

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD
KATEDRA MATEMATIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**PŘÍPRAVA GEOGRAFICKÝCH DAT
PRO 3D TISK PODROBNÉHO MODELU BUDOVY**

Text zadání.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a následné obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr magisterského studia oboru Geomatika na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené odborné literatury a zdrojů informací, který je součástí práce.

V Plzni, dne 26. května 2015

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu práce Ing. Karlu Jedličkovi, Ph.D. za pomoc a ochotu při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Janu Nejedlému a Radkovi Barvířovi za ochotu a pomoc při 3D tisků modelů budov a Karlu Bobkovi, kastelánu zámku Kozel, za vstřícnost při poskytnutí fotodokumentace na zámku Kozel.

Také chci poděkovat Ing. Stanislavu Žofkovi a Ing. Veře Palečkové za umožnění studia při práci, pochopení a vstřícné jednání.

Abstrakt

Cílem diplomové práce je prozkoumat vztah 3D geotechnologií a technologií pro 3D tisk metodami Rapid Prototyping. Dále je vytvořen postup přípravy geografických dat pro 3D tisk. Práce má prokázat průchodnost 3D geografických dat z CAD nebo GIS aplikací do výsledného fyzického 3D modelu, to vše na příkladě podrobných modelů budov. Posledním úkolem je pokus 3D tisku modelu připraveného podle navrženého postupu.

Klíčová slova

3D model, 3D tisk, geografická data, Rapid Prototyping, topologické kontroly

Abstract

The objective of this diploma thesis is to explore the relation of 3D geotechnologies and technologies for 3D printing with help of Rapid Prototyping methods. Moreover, the process of 3D data preparing for 3D printing is created. Work has to demonstrate the throughput of 3D geographic data from CAD and GIS applications to the final physical 3D model, all on the example of the detailed building models. The final task is a test of 3D print of the model prepared by the suggested procedure.

Key words

3D model, 3D Printing, geospatial data, Rapid Prototyping, validating a topology

Obsah

Úvod.....	12
1 Technologie Rapid Prototyping a 3D tisk	13
1.1 Úvod do problematiky.....	13
1.2 Technologie založené na bázi tekutých materiálů	16
1.2.1 Stereolitografie (SLA)	16
1.2.2 Solid Ground Curing (SGC)	18
1.2.3 PolyJet 3D Printing (PolyJet)	19
1.3 Technologie založené na bázi práškových materiálů.....	20
1.3.1 Selective Laser Sintering (SLS).....	20
1.3.2 Direct Metal Laser Sintering (DMLS).....	22
1.3.3 Inkjet 3D printing (3DP).....	22
1.4 Technologie založené na bázi tuhých materiálů	24
1.4.1 Fused Deposition Modeling (FDM)	24
1.4.2 Laminated Object Manufacturing (LOM)	25
1.4.3 Multi Jet Modeling (MJM)	27
1.4.4 Technologie Model Maker 3D Plotting (MM3DP) a Ballistic Particle Manufacturing (BPM)	28
1.5 Souhrn základních vlastností jednotlivých technologií Rapid Prototyping	30
2 Využití technologie Rapid Prototyping pro tisk 3D modelů geografických objektů ...	31
3 Výběr metod Rapid Prototyping pro tisk 3D modelů geografických objektů za účelem prezentace	32
3.1 Základní vlastnosti fyzického 3D modelu geografického objektu.....	32
3.2 Základní parametry 3D tiskáren.....	33
3.3 Vztahy mezi vlastnostmi 3D modelu a parametry 3D tiskáren.....	33
3.4 Posouzení jednotlivých metod Rapid Prototyping pro výběr	34
4 Obecný postup přípravy geografických dat pro 3D tisk vybranými technologiemi Rapid Prototyping	40
4.1 Schéma postupu přípravy geografických dat	40
4.2 Vstupní geografická data pro 3D tisk.....	40
4.2.1 Specifikace vstupních geografických dat	40
4.2.2 Problematika vstupních geografických dat.....	41
4.3 Harmonizace geografických 3D dat.....	41
4.4 Oprava topologie 3D modelu	43
4.4.1 Topologické chyby 3D modelu.....	44
4.4.2 Aplikace použité pro detekce a odstranění topologických chyb.....	46
4.5 Úprava 3D modelu pro tisk vybranými technologiemi Rapid Prototyping	47
4.5.1 Pevnost a přesnost 3D modelu.....	48
4.5.2 Velikost 3D modelu	48
4.5.3 Barevnost	49

4.6	Export virtuálního 3D modelu	50
4.6.1	Formáty pro 3D tisk vybranými metodami 3D Rapid Prototyping	50
4.6.2	Možnosti exportu 3D modelu do vybraných formátů.....	50
5	Ukázka přípravy geografických dat pro 3D tisk na příkladu podrobného modelu budovy	51
5.1	Vstupní data	51
5.2	Harmonizace vstupních dat	53
5.3	Editace 3D modelů	53
5.4	Topologické opravy	56
5.5	Příprava 3D modelu kaple pro tisk technologií Inject 3D printing	59
5.6	Příprava 3D modelu kaple pro tisk technologií Fused Deposition Modeling	59
5.7	Příprava 3D modelu jízdního okružního okruhu pro tisk technologií Inject 3D printing	61
6	3D tisk modelů budov	62
6.1	Tisk 3D modelu kaple	62
6.2	Tisk 3D modelu jízdního okružního okruhu	63
6.3	Shrnutí	63
	Diskuse.....	64
	Závěr	65
	Použité zdroje a literatura	66
	Seznam příloh	69
	Obsah příloženého CD	70
	Přílohy.....	71

Použité zkratky

ABS	Akrylonitril Budatiden Styren
CAD	Computer Aided Desing
CityGML	City Geography Markup Language
COLLADA	Collaborative Desing Activity
DGN	Desing
DWG	Drawing
GIS	Geografický Informační Systém
GML	Geography Markup Language
KML	Keyhole Markup Language
LOD	Level of Detail
OBJ	Object
OGC	Open Geospatial Markup Language
STL	STereoLitografy
VRML	Virtual Reality Modeling Language
WGS84	Word Geodetic Systém 1984
X3D	Extensible 3D
XML	Extensible Markup Language

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Proces vzniku fyzického 3D modelu reálného objektu	14
Obr. 1.2 Příprava virtuálního modelu pro 3D tisk	15
Obr. 1.3 Obecný princip přípravy virtuálního 3D modelu pro tisk metodami RP, zdroj Ferda (2007).....	15
Obr. 1.4 Stereolitografie, zdroj AdFab (2009).....	17
Obr. 1.5 Modely zhotovené metodou SLA, zdroj Globatek (2015)	17
Obr. 1.6 Technologie Solod Ground Curing, zdroj Hájek (2012)	18
Obr. 1.7 Technologie PolyJet, zdroj Globatek (2015).....	19
Obr. 1.8 Modely zhotovené technologií PolyJet, zdroj Stratasys (2015)	20
Obr. 1.9 Technologie Selective Laser Sintering, zdroj AdFab (2009)	21
Obr. 1.10 Technologie Inkjet 3D Printing, zdroj AdFab (2009)	23
Obr. 1.11 3D model zhotovený metodou 3D Printing, zdroj Globatek (2015)	23
Obr. 1.12 Technologie Fused Deposition Modeling, zdroj AdFab (2009).....	24
Obr. 1.13 Modely vyhotovené metodou FDM, zdroj Hájek (2012)	25
Obr. 1.14 Technologie Laminated Object Manufacturing, zdroj AdFab (2009).....	26
Obr. 1.15 Modely vyhotovené technologií LOM	27
Obr. 1.16 Technologie Multi Jet Modeling, zdroj AdFab (2009).....	27
Obr. 1.17 Modely zhotovené technologií MJM, zdroj Globatek (2015)	28
Obr. 1.18 a) Model Maker 3D Plotting, b) Ballistic Particle Manufacturing, zdroj Hájek (2012).....	29
Obr. 1.19 Modely vyhotovené technologiemi Model Maker 3D Plotting, zdroj Hájek (2012).....	29
Obr. 3.1 Modro-žluto-černá paleta barev, zdroj Stratasys (2015)	35
Obr. 3.2 Ukázky plnobarevných 3D modelů terénu a stavby, zdroj McorTech (2013)	37
Obr. 3.3 Ukázky plnobarevných 3D modelů terénu a stavby, zdroj McorTech (2013)	38
Obr. 4.1 Schéma postupu přípravy 3D geodat.....	40
Obr. 4.2 Příklady chyb narušujících topologii 3D modelu:	45
Obr. 4.3 Chyba průniku a její řešení, podle Žára (2004)	45
Obr. 4.4 Chybná orientace normály plochy objektu	46
Obr. 4.5 Model reliéfu vytvořený pomocí metody 3DP, zdroj Šuba (2010)	49
Obr. 5.1 Drátový 3D model kaple vizualizovaný v <i>MicrtoStation V8i</i>	52
Obr. 5.2 3D model budovy kaple (LoD4).....	52
Obr. 5.3 Importovaný model interiéru kaple zámku Kozel	53
Obr. 5.4 3D modely exteriéru a interiéru kaple připravené k editaci	54
Obr. 5.5 Dialogové okno <i>Laers</i> a příklad jeho využití	54
Obr. 5.6 Ukázka struktury oblouků oken a kleneb importovaného 3D modelu kaple	55
Obr. 5.7 3D model kaple (exteriéry a interiéry) pro účely virtuální prezentace	56
Obr. 5.8 Výsledek kontrol topologie 3D modelu kaple	56
Obr. 5.9 Zbytečné úsečky a jejich oprava.....	57
Obr. 5.10 Úsečka nacházející se volně v prostoru a její oprava	57

Obr. 5.11 Ploška nacházející se volně v prostoru a její oprava	57
Obr. 5.12 Otvor a jeho oprava	58
Obr. 5.13 Chybná tloušťka stěny a její odstranění.....	58
Obr. 5.14 Překrývající se úsečka a ploška	58
Obr. 5.15 Chybná a správná orientace normál ploch.....	59
Obr. 5.16 Řez kaple	59
Obr. 5.17 Levá strana kaple připravená pro tisk metodou FDM	60
Obr. 5.18 Levá strana kaple připravená pro tisk v prostředí Slic3r 1.2.6.....	60
Obr. 5.19 Pracovní prostředí aplikace Slic3r.....	61
Obr. 5.20 Řez 3D modelu budovy jízdárny	61
Obr. 6.1 Pracovní prostředí aplikace netFab.....	62

Seznam tabulek

Tab. 1.1 Souhrn základních vlastností technologií RP, zpracováno dle AdTech (2010)	30
Tab. 3.1 Přidělené hodnoty vlastnostem 3D modelu geobjektu	33
Tab. 3.2 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku SLA a SGC.....	34
Tab. 3.3 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku PolyJet.....	35
Tab. 3.4 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku SLS a DMLS	36
Tab. 3.5 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku 3DP.....	36
Tab. 3.6 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku FDM	37
Tab. 3.7 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku LOM.....	37
Tab. 3.8 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku MJM	38
Tab. 3.9 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku MM3DP a BPM	38
Tab. 3.10 Posouzení vhodnosti technologií RP pro tisk 3D modelů geobjektů	39
Tab. 6.1 Shrnutí parametrů použitých 3D tiskáren	64

Úvod

Rozvoj 3D modelování s sebou přinesl i potřebu nových technologií pro 3D tisk, které v posledních letech zažívají velký rozmach. Pojem 3D tisku je úzce provázán s pojmem Rapid Prototyping. Rapid Prototyping je skupina technologií pro rychlé zhotovení prototypů, forem pro lití a výsledných výrobků postupným nanášením materiálu po tenkých vrstvách. Technologie 3D tisku metodami Rapid Prototyping je schopna vytvářet náročné tvary a konstrukce, které by bylo obtížné zhotovit klasickými způsoby výroby. Technologie má široké uplatnění v medicíně, stomatologii, strojírenství atd.

Tato diplomová práce je zaměřena na využití 3D tisku pomocí metod Rapid Prototyping v geografických oborech. V současné době lze těžko najít kompletní a rozsáhlé vědecké studie zabývající se řešením 3D tisku v geooboru. Proto bylo nezbytné v diplomové práci využít informace od komerčních internetových zprostředkovatelů 3D tisku, kteří se zabývají propagací zboží a služeb v tomto oboru a mají načerpané znalosti a zkušenosti z praxe.

Práce by měla odpovědět na otázku: „Jak z heterogenních zdrojových geografických dat vytisknout kvalitní 3D model geografického objektu pro účely prezentace?“ a dále na otázky, s ní související: „Jakou technologii Rapid Prototyping je třeba použít, aby 3D model geografického objektu splnil svůj účel?“, „Jaký postup by se měl zvolit pro přípravu 3D dat v digitální podobě, aby výsledný 3D model mohl projít 3D tiskem?“

První kapitola seznamuje čtenáře s problematikou technologií Rapid Prototyping pro 3D tisk. V této kapitole jsou popsány nejčastěji využívané technologie 3D tisku, které se mohou využít pro tisk 3D modelů geografických objektů.

Další kapitoly jsou zaměřeny na využití 3D tisku v geooborech a na posouzení vhodnosti jednotlivých metod Rapid Prototyping pro 3D tisk modelů geografických objektů. Dále byl navržen obecný postup přípravy geografických dat pro 3D tisk vybranými technologiemi Rapid Prototyping. Postup přípravy je následně testován na příkladě podrobných 3D modelů budov kaple a jízdárny, které se nachází v areálu Zámku Kozel ve Štáhlavech. Na závěr jsou řešeny možnosti 3D tisku pomocí několika odlišných technologií Rapid Prototyping pro tisk modelů připravených pro prezentaci.

1 Technologie Rapid Prototyping a 3D tisk

Cílem kapitoly je popsat vybrané technologie Rapid Prototyping. Pro každou technologii Rapid Prototyping pro 3D tisk je v textu vyčleněna samostatná podkapitola, ve které je popsán postup práce, modelovací materiály, oblast využití, výhody/nevýhody a příklady 3D tiskáren. Tato kapitola byla zpracována převážně podle použité literatury AdTech (2010), Ferda (2007) a Hájek (2012). Na základě uvedených zdrojů vznikl soubor získaných poznatků.

1.1 Úvod do problematiky

Rapid Prototyping (dále v textu jen RP) vyhotovuje prototypy a výsledné výrobky zejména metodami aditivní výroby¹. Za posledních 25 let prošly technologie RP rychlým vývojem, při kterém vznikla celá řada nových metod a zařízení. RP nachází své uplatnění v takových oborech, jako jsou: strojírenství, elektrotechnika, medicína, stavebnictví, umělecká výroba, spotřební průmysl (např. obuvnictví), geografie (příklad viz Rase (2014)), GIS (příklad viz Protocom (2014)). Technologie RP napomáhají zlepšit vývojový proces a kvalitu výsledných produktů.

Podle Technomat (2013) mezi technologie RP patří technologie *vakuového lití a 3D tisk*. Tato diplomová práce se zabývá technologiemi RP pro 3D tisk.

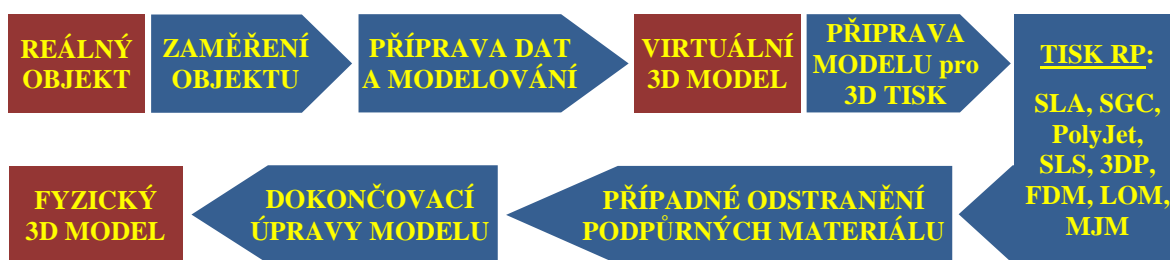
Pro lepší přehled možné technologie RP rozdělit:

- 1) podle použitého spotřebního materiálu 3D tiskáren:
 - na bázi tekutých materiálů (SLA, SGC, PolyJet),
 - na bázi práškových materiálů (SLS, DMLS, 3DP),
 - na bázi tuhých materiálů (FDM, LOM, MJM, MM3DP a BPM),
- 2) podle systému přidávání materiálu:
 - po vrstvách (SLA, SGC, SLS, DMLS, 3DP, LOM),
 - po vláknech (FDM),
 - po kapkách (MJM, PolyJet, MM3DP, BPM);
- 3) podle velikosti pracovního prostoru 3D tiskáren:
 - malé – do 210×210×210 mm,
 - střední – do 460×460×1070 mm,
 - velké – nad 460×460×1070 mm.

Jak již bylo zmíněno výše, pojem RP zahrnuje skupinu technologií pro rychlou výrobu 3D modelů pro různé účely. Tudíž je možné RP označit za proces, který byl v této diplomové práci rozdělen do jednotlivých kroků, ukázaných na obr. 1.1. Jednotlivé kroky budou vysvětleny v textu níže. Z obrázku je patrné, že proces vývoje a výroby 3D modelu zde zahrnuje také zaměření reálného objektu. Způsoby zaměření pro účel 3D tisku je

¹ 3D model vzniká postupným nanášením tenkých 2D vrstev na sebe a ty se poté vzájemně spojují tavením nebo lepením. Metoda se využívá u procesů, při nichž vzniká koncový výrobek, nikoliv prototyp. 3D-tisk (2014)

vhodné rozdělit podle velikosti reálného objektu. Je třeba brát v úvahu, že reálný objekt nemusí existovat, respektive existuje jen jeho virtuálně navržený model. V tom případě fáze zaměření objektu samozřejmě odpadá.



Obr. 1.1 Proces vzniku fyzického 3D modelu reálného objektu

REÁLNÝ OBJEKT

Reálný objekt – existující objekt, jehož 3D model je určen pro tisk.

ZAMĚŘENÍ

Existující objekt je nutno nejprve zaměřit. Pro 3D tisk můžeme rozlišovat způsoby zaměření podle velikosti objektů:

- objekty malých rozměrů lze zaměřit laserovým skenováním, pomocí ručního skeneru, a využitím měřicích přístrojů (posuvné měřítko, mikrometry apod.)
- rozsáhlé objekty (interiéry a exteriéry staveb, celá města apod.) lze zaměřit klasickými geodetickými metodami, metodou pozemní nebo letecké fotogrammetrie, pozemním nebo leteckým laserovým skenováním a dálkovým průzkumem Země.

PŘÍPRAVA DAT A MODELOVÁNÍ

Naměřená data mohou mít různorodý charakter (souřadnice, mračna bodů, kóty atd.) v závislosti na metodě měření reálného objektu. V rámci přípravy je vhodné naměřená data převést do takové formy, která bude zpracovatelná při modelování konečného virtuálního 3D modelu objektu, např. výkresová dokumentace nebo 3D model. Je třeba brát v úvahu, že ne každý virtuální 3D model je vhodný k 3D tisku. Pro 3D tisk je nutné respektovat určité technologické limity, viz odstavec o přípravě modelu pro 3D tisk.

Vývoj RP a s tím související konstruktérské práce jsou úzce spojeny s využitím výpočetní techniky a 3D CAD systémů. Při vytváření virtuálního 3D modelu mohou být také simulovány pevnostní a obtokové zkoušky nebo kolize součástí v sestavách. Je nezbytné aby 3D model obsahoval kompletní informace o geometrii tělesa.

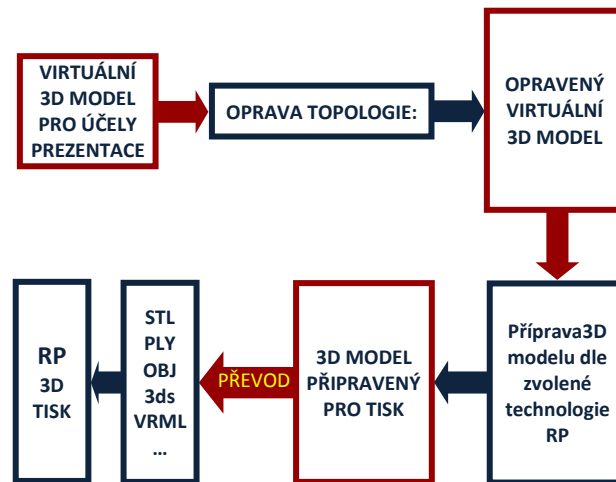
PŘÍPRAVA MODELU PRO 3D TISK

V této fázi je již hotový virtuální 3D model, který je nutné připravit pro tisk vybranými technologiemi RP.

