

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Pikovnik, T., 2015. Priprava 3D modelov za 3D tisk. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Cerovšek, T.): 33 str.

Datum arhiviranja: 18-09-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Pikovnik, T., 2015. Priprava 3D modelov za 3D tisk. B.Sc Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Cerovšel, T.): 33 p.

Archiving Date: 18-09-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**VISOKOŠOLSKI STROKOVNI
ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE
STOPNJE OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

TOMAŽ PIKOVNIK

PRIPRAVA 3D MODELOV ZA 3D TISK

Diplomska naloga št.: 98/OG-MK

**POST PROCESSING OF 3D MODELS FOR 3D
PRINTING**

Graduation thesis No.: 98/OG-MK

Mentor:

doc. dr. Tomo Cerovšek

Predsednik komisije:

doc. dr. Tomo Cerovšek

Ljubljana, 15. 09. 2015

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Tomaž Pikovnik izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Priprava 3D modelov za 3D tisk«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, September 2015

Tomaž Pikovnik

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Tomu Cerovšku, ki mi je omogočil tiskanje makete, fotografiral elemente in svetoval pri nastalih težavah.

Zahvaljujem se tudi Darku Maliću za tehnično pomoč in za potrpežljivost tekom izdelave makete.

Zahvala gre tudi staršem in prijateljem, ki so me spodbujali pri nastanku diplomske naloge.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 624:681.625.9(497.4)(043.2)

Avtor: Tomaž Pikovnik

Mentor: doc. dr. Tomo Cerovšek

Naslov: Priprava 3D modelov za 3D tisk

Tip dokumenta: Diplomaska naloga – visokošolski strokovni študij

Obseg in oprema: 33 str., 4 pregl., 52 sl., 1 graf.

Ključne besede: 3D tisk, 3D tiskanje, modeliranje makete, tiskanje makete, tehnologije 3D tiskanja

Izveček:

Po mnenju nekaterih strokovnjakov bo aditivna proizvodnja (ali 3D tiskanje) spremenila proizvodnjo industrijo, saj si bo vsak posameznik lahko natisnil svoj objekt po želji.

V diplomski nalogi so predstavljene nekatere tehnologije aditivne proizvodnje. V nadaljevanju diplomske naloge je predstavljena izdelava makete hiše v merilu 1:100, vse od modeliranja do tiskanja. Poseben poudarek je posvečen predelavi modela, da je primeren za tiskanje, kjer je razvit pristop za hitrejše in bolj zanesljivo tiskanje na osnovi predelav elementov modela stavbe na horizontalne ravninske elemente, ki jih stikujemo s prilagojenimi utori.

Opisane so tudi zahteve za izdelavo modela v programu SketchUp ter omejitve glede tiskanja s tehnologijo ciljnega nalaganja. Predstavljene so tudi težave na katere sem naletel med tiskanjem na fakultetnem tiskalniku.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 624:681.625.9(497.4)(043.2)

Author: Tomaž Pikovnik

Supervisor: Assist. Prof. Tomo Cerovšek PhD.

Title: Postprocessing of 3D models for 3D printing

Document type: Graduation Thesis – Higher Professional studies

Scope and tools: 33 p., 4 tab., 52 fig., 1 graf.

Keywords: 3D print, 3D printing, modeling model, printing model, technologies of 3D printing

Abstract:

According to the opinion of some experts the additive manufacturing or 3D printing will change manufacturing industry, because any individual could print their own model according to his or her wishes.

In this graduation thesis some of the additive manufacturing technologies are presented. Furthermore in the production of house scale model in 1:100 is presented, starting from modeling to printing. Special attention is given to postprocessing of the building model elements using unique approach with customized seams on building elements that enable faster and more reliable 3D printing of house scale models.

It also describes the requirements for the production model in SketchUp and restrictions on printing technology with fused filament fabrication. There are also presented problems that I encountered while printing on the faculty printer.

Kazalo vsebine

1	UVOD.....	1
1.1	Problem	2
1.2	Metoda dela	3
1.3	Cilj in namen naloge	3
2	3D TISK	4
2.1	TEHNOLOGIJA 3D TISKA	6
2.2	SLS - selektivno lasersko sintranje (ang. Selective laser sintering).....	9
2.3	SLA - stereolitografija (ang. Stereolithography).....	9
2.4	LOM – nalaganje krojeni plasti (ang. Laminated object manufacturing).....	10
2.5	FDM oz. FFF – ciljno nalaganje (ang. Fused deposition modeling oz. fused filament fabrication)	10
2.6	CLIP – neprekinjena tekoča površinska proizvodja (ang. Continuous liquid interface production).....	11
2.7	EBF - prosto oblikovno tiskanje z elektronskim žarkom (ang. Electron beam freeform fabrication)	12
3	MODELIRANJE ZA 3D TISK.....	13
3.1	Zahteve za tiskanje 3D objektov	13
3.2	STL datoteka.....	18
3.3	G koda.....	19
4	IZDELAVA MAKETE	20
4.1	Predstavitev vzorčne hiše	20
4.2	Modeliranje.....	22
4.2.1	Plošča	22
4.2.2	Stene	23
4.2.3	Streha in stopnice.....	27
4.3	Tiskanje.....	28
4.3.1	Pritličje	29
4.3.2	Mansarda.....	30
4.3.3	Streha	32
5	ZAKLJUČEK	33
	VIRI.....	35

Kazalo slik

Slika 1: Tiskanje v vesolju.....	1
Slika 2: Primerjava stebrov natisnjenih vertikalno (na sliki levo) in stebri natisnjeni horizontalno (na sliki desno).....	2
Slika 3: Levo natisnjeno vertikalno, desno natisnjeno horizontalno.....	3
Slika 4: Hiša natisnjena s 3D tiskalnikom	4
Slika 5: Uporaba v medicini	5
Slika 6: Tiskanje s glino	6
Slika 7: 3D tiskanje s smolo.....	7
Slika 8: 3D tiskanje s prahom	8
Slika 9: SLS tehnologija.....	9
Slika 10: : SLA tehnologija	9
Slika 11: LOM tehnologija.....	10
Slika 12: FDM oz. FFF tehnologija.....	10
Slika 13: CLIP tehnologija.....	11
Slika 14: Tiskanje Eifflovega stolpa.....	11
Slika 15: EBF tehnologija	12
Slika 16: Objekt ni vodotesn, ker mu manjka ploskev	13
Slika 17: Sovpadanje robov	14
Slika 18: Notranja stena v modelu	14
Slika 19: Dvojna ploskev na modelu	14
Slika 20: Primer skupnih robov	15
Slika 21: Geometrija stene je brez globine	15
Slika 22: Preveliki in pravšnji model za tiskanje	15
Slika 23: Primer obrnjene normale ploskve	16
Slika 24: Levo brez tolerance, desno z toleranco	16
Slika 25: Make group.....	17
Slika 26: Entity info.....	17
Slika 27: Solid group	17
Slika 28: Prikaz ločljivosti v .STL datoteki	18
Slika 29: Začetek in konec G kode v programu Slic3r.....	19
Slika 30: Tloris pritličja.....	20
Slika 31: Tloris mansarde	21
Slika 32: ISO pogled iz smeri JZ.....	21
Slika 33: ISO pogled iz smeri SV.....	21
Slika 34: Stik pero – utor	22

Slika 35: Ideja za stik med ploščo (modra) in steno (rdeča)	22
Slika 36: Prerez roba plošče	23
Slika 37: Primerek 1	23
Slika 38: Vzorci pri hitrosti 60 mm/s in 20% zapolnitvi	24
Slika 39: Vzorci pri hitrosti 15 mm/s in 20% zapolnitvi	25
Slika 40: Vzorci pri hitrosti 15 mm/s in 40% zapolnitvi	25
Slika 41: Vzorci pri hitrosti 30 mm/s in 40% zapolnitvi	26
Slika 42: Model strehe	27
Slika 43: Model stopnic	27
Slika 44: Model za tiskanje pritličja	29
Slika 45: Razlivanje filameta	29
Slika 46: Model za tiskanje mansarde	30
Slika 47: Pregrevanje filameta 1	30
Slika 48: Pregrevanje filameta 2	31
Slika 49: Stopljen filament	31
Slika 50: Model za tiskanje strehe	32
Slika 51: Puščanje filameta	32
Slika 52: Končni izdelek	33

Kazalo preglednic

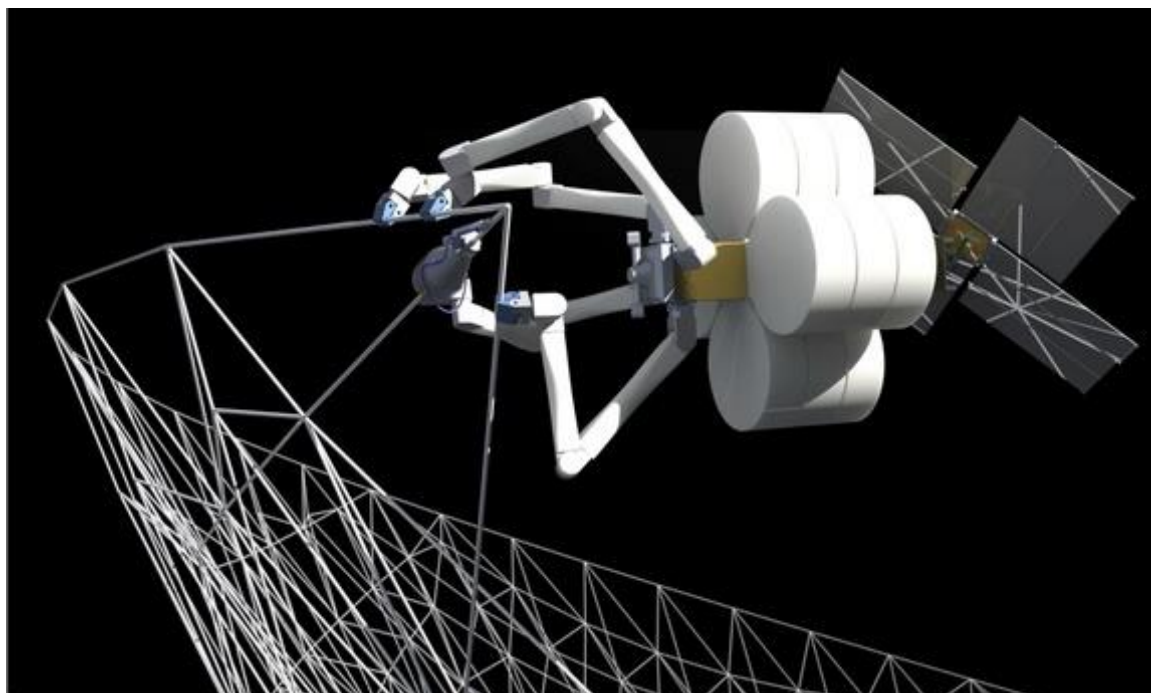
Preglednica 1: Modelirane in izmerjene debeline zob pri hitrosti 60 mm/s in 20% zapolnjenosti	24
Preglednica 2: Modelirane in izmerjene debeline zobov pri hitrosti 15 mm/s in 20% zapolnjenosti.	24
Preglednica 3: Modelirane in izmerjene debeline zobov pri hitrosti 15 mm/s in 40% zapolnjenosti.	25
Preglednica 4: Modelirane in izmerjene debeline zobov pri hitrosti 30 mm/s in 40% zapolnjenosti.	26

Kazalo grafikonov

Grafikon 1: Odstopanja pri tiskanih vzorcih.....	26
--	----

1 UVOD

Tehnologija tiskanja zgrad v gradbeništvu se razvija že od šestdesetih let prejšnjega stoletja, saj bi v gradbeništvu to prineslo cenejšo in hitrejšo gradnjo, pri tem bi nastalo manj odpadnega materiala, med gradnjo. 3D tiskanje stavb in inženirskih objektov je zelo primerna tehnologija za gradnjo na Luni ali v vesolju, a z današnjo tehnologijo je to zaenkrat še nemogoče, čeprav že potekajo poskusi tiskanja zgradb pod pogoji, ki so v vesolju.



