



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**UNIVERZÁLNÍ CLOUDOVÝ NÁSTROJ PRO TVORBU
3D TISKOVÝCH ŘEZŮ**

UNIVERSAL CLOUD-BASED 3D PRINT SLICER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB VEJČÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADEK KOČÍ, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce



18470

Student: **Vejščík Jakub**
Program: Informační technologie
Název: **Univerzální cloudový nástroj pro tvorbu 3D tiskových řezů**
Universal Cloud-Based 3D Print Slicer
Kategorie: Softwarové inženýrství

Zadání:

1. Analyzujte možnosti tvorby řezů pro 3D tisk (slicování) a dostupné nástroje pro tvorbu řezů (slicery).
2. Analyzujte dostupné nástroje pro přípravu 3D modelů pro účely 3D tisku.
3. Navrhněte prototyp cloudového nástroje pro přípravu 3D modelů pro tisk.
4. Navržený prototyp implementujte a integrujte jej s existujícím slicerem.
5. Vyhodnoťte kvalitu základních charakteristik výsledného produktu, zejména rychlost tvorby řezů (slicování) a přesnost vytvořených řezů.

Literatura:

- Best 3D Slicer Software for 3D Printers of 2018, <https://all3dp.com/1/best-3d-slicer-software-3d-printer>
- Ultimaker Cura software, <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software>

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- První tři body zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Vedoucí práce: **Kočí Radek, Ing., Ph.D.**
Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.
Datum zadání: 1. listopadu 2018
Datum odevzdání: 15. května 2019
Datum schválení: 1. listopadu 2018

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom a implementáciou cloudového nástroja pre prípravu 3D modelov pre 3D tlač. 3D tlač sa stáva súčasťou našich životov a dostáva sa napríklad do škôl, kde spája digitálny svet s fyzickým svetom. V dnešnej dobe školy nedisponujú dostatočným výpočtovým výkonom k spracovaniu náročnejších 3D modelov pre 3D tlač. Toto zistenie ma viedlo k vytvoreniu cloudového nástroja, keďže cloud poskytuje dostatočný výpočtový výkon a je ho možné rozdeliť medzi viacero užívateľov zároveň. Cloudový nástroj rieši problém nedostačujúceho výkonu k prekladu 3D modelu do jazyka G-kód, ktorému rozumie 3D tlačiareň. Riešenie prebieha pomocou prenechania náročnej výpočtovej logiky na strane cloudu a užívateľ len upravuje model podľa svojich predstáv vo webovom rozhraní cloudového nástroja.

Abstract

This bachelor thesis deals with the proposal and implementation of a cloud tool for preparation 3D models for 3D printing. 3D printing become a part of our lives and it is getting into schools, where it combines the digital world with the physical world. Nowadays schools have not sufficient computational power to handle demanding 3D models for 3D printing. This ascertainment has led me to create a cloud tool, because cloud provides sufficient computational power and it can be shared between multiple users at the same time. The cloud tool solves the problem of insufficient power to translate 3D models to G-code, which understands 3D printer. Solution is done by letting the demanding computing logic on the cloud and user just edit model according to his ideas in the web interface of cloud tool.

Klíčové slová

3D tlač, 3D tlačiareň, cloud, G-kód, 3D model, FDM, FFF

Keywords

3D printing, 3D printer, cloud, G-code, 3D model, FDM, FFF

Citácia

VEJČÍK, Jakub. *Univerzální cloudový nástroj pro tvorbu 3D tiskových řezů*. Brno, 2019. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Radek Kočí, Ph.D.

Univerzální cloudový nástroj pro tvorbu 3D tiskových řezů

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Radka Kočího, Ph.D. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

.....
Jakub Vejčík
14. mája 2019

Podakovanie

Rád by som sa podakoval vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Radkovi Kočímu, Ph.D, za jeho pomoc, ochotu a svoj čas, ktorý mi venoval. Taktiež chcem touto formou poďakovať firme Y-soft, ktorá mi poskytla nástroje na spracovanie danej problematiky.

Obsah

1	Úvod	3
2	3D Tlač	4
2.1	3D tlačiareň	4
2.2	História	4
2.3	Technológie 3D tlače	5
2.4	Rozdelenie 3D tlačiarňí	6
2.4.1	SLA	7
2.4.2	FFF/FDM	8
2.4.3	SLS	9
2.4.4	Porovnanie	10
3	Nástroje na prípravu 3D modelov pre 3D tlač	11
3.1	Príprava digitálneho modelu pre 3D tlač	11
3.1.1	Cura	11
3.1.2	Slic3r	12
3.1.3	Simplify3D	12
3.1.4	Repetier Host	12
3.1.5	CraftWare	12
3.1.6	IdeaMaker	12
3.1.7	MatterControl	12
3.1.8	Netfabb Standard	13
3.1.9	Z-Suite	13
3.1.10	AstroPrint	13
3.1.11	3DPrinterOS	13
3.1.12	SelfCAD	13
3.2	Tvorba 3D tlačového rezu pre 3D tlač	13
3.2.1	G-kód	14
3.2.2	CuraEngine	15
3.2.3	Slic3r	15
3.2.4	KISSlicer	15
3.2.5	Skeinforge	15
3.2.6	MatterSlice	16
3.2.7	MakerBot Slicer	16
3.2.8	Porovnanie	16
4	Návrh aplikácie	19
4.1	Požiadavky na aplikáciu	19

4.1.1	Podobné aplikácie	19
4.1.2	Návrh komunikácie	19
4.1.3	Grafické užívateľské rozhranie	20
4.1.4	Práca s 3D modelmi	20
4.1.5	Prototyp webového rozhrania	21
5	Implementácia	24
5.1	Použité technológie	24
5.1.1	HTML a Bootstrap	24
5.1.2	JavaScript	24
5.1.3	Java	25
5.1.4	Cloud Computing	25
5.1.5	Cloudová aplikácia	26
5.2	Spracovanie 3D modelov	26
5.3	Pripojenie a prenos	27
5.4	Tvorba 3D tlačového rezu	28
5.5	Rozloženie záťaže a škálovateľnosť	29
5.5.1	Load balancer	29
5.5.2	Škálovateľnosť	29
6	Testovanie	30
6.1	Konfigurácia testov	30
6.2	Stabilita	31
6.3	Rýchlosť	32
6.4	Kvalita	33
6.5	Možné rozšírenie	34
6.5.1	Výber nástroja na tvorbu 3D tlačových rezov	34
6.5.2	Definícia 3D tlačiarne	35
6.5.3	Technológie 3D tlače	35
7	Záver	36
	Literatúra	37
A	Obsah priloženého CD	40
B	Štruktúra zložky	41
C	Konfiguračný súbor	42
D	Konfigurácia Haproxy	44
E	Porovnanie CuraEngine a Slic3r	46

Kapitola 1

Úvod

3D tlač je v dnešnej dobe veľmi populárna a môžeme ju nájsť v širokom spektre oborov. Zavádza sa do mnohých odvetví od automobilového priemyslu po zdravotníctvo. Taktiež prudko vstupuje do školského prostredia, kde vznikajú 3D tlačiarne určené priamo pre školy ako napríklad Be3D Edee, ktorá dokáže účtovať 3D tlač pre jednotlivých žiakov po priložení školského preukazu. Napriek tomuto v školách vo veľkom množstve prípadov nedisponujeme s dostatočným výpočtovým výkonom na prípravu zložitejších digitálnych 3D modelov pre 3D tlač. Problém s malým výpočtovým výkonom sa prejavuje zamrznutím, až dokonca vypnutím nástroja na prípravu digitálnych 3D modelov pre 3D tlač. Toto zistenie ma viedlo k vytvoreniu nástroja, ktorý by nepotreboval veľký výpočtový výkon. To by znamenalo, že proces tvorby 3D tlačového rezu by sa odohrával mimo osobného počítača užívateľa. Tento problém vyrieši univerzálny cloudový nástroj na tvorbu 3D tlačových rezov, kde sa tvorba 3D tlačového rezu vykonáva výhradne na cloude, čo by malo mať za následok zníženie náročnosti na výpočtový výkon u užívateľa.

Túto tému som si vybral z dôvodu, že sa 3D tlači venujem viac ako 5 rokov a veľmi ma zaujala jej každodenným pokrokom a neobmedzenými možnosťami. Hlavný potenciál 3D tlače vidím v prototypovaní, kde nie je potrebné vytvárať drahú formu napríklad na odlievanie ale jednoducho si prototyp, ktorý si navrhne v 3D grafickej aplikácii vytlačiť na 3D tlačiarne.

Cielom mojej bakalárskej práce je možnosť pripravovať zložité 3D modely aj na menej výkonných kancelárskych a školských počítačoch pomocou cloudových riešení.

V prvej kapitole môžeme nájsť stručný náhľad do fungovania 3D tlače a 3D tlačiarní, histórie 3D tlače, stručný prehľad rozdelenia technológií 3D tlače a bližšiu špecifikáciu troch najpoužívanejších technológií 3D tlače .

V druhej kapitole môžeme nájsť popis nástrojov na prípravu 3D modelov pre 3D tlač. Prvá podkapitola tejto kapitoly sa zameriava na nástroje k príprave 3D modelov pre 3D tlač a druhá podkapitola sa venuje tvorbe 3D tlačových rezov, ktoré sú nevyhnutné pri 3D tlači.

Tretia kapitola sa venuje návrhu aplikácie, kde sú zhrnuté požiadavky na aplikáciu, návrh komunikácie a návrh prototypu grafického užívateľského rozhrania.

Štvrtá kapitola obsahuje popis implementácie cloudovej aplikácie a popis jednotlivých technológií, ktoré boli použité pri implementácii.

Piata kapitola zhrňuje dosiahnuté výsledky pomocou testovania cloudovej aplikácie a prípadné možné rozšírenia.

Kapitola 2

3D Tlač

Táto kapitola popisuje princíp 3D tlače od digitálneho 3D modelu po trojrozmerný objekt. Prvá časť sa venuje popisu 3D tlači a 3D tlačiarne, o čo sa jedná a ako funguje. V nasledujúcej časti sa zaoberá históriou 3D tlače a 3D tlačiarňami. Tretia časť sa zaoberá bližším zoznámením s technológiami 3D tlače. Posledná časť sa zaoberá rozdelením 3D tlačiarňami na základné normy a porovnaním technológií 3D tlače FDM, SLA a SLS, ktoré patria medzi najdostupnejšie a najpoužívanejšie technológie.

2.1 3D tlačiareň

3D tlačiareň je nástroj na tvorbu trojrozmerného objektu na základe digitálneho 3D modelu. Jedná sa o aditívni proces výroby. Tento proces sa nazýva 3D tlač. 3D tlač je aditívni proces, pri ktorom z digitálneho 3D modelu vytvárame trojrozmerný objekt. Aditívni proces je proces, pri ktorom pridávame materiál, ktorý kladieme vrstvu po vrstve dokým nemáme požadovaný tvar. 3D tlač patrí medzi technológie Rapid prototyping¹ [21]. 3D tlačiarne sa rozdeľujú na základe použitej technológie k tvorbe trojrozmerného objektu. Najväčšie využitie 3D tlačiarňami je pri vytváraní prototypov, kde nemusí byť vytváraná drahá forma napríklad na odlievanie, ale postačuje si produkt vytlačiť pomocou jednej z technológií 3D tlače.

2.2 História

Začiatky 3D tlače sa datujú do roku 1981, keď si Dr. Hideo Kodama zažiadala o patentovanie technológie na rýchle prototypovanie, jednalo sa o technológiu stereolitografia (SLA). Japonský právnik Dr. Hideo Kodama bohužiaľ nedodal potrebnú dokumentáciu vo vymedzenom termíne a patent mu nebol uznaný. Za otca 3D tlače a spoločnosti 3D systems sa považuje Charles Hull, ktorý v roku 1984 vynášiel stereolitografiu pri skúmaní atramentových tlačiarňami. V roku 1986 Charles Hull úspešne zaregistroval patent na stereolitografiu. Stereolitografia je metóda vytvárania objektov pomocou postupného vytvrdzovania polymérov na základe pôsobenia určitých vlnových dĺžok [19].

V roku 1988 spoločnosť 3D Systems predstavila prvú 3D tlačiareň SLA-1 a taktiež sú predstavené nové technológie FDM (Fused deposition modeling) a SLS (Selective laser sintering) [19].

¹Rapid prototyping - všetky technológie, ktoré používajú aditívny proces výroby pri čom kladú vrstvy na seba na základe prierezu 3D modelu.

Začiatok tzv. revolúcie 3D tlačiarňí sa datuje na rok 2005, keď Dr. Adrian Bowyer zakladá RepRap. RepRap je iniciatíva vytvorenia open-source tlačiarne, ktorá by dokázala reprodukovat svoje súčiastky a tým znížiť cenu 3D tlačiarňí [16].

V roku 2008 vychádza prvá FDM samoreplikačná tlačiareň Darwin. Táto tlačiareň predstavovala významný posun vo vývoji, keďže vlastníci 3D tlačiarňí mohli tlačiť diely na ďalšie 3D tlačiarne svojim priateľom, aby si mohli postaviť svoju vlastnú 3D tlačiareň [16].

2.3 Technológie 3D tlače

Technológie 3D tlače sú založené na tom istom princípe rozloženia digitálneho 3D modelu po jednotlivých vrstvách tzv. rezoch, ktoré sú následne pomocou 3D tlače podľa typu technológie zostavené do trojrozmerného objektu.

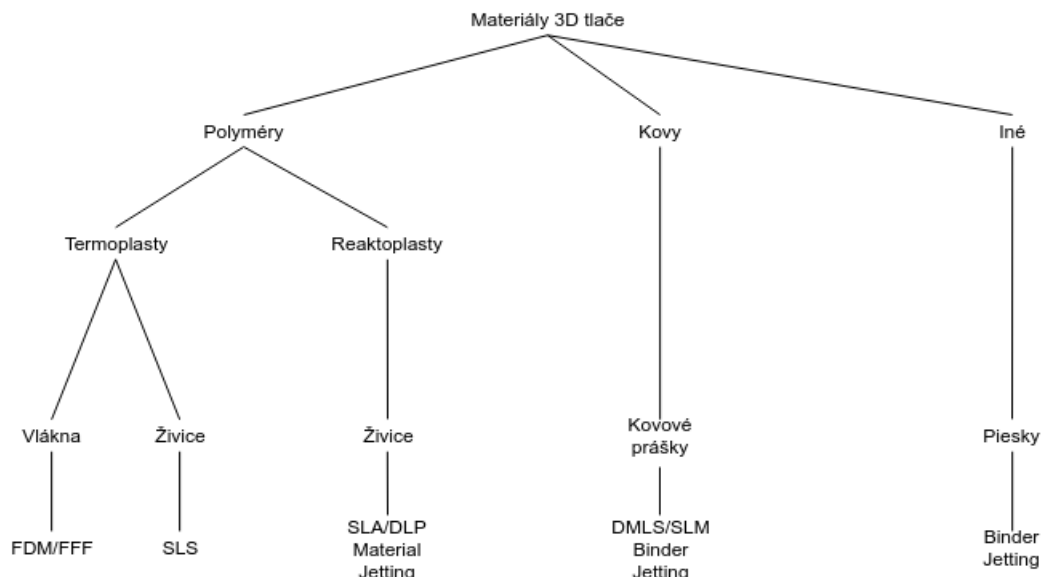
Rozdelenie technológií 3D tlače [6] [23] :

- **Stereolitografia (SLA)** - technológia fungujúca na princípe postupného vytvrdzovania polymérov najčastejšie pomocou UV lasera. Najstaršia technológia vyvinutá v roku 1986.
- **Direct Light Processing (DLP)** - podobný princíp fungovania ako v prípade technológie SLA, ale namiesto UV lasera k vytvrdeniu fotopolyméru využíva projekciu rezu 3D modelu pomocou svetelného zdroja zvyčajne sa jedná o digitálnu obrazovku. Vrstva modelu je vytvorená naraz.
- **Selective laser sintering (SLS)** - technológia založená na princípe zapekania prášku pomocou vysokovýkonného lasera.
- **Selective Laser Melting (SLM) a Direct Metal Laser Sintering (DMLS)** - technológia podobná ako SLS. Hlavný rozdiel je v tom, že technológie SLM a DMLS sa používajú výhradne pri výrobe kovových trojrozmerných objektov. Technológia SLM funguje na princípe plného roztavenia kovového prášku s následným spojením oproti tomu DMLS nahrieva prášok na teplotu topenia až dokým sa chemicky nespoja. DMLS pracuje len so zliatinami a SLM s jednozložkovými kovmi napríklad hliníkom.
- **Electron Beam Melting (EBM)** - veľmi drahá technológia, ktorá dokáže vytvárať trojrozmerné objekty s veľmi vysokou presnosťou. Proces výroby trojrozmerného objektu sa odohráva vo vákuu, kde používa usmernený tok elektrónov na roztavenie materiálu v potrebnom mieste. Zvyčajne sa využíva titánový prášok.
- **Fused Deposition Modeling (FDM)** - technológia taktiež známa ako **Fused filament fabrication (FFF)** je najrozšírenejšia technológia vďaka svojej cene a dostupnosti. Technológia je založená na princípe nanášania tenkých vrstiev roztaveného termoplastu. Termoplast je dodávaný vo forme struny do tlačiarenskej hlavy, kde je vytláčaný cez vyhrievanú trysku. V prípade výklenkov sú potrebné podporné štruktúry. Umožňuje použitie jedného až viacerých materiálov.
- **Drop-On-Demand (DOD)** - 3D tlačiarne tohto typu obsahujú dve tlačiarenské hlavy, kde jedna hlava obsahuje stavebný materiál a druhá hlava rozpustný materiál, ktorý je používaný na previsy. Materiál je nanášaný bodovo s cieľom vytvoriť prierez objektu vo forme vrstvy, ktorá je následne pomocou frézy zrovnaná do dokonalej roviny.