Není zaručeno, že po dokončení konstrukčních prací bude k dispozici topologicky bezchybný model. V každém případě je třeba pomocí speciálních aplikací provést kontroly

a zjistit, zda je model topologicky čistý a případné chyby opravit. Jinak software 3D tiskáren nebude schopen model zpracovat.

Technologie RP mají svoje specifika, jimiž jsou technické parametry jednotlivých tiskáren (stavba podpor, tloušťka stěn, přesnost, velikost pracovního prostoru, barevnost atd.). Pro tisk kvalitního modelu je nutné model přizpůsobit parametrům jednotlivých tiskáren (např. úprava tloušťky stěn nebo rozdělení modelu na části). Dále virtuální 3D model je převeden do formátu pro tisk, např. STL, VRML, atd. (více kap. 4.6). Obecné schéma přípravy dat lze vidět na obr. 1.2.



Obr. 1.2 Příprava virtuálního modelu pro 3D tisk

Příprava dat pro 3D tisk je hlavním tématem této diplomové práce. Tato problematika bude podrobně rozebrána v kap. 4.

RP (RAPID PROTOTYPING - 3D TISK)

V rámci této fáze procesu výroba 3D modelů vyžaduje specifické zařízení – 3D tiskárnu. 3D tiskárnu řídí speciální software, který pracuje na principu rozložení virtuálního modelu v příslušném formátu (STL, VRML, atd.) do tenkých vrstev a jejich následném sestavení do reálného modelu v pracovním prostoru tiskárny. Obr. 1.2 ukazuje postup v rámci přípravy virtuálního 3D modelu k tisku. Ferda (2007)



Obr. 1.3 Obecný princip přípravy virtuálního 3D modelu pro tisk metodami RP, zdroj Ferda (2007)

ODSTRANĚNÍ PODPŮRNÝCH MATERIÁLŮ

Po dokončení 3D tisku metodami SLA, SGC, MM3DP, LOM, FDM, je třeba manuálně a velmi pečlivě odstranit podpůrný materiál. U ostatních metod 3D tisku (SLS, 3DP) je tato část procesu vzniku modelu nepodstatná.

DOKONČOVACÍ ÚPRAVY MODELU

Dokončovací práce jsou většinou manuálního charakteru. Po dokončení tisku je třeba očistit, případně vyhladit, povrch modelu, nebo jej opláchnout ve speciálních chemikáliích a rozpouštědlech. Pro zlepšení povrchových vlastností může být model opatřen speciálním nátěrem nebo pískován. Ferda (2007)

FYZICKÝ 3D MODEL

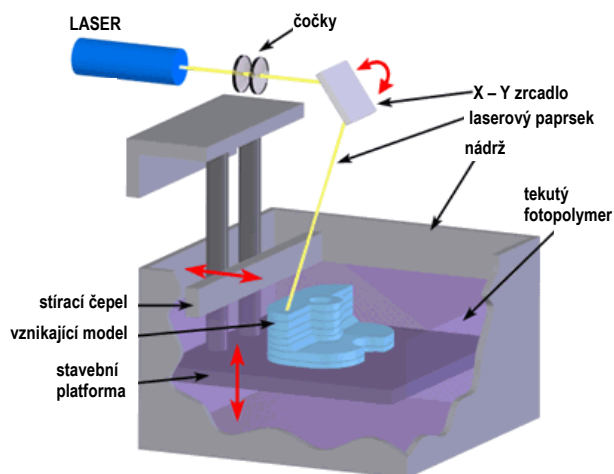
Tímto pojmem se rozumí vytištěný, upravený výsledný 3D model, případně výsledný prototyp reálného objektu.

V současné době existuje velké množství metod RP. V následujících podkapitolách budou popsány nejčastěji používané technologie RP, které se nejvíce prosadily na trhu a lze je označit za základní technologie RP. Technologie jsou uvedené v pořadí podle použitého spotřebního materiálu dle rozdělení na str. 4.

1.2 Technologie založené na bázi tekutých materiálů

1.2.1 Stereolitografie (SLA)

SLA je nejstarší technologie používaná od roku 1986. Technologie je založena na postupném vytváření 2D vrstev. Jednou ze součástí pracovní komory stroje pro výrobu modelu je nádrž, která je naplněna fotocitlivou tekutou pryskyřicí (fotopolymer). Stavební platforma se ponořuje pod hladinu fotopolymeru do hloubky rovnající se tloušťce jedné vrstvy. Působením laserového paprsku skrz optickou soustavu se fotopolymer vytváří. Po vytváření jedné vrstvy zarovnává stírací čepel nanesený fotopolymer na požadovanou tloušťku a proces se opakuje do vzniku fyzického 3D modelu. Po dokončení tisku je třeba povrch modelu očistit, upravit a opracovat v UV komoře, která modelu dodává požadovanou integritu povrchu.



Obr. 1.4 Stereolitografie, zdroj AdFab (2009)

Modelovací materiál: je na bázi fotopolymeru nebo pryskyřice.

Tloušťka vrstvy (vertikální rozlišení): 0,05–0,13 mm.

Minimální tloušťka stěny modelu: není uvedeno ve zdrojích.

Přesnost výtisku: cca 0,01–0,02 mm na 1 cm. Globatek (2015)

Výhody:

- + velká přesnost modelů, dostatečná jakost povrchu,
- + zhotovení objemnějších modelů,
- + široký výběr materiálů,
- + bezobslužný provoz, plynulý průběh procesu výroby.

Nevýhody:

- potřeba úpravy povrchu, odstranění podpor stabilizujících model během tisku,
- pomalý proces tvrzení polymeru – vyžaduje sušení,
- malá tepelná odolnost vytvořených modelů u některých materiálů.

Oblast využití: technologie se používá v automobilovém průmyslu, pro výrobu forem pro lití a vstřikování a pro výrobu modelu s přesnými detaily.



Obr. 1.5 Modely zhotovené metodou SLA, zdroj Globatek (2015)

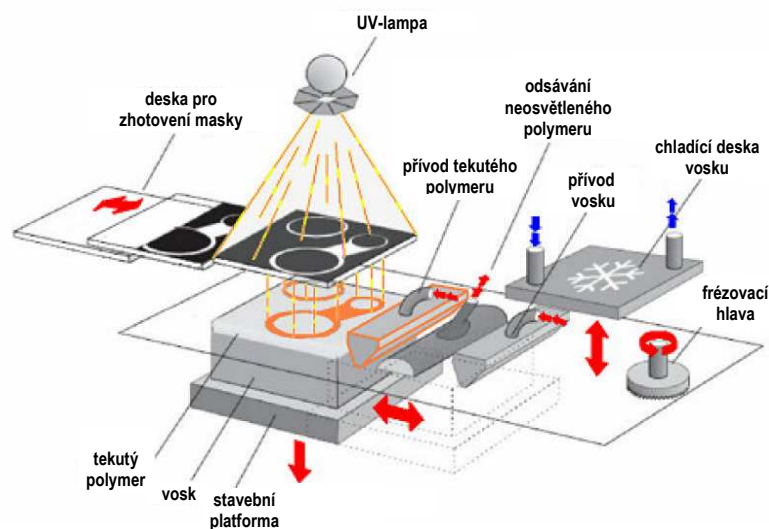
Výrobci 3D tiskáren technologii SLA:

- 3D Systems (viz v 3D Systems (2015)),
- Formlab².

1.2.2 Solid Ground Curing (SGC)

Technologie nejprve ze 3D modelu vytvoří jednotlivé řezy, ze kterých jsou pomocí speciálního programu vytvořené masky. Jsou to skleněné šablonové desky, potištěné vrstvou toneru, nesoucí obrysy vytvářené vrstvy. Tyto šablonové desky jsou umístěné nad nosnou deskou s nanesenou tenkou vrstvou fotopolymerní pryskyřice, kterou krátkou dobu osvětluje UV lampa. Tekutá pryskyřice pod nepotištěnou částí masky ztvrdne. Nevytvrzená pryskyřice pod potištěnou částí je vakuově odsáta.

Na prázdná místa po odsáté pryskyřici je nanesen roztavený výplňový vosk, který slouží jako podpora pro další vrstvu. Hotový model je v některých případech na závěr vytvrzován pomocí ozařování UV lampou. Nakonec, po vytvrzení, je třeba chemicky (kyselinou citronovou) odstranit podpory a přebytečný materiál ve formě vosku (obr. 1.5).



Obr. 1.6 Technologie Solid Ground Curing, zdroj Hájek (2012)

Modelovací materiál: fotopolymerní pryskyřice.

Tloušťka vrstvy (vertikální rozlišení): 0,1–0,2 mm. Hájek (2012)

Minimální tloušťka stěny modelu: 0,1–0,2 mm.

Přesnost výtisku: $\pm 0,084$ mm. KVS (2012)

Výhody:

- + malý smršťovací efekt během chladnutí,
- + vysoká pevnost a stabilita,
- + proces neprodukuje výpary z pryskyřice,
- + spolehlivost a přesnost,

² <http://formlabs.com/>

- + možnost tvorbu modelu přerušit pro odstranění nezdařilých vrstev a dále pokračovat v tvorbě modelu.

Nevýhody:

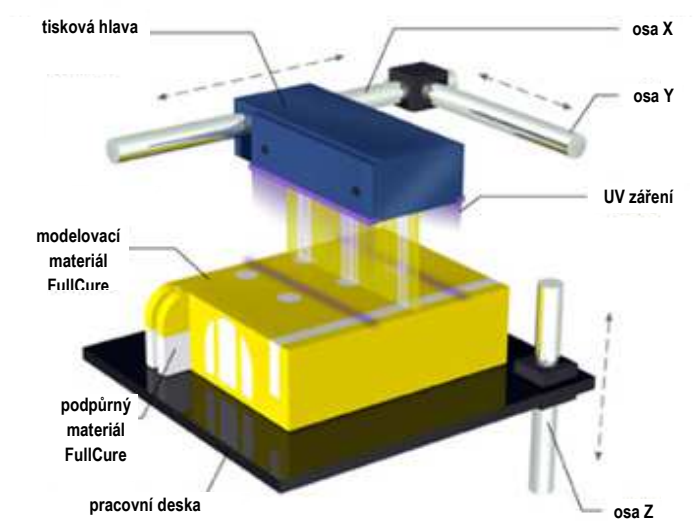
- objemná a hlučná zařízení,
- složitý proces vyžaduje odbornou obsluhu,
- problematické odstranění vosku – podpůrného materiálu v místech se složitou geometrií,
- při obrábění jednotlivých vrstev vznikají hobliny, které znečišťují pracovní prostředí a tvoří odpad.

Oblast využití: technologie vhodná pro modely s vysokou mírou detailů, hlavní využití je v ověřování designu, funkce a smontovatelnosti strojních součástí, průzkum trhu. Za zmínku stojí využití v medicíně pro výrobu chirurgických pomůcek na míru pacientovi, zakázkových protéz apod.

3D tiskárny technologii SGC vyvinula izraelská firma Cubital Ltd a jedním z představitelů je tiskárna SGC 4600. Hájek (2012)

1.2.3 PolyJet 3D Printing (PolyJet)

Technologie PolyJet pracuje na principu inkoustové tiskárny, jen místo inkoustu vystřikuje tekutý fotopolymer. Tisknoucí zařízení tvoří tisková hlava a pracovní deska. Tisková hlava je propojena se zásobníkem tekutého fotopolymeru, který vystřikuje na pracovní desku. Do tiskové hlavy je z obou stran zabudováno UV světlo, které okamžitě vytvrzuje tenké vrstvy fotopolymeru naneseného na pracovní desce. Technologie umožňuje tisk speciálně vyvinutého a snadno odstranitelného gelového podpůrného materiálu.



Obr. 1.7 Technologie PolyJet, zdroj Globatek (2015)

Existuje další varianta dané technologie – Polyjet Matrix³. Tato technologie je schopná současně vystříkovat několik odlišných fotopolymerových materiálů v přednastavených kombinacích. Polyjet Matrix umožňuje výrobu kompozitních materiálů. Zároveň dokáže vytisknout barevný model, u kterého lze v jednom tiskovém procesu kombinovat až 45 barev. Tím nabízí neomezené možnosti tisku 3D modelů různorodých vzhledů, fyzikálních vlastností a funkčnosti. Stratasys (2015)

Modelovací materiál: fotopolymerové materiály s vlastnostmi ABS⁴ a polypropylenu, elastické fotopolymery, čiré fotopolymery nebo bio-fotopolymery.

Tloušťka vrstvy (vertikální rozlišení): 0,016–0,33 mm.

Minimální tloušťka stěny modelu: cca 0,1 mm. Stratasys (2015)

Přesnost výtisku: 0,1–0,3 mm. Objet (2015)

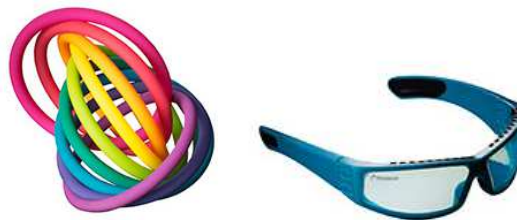
Výhody:

- + kombinace kompozitních materiálů v průběhu jednoho tisku,
- + snadné odstranění podpůrného materiálu,
- + vysoké rozlišení tisku, hladký povrch modelu,
- + barevnost – 45 barev během jednoho tisku,
- + schopnost tisknout složitou geometrii modelu.

Nevýhody:

- všechny materiály jsou na bázi fotopolymerů,
- finanční náročnost jak tisku, tak i pořizovacích nákladů.

Oblast využití: konceptuální modelování, výroba prototypů, testování ergonomie, architektura, design, stomatologie atd.



Obr. 1.8 Modely zhotovené technologií PolyJet, zdroj Stratasys (2015)

Poskytovatelem 3D tiskáren používajících technologii PolyJet je společnost Startasys. Stratasys (2015)

1.3 Technologie založené na bázi práškových materiálů

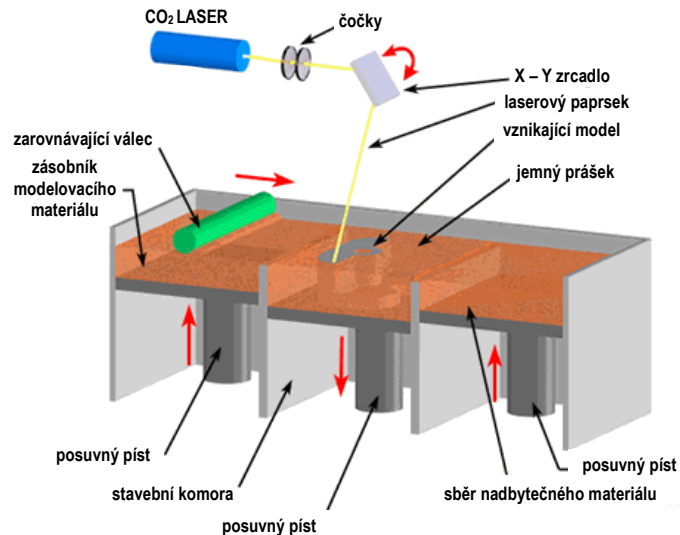
1.3.1 Selective Laser Sintering (SLS)

SLS je metoda zapékání práškového materiálu laserovým paprskem (obr. 1.9). Na podkladovou desku je nanášena první vrstva práškového materiálu. Vytvoření první vrstvy

³ <http://www.objet.cz/3D-tiskarny/technologie-polyjet>

⁴ ABS – Akrylonitril Butadien Styren

probíhá tímto způsobem: prášek je působením laseru nataven a dochází k jeho spékání pouze v požadovaném místě, přitom okolní materiál zůstává nespečen a slouží jako podpora výsledného 3D modelu. Po dokončení první vrstvy se nosná deska sníží o tloušťku jedné vrstvy a další vrstva prášku je nanášena speciálním válečkovým mechanismem a proces spékání se opakuje do vzniku 3D modelu.



Obr. 1.9 Technologie Selective Laser Sintering, zdroj AdFab (2009)

Modelovací materiál – velmi jemný prášek (částice 20–100 μm) z takových materiálů jako: polyamidy, polykarbonáty, nylon, termoplastické elastomery, kov, keramika a upravený slévárenský písek.

Tloušťka vrstvy (vertikální rozlišení): 0,02–0,15 mm. Hájek (2012)

Minimální tloušťka stěny modelu: 0,4–0,6 mm.

Přesnost výtisku: $\pm 0,1$ mm.

Výhody:

- + modely vyrobené metodou SLS vynikají svojí pevností,
- + modely nepotřebují podpory,
- + velký výběr použitelných materiálů,
- + není potřeba dokončovacích prací.

Nevýhody:

- relativně hrubý povrch vzhledem k velikosti zrn použitého prášku (obr. 1.10),
- prostorově a energeticky náročné zařízení.

Oblast využití: výroba forem a nástrojů pro prototypové formy, tvarově složité vložky apod. Může se používat také v letectví, medicíně atd.

Výrobci 3D tiskáren technologie SLS:

- společnost EOS, např. EOSINT M 280, EOS (2013)
- 3D Systems (3D Systems (2015)).

1.3.2 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Podle názvu technologie je zřejmé, že jde o stejnou technologii jako SLS, s tím rozdílem, že jako stavební materiál zde slouží kov a slitiny ve formě velmi jemného prášku. Technologie DMLS se často kombinuje s tradičními výrobními postupy a jedná se o tzv. „hybridní koncepci“ (příkladem je forma pro lití). Proces 3D tisku vytváří vysoce odolné, ale přitom jemné komponenty. Kvalita povrchu závisí na velikosti práškového materiálu.

Tloušťka vrstvy (vertikální rozlišení): 0,02–0,04 mm.

Minimální tloušťka stěny modelu: 0,4–0,6 mm. AdTech (2010)

Přesnost výtisku: +/- 0,1 mm. DMLS (2007)

Výhody:

- + metoda rychlé a zároveň přesné výroby plně funkčních prototypových dílů a dokonce i finálních výrobků pro různé aplikace,
- + modely vynikají svojí pevností a nepotřebují podpory,
- + obslužný software nabízí změnu parametrů během tisku.

Nevýhody:

- prostorově a energeticky náročná 3D tiskárna.

Oblasti využití: letecký, automobilový, elektronický průmysl a medicína.

Výrobci 3D tiskáren technologie DMLS:

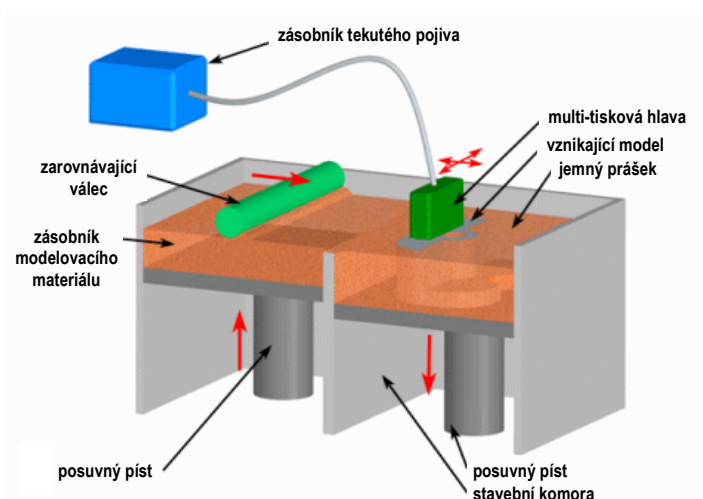
- EOS, např. EOSINT M 270 (EOS (2013)),
- 3D Systems (3D Systems (2015)).

K tématu o 3D tisku kovových materiálů je nutné dodat, že DMLS není jedinou metodou. Existují další možnosti 3D tisku kovových materiálů jako jsou Electron Beam Melting, Laser Engineered Net Shaping a další.

1.3.3 Inkjet 3D printing (3DP)

3DP je jedna z mála technologií na výrobu plnobarevných modelů. Směs pojiva a případně i inkoustu je vytlačována z tiskových hlav (obdoba inkoustové tiskárny). Viz obr. 1.12. Je to 24bitová barevná technologie. Automatický odprašovací a vibrační systém odstraní až 80% přebytečného prášku a recykluje ho pro další použití. Při dokončovacích pracích je povrch hotového modelu ošetřen ponořením do speciálního infiltrátu. Modely mají velmi tenké stěny a přesné konstrukční detaily. AdTech (2010)

Pro plnobarevné modely tato technologie podporuje formát VRML. Rubeus (2015)



Obr. 1.10 Technologie Inkjet 3D Printing, zdroj AdFab (2009)

Modelovací materiál – sádrový prášek. Snap-Fit materiály, které se využívají pro následnou infiltraci modelu Z-snap epoxidovou pryskyřicí.