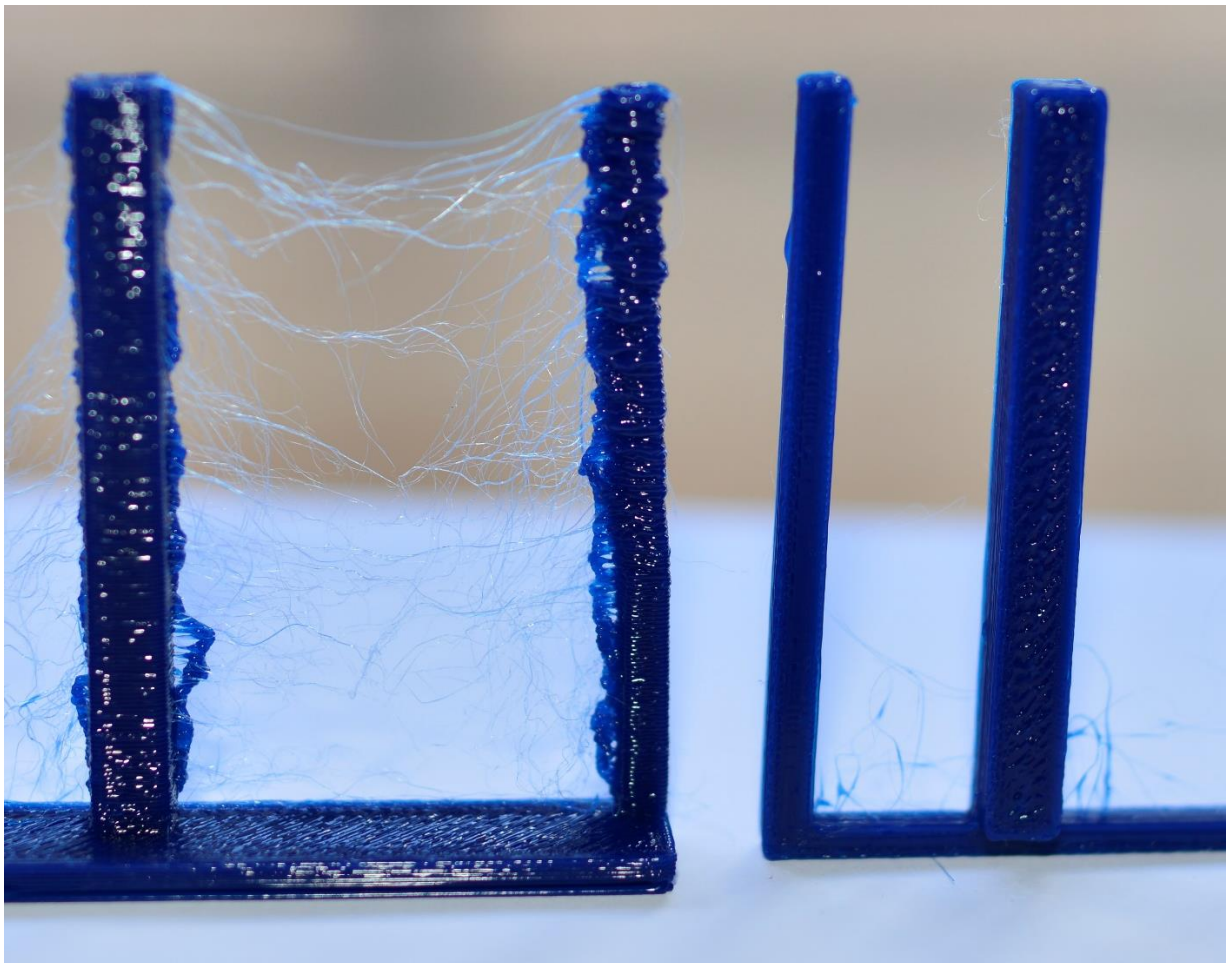
Slika 1: Tiskanje v vesolju (vir: <http://www.space.com/28846-spiderfab-space-structures-incredible-technology.html>)

Planet Mars je oddaljen najmanj 54,6 milijona kilometrov od Zemlje, in transportirati predmete iz Zemlje na Mars je zelo drago, tvegano in težko, medtem ko transportirati predmete iz Marsa na Zemljo z današnjo tehnologijo skoraj nemogoče, pa čeprav so Nasini znanstveniki v laboratoriju »Jet Propulsion« aprila leta 2014 držali v rokah kopijo meteorita poimenovanega »Block Island«, ki ga je odkril rover na površju Marsa (Christopher, 2014). Res je da sta se razlikovala po teži in sestavi, ampak imel je čisto isto obliko kot original. To je bilo doseženo z uporabo natančnega skeniranja in panoramskih slik, ki jih je vzel Nasin rover. Ti podatki so bili preneseni na Zemljo pretvorjeni v 3D računalniški model in natisnjen v Nasinem laboratoriju.

1.1 Problem

Problem tiskanja s fakultetnim tiskalnikom, ki temelji na tehnologiji ciljnega nalaganja, je da ne more natančno natisniti sten in stebrov vertikalno, kot se vidi na sliki 2 in 3, saj se stopljeni filament razliva, zato sem bil primoran natisniti vsak element posebej, položen tako, da ni imel previsnih in tankih visokih elementov. Veliko pozornost je treba nameniti tudi materialu s katerim tiskamo. Modri filament, s katerim sem natisnil maketo se topi pri 185 °C, medtem ko zeleni (ime: Village Green) se topi pri 220 °C, kljub temu, da sta oba filamenta PLA plastika. Pri tiskanju z višjimi temperaturami je potrebno tudi upoštevati, da filament potrebuje višjo temperaturo grelne posteljice, to sem spremenil iz 65 °C za modri filament na 100 °C za zeleni filament.

Na sliki 1 se vidi razlika med tiskanje v višino (levo) in tiskanjem po dolžini (desno). Tiskalnik lažje natisne nižji element, saj vibracije, ki nastajajo zaradi premikanja grelne posteljice in šobe, povzročajo premikanje tiskajočega se elementa in višji kot je element večji so pomiki. Na sliki sta osrednje dva stebra dimenzij 50x3x3 mm, robne dva pa 50x5x5 mm.



Slika 2: Primerjava stebrov natisnjenih vertikalno (na sliki levo) in stebri natisnjeni horizontalno (na sliki desno)

Na sliki spodaj se opazijo nitke filameta, ki so posledica premikanja šobe med stebri. Ko se tisk na enem stebru konča, šoba razvleče stopljen filament do drugega stebra in pri tem za seboj pusti nitko. To težavo rešimo tako, da po tisku, ko se element strdi pobrusimo robove.



Slika 3: Levo natisnjeno vertikalno, desno natisnjeno horizontalno

1.2 Metoda dela

Maketo sem izdelal, da sem natisnil ploščo, ter določil standardni utor na plošči. Nato sem natisnil preizkušance, ki predstavljajo steno, pri različnih hitrostih, debelinah in zapolnjenostih. Te preizkušance sem izmeril z digitalnim kljunastim merilom, analiziral podatke, ter določil najustreznejšo hitrost in zapolnjenost. Pri vsem tem sem moral upoštevati tudi tolerance pri tiskanju, saj se drugače maketa ne bi mogla sestaviti.

1.3 Cilj in namen naloge

Cilji naloge so:

- Natisniti maketo v merilu 1:100 in jo narediti kar se da realistično,
- Izboljšati hitrost 3D tiskanja
- Izboljšati natančnost 3D tiskanja.

S to maketo sem probal določiti optimalne nastavitve za tisk maket v bodoče.

Namen diplomske naloge je razviti metodo za predelavo stavb, ki jih ni mogoče natisniti tako, da se jih sploh da natisniti in da je tiskanje kar se da natančno.

Za boljše razumevanje si najprej oglejmo nekaj metod.

2 3D TISK



Slika 4: Hiša natisnjena s 3D tiskalnikom (vir:3ders.org)

Aditivna proizvodnja ali tri dimenzionalno tiskanje je postopek, kjer lahko iz digitalnega modela, za katerega morajo veljati posebni pogoji, kot je Eulerjeva poliedrska enačba, torej model mora biti vodotesen, pri katerem se nalagajo plasti ena na drugo, da tvorijo načrtovani model. Nalaganje plasti velja za skoraj vse tehnologije, razen za tehnologijo CLIP (ang. »continuous liquid interface production«), pri kateri nastaja objekt brez plasti (Barnatt, 2014). Prednosti tri dimenzionalnega tiska so mnoge, saj nekateri trdijo, da je 3D tiskanje tako revolucionarno, kot je bil izum tekočega traka in da bo prinesel novosti na področjih od tehnike in gradbeništva do medicine.

3D tisk bo dovoljeval, da si bo vsak posameznik po svoji želji priredil produkt, ki si ga bo želel, kar je precej novo, saj od začetka industrijske revolucije so bili vsi proizvodi enaki, zaradi masovne in poceni proizvodnje. V medicini, 3D tiskanje je zelo uporabno, saj lahko vsakemu naredijo po meri protezo, slušni aparat ali dentalni pripomoček.



Slika 5: Uporaba v medicini (vir: <http://blog.designersofthings.com/post/59390299280/3d-printing-is-not-just-for-toys-and-trinkets-3d>)

V marcu 2014 je podjetje Amazon začelo prodajati izdelke, ki so 3D natisnjeni na zahtevo in po meri kupca, danes lahko preko spletne strani www.3dhubs.com naročimo svoj izdelek, ki ga sami narišemo in pošljemo najprimernejšemu kandidatu s 3D tiskalnikom.

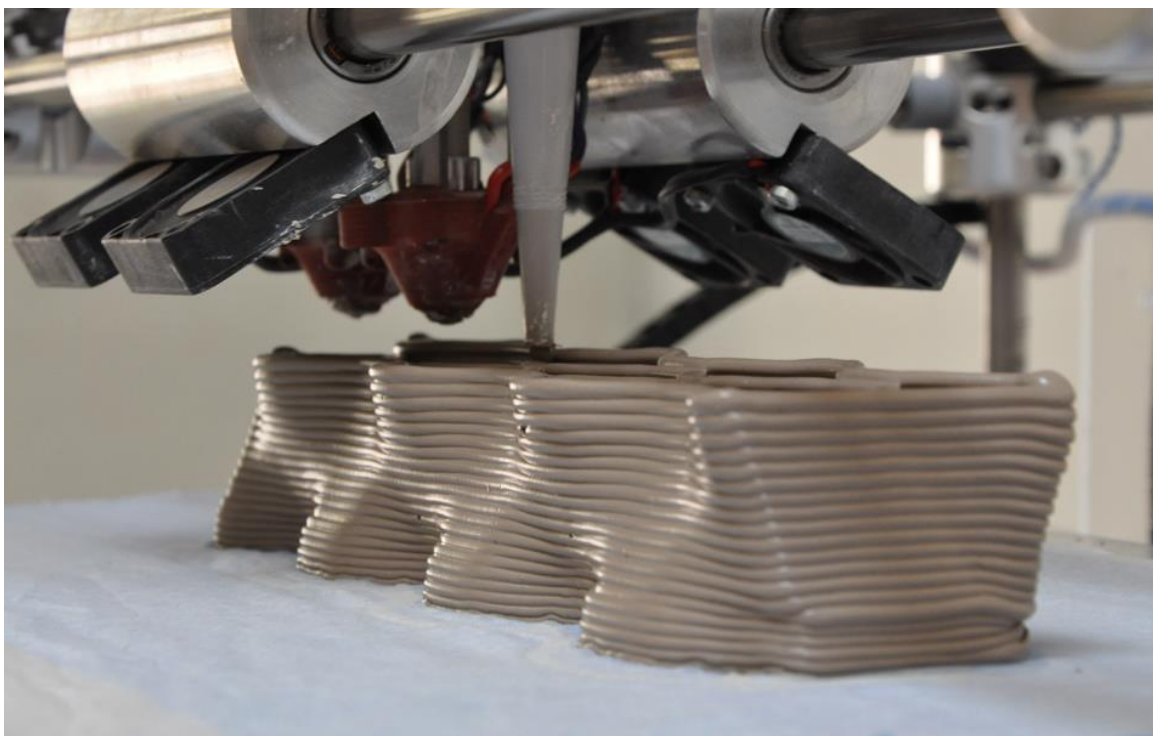
Zanimiv podatek je, da je samo v Ljubljani prijavljenih 26 3D tiskalnikov (podatek za maj 2015).

Strokovnjaki iz področja aditivne proizvodnje napovedujejo, da bo v roku desetih do dvajsetih let aditivna proizvodnja močno vplivala na masovno proizvodnjo, saj ne bo več potrebe po njej, ker si bo lahko vsak sam natisnil izdelek, ki ga potrebuje.

2.1 TEHNOLOGIJA 3D TISKA

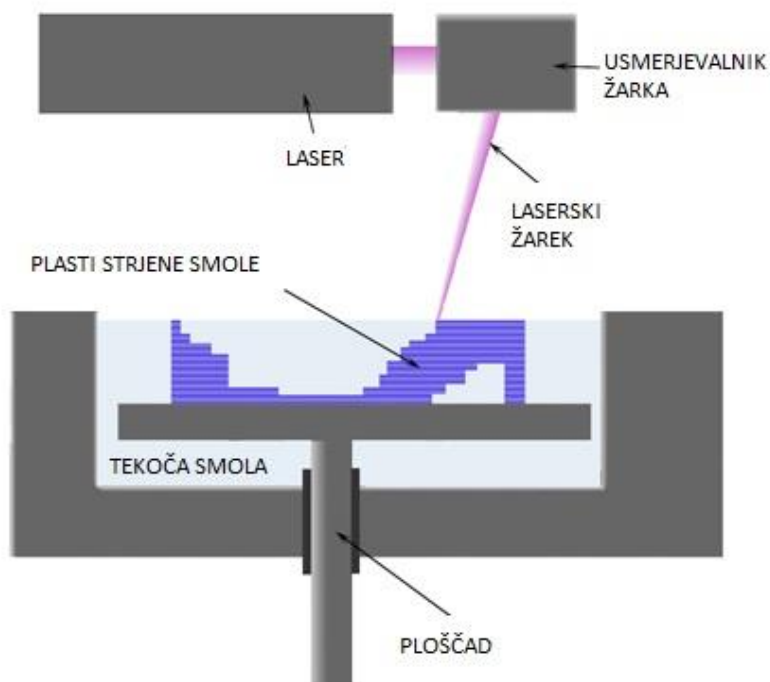
Tro-dimenzionalno tiskanje je samo logično nadaljevanje dvo-dimenzionalnega tiskanja, saj v večini 3D tiskalniki samo nalagajo zelo tanke plasti materiala, v eni ravnini. Za začetek mora biti objekt, ki ga želimo natisniti, obstajati v CAD programu ali katerem koli drugem 3D oblikovnem programu. Lahko tudi skeniramo objekt in ga potem uredimo v oblikovnem programu. Neglede na to kako je model izdelan, mora iti skozi program, ki razreže model na tanke plasti (ang. »slicing software«). Te plasti, ki so debele od nekaj mikrometrov do milimetra, so poslone v 3D tiskalnik, kjer jih tiskalnik eno za drugo natisne. Kako pa 3D tiskalnik tiska plasti, je pa odvisno od tehnologije tiskalnika in materiala.