- **Material Jetting** - podobný princíp ako FDM, tlačovou hlavou je vytlačovaný materiál.
- **Binder Jetting** - materiál vo forme prášku je nanášaný v tenkých vrstvách a spájaný pomocou pojiva.
- **Laser Engineered Net Shape (LENS)** - tlačová hlava sa skladá z lasera a dýz na vypúšťanie prášku a inertného plynu. Laser je mierený do malého bodu, kde dosahuje vysokú teplotu a na tento bod je nanášaný prášok, kde dochádza k jeho spojeniu s predchádzajúcou vrstvou. Inertný plyn je využitý na lepšiu kontrolu vlastností pri spájaní vrstiev materiálu.
- **Electron Beam Additive Manufacture (EBAM)** - podobná technológia ako LENS, k zvareniu kovového prášku alebo drôtu sa používa elektrónový lúč, ako zdroj tepla. EBAM pracuje vo vákuu.
- **Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)** - technológia využíva ultrazvukové vlny na zváranie pásov kovu popri tlačovej podložke za pôsobenia veľkého tlaku na fóliu oproti tlačovej podložke.
- **Laminated Object Manufacturing (LOM)** - trojrozmerný objekt je skladaný z vrstiev fólie, ktorá je vystrihnutá do požadovaného tvaru. Vzniká veľké množstvo odpadu

2.4 Rozdelenie 3D tlačiarňí

3D tlačiarne môžeme rozdeliť na základe použitej technológie k vytvoreniu trojrozmerného objektu z digitálneho 3D modelu alebo na základe materiálu s ktorým pracuje. Norma ISO / ASTM 52900 bola vytvorená v roku 2015 s cieľom štandardizovať všetky terminológie, ako aj klasifikovať každú z rôznych metód 3D tlače. Bolo vytvorených celkom 7 kategórií procesov [28]. Na obrázku môžeme vidieť radenie na základe použitého materiálu vid Obrázok 2.1.



Obr. 2.1: Rozdelenie techník 3D tlače na základe použitého materiálu

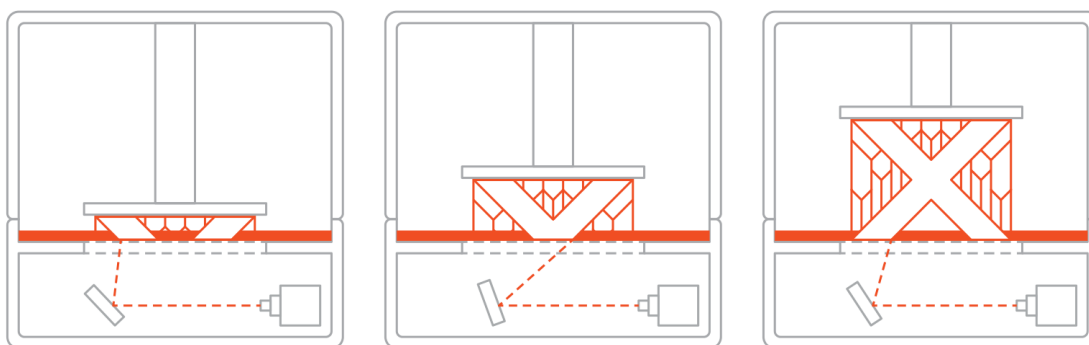
Rozdelenie na základne normy ISO / ASTM 52900 do 7 kategórií procesov[28] [6] [31]:

- **Material Extrusion (Tavenie plastovej struny/vlákná)** - materiál je nanášaný formou roztaveného vlákna cez trysku. Technológie: FFF/FDM.
- **Vat Polymerization (Polymerizácia)** - vytvrdzovanie tekutého polyméru pomocou výkonného laseru. Technológie: SLA, DLP.
- **Powder Bed Fusion (Spekanie polymérových/kovových práškov)** - spekanie práškoveho materiálu pomocou laserového lúča. V prípade technológie SLS sa používa plastový prášok a v prípade DMLS, SLM a EBM sa používa kovový alebo keramický prášok. Technológie: SLS, DMLS, SLM, EBM.
- **Material Jetting (Vstrekovanie a vytvrdzovanie materiálu)** - podobne ako u Material Extrusion. Vosk alebo termoplast je vytláčaný tlačiarenskou hlavou. Pre previsy sú vytvárané nosné konštrukcie, ktoré sú z iného materiálu. Tento materiál má nižšiu teplotu tavenia ako materiál z ktorého je vytvorený nami požadovaný trojrozmerný objekt a je odstraňovaný nahrievaním. Technológie: MJ, DOD.
- **Binder Jetting (Vstrekovanie a vytvrdzovanie pojiva)** - pojivo je nanášané z tlačiarenskej hlavy, ktorým sa spája práškový materiál nanášaný po tenkých vrstvách. Technológie: BJ.
- **Direct Energy Deposition (Tavenie kovovej elektródy)** - používa sa vysoko výkonný laser, ktorý slúži na spájanie kovového prášku do trojrozmerných štruktúr. Technológie: LENS, EBAM.
- **Sheet Lamination (Laminovanie pásov materiálu)** - vrstvy materiálu vo forme fólie sú postupne nanášané a vyrezávané do požadovaného tvaru. Technológie: UAM, LOM.

2.4.1 SLA

Fungovanie tlačiarne je na princípe stereolitografie. Jedná sa o jednu z najpresnejších metód 3D tlače, keďže teoretická presnosť odpovedá veľkosti jednej molekuly polyméru. Stereolitografia využíva na vytvrdzovanie materiálu UV žiarenie. Toto žiarenie je zamerané do jedného bodu a vytvrdzuje polymér do pevného plastu.

Proces sa zaháji pohybom platformy, ktorá je umiestnená nad zásobníkom polymérneho plastu. Platforma sa ponorí do zásobníka tak, aby sa vytvorila tenká vrstva kvapaliny. Ultrafialový laser prechádza tam a späť cez kvapalinu, čím vytvorí prvú vrstvu objektu. Následne sa zdvihne platforma o veľkosť vrstvy aby mohla byť vytvorená ďalšia vrstva, ktorá musí byť pripojená k objektu alebo k podpore viď Obrázok 2.2. Tento proces sa opakuje dokým nemáme vytvorený celý objekt. Polymér, ktorý je náplňou tlačiarne je fotosenzitívna živica [34].



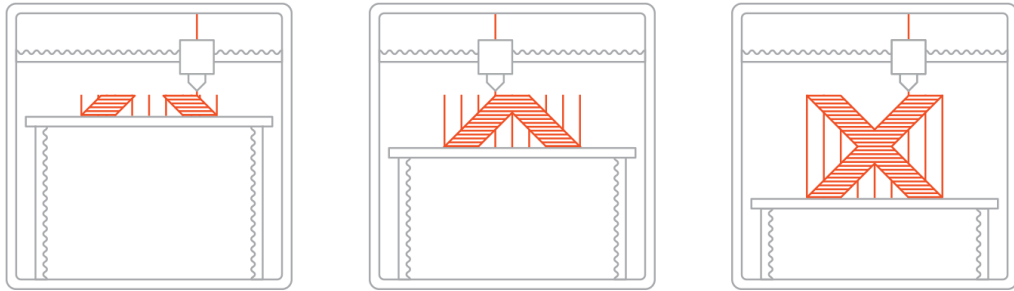
Obr. 2.2: Fungovanie SLA 3D tlačiarne²

2.4.2 FFF/FDM

Fungovanie tlačiarne je na princípe modelovania depozíciami taveniny. Roztavením materiálu v tlačovej hlave je materiál nanášaný vrstva po vrstve [28]. Najčastejšie sa používa termoplast a vosková hmota. Tieto plasty sú extrudované ako polo roztavené vlákno. Metóda FFF/FDM je jednou z najpopulárnejších techník v oblasti aditívnej výroby. Používa sa k výrobe prototypov a modelovaniu. Jedná sa o najviac rozšírený druh 3D tlačiarne vďaka jednoduchosti a cenovej dostupnosti. Táto technika je čistá, efektívna a užívateľsky prívetivá to jest nenáročná na užívateľa [23].

Tlačiareň sa pohybuje vo všetkých troch osách to znamená, že využíva pre svoj pohyb osi X, Y, Z a taktiež tzv. osu E čo je osa pre extrúder. Extrúder je časť tlačiarne, ktorá zabezpečuje prísun materiálu do tlačovej hlavy. Materiál je v tvare struny a býva zvyčajne namotán na tzv. špulkách. Poznáme 2 rozmeru strún a to 1.75 a 3.00 mm. Proces tlače sa zaháji zohrievaním tlačovej hlavy na potrebnú teplotu v prípade niektorých plastov potrebujeme vyhrievanú platformu. Roztavený materiál sa nanáša vrstva po vrstve na vopred určených miestach, kde sa ochladzuje a tuhne. Niekedy sa chladenie materiálu urýchluje použitím ventilátorov pripravených k tlačovej hlave. Po dokončení vrstvy sa platforma posunie nižšie a naniesie sa nová vrstva. Tento proces sa opakuje dokým nieje dokončená tlač [33].

²Zdroj: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing>



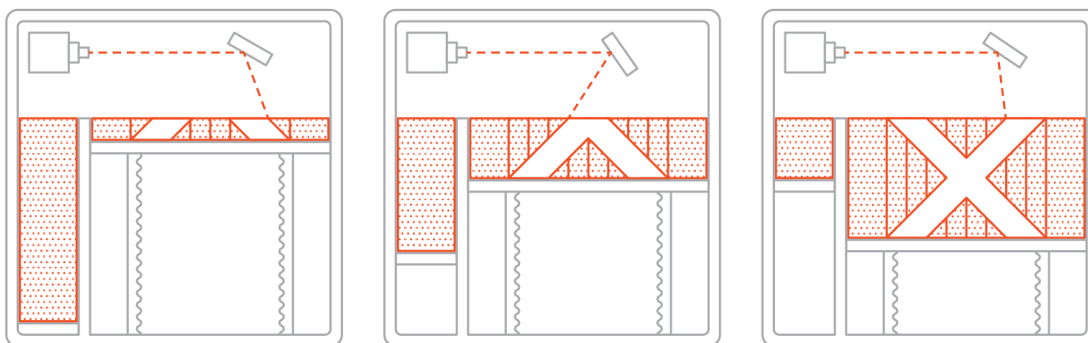
Obr. 2.3: Fungovanie FDM 3D tlačiarne³

2.4.3 SLS

Táto metóda bola predstavená **Dr. Carl Deckard** a **Dr. Joe Beaman** v roku 1988. Metóda bola prispôbena na prácu s veľkým množstvom materiálov vrátane plastov, kovov, skla, keramiky a rôznych kompozitných práškov [10].

Fungovanie tlačiarne je na podobnom princípe ako SLA ale miesto spevňovania tekutiny dochádza k spevňovaniu prášku. Tento prášok je spevňovaný pomocou vysokovýkonného laseru. Proces tlače začína nanosením tenkej vrstvy prášku na platformu. Táto platforma je zohrievaná na teplotu tesne pod bod teploty topenia prášku/materiálu. Tento proces uľahčuje laseru zvýšenie teploty na potrebnom mieste a dochádza k taveniu materiálu. Z dôvodu použitia prášku nie je potrebné vytvárať podporné body pri tlači. Výška vrstvy sa pohybuje v rozmedzí 50 až 200 mikrónov. Následne ako je vytvorená prvá vrstva sa platforma posunie nižšie o výšku vrstvy a je nanosený prášok, ktorý je pomocou lasera spevňovaný v požadovaných miestach. Tento proces sa opakuje pre každú vrstvu, kým nie je vytvorený požadovaný objekt. Následne sa nechá objekt vychladnúť vo vnútri tlačiarne. Po ochladnutí sa vysaje prebytočný prach, ktorý sa použije znova a objekt sa preniesie do čistiacej komory, kde je pomocou vysokého tlaku vzduchu zbavený prebytočného prášku [6].

³Zdroj: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>



Obr. 2.4: Fungovanie SLS 3D tlačiarne⁴

2.4.4 Porovnanie

Najväčší rozdiel 3D tlačiarňí je v použitej technológii a cene čo, je späté s výslednou kvalitou 3D tlačie vid Tabuľka 2.1. Medzi najviac používané 3D tlačiarne patria tlačiarne typu FDM, ktoré vďaka svojej cene a prevádzkovým nákladom sú najpredávanejšie vo svete [15]. Toto zistenie ma viedlo k vytvoreniu cloudového nástroja na tvorbu 3D tlačových rezov výhradne pre 3D tlačiarne typu FDM.

Kritérium	FDM	SLA	SLS
Materiál	ABS, PLA, PVA, Nylon, Hips...	Fotosenzitívna živica	Kov, Keramika, Sklo
Hrúbka vrstvy	0.8 - 0.127 mm	0.05 - 0.015 mm	0.05 - 0.01 mm
Tvar povrchu	Drsný	Hladký	Mierne drsný
Podporné štruktúry	Potrebné	Potrebné	Nepotrebné
Následné spracovanie	Brúsenie, Farbenie, Zahľadzovanie (pomocou acetónových kúpeľí)	Farbenie	Zahľadzovanie, Farbenie, Lakovanie
Cena	Najlacnejšia	Stredne drahá	Najdrahšia

Tabuľka 2.1: Rozdiely medzi technológiami FDM, SLA a SLS [25]

⁴ Zdroj: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing>

Kapitola 3

Nástroje na prípravu 3D modelov pre 3D tlač

Táto kapitola sa zameriava na porovnanie existujúcich nástrojov na prípravu digitálnych 3D modelov pre 3D tlač a nástrojov k tvorbe 3D tlačových rezov. Prieskum sa zameriava na najpoužívanejšie nástroje implementované formou desktopovej¹ a cloudovej² aplikácie pre 3D tlačiarne typu FDM, pre ktoré je vytváraná cloudová aplikácia na základe porovnania troch najpoužívanejších technológií 3D tlače, ktorými sú technológie FDM, SLA a SLS vid' Podkapitola 2.4.4. Každý nástroj na prípravu digitálnych 3D modelov pre 3D tlač obsahuje jeden alebo viacero nástrojov na tvorbu 3D tlačových rezov. Tieto nástroje sa nazývajú slicery. Slicer je aplikácia, ktorá transformuje digitálny 3D model do jednotlivých vrstiev s následným prekladom do strojového kódu nazývaného G-kód.

3.1 Príprava digitálneho modelu pre 3D tlač

K príprave digitálneho modelu pre 3D tlač existuje množstvo nástrojov. K analýze boli vybraté tie najpoužívanejšie nástroje s najpopulárnejšími slicermy. Nástroje nám umožňujú jednoducho upravovať umiestnenie 3D modelu na tlačovej podložke 3D tlačiarne, veľkosti modelu a pod. Taktiež nám umožňujú nastavovať bližšie špecifikácie vygenerovaných numerických blokov. Napríklad výšku vrstvy, čo nám ovplyvňuje množstvo vygenerovaných blokov v jazyku G-kód.