Tloušťka vrstvy (vertikální rozlišení): 0,089–0,102 mm. Rubeus (2015)

Minimální tloušťka stěny modelu: 0,5 mm.

Přesnost výtisku: 0,1–0,4 mm. Globatek (2015)

Výhody:

- + průmyslově nejrychlejší zařízení na výrobu prototypů,
- + plnobarevná technologie,
- + výroba modelů s různým stupněm přesnosti,
- + dobrá kvalita povrchu výsledného modelu,
- + bezodpadová technologie.

Nevýhody:

- malý výběr použitelných materiálů.

Oblast využití: při testování funkčnosti, pro účely vizualizace, prezentace a designu nových výrobků. Modely je možné používat jako formy pro odlévací technologie. Také se často využívají ve výrobě prototypů budov a terénů.



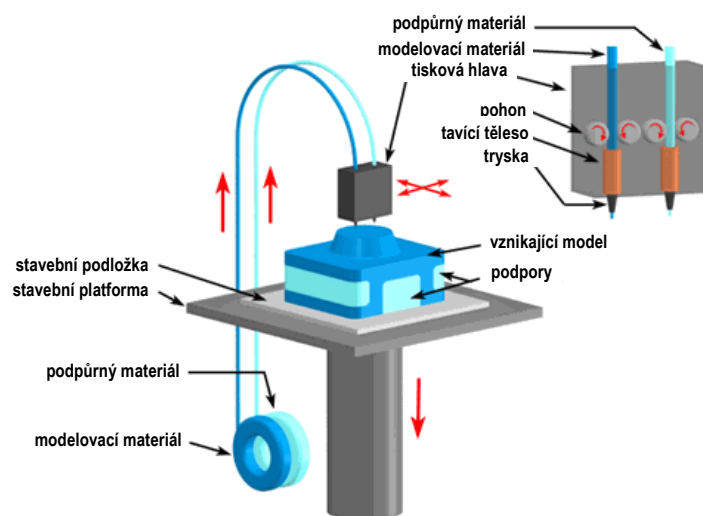
Obr. 1.11 3D model zhotovený metodou 3D Printing, zdroj Globatek (2015)

Poskytovatelem 3D tiskáren používajících technologii 3DP je společnost 3D Systems, která přejmenovala danou technologii na Color Jet Printing. 3D Systems (2015)

1.4 Technologie založené na bázi tuhých materiálů

1.4.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

FDM je technologie realizovaná nanášením roztaveného materiálu navinutého na cívce ve formě plastového drátu, který je dodáván do trysky. Zde se roztaví pomocí kladek a následně je vytlačěn po jednotlivých vrstvách na vznikající model. Nové vlákno se přichytí na poslední vrstvu a ihned tuhne. Když je vrstva hotová, stavební platforma se posune o průměr vlákna dolů k vytvoření nové vrstvy. Tisková hlava se pohybuje v horizontální rovině. Technologie vyžaduje stavbu podpor, které jsou po dokončení tisku mechanicky nebo chemicky odstraněny. Výsledná struktura modelu má nerovný povrch vodorovné vrstvy, ale je možné povrch dále upravovat broušením, leštěním apod.



Obr. 1.12 Technologie Fused Deposition Modeling, zdroj AdFab (2009)

Modelovací materiál: plasty ABS a ABS plus, polykarbonáty, elastomery, vosk, cukr atd.

Tloušťka vrstvy (vertikální rozlišení): 0,025–0,4 mm.

Minimální tloušťka stěny modelu: 0,7 mm.

Přesnost výtisku: 0,1mm nebo 4% požadovaného rozměru⁵.

Výhody:

- + pevný materiál s vysokou teplotní odolností,
- + minimální odpad,
- + možnost používat zařízení v kancelářích,
- + některé tryskové tiskárny umožňují až tříbarevné modely.

Nevýhody:

- omezená přesnost daná tvarem materiálu a průměrem výstupní trysky,
- zdoluhavá výroba modelu,
- nelze v průběhu tisku vyměňovat materiál, po výměně cívky je třeba začít tisknout model znovu od začátku,

⁵ <http://www.easycnc.cz/foto/techdata-fabbster-jpg/>

- nepředvídatelné smrštění.

Oblast využití: pevné, tvarově stálé mechanické modely bez požadavku na kvalitu povrchu, metoda není vhodná pro subtilní konstrukce. Modely se využívají také v medicíně a potravinářském průmyslu.



Obr. 1.13 Modely vyhotovené metodou FDM, zdroj Hájek (2012)

Výrobci 3D tiskáren technologie FDM:

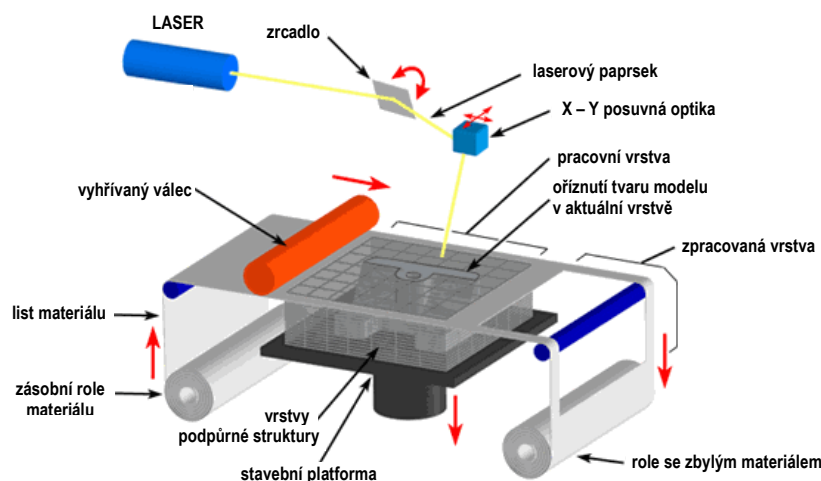
- Stratasys (Stratasys (2015))
- Fabbster (Fabbster (2015)),
- MakerBot⁶,
- Fab@Home⁷.

1.4.2 *Laminated Object Manufacturing (LOM)*

LOM je technologie, při které je model vyhotoven postupným laminováním jednotlivých vrstev. Jednotlivé vrstvy jsou na jedné straně napuštěny přínavou hmotou, kterou jsou přilepeny k předcházející vrstvě. Řezání zajišťuje buď laser – tisk plastovými materiály, nebo ořezávací nůž – tisk papírem. Řezací hlava vyřeže do vrstvy obrys požadovaného tvaru. Hloubka řezu je totožná s tloušťkou přilepeného modelovacího materiálu. Po vytvoření vrstvy se nosná deska sníží o tloušťku vrstvy a celý proces se opakuje. Přebytečný materiál je rozřezán na jednotlivé kvádry, které jsou na závěr procesu odstraněny. Modely mohou být dále opracovávány obráběcími metodami a povrch je nutné pokrýt silikonovým, uretanovým nebo epoxidovým nástřikem, aby se model nezvětšoval vlivem vsakující se vlhkosti. Dle McorTech (2014) technologie pro plnobarevný tisk podporuje formáty VRML, OBJ a Collada.

⁶ <http://www.makerbot.com/>

⁷ <http://www.fabathome.org/index.php?q=node/10>



Obr. 1.14 Technologie Laminated Object Manufacturing, zdroj AdFab (2009)

Modelovací materiál: Adam (2013) uvádí, že do roku 2005 – speciální papír, napuštěný zpevňující hmotou, od roku 2005 – běžný kancelářský (dále jen kanc.) papír (nejčastější použití), dalšími materiály, dle Hájek (2012), jsou nylon a polyester, podle AdTech (2010) – keramika.

Tloušťka vrstvy (vertikální rozlišení): tisk papírem – 0,1–0,19 mm, tisk polyesterem – 0,168 mm. McorTech (2014), Solido (2009)

Minimální tloušťka stěny modelu: ve zdrojích není uvedena.

Přesnost výtisku: +/- 0,1 mm.

Výhody:

- + rychlost zařízení,
- + vysoká přesnost,
- + při použití papíru lze tisknout model plnobarevně,
- + proces je ekologicky nezávadný.

Nevýhody:

- jednotlivé tiskárny jsou zaměřeny na tisk jen z jednoho typu modelovacího materiálu (buď tiskne z papíru, nebo z plastu),
- technologie není vhodná pro subtilní konstrukce,
- složité nastavení a kontrola laserového paprsku tak, aby řezal pouze aktuální vrstvu,
- důsledkem použití podpor je jejich zdlouhavé odstraňování a nebezpečí poškození vyrobené součásti,
- velké množství odpadů.

Oblast využití: modely lze využívat pro účely prezentace, vizualizace, marketingu, modely z plastu lze také využít jako formy pro odlévací a vstřikovací technologie.



a) tisk plastem, zdroj Solido (2009)



b) tisk kanc. papírem, zdroj McorTech (2013)

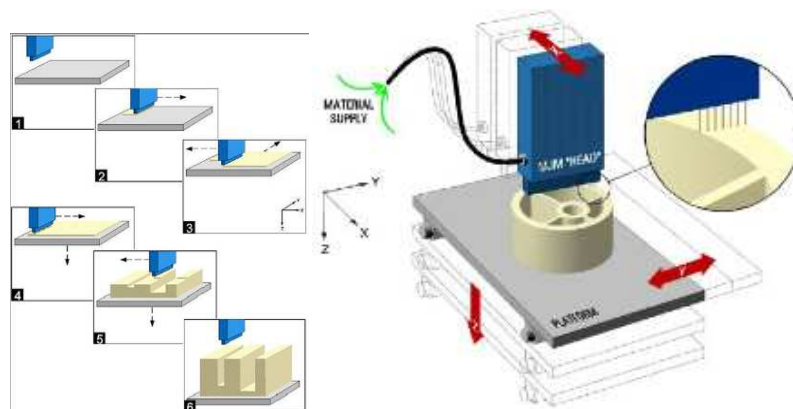
Obr. 1.15 Modely vyhotovené technologií LOM

Výrobce 3D tiskáren, které využívají technologii LOM:

- Solido – 3D tisk z plastu, Solido (2009)
- Mcor Technologies – 3D tisk z papíru. McorTech (2014)

1.4.3 Multi Jet Modeling (MJM)

Dle 3D Systems (2015) se tato technologie jmenuje Multi Jet Printing. Podstata technologie tkví v postupném nanášení jednotlivých vrstev materiálu pomocí tiskové hlavy. Tisková hlava u technologii MJM obsahuje místo jedné až 352 trysek, které jsou umístěny v jedné řadě. Každá tryska je samostatně řízená počítačem a jednobarevný model se tiskne na nosnou desku, která se vertikálně posouvá po nanesení jedné vrstvy o tloušťku vrstvy směrem dolů. Hlava se pohybuje nad nosnou deskou pouze v jednom směru. V případě, že je model širší než velikost jednoho záběru, posune se nosná deska a to ve směru kolmém na pohyb hlavy, která následně dokončí vrstvu. Nanášený materiál okamžitě ztuhne při styku s již nanesenou vrstvou. Tloušťka vrstvy závisí na typu tiskárny.



Obr. 1.16 Technologie Multi Jet Modeling, zdroj AdFab (2009)

Modelovací materiál: termopolymer, akrylátový fotopolymer, vosk.

Tloušťka vrstvy (vertikální rozlišení): 0,016–0,152 mm.

Minimální tloušťka stěny modelu: cca 0,029 mm. Globatek (2015)

Přesnost výtisku: 0,02–0,05 mm na 2,5 cm.

Výhody:

- + velmi přesná technologie, tvarová stálost,
- + metoda je efektivní a úsporná díky použití levných termopolymerů,
- + materiál je nanášen rovnoměrně, což způsobuje hladký povrch,
- + jednoduché řešení a velmi rychlý tisk,
- + možnost využití v kancelářském prostředí.

Nevýhody:

- náročná údržba,
- malý výběr materiálů,
- modely nelze používat jako zkušební.

Oblast využití: modely nacházejí uplatnění především při tvorbě funkčních, prezentačních a koncepčních modelů, při výrobě forem a odlitků, u kterých se klade důraz na velmi přesné vykreslení drobných detailů.



Obr. 1.17 Modely zhotovené technologií MJM, zdroj Globatek (2015)

3D tiskárny, které využívají technologii MJM vyrábí společnost 3D Systems. 3D Systems (2015).

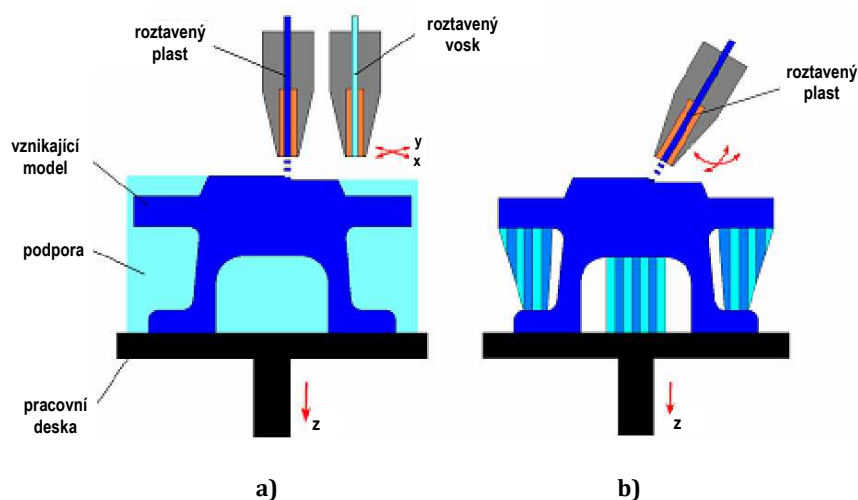
1.4.4 Technologie Model Maker 3D Plotting (MM3DP) a Ballistic Particle Manufacturing (BPM)

Název technologie MM3DP byl převzat z Hájek (2012), jinak např. podle Additive3D (2013) nebo Solidscape (2013) se tato technologie jmenuje Drop On Demand Technology.

Obě technologie jsou založené na principu inkoustových tiskáren.

MM3DP technologie nanáší malé kapky materiálu vystřikované z tlakové hlavy na pracovní desku, kde okamžitě po dopadu tuhnou, dokud nevznikne celý model. Tato technologie pracuje s dvěma tiskovými hlavami pro nanášení modelovacího a podpůrného materiálu. Tisková hlava vystřikuje 6000–12000 kapek o průměru cca 0,076 mm za sekundu, a to umožňuje zhotovení velmi přesných modelů.

BPM technologie pracuje na obdobném principu jako MM3DP. Rozdíl je jen v tom, že BPM používá pro nástřik kapek jen jednu hlavu, která má 5 stupňů volnosti. Tryska je natáčena kolmo ke vznikajícímu povrchu modelu, a proto tato technologie umožňuje vytvářet modely bez podpůrné konstrukce.



Obr. 1.18 a) Model Maker 3D Plotting, b) Ballistic Particle Manufacturing, zdroj Hájek (2012)

Modelovací materiál: termoplast.

Tloušťka vrstvy (vertikální rozlišení): 0,0254–0,0762 mm. Hájek (2012)

Minimální tloušťka stěny modelu: ve zdrojích není uvedeno.

Přesnost výtisku: cca 0,0254 mm.

Výhody:

- + metody jsou nenáročné jak finančně tak na obsluhu a údržbu,
- + nevznikají toxické odpady ani plyny,
- + lze využít v kanceláři,
- + umí vytvořit tvarově velmi složité modely v různých barevných provedeních.

Nevýhody:

- je vhodnější pro tvorbu malých součástí,
- MM3DP vyžaduje tvorbu podpěr,
- BPM technologie může vytvářet drsný povrch modelu, který je třeba následně upravovat.

Oblast využití: výrobky vyhotovené těmito technologiemi nachází uplatnění hlavně u klenotníků při navrhování šperků, v zubních laboratořích v digitální stomatologii. Hájek (2012) a Solidscape (2013)



Obr. 1.19 Modely vyhotovené technologiemi Model Maker 3D Plotting, zdroj Hájek (2012)

Výrobcem 3D tiskáren využívajících technologii Model Maker 3D Plotting je firma Solidscape, kterou v roce 2011 získala společnost Stratasys.

1.5 Souhrn základních vlastností jednotlivých technologií Rapid Prototyping

V této kapitole jsou v následující tabulce shrnuté základní vlastnosti výše zmíněných metod RP. Tabulka byla převzata z AdTech (2010) s tím, že byly aktualizovány některé údaje o tloušťce vrstvy podle modernějších technologií, přidány nové poznatky o výhodách metod RP a také byl do tabulky doplněn nový údaj o přesnosti tisku modelů.

Tab. 1.1 Souhrn základních vlastností technologií RP, zpracováno dle AdTech (2010)

	Orientační velikost pracovního prostoru, [mm]	Modelovací materiál	Tloušťka vrstvy, [mm]	Přesnost výtisku modelu [mm]	Základní přednosti	Důležité nedostatky
SLA	600×600×500	Fotopolymer	0,05–0,13	0,01–0,02 na cm	Velké modely, přesné detaily, tenké stěny	Toxický fotopolymer, malá tepelná odolnost
SGC	500×350×500	Fotopolymer, nylon	0,10–0,20	+/-0,084	Lze odfrézovat poškozené vrstvy, nejsou podpory	Malý výběr materiálů
PolyJet	255×252×200 (Objet260 Connex3)	Fotopolymerové materiály s různorodými vlastnostmi	0,016	0,1–0,3	Široké spektrum materiálů	Všechny materiály jsou na bázi fotopolymerů
SLS	350×350×450	Polyamid, polykarbonát, nylon, vosk, atd.	0,02–0,15	+/-0,1	Široké spektrum materiálů, výtisk bez podpor, využití 45 barev během jednoho tisku	Robustné zařízení, pórovitost modelu
DMLS	250×250×215/325 (EOSINT M270/290)	Kovové prášky	0,02–0,04	+/-0,1	Široké spektrum materiálů, výtisk bez podpor	Malý výběr použitých materiálů
3DP	252×204×204 (Zprinter 450)	Sádrový prášek	0,089–0,102	0,1–0,4	Vysoká rychlost, výtisk bez podpor, plnobarevný model	Malý výběr použitých materiálů
FDM	200×200×200 (Fabbster 11.1)	ABS, ABS+, PLA, vosk, cukr, atd.	0,025–0,4	0,1	Více druhů materiálů	Dokončovací práce – podpory
LOM	500×700×300	Fólie tvořené papírem, plastem, kovem, atd.	0,1–0,20	+/- 0,1	Široké spektrum materiálů, snadné obrábění, plnobarevný model	Pracné odstraňování podpor
MJM	300×180×200 (Invision)	Fotopolymer, akrylátový fotopolymer	0,016–0,152	0,02–0,05 na 2,5 cm	Hladký povrch, rychlý tisk, použití 5 barev	Malý výběr materiálů, odstranění podpor
MM3DP	305×152×101	Termoplast	0,0127–0,0762	0,0254	Přesné detaily, složité tvary malých modelů	Výroba velmi malých modelů

2 Využití technologie Rapid Prototyping pro tisk 3D modelů geografických objektů

Problematika tisku 3D modelů geografických objektů (dále v textu jen 3D model geoobjektu) je úzce provázána jak s technologiemi GIS, tak i s CAD systémy. Pomocí aplikací GIS je mj. realizován výběr, příprava a klasifikace geografických dat. CAD systémy nejčastěji slouží pro účel tisku 3D modelů jako modelovací a vizualizační nástroje.

GIS/CAD aplikace jsou úspěšně realizované v různých oborech a poskytují velké množství kvalitních tematických dat, která mohou být vytisknuta pomocí RP tak, aby při prezentaci výsledných 3D modelů přispěly ke zlepšení vzájemného porozumění mezi zúčastněnými stranami. Je třeba brát v potaz to, že na jedné straně mohou být odborníci GIS/CAD, ale na druhé straně může být potenciální zákazník z jiného oboru, a často je zapotřebí více poutavých prostředků pro prezentaci produktu. V současné době jsou již 3D virtuální scény dynamické a více realistické, čímž zlepšují pochopení 3D modelů. Nicméně virtuální 3D modely jsou nejčastěji prezentovány na 2D obrazovce, a snižují tím míru reálného vnímání 3D objektu, což může vést k chybnému pochopení a hodnocení, např. velikosti nebo celkového vzhledu objektu. Vytištěný 3D model (v závislosti na měřítku) můžeme prohlédnout a prozkoumat mnohem lépe než virtuální bez použití další techniky. RP vyrábí sofistikované, jednobarevné a plnobarevné (technologie 3DP, LOM) modely geoobjektů libovolného tvaru. Dle Protocom (2014) a dalších zdrojů ukázaných níže lze způsoby využití fyzických 3D modelů geoobjektů rozdělit:

- 3D kartografie:
 - topografické a územní modely z GIS dat (ukázky v Rase (2009)),
 - hmatové mapy (tyflomapy) pro zrakově postižené (viz Doležal (2010)),
 - hydrografie,
 - modely měst a krajina (viz Ghawana et al (2013)),
 - tematické mapy (viz Rase (2009)),
 - modely pro výuku nebo expozice pro muzea;
- prezentace v rámci projektování:
 - informační modely pro odbornou a širokou veřejnost,
 - jasné a komplexní informace,
 - plně barevné modely přinášejí lepší představu o projektu;
- 3D vizualizace pro průzkum, analýzu a plánování:
 - geologické průzkumy (Ghawana et al (2013)),
 - studie rozmístění budov v terénu,
 - stavební studie,
 - analýzy rozvodů,
 - územní plánování.

