

Topi Salminen

3D-TULOSETETUN TELINEEN TOPOLOGIAN OPTIMOINTI

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Topi Salminen: 3D-tulostetun telineen topologian optimointi
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2022

Topologian optimointi on menetelmä, jossa kappaleesta poistetaan ylimääräistä materiaalia tavoitteena tuottaa kevyempiä osia, jotka ovat käyttötarkoitukseensa edelleen sopivia. Tällaisia optimoituja osia on kuitenkin hankala valmistaa perinteisin ainetta poistavin menetelmin. Sen sijaan ainetta lisäävä valmistus on optimoitujen osien valmistukseen hyvä menetelmä.

Teoriaosuus esittelee 3D-tulostamisen ja topologian optimoimisen perusteita ja avaa eri valmistusmenetelmien soveltuvuutta optimoitujen kappaleiden valmistukseen. Valmistusmenetelmissä käsitellään ainetta poistavien ja ainetta lisäävien menetelmien eroja optimoitujen kappaleiden valmistamiseen ja esitellään yleisimpiä 3D-tulostusmenetelmiä ja niiden etuja.

Tutkimuksen tavoite on tuottaa optimoitu osa, joka täyttää kestävyysvaatimukset ja on alkuperäistä taloudellisempi. Optimointi toteutetaan useilla eri rajoitteilla ja tutkitaan suunnittelualueen vaikutusta optimoinnin tulokseen. Optimointi suoritetaan Solidworks-ohjelmalla mallintamalla ja Solidworks Simulation-ohjelmassa topologian optimointityökalua käyttämällä, jonka jälkeen tehdään Solidworks -ohjelmalla siistityt versiot optimointien tuloksista. Osien tulostettavuus ja taloudellisuus arvioidaan PrusaSlicer-ohjelmassa.

Tutkimustulokset näyttävät, että tulostamista varten suunniteltua valmista osaa on kannattavampaa keventää, kuin antaa Solidworks Simulation -ohjelmiston luoda vapaammin uudenlainen muotoilu. Optimoitujen kappaleiden pohjalta suunnitellut osat ovat tulostamisen ja taloudellisuuden näkökulmasta onnistuneimpia, vaikka optimointitulokset itsessäänkin ovat käyttökelpoisia. Optimointi rakenteiden paksuutta rajoittamalla osoittautui tekemään liian monimutkaisia rakenteita, jotka puolestaan olivat epätaloudellisia.

Avainsanat: 3D-tulostin, 3D-tulostus, Ainetta lisäävä valmistus, Optimointi, Solidworks, Solidworks Simulation, Topologia.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TOPOLOGIAN OPTIMOINTI JA AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS	2
2.1 Topologian optimointi	2
2.2 Ainetta lisäävä valmistus	2
2.3 Topologian optimointi ainetta lisäävässä valmistuksessa	6
3. OPTIMOINTI, ARVIOINTI JA VALMISTUS	7
3.1 Osan esittely, tavoitteet ja hypoteesi	7
3.2 Optimointi	10
3.3 Suuren suunnittelun alueen osa	11
3.4 Optimoinnin tulosten analysointi	12
3.5 Osien tulostettavuuden arviointi	19
3.6 Osien taloudellisuuden vertailu	24
3.7 Parhaan osan valinta	25
3.8 Osan tulostaminen ja kestävyys testaus	26
4. YHTEENVETO	27
LÄHTEET	28

LYHENTEET JA MERKINNÄT

a	kihtyvyyys
F	voima
m	massa
FFF	engl. filament fabrication, ainetta lisäävä valmistus filamenttia pursottaen
SLA	engl. stereolithography, stereolitografia

1. JOHDANTO

Topologian optimoiminen on yleensä elementtimenetelmään perustuva laskennallinen menetelmä, jonka tuloksena saadaan tietokoneen laskema malli kappaleen sisäisistä rasituksista, joiden perusteella kappaleesta voidaan poistaa materiaalia. Materiaalia poistamalla pyritään luomaan rakenteita, jotka ovat kevyempiä, mutta edelleen tarpeeksi lujia ja jäykkiä. Ohjelmisto tuottaa ehdotuksen materiaalin poistamisesta, mutta se on kuitenkin usein hankala valmistaa, sillä pinnat ovat epätasaisia ja rakenteet menevät usein lomittain niin, ettei niitä voi välttämättä valmistaa ainetta poistavien menetelmin, sillä työkalut eivät aina mahdu rakenteiden väleihin.

Ainetta lisäävät menetelmät puolestaan soveltuvat hyvin tällaisten optimoitujen osien valmistukseen. Näillä menetelmillä voidaan valmistaa erittäin monimutkaisia osia, mutta siihen kuluu yleensä paljon aikaa. Optimointi voi lyhentää valmistusaikaa ja käytettyä materiaalia, jolloin aikaa ja rahaa kuluu vähemmän.

Tämän opinnäytetyön tavoite on optimoida telineen jalka ja tuottaa kevyempi kappale, joka on valmistettavissa ainetta lisäävän valmistuksen FFF-menetelmällä (Fused Filament Fabrication) ilman tukimateriaalia. Tutkimus toteutetaan Solidworks ja PrusaSlicer -ohjelmistoilla, joilla arvioidaan optimoidun osan kestävyyttä, valmistettavuutta, valmistukseen kuluvaan aikaa, käytettyä materiaalia ja sen valmistuskustannusta. Kevennetyn osan tulee täyttää myös sille asetetut kestävyysvaatimukset.