3.1.1 Cura

Prostredie na prípravu digitálnych modelov pre 3D tlač, ktoré využíva jeden z najpoužívanejších slicerov CuraEngine. Software bol vyvinutý Davidom Brammom, ktorý bol následne zamestnaný spoločnosťou Ultimaker na pozíciu vývojára aplikácie Cura. Na vývoji sa podieľa z veľkej časti komunita a spoločnosť Ultimaker. Jedná sa o voľne dostupný software formou open-source³ aplikácie [21]. Cura je primárne podporovaná spoločnosťou Ultimaker,

¹Desktopová aplikácia - aplikačný software s grafickým užívateľským rozhraním, ktorý je lokálne inštalovaný na osobnom počítači.

²Cloudová aplikácia - je softvérový program, na ktorom spolupracujú cloudové a lokálne komponenty. Tento model sa spolieha na vzdialené servery na spracovanie logiky, ku ktorej sa pristupuje cez webový prehliadač s nepretržitým pripojením na internet.

³Open Source - označenie programov, ktorých zdrojový kód je voľne dostupný.

ktorá zabezpečuje pokračovanie vo vývoji aplikácie, z čoho môžeme usudzovať zameranie aplikácie primárne na 3D tlačiarne od spoločnosti Ultimaker. Licencia: Zdarma [24].

3.1.2 Slic3r

Nástroj bol vytvorený Alessandrom Ranellucci a následne rozvíjaný komunitou RepRap. Vývoj aplikácie sa započal v roku 2011. Tento projekt sa radí medzi neziskové projekty. Software je dostupný formou open-source aplikácie [21]. Z tohto dôvodu tu vzniklo veľké množstvo originálnych vecí. V tomto nástroji vznikli v dnešnej dobe veci považované v 3D tlači za samozrejmosť. Napríklad podpora viacerých extrúderov⁴, taktiež ako prvý zaviedli vzor výplne modelu, ktorý sa môže podľa vrstvy meniť a pod. Licencia: Zdarma [24].

3.1.3 Simplify3D

Simplify3D je vyvíjaný spoločnosťou Simplify3D. Nejedná sa o open-source aplikáciu, ale je z veľkej časti podporovaná komunitou. Nástroj nieje voľne dostupný, je potrebné si zakúpiť licenciu [21]. Aplikácia môže byť využitá pri tlači s mnohými výrobcami 3D tlačiarne Ultimaker, Prusa a pod. vďaka podpore mnohých výrobcov tlačiarne. Licencia : Viazaná na počítač 150\$/ 2 počítače [24].

3.1.4 Repetier Host

Multiplatformový nástroj pre prípravu 3D digitálnych modelov pre 3D tlač. Obsahuje v základe 4 slicery : CuraEngine, Slic3r, Slic3r prusa edition a Skeinforge. Na rozdiel od iných nástrojov podporuje možnosť vloženia vlastného slicera, ak nám nevyhovuje ani jeden z integrovaných slicerov. Aplikácia je vyvíjaná spoločnosťou Hot-World GmbH & Co. KG. Licencia : Zdarma [1].

3.1.5 CraftWare

Multiplatformový nástroj vyvíjaný spoločnosťou CraftUnique. Nástroj je určený pre tlačiarne od spoločnosti CraftUnique tzv. Craftbot. Licencia: Zdarma [24].

3.1.6 IdeaMaker

Multiplatformový nástroj vyvíjaný spoločnosťou Raise3D. Nástroj sa zameriava predovšetkým na tlačiarne od spoločnosti Raise3D, ale napriek tomu je možné definovať vlastnú 3D tlačiareň. Ako jeden z mála nástrojov umožňuje automaticky opravovať model v prípade chýb. Licencia: Zdarma [24].

3.1.7 MatterControl

Multiplatformový open-source nástroj vyvíjaný spoločnosťou MatterHackers a komunitou. Nástroj je výnimočný možnosťou návrhu 3D modelov a následným slicovaním pre 3D tlačiareň. Licencia: Zdarma [7].

⁴Extrúder - zariadenie, ktoré cez určený priemer vytlačí určité množstvo materiálu

3.1.8 Netfabb Standard

Nástroj zameraný len na platformu Windows vyvíjaný spoločnosťou Autodesk, ktorý umožňuje analyzovať 3D modely vo formáte .stl pred 3D tlačou a opravovať ich. Umožňuje taktiež overiť pružnosť a pevnosť modelu pred tlačou a mnoho ďalších funkcií, ktoré neobsahujú voľne dostupné nástroje. Licencia: 1000\$ až 4000\$ cena závisí na požadovanom množstve sprístupnených funkcií [24].

3.1.9 Z-Suite

Multiplatformový nástroj je určený len 3D tlačiarňam od spoločnosti Zortrax, keďže táto spoločnosť vyvíja softvér Z-Suite. Nástroj neobsahuje veľké množstvo nastavení, a preto je vhodný pre začiatočníkov, keďže bez väčšej znalosti dostanú veľmi kvalitné výťažky. Licencia: Zdarma [24].

3.1.10 AstroPrint

Cloudová aplikácia na spravovanie 3D tlačiarní. K správe tlačiarní využíva tzv. AstroBox, jedná sa o zariadenie, ktoré sa pripojí k tlačiarňam a pomocou neho môžeme tlačiareň ovládať, čo nám rozširuje možnosti cloudového nástroja [24]. Licencia zdarma nám umožňuje neobmedzené slicovanie, spravovať dve tlačiarne, 2 GB miesta na cloude pre uložené 3D modely a množstvo ďalších služieb v s obmedzením využitím. Platená verzia ponúka spravovanie neobmedzeného množstva tlačiarní, 50 GB miesta na cloude pre 3D modely a množstvo ďalších služieb, ktoré sú taktiež vo verzií zdarma, ale môžeme ich využívať neobmedzene. Licencia: 10\$ / mesačne alebo zdarma, ale obmedzená funkcionálnosť [9].

3.1.11 3DPrinterOS

Cloudová aplikácia určená na spravovanie 3D tlačiarní. Aplikácia je postavená na AstroPrint API. Obsahuje 3 slicery a to Cloud Slicer, Slicer 2 a MakerBot Slicer. Podporuje široké spektrum 3D tlačiarní. Ponúka verziu zdarma a aj platenú verziu. Verzia zdarma obsahuje menej nástrojov, ale ako prisľúbili vývojári slicovanie bude vždy zdarma. Taktiež je možné stiahnuť si multiplatformovú desktopovú aplikáciu, ktorá nám zabezpečuje ovládanie 3D tlačiarne a takto rozvíja funkčnosť cloudovej aplikácie. Licencia: 200\$ / užívateľ alebo zdarma, ale obmedzená funkcionálnosť [26].

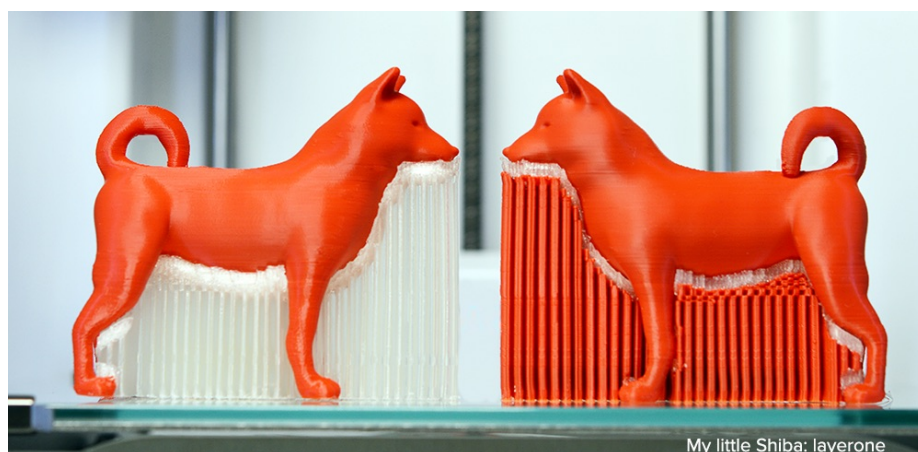
3.1.12 SelfCAD

Cloudová aplikácia na návrh a prípravu 3D modelov pred 3D tlačou. Umožňuje tvorbu 3D tlačového rezu z navrhnutého alebo vloženého 3D modelu do webového rozhrania. Nástroj obsahuje slicer vytvorený vývojármi SelfCAD. Jednoduché rozhranie vhodné pre začiatočníkov, ktoré obsahuje všetky potrebné funkcie k vytvoreniu kvalitného tlačového rezu. Licencia: 9.99\$/ mesiac [24].

3.2 Tvorba 3D tlačového rezu pre 3D tlač

Na tvorbu 3D tlačových rezov sa využívajú tzv. slicery. Proces tvorby 3D tlačového rezu z 3D modelov sa nazýva slicovanie. Slicer je nástroj, ktorý transformuje digitálny 3D model zvyčajne vo formáte .stl alebo .obj do formátu .gcode. Úlohou sliceru je rozrezať 3D model

po vrstvách podľa výšky vrstvy, pričom musí byť model rozmerovo a geometricky správne rozrezaný. V prípade, že slicer splní túto úlohu korektne vygeneruje .gcode pomocou, ktorého firmware tlačiarne spracúva údaje a ovláda všetky súčasti 3D tlačiarne podľa potreby. Výsledkom je výtlačok nášho 3D modelu. Slicer taktiež analyzuje model a podľa potreby napríklad pridáva tzv. podporné vrstvy viď Obrázok 3.1, ktoré môžu vyžadovať zmenu vonkajšieho obvodu 3D modelu. Slicer sa musí rozhodovať, kde zmeniť hrúbku steny, aby sme dospeli k najlepšiemu výsledku. Záver analýzy dostupných slicerov je na základe porovnania výsledkov získaných z jednotlivých testov slicerov. Základnými kritériami sú jednoduchosť ovládania, rýchlosť prevodu 3D digitálneho modelu do jazyku G-kód a výsledná kvalita vytlačeného 3D digitálneho modelu.



Obr. 3.1: 3D výtlačok s podporami⁵

3.2.1 G-kód

G-kód je programovací jazyk, ktorý sa radí medzi numerické programovacie jazyky. Jazyk bol vyvinutý spoločnosťou Electronic Industries Alliance v 60. rokoch. Používa jednoduché príkazy viď Obrázok 3.2, ktorými ovláda správanie 3D tlačiarne. Na dosiahnutie týchto konkrétnych druhov pohybov sa používajú numericky riadené bloky. Numericky riadený blok je základnou jednotkou, ktorý predstavuje jeden riadok textu. Každý blok sa skladá z jedného alebo viacerých slov, z ktorých každé slovo sa skladá z písmena a čísla. Písmeno popisuje funkciu, ktorá sa má vykonať a číslo priraduje hodnotu tejto funkcii. V súčasnosti je blok obmedzený na maximálne 256 znakov [4]. Tento programovací jazyk využívajú CNC a NC stroje, 3D tlačiarne a mnoho ďalších automatizovaných strojov, ktoré sú ovládané počítačom. Súčasťou G-kódu je taktiež M-kód a F-kód, ktorými sa ovládajú súčasti 3D tlačiarne. V jazyku G-kód premenné X, Y a Z predstavujú umiestnenie na osi.

⁵Zdroj: <https://3dprint.com/182089/simplify-3d-version-4-0/shiba-dense-support-extruder/>

```

G92 E0
M109 S205
G0 F15000 X9 Y6 Z2
G280
G1 F1500 E-6.5
;LAYER\_COUNT:34
;LAYER:0
M107
M204 S625
M205 X6 Y6
G0 F4285.7 X92.132 Y83.27 Z0.27
M204 S500
M205 X5 Y5
;TYPE:SKIRT
G1 F1500 E0
G1 F1200 X92.672 Y82.758 E0.01323
G1 X93.357 Y82.246 E0.02843
G1 X93.927 Y81.872 E0.04055
G1 X94.571 Y81.498 E0.05379
G1 X95.25 Y81.194 E0.06701
G1 X95.959 Y80.966 E0.08025
G1 X96.396 Y80.865 E0.08822

```

Obr. 3.2: Príklad jazyku G-kód.

3.2.2 CuraEngine

Open-source slicer vyvíjaný špeciálne pre Ultimaker no napriek tomu ho môžu využívať všetky 3D tlačiarne založené na jazyku G-kód. Slicer je naprogramovaný v jazyku C++ vďaka čomu dosahuje veľkú rýchlosť. Slicer je súčasťou nástroja na prípravu 3D modelov Cura a Repetier-Host. Licencia: Zdarma [18].

3.2.3 Slic3r

Open-source multiplatformový slicer vyvíjaný komunitou RepRap. Slicer je naprogramovaný v jazyku C++. Slicer je súčasťou nástroja na prípravu 3D modelov Slic3r a Repetier-Host. Licencia: Zdarma [18].

3.2.4 KISSlicer

Multiplatformový slicer vyvíjaný spoločnosťou KISSlicer. Licencia: Zdarma - so všetkými funkciami pre jeden extrúder. V prípade viacerých extrúderov je potrebné si zakúpiť licenciu [18].

3.2.5 Skeinforge

Slicer je naprogramovaný v jazyku Python, pre jeho spustenie je potrebné nainštalovať jazyk Python 2.x. V dnešnej dobe sa slicer už nepoužíva, keďže je veľmi pomalý a užívatelia stratili o slicer záujem. Vývoj sa prerušil v roku 2016. Licencia: Zdarma [18].

3.2.6 MatterSlice

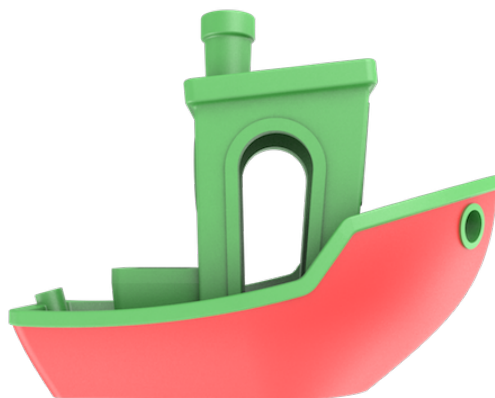
Open-source slicer, ktorý vychádza zo sliceru CuraEngine 3.2.2. Slicer je naprogramovaný v jazyku C# a je v súčasťou nástroja MatterControl. Vyvíjaný je spoločnosťou MatterHackers a komunitou. Licencia: Zdarma [8].

3.2.7 MakerBot Slicer

Slicer je súčasťou nástroja MakerBot Print pre prípravu 3D model pre 3D tlač. Vyvíjaný spoločnosťou MakerBot a určený pre tlačiarne tejto spoločnosti. Slicer nie je samostatne dostupný, ale ako súčasť nástroja na prípravu 3D modelov pred 3D tlačou MakerBot Print. Licencia: Zdarma, ale len ako súčasť MakerBot Print [18].

3.2.8 Porovnanie

Testovanie slicerov prebiehalo na najpoužívanejšom 3D modeli, k testovaniu kvality tlače 3D tlačiarne a kvality vygenerovaného G-kódu pomocou sliceru. Jedná sa o 3D model tzv. 3DBenchy. Tento 3D model je voľne dostupný na webe autorov v rôznych formátoch.



Obr. 3.3: 3DBenchy⁶

Testovanie prebiehalo na osobnom počítači, ktorého konfigurácia je dostupná v Tabuľka 3.1. Rýchlosť prekladu bola testovaná ako priemerný čas z troch pokusov. Nastavenie slicerov bolo podľa špecifikácie na webe 3DBenchy⁷ to jest výška vrstvy 0.2mm a výplň 10%. Trojrozmerný objekt bol tlačený v pomere 1:1, aby boli zachované rozmery digitálneho 3D modelu. K tlači digitálneho 3D modelu bola vybratá FDM 3D tlačiareň Edee od spoločnosti Be3D, ktorá bola poskytnutá k testovaniu jednotlivých slicerov spoločnosťou Y-soft.