Jak je vidět z výše uvedeného rozdělení, využití 3D modelů geoobjektů může být různorodé a je třeba se zamyslet nad výběrem nejvhodnějších metod RP pro 3D tisk modelů v daném oboru.

Podle zdrojů použitých v seznamu způsobů využití 3D modelů geoobjektů, lze konstatovat, že v současné době je 3D tisk nejčastěji využíván pro prezentaci.

Tato diplomová práce se zabývá přípravou geografických dat pro 3D tisk modelů hlavně za účelem jejich prezentace. Na tento účel je zaměřena další kapitola, která posuzuje vhodnost technologií RP pro 3D tisk modelů geoobjektů.

3 Výběr metod Rapid Prototyping pro tisk 3D modelů geografických objektů za účelem prezentace

3D modely geoobjektů vyžadují časově náročný proces výroby zahrnující mapování reálného světa, modelování virtuálního 3D modelu a následnou tvorbu jeho fyzického 3D modelu.

Před výběrem vhodných metod tisku 3D modelů geoobjektů je třeba shrnout základní vlastnosti výsledného 3D modelu, základní parametry 3D tisku a následně určit vztahy mezi nimi. Vlastnosti modelu jsou určeny nezávisle na parametrech tiskáren proto, že byly nejprve vyhodnoceny v závislosti na účelu. Až poté se rozhodne, podle parametrů předložených tiskáren a vztahů mezi nimi, kterou technologií RP lze docílit požadovaného výsledku nebo se k němu aspoň přiblížit.

Základní vlastnosti fyzického 3D modelu geoobjektu jsou stanoveny v závislosti na účelu – v našem případě tedy prezentace 3D modelu.

3.1 Základní vlastnosti fyzického 3D modelu geografického objektu

Nejprve zde budou popsány vlastnosti modelu pro účely prezentace a dále bude uvedena tabulka s číselnými hodnotami určenými podle účelu prezentace, které poslouží jako mezní hodnoty pro posouzení vhodnosti metod RP pro tisk 3D modelů geoobjektů.

Základní vlastnosti fyzického 3D modelu geoobjektu pro účely prezentace:

- 1) *Pevnost* [MPa] – určuje fyzické schopnosti modelu vydržet taková zatížení, jako jsou vlastní tíha nosných konstrukcí, následné mechanické úpravy modelu a odstranění podpor, otřesy při běžném přenosu nebo převozu modelu. Jelikož testovací hodnoty nebyly nalezeny, jsou použité pevnostní a tuhostní vlastnosti tvrdého dřeva D30 (dle ČSN EN 338), které vyhovují našemu účelu.
- 2) *Přesnost* [mm] – v horizontálním (H) a ve vertikálním (V) směru. Jelikož jde o 3D model geografického objektu, jako ekvivalent *přesnosti* 3D modelu poslouží grafická přesnost mapy dle Lauerman (1974) – 0,1 mm.
- 3) *Velikost* [mm³] – minimální velikost 3D modelu = 200×200×200 (viz vztahy mezi vlastnostmi modelů a parametry tiskáren). Při prezentaci 3D modelů geoobjektů větší velikost umožňuje lepší vizualizaci modelu a jeho detailů a tím značně zvyšuje jeho

vypovídací hodnotu i z hlediska přesnosti. Maximální velikost modelu je řešena pro všechny technologie RP analogicky – rozdělením a tiskem modelu po částech.

- 4) *Barevnost* – model může být jednobarevný, plnobarevný nebo mít různý počet barev. *Plnobarevnost* značně zvyšuje vypovídací hodnotu modelu geografického objektu.

Pro účely této diplomové práce byly zvoleny hodnoty uvedené v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Přidělené hodnoty vlastnostem 3D modelu geoobjektu

Vlastnosti 3D modelu geoobjektu		Požadovaná hodnota dle účelu modelu
Pevnost [MPa]	v tahu	18
	v ohybu	30
	průměrný modul pružnosti	10
Přesnost [mm]	H	0,1
	V	
Velikost [mm ³]		200×200×200
Barevnost		plnobarevný

3.2 Základní parametry 3D tiskáren

Základní parametry 3D tiskáren, které bychom měli brát v úvahu při tisku 3D modelu geoobjektu, jsou:

- *vlastnosti modelovacího materiálu*,
- *tloušťka vrstvy* – vertikální přesnost, závisí na materiálu a nastavení tiskárny [mm],
- *minimální tloušťka stěny modelu* – taková tloušťka stěny, která vydrží následné úpravy, odstraňování podpor a zátěž při dalším využití modelu [mm], závisí na nastavení tiskárny,
- *přesnost* – jak přesně 3D tiskárna vytiskne celkový model [mm],
- *velikost pracovního (tiskového) prostoru* [mm×mm×mm],
- *barevnost*,
- *stavba a odstraňování podpor* – využívají se při tisku převislých útvarů.

3.3 Vztahy mezi vlastnostmi 3D modelu a parametry 3D tiskáren

V následujících odstavcích je popsáno, jak spolu souvisí výše uvedené základní parametry 3D modelu a 3D tiskárny a jak jsou důležité při výběru vhodné 3D technologie RP pro tisk 3D modelů geoobjektů.

- 1) *Pevnost* modelu ovlivňují:
- pevnostní vlastnosti modelovacího materiálu [MPa],
 - tloušťka nanášené vrstvy a tloušťka stěn [mm],
 - způsob spékání nebo lepení materiálu, pojivo a ošetřující infiltráty;

- 2) *horizontální přesnost* modelu závisí:
 - na konzistenci modelovacích materiálů (tuhý, tekutý nebo práškový),
 - na způsobu spékání nebo vyřezávání vrstev (laser, nůž) nebo vystřikování materiálu;
- 3) *vertikální přesnost* modelu závisí na tloušťce vrstev;
- 4) *velikost* celého modelu:
 - je určena velikostí pracovního prostoru tiskárny,
 - pro tuto diplomovou práci stanovíme velikost modelu (nebo části modelu) dle nejmenšího pracovního prostoru metody FDM v tab. 1.1,
 - pokud rozměr modelu přesahuje kapacitu pracovního prostoru, lze ho rozdělit a vytisknout po částech;
- 5) *barevnost* – závisí na 3D tiskárně;
- 6) *stavba podpor* – viz kap. 4.4.

3.4 Posouzení jednotlivých metod Rapid Prototyping pro výběr

Každá metoda RP bude posouzena podle základních vlastností 3D modelů geoobjektů v závislosti na účelu prezentace modelu. V tabulkách budou porovnány hodnoty výtisku jednotlivými metodami RP s požadovanými hodnotami 3D modelu. Dále budou uvedeny výhody/nevýhody a oblasti využití 3D modelů v geooborech.

PEVNOST 3D MODELŮ GEOOBJEKTŮ

Při hodnocení vhodnosti všech vybraných technologií pro tisk modelů geoobjektů nebude kladen důraz na problematiku *pevnosti* výsledných modelů. Většina metod RP umožňuje vytisknout modely větší pevnosti, než jaká je požadována (cca od 20 MPa – v tahu, od 30 MPa – v ohybu a více)⁸ a vyhovují tak prezentačním účelům. Viz oblasti použití technologií RP v kap. 1.

Stereolitografie (SLA), Solid Ground Curing (SGC)

Tab. 3.2 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku SLA a SGC

vlastnosti 3D modelu	požadované hodnoty	hodnoty výtisku metodou SLA	hodnoty výtisku metodou SGC
přesnost [mm]	0,1	0,01–0,02 na 1 cm	+/-0,084
min. velikost [mm ³]	200×200×200	600×600×500	500×350×500
barevnost	plnobarevný	jednobarevný	jednobarevný

⁸ Přebráno z technických specifikací jednotlivých 3D tiskáren

Výhody:

- + vysoká přesnost
- + rozměrné modely

Nevýhody:

- jednobarevný model
- podpůrné struktury
- malá oblast využití v geoborech

Využití v geoborech: technologie je vhodná pro tisk jednobarevných hmatových map, tematických map, stavebních objektů, jednobarevných modelů zemských povrchů, modelů měst.

PolyJet 3D Printing (PolyJet)

Tab. 3.3 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku PolyJet

vlastnosti 3D modelu	požadované hodnoty	hodnoty výtisku metodou PolyJet
přesnost [mm]	0,1	0,1–0,3
min. velikost [mm ³]	200×200×200	255×252×200
barevnost	plnobarevný	45 barev

Výhody:

- + rozsáhlé spektrum barev
- + využití 45 barev při jednom tisku
- + snadné odstranění podpor umožňuje tisk geometricky složitých modelů
- + lze široce využívat v geoborech

Nevýhody:

- podpůrný materiál
- nelze míchat barvy technologií CMYK

Využití v geoborech: technologie je vhodná pro tisk topografických modelů (při výběru vhodné palety barev, viz obr. 3.1), modelů měst, interiérů a exteriérů budov, hmatových map, tematických map a dalších modelů.



Obr. 3.1 Modro-žluto-černá paleta barev, zdroj Stratasy (2015)

Selektive Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Tab. 3.4 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku SLS a DMLS

vlastnosti 3D modelu	požadované hodnoty	hodnoty výtisku metodou SLS	hodnoty výtisku metodou DMLS
přesnost [mm]	0,1	+/-0,1	+/-0,1
min. velikost [mm ³]	200×200×200	350×350×450	250×250×215
barevnost	plnobarevný	jednobarevný	jednobarevný

Výhody:

- + rozměrné modely
- + nepotřebuje podpory a umožňuje tak tisk geometricky složitých modelů

Nevýhody:

- jednobarevné modely
- malá oblast využití v geooborech

Využití v geooborech: technologie SLS je vhodná pro tisk jednobarevných hmatových a tematických map, modelů budov; DMLS je vhodná pro prezentační účely s uměleckým záměrem.

Inkjet 3D Printing (3DP)

Tab. 3.5 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku 3DP

vlastnosti 3D modelu	požadované hodnoty	hodnoty výtisku metodou 3DP
přesnost [mm]	0,1	0,1–0,4
min. velikost [mm ³]	200×200×200	252×204×204
barevnost	plnobarevný	plnobarevný

Výhody:

- + absence podpor umožňující tisk geometricky složitých modelů
- + plnobarevné 3D modely
- + rychlý tisk

Nevýhody:

- malý výběr použitých materiálů

Využití v geooborech: lze využít ve všech geooborech. Ukázky plnobarevných 3D modelů lze vidět na obr. 3.2.



Obr. 3.2 Ukázky plnobarevných 3D modelů terénu a stavby, zdroj McorTech (2013)

Fused Deposition Modeling (FDM)

Tab. 3.6 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku FDM

vlastnosti 3D modelu	požadované hodnoty	hodnoty výtisku metodou FDM
přesnost [mm]	0,1	0,1
min. velikost [mm ³]	200×200×200	200×200×200
barevnost	plnobarevný	3 barvy

Výhody:

- + široké spektrum barev
- + nejdostupnější metoda 3D tisku

Nevýhody:

- stavba podpůrných struktur
- možnost tisku jen třemi barvami

Využití v geoborech: technologii lze využít pro tisk stavebních objektů, modelů měst (Hájek (2012)), barevných map s omezenou barevností.

Laminated Object Manufacturing (LOM)

Tab. 3.7 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku LOM

vlastnosti 3D modelu	požadované hodnoty	hodnoty výtisku metodou LOM
přesnost [mm]	0,1	+/-0.1
min. velikost [mm ³]	200×200×200	500×700×300
barevnost	plnobarevný	papír – plnobarevný ostatní – jednobarevný

Výhody:

- + velmi přesné modely
- + rozměrné modely
- + plnobarevný model při tisku papírem
- + díky kladení vrstev ve vodorovném směru, se povrch podobá struktuře

Nevýhody:

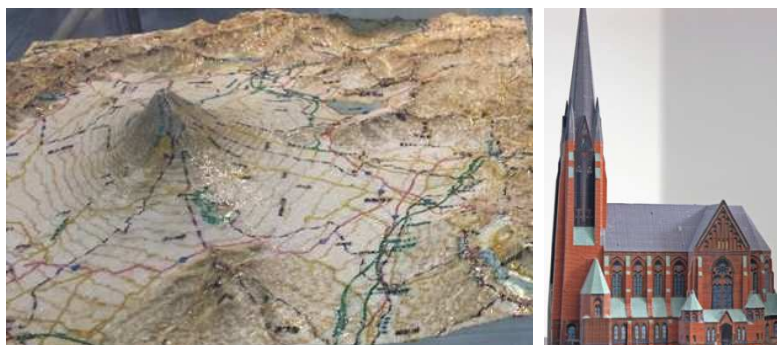
- stavba podpůrných struktur
- tisk papírem – nehodí se pro tisk modelů se subtilními konstrukcemi, při odstraňování podpor může dojít k destrukci modelu

dřeva a hodí se tak pro tisk terénu
s pokrytím ortofota

– není vhodný pro tisk modelů
s komplikovanou geometrií

+ dostupná metoda 3D tisku

Využití v geoborech: technologie může být využívána ve všech geoborech. Příklady 3D modelů geobjektů, tištěných technologií LOM, lze vidět na obr. 3.3.



Obr. 3.3 Ukázky plnobarevných 3D modelů terénu a stavby, zdroj McorTech (2013)

Multi Jet Modeling (MJM)

Tab. 3.8 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku MJM

vlastnosti 3D modelu	požadované hodnoty	hodnoty výtisku metodou MJM
přesnost [mm]	0,1	0,02 – 0,05 na 2,5 cm
min. velikost [mm ³]	200×200×200	300×180×200
barevnost	plnobarevný	jednobarevný

Výhody:

- + velmi přesné modely
- + rychlý tisk

Nevýhody:

- stavba podpor
- jednobarevné modely

Využití v geoborech: Danou metodu lze využít např. pro tisk stavebních objektů, modelů měst, jednobarevných tematických a hmatových map.

Model Maker 3D Plotting (MM3DP), Ballistic Particle Manufacturing (BPM)

Tab. 3.9 Porovnání požadovaných a výsledných hodnot tisku MM3DP a BPM

vlastnosti 3D modelu	požadované hodnoty	hodnoty výtisku metodou MM3DP
přesnost [mm]	0,1	0,0254
min. velikost [mm ³]	200×200×200	305×152×101
barevnost	plnobarevný	jednobarevný

Výhody:

- + velmi přesné modely
- + tisk modelů s komplikovanou geometrií

Nevýhody:

- velmi malé modely
- jednobarevné modely

Využití v geoborech: nedoporučuje se.

SHRNUTÍ

Z výše uvedeného vyplývá, že všechny technologie RP, až na MM3DP a BPM, umožňují z hlediska základních vlastností 3D modelu tisk jednobarevných 3D modelů geobjektů vhodných hlavně pro prezentační účely. Nevýhodou většiny metod, kromě LOM, 3DP a PolyJet, je omezení v použití barev, které hrají klíčovou úlohu ve vizualizaci, průzkumu, analýze a plánování nebo v lepším znázornění tematických map.

Na závěr této kapitoly je v tabulce č. 3.10 uvedeno přehledné posouzení vhodnosti technologií RP vzhledem k základním požadavkům na 3D model geografického objektu.

Tab. 3.10 Posouzení vhodnosti technologií RP pro tisk 3D modelů geobjektů

	Pevnost modelu podle účelu prezentace [Mpa]	Minimální přesnost 0,1 mm	Minimální velikost 200×200×200 mm	Barevnost	Vhodnost metod RP pro účely prezentace: ++ vhodná +- vhodná s omezeními — nevhodná
SLA	> 20 v tahu > 30 v ohybu	0,01-0,02 na 1cm	600×600×500	jednobarevný	+-
SGC	> 20 v tahu > 30 v ohybu	0,1-0,2	500×350×500	jednobarevný	+-
PolyJet	> 20 v tahu > 30 v ohybu	0,1	255×252×200	max. 45 barev	++
SLS	> 20 v tahu > 30 v ohybu	+/-0,1	350×350×450	jednobarevný	+-
DMLS	> 20 v tahu > 30 v ohybu	+/-0,1	250×250×215	jednobarevný	+-
3DP	> 20 v tahu > 30 v ohybu	0,1-0,4	200×200×200	plnobarevný	++
FDM	> 20 v tahu > 30 v ohybu	0,1	500×700×300	max. 3 barvy	+-
LOM	> 20 v tahu > 30 v ohybu	+/-0,1	500×700×300	jednobarevný plnobarevný	+- ++
MJM	> 20 v tahu > 30 v ohybu	0,02-0,05 na 2,5 cm	300×180×200	jednobarevný	+-
MM3DP	> 20 v tahu > 30 v ohybu	0,0254	305×152×101	jednobarevný	—

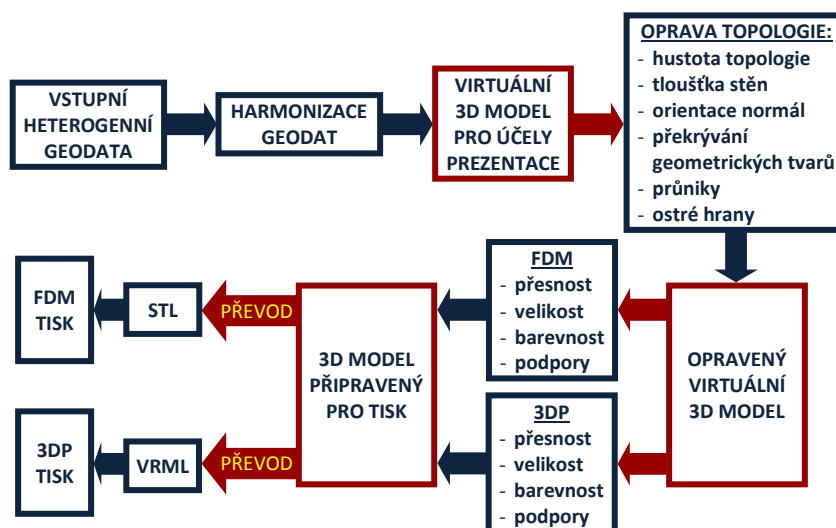
Je namístě podotknout, že výše uvedené poznámky ke každé technologii 3D tisku, mimo 3DP, FDM a LOM, mají teoretický základ, odvozený z poznatků ze studia těchto metod. Je možné, že v praxi může tisk některých 3D modelů přinést další problémy, o kterých zde nejsou zmínky. Naopak problémy, které jsou zde probírány, mohou mít jiná řešení a základní vlastnosti mohou mít jiné hodnoty, než ty, které jsou v této diplomové práci určeny.

Pro danou diplomovou práci byly pro porovnání zvoleny dvě dostupné technologie: FDM a 3DP. Příprava dat a náležitá porovnání jsou popsány v dalších kapitolách.

4 Obecný postup přípravy geografických dat pro 3D tisk vybranými technologiemi Rapid Prototyping

Příprava dat je jedna z hlavních fází procesu vzniku fyzického 3D modelu (obr. 1.1). V této kapitole bude fáze příprav podle schématu v kap. 1.1 na obr. 1.2 zaměřena na nehomogenní geografická data, která jsou připravována pro tisk vybranými technologiemi 3DP a FDM (obr. 4.1). Dané schéma lze uplatnit i na další technologie RP.

4.1 Schéma postupu přípravy geografických dat



Obr. 4.1 Schéma postupu přípravy 3D geodat

Následující kapitoly budou věnovány jednotlivým částem z uvedeného postupu. Kapitoly 4.2 – 4.4 nejsou rozděleny podle metod RP, vstupní data a práce s nimi jsou dány nezávisle na 3D tisku.

4.2 Vstupní geografická data pro 3D tisk

4.2.1 Specifikace vstupních geografických dat

Pod pojmem *vstupní (zdrojová) geografická data* pro 3D tisk (pro obě vybrané metody RP) je možné si představit různé zdroje dat:

- Výkresová dokumentace – výkresy, plány a mapy velkého měřítka v digitální a analogové podobě. Pro účely GIS se výkresová dokumentace používá nejčastěji při modelování architektonických objektů.