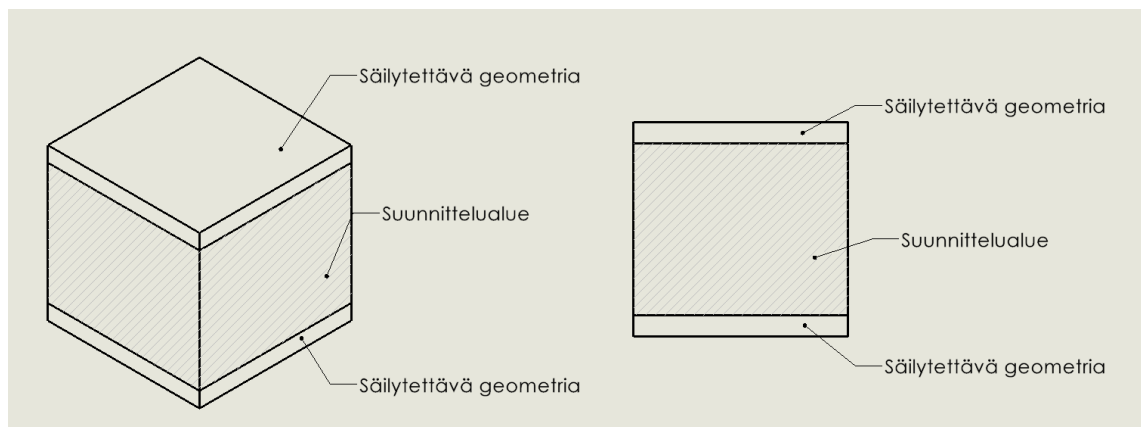
Optimointiin käytetään kahta eri tapaa, joista ensimmäisellä tavalla tutkitaan, kuinka topologian optimointia voi hyödyntää valmista osaa keventämällä ja toisella tavalla tutkitaan, millainen optimaalinen muotoilu olisi Solidworks-ohjelman optimointityökalun mukaan. Simuloinnit suoritetaan PET muoville ja lopulta osa valmistetaan 3D-tulostamalla se kyseisellä muovilla.

2. TOPOLOGIAN OPTIMOINTI JA AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS

2.1 Topologian optimointi

Topologiaa optimoimalla vähennetään käytettyä materiaalia osissa. Osalle asetetaan ennalta määritetyt reunaehdot, joiden puitteissa tietokone laskee elementtimenetelmää hyväksi käyttäen kappaleeseen kohdistuvat rasitukset. Joka laskentakierroksella ohjelmisto poistaa ne tilavuudet, joihin kohdistuu pienimmät rasitukset. Laskentaprosessi on iteratiivinen ja ohjelmisto laskee ja pienentää kappaleen tilavuutta, kunnes tavoite saavutetaan.

Pohjimmiltaan topologian optimoinnissa on kyse siitä, kuinka materiaalia asetetaan rakenteellisesti kestäväksi rakenteeksi suunnittelualueen sisällä (Sigmund, & Maute, 2013). Suunnittelualueeksi kutsutaan reunaehtojen rajaamaa aluetta. Tämän alueen sisällä optimointiin käytettävä ohjelmisto laskee kappaleen sisällä rasitukset ja luo uuden rakenteen. (Saadlaoui, et al. 2017) Suunnittelualue on havainnollistettu kuvassa 1.



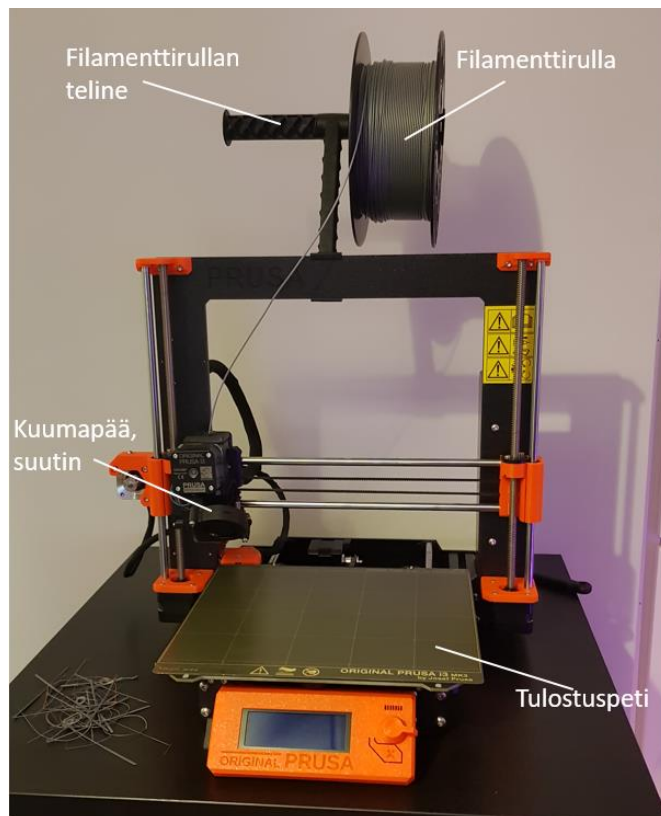
Kuva 1. Suunnittelualueen visuaalinen esitys.