⁶Zdroj: <http://www.3dbenchy.com/>

⁷Zdroj: <http://www.3dbenchy.com/3d-print/>

Operačný systém	Ubuntu 18.10 x86_64
Processor	Intel i5-3230M (4) @ 3.200GHz
Disk	SSD 256 GB
Pamäť	16GB

Tabuľka 3.1: Konfigurácia osobného počítača

Zohľadnené kritéria, pre výsledný výber sliceru boli následovné: rýchlosť prekladu, výsledná kvalita tlače, dĺžka tlače, dostupnosť podpory (komunitné fóra) a podporované formáty digitálnych 3D modelov viď Tabuľka 3.2. Poradie určuje taktiež váhu jednotlivých parametrov od najvyššej po najnižšiu. K testovaniu slicerov boli vybrané všetky slicery spomenuté v tejto bakalárskej práci. MakerBot Slicer nebol do testu vybraný z dôvodu, že tento slicer je používaný výhradne spoločnosťou MakerBot a nie je možné sa k sliceru dostať samostatne len spustením cez ich aplikáciu MakerBot Print, ktorá je určená tlačiarňam od spoločnosti Makerbot.

Tabuľka 3.2: Porovnanie výsledkov jednotlivých slicerov na modely 3DBenchy

Slicer	CuraEngine	Slic3r	Kisslicer	Skeinforge	MatterSlice
Čas prekladu do jazyka G-kód	5.69s	16.888s	21.270s	30.126s	20.012s
Výsledná kvalita tlače	výborná	dobrá	dostačujúca	dostačujúca	chválitebná
Dĺžka tlače	1 h 28 m	2 h	2 h 16 min	2 h 24 min	1 h 32 min
Dostupnosť podpory (komunitné fóra)	výborná	výborná	dostatočná	nedostatočná	dostatočná
Podporované formáty digitálnych 3D modelov	.stl	.stl, .obj, .amf	.stl	.stl	.stl

V prípade kvality tlače a dostupností podpory je kvantifikácia radená od najlepšieho po najhorší výsledok následovne: výborný, chválitebný, dobrý, dostačujúci a nedostačujúci.

Z výsledkov vyšli ako potencionálne využiteľné slicery pre bakalársku prácu CuraEngine 3.2.2 a Slic3r 3.2.3. V prípade 3D modelu 3DBenchy sa CuraEngine vyznačuje niekoľko násobne vyššou rýchlosťou prekladu oproti testovaným slicerom. Pre ich porovnanie kvality tlače bola vytvorená séria 3D modelov vytlačených pomocou 3D tlačiarne Be3D Edee. Výtlačky ukázali zvýšenú kvalitu tlače v prípade sliceru CuraEngine. Séria obrázkov z testovania kvality tlače je dostupná v Príloha E. CuraEngine sa taktiež vyznačuje veľkou podporou na komunitných fórach. Používa sa v mnohých nástrojoch na prípravu 3D modelov pre 3D tlač, napríklad Cura 3.1.1, Repetier-Host 3.1.4 a pod.

Následne boli slicery otestované na väčšom a zložitejšom digitálnom 3D modely. Jednalo sa o overenie výsledkov z testu na digitálnom 3D modely 3DBenchy dostupných v Tabuľka 3.2. Testovanie bolo zamerané len na rýchlosť prekladu do jazyku G-kód pomocou jednotlivých slicerov. K testu bol vybratý jeden zložitejší 3D model s názvom Disney Castle⁸. Testovanie prebiehalo v troch sériách testov. V prvej sérii bol 3D model slicovaný bez podpory, výškou vrstvy 0.2 mm a výplň bola nastavená na 20%. V druhej sérii bol model slicovaný s podporou, výškou vrstvy 0.2 mm a výplňou 20%. V poslednej sérii testov

⁸Zdroj: <https://www.thingiverse.com/thing:2873346>

bol 3D model slicovaný s podporou, výškou vrstvy 0.2 mm a výplňou 70%. Získaný čas je priemerná hodnota z troch opakovaní.

Tabuľka 3.3: Porovnanie výsledkov jednotlivých sérií testov slicerov na 3D modely Disney Castle

Slicer	CuraEngine	Slic3r	Kisslicer	Skeinforge	MatterSlice
Test č.1	17.15 s	1 min 10 s	5 min 4 s	nezískané	nezískané
Test č.2	41.58 s	1 min 30 s	6 min 7 s	nezískané	nezískané
Test č.3	47.08 s	1 min 54 s	6 min 37 s	nezískané	nezískané

Dáta zo slicerov Skeinforge a MatterSlice neboli získane z dôvodu, že tvorba 3D tlačového rezu skončila chybou segmentácie alebo vygenerovaný G-kód bol neúplný. Tieto dáta boli považované za nevyhovujúce, čo viedlo k vyradeniu slicerov Skeinforge a MatterSlice z možných na použitie v prípade cloudovej aplikácie.

Výsledky ukázali, že najlepším slicerom pre účely bakalárskej práce je CuraEngine 3.2.2 z dôvodu vysokej rýchlosti tvorby 3D tlačového rezu. Potrebnami pre výber sliceru je hlavne rýchlosť z dôvodu, že určitý čas zaberie prenos súboru od klienta na server a späť viď Podkapitola 5.3.

Kapitola 4

Návrh aplikácie

Táto kapitola opisuje požiadavky na aplikáciu a následný návrh cloudového nástroja na tvorbu 3D tlačových rezov. V prvej časti sa kapitola venuje popisu požiadavkou na aplikáciu. Následne sa v druhej časti venuje podobným aplikáciám na trhu. V ďalšej časti popisuje schéma návrhu komunikácie. Kapitola sa zameriava taktiež na popis grafického užívateľského webového rozhrania aplikácie.

4.1 Požiadavky na aplikáciu

Výsledkom práce bude cloudová aplikácia. K aplikácií by sa malo pristupovať cez webové rozhranie, kde bude možné cez klientskú časť aplikácie vkladať modely a následne s nimi rotovať, pohybovať po tlačovej podložke, zväčšovať a zmenšovať ich. Cloudová aplikácia by mala byť schopná tvorby 3D tlačových rezov, pri čom tento proces sa bude výhradne vykonávať na strane servera. Aplikácia by mala vychádzať pre klientskú časť z programovacích jazykov HTML a Javascript. Serverová časť aplikácie by mala vychádzať z programovacieho jazyka Java.

4.1.1 Podobné aplikácie

Existuje niekoľko nástrojov, ktoré umožňujú slicovať digitálny 3D model pomocou cloudovej aplikácie viac Podkapitoly [3.1.10](#), [3.1.11](#) a [3.1.12](#). Avšak ani jeden neumožňuje si tento nástroj nahráť na vlastný cloud, ale jediná možnosť je využívať nástroj na ponúkanom cloude od vývojárov.

4.1.2 Návrh komunikácie

Komunikácia medzi užívateľom a cloudom má veľký vplyv na výkon cloudovej aplikácie, čo je úzko späté s tým, za aký čas dostane užívateľ svoj požadovaný 3D tlačový rez. Navrhnutá komunikácia musí byť efektívna, ale aj dostatočná, aby pokryla všetkých užívateľov.

Návrh komunikácie medzi klientom a serverom by mal byť navrhnutý tak, aby spĺňal požiadavky cludovej aplikácie ako škálovateľnosť a vyrovnávanie záťaže. Mala by umožňovať fungovanie na všetkých najpoužívanejších webových prehliadačoch a operačných systémov z dôvodu väčších možností ako zaujať prípadného užívateľa. Taktiež rozdelenie výkonu servera by malo byť spravodlivé pre všetkých užívateľov. To znamená, že žiadny užívateľ by nemal byť zvýhodnený oproti druhému.

4.1.3 Grafické užívateľské rozhranie

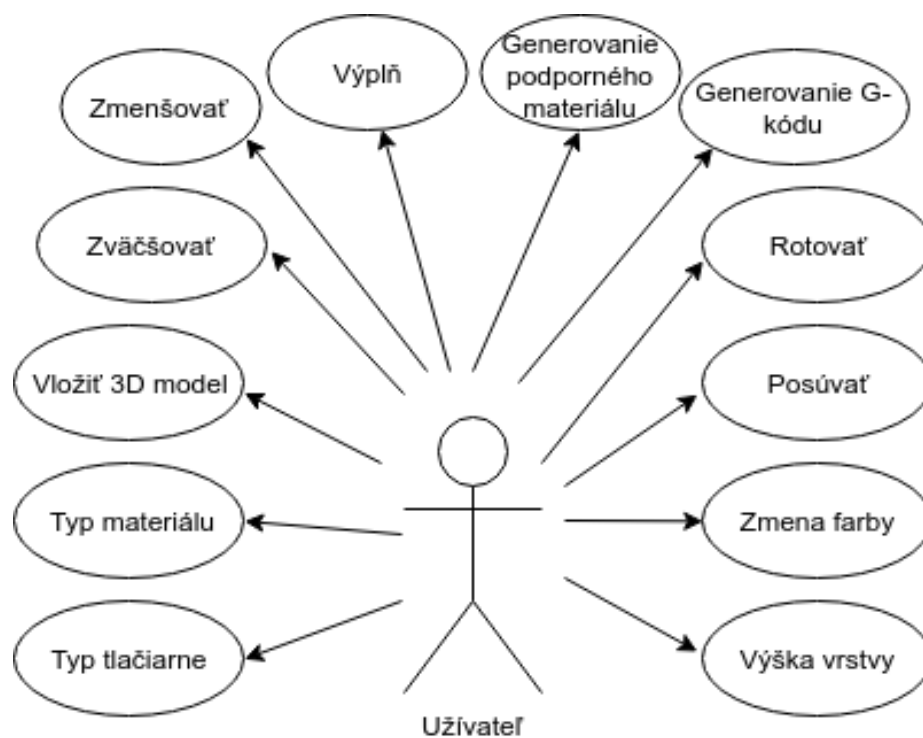
Užívateľské rozhranie má veľký vplyv na počet užívateľov, ktorý danú aplikáciu budú používať. Ako prvé si musíme uvedomiť, kto bude cloudovú aplikáciu využívať. Budú to predovšetkým študenti na školských počítačoch a užívatelia s nižšou konfiguráciou počítačov, ktorí majú problém so spracovaním 3D modelov v komerčných nástrojoch. Títo ľudia väčšinou nemajú s 3D tlačou žiadne skúsenosti, alebo prípadne začínajú. Zložité nastavovanie by ich mohlo odradiť. Z tohto dôvodu by malo byť užívateľské rozhranie jednoduché ale zároveň použiteľné. To znamená, že by malo obsahovať základné nástroje na úpravu 3D modelov pred slicovaním a základné nastavenia požadovaných vlastností modelu.

Grafické užívateľské rozhranie by mala predstavovať webová stránka, ktorá umožňuje nahrať 3D modely a následne s nimi rotovať, meniť ich polohu na podložke, zväčšovať, zmenšovať, meniť farbu modelu a pod. Inšpirácia na užívateľské rozhranie vychádzala z dostupných nástrojov, kde boli porovnané prostredia a vybrané základné funkcie dostupných nástrojov a implementované do webového rozhrania.

Výsledné užívateľské prostredie je potrebné otestovať na potencionálnych užívateľoch. Testovanie ukáže záujem o aplikáciu a prípadné nedostatky.

4.1.4 Práca s 3D modelmi

Práca s 3D modelmi vo webovom rozhraní musí byť intuitívna, aby užívateľ nemusel venovať veľké množstvo času pochopeniu, ako narábať s webovým rozhraním. Nezrozumiteľnosť a neprehľadnosť narábania s 3D modelmi vo webovom rozhraní by mohla viesť k nepochopeniu nástroj na prácu s 3D modelmi, čo by malo za následok odstúpenie užívateľov od používania cloudovej aplikácie. Diagram prípadov užitia vid' Obrázok 4.1 predstavuje možnosti narábania s webovým rozhraním a prípady užitia, ktoré sú popísané nižšie.



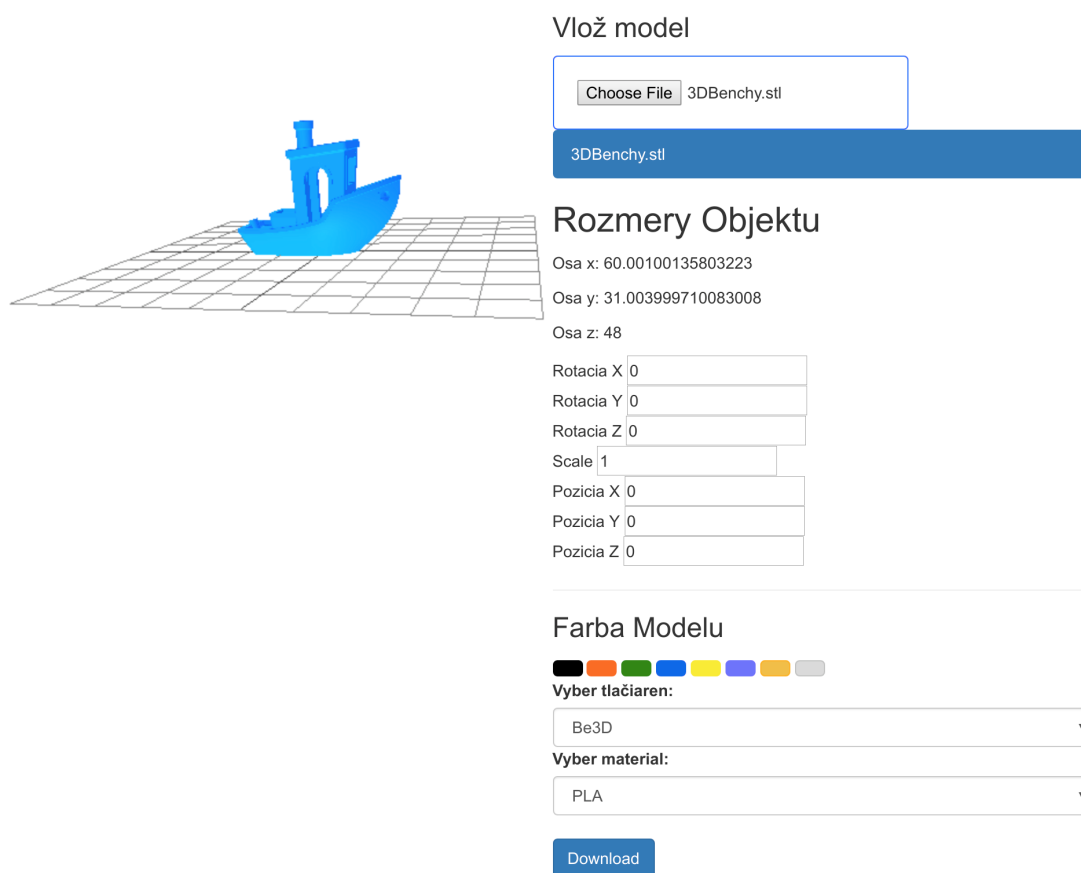
Obr. 4.1: Diagram prípadov užitia

- **Vložiť 3D model** - najdôležitejšia vlastnosť, bez ktorej webové rozhranie stráca význam. Užívateľ môže nahráť 3D model vo formáte .stl, ktorý sa mu zobrazí po načítaní. Dĺžka načítania 3D modelu závisí od veľkosti 3D modelu a jeho zložitosti.
- **Rotácia 3D modelu** - užívateľ má možnosť rotovať s 3D modelom vo všetkých troch osách X, Y a Z. 3D model sa automaticky zdvíha z pod úrovne podložky, aby nedošlo ku prípadným kolíziám s tlačiarenskou podložkou. Hodnota je zadávaná v stupňoch.
- **Zväčšovanie/Zmenšovanie 3D modelu** - zväčšovanie a zmenšovanie prebieha tzv. uniformne to znamená, že sa zväčšuje alebo zmenšuje 3D model vo všetkých troch osiach naraz. Zadaná hodnota predstavuje násobné zväčšenie modelu. V prípade, že je hodnota väčšia ako 1 dochádza k zväčšeniu, ak je v rozmedzí 0-1 dochádza k zmenšeniu a ak je rovná 1 model si zachováva svoje pôvodné rozmery.
- **Posun 3D modelu** - užívateľ môže s modelom pohybovať po osách X a Y. Osa Z bola odstránená po testovaní s užívateľmi viac Podkapitola 4.1.5. Posun je vykonávaný v centimetroch.
- **Výplň 3D modelu** - užívateľ má na výber z niekoľkých hodnôt výplne, kde hodnota predstavuje percentuálnu výplň modelu materiálom. Táto vlastnosť ovplyvňuje množstvo spotrebovaného materiálu a pevnosť vytlačeného trojrozmerného objektu.
- **Generovanie podporného materiálu** - v prvotnom návrhu tento prípad využitia nebol implementovaný, až na základe testovania s užívateľmi viac Podkapitola 4.1.5. Užívateľ má možnosť zaškrtnúť, pre ktorý 3D model bude generovaný podporný materiál.
- **Farba 3D modelu** - aplikácia podporuje zmenu farby 3D modelu. Farba sa mení pre všetky 3D modely.
- **Typ tlačiarne** - užívateľ si môže vybrať typ 3D tlačiarne z troch prednastavených profilov. Profil tlačiarne ovplyvňuje veľkosť tlačovej podložky a výslednú kvalitu tlače, keďže každá 3D tlačiareň ma špecifické potreby G-kódu.
- **Typ materiálu** - taktiež si môže vybrať teplotný profil pre materiál, ktorý bude využitý pri tvorbe trojrozmerného objektu z 3D modelu. Použitý materiál má vplyv na vlastnosti trojrozmerného objektu a každý materiál má inú teplotu tavenia.
- **Výška vrstvy** - určuje počet nanesených vrstiev a taktiež veľkosť výsledného G-kódu. Veľkosť si môžeme voliť od 0.1-0.4 mm záleží však od typu 3D tlačiarne.
- **Generovanie G-kódu** - užívateľ môže generovanie započat kliknutím na tlačidlo "Download" v prípade, že vložil minimálne jeden 3D model do webového rozhrania.