- Geodetická data – souřadnice bodů získaná geodetickým měřením.
- Fotogrammetrická data – rastrová data, digitální model reliéfu a digitální ortofotosnímky pořízené pozemní fotogrammetrií.
- Mračna bodů – data získané laserovým skenováním.
- Virtuální 3D modely – již jednou zpracovaná naměřená data.
3D modely mohou mít odlišné způsoby reprezentace: bodová, drátová a povrchová.
Žára (2005), Železný (2015)

4.2.2 Problematika vstupních geografických dat

Jak je vidět z výše uvedeného, vstupní data mohou pocházet z odlišných měření a způsobů zpracování, výsledkem čehož jsou *heterogenní* data.

Heterogenní data jsou pořízena z různých zdrojů, v rozdílném datovém formátu, rozdílném měřítku, každá datová sada je v jiném souřadnicovém systému atd. Při použití heterogenních zdrojových dat lze dosáhnout správné a kompletní reprezentace celého 3D modelu geografického objektu harmonizací těchto dat.

Problematika harmonizace je nastíněna v kapitole 4.3, kde je také zpracován přehled často používaných formátů pro reprezentaci 3D geografických dat, které mohou být využity pro uložení 3D geografických dat.

4.3 Harmonizace geografických 3D dat

Při harmonizaci geografických dat pro 3D tisk hrají nezanedbatelnou roli rozdílné datové formáty, ve kterých jsou datové sady vytvořené a poskytovány. Dnes je k dispozici velké množství odlišných datových formátů pro uložení 3D geografických dat, které nabízí několik variant řešení interoperability dat.

CAD FORMÁTY

Mezi nejznámější CAD formáty pro uložení 3D objektů patří:

- DGN (*DesiGN*) – nativní formát aplikace MicroStation od firmy Bentley,
- DWG (*DraWinG*) a výměnný formát DXF (*Drawing eXchange Format*) – nativní formáty aplikace AutoCAD vyvinuté firmou Autodesk,
- 3DS – nativní formát aplikace 3DS Max vyvinuté také firmou Autodesk.

VRML

Dalším 3D formátem, ve kterém mohou být uložena geografická 3D data je VRML⁹ (*Virtual Reality Modeling Language*). VRML je deklarativní programovací jazyk, který slouží k popisu virtuální reality a umožňuje ji publikovat na webu. Obsah VRML je uložen do souboru WRL. Existuje i nástavba pro geodata – GeoVRML, která umožňuje lokalizaci modelu v různých souřadnicových systémech.

⁹ <http://www.ai.sri.com/geovrml>

X3D (*eXtensible 3D*) – formát slouží k uložení 3D objektů a scén. Vychází z VRML, ale má XML syntaxi a byl přijat jako ISO¹⁰ standard. WEB3D (2014)

Multipatch

K popisu 3D objektů slouží také proprietární datový formát Multipatch¹¹ od firmy ESRI, založený na hraniční trojúhelníkové reprezentaci 3D objektu. Je kompatibilní s dalšími 3D formáty např. DAE (COLLADA) nebo SKP (SketchUp). Ukládá objekty v prostorové databázi. Umožňuje také ukládání textur, barev a průhlednosti povrchu.

COLLADA

COLLADA¹² (*COLLABorative Desing Activity*) – výměnný datový formát pro ukládání 3D objektů a animací, používá příponu DAE, zapouzdřený ve formátu KMZ a používá se jako výchozí 3D formát pro popis 3D modelů v programu Google Earth.

CityGML

CityGML¹³ (*City Geography Markup Language*) – datový formát založený na XML a sloužící pro reprezentaci, ukládání a výměnu hlavně virtuálních 3D modelů měst. Tento datový formát umožňují prohlížet aplikace LandXplorer CityGML, MicroStation, ArcGIS a další. CityGML definuje 5 úrovní detailů (LoD – Level of Detail):

- LoD0 – 2D mapa, 2.5D model terénu, budovy jsou reprezentovány půdorysem nebo promítnutím střechy,
- LoD1 – blokový model bez modelace střech,
- LoD2 – blokové modely budov jsou doplněny střechami a dalšími architektonickými prvky, např. balkóny, vikýři, komíny, terasami atd.,
- LoD3 – podrobnější model obsahující další architektonické prvky – okna, dveře, detaily na prvcích z LoD2 atd.,
- LoD4 – doplnění LoD3 o interiér budovy (podlahy, schody, místnosti) a jeho zařízení.

GML¹⁴ (*Geography Markup Language*) – značkovací jazyk na bázi XML pro geografická data, otevřený standard OGC.

KML¹⁵ (*Keyhole Markup Language*) – značkovací jazyk na bázi XML pro vizualizaci geografických 2D dat, který využívá geodetický souřadnicový systém, otevřený standard OGC a je využíván aplikacemi Google Maps a Google Earth.

Rozdíly mezi jednotlivými formáty

Formáty se mezi sebou liší také z hlediska uložení atributů. Pro zachování homogenity dat při převodu je důležité zachovat informace o attributech. Formáty založené na XML ukládají atributy přímo k jednotlivým prvkům, jiné formáty podporují uložení atributů do atributových tabulek.

¹⁰ <http://www.iso.org/iso/home/search.htm?qt=X3D&sort=rel&type=simple&published=on>

¹¹ <http://www.esri.com/library>

¹² <https://www.khronos.org>

¹³ <http://www.opengeospatial.org/standards/citygml>

¹⁴ <http://www.opengeospatial.org/standards/gml/>

¹⁵ <http://www.opengeospatial.org/standards/kml/>

Rozdíly lze najít ve vizualizaci nebo ve způsobu uložení dat na disk. Např. DGN, DWG, DXF aj. formáty jsou reprezentovány jako jeden soubor a jiné, např. formát COLLADA – několika soubory, kde v jednom souboru je uložena geometrie, v jiném např. textury. Převody mezi takovými formáty a výměna dat mezi různými systémy GIS a CAD nejsou jednoduchou záležitostí, ale existuje řešení v podobě výměnných formátů.

Výměnné formáty

Sestavení kompletních datových sad z různorodých zdrojů umožňují hlavně výměnné formáty. Téměř každý výrobce GIS/CAD aplikací používá proprietární formát dat, který se vyvíjí současně s aplikací. Obecné výměnné formáty výrobci GIS/CAD aplikací zvolili na nátlak uživatelů. Pro CAD jsou to výměnné formáty DXF, IGES, STEP a další, pro GIS – XML, COLLADA, CityGML. Většina GIS/CAD aplikací obsahuje nástroj nebo umožňuje instalaci nástavbových programů na import a export 3D dat v nejčastěji aplikovaných formátech. Mnoho času, práce a případných problémů těm, kdo budou data zpracovávat, ušetří záznamy o exportu dat, uložené v metadatech. Automa (2014)

Metadata

Možnosti výměny 3D dat patří mezi nejdůležitější požadavky při výběru GIS/CAD systému pro zpracování geografických 3D dat. Metadata obsahují mj. informaci, z jakého systému CAD byla 3D data exportována, jaký formát dat a v jaké verzi je poslán, atd. Tyto informace se posílají společně s daty. Automa (2014)

V současné době není hlavním problémem kvantita dat a informací, ale v první řadě jejich kvalita. Kvalita dat spočívá především v možnosti kombinace různých datových sad mezi sebou, jejich implementace do používaných softwarových i hardwarových řešení bez ohledu na zdroje dat, používané technologie, datové modely, měřítko, organizační strukturu, uživatelské potřeby, formát dat apod. Čerba et al. (2008)

Ze značné odlišnosti geografických dat a všeobecné potřeby jejich integrace do jedné aplikace nebo informačního systému vyplývají principy harmonizace. Urbanová (2012).

Sehráním všech potřebných zdrojových 3D dat dohromady, dostaneme homogenní data, která je třeba následně editovat a přizpůsobit parametrům vybraných technologií RP.

4.4 Oprava topologie 3D modelu

Software 3D tiskárny bude moci přijmout, zpracovat a vytisknout jen topologicky čistý 3D model. Opravy topologie 3D modelu nezávisí na tom, k jakému účelu 3D model slouží (model geoobjektů, model uměleckého díla apod.), ani na tom, jaká metoda RP byla vybrána pro tisk 3D modelu. Topologické kontroly a případné opravy je nezbytné provést pro tisk všemi technologiemi RP. Proto není nutné v této fázi příprav geografických dat rozdělovat opravu podle vybraných technologií RP – FDM a 3DP.

Problematiku topologie 3D modelu je třeba řešit z pohledu softwaru 3D tiskáren. Ten definuje digitální model v 3D prostoru jako spojitý (*Solid*) útvar - těleso, tvořený jedním celkem s případnými otvory, což je cílem topologického čištění modelu.

Problémem v daném tématu zůstane neustálená terminologie. V různých zdrojích jsou v souvislosti s topologickými přípravami používány termíny „*watertight*“, *manifold* nebo *2-manifold*. Pro účely diplomové práce bude upuštěno od výše uvedených definic a chyby budou pojmenovány a definovány podle úvah a zkušenosti autorky této práce.

4.4.1 Topologické chyby 3D modelu

Topologicky bezchybný model pro 3D tisk musí mít jasně definovanou a celistvou vnější hranici, viz obr. 4.2 a).

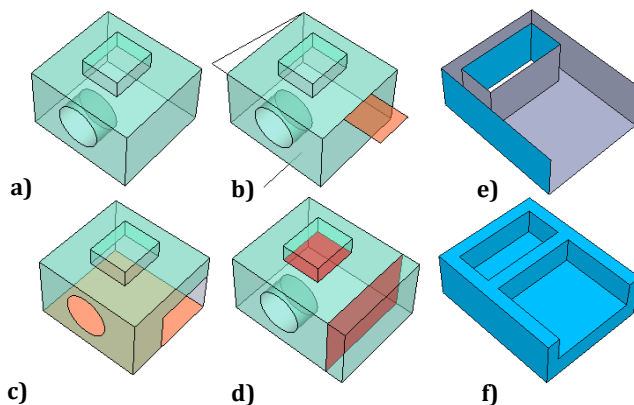
Topologické chyby jsou v této diplomové práci popsány zvlášť, jelikož každá z představených chyb vyžaduje vlastní opravy. Mezi chyby, které narušují a komplikují správnou topologii 3D modelu patří:

- **Hustota topologie.** Hustotou topologie 3D modelu můžeme definovat počet polygonů v síti, např. na cm^2 . Vysoká hustota topologie modelu komplikuje automatické převody, kontroly a výpočty software 3D tiskárny. Některé software mají nastavený maximální počet polygonů 3D modelu pro tisk. Nízká hustota polygonů zhoršuje povrch hlavně kulatých objektů.
Detekce chyby: nejprve v CAD aplikaci vypnout vyhlazení modelu a následně po vizuálním vyhodnocení rozhodnout jakou bude mít model hustotu sítě.
Oprava: lze manuálně a automaticky v CAD programech. Stratil (2013)
- **Úsečky, křivky, obecné plochy,** které se *nacházejí volně v prostoru* (obr. 4.2 b)). Tyto geometrické objekty nepatří do skupiny těles, jelikož nemají žádné vnitřní body ve smyslu tělesa, proto je software tiskárny nezpracuje.
Detekce chyby: automaticky pomocí CAD aplikací nebo zásuvného modulu Solid Inspector pro SketchUp.
Oprava: zde je třeba se správně rozhodnout, jak danou chybu opravit. Buď hranu odstranit, nebo v případě, kdy hrana spojuje dvě plochy, ji editovat.
- **Otvory** (obr. 4.2 c)) vznikající např. porušením trojúhelníkové sítě nebo konstrukční chybou. Software 3D tiskárny pak není schopen správně rozřezat 3D model na vrstvy a spočítat bezchybně dráhu tisku.
Detekce chyby: automaticky pomocí CAD aplikací nebo zásuvného modulu Solid Inspector pro SketchUp.
Oprava: uzavření otvoru konstrukčními nástroji v grafických aplikacích.
- **Chybná (nereálná) tloušťka stěny objektu** (obr. 4.2 d), e)) představuje pro software 3D tiskárny problém při správném vyplnění 3D modelu stavebním materiálem.

Výhodou určení náležité tloušťky stěny modelu je menší spotřeba materiálu, protože nebude třeba tisknout celý vnitřek modelu.

Detekce chyby: automaticky pomocí CAD aplikací nebo zásuvného modulu Solid Inspector pro SketchUp.

Oprava: editace chybných ploch způsobem ukázaným na obr. 4.2 f). Zde je třeba správně určit, co se bude vyplňovat stavebním materiálem, např. který objekt bude zeď a který místnost. Je to důležité při přípravách modelů interiérů budov.



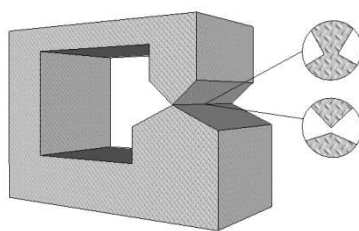
Obr. 4.2 Příklady chyb narušujících topologii 3D modelu:
a), f) topologicky čistý model, b) úsečky a plocha volně v prostoru,
c) otvory, d) průnikové plochy, e) tenké stěny

- **Průniky.** V grafice můžeme nakreslit nekonečně tenkou přímku nebo dotyk dvou objektů v jednom bodě, ale ve skutečnosti není možné vyrobit nekonečně tenké vlákno nebo spojit dva objekty ideálně bodovým svářem. Žára (2004)

3D model musí obsahovat takové hrany, které spojují jen dva polygony. Na obr. 4.3 je vidět chybu průniku a její následné řešení.

Detekce chyby: automaticky pomocí CAD aplikací nebo zásuvného modulu Solid Inspector pro SketchUp.

Oprava: editace objektu způsobem ukázaným na obr. 4.3.



Obr. 4.3 Chyba průniku a její řešení, podle Žára (2004)

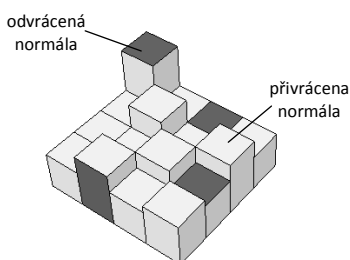
- **Orientace normály plochy objektu.** Problematika orientace normály tkví v povrchové reprezentaci 3D modelu. Každá plocha 3D modelu má orientaci, kterou ukazuje normálový vektor (normála) mířící vždy ven z tělesa. Podle toho, jestli normála směřuje k pozorovateli či od něj, rozlišujeme plochy na *přivrácené*

a *odvrácené*. Žára (2004) Aby 3D tisk proběhl bez problému, těleso musí mít všechny normály ven.

Orientace ploch objektu má vliv na správnost vyplnění modelu. Pokud je plocha odvrácená, může chybně změnit oblast výplně modelu. Aby tedy byl model vyplněn stavebním materiálem korektně, musí být plocha orientovaná směrem dovnitř modelu, viz obr. 4.4.

Detekce chyby: automaticky pomocí CAD aplikací nebo zásuvného modulu CADspan.

Oprava: automatickým nebo manuálním otočením ploch správným směrem, tj. dovnitř modelu.



Obr. 4.4 Chybná orientace normály plochy objektu

- **Překrývající se geometrické objekty** také poškozují topologii 3D modelu. K překrytí geometrických objektů (úsečky, plochy) dochází během konstrukčních prací nebo při editaci jednotlivých částí 3D modelu.

Detekce chyby: automaticky pomocí CAD aplikací nebo zásuvného modulu Solid Inspector pro SketchUp.

Oprava: manuální odstranění duplicitních objektů.

- **Ostré hrany**. 3D tiskárny většinou nejsou schopné vytisknout příliš ostré hrany. V případě když se to povede, nastává problém v pevnosti takových části, které jsou převážně velmi křehké a mohou se lámat a tím poškodit větší část modelu.

Detekce chyby: automaticky pomocí CAD aplikací.

Oprava: lze manuálně a automaticky, ve SketchUp pomocí zásuvného modulu RoundCorner.

4.4.2 Aplikace použité pro detekce a odstranění topologických chyb

V dané podkapitole budou popsány ty aplikační prostředky pro určení a opravu topologických chyb, které byly vyzkoušeny v rámci této diplomové práce a doporučeny v kap. 4.5.1.

Před začátkem oprav topologických chyb je třeba je vyhledat a následně opravovat odstraněním nebo editací. CAD aplikace¹⁶, např. Autodesk 3ds Max, Geomagic nabízí nástroje pro detekci a opravu topologických nedostatků. Tato diplomová práce je zaměřena na vyhledávání a opravy topologických chyb v programu SketchUp.

¹⁶ <http://www.shapeways.com/tutorials/3d-software>

Aplikace SketchUp neobsahuje žádné nástroje, pomocí kterých by se dalo snadno zkontrolovat výše uvedené chyby. Řešením jsou zásuvné moduly vhodné pro detekci a opravu topologických chyb.

1. *Solid Inspektor*¹⁷

Tento zásuvný modul, vyžadující jen instalaci TT_Lib²-2.7.0, umí rychle vyhledat všechny chyby narušující topologii modelu. Zásuvný modul po stažení je třeba uložit do složky *SketchUp/Plugins*.

Použití daného zásuvného modulu je velice jednoduché a pohodlné. Lze aktivovat nástroj z nabídky *Tools – Solid Inspektor*. Nástroj označuje chyby žlutými kolečky. Pokud je 3D model složený z komponent, jsou dvě možnosti jak to kontrolovat:

- každou komponentu kontrolovat zvlášť,
- rozložit komponenty a spustit nástroj nad celým 3D modelem naráz.

Daný nástroj chyby jen vyhledává, opravovat je třeba manuálně mazáním nebo editací chybných objektů.

2. *RoundCorner*¹⁸

Zásuvný modul *Round Corner* umožňuje vybrat plochy a hrany a zaoblit jejich ostré rohy. Lze zde nastavit parametry rohů včetně poloměru a segmentů. V rámci diplomové práce nebyl použit.

3. *CADspan*

Další zásuvný modul pro SketchUp, který byl vyzkoušen v této diplomové práci je *CADspan*. Daný modul poskytuje uživateli nástroje jak na opravu, tak na export modelu do STL v SketchUp. Obsahuje tyto nástroje:

- *Layerize*
- *Unsmooth Model*
- *Preview Style* – užitečný pro kontrolu orientace normály plochy objektu
- *Resurfacers*
- *Import Geometry*
- *STL Raw Export*.

Po všech úpravách a topologických kontrolách je k dispozici virtuální 3D model vhodný pro zpracování softwarem 3D tiskárny.

4.5 Úprava 3D modelu pro tisk vybranými technologiemi Rapid Prototyping

Cílem této fáze příprav virtuálního 3D modelu je přizpůsobit ho parametrům tiskárny tak, aby výsledný model vyhovoval základním požadavkům v kap. 3.1. Dále je v této fázi třeba řešit, jakým způsobem ovlivní případné nedostatky vybraných technologií výsledný 3D tisk modelu.

Přípravu topologicky čistého 3D modelu lze provádět několika postupy:

¹⁷ <https://extensions.sketchup.com/en/content/solid-inspector>

¹⁸ <http://www.mastersketchup.com/best-3d-printing-plugins-for-sketchup/>

1. 3D model upravit v modelovacím programu, např. SketchUp, 3DS Max.
2. 3D model převést do vhodného formátu a upravovat ho buď ve software 3D tiskáren, nebo ve freeware aplikacích, které slouží pro tzv. „slicování“ modelu, což je rozdělování modelu na vrstvy, např. Slic3r¹⁹, SFACT²⁰ apod.
3. Kombinovat dvě první varianty, jelikož ani ve software, ani ve freeware aplikacích pro 3D tiskárny nejde 3D model editovat.

Pro účely diplomové práce byly v kap. 3.4 vybrány dvě dostupné technologie 3DP a FDM. Při úpravě 3D modelu bude postupováno podle základních vlastnosti 3D modelu.

4.5.1 Pevnost a přesnost 3D modelu

Pevnost a přesnost modelu jsou dány technologií tisku. Technologie 3DP a FDM zcela vyhovují požadavkům na výsledný 3D model pro účely prezentace. Není tedy třeba se jimi v této fázi výrazně zabývat.

Nutné je ohlídat pouze vhodnou minimální a maximální tloušťku stěn modelu. Minimální tloušťka stěn má vliv na pevnost drobných detailů a maximální na spotřebu materiálu.

4.5.2 Velikost 3D modelu

Velikost modelu je řešena stejným způsobem pro obě technologie 3DP i FDM. Při úpravě 3D modelu se musí vzít v potaz: *měřítko*, *minimální rozměr detailů* a *maximální velikost modelu*, které jsou ovlivnitelné technologickými limity vybraných technologií, viz kap. 3.3.