V prvi skupini imamo tiskalnike, ki iztiskajo stopljen ali pol tekoč material iz dulca tiskalnika. Največkrat uporabljeni material za takšno tiskanje je termo plastika, ki se strdi zelo hitro po tem ko zapusti dulec. Nekateri tiskalniki iztisnejo stopljeno kovino, glino ali pa kar beton.



Slika 6: Tiskanje s glino (vir: <http://canprint3d.com/first-3d-printer-for-ceramic/>)

V drugi skupini so tiskalniki, ki ustvarijo model, kjer laser ali drug svetlobni vir selektivno strjuje plasti tekoče fotopolimerne smole. Tu poznamo dva tipa tiskalnikov, pri prvem potrebujemo rezervoar smole in potem s svetlobo strdimo smolo na gladini, pri drugem tipu pa se uporablja svetloba, da strdi tanko plast smole, ki je bila dodana z dulcem. Nekateri tiskalniki, so tako napredni, da lahko natisnejo objekte z različnimi materiali, kot sta guma in plastika.



Slika 7: 3D tiskanje s smolo (vir: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>)

Pri tretji skupini pa tiskalnik izgradi model tako, da selektivno nalaga zelo tanko plast finega praha, ki ga nato zlepi skupaj. Pri tem postopku lahko uporabljamo zelo različne materiale od najlona, bio-plastike, keramike, voska, brona, kobalta in titana. Učinek da se delci prahu zlepijo skupaj pa lahko dosežemo tako da, med vsako plastjo tiskalnik nanese lepilo ali pa z svetlobnim virom kot je laser ali UV svetloba stopi prah v željeni obliki.

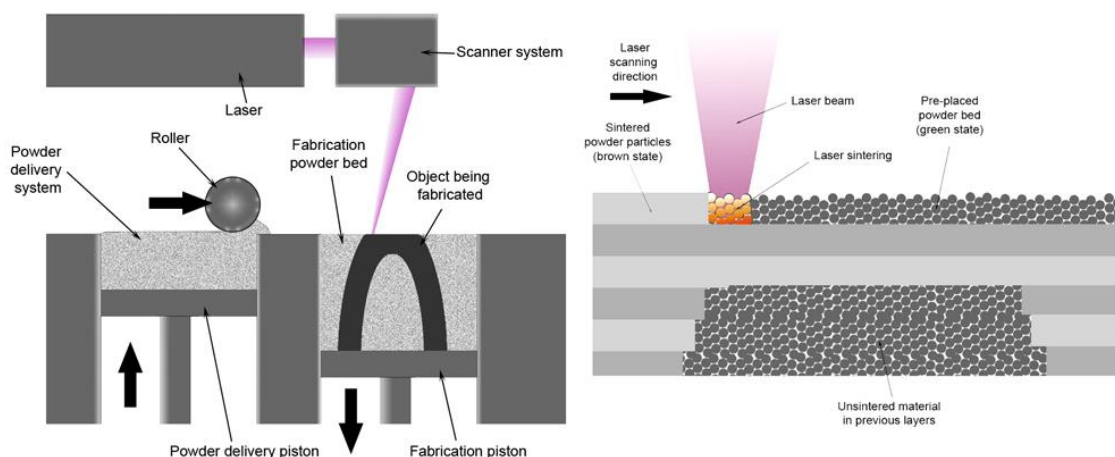


Slika 8: 3D tiskanje s prahom (vir: <http://www.instructables.com/id/3D-Printing/>)

V četrto skupino 3D tiskalnikov pa spadajo tiskalniki, ki zlepijo skupaj tanke ploskve papirja, plastike ali kovine. Te plasti pa izreže nož ali laser, običajno so plasti pobarvane tako, da na koncu tvorijo cenejšo in barvno obliko modela (Wikipedia, Selective laser sintering, 2015).

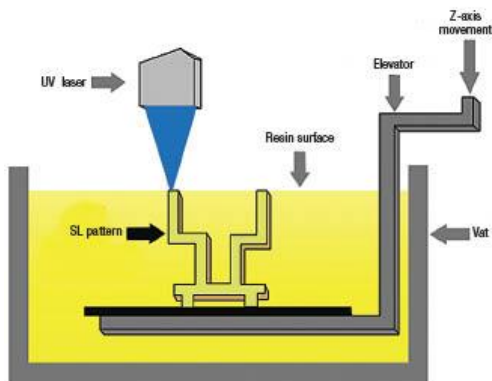
2.2 SLS - selektivno lasersko sintranje (ang. **Selective laser sintering**)

Pri tem procesu laser segreje prah, običajno je to termoplastični prah, kovinski prah ali keramični prah. Prednost te tehnologije je da, ne potrebujemo podpornega materiala, ker vse prostore zasede prah. Plasti prahu, ki se nanašajo na so debeline par mikrometrov in temperatura segrevanja mora biti natančna do 2°C.



Slika 9: SLS tehnologija (vir: https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering)

2.3 SLA - stereolitografija (ang. **Stereolithography**)

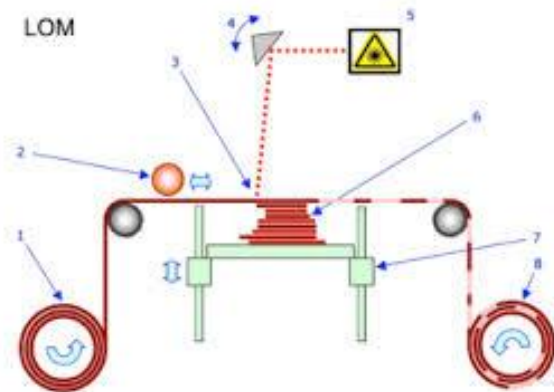


Slika 10: : SLA tehnologija (vir: <http://www.micromanufacturing.com/content/stereolithography-microparts>)

Stereolitografija poznana kot smolno tiskanje uporablja tekočo smolo, ki se strdi če na njo žarčimo UV laser ali podoben energijski vir. Pri tem procesu se model, ki ga tiskamo potaplja nazaj v smolo med 0,05 mm in 0,15 mm, kolikor je tudi debelina ene plasti. Pri stereolitografiji moramo modelu zagotavljati podporo tam kjer je potrebno, saj bi se drugače strjena smola potopila (Wikipedia, Stereolithography,2015).

2.4 LOM – nalaganje krojeni plasti (ang. Laminated object manufacturing)

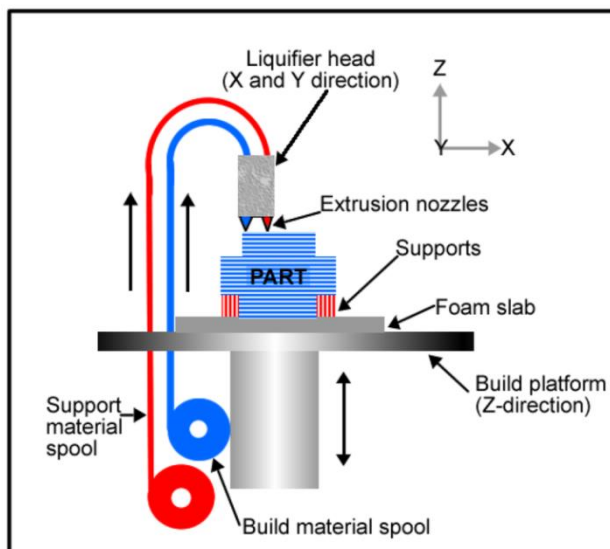
Plasti iz kovine, papirja ali plastike se nalagajo ena na drugo, med tem pa se vsaka plast posebej izreže s pomočjo laserja ali noža. Plasti se skupaj povežejo z vezivom in po končanju tiskanja je mogoče model še dodatno obdelati (Wikipedia, Laminated object manufacturing, 2015).



Slika 11: LOM tehnologija (vir: https://en.wikipedia.org/wiki/Laminated_object_manufacturing)

2.5 FDM oz. FFF – ciljno nalaganje (ang. Fused deposition modeling oz. fused filament fabrication)

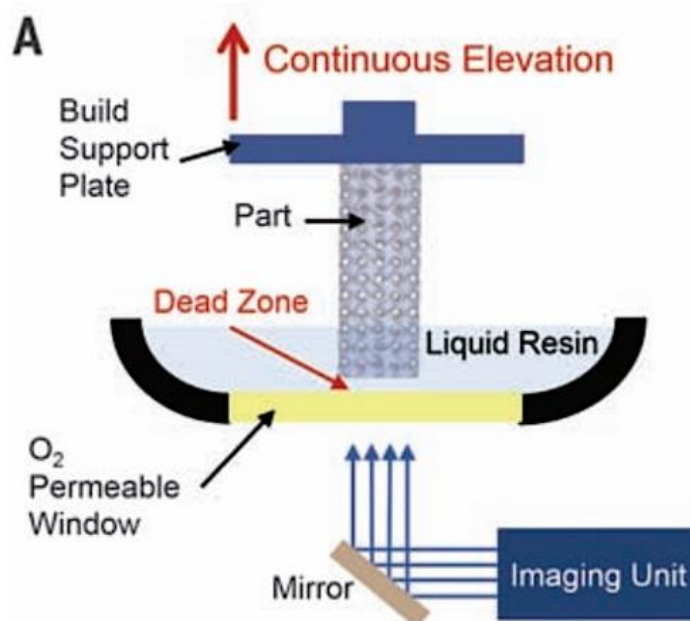
Pri ciljnem nalaganju segreta šoba dovaja stopljen material, ki je lahko termo plastika, jeklo, guma ali glina za oblikovanje, eno plast za drugo. Pri tem procesu lahko uporabljamo različne materiale in različne barve za isti model. Material se takoj strdi po tem ko, zapusti šobo, pri tej tehnologiji moramo pa uporabljati tudi podporni material, saj je filament, ki zapusti šobo še premalo trden, da bi podpiral sam sebe (Wikipedia, Fused deposition modeling, 2015).



Slika 12: FDM oz. FFF tehnologija (vir: <http://www.mdpi.com/1996-1944/7/12/8168/htm>)

2.6 CLIP – neprekinjena tekoča površinska proizvodnja (ang. **Continuous liquid interface production**)

Tiskanje se začne v tekoči fotopolimerni smoli. Del dna bazena je prosojen na ultravijolično svetlobo. Žarek UV svetlobe potuje skozi okno in strdi določen presek objekta, model se počasi dviguje iz smole, pri tem pa membrana, ki zadržuje kisik na dnu bazena onemogoča, da bi se strdila smola tik ob oknu z UV svetlobo. Cona v kateri se smola ne more strditi zaradi kisika se imenuje »mrtva cona«. Tako tiskanje omogoča da lahko natisnemo model brez plasti (trdnost modela je v vse strani enaka). Za razliko od stereolitografije je tu proces neprekinjen in omogoča, da lahko natisnemo objekt tudi do sto krat hitreje kot pri običajnem tiskanju (TED, 2015), (Wikipedia, Continuous Liquid Interface Production, 2015).