4.1.5 Prototyp webového rozhrania

Prvotný návrh webového rozhrania môžete vidieť nižšie Obrázok 4.2. Tento návrh bol predstavený desiatim ľuďom, ktorý nemajú žiadne skúsenosti s 3D tlačou a sú študentami vysokej školy oboru informačných technológií. Títo užívatelia sa orientovali v rozhraní veľmi rýchlo len im niektoré funkcie prišli zbytočne zložené. Užívatelia narážali na problém so zbytočným písaním presnej hodnoty otočenia o počet stupňov a radšej by uvítali tlačidlá, ktoré by rotovali model v jednej z osí vždy o 10° / -10° a prípadne manuálnou zmenou hodnoty.

Tento istý problém mali aj v prípade posúvania modelu po tlačovej podložke a uvítali by tlačidlo, ktoré by posunulo model vždy o 5/-5 cm od počiatku s prípadným zadaním presnej hodnoty. Následne im prišla nepraktická možnosť posúvať 3D model v smere osi Z, ktorý by v prípade nepozornosti užívateľa mohol viesť k chybnéj 3D tlači. Posledná funkcia, ktorá im prišla nepraktická, bolo automatické generovanie podporného materiálu, kde nebol potrebný. Užívatelia by uvítali, aby táto voľba bola na nich, ako to je v dostupných nástrojoch na prípravu digitálnych 3D modelov pre 3D tlač.



Vlož model

Choose File 3DBenchy.stl

3DBenchy.stl

Rozmery Objektu

Osa x: 60.00100135803223
Osa y: 31.003999710083008
Osa z: 48

Rotacia X 0
Rotacia Y 0
Rotacia Z 0
Scale 1
Pozícia X 0
Pozícia Y 0
Pozícia Z 0

Farba Modelu

● ● ● ● ● ● ● ●

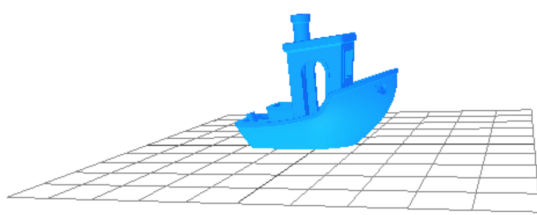
Vyber tlačiaren:
Be3D

Vyber material:
PLA

Download

Obr. 4.2: Prototyp webového rozhrania

Všetky tieto pripomienky boli zohľadnené a webové rozhranie bolo prerobené podľa požiadavok užívateľov. Taktiež boli doplnené funkcie výška vrstvy a percentuálna výplň 3D modelu. Tieto funkcie ovplyvňujú čas za aký bude 3D model vytlačený, akú bude mať pevnosť a počet vrstiev z ktorých sa bude skladať. Užívateľ má na výber z preddefinovaných hodnôt pre výšku vrstvy a taktiež pre výplň. Tieto hodnoty platia pre všetky 3D modely, ktoré sú spoločne odoslané na tvorbu 3D tlačového rezu. Webové rozhranie po úprave na základe podnetov je možné vidieť na Obrázok 4.3.



Vlož model

Choose File 3DBenchy.stl

3DBenchy.stl

Rozmery Objektu

Osa x: 60.00100135803223
Osa y: 31.003999710083008
Osa z: 48

Rotacia X ← -10° 0 → +10°
Rotacia Y ← -10° 0 → +10°
Rotacia Z ← -10° 0 → +10°

Scale 1

Pozicia X ← -5 0 → 5
Pozicia Y ↑ 5 0 ↓ -5

Generovanie podporného materiálu

3DBenchy.stl

Farba Modelu

● ● ● ● ● ● ● ●

Vyber tlačiaru:

Be3D

Vyber material:

PLA

Výška vrstvy:

0.1

Výplň %:

10

Download

Obr. 4.3: Webové rozhranie po úprave na základe podnetov

Kapitola 5

Implementácia

Táto kapitola opisuje implementáciu univerzálneho cloudového nástroja na tvorbu 3D tlačových rezov. V prvej časti sa venuje popisu použitých technológií. V druhej časti bližšie popisuje proces spracovania 3D modelov. Ďalšia časť sa venuje popisu pripojenia a prenosu v rámci aplikácie. Štvrtá časť opisuje tvorbu 3D tlačových rezov v cloudovej aplikácii za pomoci nástroja CuraEngine. Posledná časť sa venuje popisu implementácie load balancera a zabezpečenia škálovateľnosti v rámci aplikácie.

5.1 Použité technológie

Využili sa voľne dostupné knižnice a frameworky. V prípade webového rozhrania bol pre frontend použitý jazyk HTML spolu s knižnicou Bootstrap. Na návrh backendu webové rozhrania bol využitý jazyk Javascript spolu s knižnicami three.min.js, jszip.min a filesaver.js. Následne k správne fungovaniu aplikácie a zaisteniu cloudových služieb, bol využitý jazyk Java spolu s frameworkami Spring.

5.1.1 HTML a Bootstrap

Jazyk HTML¹ je tzv. značkovací jazyk. Značkovacie jazyky sa používajú na tvorbu webových stránok. Tieto jazyky sú typické tým, že ich štruktúra je pevne daná stanovenými značkami, ktoré sa nemenia. Jazyk HTML využíva značky, ktoré sa nazývajú tzv. tagy [14].

Bootstrap je voľne dostupný CSS framework,² ktorý obsahuje nástroje, ktoré nám uľahčujú vývoj webov [35]. Obsahuje množstvo preddefinovaných štýlov od našťýlovaných tlačítkov, tabuliek cez celý vzhľad stránok. Tento framework nám taktiež umožňuje vytvárať weby prispôsobené pre mobilné zariadenia tzv. responzívne weby [36].

5.1.2 JavaScript

JavaScript je dynamický programovací jazyk, ktorý vznikol koncom 90. rokov. Z počiatku sa tento jazyk nazýval LiveScript. Následne, keď nastal boom vo svete ohľadom jazyka Java usúdili z marketingového hľadiska, že bude najlepšie tento jazyk premenovať na jazyk JavaScript. JavaScript je programovací jazyk, ktorý je zvyčajne interpretovaný na strane

¹HyperText Markup Language

²Framework - je softvérová štruktúra, ktorá slúži ako podpora pri programovaní, vývoji a organizovaní iných softvérových projektov. Môže obsahovať podporné programy, knižnice API, návrhové vzory alebo doporučené postupy pri vývoji.

klienta pomocou webového prehliadača [37]. JavaScript kód by mal byť zahrnutý, alebo by sa naň malo odkazovať v HTML dokumente interpretovanom pomocou webového prehliadača. To znamená, že webová stránka nemusí byť statická ale môže interaktívne komunikovať s užívateľom a dynamicky vytvárať obsah HTML.

Three.js, Jszip.js, File saver.js a Trackball.js

Three.js je javascriptová knižnica, ktorá poskytuje aplikačné rozhranie pre prácu s 3D modelmi vo webovom prehliadači. Knižnica využíva aplikačné rozhranie WebGL. Obsahuje veľké množstvo prvkov na vytvorenie 3D scény priamo v prehliadači [17].

Jszip.js javascriptová knižnica, ktorá umožňuje vytvárať, čítať a editovať súbory vo formáte zip a ponúka jednoduché aplikačné rozhranie [5].

File saver.js javascriptová knižnica, ktorá slúži na ukladanie dát na strane klienta, pri čom je určená predovšetkým pre webové aplikácie [2].

Trackball.js javascriptová knižnica, určená k pohybu v scéne a rotácie kamery, ktoré je súčasťou Three.js [17].

5.1.3 Java

Jazyk Java je interpretovaný programovací jazyk, ktorý je objektovo orientovaný a triedne založený jazyk. Vývoj jazyka začal v 90. rokoch. Prvá verzia jazyka Java bola predstavená v roku 1995. Zámerom jazyka Java bolo stať sa produkčným jazykom a nie výskumným jazykom, čo viedlo autorov k cieľu, aby bol jazyk v čo najväčšej miere prenositeľný a nezávislý na platforme. Programovací jazyk Java je spájaný s jazykmi C a C++, ale oproti týmto jazykom nedovoľuje napísať program, ktorý by nebol objektovo orientovaný. Radí sa medzi silne staticky typované jazyky [22]. Jazyk Java je súčasne prekladaný aj interpretovaný, čo spôsobuje problém v rýchlosti. Tento problém však prevyšuje univerzálnosť napísaného kódu. Program napísaný v jazyku Java sa najprv preloží do bajtkódu, ktorý sa následne analyzuje a interpretuje pomocou interpretu nazývaného Java Virtual Machine [27].

Spring Framework

Spring Framework je open-source aplikačný rámec určený k tvorbe komplexných podnikových aplikácií. Spring framework je rozdelený do modulov. Aplikácia si môže vybrať, ktorý modul bude používať. Prvá verzia frameworku Spring bola vydaná v roku 2003 [11].

5.1.4 Cloud Computing

Cloud computing predstavuje prostriedok pomocou, ktorého môžeme dodávať výpočtový výkon, miesto pre Vaše dáta a aplikácie ako službu alebo balíček služieb, a to bez toho aby ste museli investovať do drahého hardwaru. Postačuje osobný počítač a pripojenie na internet. Kedykoľvek môžete výkon zvýšiť a následne znížiť a vždy platíte len za to čo využívate. Prečo Cloud ? Internet sa často v sieťových schémach znázorňuje ako oblak tzv. cloud. Oblak predstavuje všetky vrstvy internetu a zlučuje ich do jednej [29].

Rozdelenie do kategórií podľa služieb [20] [3]:

- **SaaS – Softvér ako služba** - najpoužívanejšie prevedenie cloud computingu v dnešnej dobe. Užívateľ neinštaluje službu lokálne, ale všetko prebieha výhradne na cloude. Poskytovatelia služby poskytujú plnú podporu systémov a aplikácie. Typickým príkladom tejto služby je e-mail napr. od spoločnosti Google tzv. Gmail.

- **PaaS – Platforma ako služba** - poskytuje užívateľom priestor na cloude, kde môžu vyvíjať, distribuovať a spravovať aplikácie. Poskytovateľ služby sa stará o hardware a taktiež o niektoré prvky systému, ako o operačný systém a jeho aktualizáciu a podobné.
- **IaaS – Infraštruktúra ako služba** - služba najnižšej úrovne, ktorá poskytuje hardvérové prostriedky so základným softvérom. Užívateľ nemá kontrolu nad hardvérom, ale iba nad niektorými bezpečnostnými prvkami a základnými nastaveniami operačného systému, ako je napríklad konfigurácia sieťového pripojenia.

5.1.5 Cloudová aplikácia

"Cloudová aplikácia je internetový program, kde sa v cloude spracúvajú niektoré, alebo všetky procesné logiky a ukladanie dát. Užívateľ komunikuje s aplikáciou prostredníctvom webového prehliadača alebo mobilnej aplikácie a spracovanie údajov je riadené kombináciou lokálneho zariadenia a riešenia cloud computingu. Z pohľadu užívateľa sa cloudová aplikácia chová ako štandardná webová stránka, ale spracovanie dát je obsluhované cloudom cez API (rozhranie aplikačného programu) alebo hybrid oboch." [13]

Vyrovňavanie záťaže (Load Balancing)

Vyrovňavanie záťaže je vlastnosť systému, siete alebo procesu rozdeľovať záťaž medzi dva alebo viaceré počítače. Slúži na zlepšenie dostupnosti webových stránok, aplikácií a to pomocou rozloženia záťaže na serveroch [12]. Vyrovňavanie záťaže je v cloudových aplikáciách implementované pomocou load balancera viac nájdete Podkaptiola 5.5.1.

Škálovateľnosť (Scalability)

Škálovateľnosť je vlastnosť systému, siete alebo procesu zvládať rastúci objem práce a rozšíriť ho tak, aby mohol tento nárast spracovať [32].

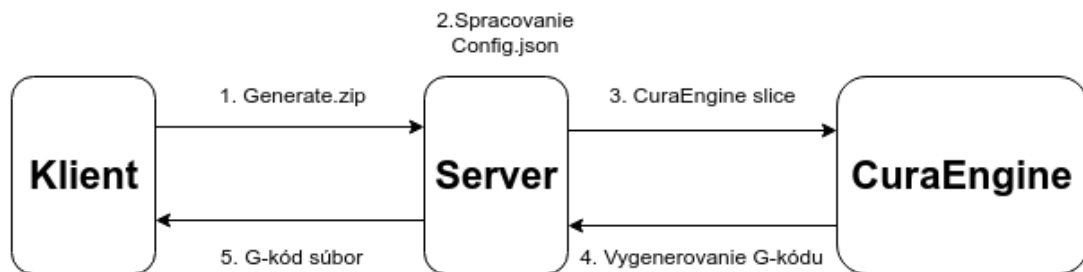
5.2 Spracovanie 3D modelov

Spracovanie 3D modelov prebieha výhradne u užívateľa vo webovom prehliadači. K tejto činnosti bola využitá javascriptová knižnica Three.js pozri Podkapitola 5.1.2. Webové rozhranie umožňuje prepínať medzi nahranými 3D modelmi kliknutím na názov modelu, pričom modrá farba určuje, ktorý model je momentálne aktívny. Pre vybraný model môžeme vidieť rozmery objektu, kde sú zobrazené rozmery vo všetkých troch osách X, Y a Z. Rozmery sú zadané v milimetroch. Objektom môžeme rotovať v troch osách X, Y a Z. Hodnota musí byť zadaná v stupňoch. Zväčšenie je zadávané v jednotkách násobku rozmeru modelu. V prípade zadania hodnoty 2 sa model zväčší dvojnásobne a podobne. 3D modelom hýbeme po tlačovej podložke v dvoch osách a to X a Y. Modelom pohybujeme zadaním hodnoty v centimetroch. Nepohybujeme sa po ose Z z dôvodu implementácie automatického zarovnanie modelu o tlačovú podložku. Následkom tejto implementácie nám nevznikajú medzery medzi 3D modelom a tlačovou podložkou, ktoré by mali za následok chyby pri 3D tlači. 3D model by nebol prichytený k tlačovej podložke a tlačilo by sa tzv. do vzduchu. Farba modelu sa mení po kliknutí na príslušnú farbu. Farba je jednotná pre všetky modely, takže pri výbere farby sa zmení farba všetkých modelov. Môžeme vyberať z niekoľkých tlačiarň čo nám

ovplyvňuje veľkosť tlačovej podložky a preddefinovaný profil tlačiarne pre slicer CuraEngine. Výber materiálu nám určuje preddefinované nastavenie teploty extrúdera pre správne extrúďovanie materiálu, keďže každý materiál má iné vlastnosti pri rôznej teplote. Výška vrstvy určuje počet vrstiev materiálu z koľkých sa bude vytlačený trojrozmerný model skladať. Percentuálna výplň určuje pevnosť trojrozmerného objektu a množstvo spotrebovaného materiálu. Tlačidlo Download zahajuje proces nadviazania spojenia medzi klientom a serverom. Následne pod tlačidlom Download je ukazovateľ, ktorý zobrazuje proces kompresie do zipu po obdržaní binárnej správy od servera viac nasledujúca Podkapitola 5.3.