Minimální rozměr detailů

U tiskáren založených na technologiích 3DP a FDM má tiskový software přednastavený minimální rozměr objektu. Pokud je objekt menší než minimální rozměr, tiskový software tento detail ignoruje a tiskárna ho nevytiskne. Takže řešením je takové detaily modelu zvětšit podle nastavení minimálního rozměru v softwaru tiskárny.

Maximální velikost

Když se jedná, ve fázi před tiskem, o velikost 3D modelu, jedná se hlavně o měřítko, které je hlavním rozhodovacím faktorem kvality a podrobnosti výsledného 3D modelu. Zde je nutné vzít v úvahu účel modelu.

Maximální velikost modelu se musí řešit na základě stanoveného měřítka. Jak již bylo uvedeno v kap. 3.1, maximální velikost není omezena a pro obě technologie ji lze vyřešit vhodným rozdělením modelu na části.

¹⁹ <http://slic3r.org/>

²⁰ <http://www.futur3d.net/programy-pro-3d-tisk>

Stavba podpor

Jedním z omezení, které 3D tiskárna přináší, je *stavba podpor*. Před výběrem technologie je třeba, v závislosti na dosažené *pevnosti* 3D modelu, uvážit, zda a jak budou podpory odstraňovány. Jsou dvě možnosti stavby podpor – podpůrné struktury (jedna tisková hlava) a podpůrný materiál (několik tiskových hlav), přičemž podpůrný materiál může být odstraněn snadněji než podpůrná struktura. Zamezit velkému počtu podpor lze vhodným otočením virtuálního modelu nebo jeho rozdělením na části.

4.5.3 Barevnost

FDM

Tisk jednobarevných 3D modelů nepřináší žádné problémy.

Teoreticky je možné metodou FDM vytisknout krajinu nebo část města vícebarevně několika způsoby:

1. využitím tří trysek,
2. modely budou rozděleny na části (např. stavební objekty, stromy, reliéf, výškopisné mapy apod.) a každá část bude vytisknuta jinou barvou. Při dokončovacích pracích se všechny části poskládají dohromady.

3DP

Metodou 3DP je možné tisknout plnobarevné 3D modely všech geoobjektů.

Pokud máme plnobarevný model budovy nebo model reliéfu, je důležité zvolit správné barvy. Tiskárna využívá barevný model CMYK, založený na subtraktivním²¹ míšení barev, které pak zapříčiňuje pracné hledání správné barvy.

V případě tisku modelu s texturami nebo ortofotosnímekem je důležité:

- rozlišení 3D tiskárny,
- vybrat kvalitní ortofotosnímky, které obsahují co nejméně stínů. Stíny snižují kvalitu použitého ortofotosnímku a následně i kvalitu zobrazení reálného a přehledného stavu na vytištěném modelu reliéfu. Na obrázku č. 4.5 je možné prohlédnout vytištěný model reliéfu, kde jsou červenými šipkami ukázány stíny.



Obr. 4.5 Model reliéfu vytvořený pomocí metody 3DP, zdroj Šuba (2010)

²¹ Subtraktivní míšení barev znamená, že při míšení barvy od sebe odečítáme, tudíž omezujeme barevné spektrum odrážející od povrchu.

V této fázi je virtuální 3D model editován a má cílovou podobu. Dále je třeba ho důkladně analyzovat a zjistit, zda je topologicky čistý a případně provést nutné opravy 3D modelu, které jsou popsány v následující kapitole.

4.6 Export virtuálního 3D modelu

Poslední fáze příprav zahrnuje export připraveného virtuálního 3D modelu z formátu CAD nebo SKP do formátů pro 3D tisk pomocí vhodných aplikací.

4.6.1 Formáty pro 3D tisk vybranými metodami 3D Rapid Prototyping

Technologie FDM využívá hlavně formát STL, který je vhodný především pro tisk jednobarevných modelů.

Často využívanými formáty pro 3D tisk technologií 3DP jsou formáty PLY, VRML (viz kap. 4.3), OBJ, 3DS, X3D. Tyto formáty jsou vhodné pro tisk vícebarevných a plnobarevných modelů, jelikož zachovávají informaci o barvě, navrženou při modelování virtuálního modelu.

STL²² (Stereolithography) – univerzální formát pro 3D tisk, který akceptuje většina aplikací 3D tiskáren. Formát představuje zápis trojdimenzionálních objektů složených z trojúhelníkové sítě. Každá plocha sítě je definována normálou a třemi vrcholy. Soubor STL popisuje povrchovou geometrii 3D modelu bez zastoupení barvy, textur a jiných atributů modelu.

4.6.2 Možnosti exportu 3D modelu do vybraných formátů

CAD aplikace, např. MicroStation V8i, jsou již schopné exportovat data do formátů 3D tisku. Naopak 3D tiskárny již podporují výstupy některých grafických aplikací, např. 3DS formát (3DS Max) a STL formát (Blender). V dané podkapitole jsou uvedeny některé aplikace, které by mohly být přínosné při převodu výstupních dat, která nejsou podporována software 3D tiskáren.

STL Import/Export

STL Import/Export²³ je zásuvný modul aplikace SketchUp a umožňuje importovat a exportovat soubory ve formátu STL. Soubor ve formátu RBZ lze nainstalovat pomocí *Window – System Preferences – Extensions – Install Extensions*. Výsledek exportu se bude nacházet v nabídce *File – Export STL* a výsledek importu – v nabídce *File – Import*.

²² <http://reference.wolfram.com/language/ref/format/STL.html>

²³ <http://extensions.sketchup.com/en/content/sketchup-stl>

MeshLab

MeshLab²⁴ je volně přístupný program pro tvorbu a editaci 3D modelů (obr. 4.9). Tento program může být přínosný zejména pro své vlastnosti importu a exportu velkého množství formátů pro 3D tisk. Aplikace umožňuje především jednoduše importovat a prohlížet 3D objekty v STL formátu.

5 Ukázka přípravy geografických dat pro 3D tisk na příkladu podrobného modelu budovy

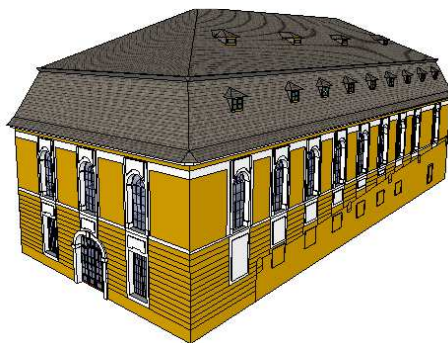
V této kapitole bude popsán postup přípravy geodat pro 3D tisk metodami 3DP a FDM na konkrétních datech 3D modelů budov kaple a jízdárny, které se nachází v areálu zámku Kozel²⁵.

V kapitole bude dále popsáno spojení všech vstupních dat kaple a vytvoření topologicky čistého 3D modelu exteriéru a interiéru budovy více v kap. 4.3 Data budou připravována pro 3D tisk oběma metodami. 3D model jízdárny bude připravován podobným způsobem jako 3D model kaple. Výstupem příprav bude topologicky čistý 3D model exteriéru.

5.1 Vstupní data

Pro tisk 3D modelů kaple a jízdárny v zámeckém areálu Kozel byla použita tato vstupní data:

1. Vektorový povrchový 3D model exteriéru budovy jízdárny ve formátu SKP, který vyhotovila Ing. J. Stejcová v rámci předmětu KMA/AGI.



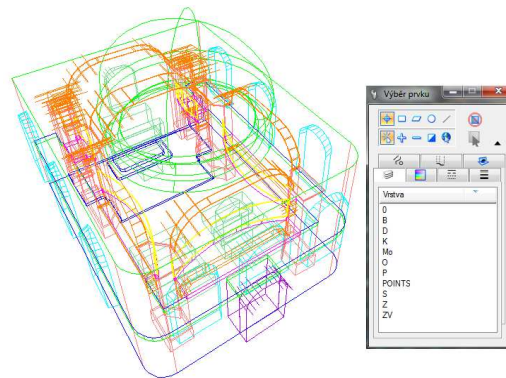
5.1 3D model jízdárny

2. Vektorový drátový 3D model interiéru kaple ve formátu DGN (obr. 4.2), který byl vymodelován z mračna bodů zaměřených laserovým skenováním. 3D model je

²⁴ <http://meshlab.sourceforge.net/>

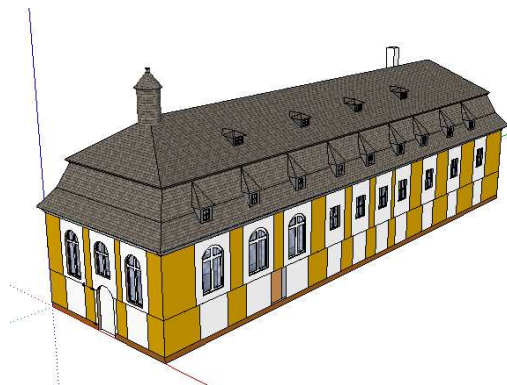
²⁵ <http://www.zamek-kozel.eu/>

rozdělen na vrstvy: B – balkón, D – dveře, K – klenba, Mo – mobiliář, O – okno, P – podlaha, POINTS – body, S – strop, Z – zábradlí, ZV – zeď vnitřní. Hrádková (2009)



Obr. 5.1 Drátový 3D model kaple vizualizovaný v *MicroStation V8i*

3. Vektorový povrchový 3D model exteriéru a interiéru celé budovy kaple ve formátu SKP. 3D model byl vymodelován na základě analogové výkresové dokumentace v rámci předmětu KMA/AGI.



Obr. 5.2 3D model budovy kaple

4. 2D výkresová dokumentace v digitální podobě ve formátu DXF.

Výše uvedená vstupní data byla uložena v rozdílných formátech a typech reprezentace (hranová a povrchová). Je tedy možné tato data označit za heterogenní vstupní data, která bude třeba před editací harmonizovat v rámci příprav modelu budovy.

Pro účely diplomové práce byly využity 3D modely ve formátu DGN a SKP, a proto byly pro další zpracování zvoleny aplikace pracující s danými formáty:

- **MicroStation V8i**²⁶ byl použit pro export drátěného 3D modelu v nativním formátu DGN do výměnného formátu DXF.
- **SketchUp Pro 2013**²⁷ byl zvolen pro import 3D modelu ve formátu DXF do SKP a pro následnou editaci obou modelů.

²⁶ <http://www.bentley.com/en-US/Products/MicroStation/>

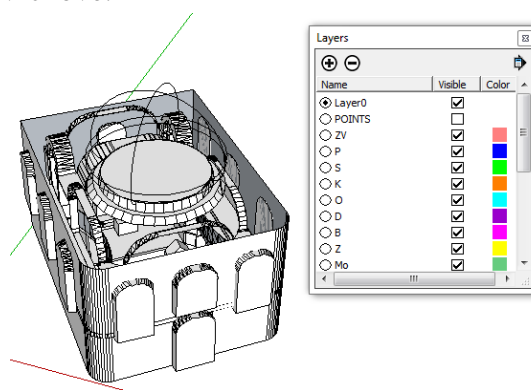
²⁷ <http://www.sketchup.com/>

5.2 Harmonizace vstupních dat

Vstupní data rozdílných formátů lze harmonizovat pomocí exportu resp. importu těchto dat do požadovaného formátu prostřednictvím CAD aplikací nebo programu SketchUp.

Drátový 3D model interiéru kaple byl exportován do výměnného formátu DXF v programu MicroStation V8i pomocí *Soubor – Export – DXF*.

3D model ve formátu DXF byl importován (*File – Import*) do programu SketchUp Pro 2013. Při importu modelu ve formátu DXF bylo nutné, před načtením dat, pro zachování měřítka nastavit jednotky (*Units*) na metry. Nastavení jednotek lze najít v dialogovém okně *Import* ve složce *Volby (Options) – Měřítko (Scale)*. Nainportovaný 3D model je na obr. 5.3, z něhož je zřejmé, že aplikace automaticky převedla některé části drátového modelu na povrchové.



Obr. 5.3 Importovaný model interiéru kaple zámku Kozel

Jak je vidět na obr. 5.3, při importu 3D modelu bylo mj. zachováno původní rozdělení modelu do vrstev. Nainportovaný 3D model byl následně natočen ve směru os základního osového kříže.

Jak celý drátový model, tak i jednotlivé objekty, které ho tvoří, při importu do SketchUp konverzovaly do podoby komponent. Pro další úpravy bylo nezbytné rozložit komponenty na jednotlivé prvky. Komponentu lze rozložit tak, že ji označíme a po kliknutí pravým tlačítkem, z kontextového menu vybereme volbu *Explode*.

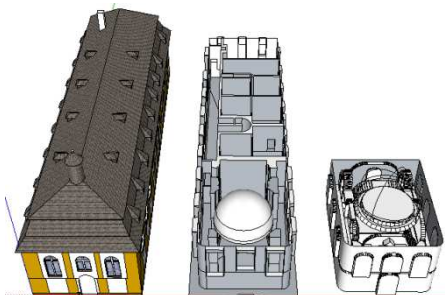
Po výše zmíněných přípravách byl 3D model interiéru kaple připraven ke spojení s modelem celé budovy kaple.

5.3 Editace 3D modelů

3D model kaple

Dalším krokem při přípravě 3D modelu pro tisk bylo spojení importovaného interiéru kaple (viz kap. 5.2.2) s ostatními interiéry a exteriéry budovy. Spojení 3D modelů bylo provedeno tak, že nejprve byl v programu SketchUp otevřen soubor s 3D modelem celé budovy kaple a poté do něj byl importován, pomocí příkazu *File – Import*, 3D model

interiéru kaple. Na obr. 5.5 je vidět všechny vstupní 3D modely v jednom souboru, připravené pro editaci a spojení do kompletního 3D modelu.

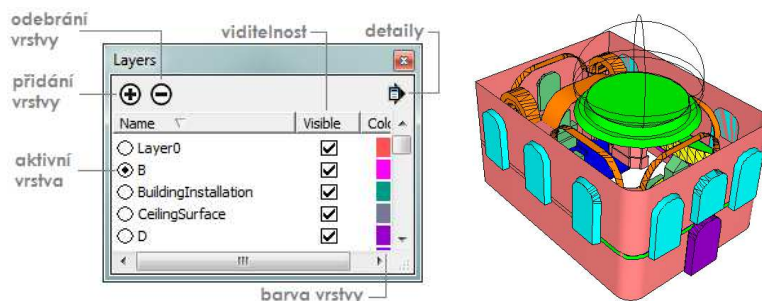


Obr. 5.4 3D modely exteriéru a interiéru kaple připravené k editaci

Při spojení 3D modelů se automaticky spojily i jejich vrstvy, které bylo třeba seřadit a sladit dohromady pro jeden společný 3D model. Byly např. spojeny vrstvy balkonů a zábradlí, okna kaple s okny celé budovy, dveře kaple s dveřmi celé budovy atd.

Dále byla ze seznamu vrstev smazána vrstva POINTS (body), která nebyla potřebná pro 3D tisk budovy a komplikovala práci s programem tak, že se činnost programu hodně zpomalovala.

Pro třídění a editaci vrstev bylo využito dialogové okno *Layers*, v nabídce *View – Toolbars – Layers* nebo *Window – Layers*, které je nápomocné při práci s podrobným modelem budov. Tento panel umožňuje rychle nastavit aktivní vrstvu a spustit informací o všech vrstvách *Layers*. Vše se implicitně ukládá do vrstvy *Layer0*, kterou nelze odstranit. Abychom mohli využívat *Layers* plnohodnotně, je třeba vybrané objekty modelu zařadit vždy do patřičné vrstvy. Nejlepší způsob je nejprve vrstvu vytvořit a poté do ní přidat prvek modelu. Pro lepší přehled lze model obarvit podle vrstev tlačítkem *Details – Color by layer*. Využití vrstev značně usnadňuje práci při úpravách modelu. Vybrané vrstvy lze vypínat, což je výhodné pro úpravy interiéru při vypnutí vrstvy exteriéru. Okno *Layers* je ukázaný na obr. 5.4. Další pomůcka pro práci s vrstvami v SketchUp je okno *Entity Info*. Tento nástroj je spojen s *Layers* a umožňuje snadno a rychle převádět objekty mezi vrstvami a měnit textury objektů. Okno lze aktivovat z nabídky *Window – Entity Info* nebo jej vybrat z kontextového menu po kliknutí prvním tlačítkem.



Obr. 5.5 Dialogové okno *Layers*²⁸ a příklad jeho využití

Editace modelů a modelování nových objektů probíhala v programu SketchUp s využitím všech obvyklých nástrojů pro modelování. Více lze přečíst v Belai (2012).

²⁸ Význam vrstev označených B a D je vysvětlen v kap. 5.1

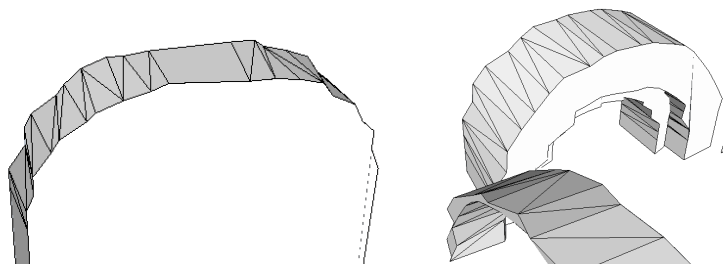
Zdrojový 3D model celé budovy kaple (kap. 5.1, odst. 2) byl vymodelován nepřesně podle starších a už neplatných podkladů. Proto bylo v rámci editace třeba také aktualizovat exteriéry a interiéry celé budovy kaple podle nové 2D výkresové dokumentace.

Nejprve byly aktualizovány exteriéry kaple podle fotografické dokumentace objektu, která byla pořízena v únoru 2014. Byla editována všechna okna, dveře, střecha s komíny, vikýři, věžičkou a fasáda budovy.

Následně byly editovány interiéry celé budovy kaple, které zahrnují technické a sociální zázemí v přízemí budovy kaple. Nakonec byly na základě nových podkladů vymodelovány chybějící schody, okna, dveře a místnost „Modrý salónek“ v prvním poschodí, viz kap. 5.1, odst. 3.

Původní interiér kaple v modelu celé budovy bylo třeba nahradit přesným a kompletním 3D modelem interiéru kaple vzniklého z drátěného modelu.

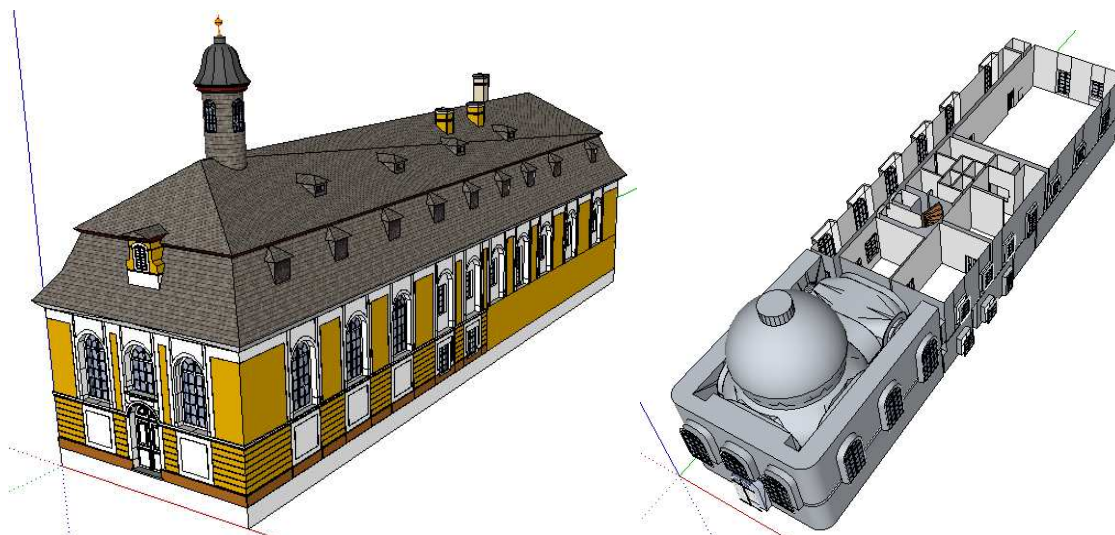
3D model kaple vzniklý z drátěného modelu byl před vložením do druhého modelu také editován. Všechny objekty se musely opravit nově, jelikož byla při importu 3D modelu porušena hlavně struktura oblouků u dveří, oken a kleneb, viz obr. 5.6.