2.2 Ainetta lisäävä valmistus

Ainetta lisäävä valmistus, englanniksi additive manufacturing, yleisemmin 3D-tulostus, on valmistusmenetelmä, jossa ainetta lisäämällä valmistetaan kappaleita. Tämä menetelmä on ainetta poistavan valmistuksen vastakohta. 3D-tulostimet valmistavat kappaleita kerros kerrallaan ja kerroksia vaaditaan kappaleesta ja 3D-tulostimesta riippuen jopa tuhansia. Yleisimmät 3D-tulostusmenetelmät ovat FFF- (Fused Filament Fabrication) ja SLA-menetelmät (Stereolitography). FFF-menetelmässä 3D-tulostin piirtää jokaisen kerroksen sulaa muovifilamenttia ohuena nauhana pursottaen. SLA-

menetelmässä, eli stereolitografiassa, muovikerrokset kovetetaan UV-valoa käyttämällä. Tulostustekniikasta riippumatta jokaisen osassa olevan osion on oltava yhteydessä tulostusalustaan jollain tavalla.

Tässä työssä käsitellään FFF-menetelmällä toimivalla Prusa i3mk3S tulostimella tulostamista. Tyypillisen FFF-tulostimen tärkeimmät osat ovat sen runko, kuumapää (Hot end), suutin (Nozzle), tulostusalusta (Print bed), filamenttirullan teline, jotka ovat esitetty kuvassa 2.

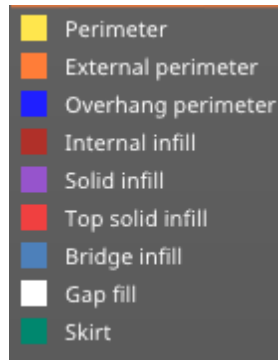


Kuva 2. Prusa i3mk3S 3D-tulostin, tärkeimmät osat kuvaan nimettyinä.

Kappale on ensin viipaloitava, jotta 3D-tulostin voi valmistaa kappaleen. Viipalointi tarkoittaa 3D-mallin muuttamista 3D-tulostimen lukemaan muotoon. Viipalointiprosessin aikana käyttäjä analysoi viipaloitua kappaletta ja säätää asetuksia, jotta kappale voidaan tulostaa oikein. Tässä työssä käytetään viipalointiin PrusaSlicer-viipalointiohjelmaa, joka viipaloi kappaleen FFF-tyyppistä Prusa i3mk3S -3D-tulostinta varten.

Viipaloinnin analysoimisen helpottamiseksi PrusaSlicer-ohjelmassa on värikoodit erilaisille pursotustyypeille. Kuvan 3 värien avulla viipaloitua mallia on helppo tulkitella ja löytää huomiota vaativat kohdat. Yleisesti ongelmia aiheuttavat roikkuvat osiot (Overhang perimeter) ja sillat (Bridge infill). Tämä johtuu FFF-tekniikasta, sillä sulatettua muovia ei voi pursottaa ilmaan niin, että se pysyisi paikallaan. Roikkuvat osat on siis mahdotonta tulostaa ilman tukea, mutta siltoja voidaan FFF-tekniikalla tehdä. Siltoja

voidaan tulostaa pingottamalla sulaa muovinauhaa kahden tukipisteen väliin. Muovilaadusta ja tulostimesta riippuen sillat voivat roikkua ja kappaleesta ei tule suunnittelun mukainen. Osa voi itse kannatella jokaista osiotaan, jolloin jokainen kerros lisätään edellisen päälle niin, että lisättävä kerros ei ole olennaisesti edellisen kerroksen ulkorajojen ulkopuolella.



Kuva 3. PrusaSlicer-ohjelman selite.

Toinen vaihtoehto on lisätä tukimateriaalia, joka kannattelee roikkuvia osioita ja siltoja. Tukien käyttäminen heikentää FFF-tekniikalla valmistuksen taloudellisuutta, mutta lyhyitä siltoja ei tulostettavan materiaalin mukaan tarvitse tukea. Tuet ovat yleensä ohuita seinämiä, joita tehdään vierekkäin tuettavan osion alle. Tuen yläpään tulee muutaman kerroksen paksuinen tasainen rajapinta, joka tulostetaan siltana näiden ohuiden tukiseinien päälle. Rajapinnan tarkoitus on tarjota tuettavalle pinnalle tasaisempi alusta, jotta roikkuvan osion alapinnasta ei tulisi epätasainen.

Osan asennolla on myös valmistettaessa väliä. Osan kääntäminen vaikuttaa tuen tarpeeseen ja tuen voi minimoida osan mukaan tietyssä asennossa. On silti muistettava, että osan asento vaikuttaa myös sen kestävyyskykyyn, sillä kerrosten irtoaminen toisistaan on merkittävin kestävyyskykyyn vaikuttava tekijä. Näin ollen osa on vahvimmillaan, kun vetävä voima on kerrosten suuntainen ja puolestaan heikoimmillaan, jos voima on kerroksiin nähden kohtisuorassa, kuten Prusa Polymers ilmoittaa kuvassa 4. Kuvasta voidaan nähdä, että "Vertical Z-Axis" -suunnassa tulostettu testikappale on heikoin, kun taas "Vertical X,Y-Axis" -suunnassa tulostettu testikappale on kestävin.