5.3 Pripojenie a prenos

Komunikácia prebieha medzi klientom a serverom Obrázok 5.1. Komunikácia prebieha pomocou websocketov. "WebSocket je komunikačný protokol pre trvalé, obojsmerné, plne duplexné TCP spojenie z webového prehliadača používateľa na server." [30] Každý odsek predstavuje postupnosť krokov naznačených na Obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Komunikácia klient-server

Spojenie medzi klientom a serverom nastáva po kliknutí na tlačidlo Download, kde klient odošle požiadavok v tvare viď Výpis 5.1 o nadviazanie spojenia pomocou websocketov. Požiadavok o nadviazanie spojenia vyhodnotí server a v prípade validity sa nadviaže duplexné TCP spojenie, ak je požiadavok neplatný server vracia hodnotu 400, čo je považované za "Bad Request". Po nadviazaní spojenia so serverom sa u klienta vytvorí súbor `config.json`, ktorý obsahuje všetky potrebné informácie k vytvoreniu 3D tlačového rezu pre 3D modely vložené užívateľom pomocou webového rozhrania. Štruktúra obsahu súboru `config.json` je dostupná v Príloha C. Tento súbor je vložený do súboru s názvom `Generate.zip`, ktorý je vytvorení pomocou `JsZip.js`. Po úspešnom vložení súboru `config.json` sa do súboru `Generate.zip` vložia 3D modely nahrané užívateľom cez webové rozhranie. Akonáhle sú 3D modely v súbore `Generate.zip` tak sa odošle súbor pomocou websocketov serveru.

Po odoslaní klient čaká na odpoveď od servera. Server obdrží súbor `Generate.zip`. V prípade, že sa jedná o prvý požiadavok o tvorbu 3D tlačového rezu na strane serveru vytvorí sa priečinok `uploads/websocket/`. V priečinku `uploads/websocket/` sa vytvorí unikátna zložka, kde sa uloží `Generate.zip` a následne je extrahovaný. Schému štruktúry zložiek a súborov nájdeme v Príloha B.

`Config.json` je parsovaný a na základe obsiahnutých hodnôt je vytvorená postupnosť príkazov pre CuraEngine.

Postupnosť príkazov je predaná sliceru CuraEngine na základe, ktorých vygeneruje súbor `Generate.gcode`, ktorý obsahuje G-kód. Tento súbor je uložený do zložky, kde sa nachádza súbor `config.json`, ktorý bol použitý na vygenerovanie postupnosti príkazov.

Po úspešnom uložení je súbor odoslaný klientovi a po úspešnom prijatí súboru na strane klienta je automaticky prerušené spojenie pomocou websocketov. Klient prijíma súbor ako binárnu správu, ktorú je potrebné dekodovať a je uložená do súboru `gcode.zip` pomocou knižnice `Jszip.js`. Následne je súbor `gcode.zip` uložený pomocou knižnice `FileSaver.js`.

```
GET /binary?uploadSessionId=VWx0aW1ha2VyXFBMQVw0YWM2YjA3NS03M2ZmLTBhZWUt
ZDBiMS0zM2YxN2IyZjFjNGVcR2VuZXJhdGUuemlw HTTP/1.1
Host: localhost:8080
Upgrade: websocket
Connection: Upgrade
Sec-WebSocket-Key: Xy8ZcfL9BFjXaL+0VvCMFw==
Sec-WebSocket-Version: 13
```

Výpis 5.1: Príklad požiadavku na nadviazanie spojenia od klienta

5.4 Tvorba 3D tlačového rezu

Tvorba 3D tlačových rezov prebieha za pomoci slicera CuraEngine vybraného za najlepší pre použitie v bakalárskej práci z výsledkov dosiahnutých testov, ktoré sú bližšie zhrnuté Podkapitola 3.2.8. Na základe operačného systému na strane servera Windows alebo Linux je spúšťaný proces tvorby 3D tlačových rezov. V prípade operačného systému Windows je slicer CuraEngine spúšťaný zo zložky `slicers/cura/`, kde je spúšťaná aplikácia `CuraEngine.exe` s vhodnou postupnosťou argumentov potrebnými pre vytvorenia G-kódu z 3D modelu alebo 3D modelov viac nižšie. Schému štruktúry zložiek a súborov nájdete v Príloha B. V prípade operačného systému Linux je slicer CuraEngine spúšťaný priamo zo systému s vhodnou postupnosťou príkazov za predpokladu, že v systéme je tento slicer nainštalovaný v inom prípade dochádza k chybovému hláseniu.

Základné príkazy slicera CuraEngine :

```
CuraEngine slice [-v] [-p] [-j <settings.json>] [-s <settingkey>=<value>]
[-g] [-e<extruder\_nr>] [-o <output.gcode>] [-l <model.stl>] [-next]
```

Všetky príkazy v hranatých zátvorkách su voliteľné.

- **-v** zvýšenie počtu informácií v logoch.
- **-p** zapisovanie zmien do logu.
- **-j** nastavenia základných hodnôt pre tlačiareň, pre ktorú vytvárame G-kód.
- **-s** nastavenie hodnoty pre vybraný parameter z nastavení.
- **-g** globálne nastavenie pre všetky 3D modely.
- **-e** v prípade viacerých extrúderov určuje, ktorým extrúderom sa bude daný model tlačiť.
- **-o** určuje výstupný súbor, kde sa bude nachádzať vygenerovaný G-kód.

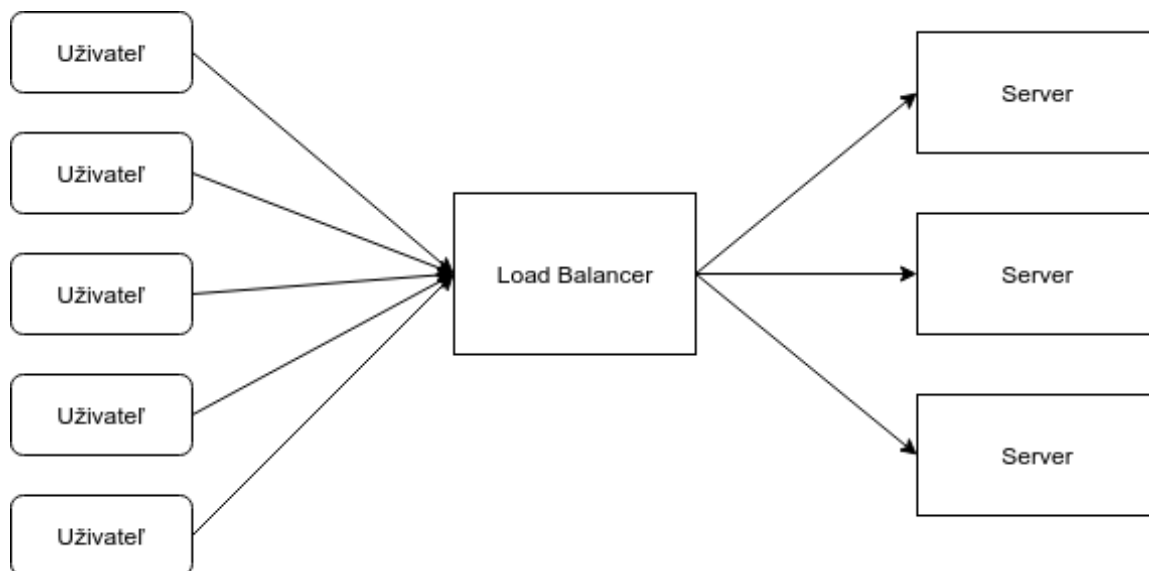
- -l cesta k 3D modelu, ktorý ma byť slicovaný.
- -next vyznačuje koniec sledu príkazov pre jeden daný 3D model.

5.5 Rozloženie záťaže a škálovateľnosť

Zabezpečenie týchto vlastností pri vývoji aplikácií bolo veľmi podstatné a na ich vytvorenie boli využité voľne dostupné nástroje.

5.5.1 Load balancer

Load balancer je zariadenie, ktoré rozdeľuje sieťovú alebo aplikačnú záťaž medzi servermi v rámci služby, kvôli lepšej dostupnosti aplikácie. K vytvoreniu load balanceru bol využitý voľne dostupný nástroj HAProxy³, ktorý je nainštalovaný na servery s operačným systémom Ubuntu. Load balancer je nastavený na servery, ktoré obsahujú cloudový nástroj na tvorbu 3D tlačových rezov viac o nastavení v Príloha D. Obrázok 5.2 predstavuje princíp fungovania load balancera.



Obr. 5.2: Princíp load balancera

5.5.2 Škálovateľnosť

Škálovateľnosť je veľmi podstatná vlastnosť cloudovej aplikácie. Zabezpečuje možnosť pripojenia veľkého množstva užívateľov. V našom prípade je škálovateľnosť implementovaná pomocou websocketov, ktoré umožňujú pripojenie množstva užívateľov nezávisle na sebe.

³Zdroj: <http://www.haproxy.org/>

Kapitola 6

Testovanie

Táto kapitola popisuje proces testovania cloudovej aplikácie. Testovanie patrí medzi najdôležitejšie etapy pri vývoji softvéru, ktorého cieľom je odhaliť chyby softvéru. Testovanie môže prebiehať manuálne, alebo automatizovane pomocou nástrojov k tomu určeným.

Prvá podkapitola popisuje priebeh testovania a rozdelenie testovania do troch testovacích sád, ktoré sú zamerané na kvalitu, stabilitu a rýchlosť.

Druhá podkapitola obsahuje možné rozšírenia cloudovej aplikácie, ktoré boli zistené pri implementáciách a sú považované za splniteľné.

6.1 Konfigurácia testov

Pre overenie funkčnosti cloudovej aplikácie bolo vytvorených niekoľko testovacích sád. Tieto sady boli naprogramované v jazyku Java za pomoci knižníc Selenium a TestNG, ktoré sa zameriavajú na automatizáciu testovania webových aplikácií. Inštancie webových prehliadačov Chrome a Firefox, boli vytvárané pomocou knižnice Selenium. Knižnica TestNG, bola využitá k naprogramovaniu testovacích sád. Testovanie prebiehalo na siedmych inštanciách cloudovej aplikácie za pomoci load balancera umiestneného v samostatnej inštancii. Testovacie sady môžeme rozdeliť do troch typov podľa zamerania, ktorými sú stabilita 6.2, rýchlosť 6.3 a kvalita 6.4. Testovanie prebiehalo v následovnej konfigurácii inštancií. V prípade inštancie cloudovej aplikácie bola konfigurácia následovná vid' Tabuľka 6.1 a v prípade load balancera vid' Tabuľka 6.2. Prvotné testovanie pomocou voľne dostupných webových prehliadačov ukázalo, ako dokáže pozmeniť vzhľad stránky samotný webový prehliadač z dôvodu rôznych vykreslovacích jadier webových prehliadačov a rôznych interpretov jazyka Javascript. Tabuľka 6.3 obsahuje zoznam webových prehliadačov s príslušnými verziami na ktorých bol správny chod cloudovej aplikácie otestovaný.

Konfigurácia	
Operačný systém	Windows server 2016 64 bit
Procesor	Intel Xeon L755 1.87Ghz x2
Pamäť	8gb
Pevný disk	120gb

Tabuľka 6.1: Konfigurácia inštancie cloudovej aplikácie

Konfigurácia	
Operačný systém	Ubuntu 14.04
Procesor	Intel Xeon L755 1.87Ghz x2
Pamäť	4gb
Pevný disk	120gb

Tabuľka 6.2: Konfigurácia inštancie load balancera

Webový prehliadač	Verzia
Chrome	74.0.3729.131
Firefox	66.0.3
Chromium	73.0.3683.75
Opera	60.0.3255.70

Tabuľka 6.3: Verzie podporovaných webových prehliadačov

Prvá testovacia sada bola zameraná na overenie stability cloudovej aplikácie v prípade prihlásenia veľkého množstva užívateľov s prípadným požiadavkom na tvorbu 3D tlačového rezu z digitálneho 3D modelu.

Druhá testovacia sada overovala rýchlosť prekladu digitálneho 3D modelu v niekoľkých prípadoch zataženia cloudu. V prípade plného výkonu pre jedného užívateľa, v prípade zataženia cloudu päťdesiatimi a v prípade zataženia 100 užívateľmi.

Tretia testovacia sada bola zameraná na kvalitu generovaných 3D tlačových rezov z digitálnych 3D modeloch, ktoré boli následne porovnané s vygenerovanými 3D tlačovými reznami pomocou desktopovej aplikácie Cura s následnou 3D tlačou.

6.2 Stabilita

Stabilita bola overená veľkým množstvom pripojení užívateľov, ktorý upravujú 3D modely, ktoré odosielaajú serveru k procesu slicovania digitálneho 3D modelu pomocou tlačidla Download viac Podkapitola 5.3.

Prvý test overuje stabilitu serveru pripojením užívateľa s následným požiadavkom na tvorbu 3D tlačového rezu z digitálneho 3D modelu. Tento požiadavok je odoslaný na cloud a užívateľovi je odoslaný vygenerovaný G-kód uložený v .zip súbore.

Druhý test sa zameriava na troch užívateľov, ktorý v krátkom časovom rozmedzí za sebou odošlú požiadavok na tvorbu 3D tlačového rezu z digitálneho 3D modelu. Tento test skúma správne rozloženie záťaže medzi jednotlivé inštancie v cloude a skúma, či jednotliví užívatelia dostanú správne vygenerovaný G-kód vo formáte .zip. Overenie rozloženia záťaže prebehlo pomocou konzole open-source aplikácie HAProxy, ktorá je využívaná v tejto bakalárskej práci ako load balancer a ukázala, že rozloženie záťaže je správne. Vygenerované .zip súbory boli extrahované a vygenerovaný G-kód bol porovnaný s G-kódom vytvoreným za tých istých nastavení pomocou desktopovej aplikácie Cura. Porovnanie ukázalo 100% zhodu v počte vrstiev čo považovať za validný výsledok. Rozdiel ostatných hodnôt bol spôsobený použitím novšieho profilu 3D tlačiarne, kde je preddefinovaná iná rýchlosť tlače a taktiež hrúbka stien. Tieto aspekty ovplyvnili rýchlosť tlače, veľkosť vygenerovaného súboru a taktiež množstvo spotrebovaného materiálu.

Model	Názov	Výška vrstvy	Výplň
Model 1	3D Benchy	0.2 mm	10%
Model 2	aaaaaHorse_t2 ¹	0.2 mm	50%
Model 3	clean_flexi_shark_v2 ²	0.2 mm	20%

Tabuľka 6.4: Špecifikácia nastavení

Parameter	Model 1	Model 2	Model 3
Dĺžka tlače	1 h 15 min	6 h 27 min	1 h 23 min
Veľkosť	5 370 kB	11 900 kB	4 196 kB
Počet vrstiev	240	610	40
Spotreba materiálu	10 411 mm	77 210 mm	12 749 mm

Tabuľka 6.5: Hodnoty získane z cloudovej aplikácie

Parameter	Model 1	Model 2	Model 3
Dĺžka tlače	58 min	5 h 38 min	1 h 14 min
Veľkosť	4 970 kB	8 270 kB	3 700 kB
Počet vrstiev	240	610	40
Spotreba materiálu	8 449 mm	73 264 mm	10 704 mm

Tabuľka 6.6: Hodnoty získané z desktopovej aplikácie Cura

Tretí test vytvoril 50 inštancií užívateľov, ktorý v časovom rozmedzí 1 až 5 sekúnd po načítaní webového rozhrania cloudovej aplikácie odoslali požiadavok na tvorbu 3D tlačového rezu z digitálneho 3D modelu. Testom bola overená funkčnosť load balancera, ktorého cieľom bolo rozložiť záťaž medzi všetky inštancie cloudovej aplikácie. Taktiež bola overená funkčnosť tvorby 3D tlačových rezov pod záťažou, kde sa ukázalo výrazné spomalenie tvorby 3D tlačových rezov, ktoré bolo spôsobené limitom priepustnosti sieťovej karty osobného počítača a rozdelením výpočtového výkonu na inštanciách cloudovej aplikácie. Výpočtový výkon bol pomocou vrstvy operačného systému Windows rozdelený medzi požiadavky k tvorbe 3D tlačového rezu od užívateľov rovnomerne.