Obr. 5.6 Ukázka struktury oblouků oken a kleneb importovaného 3D modelu kaple

Jako poslední byla vymodelována kopule kaple, která zůstala po převodu drátěná (viz obr. 5.5). Oprava kopule probíhala podle následujícího postupu. Nejprve byla definována výška kopule podle oblouků – hran, které se převedly při importu modelu. Poté jeden z oblouků byl smazán. Z druhého oblouku byl vytvořen rovinný profil. Klenba byla vytvořena po dráze ve tvaru kružnice pomocí nástroje *Follow Me*.

Po skončení editace modelu kaple, byly všechny tři modely – exteriéry, interiéry celé budovy kaple a interiéry kaple spojeny v jeden 3D model pro účely virtuální prezentace. Následně 3D model byl umístěn nad rastrem Google a v souřadnicovém systému WGS84 uložen jako zvláštní soubor.



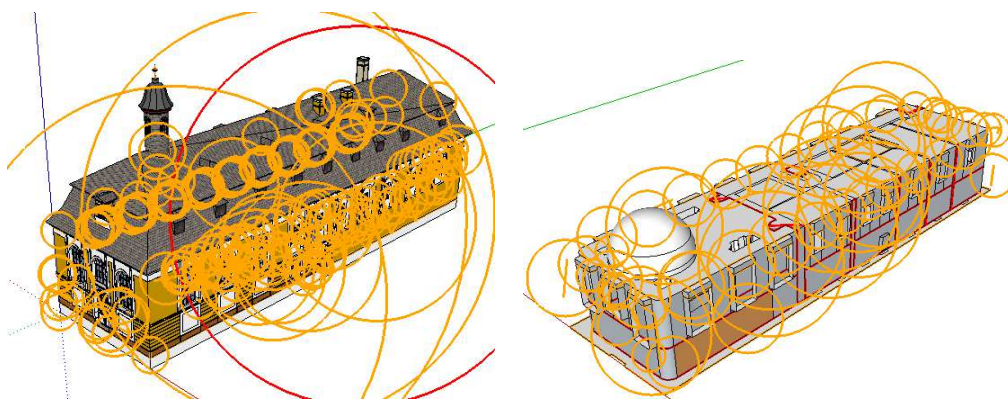
Obr. 5.7 3D model kaple (exteriéry a interiéry) pro účely virtuální prezentace

3D model jízárny

Editace 3D modelu exteriéru probíhala obdobným způsobem, jako editace 3D modelu kaple, tedy v programu SketchUp. Jelikož původně modelování probíhalo podle neaktuální výkresové dokumentace, bylo třeba některé architektonické prvky budovy opravit podle skutečnosti. Byly opraveny vikýře, fasáda; nově vymodelována okna v přízemí a vikýř nad vchodem do budovy. Na střechu a vikýře se použila nová textura, která se více podobá té skutečné. 3D model byl tímto připraven k topologickým kontrolám.

5.4 Topologické opravy

Kontrola topologie 3D modelů kaple a jízárny byla provedena v programu SketchUP s využitím zásuvného modulu Slid Inspector, který bezchybně kontroluje a vyhledává v modelu všechny topologické chyby (více v 4.5.2). Výsledky první kontroly po editaci model lze vidět na obr. 5.8.

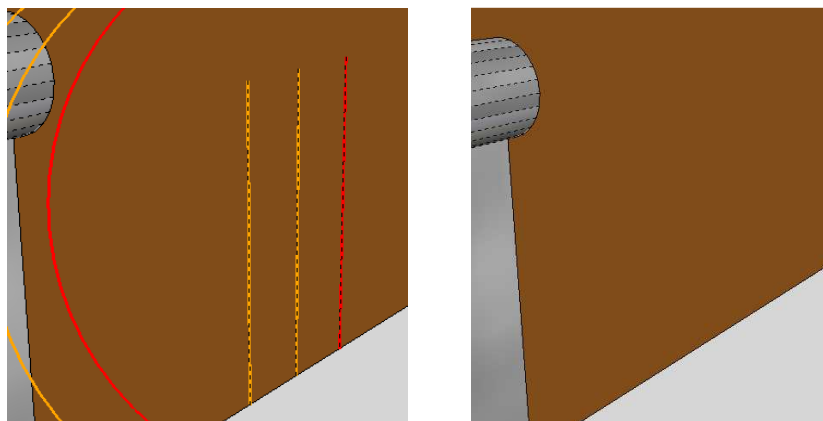


Obr. 5.8 Výsledek kontrol topologie 3D modelu kaple

Při práci se lze využívat klávesy *Shift+Tab*, které umožňují procházet označené prvky a přiblížují je, a klávesy *Nahoru/Dolů*, *Vlevo/Vpravo* umožňují jen přepínat mezi označenými prvky. Po spuštění *Solid Inspektor* je možné hned na to použít nástroje z panelu *Camera*. Jakmile je pohled vhodně nastaven, dá se s využitím klávesy *Esc* vrátit k označeným chybám.

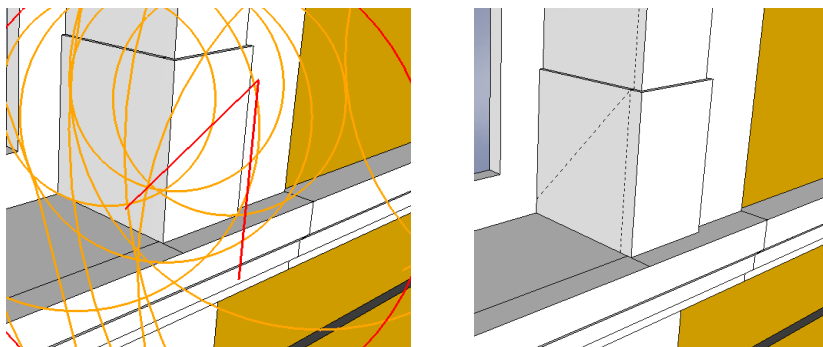
Snadnou navigaci mezi prvky označenými kolečky byly topologické chyby, jedna po druhé, manuálně opravovány. Topologické chyby a jejich opravy jsou ukázány níže.

Hustota topologie: zbytečné úsečky zvyšují hustotu topologie.

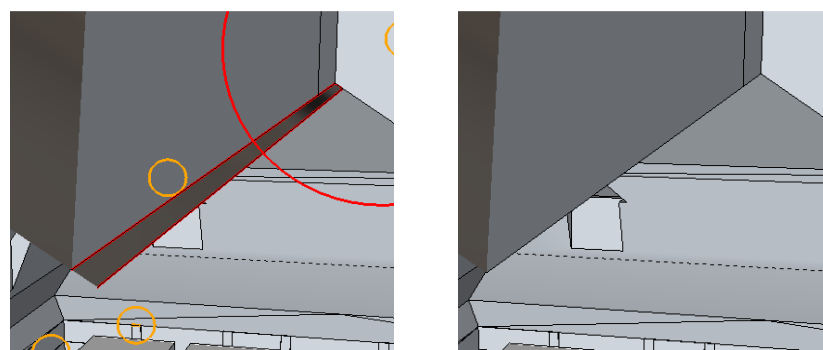


Obr. 5.9 Zbytečné úsečky a jejich oprava

Úsečky a plošky, které se nacházejí volně v prostoru. Chyby vznikly při kopírování části 3D modelu. Oba prvky byly odstraněny, jelikož nebyly součástí žádného jiného objektu.

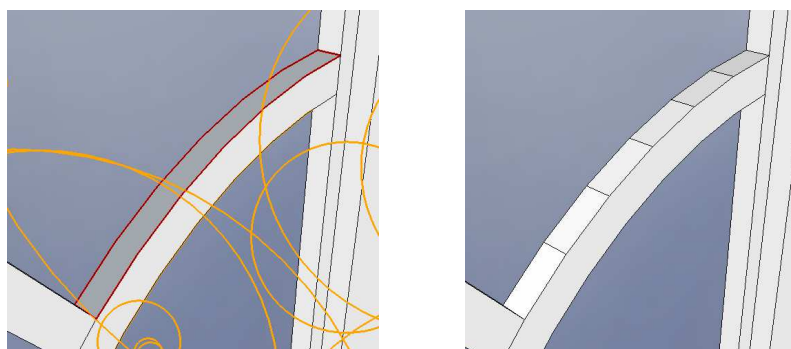


Obr. 5.10 Úsečka nacházející se volně v prostoru a její oprava



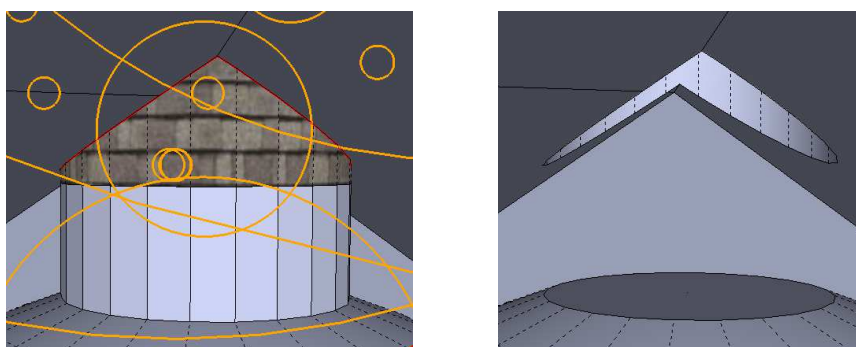
Obr. 5.11 Ploška nacházející se volně v prostoru a její oprava

Otvory. V tomto místě je chyba odstraněna modelováním nových plošek.



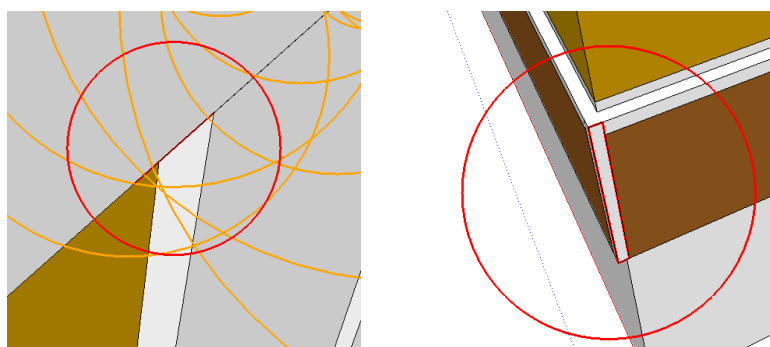
Obr. 5.12 Otvor a jeho oprava

Chybná tloušťka stěny objektu. V daném případě bylo třeba stěny věžičky odstranit. Další možné řešení je přidat stěnám příslušnou tloušťku.



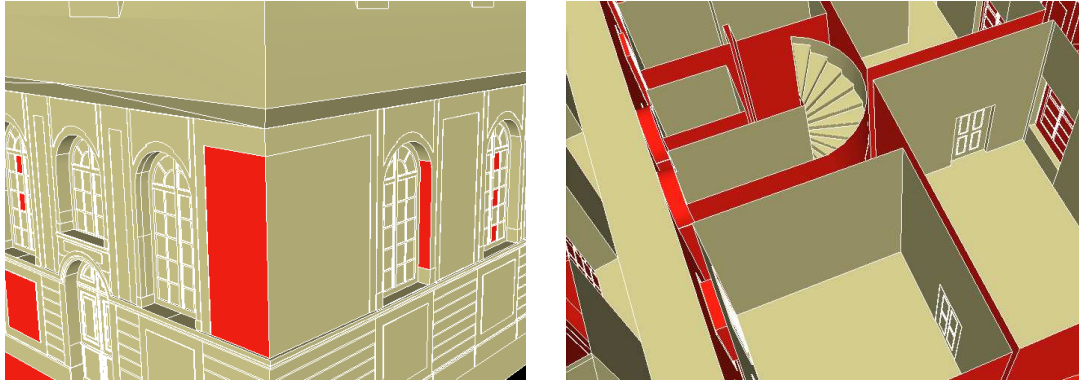
Obr. 5.13 Chybná tloušťka stěny a její odstranění

Překrývající se úsečky a plošky. Takové chyby se stávají nejčastěji při kopírování objektů a je třeba duplicitní objekty smazat.



Obr. 5.14 Překrývající se úsečka a ploška

Orientace normály plochy objektu. Na obr. 5.15 vpravo je vidět správně otočené normály a software 3D tiskárny tak bude schopen zpracovat informaci o vyplnění modelu materiálem. Pro lepší vizualizaci otočení ploch byl využit zásuvný modul *CADspan*.



Obr. 5.15 Chybná a správná orientace normál ploch

V této fázi jsou již opravené topologicky čisté 3D modely celé budovy kaple a jízdárny vhodné pro 3D tisk.



Obr. 5.16 Řez kaple

V rámci diplomové práce bylo rozhodnuto připravit pro 3D tisk dvěma metodami (3DP a FDM) jen část budovy kaple. 3D model byl rozřezán na dvě poloviny a každou z nich bylo třeba vytisknout jednou z vybraných metod, viz obr. 5.16.

5.5 Příprava 3D modelu kaple pro tisk technologií Injet 3D printing

Pro tisk technologií 3DP byla zvolena pravá polovina kaple, kde se nachází oltář. Tento model byl připravován za účelem prezentace v rámci akce „Dny vědy a techniky“ v Plzni v roce 2014. Cílem bylo vytisknout bílý 3D model v měřítku 1:100.

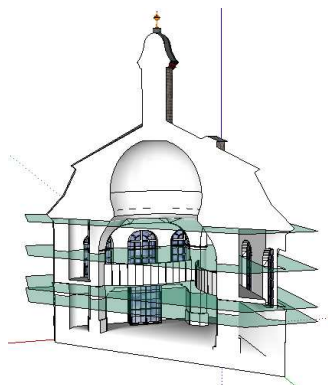
V této fázi příprava 3D modelu nevyžadovala specifické kroky. Virtuální 3D model byl v programu SketchUp 2013 ze SKP formátu rovnou převeden do formátu VRML a poslán do aplikace ZPrint – software 3D tiskárny Zprinter 450.

5.6 Příprava 3D modelu kaple pro tisk technologií Fused Deposition Modeling

Pro tisk technologií FDM byla zvolena levá polovina kaple. Tento model byl připravován pro testovací účely. Cílem bylo také vytisknout model v měřítku 1:100 a pak

jej porovnat s tiskem metodou 3DP. Tisk byl vyzkoušen na dvou typech 3D tiskáren Fabbster 11.1 a Prusa 3i.

Přípravy 3D modelu pro 3D tisk tiskárnou **Fabbster 11.1** probíhaly v programu SketchUp. Pro efektivnější tisk bez podpor bylo rozhodnuto 3D model rozdělit horizontálně na pět částí a každou část vytisknout samostatně. Viz obr. 5.17. Dále bylo třeba rozšířit tloušťku zábradlí balkonů, jelikož v měřítku 1:100 tloušťka již nevyhovovala parametrům 3D tiskárny, byla cca 0,6 mm, což je menší než je limit (0,7 mm) tiskárny.

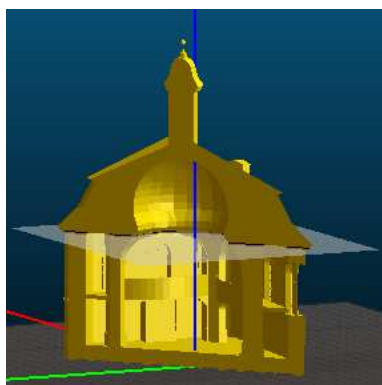


Obr. 5.17 Levá polovina kaple rozřezána pro tisk metodou FDM

Nakonec byl 3D model převeden do formátu STL dvěma způsoby:

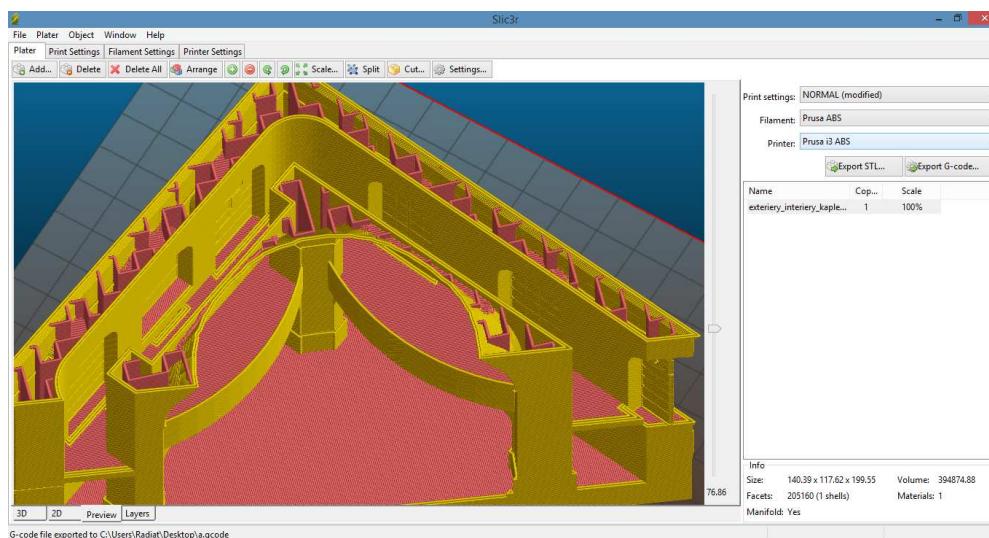
- pomocí zásuvného modulu STL Import/Export, který proběhl bez problému,
- pomocí aplikace MeshLab, kde převod probíhal bez problému, ale z nejasných příčin nebylo zachováno měřítko 1:100. Model se v důsledku převodu zmenšil a byl v měřítku cca 1:2000.

Přípravy 3D modelu pro 3D tisk tiskárnou **Prusa 3i** probíhaly prostřednictvím aplikace Slic3r 1.2.6. 3D model byl rozdělen na dvě části (obr. 5.18), jelikož tiskárna nezvládá dobře vytisknout model vyšší než 18 cm.



Obr. 5.18 Levá strana kaple připravená pro tisk v prostředí Slic3r 1.2.6

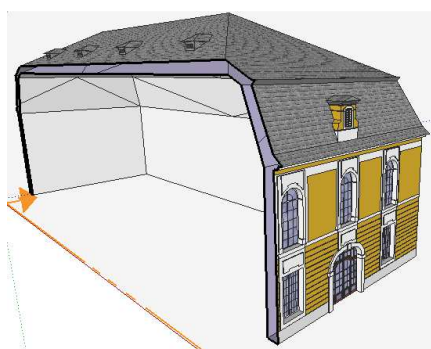
Pomocí aplikace Slic3r 1.2.6 ze souboru STL byl vygenerován G-code²⁹, kterému rozumí ovládací elektronika 3D tiskárny. G-code je uložen na příloženém CD. Ukázka pracovního prostředí Slic3r a v něm nahraného modelu je na obr. 5.19.



Obr. 5.19 Pracovní prostředí aplikace Slic3r

5.7 Příprava 3D modelu jízďárny pro tisk technologií Inject 3D printing

Záměrem bylo vytisknout plnobarevný 3D model exteriéru jízďárny v měřítku 1:400, který bude využit pro propagaci Zámku Kozel. Přípravy 3D modelu nebyly komplikované jako u předchozích modelů. Bylo třeba jen určit šířku stěny budovy, aby model byl dutý, čímž se spotřebuje menší množství stavebního materiálu. Řez 3D modelu je na obr. 5.20.



Obr. 5.20 Řez 3D modelu budovy jízďárny

3D Model byl následně prostřednictvím programu SketchUp vyexportován do formátu VRML. Při přípravách nastaly komplikace s texturami a barvami modelu, které bylo třeba upravovat v programu Geomagic. Upravený model byl poté poslán aplikaci Zprint, která ovládá 3D tiskárnu Zprinter.

²⁹ G-code je jazyk používaný k ovládní CNC obráběcích strojů.

6 3D tisk modelů budov

Pro porovnání výhod/ nevýhod a možností 3D tisku modelů geografických objektů byly pro tuto diplomovou práci zvoleny:

- dvě dostupné technologie 3D tisku: 3DP a FDM,
- 3D modely dvou odlišných budov – kaple (interiéry) a jízďárna (exteriéry).

6.1 Tisk 3D modelu kaple

Tisk 3D modelu interiéru kaple probíhal dvěma technologiemi, a to 3DP a FDM.