Kuvissa 5 ja 6 nähdään esimerkkikappaleen viipalointikuvista esimerkki silloista, roikkuvista osioista, täytöstä ja ylä- ja alapinnoista. Näitä kuvia voidaan tulkita kuvan 3 värien avulla. Väreistä voidaan tulkita kuvasta 5, että kappaleen oikea reuna ei ole yhteydessä tulostusalustaan sen alapuolelta, joten se on roikkuva, eikä sitä voida tulostaa ilman tukea. Kuvassa 6 on havainnollistettu ohjelmiston toimintoa, jossa eri pursotustyyppisiä voidaan piilottaa näkyvistä. Tässä esimerkissä kappaleesta on poistettu seinät.

MECHANICAL PROPERTIES OF PRINTED TESTING SPECIMENS(2):

Property / print direction	Horizontal	Vertical X,Y-Axis	Vertical Z-Axis	Method
Tensile Yield Strength [MPa]	47 ± 2	50 ± 1	30 ± 5	ISO 527-1
Tensile Modulus [GPa]	1.5 ± 0.1	1.5 ± 0.1	1.4 ± 0.1	ISO 527-1
Elongation at Yield Point [%]	5.1 ± 0.1	5.1 ± 0.1	2.5 ± 0.5	ISO 527-1
Impact Strength Charpy(3) [kJ/m ²]	NB(C)(4)	NB(4)	5 ± 1	ISO 179-1

(1) 30 °C; humidity 30 %

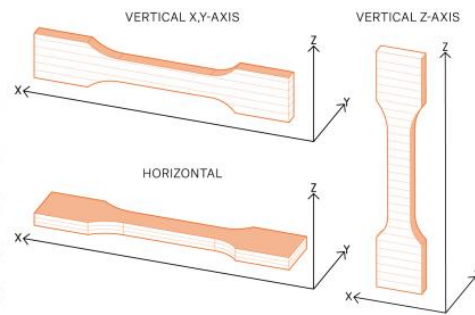
(2) Original Prusa i3 MK3 3D printer was used to make testing specimens. Slic3r Prusa Edition 1.40.0 was used to create G-codes with following settings: Prusa PETG Filament; Print settings 0,20mm FAST (layers 0,2mm); solid layers Top:0 Bottom:0; Infill 100% Rectilinear, infill print speed 100mm/s; extrusion multiplier 1.07; extruder temperature 260°C all layers; bed temperature 90°C all layers; other parameters set default

(3) Charpy unnotched - Edgewise direction of blow according to ISO 179-1

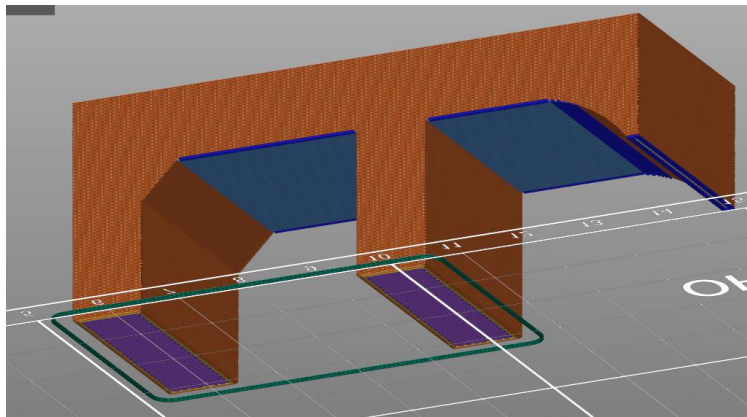
(4) NB (no break); C (complete break) in brackets second most frequent type of failure > 1/3

Disclaimer

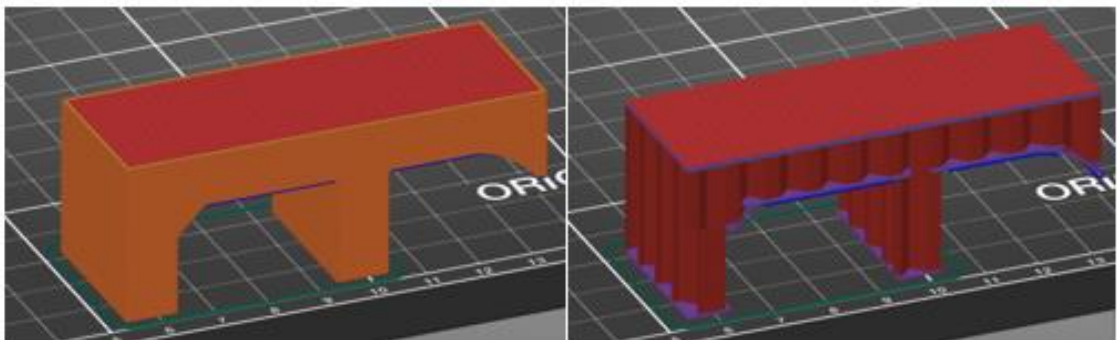
The results presented in this data sheet are just for your information and comparison. Values are significantly dependent on print settings, operators experiences and surrounding conditions. Everyone have to consider suitability and possible consequences of printed parts usage. Prusa Polymers can not carry any responsibility for injuries or any loss caused by using of Prusa Polymers material.



Kuva 4. PETG materiaaliominaisuuksia (Prusa Polymers PETG Data sheet).



Kuva 5. Esimerkkikappale viipaloituna PrusaSlicerissa.



Kuva 6. Esimerkkikappale viipaloituna PrusaSlicerissa.