Testovanie malo za úlohu overiť stabilitu cloudovej aplikácie. Z výsledkov je možné považovať cloudovú aplikáciu za stabilnú.

6.3 Rýchlosť

Testovaciu sadu na overenie rýchlosti cloudovej aplikácie môžeme rozdeliť do dvoch častí. Prvá časť sa venuje rýchlosti načítania webového rozhrania cloudovej aplikácie. Druhá časť sa venuje rýchlosti generovania 3D tlačového rezu pomocou cloudovej aplikácie. Testovanie prebiehalo simultánne, čo nám umožnilo vytvoriť tabuľku, ktorá porovnáva výsledky rýchlosti načítania webového rozhrania cloudovej aplikácie a rýchlosti tvorby 3D tlačového rezu.

Prvý test meria rýchlosť načítania webového rozhrania cloudovej aplikácie v prípade, že cloud sa nenachádza pod záťažou. Toto meranie prebieha pomocou načítania webového roz-

¹Zdroj: <https://www.thingiverse.com/thing:925638>

²Zdroj: <https://www.thingiverse.com/thing:2801989>

hrania cloudovej aplikácie jedným užívateľom. Po kompletnom načítaní webového rozhrania je čas uložený. Užívateľ vloží 3D model a odošle na tvorbu 3D tlačového rezu pomocou tlačidla Download. Po kliknutí na tlačidlo Download sa započne merania času, za aký užívateľ dostane možnosť na stiahnutie vygenerovaného súboru vo formáte .zip. Pre overenie validity získaných dát bol test vykonaný 10 krát.

Druhý test taktiež ako prvý test meria rýchlosť načítania webové rozhrania cloudovej aplikácie a rýchlosť generovania 3D tlačového rezu po kliknutí na tlačidlo Download. Na rozdiel od prvého testu, testovanie prebieha pri záťaži cloudu vytvorením päťdesiatich inštancií užívateľov, ktorý v časovom rozmedzí 1 až 5 sekúnd po načítaní webového rozhrania vytvárajú požiadavok na tvorbu 3D tlačového rezu vložím 3D modelu a kliknutím na tlačidlo Download.

Tretí test je totožný s druhým testom, len bol pozmenený počet užívateľov z 50 na 100. Táto zmena viedla k väčšej záťaži cloudu, čo viedlo k predĺženiu času načítania webového rozhrania a niekoľko násobnému predĺženiu času tvorby 3D tlačových rezov.

Počet užívateľov	Webové rozhranie	Tvorba 3D tlač. rezu
1	1.7 s	17.2 s
50	2.8 s	30.2 s
100	4.4 s	46.7 s

Tabuľka 6.7: Získané dáta z testovania rýchlosti cloudovej aplikácie

Testovanie preukázalo veľmi dobrú rýchlosť tvorby 3D tlačových rezov aj keď sa nejedná o desktopovú aplikáciu. Zhoršená rýchlosť tvorby 3D tlačového rezu v prípade veľkého množstva užívateľov bola predovšetkým spôsobená odosielaním požiadavkov z jedného osobného počítača, ktorý má obmedzenú priepustnosť dát pomocou sieťovej karty, a keďže sa jednalo o odosielanie a následne sťahovanie, dochádzalo k rozdeleniu výkonu, čo malo za následok veľké spomalenie procesov. Na spomalenie tvorby 3D tlačových rezov mala taktiež veľký podiel kvalita pripojenia na cloud, ktoré bolo v niektorých prípadoch nepostačujúce a spomaľovalo proces tvorby 3D tlačových rezov. No napriek tomu je možné považovať rýchlosť tvorby 3D tlačových rezov za veľmi dobrú. Rýchlosť načítania webového rozhrania bola v prípade záťaže veľkým počtom užívateľov výborná. Toto zistenie podporujú dáta získané z testovania dostupné v Tabuľka 6.7 .

6.4 Kvalita

Testovanie kvality vygenerovaného 3D tlačového rezu prebiehalo pomocou vytvorenia požiadavku na tvorbu 3D tlačového rezu jedným užívateľom vo webovom rozhraní cloudovej aplikácie. Testovanie prebiehalo porovnávaním vygenerovaných 3D tlačových rezov pomocou cloudovej aplikácie s vygenerovanými 3D tlačovými rezmi z desktopovej aplikácie Cura.

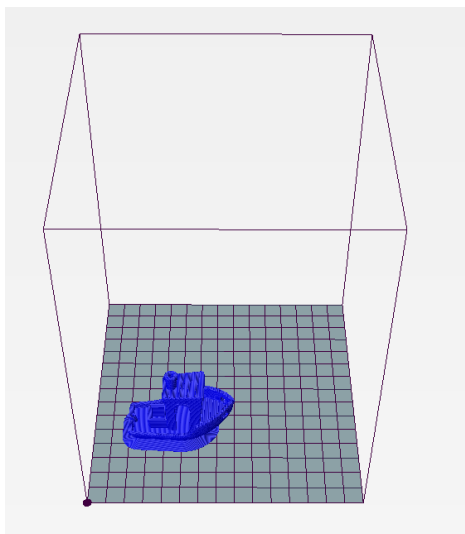
Prvý test použil k testovaniu nám dobre známy 3D model s názvom 3DBenchy. Kvalita výsledného G-kódu bola testovaná na tlačiarni Be3D Edee a porovnaná už s dosiahnutými výsledkami, ktoré boli využité v analýze slicerov pozri Podkapitola 3.2.8. Kvalita je zhodná s kvalitou desktopovej aplikácie Cura okrem umiestnenia na tlačovej podložke viac nižšie.

Druhý test overil kvalitu na zložitejšom 3D modeli, ktorého názov je Disney Castle³. Tento 3D model je voľne dostupný. Nastavenie bolo podľa špecifikácií na stránkach 3D

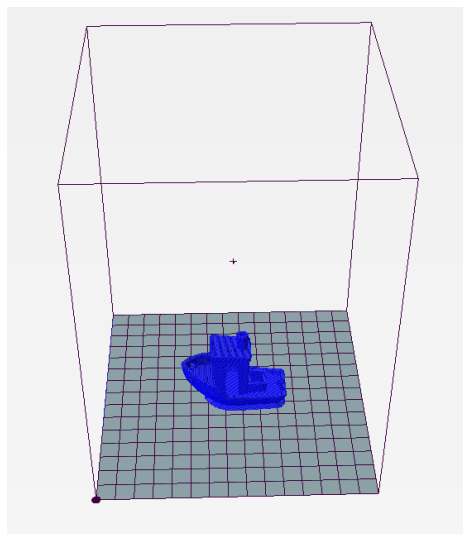
³Zdroj: <https://www.thingiverse.com/thing:127748>

modelu. Výška vrstvy 0,2 mm a výplň 10%. Vygenerovaný G-kód bol testovaný na 3D tlačiarňi Be3D Edee a porovnaný s G-kódom vygenerovaným aplikáciou Cura.

Testovanie kvality ukázalo takmer zhodnú kvalitu aplikácie Cura s cloudovou aplikáciou. Rozdiel v kvalite je spôsobený v rôznych verziách CuraEngine v prípade aplikácie Cura to je verzia 3.3 a v prípade cloudovej aplikácie to je verzia 2.7. Taktiež bol zistený rozdiel v prípade profilu pre 3D tlačiareň Be3D Edee, kde sa 3D model nachádza po tvorbe 3D tlačového rezu mimo stredu tlačovej podložky viď Obrázok 6.1. V prípade nástroja Cura je 3D model umiestnený na stred tlačovej podložky viď Obrázok 6.2. Tento problém bol spôsobený zle nastaveným profilom pre danú 3D tlačiareň. Možným riešením je prestavenie profilu 3D tlačiarne, prípadne aktualizácia CuraEngine na najnovšiu verziu. Vygenerovaný G-kód bol vizualizovaný pomocou nástroja Repetier-host.



Obr. 6.1: Cloudslicer



Obr. 6.2: Cura

6.5 Možné rozšírenie

Pri testovaní cloudovej aplikácie boli zistené možné rozšírenia, ktoré by mohli byť implementované a takto zaujať väčšie množstvo užívateľov.

6.5.1 Výber nástroja na tvorbu 3D tlačových rezov

Možnosť výberu slicera podľa našich preferencií, čo by malo za následok v niektorých prípadoch zvýšenie kvality 3D tlače, keďže niektorí výrobcovia 3D tlačiarňi úzko spolupracujú s určitými slicermi a ponúkajú profily 3D tlačiarňi len pre vybrané slicery. Vďaka tomuto rozšíreniu by bolo možné pokryť väčšinu dostupných FDM tlačiarňi na trhu. V grafickom rozhraní by musela byť pridaná možnosť výberu slicera a ku každému sliceru by bolo potrebné vytvoriť potrebnú sadu príkazov, ktoré musia byť skladané tak, aby mali za následok vygenerovanie potrebného 3D tlačového rezu. Každý slicer má jedinečnú sadu príkazov.

6.5.2 Definícia 3D tlačiarne

Ďalším rozšírením by mohla byť možnosť definovať svoju vlastnú 3D tlačiareň. Týmto rozšírením by si užívateľ mohol priamo vo webovom rozhraní vytvoriť profil pre svoju 3D tlačiareň. Prípadne by mohla existovať možnosť si svoj profil 3D tlačiarne nahrať priamo do webového rozhrania a následne by bol tento profil využitý pri tvorbe 3D tlačového rezu. Obmedzením je prípadná nekompatibilita nahraných profilov s daným slicerom, alebo prípadne zle definovaný profil 3D tlačiarne, čo by malo za následok nezdarenú 3D tlač. Musel by existovať algoritmus, ktorý by kontroloval správnosť profilu pre 3D tlačiareň a kompatibilitu s daným slicerom.

6.5.3 Technológie 3D tlače

Pridaním podpory ďalších technológií 3D tlače ako je napríklad DLP, ktorého tvorba 3D tlačového rezu taktiež prebieha rozrezaním po vrstvách, kde vrstvu transformuje na obrázok prierezu vrstvy. V tomto prípade by bolo potrebné použiť nástroje na tvorbu 3D tlačových rezov pre daný typ technológie. Toto rozšírenie by malo za následok spojenie niekoľkých technológií do jednej cloudovej aplikácie a mohlo by zaujať viacero užívateľov. Avšak toto rozšírenie by bolo veľmi časovo a finančne náročné, keďže v drvivej väčšine firiem a domácností disponujú len 3D tlačiarňami typu FDM z dôvodu jednoduchosti, ľahkej údržby a ceny. No napriek tomuto sa mnohé technológie 3D tlače ako SLA a SLS dostávajú do domácnosti a firiem vďaka novo vznikajúcim lacným 3D tlačiarňam, ktoré sú založené na týchto technológiách. No napriek tomuto zisteniu by vloženie podpory ďalších technológií 3D tlače bolo najvýznamnejším rozšírením ako zvýšiť záujem užívateľov o aplikáciu. Riešením by bolo zakúpenie lacnej 3D tlačiarne typu SLA alebo SLS, ktorá by bola určená na testovanie cloudovej aplikácie.

Kapitola 7

Záver

Cieľom bakalárskej práce bolo vytvoriť cloudovú aplikáciu, ktorá by bola schopná upravovať 3D modely pre 3D tlač a bola schopná tvorby 3D tlačových rezov.

Ako prvé bolo potrebné si vyhľadať a naštudovať potrebnú literatúru k pochopeniu fungovania 3D tlače a hlavne k pochopeniu fungovania tvorby 3D tlačových rezov. Štúdium 3D tlače a 3D tlačiarň ukázalo ako najdostupnejší druh 3D tlačiarň typ FFF/FDM. Tieto tlačiarne sú hojne zastúpené v školách a vo firmách vďaka svojej cene a jednoduchosti. Z tohto dôvodu bol vybraný typ tlačiarne FFF/FDM pre vytvorenie cloudového nástroja pre tvorbu 3D tlačových rezov. Tieto zistenia viedli k zameraniu sa na nástroje pre prípravu 3D modelov pre 3D tlač a nástroje k tvorbe 3D tlačových rezov vhodné pre FFF/FDM 3D tlačiarne.

Z analýzy dostupných nástrojov vhodných pre 3D tlačiarne typu FDM na prípravu digitálnych 3D modelov pre 3D tlač boli získané potrebné informácie, ktoré boli využité pri návrhu aplikácie a následnej implementácii. Analýza dostupných nástrojov vhodných k tvorbe 3D tlačových rezov pre 3D tlačiarne typu FDM ukázala ako najvhodnejší nástroj k použitiu v bakalárskej práci nástroj CuraEngine. Zo získaných dát z analýz bol vytvorený návrh aplikácie a prototyp webového rozhrania, ktorý bol konzultovaný s možnými užívateľmi. Na základe podnetov od užívateľov bolo webové rozhranie upravené. Cloudová aplikácia bola implementovaná za pomoci jazykov Java, Javascript a HTML s použitím knižníc a frameworkov tretích strán.

Cloudová aplikácia umožňuje užívateľovi upravovať 3D modely pre 3D tlač s možnosťou tvorby 3D tlačových rezov v jednoduchom, prehľadnom, interaktívnom webovom rozhraní, ktoré je spustiteľné na všetkých najpoužívanejších webových prehliadačoch. Aplikáciu je možné používať na cloude a využívať ju pri tvorbe 3D tlačových rezov no napriek tomu aplikácia má ešte veľa možností, kde sa rozvíjať napríklad doplnenia funkcií do webového rozhrania na správu 3D modelov. Vo vývoji cloudovej aplikácie by som chcel naďalej pokračovať a implementovať tvorbu 3D tlačových rezov pre technológie SLA a SLS, ktoré vďaka predaju lacných 3D tlačiarň prenikajú postupne do domácnosti a do škôl.

Literatúra

- [1] *About us*. [Online; navštívené 01.05.2019].
URL <https://www.repetier.com/about-us/>
- [2] *FileSaver.js*. [Online; navštívené 23.04.2019].
URL <https://github.com/eligrey/FileSaver.js/>
- [3] *IaaS, PaaS and SaaS – IBM Cloud service models*. [Online; navštívené 23.04.2019].
URL <https://www.ibm.com/cz-cs/cloud/learn/iaas-paas-saas>
- [4] *Introduction to G-code*. [Online; navštívené 01.05.2019].
URL <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/introduction-gcode>
- [5] *JSZip*. [Online; navštívené 23.04.2019].
URL <https://github.com/Stuk/jszip>
- [6] *Knowledge Base*. [Online; navštívené 22.03.2019].
URL <https://www.3dhubs.com/knowledge-base>
- [7] *MatterControl - 3D Printing Software*. [Online; navštívené 01.05.2019].
URL <https://www.matterhackers.com/store/l/mattercontrol/sk/MKZGTDW6>
- [8] *MatterSlice*. [Online; navštívené 23.04.2019].
URL <https://github.com/MatterHackers/MatterSlice>
- [9] *Plans and Pricing*. [Online; navštívené 01.05.2019].
URL <https://cloud.astroprint.com/pricing>
- [10] *Selective Laser Sintering, Birth of an Industry*. [Online; navštívené 23.04.2019].
URL <https://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry>
- [11] *Spring Framework Overview*. [Online; navštívené 23.04.2019].
URL <https://docs.spring.io/spring/docs/current/spring-framework-reference/overview.html>
- [12] Anderson, M.: *What is Load Balancing?* Február 2017, [Online; navštívené 17.04.2019].
URL <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/what-is-load-balancing>
- [13] Barton, Z.: *What is a Cloud Application?* Apríl 2018, [Online; navštívené 17.04.2019].
URL <https://www.cloudbakers.com/blog/what-is-a-cloud-application>

- [14] Burget, R.: *ITW. Tvorba webových stránek*. [Online; navštívené 22.03.2019].
URL https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/ITW/private/prednasky/itw_p02.pdf
- [15] Columbus, L.: *The State of 3D Printing, 2018*. Máj 2018, [Online; navštívené 01.05.2019].
URL <https://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2018/05/30/the-state-of-3d-printing-2018>
- [16] Daly, J.: *The History of 3D Printing*. August 2013, [Online; navštívené 23.04.2019].
URL <https://statetechmagazine.com/article/2013/08/history-3d-printing-infographic>
- [17] Dirksen, J.: *Learning Three.js - the JavaScript 3D Library for WebGL (Second Edition)*. Packt Publishing Limited, 2015, ISBN 9781784392215.
- [18] France, A. K.: *Make: 3D Printing: The Essential Guide to 3D Printers 1st Edition*. Maker Media, 2013, ISBN 1457182939.
- [19] Gregurić, L.: *History of 3D Printing – When Was 3D Printing Invented?* December 2018, [Online; navštívené 23.04.2019].
URL <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [20] HALLOVÁ, M.: *Cloud computing – definícia, výhody a nevýhody*. [Online; navštívené 23.04.2019].
URL <http://www.slpk.sk/eldo/2013/zborniky/024-13/978-80-552-0983-8.pdf>
- [21] Horne, R.; Hausman, K. K.: *3D Printing For Dummies 2nd Edition*. For Dummies, 2017, ISBN 1119386314.
- [22] James Gosling, G. S. G. B., Bill Joy; Buckley, A.: *The Java® Language Specification Java SE 8 Edition*. Addison-Wesley Professional, 2014, ISBN 013390069X.
- [23] L. Jyothish Kumar, P. M. P.; Wimpenny, D. I.: *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. Springer, 2018, ISBN 978-981-13-0304-3.
- [24] Locker, A.: *Best 3D Slicer Software for 3D Printers in 2019 (Most are Free)*. Február 2019, [Online; navštívené 01.05.2019].
URL <https://all3dp.com/1/best-3d-slicer-software-3d-printer/>
- [25] MANUFACTUR3D: *3D Printing Technology Choice: FDM v/s SLA v/s SLS*. Február 2018, [Online; navštívené 01.05.2019].
URL <https://manufactur3dmag.com/3d-printing-technology-choice-fdm-v-s-sla-v-s-sls/>
- [26] Molitch-Hou, M.: *Controlling All of Manufacturing with 3DPrinterOS*. [Online; navštívené 01.05.2019].
URL <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/12891/Controlling-All-of-Manufacturing-with-3DPrinterOS.aspx>
- [27] Pecinovský, R.: *Myslíme objektově v jazyku Java*. Grada, 2009, ISBN 978-80-247-2653-3.