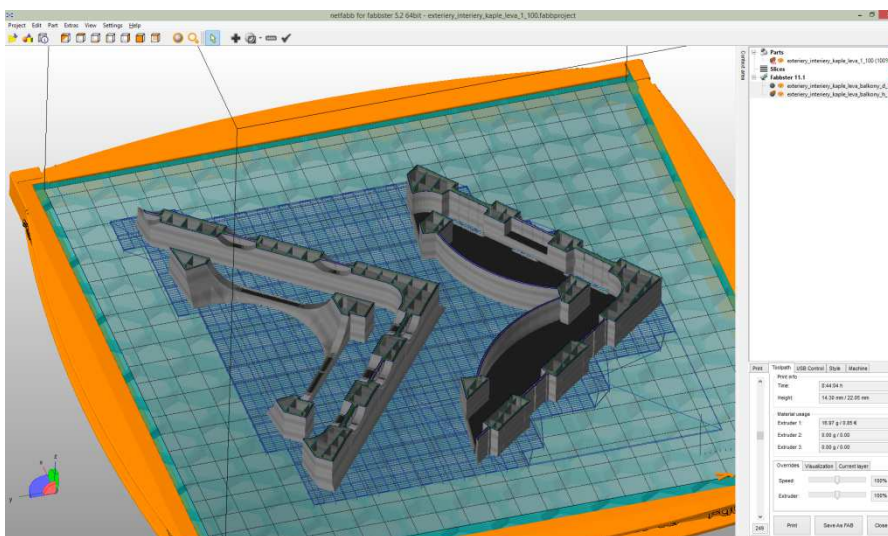
3DP

Nejdříve byla vytisknuta pravá polovina kaple na tiskárně ZPrinter 450. Proces tisku proběhl bez komplikací, ale výsledek (viz přílohy č. 1 a 2) tisku 3DP měl nedostatky:

- okna měla minimální hranici tiskutelnosti – 0,6 mm a byla zborcena při dokončovacích úpravách modelu,
- některé části měly zbytečně masivní konstrukce pro tisk.

FDM

Pro tisk částí modelu levé poloviny kaple byla jako první využita 3D tiskárna **Fabbster 11.1**. Tisk probíhal ve dvou pokusech s využitím dvou odlišných materiálů. 3D model v STL formátu byl exportován do aplikace netFabb, přes kterou je ovládán tisk. Ukázka pracovního prostředí netFabb s nahranými částmi modelu je níže na obr. 6.1.



Obr. 6.1 Pracovní prostředí aplikace netFab

Při prvním pokusu byl využit stavební materiál termoplast ABS. Tato verze tiskárny nemá vyhřívanou pracovní desku, což způsobilo, že při tisku první vrstvy rychle tuhnul materiál vytlačený na desku a docházelo tak k deformaci tisknuté části modelu. Ve výsledku se tisk modelu se nezdařil.

Při druhém pokusu byl využit stavební materiál termoplast PLA³⁰. Tento materiál nevyžadoval vyhřívanou podložku a tím pominul problém s deformací modelu. Přesto při použití termoplastu PLA nastala další komplikace. Po určité době nebyly pohony v tiskové hlavě schopné pohánět plastový drát do trysky, v důsledku čehož tiskárna přestala vytlačovat další vrstvy materiálu a tisk byl zastaven. Ve výsledku se tisk modelu také nezdařil.

Nakonec bylo rozhodnuto tisknout model jinou tiskárnou – **Prusa i3**. Jak již bylo uvedeno v kap. 5.2.5, model byl rozdělen na dvě části a každá z nich byla vytisknuta zvlášť. Horní část modelu (střecha) byla vytisknuta černou barvou, a dolní část modelu (korpus budovy) bílou barvou. Tisk je ovládán přes aplikaci Pronterface, do níž se nahraje G-code, který byl exportován z programu Slic3r. Tisk proběhl bez komplikací a nebylo potřeba využívat podpory. V tomto případě má výsledný 3D model (viz foto v přílohách č. 3 a 4) též drobné nedostatky:

- některé části (balkóny, strop střechy) modelu se vytiskly s hrubým povrchem, které je třeba obrousit,
- šířka oken měla minimální tisknutelnou hranici a okna pak tak mají v některých místech malé otvory.

6.2 Tisk 3D modelu jízdárny

Plnobarevný 3D model budovy exteriéru jízdárny byl vytisknut metodou 3DP prostřednictvím 3D tiskárny Zprinter 450. Tisk plnobarevného 3D modelu proběhl na dva pokusy. U prvního 3D modelu se nepodařilo zachovat správné barvy a textury. Po následných úpravách v programu Geomagic se podařilo dosáhnout správných barev a textur a výsledný 3D model byl akceptovatelný. Foto výsledného 3D modelu lze vidět v přílohách č. 5.

6.3 Shrnutí

Z výše uvedeného, lze vyvodit, že nejlépe se tiskly 3D modely budov pro účely prezentace tiskárnami Zprinter 450 a Prusa i3.

Tiskárnou Zprinter 450, na rozdíl od Fabbster 11.1 nebo Prusa i3, se podařilo vytisknout celý plnobarevný model v průběhu jednoho tisku. Je třeba podotknout, že zde byl požadavek na vytištění jak nekomplikovaného 3D modelu exteriéru budovy, tak komplikovanějšího 3D modelu exteriéru a interiéru budovy. Přípravy virtuálních modelů pro 3D tisk tiskárnou Zprinter 450 nebyly příliš složité. Nevýhodou je vysoká cena materiálu ve srovnání s ostatními tiskárnami a také omezené schopnosti software tiskárny, který nemá náležité funkce pro případné rozdělení modelu na části.

Tiskárnou Fabbster 11.1 nebylo možné vytisknout ani jednu část 3D modelu. Kromě toho 3D model vyžadoval mnohem komplikovanější přípravné práce. Negativní

³⁰ Polyactid acid – polymer mléčné kyseliny

roli sehrála nekompatibilita mezi nevyhřívanou pracovní deskou a materiálem ABS, nebo neschopnost tiskací hlavy, při použití materiálu PLA, jej po určité době vytlačovat. Cena použitých materiálů je nejvýhodnější ze všech ostatních.

Technologii FDM se podařilo uplatnit při tisku 3D modelu interiéru a exteriéru kaple na tiskárně Prusa i3. Tiskárna dokázala model vytisknout, jen pokud byl rozdělený jen na 2 části, kvůli problémům s tiskem modelů větších než 18 cm. Rozdělení bylo nakonec výhodou, jelikož se díky němu podařilo vytisknout dvoubarevný model.

Porovnání parametrů tiskáren, které byly využity v rámci dané diplomové práce, je na závěr shrnut v tab. 6.1.

Tab. 6.1 Shrnutí parametrů použitých 3D tiskáren

Typ 3D tiskárny	3DP Zprinter 450	FDM Fabbster 11.1	FDM Prusa i3
Vlastnosti			
Tloušťka stěny 3D modelu [mm]	0,5	0,7	0,6
Tloušťka nanášené vrstvy [mm]	0,089 – 0,102 mm	0,12 mm	střecha – 0,152 ostatní část – 0,252
Barevnost	plnobarevně, možnost míchání barev	jednobarevně	jednobarevně
Max. velikost modelu [mm]	252×204×204	200×200×200	200×200×200
Maximální rychlost tisku	2 – 4 vrstvy/min	400 mm/sec	200 mm/sec
Cena materiálu (Kč/cm ³) podle výrobce	cca 17	ABS cca 1 PLA cca 0,5	3,18

Diskuse

Podstatnou výhodou 3D tisku technologiemi RP je velká úspora materiálu a energie. Pořizovací ceny stavebních materiálů a 3D tiskáren většinou neumožní zhotovit 3D modely levněji než při použití klasických výrobních metod, určitě však umožní zhotovit přesný 3D model v kratším termínu.

Podle obecných poznatků, získaných o technologiích RP, je možné vyvodit, že v současné době je rychlý vývoj RP technologií zaměřen především:

- na výrobu přesnějších prototypů z materiálů nejen s lepšími mechanickými vlastnostmi, ale i ekologicky nezávadných,
- na zrychlení výrobního procesu a zároveň snížení rizika vzniku chyb,
- na zjednodušení konstrukce a obsluhy 3D tiskáren (např. neustálý vývoj a větší dostupnost tiskáren RepRap) a tím i snížení jejich pořizovací ceny.

V současné době se rychle vyvíjejí spíše modelovací materiály, jednotlivá zařízení a software 3D tiskárny pro RP, než samotné metody RP. Vývoj technologií RP je směřován hlavně podle potřeb jednotlivých odvětví. To znamená, že metody 3D tisku zůstávají stejné, jen technologie a materiály jsou přizpůsobené potřebám jednotlivých oborů.

V oboru 3D tisku metodami Rapid Prototyping chybí kompletní metodika tisku a ustálené pojmy.

Technologie RP umožňuje vyrobit velmi kvalitní a přesné 3D modely terénů, podpovrchových map, zastavěných ploch měst, jednotlivých staveb atd. Avšak všechny

tyto metody mají však svoje technologické limity, na které je nutno brát ohled při rozhodování o výběru potenciální technologie RP pro tisk 3D modelů geoobjektů.

Závěr

Hlavním cílem diplomové práce je uvést čtenáře do problematiky 3D tisku technologiemi Rapid Prototyping. Práce je zaměřena na přípravu geografických dat, jelikož jedním ze základů úspěšného 3D tisku jsou dobře připravená data.

První část je věnována přehledu všech základních metod Rapid Prototyping, kde bylo při přípravě třeba využít co nejvíce aktuálních zdrojů.

Druhá kapitola je zaměřena na využití metod Rapid Prototyping v geografických oborech. Po prostudování všech nalezených zdrojů bylo konstatováno, že využití 3D modelů geografických objektů může být různorodé, avšak nejčastěji se modely využívají pro účely prezentace.

Ve třetí kapitole byly shrnuty základní vlastnosti fyzického 3D modelu, základní parametry 3D tiskáren a vztahy mezi nimi. Na základě toho byla posouzena vhodnost užití uvedených technologií 3D tisku. Výsledkem je zjištění, že nejvhodnějšími technologiemi pro 3D tisk modelů geografických objektů jsou technologie PolyJet, Inkjet 3D Printing a Laminated Object Manufacturing (tisk papírem). Největší předností vybraných technologií je využití metody míchání barev nebo velkého počtu barev, které jsou nezbytné pro tisk kvalitních 3D modelů geografických objektů a tematických map.

Tisk modelů geografických objektů nemá v současné době velké uplatnění. Nebyla nalezena kompletní metodika pro zpracování modelu pro 3D tisk. Cílem čtvrté kapitoly bylo sepsat obecný postup přípravy geografických dat pro 3D tisk a tím ukázat vztah mezi technologiemi 3D tisku a 3D geotechnologiemi. Příprava zahrnuje mj. specifikaci vstupních dat, řešení topologických chyb 3D modelu a možnosti exportu modelů do vybraných formátů. Daný postup umožní dalším zpracovatelům, nejen geografických dat, se vyhnout překážkám při 3D tisku a vytvořit topologicky čistý model, připravený pro 3D tisk. Problémem zůstane neustálená terminologie pojmenování topologických chyb. Názvy chyb jsou používány podle uvážení autorky diplomové práce.

Ukázka přípravy geografických dat pro 3D tisk byla předvedena na příkladu podrobných modelů budov kaple a jízďárny v páté kapitole. Každý z připravených 3D modelů byl vytisknut jednou z dostupných technologií. 3D model jízďárny je již využíván pro propagaci zámku Kozel a jedna z polovin 3D modelu kaple byla využita pro prezentace v rámci akce „Dny vědy a techniky“ v Plzni.

Všechny cíle v diplomové práci byly splněny a otázky stanovené na začátku zodpovězeny.

Použité zdroje a literatura

3D Systems. (2015). *3D systems*. [online] [cit. 2015-01-12]

Dostupné z: <<http://www.3dsystems.com/3d-printers/production/overview>>

3D-tisk. (2014). *Aditivní výroba*. [online] [cit. 2015-01-12]

Dostupné z: <<http://www.3d-tisk.cz/aditivni-vyroba>>

Adam, D. (2013). *3D tisk modelů z běžného kancelářského papíru A4*. Článek InGIS 1/2013. [online] [cit. 2015-04-21] Dostupné z: <<http://www.cad.cz/hardware/78-hardware/4719-3d-tisk-modelu-z-bezneho-kancelarskeho-papiru-a4.html>>

Additive3D. (2013). *Worldwide Guide to Rapid Prototyping*. [online] [cit. 2015-04-25]

Dostupné z: <http://www.additive3d.com/3dpr_cht.htm>

AdFab. (2009). *Additive Fabrication*. [online] [cit. 2015-04-21] Dostupné z:

<<http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>>

AdTech. (2010). *Aditivní technologie metody Rapid Prototyping*. Výuková prezentace. [online] Brno. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

[cit. 2015-01-12] Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_techologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf>

Automa. (2014). *Výměna dat mezi různými systémy CAD*. Odborný časopis. Cislo 4/2014 vyslo 22. 04. 2014 Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33435>

Belai, E. (2012). *3D model památkově chráněného areálu na základě kombinace jeho geodetické a architektonické dokumentace*. [Bakalářská práce]. Plzeň. Zapadočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd.

Čerba, O., et al. (2008). *Projekt HUMBOLDT: cesta k implementaci ESDI*. [online]. GIS Ostrava, 2008. [cit. 2015-04-23] Dostupné z: <http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2008/sbornik/index.htm>

DMLS. (2007). *DMLS – Direct Metal Laser Sintering*. [online] [cit. 2015-04-25]

Dostupné z: <<http://www.dmls.cz/>>

Doležal, J. (2010). *Programová podpora přípravy 3D dat pro tisk tyflomap*. [Bakalářská práce]. Olomouc. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta.

ESRI. (2008). *The Multipatch Geometry Type*. [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <<http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/multipatch-geometry-type.pdf>>

- Ferda, T. (2007). *Využití Rapid Prototypingu v životním cyklu výrobku*. [Bakalářská práce]. Brno. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
Dostupné z: <http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=242>
- Globatek. (2015). *3D printers*. [online] [cit. 2015-04-23]
Dostupné z: <<http://3d.globatek.ru/3d-printers/polyjet/>>
- Ghawana, T., Zlatanova, S. (2013). *3D printing for urban planning: A physical enhancement of spatial perspective*. [online] [cit. 2015-01-26]
Dostupné z: <<http://www.gdmc.nl/publications/index.html/>>
- Hájek, P. (2012). *Příručka pro výuku Rapid Prototyping (RP)*. [online] [cit. 2015-04-23]
Dostupné z: <<http://linux.spszr.cz/indexin.htm>>
- Hrádková, M. (2009). *Studie možností sběru a zpracování podrobných 3D dat pro účely památkové péče*. [diplomová práce]. Plzeň. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd. Dostupné z: <<http://gis.zcu.cz/studium/ZaverecnePrace/>>
- Hausman, K.. (2013). *3D printing for Dummies*. USA. For Dummies. 1 edition. ISBN 978-1-1186-6075-1
- Koutný, D., Paloušek D. (2012). *3D tisk kovových materiálů*. Prezentace. [online] Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. [cit. 2015-04-23]
Dostupné z: <http://ldt.uk.fme.vutbr.cz/img/texty/3D_print_days_Prague.pdf>
- KVS. (2012). *Technologie Rapid Prototyping Polyjet Matrix*. [online] [cit. 2015-04-23]
Dostupné z: <http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping>
- LAUERMANN, L. (1974). *Technická kartografie*. Vyd. 1. Brno. Vojenská akademie Antonína Zápotockého.
- McorTech. (2013). *3D Printers*. [online] [cit. 2015-04-21]
Dostupné z: <<http://mcortechtechnologies.com/resources/gallery/>>
- McorTech. (2014). *3D Printers*. [online] [cit. 2015-04-21] Dostupné z: <<http://mcortechtechnologies.com/wp-content/uploads/2014/10/MCOR-PrinterBrochureNEW-EU-single.pdf>>
- Protocom. (2014). *GIS*. [online] [cit. 2015-01-12].
Dostupné z: <<http://www.protocom.cz/reseni/geospatial/>>
- Rase, W. - D. (2009). *Creating Physical 3D Maps Using Rapid Prototyping Techniques*. [online] [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: <<http://www.wdrase.de/>>

Rubeus. (2015). *Tisk 3D modelů*. [online] [cit. 2015-04-21].
Dostupné z: <http://www.rubeus.cz/?page_id=15>

Singh, S. (2010). *Beginning Google SketchUp for 3D printing*. USA. Apress. 1st edition. ISBN 978-1-4302-3361-9.

Solido. (2009). *3D Technologies*. [online] [cit. 2015-04-23].
Dostupné z: <<http://www.solido3d.com/AdminLockedFiles/File115604.pdf>>

Solidscape. (2013). *3D Printers*. [online] [cit. 2015-04-25]. Dostupné z:
<<http://www.solid-scape.com/products/3d-wax-printers-rapid-prototyping-services-dimension-3d-printers>>

Stratasys. (2015). *Polyjet technologie*. [online] [cit. 2015-04-23].
Dostupné z: <<http://www.stratasys.com/ru>>

Stratil, R. (2014). *Příprava 3D modelu pro 3D tisk*. [Bakalařská práce]. Brno. Masaryková univerzita, Fakulta informatiky. [cit. 2015-04-23].
Dostupné z: <http://is.muni.cz/th/325095/fi_b/>

Šuba, R. (2010). *3D model exteriérů Státního zámku Kozel*. [Bakalařská práce]. Plzeň. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd.
Dostupné z: <<http://gis.zcu.cz/studium/ZaverecnePrace/>>

Technomat. (2013). *Rapid Prototyping – základní pojmy, oblasti použití*. Vyučovací prezentace. [online] Liberec. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní. [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: <http://www.techno-mat.cz/data/katedry/kom/KOM_AT_PT_PR_03_CZE_Votocek_Rapid_Prototyping.pdf>

Urbanová, M. (2012). *Analýza přístupů harmonizace geografických dat*. [Diplomová práce]. Brno. Masaryková univerzita, Přírodovědecká fakulta. Geografický ústav. [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://is.muni.cz/th/269489/prif_m/DP_Marketa_Urbanova.pdf>

WEB3D. (2014). *Web 3D CONSORTIUM: Open Standards for Real-Time 3D Communication. What is X3D?* [online] [cit. 2015-04-23].
Dostupné z: <<http://www.web3d.org/realtime-3d/x3d/whatx3d/>>

Žára, J., Beneš, B., Sochor, J., Felkel, P. (2004). *Moderní počítačová grafika*. Brno. Computer Press. ISBN 80-251-0454-0

ŽELEZNÝ, M. (2015). *Zpracování digitalizovaného obrazu*. Katedra kybernetiky. Přednáškové texty z předmětu KKY/ZDO. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z:
<http://www.kky.zcu.cz/uploads/courses/zdo/ZDO_aktual_130215.pdf>

Seznam příloh

Příloha 1: fotografie pravé poloviny kaple vytisknuté na tiskárně ZPrinter 450.....	71
Příloha 2: fotografie pravé poloviny kaple vytisknuté na tiskárně ZPrinter 450.....	72
Příloha 3: fotografie levé poloviny kaple vytisknuté na tiskárně Prusa 3i	73
Příloha 4: fotografie levé poloviny kaple vytisknuté na tiskárně Prusa 3i	74
Příloha 5: fotografie exteriéru budovy jízdárny vytisknuté na tiskárně ZPrinter 450	75

Obsah přiloženého CD

Přiložený CD disk obsahuje následující soubory:

- BelaiE_DP – text diplomové práce
- Kozel_kaple_leva_tisk_FDM – soubor obsahuje 3D model ve formátu SKP a ve formátu STL a G-code
- Exteriéry_kaple_k_Tisku – 3D model exteriéru kaple ve formátu SKP
- Kozel_kaple_komplet – 3D model exteriéru a interiéru ve formátu SKP
- Kozel_Kaple_komplet_lokalizace_Google – 3D model ve formátu SKP lokalizovaný ve WGS84
- Kozel_kaple_prava_3DP
- Textury
- Vikýř – textury na vikýře
- Jízdárna
 - 3DS – 3D model ve formátu 3DS
 - AutoCAD – výkresová dokumentace v DXF
 - Collada – 3D model ve formátu Collada
 - FBX – 3D model ve formátu FBX
 - GoogleE – 3D model ve formátu KMZ
 - OBJ – 3D model ve formátu ve formátu OBJ
 - VRML – 3D model ve formátu VRML
 - XSI – 3D model ve formátu XSI
 - Jízdárna LOD3 – původní 3D model

Přílohy

Příloha 1: fotografie pravé poloviny kaple vytisknuté na tiskárně ZPrinter 450



Příloha 2: fotografie pravé poloviny kaple vytisknuté na tiskárně ZPrinter 450



Příloha 3: fotografie levé poloviny kaple vytisknuté na tiskárně Prusa 3i



Příloha 4: fotografie levé poloviny kaple vytisknuté na tiskárně Prusa 3i



Příloha 5: fotografie exteriéru budovy jízďárny vytisknuté na tiskárně ZPrinter 450