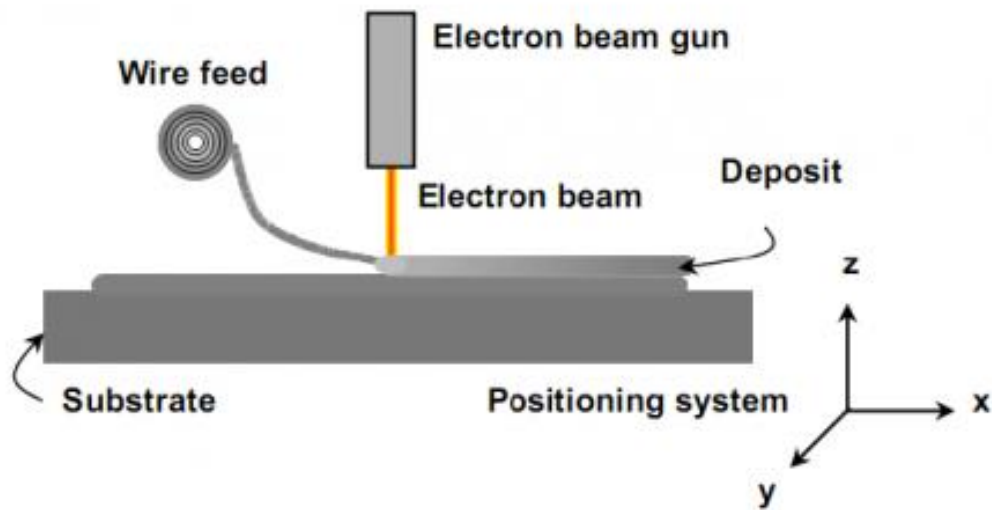
Slika 13: CLIP tehnologija (vir: <http://www.greencarcongress.com/2015/08/20150810-carbon3d.html>)



Slika 14: Tiskanje Eifflovega stolpa (vir: <http://www.businessinsider.com/liquid-3d-prints-really-fast-2015-3>)

2.7 EBF - prosto oblikovno tiskanje z elektronskim žarkom (ang. **Electron beam freeform fabrication**)

Tehnologija je bila razvita v NASI, in sicer zato da bi, lahko natisnili model direktno iz CAD datoteke. Pri tem procesu, ki se dogaja v vakuumu in lahko tudi v breztežnostnem okolju, elektronski žarek stopi kovinsko žico in takoj, ko žarek preide žico se žica strdi. Dobra stran te tehnologije je da deluje v breztežnostnem prostoru in model ne potrebuje dodatne podpore med tiskanjem (Wikipedia, Electron beam melting, 2015).



Slika 15: EBF tehnologija (vir: <https://kevinjdebruin.wordpress.com/2012/12/17/advanced-space-application-manufacturing/nasa/>)

3 MODELIRANJE ZA 3D TISK

Da natisnemo model s 3D tiskalnikom, potrebujemo datoteko, ki sporoči tiskalniku kako naj natisne željen objekt. To datoteko lahko dobimo na dva načina. Če model, ki ga želimo natisniti že obstaja v realnosti, ga lahko poskeniramo in natisnemo.

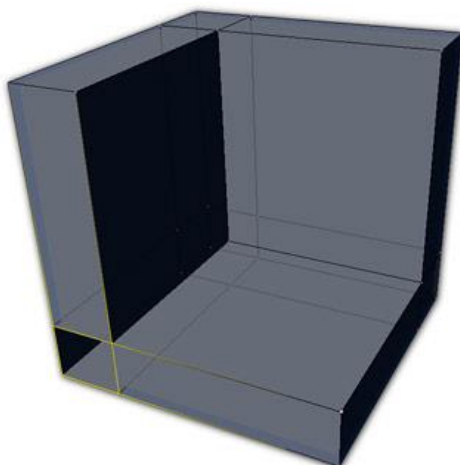
Pri drugem načinu pa uporabimo enega izmed računalniških programov za 3D modeliranje. Za tretji način pa uporabimo digitalno kamero in fotogrametrični program, ki nam izdelava 3D model.

Neglede na to kateri program uporabljamo za izdelavo računalniškega 3D modela, je potrebno datoteko pretvoriti v .STL ali .OBJ datoteko. Po navadi je v CAD programih že vgrajen sistem, ki nam omogoča izdajanje datoteke v željenih formatih. V nadaljevanju bom predstavil nekaj ključnih zahtev pri modeliranju objektov z računalniškimi programi

3.1 Zahteve za tiskanje 3D objektov

- EULERJEVA POLIEDERSKA FORMULA

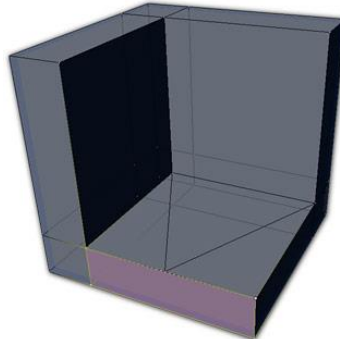
Za vsak model, ki ga hočemo natisniti mora veljati Eulerjeva poliedrska formula, kar pomeni $V - E + F = 2$, pri čemer velja V, število oglišč, E število robov in F število ploskev. S tem pogojem ustvarimo zaprt vodotesen model. Če temu pogoju ni zadovoljeno, program ne more pretvoriti objekta v .STL datoteko. Na srečo obstajajo algoritmi v programih, ki sami zapolnjujejo ali odrežejo presežke ploskev (Ritland, 2012), (William, 2015).



Slika 16: Objekt ni vodotesn, ker mu manjka ploskev (vir: <http://www.ponoko.com/starter-kits/design-rules-3d>)

- SOVPADANJE ROBOV

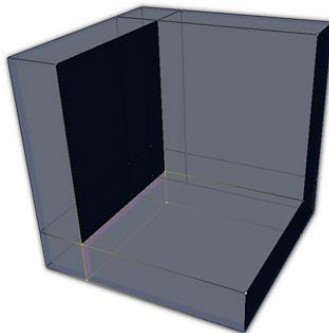
Sovpadanje robov se zgodi takrat, ko dva robova plosk obstajata na istem kraju, brez da bi bila združena. Sosednje ploskve morajo biti povezane s skupnimi robovi.



Slika 17: Sovpadanje robov (vir: <http://www.ponoko.com/starter-kits/design-rules-3d>)

- VOTEL MODEL

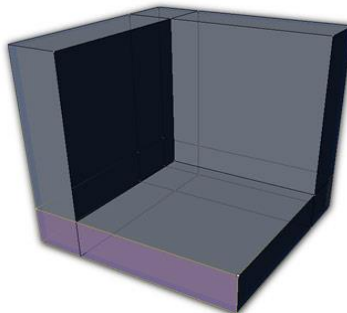
Notranje ploskve so stene ki obstajajo znotraj modela in preprečujejo da je model vodotesen.



Slika 18: Notranja stena v modelu (vir: <http://www.ponoko.com/starter-kits/design-rules-3d>)

- ENOJNE PLOSKVE

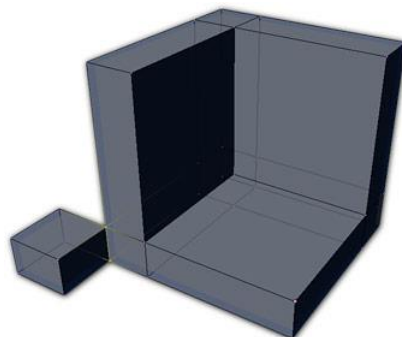
Eden od pogojev je tudi da je model narejen samo iz ploskev ki se ne pokrivajo. Če se to zgodi, da se dve površini pokrivata, program ne bo mogel prebrati in pretvoriti v .stl datoteko. Da se temu izognemo moramo, premikati model po prostoru, da odkrijemo kje se površine prekrivajo.



Slika 19: Dvojna ploskev na modelu (vir: <http://www.ponoko.com/starter-kits/design-rules-3d>)

- BREZ SKUPNIH ROBOV

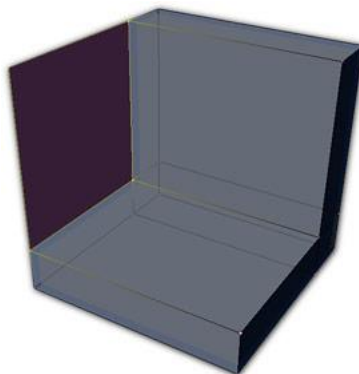
Skupni robovi so robovi, ki so sestavni del dveh vodotesnih modelov. Zato moramo modela združiti ali ločiti.



Slika 20: Primer skupnih robov (vir: <http://www.ponoko.com/starter-kits/design-rules-3d>)

- DEBELINA STENE

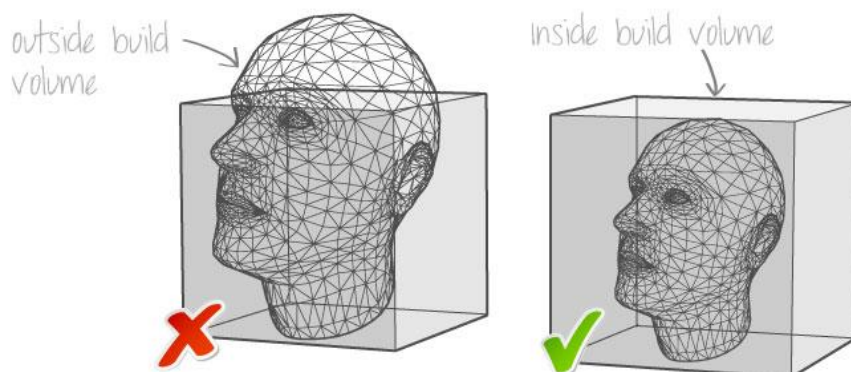
Vsaka stena mora imeti svojo debelino, vsaj 1 mm, da lahko tiskalnik normalno natisne brez komplikacij, kot so razlivanje filameta in deformiranje stene zaradi pretkanosti.



Slika 21: Geometrija stene je brez globine (vir: <http://www.ponoko.com/starter-kits/design-rules-3d>)

- VELIKOST MODELA

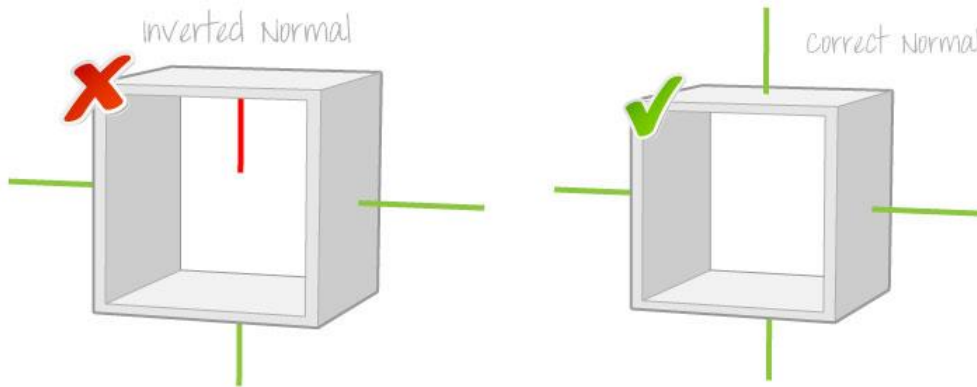
Model mora biti manjši od tiskalnih zmogljivosti 3D tiskalnika.



Slika 22: Preveliki in pravšnji model za tiskanje (vir: http://3dprintinguae.com/basic_rules.php)

- NORMALE PLOSKEV

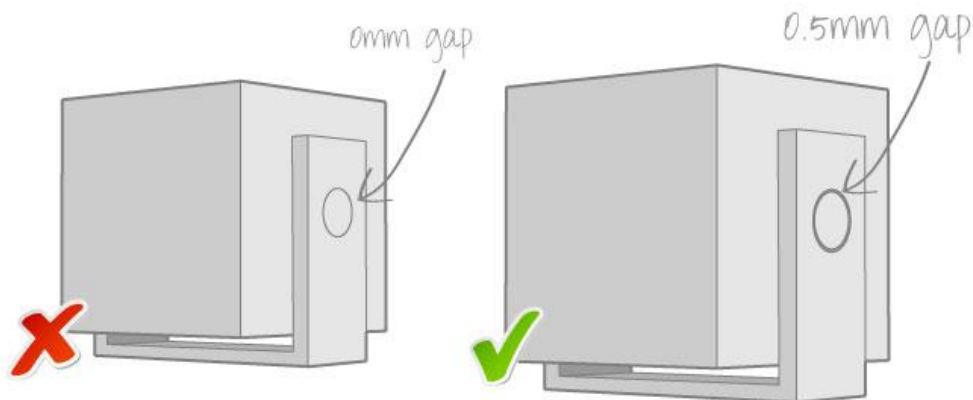
Normale ploskev morajo biti pravilno obrnjene, če ne program zameša kaj je notranjost in zunanost modela. Pri obračanju normal nam pomagajo programi (Rotchild, 2014).



Slika 23: Primer obrnjene normale ploskve (vir: http://3dprintinguae.com/basic_rules.php)

- TOLERANCA

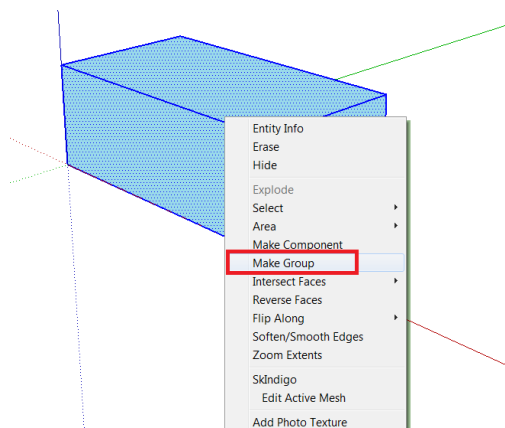
Če tiskamo model, ki ima premikajoče se dele ali pa model, ki je iz več kosov in ga moramo sestaviti po tiskanju, moramo upoštevati deformacije, ki se zgodijo ob sušenju modela. Zato moramo vedno upoštevati nekaj tolerance, ki pa je odvisna od hitrosti tiskanja, materiala, ki ga uporabljamo in tehnologije tiskanja.