2.3 Topologian optimointi ainetta lisäävässä valmistuksessa

Topologian optimointi tuottaa lopputuloksen, joka on monesti niin monimutkainen, että se on mahdoton valmistaa ainetta poistavin menetelmin tai valamalla yhtenä kappaleena. Siksi tietokoneen laskemaa rakennetta joudutaan muuttamaan ja yksinkertaistamaan. Tämä työ tehdään ohjelmiston tuottaman ehdotuksen mukaan CAD-ohjelmistossa (Computer Aided Design, suomeksi tietokoneavusteinen suunnittelu.). (Meng, et al. 2020)

Ainetta lisäävän valmistuksen etu on, että kappaleita ei välttämättä tarvitse yksinkertaistaa lainkaan, sillä 3D-tulostamalla pystytään valmistamaan monimutkaisetkin kappaleet, jolloin yksinkertaistaminen voi olla tapauksen mukaan turhaa (Meng, et al. 2020). Kuitenkin yleensä osia suunnitellaan ainetta poistavaa valmistusta varten optimoitujen kappaleiden pohjalta, jotta valmistettavuus voidaan ottaa huomioon. Näin tehdessä optimoinnin tulos on vain suuntaa antava malli, jonka pohjalta osia muotoillaan uudelleen.

Topologian optimoinnin tuloksena syntyvä kappale voi silti olla edelleen haastava ainetta lisäävän valmistuksenkin näkökulmasta. Tällaisia tilanteita syntyy, kun optimointi tuottaa kappaleen, jossa on pitkiä siltoja tai roikkuvia osia, joita kappale ei itse tue. Osan topologian voi myös optimoida itseään kannattelevaksi reunaehtoja asettamalla, jolloin osaa ei tarvitse tukea valmistamisen aikana (Mirzendehtdel, & Suresh, 2016).