- [28] Redwood, B.; Schöffer, F.; Garret, B.: *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. 3D Hubs, 2017, ISBN 9082748509.
- [29] Rouse, M.: *cloud computing*. [Online; navštívené 23.04.2019].
URL <https://searchcloudcomputing.techtarget.com/definition/cloud-computing>
- [30] Rouse, M.: *WebSocket*. [Online; navštívené 23.04.2019].
URL <https://whatis.techtarget.com/definition/WebSocket>
- [31] Stepanek: *Aké materiály sa používajú pri 3D tlači?* Január 2019, [Online; navštívené 23.04.2019].
URL <https://stepanek3d.sk/ake-materialy-sa-pouzivaju-pri-3d-tlaci>
- [32] techopedia: *Scalability*. [Online; navštívené 23.04.2019].
URL <https://www.techopedia.com/definition/9269/scalability>
- [33] Varotsis, A. B.: *Introduction to FDM 3D printing*. [Online; navštívené 22.03.2019].
URL <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>
- [34] Varotsis, A. B.: *Introduction to SLA 3D Printing*. [Online; navštívené 22.03.2019].
URL <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing>
- [35] Vlkanova, F.: *Znáte Bootstrap?* online, [Online; navštívené 22.03.2019].
URL <http://www.easyweb.cz/blog/znete-bootstrap-detail-20>
- [36] Čápka, D.: *Lekce 1 - Úvod do CSS frameworku Bootstrap*. online, [Online; navštívené 22.03.2019].
URL <https://www.itnetwork.cz/html-css/bootstrap/kurz/uvod-do-css-frameworku-bootstrap/>
- [37] Škultéty, R.: *JavaScript - Programujeme internetové aplikace 2. aktualizované vydání*. Computer Press, 2004, ISBN 8025101444.

Príloha A

Obsah priloženého CD

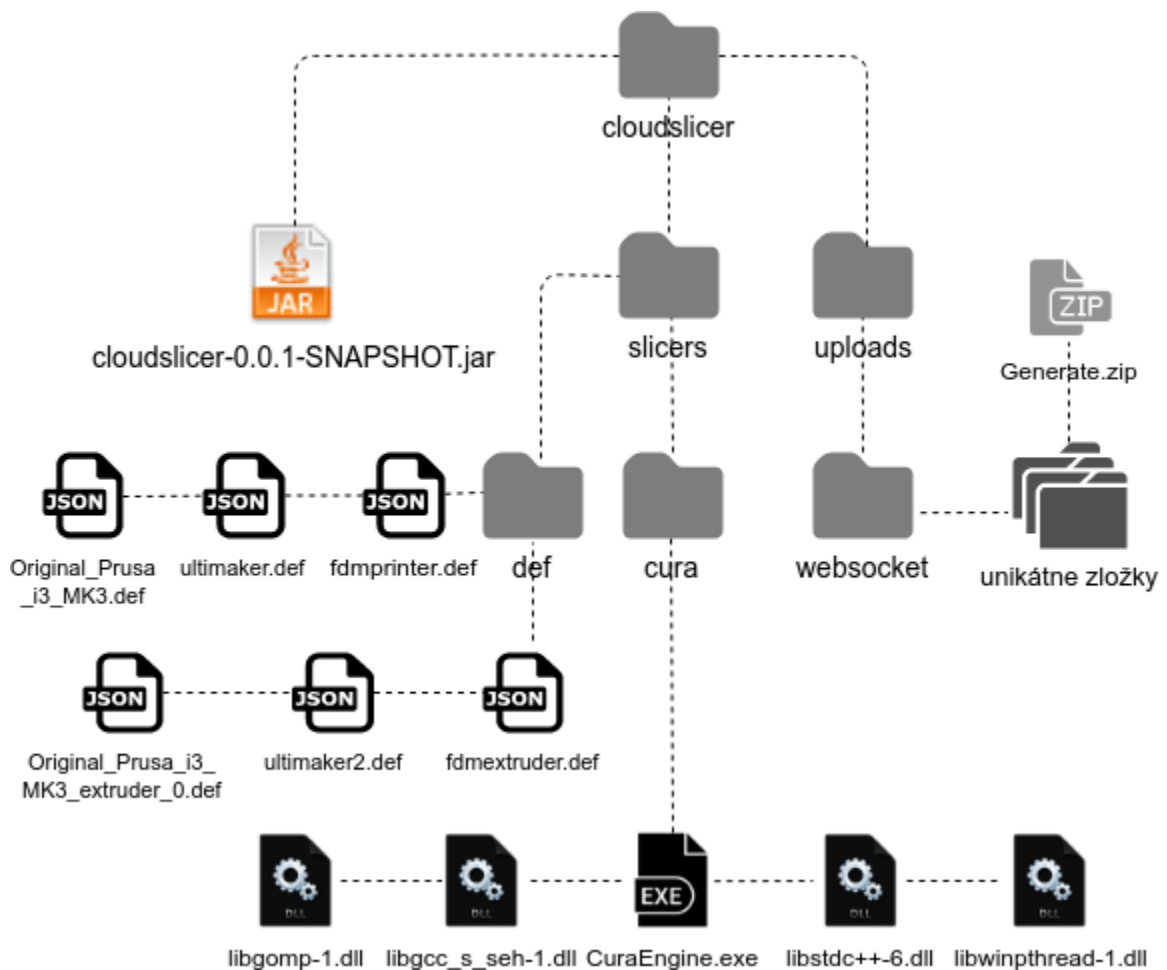
Priložené CD obsahuje nasledovné súbory a zložky :

- zložka **testy** - obsahuje sadu testov, ktoré boli použité pri testovaní.
- súbor **Readme.pdf** - obsahuje návod na spustenie cloudovej aplikácie, odkazy na potrebné aplikácie tretích strán a stručný popis cloudovej aplikácie.
- zložka **porovnanie** - obsahuje fotografie vo vysokej kvalite vytlačených 3D modelov, ktoré boli porovnávané v Podkapitola [3.2.8](#).
- zložka **cloudslicer** - obsahuje cloudovú aplikáciu v spustiteľnom súbore .jar a všetky potrebné súbory a zložky k správne fungovaniu aplikácie. Štruktúra zložky je dostupná v Príloha [B](#).
- zložka **zdroj** - obsahuje všetky súbory a zdrojové kódy cloudovej aplikácie.
- zložka **modely** - obsahuje všetky 3D modely, ktoré boli využité v tejto bakalárskej práci.
- súbor **xvejci00_BP.pdf** - obsahuje túto bakalársku prácu vo formáte .pdf.
- zložka **tex** - obsahuje zdrojové súbory pre generovanie technickej správy.

Príloha B

Štruktúra zložky

Obrázok B.1 predstavuje štruktúru zložky **cloudslicer**. Zložka obsahuje všetky potrebné súbory a zložky k správne chodu aplikácie. Na základe operačného systému je potrebné nainštalovať aplikácie tretích strán, ktorých špecifikáciu a odkazy na stiahnutie nájdeme v súbore **Readme**, ktorý sa nachádza na priloženom CD viď Príloha A. V tomto súbore sa taktiež nachádza návod k spusteniu aplikácie.



Obr. B.1: Štruktúra zložky cloudslicer

Príloha C

Konfiguračný súbor

Konfiguračný súbor je vo formáte JSON, ktorý je odosielaný spolu s 3D modelmi do cloudu od užívateľa ako jeden súbor vo formáte .zip. Podľa konfiguračného súboru sa generujú parametre pre nástroj k tvorbe 3D tlačových rezov s názvom CuraEngine.

```
1 [
2 {
3   "filename": "Stem.stl",
4   "scale": 1,
5   "rotation":
6     [
7       {"x": 0},
8       {"y": 0},
9       {"z": 0}
10    ],
11  "move":
12    [
13      {"x": 0},
14      {"y": 0},
15      {"z": 102.25000000000001}
16    ],
17  "layer": 0.1,
18  "support": false,
19  "infill": 20
20 }
21 ]
```

Výpis C.1: Príklad konfiguračného súboru

- **filename** - predstavuje názov 3D modelu, pre ktorý je nasledujúca konfigurácia
- **scale** - hodnota zväčšenia alebo zmenšenia 3D modelu vo všetkých 3 osách X, Y a Z. Ak je hodnota > 1 dochádza k zväčšeniu 3D modelu v prípade, že je hodnota > 0 a zároveň je hodnota < 1 dochádza k zmenšeniu modelu. V prípade, že je hodnota 1 model nemení rozmery.
- **rotation** - hodnota rotácie v osách X, Y a Z v radiánoch.

- **move** - hodnota posunu v osách X, Y a Z v centimetroch.
- **layer** - hodnota výšky vrstvy.
- **support** - hodnota false značí pre vybraný 3D model, že nebude generovaný podporný materiál v prípade, že bola zadaná hodnota true bude generovaný podporný materiál.
- **infill** - hodnota značí percentuálnu výplň modelu materiálom.

Príloha D

Konfigurácia Haproxy

Konfigurácia použitá na nastavenie nástroja HAProxy, ktorý bol použitý v bakalárskej práci ako load balancer. Konfigurácia obsahuje frontend smerovaný na IP adresu load balancera a inštancie cloudovej aplikácie v cloude, ktoré mu poskytujú backend. Rozloženie záťaže prebieha pomocou algoritmu round robin.

defaults

```
mode http
log global
option httplog
option http-server-close
option dontlognull
option redispatch
option contstats
retries 3
backlog 10000
timeout client 25s
timeout connect 5s
timeout server 25s
timeout http-keep-alive 1s
timeout http-request 15s
timeout queue 30s
timeout tarpit 60s
default-server inter 3s rise 2 fall 3
option forwardfor
```

frontend ft_web

```
bind 0.0.0.0:80 name http
maxconn 10000
```

default_backend bk_web

```
backend bk_web
balance roundrobin
server webserv1 10.0.13.15:8081 maxconn 10000 weight 10
cookie webserv1 check
server webserv2 10.0.13.14:8080 maxconn 10000 weight 10
```



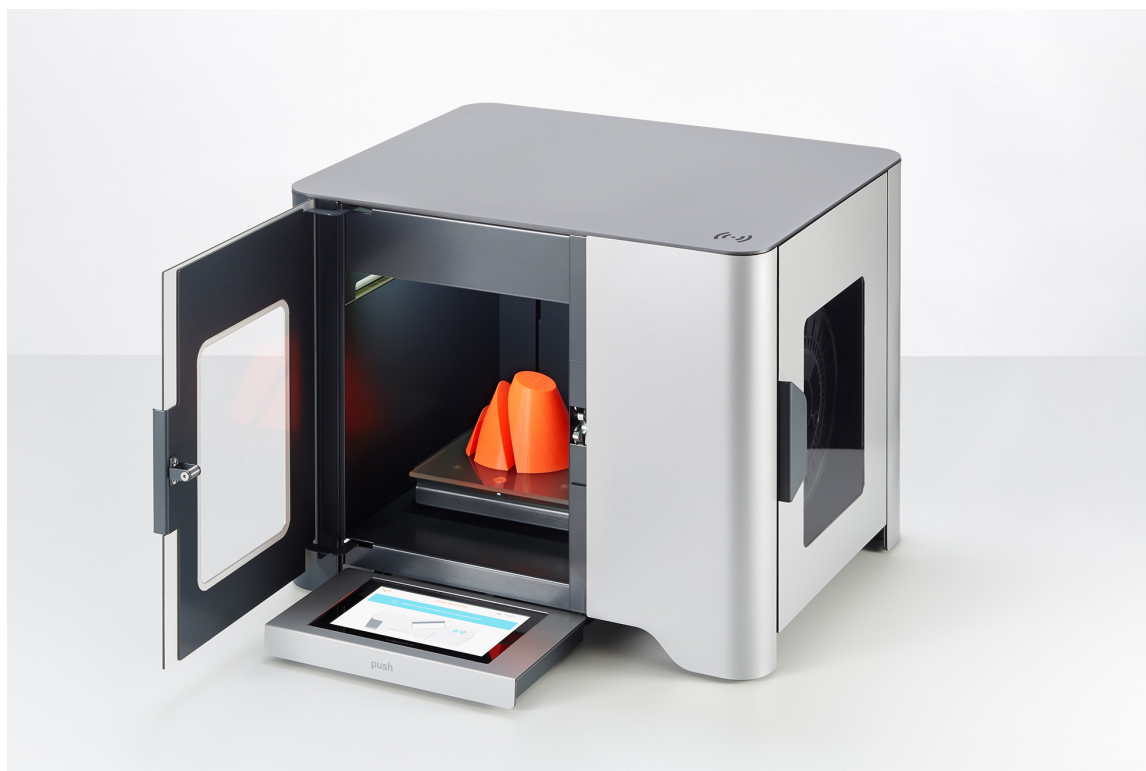
```
cookie webserv2 check
server webserv3 10.0.13.65:8082 maxconn 10000 weight 10
cookie webserv3 check
server webserv4 10.0.13.66:8083 maxconn 10000 weight 10
cookie webserv4 check
server webserv5 10.0.13.64:8084 maxconn 10000 weight 10
cookie webserv5 check
server webserv6 10.0.13.59:8085 maxconn 10000 weight 10
cookie webserv6 check
server webserv7 10.0.13.55:8086 maxconn 10000 weight 10
cookie webserv7 check
```

```
listen stats
  bind :32700
  stats enable
  stats uri /
  stats hide-version
  stats auth jon:doe
```

Príloha E

Porovnanie CuraEngine a Slic3r

V prílohe nájdeme sadu fotografií, ktoré boli zriadené pre porovnanie dostupných slicerov. Séria fotografií porovnáva kvalitu vygenerovaného tlačového rezu 3D modelu s názvom 3DBenchy. Tlačové rezy boli vygenerované slicermi CuraEngine a Slic3r a vytlačené na 3D tlačiarni Be3D Edee.



Obr. E.1: 3D tlačiareň Be3D Edee



Obr. E.2: CuraEngine



Obr. E.3: Slic3r



Obr. E.4: CuraEngine



Obr. E.5: Slic3r



Obr. E.6: CuraEngine



Obr. E.7: Slic3r



Obr. E.8: CuraEngine



Obr. E.9: Slic3r