Slika 24: Levo brez tolerance, desno z toleranco (vir: http://3dprintinguae.com/basic_rules.php)

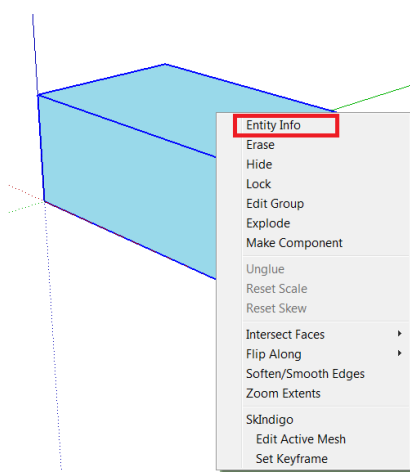
Prvih šest zahtev lahko preverimo v programu SketchUp tako, da model, ki ga želimo natisniti združimo v »Skupino« (ang. »Group«), nato z desnim klikom na novo nastalo Skupino izberemo »Entity info« in novo odprtem oknu mora pisati »Solid Group«.

1. KORAK



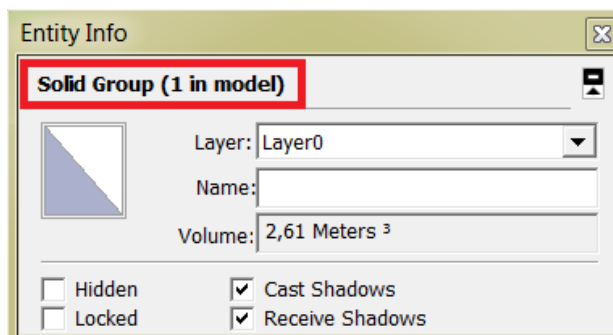
Slika 25: Make group

2. KORAK



Slika 26: Entity info

3. KORAK



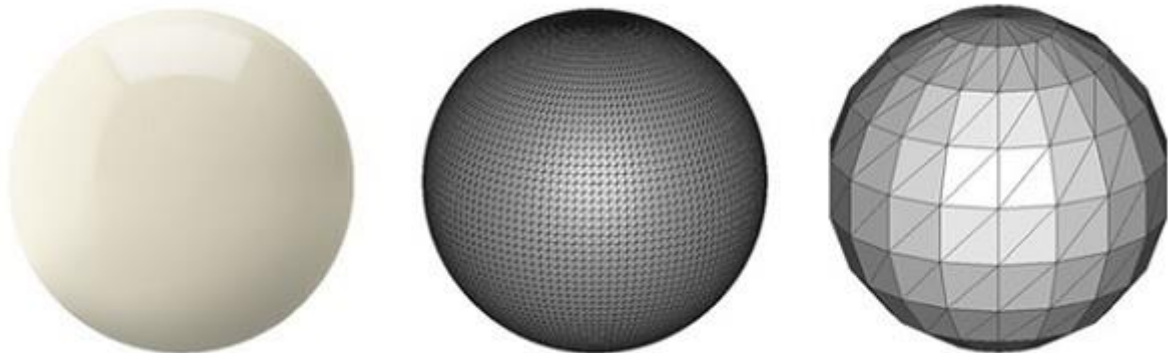
Slika 27: Solid group

3.2 STL datoteka

Ko izdamo model v CAD programu, ga moramo izvoziti v takšno datoteko da jo, program, ki razreže model v plasti lahko prepozna in obdela.

Najbolj pogosta datoteka je .STL, kar pomeni standardni trikotniški jezik (ang. Standard Triangle Language), kar pomeni, program pretvori model v trikotnike v tri dimenzionalnem prostoru. Večina programov ima že vgrajene algoritme za izdajanje .STL datoteke, pri SketchUp-u pa imamo na voljo dodatek na spletu, ki opravlja to funkcijo (Tech Tips, 2015), (Fabian, 2015).

Zelo je pomembno s kakšno ločljivostjo program pretvori v .STL datoteko, saj preveč ali premalo natančna ločljivost lahko povzroča probleme. Na levi slika prikazuje model, ki je nastal v CAD programu, na sredini je model, ki je bil izvožen z veliko ločljivostjo in na desni je model, ki je bil izvožen s slabo ločljivostjo.



Slika 28: Prikaz ločljivosti v .STL datoteki (vir: <http://3dyield.com/helpful-tips-on-choosing-the-perfect-file-resolution-for-your-3d-printed-models/>)

Če izvozimo preveč ločljivo .STL datoteko, lahko povzroča težave rezalnikom, saj bodo težje razrezali model, pa tudi 3D tiskalniki so omejeni z najmanjšimi detajli, ki jih lahko natisnejo.

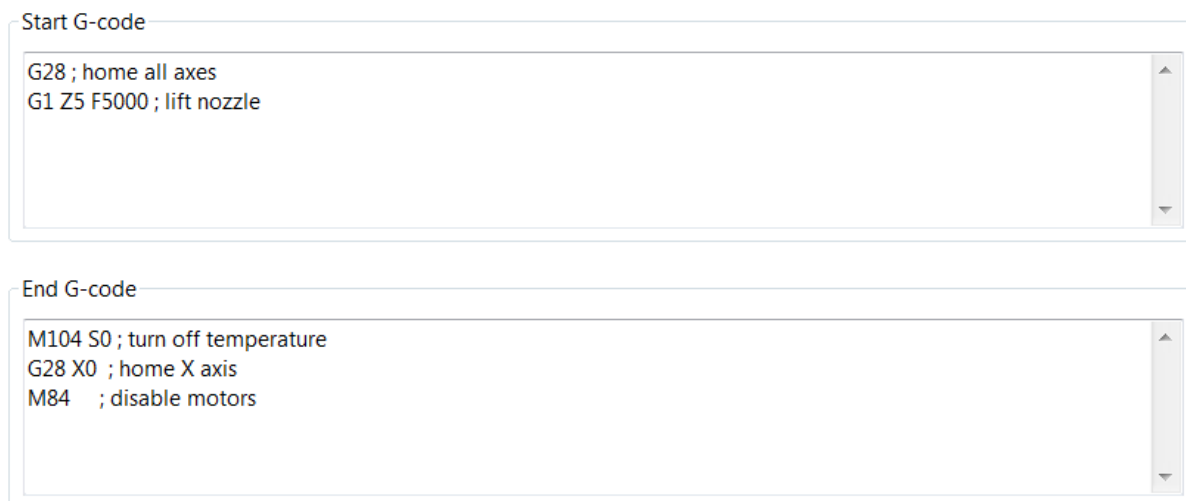
Ko pa je ločljivost .STL datoteke premajhna, kar pomeni da so trikotniki večji, bo pa tiskalnik natisnil slabšo kvaliteto modela, saj površina ne bo gladka. To pa pripelje do tako imenovanega »pixelated« tiska.

3.3 G koda

G koda (ang. G code) je numerični krmilni programski jezik. Uporablja se ga predvsem v CAD programih za kontroliranje avtomatskih strojev za obdelovanje in tiskanje objektov (G-code, 2015). Poenostavljeno bi lahko rekli, da G koda pove kje se morajo gibati premični deli tiskalnika, v našem primeru grelna miza in šoba, ter pove s kolikšno hitrostjo in pod kakšno temperaturo iztiska filament iz šobe.

Poznamo dva načina, kako lahko pripravimo G kodo za tiskalnik. Najlaže dobimo G kodo če model, ki smo ga zmodelirali v CAD programu, uvozimo v program Slic3r, Skeinforge ali Cura. Uvoženi model programi razdelijo na plasti in potem napišejo G kodo za vsako plastjo posebej. Res da, je to eden najlažjih postopkov, a s tem postopkom izgubimo nekaj fleksibilnosti.

Drugi način je da sami napišemo G kodo sami. Ta način je zelo zamuden in zahteva veliko znanja. Je pa najboljši način če potrebujemo narediti kalibracijo 3D tiskalnika.



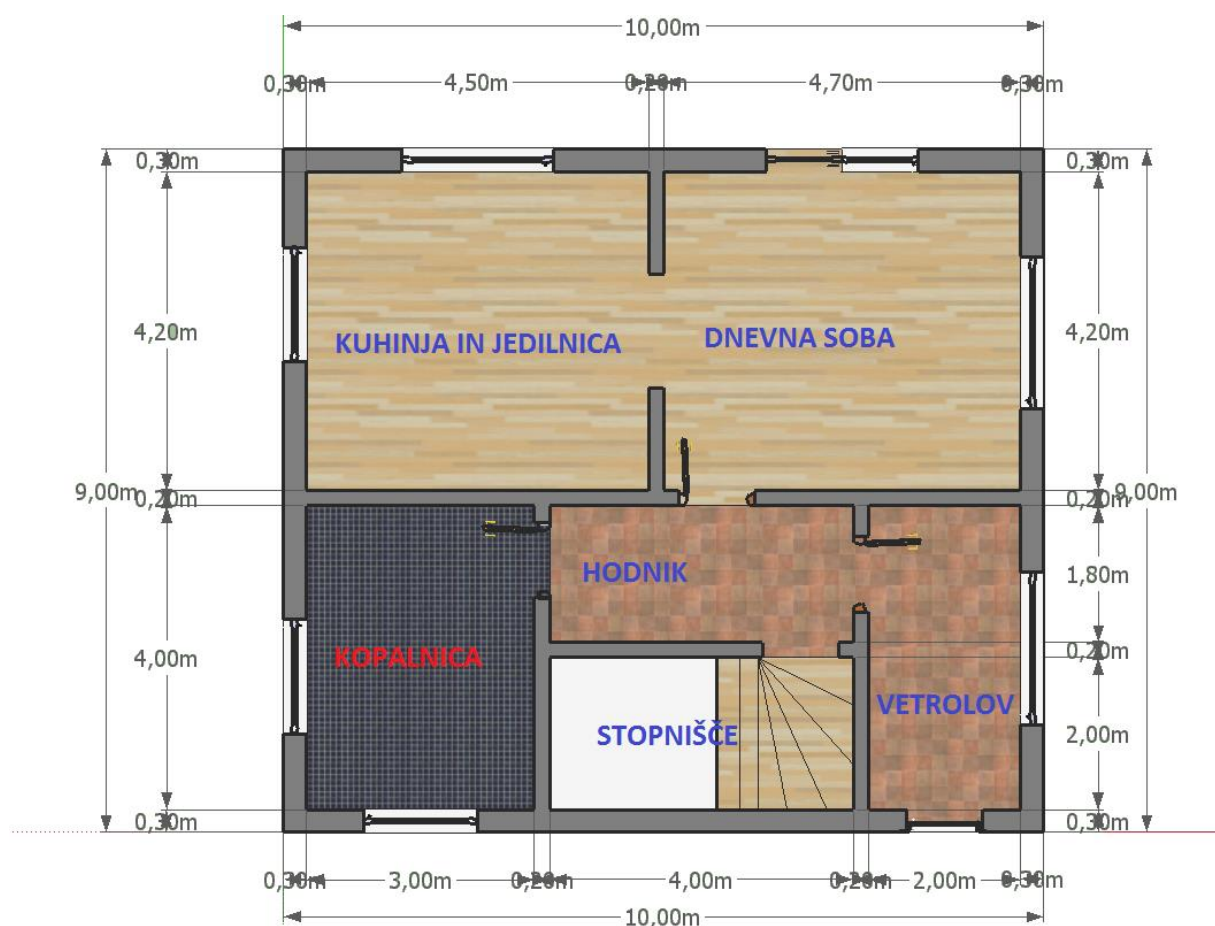
Slika 29: Začetek in konec G kode v programu Slic3r