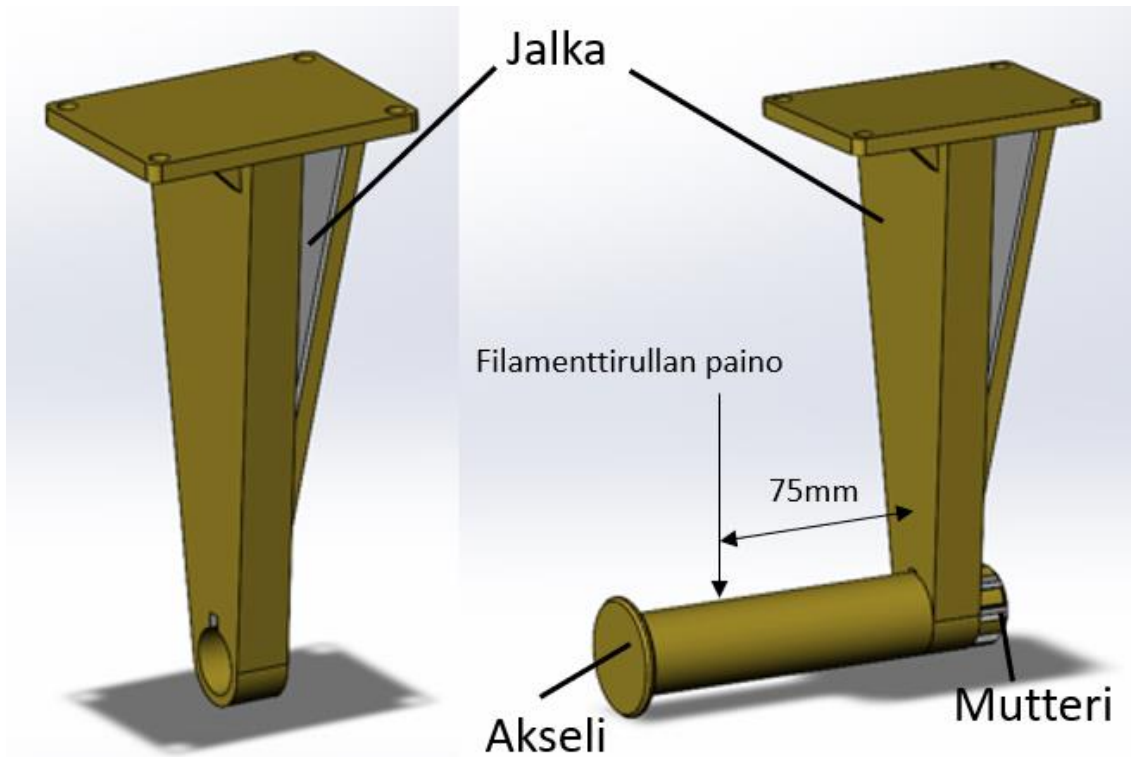
3. OPTIMOINTI, ARVIOINTI JA VALMISTUS

3.1 Osan esittely, tavoitteet ja hypoteesi

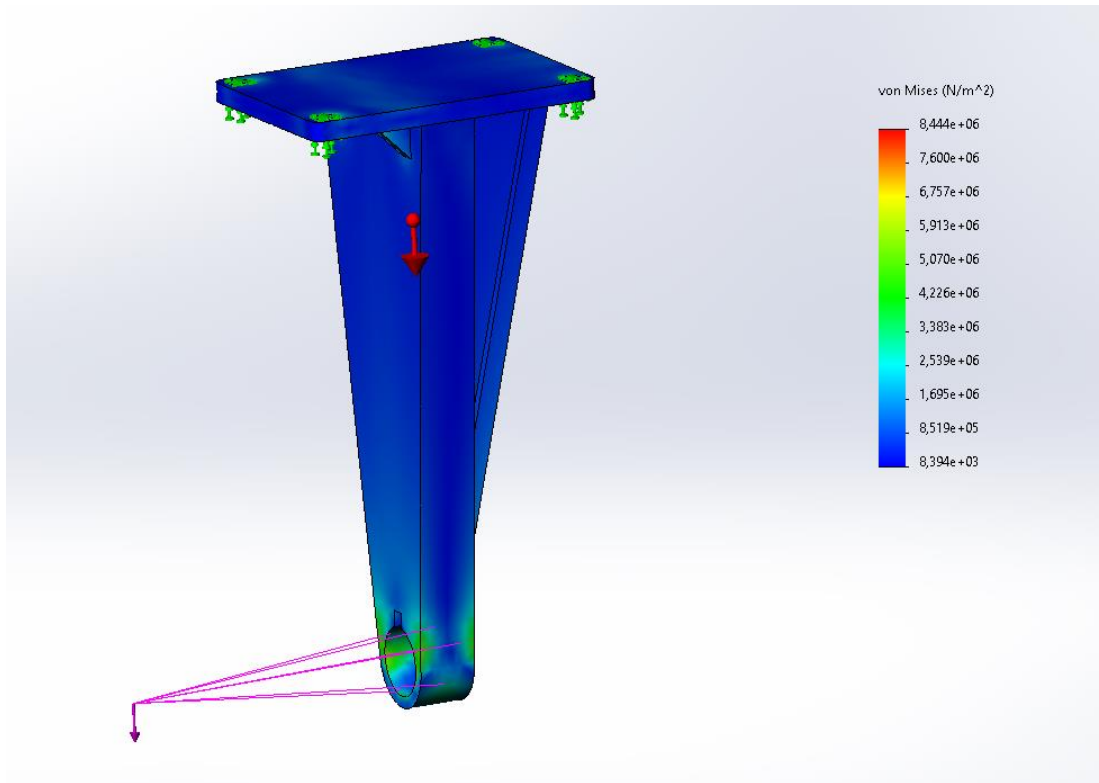
Työssä tutkittiin filamenttirullan telineen jalkaa, joka näkyy kuvassa 7. Jalka roikkuu pöydän pinnasta ruuvien varassa, ja telineen toisessa päässä on akseli, jonka päällä filamenttirulla lepää. Jalka on helposti valmistettava FFF-menetelmällä ylösalaisin, sillä jalalla on suuri kiinnityspinta, eikä jalassa ole lainkaan siltoja, jotka vaatisivat tukea. Jalan tulee kestää noin yhden kilogramman painoisen filamenttirullan, jonka lisäksi myös puolan painon. Siirtymillä ei ole suurta merkitystä, sillä filamentti itsessään liikkuu puolalla noin 60 mm:n leveydellä.

Tulostussuunta on kestävyuden kannalta huonoin mahdollinen, kuten kuvasta 4 voidaan tulkita, sillä kappaleeseen kohdistuva voima tulee olemaan kohtisuorassa tulostuettuihin kerroksiin, eli myötöraja luetaan z-suunnan kohdalta kuvan 4 taulukosta. Kuvassa 8 on esitetty elementtimenetelmällä lasketut von Mises -vertailujännitykset, jotka ovat kuitenkin pienemmät, kuin 30 MPa, ja kuvasta 9 voidaan katsoa, ettei siirtymät ole suurimmillaan kuin 0,4 mm, joten voidaan sanoa, että tulostussuunta on myös kestävyuden kannalta perusteltu.

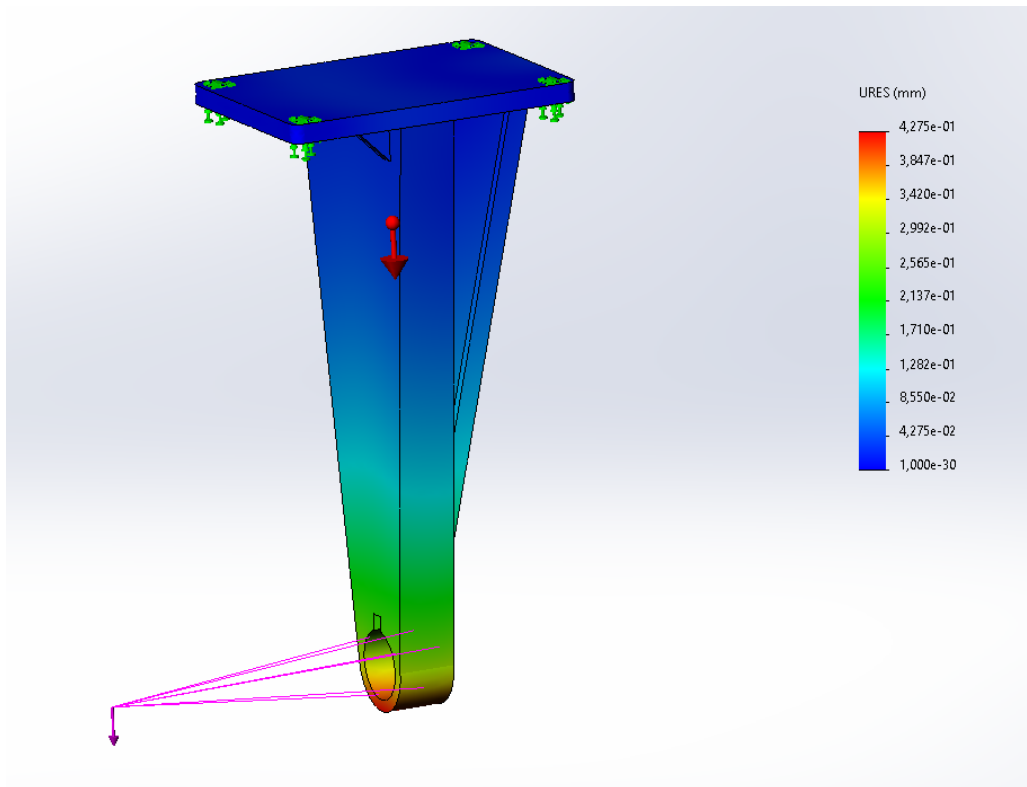
Tavoite optimoinnille on tuottaa osa, joka on FFF-menetelmällä valmistettavissa ilman tukea. Osan tulisi olla myös huomattavasti kevyempi, jolloin materiaalia käytetään vähemmän. Materiaalin vähentämisellä tavoitellaan säästöä valmistusaikaan ja -kustannuksiin. Optimoinnin pitäisi tuottaa tulostuskelpoinen osa, mikäli osassa ei ole vaikeasti tulostettavia siltoja tai roikkuvia osioita. Odotettavissa on, että kappaleen massan vähentäminen maltillisesti ei tuota haluttuja tuloksia, vaan painon vähentämistavoitteen saavuttamiseksi pitää poistaa vähintään puolet materiaalista.