4 IZDELAVA MAKETE

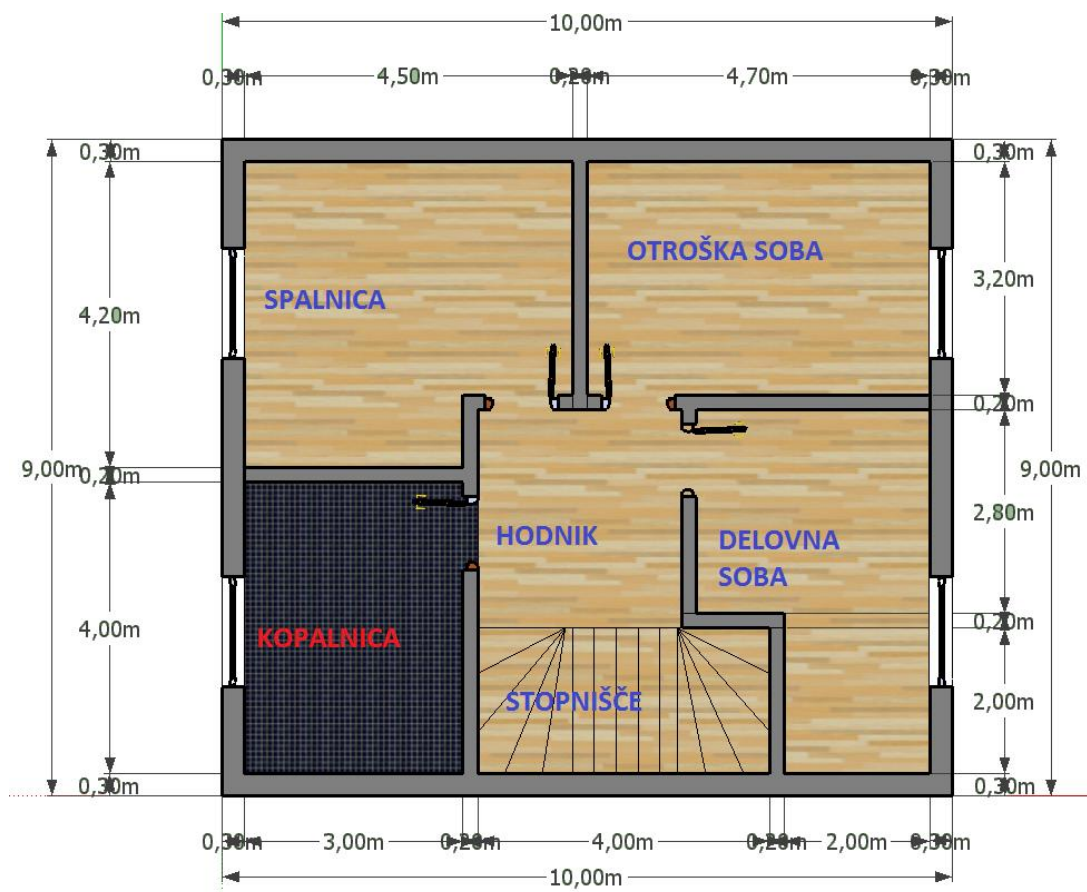
4.1 Predstavitev vzorčne hiše

V sklopu diplomske naloge sem izdelal maketo eno družinske hiše, v merilu 1:100. Hiša je sestavljena iz dveh etaž, in sicer iz pritličja (67,5 m²) in mansarde (67 m²), ki imata skupne uporabne površine 134,5 m². V pritličju se nahaja vetrolov, hodnik, kopalnica ter kuhinja z jedilnico in dnevna soba. V mansardi se nahaja kopalnica, hodnik, spalnica, otroška soba in delovna soba. Svetla višina v obeh etažah je 2,50 metra. Streha je dvokapnica pod kotom 30° in poteka v smeri vzhod – zahod in sleme je 6,90 metra nad tlemi.

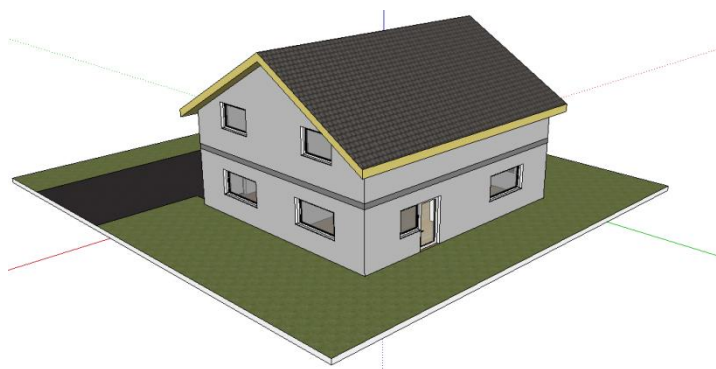
Zunanje mere hiše so 9 x 10 metra in debelina zunanjih sten je 30 cm, debelina notranjih sten pa 20 cm. Vsa vrata v stavbi so širine 1 metra in višine 2,1 m. Okna v pritličju imajo dimenzije 2 x 1 m, okna v mansardi so manjša zaradi poteka strehe in merijo 1,5 x 1 m.



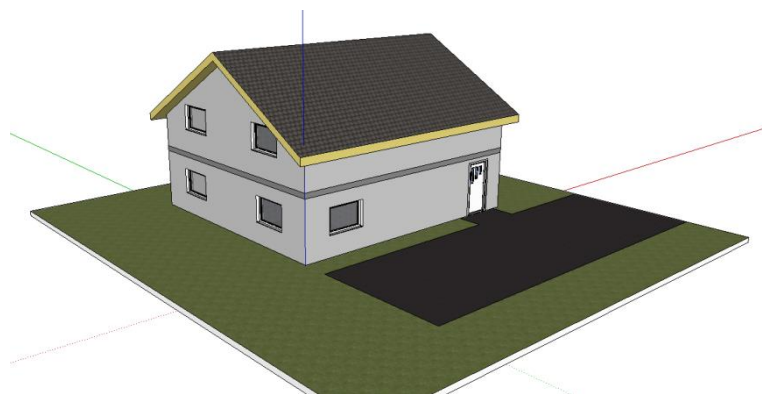
Slika 30: Tloris pritličja



Slika 31: Tloris mansarde



Slika 32: ISO pogled iz smeri JZ



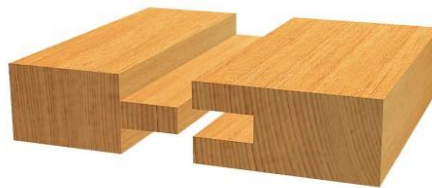
Slika 33: ISO pogled iz smeri SV

4.2 Modeliranje

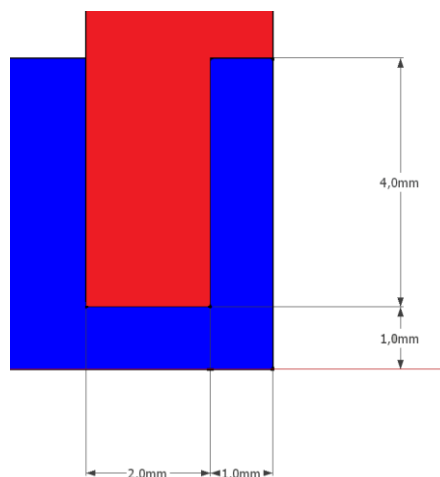
Za modeliranje sem uporabil program SketchUp 8 in glede na to, da sem imel na voljo tiskalnik 3D Inovator, ki temelji na tehnologiji FDM oz. FFF (poglavje 3.4.), ne omogoča natančnega tiskanja pod negativnimi koti in na voljo ni podpornega materiala, sem moral celotno maketo hiše razrezati tako, da sem tiskal samo ploščate dele makete, brez premostitev ali previsnih delov.

4.2.1 Plošča

Preden sem lahko začel modelirati hišo sem mogel izvedeti koliko tolerance morajo imeti objekti in katere nastavitve moram uporabiti za tisk, da bodo tiskani objekti primerni za sestavljanje makete (Franky, 2014). Idejo za stikanje sten in plošče sem dobil pri spoju desk na pero in utor, le da sem spoj prilagodil potrebam makete. Nato sem določil standardni utor na plošči in prilagajal zob stene tako, da je stena pravokotno stala na ploščo.

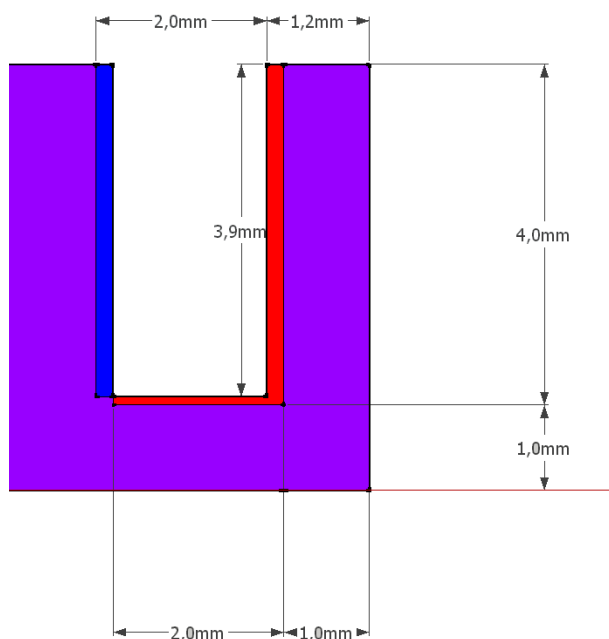


Slika 34: Stik pero – utor (vir: <http://forum.homeone.com.au/viewtopic.php?f=7&t=61333>)



Slika 35: Ideja za stik med ploščo (modra) in steno (rdeča)

Za utor sem določil, da je globok 4 mm in širok 2 mm, ter odmaknjen 1 mm od roba. Tiskanje se je izvedlo pri hitrosti 30 mm/s in z 40% zapolnjenostjo. Nato sem s pomočjo kljunastega merila izmeril utor in prišel do ugotovitev, da je utor globok 3,9 mm širok 2,0 mm in 1,2 mm odmaknjen od roba, po celotni dolžini utora obstajajo odstopanja do $\pm 0,05$ mm.

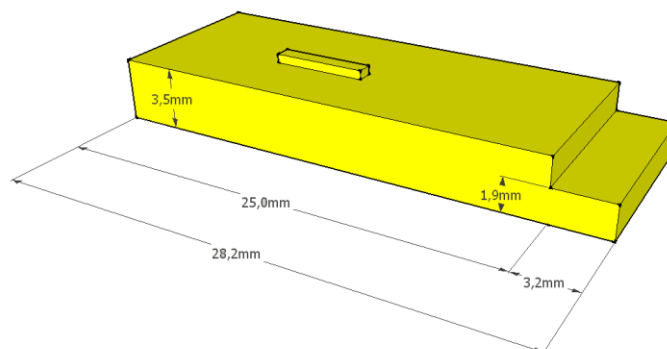


Slika 36: Prerez roba plošče

Na sliki zgoraj lahko vidimo kakšno je dejansko po tiskanju (rdeče) in kakšno stanje je bilo projektirano (modra), ter kje se prikriva natisnjen in modeliran prerez ujemata (vijolična).

4.2.2 Stene

Ker tiskalnik ni čisto natančno tiskal izdelke, sem natisnil več primerkov sten z različnimi dimenzijami in z različnimi nastavitvami tiskanja. Dimenzije primerkov sten so se razlikovale le v debelini zoba, saj sem moral izvedeti katera debelina zoba se ujema z utorom na plošči, poleg tega sem pa v nastavitvah spreminjal hitrost tiskanja in zapolnitev objekta.



Slika 37: Primerek 1

V enem tisku sem natisnil pet primerkov z različnimi debelinami zoba, da sem jih ločil sem na njih še natisnil rimsko številko od 1 do 5. Vsak tisk je imel svoje nastavitve glede zapolnitvije in hitrosti tiska, ki se meri v mm/s, kar pomeni za koliko se šoba premakne v eni sekundi.

- Hitrost: 60 mm/s, zapolnjenost: 20%

Preglednica 1: Modelirane in izmerjene debeline zob pri hitrosti 60 mm/s in 20% zapolnjenosti

DEBELINA ZOBA		izmerjeno (60mm/s; 20%)	razlika
	projektirano v mm		
I	1,9	1,99	0,09
II	1,7	1,78	0,08
III	1,5	1,71	0,21
IV	1,3	1,47	0,17
V	1,1	1,41	0,31



Slika 38: Vzorci pri hitrosti 60 mm/s in 20% zapolnitvi

Na primerkih vidimo nepravilnosti, ki so nastale zaradi prevelike hitrosti tiskanja in premalo zapolnjenosti sredice.

- Hitrost: 15 mm/s, zapolnjenost: 20%

Preglednica 2: Modelirane in izmerjene debeline zobov pri hitrosti 15 mm/s in 20% zapolnjenosti.

DEBELINA ZOBA		izmerjeno (15mm/s; 20%)	razlika
	projektirano v mm		
I	1,9	1,91	0,01
II	1,7	1,73	0,03
III	1,5	1,56	0,06
IV	1,3	1,37	0,07
V	1,1	1,25	0,15



Slika 39: Vzorci pri hitrosti 15 mm/s in 20% zapolnitvi

Kljub 4 krat zmanjšani hitrosti se na tisku še vedno pojavljajo luknje zaradi premajhne zapolnjenosti.

- Hitrost: 15 mm/s, zapolnjenost: 40%

Preglednica 3: Modelirane in izmerjene debeline zobov pri hitrosti 15 mm/s in 40% zapolnjenosti.

	DEBELINA ZOBA		
	projektirano v mm	izmerjeno (15mm/s; 40%)	razlika
I	1,9	1,91	0,01
II	1,7	1,72	0,02
III	1,5	1,55	0,05
IV	1,3	1,37	0,07
V	1,1	1,24	0,14



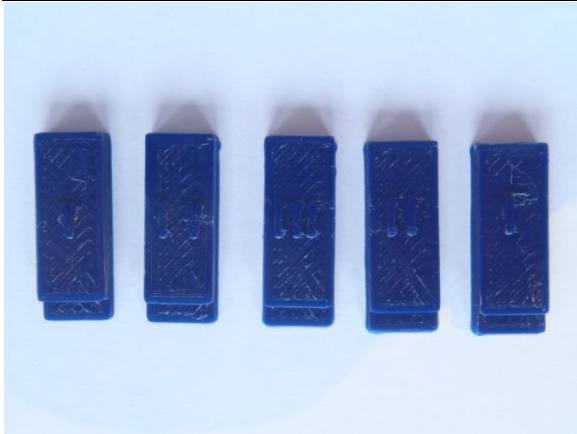
Slika 40: Vzorci pri hitrosti 15 mm/s in 40% zapolnitvi

Zapolnjenost sem povečal na 40% in s tem odpravil problem lukenj, ampak zaradi zmanjšane hitrosti in povečanja zapolnjenosti se je plastika razvlekla po primerkih.

- Hitrost: 30 mm/s, zapolnjenost: 40%

Preglednica 4: Modelirane in izmerjene debeline zobov pri hitrosti 30 mm/s in 40% zapolnjenosti.

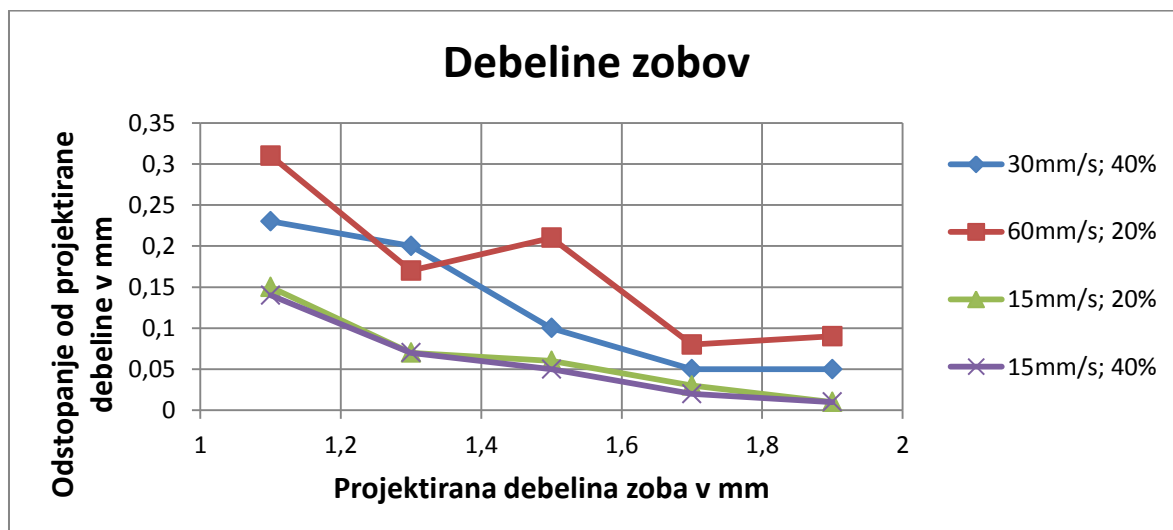
DEBELINA ZOBA		izmerjeno (30mm/s; 40%)	razlika
	projektirano v mm		
I	1,9	1,95	0,05
II	1,7	1,75	0,05
III	1,5	1,6	0,1
IV	1,3	1,5	0,2
V	1,1	1,33	0,23



Slika 41: Vzorci pri hitrosti 30 mm/s in 40% zapolnitvi

S hitrostjo 30 mm/s se še zmeraj pojavljajo napake na tisku, a je površina veliko bolj gladka kot če tiskamo pri hitrosti 15 mm/s.

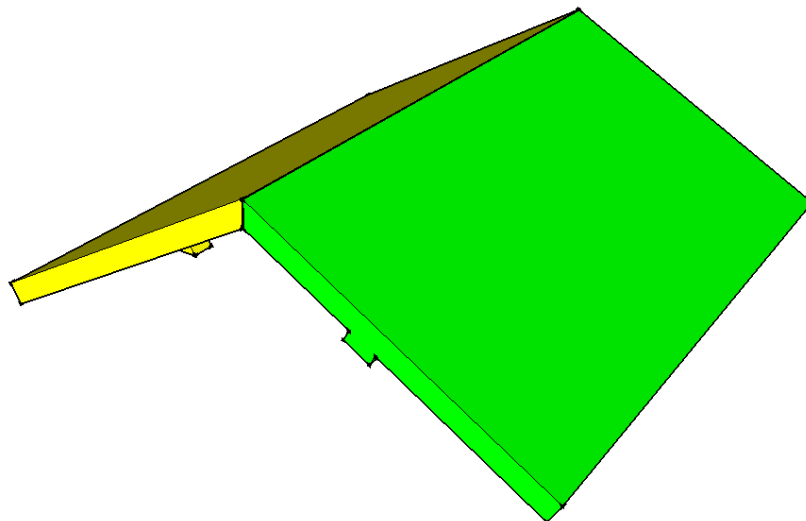
Grafikon 1: Odstopanja pri tiskanih vzorcih.



Na grafu se vidi, da če tiskamo počasneje dobimo natančnejše tiske. Nekaj malega k natančnosti tiska pomaga tudi večja zapolnitev tiskanega objekta. Opazimo lahko tudi, da se pri manjših debelinah tiska pojavi večja napaka. Glede na to raziskavo sem se odločil da bom stene in ostale dele tiskal pri hitrosti 30 mm/s, z 40% zapolnitvijo.

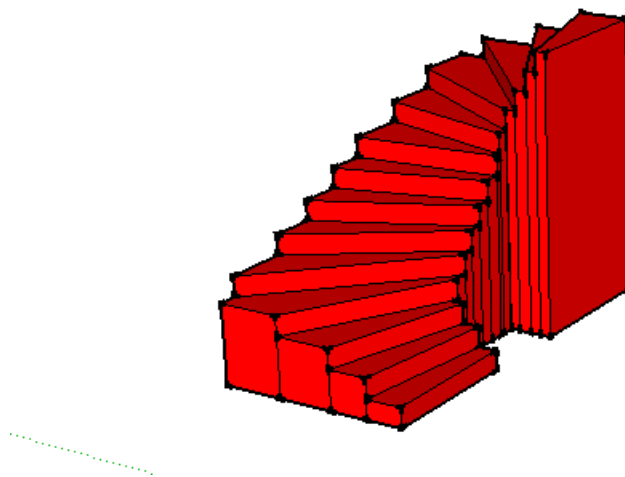
4.2.3 Streha in stopnice

Dvokapno streho sem modeliral iz dveh delov, južne in severne strani. Za izvoz v .STL datoteko sem streho obrnil, tako da je normala strehe vzporedna z Z osjo, saj je bila to edina opcija za tiska strehe.



Slika 42: Model strehe

Stopnice so dvakrat kotno zavite in sestavljene iz 14 stopnic, široke so 15 mm, višina stopnice je 2 mm globina pa 23 mm. Celotna višina stopnic je 28 mm širina 19,4 mm in dolžina 39,4 mm.



Slika 43: Model stopnic

4.3 Tiskanje

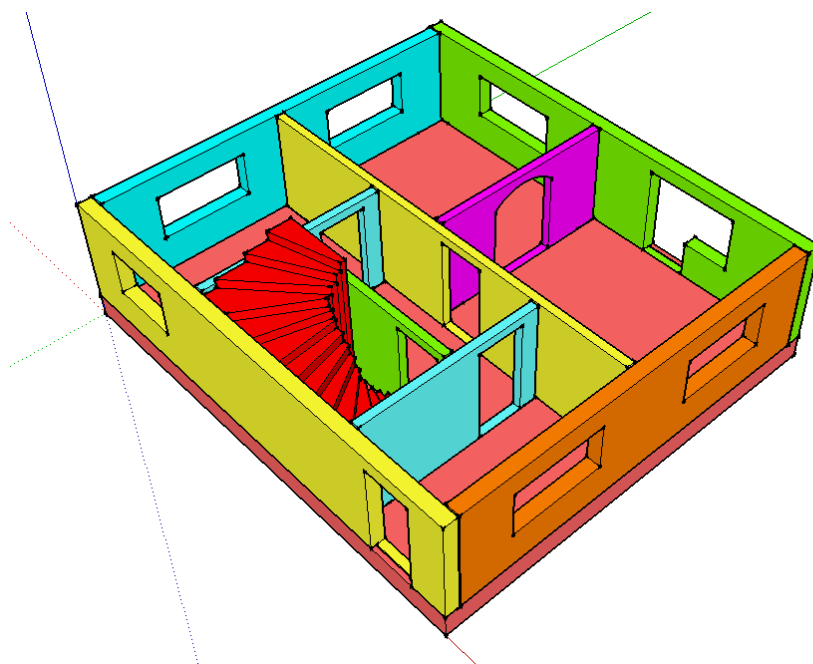
Ko sem določil dimenzije, polnjenost tiskanih objektov in hitrost tiskanja, sem lahko začel tiskati na tiskalniku 3D Inovator, ki ga je sestavil Luka Ceglar, žal pa zaradi ponavljajočih težav sem bil primoran uporabiti še tiskalnik Purso i3, preko spletne strani www.3dhubs.com.

Tiskal sem od spodaj navzgor, tako da sem začel z pritlično ploščo, potem vse stene v pritličju, nato v istem vrstnem redu še mansarda in na koncu streha.

Za tisk sem uporabil modro termo plastiko PLA (ang. Polylatic acid) s premerom 2,85 mm, ki ima boljše mehanske lastnosti od termo plastike ABS, ki jo še lahko uporabljamo na tiskalniku.

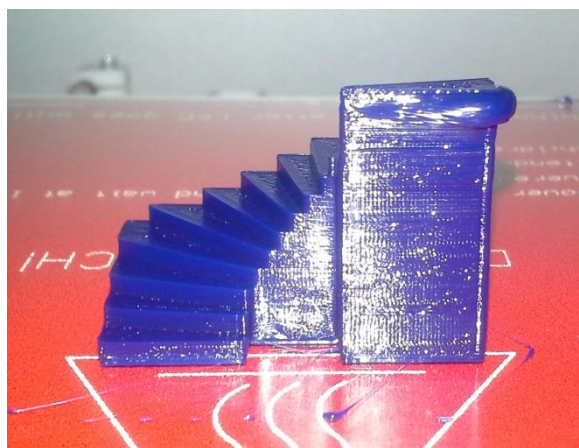
4.3.1 Pritličje

Volumen plošče, stopnic in sten v pritličju je $82,6 \text{ cm}^3$, kar pa ne pomeni da je toliko filameta vgrajenega v maketo, saj je zapolnjenost tiskancev 40%. Večjih težav pri tisku pritličja nisem imel, saj so tiskani elementi enostavni, problem je nastal le pri tiskanju stopnic.



Slika 44: Model za tiskanje pritličja

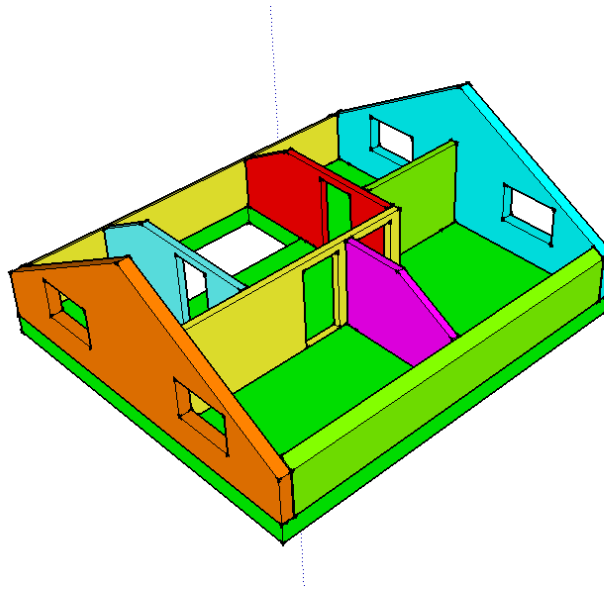
Kot sem omenil je problem nastal pri tiskanju stopnic, natančneje pri tisku najvišje stopnice, saj je zaradi geometrije zadnje stopnice, tloris stopnice je pravokotni trikotnik, šoba razvlekla filament. Problem je nastal ker, je začrtana pot šobe potekala preblizu svoje poti. Na koncu se pobrusil razlitek filameta, tako da so stopnice dobile željeno obliko.



Slika 45: Razlivanje filameta

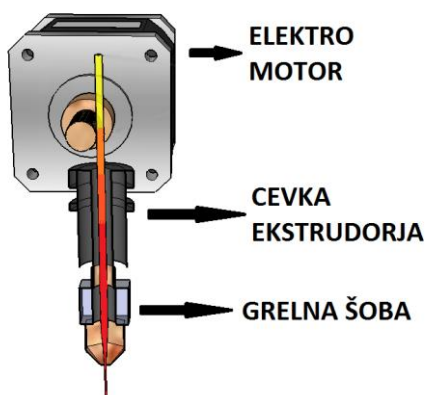
4.3.2 Mansarda

Volumen mansarde, ki je na sliki 43 znaša $64,8 \text{ cm}^3$. Tu sem naletel na večje težave, saj sem moral nekatere elemente tiskati večkrat, ter prilagajati geometrijo.