Kuva 7. Alkuperäinen osa.



Kuva 8. Alkuperäisen osan jännitystarkastelu.



Kuva 9. Alkuperäisen osan siirtymätarkastelu.

3.2 Optimointi

Filamenttirulla liikkuu vapaasti sivuttain akselin päällä, joten jalka optimoitiin niin, että filamenttirulla on akselin päädyssä olevan olkapään varassa. Tällöin filamenttirullan painopiste on kauimmillaan, eli 75 mm:n etäisyydellä akselin kiinnityspisteestä. Optimointi tehtiin yhden kilogramman painoiselle filamenttirullalle varmuuskertoimen ollessa $n = 2$. Todellisuudessa filamentin massa ilmoitetaan ilman puolaa, minkä takia varmuuskertoimeksi valittiin 2.

Optimointityökalulle on määritelty säilytettäväksi geometriaksi kaikki neljä kiinnitysreikää, sekä akselin kiinnitysreikä ja 2 mm niiden ympäriltä. Näin varmistetaan, ettei työkalu poista kiinnityspisteitä. Seuraavaksi työkalulle on määritetty yläosan kiinnityskohtat kiinteäksi geometriaksi. Painovoima on lisätty vaikuttamaan jalkaan ja painopisteen kohdalle on asetettu 20 N:n suuruinen alaspäin vaikuttava voima. 20 N:n voima tulee laskukaavalla:

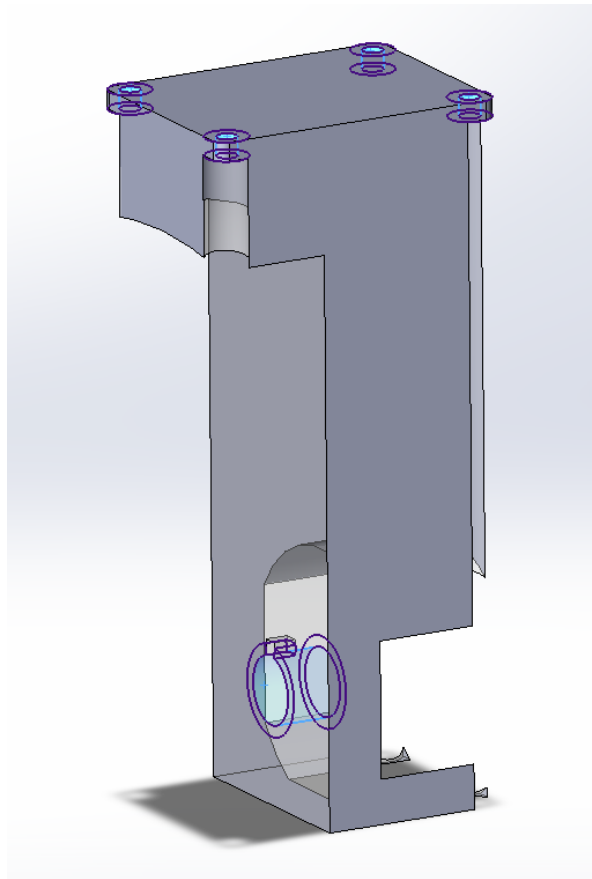
$$F = m * g * n = 1 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 2 = 19,62 \approx 20 \text{ N}.$$

Optimoinnin tavoitteeksi asetettiin 30, 50, 75 ja 90 %:n massan vähentäminen ja lopuksi muutettiin optimointituloksen pinta sileäksi.