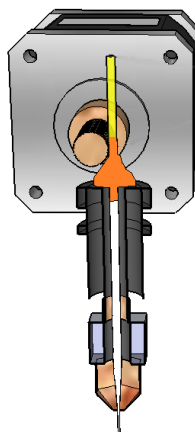


Slika 46: Model za tiskanje mansarde

Zaradi geometrije mansardne plošče, naj bi tisk potekal približno 5 ur, saj je več robnih ploskev, ki se tiskajo s hitrostjo 30 mm/s , medtem ko se sredica elementa tiska s hitrostjo 60 mm/s . Ker se je večino časa tiska s hitrostjo 30 mm/s je prišlo do pregrevanja filameta v cevki ekstrudorja in v predprostoru ekstrudorja. S tem se je filament stopil predno je vstopil v grelno šobo in v cevko ekstrudorja. Tako je stopljen filament nakopičil predno je vstopil v cevko ekstrudorja in onemogočil nadaljnjo tiskanje.

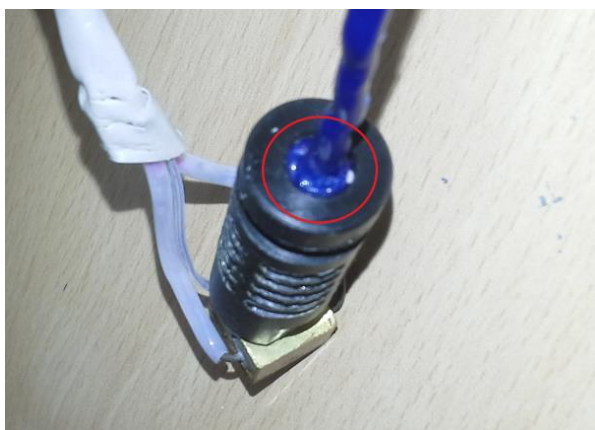


Slika 47: Pregrevanje filameta 1 (vir: <http://bootsindustries.com/portfolio-item/importance-of-good-filament/>)



Slika 48: Pregrevanje filameta 2 (vir: <http://bootsindustries.com/portfolio-item/importance-of-good-filament/>)

Ko filament izgubi trdnost predno vstopi v cevko ekstrudorja, se nakopiči in blokira nadaljnje tiskanje (slika 48). Stopljen filament v cevki in šobi normalno odteče na posteljico tiskalnika, medtem ko elektro motor poškoduje filament, ki je ostal pred cevko.



Slika 49: Stopljen filament

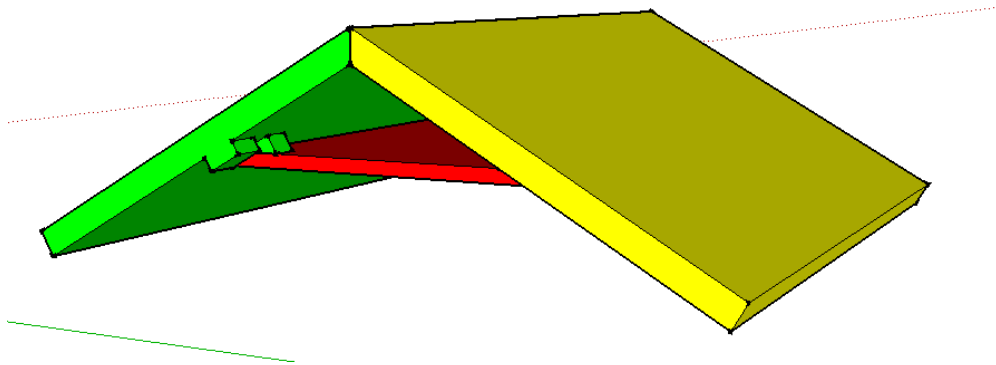
Na sliki zgoraj vidimo, kako se je stopljen filament nakopičil pred cevko ekstruderja. Višje po filamentu pa opazimo kako so zobniki elektro motorja deformirali filament.

Po treh neuspešnih poskusih tiskanja, sem preko strani, ki omogoča lastnikom 3D tiskalnikov, da prodajajo tiskance, naročil ploščo mansarde, ki je bila izdelana s tiskalnikom Purso i3 in z enakim materialom, kot ostali elementi makete. Izdelovalec ni naletel na nobene težave saj uporabil filament premera 1,75 mm, ki ga hitreje pošilja skozi grelno šobo in s tem se filament ne pregreva po dolžini ekstruderske cevi.

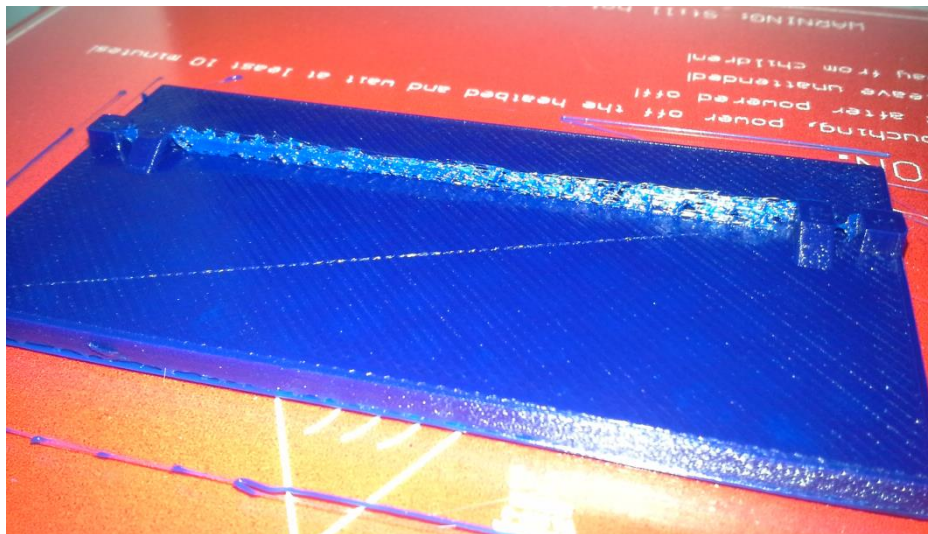
Težavo s pregrevanjem filameta, bi lahko odpravili na tri načine, prvi je da povečamo ekstrudersko cev po dolžini, s tem povečamo območje kjer se filament lahko pregreva. Drugi način je da zamenjamo teflonsko cevko, ki se nahaja v ekstrudorju, za manjšo cevko, da lahko tiskamo s filamentom manjšega premera, ali pa povečamo hitrost tiskanja, ampak s tem ukrepom dobimo manj natančen element.

4.3.3 Streha

Volumen strehe s stropno ploščo mansarde znaša $60,4 \text{ cm}^3$. Pri tisku strehe sem naletel na manjšo težavo, saj je šoba puščala filament tam kjer ga ne bi smela (slika 48). Odvečni filament sem po koncu tiskanja zbrusil in tako dobil željeno obliko strehe.



Slika 50: Model za tiskanje strehe



Slika 51: Puščanje filamenta

5 ZAKLJUČEK

Diplomska naloga si sledi v logičnem zaporedju, saj sem se naprej podučil o tehnologijah aditivne proizvodnje, nato preučil zahteve za modeliranje, zmodeliral maketo in jo natisnil.

Maketo enodružinske hiše v merilu 1:100 sem natisnil na 3D tiskalniku 3D Inovator, ki ga je sestavil Luka Ceglar (Ceglar, 2015). Za tiskanje sem uporabil termo plastiko PLA, modre barve s premerom 2,85 mm. Pred modeliranjem in tiskanjem makete, sem naredil mnogo poskusov kako izdelati spoje na maketi ter kakšne nastavitve moram uporabiti, da bodo elementi optimalni. Zaradi tehnologije 3D tiskalnika se je vsak element hiše tiskal posebej, saj nisem smel zmodelirati premostitev in previsnih delov. Veliko težav mi je povzročilo pregrevanje filameta v ekstrudorju, saj sem s pomočjo Darka Malića večkrat razstavila in sestavila ekstrudor in grelni šobo, da je bilo mogoče tiskalnik očistiti.

Če bi želeli natisniti večjo maketo, bi jo lahko, ampak še vedno bi mogli uporabiti enake nastavitve kot pri manjši maketi, saj bi še vedno potrebovali enako natančnost elementov. Težave bi se pojavile, ko bi hoteli natisniti manjše elemente, kot so okna in ostalo pohištvo. Geometrija teh elementov je zelo zahtevna za tiskalnik s tehnologijo ciljnega nalaganja, zato bi bilo primernejše če bi uporabili tehnologijo laserskega sintranja oziroma tiskali bi s prahom in laserjem. Pri tem je pa treba omeniti, da je tiskanje s prahom trikrat dražje kot tiskanje s termo plastiko.

Z modeliranjem in tiskanjem makete sem pridobil veliko izkušenj o aditivni proizvodnji ter o sestavi 3D tiskalnika.



Slika 52: Končni izdelek

V prihodnosti bi bilo smiselno poskusiti narediti večjo maketo z več detajli ali maketo kakšnega inženirskega objekta, kot je most. Ampak pred tem se mora predelati šobo, da se lahko tiska z 1,75 mm filamentom, saj se bo potem filament hitreje dodajal v ekstrudor pri enaki hitrosti tiskanja in s tem zmanjšamo možnosti pregrevanja filameta.

Preučiti je potrebno izdelovanje kompleksnejših elementov s premikajočimi deli in z drugim materialom, kot je ABS plastika. Potrebno je preizkusiti tiskanje previsnih in premostitvenih elementov z ABS plastiko, saj se material ne utekočini toliko kot PLA plastika in tudi otrdi se pri višji temperaturi.

VIRI

Marcus Ritland. 2012. 8 Tips for 3D Printing with Sketchup.

<http://mastersketchup.com/8-tips-for-3d-printing-with-sketchup/> (Pridobljeno 20. 3. 2015)

Ben Rothschild. 2013. Create Google Sketchup files that can be printed on a 3D printer.

<http://www.instructables.com/id/Create-Google-Sketchup-files-that-can-be-printed-o/>

(Pridobljeno 20. 3. 2015)

Christopher Barnatt. 2014. Explaining the future - 3D Printing.

<http://www.explainingthefuture.com/3dprinting.html> (Pridobljeno 5. 4. 2015)

Christopher Barnatt. 2014. The next revolution. V: Christopher Barnatt. 3D Printing – second edition. str. 1-20

http://www.explainingthefuture.com/3dp2e_chapter1.pdf (Pridobljeno 6. 4. 2015)

TED (producent). 2015. What If 3D Printing Was 100x Faster? | Joseph DeSimone | TED Talks. (videoposnetek)

<https://www.youtube.com/watch?v=ihR9SX7dgRo> (Pridobljeno 5. 4. 2015)

Eric William (producent). 2012. 3D Printing From Google Sketchup Model- Tutorial. (videoposnetek)

<https://www.youtube.com/watch?v=b-PVl5lUueM> (Pridobljeno 5. 4. 2015)

Wikipedia, 3D printing. 2015.

https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing (Pridobljeno 16. 7. 2015)

Wikipedia, Fused deposition modeling. 2015.

https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling (Pridobljeno 16. 7. 2015)

Wikipedia, Stereolithography. 2015.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography> (Pridobljeno 16. 7. 2015)

Wikipedia, Electron beam melting. 2015.

https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_beam_melting (Pridobljeno 20. 7. 2015)

Wikipedia, Laminated object manufacturing. 2015.

https://en.wikipedia.org/wiki/Laminated_object_manufacturing (Pridobljeno 20. 7. 2015)

Wikipedia, Electron beam freeform fabrication. 2015.

https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_beam_freeform_fabrication (Pridobljeno 20. 7. 2015)

Wikipedia Selective laser sintering. 2015.

https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering (Pridobljeno 20. 7. 2015)

Wikipedia, Continuous Liquid Interface Production. 2015.

https://en.wikipedia.org/wiki/Continuous_Liquid_Interface_Production (Pridobljeno 20. 7. 2015)

The basics Rules for STL files. 2015.

<https://www.3dprint-uk.co.uk/the-basic-rules-for-stl-files/> (Pridobljeno 30. 7. 2015)

Franky. 2014. 3D Printing Tips & Tricks – How to 3D Model A Great 3D Print.

<http://i.materialise.com/blog/tips-and-tricks-to-design-3d-printab> (Pridobljeno 8. 7. 2015)

Fabian. 2015. 5 Mistakes to Avoid When Designing a 3D Model for 3D Printing.

<http://i.materialise.com/blog/5-mistakes-to-avoid-when-designing-a-3d-model-for-3d-printing>
(Pridobljeno 8. 7. 2015)

G-code. 2015.

<http://reprap.org/wiki/G-code> (Pridobljeno 15. 7. 2015)

Tech Tips What is a STL File?. 2015.

<http://bastech.com/sla/techtips/stlfiles.asp> (Pridobljeno 16. 7. 2015)

Ceglar, L., 2015. Izdelava 3D tiskalnika in preizkus mehanskih lastnosti tiskanih modelov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba L. Ceglar)