Tutkimuksen yksinkertaistamisen takia optimointi on tehty PET-muovin tiedoilla, jotka löytyvät Solidworks-ohjelman materiaalikirjastosta. FFF-menetelmällä pursotetun PET-muovin ominaisuudet eroavat valetusta muovista, sillä FFF-menetelmällä valmistettu kappale koostuu kerroksista, eikä ole valukappaleen tavoin homogeeninen. FFF-menetelmällä valmistetulle kappaleelle voidaan määrittää materiaaliominaisuudet tarkasti vain kokeellisin menetelmin, sillä tulostusasetukset ja olosuhteet vaihtelevat tulostettaessa. Solidworks-ohjelman materiaalikirjaston myötöraja on 57,3 MPa, mutta filamentin valmistajan mukaan myötöraja on 30 MPa (kuva 4, Prusa Polymers). Tähän arvoon tullaan viittaamaan jännitystarkastelujen yhteydessä.

3.3 Suuren suunnittelalueen osa

Optimoinnin tavoitteena oli Solidworks Simulation -ohjelman tuottama optimaalinen muotoilu osalle. Tätä varten luotiin uusi 3D-malli, jonka suunnittelualaue on mahdollisimman suuri. Tässä suunnittelualueessa on otettu huomioon osan asennettavuus ja käytettävyys, joten kulmissa on ruuvimeisselin mentävät leikkaukset, telineen takana on käsin pyöritettävän mutterin kiinnittämistä varten tilaa ja telineen etupuolella on filamenttirullalle sopiva pyörimistila. Tämä osa on esitetty kuvassa 10, jossa näkyy säilytettävät alueet violetilla värillä rajattuna.

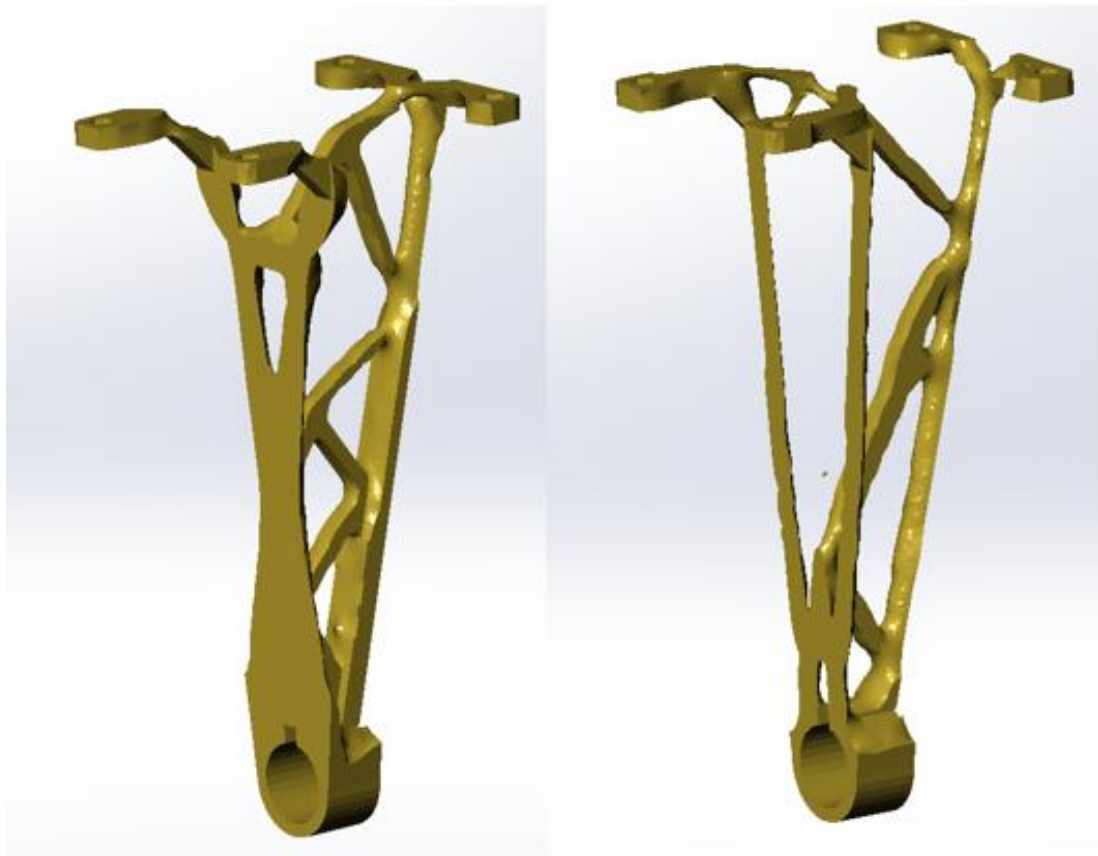


Kuva 10. Iso suunnittelualaue.

Optimointi suoritettiin samalla tavalla, kuin alkuperäisen osan optimointi, paitsi tällä kertaa tavoitteeksi asetettiin 90 %:n massan vähentäminen. Jo tässä vaiheessa nähdään se, että massa tulee olemaan suurempi, kuin alkuperäisen osan. Tämä johtuu suuren suunnittelalueen suuremmasta tilavuudesta. Optimointi tehtiin kahdesti, joista toiseen lisättiin myös Thickness Control -rajoite. Thickness Control rajoittaa optimointituloksessa rakennepaksuuden tietylle välille, ja tässä työssä väliksi asetettiin 2–4 mm, jotta rakenteesta saataisiin levymäinen.

3.4 Optimoinnin tulosten analysointi

30 % massan vähentäminen ei tuottanut silmämääräisesti halutunlaista lopputulosta, sillä osaan jäi vielä paljon ylimääräistä materiaalia, joka ei vaikuta osan kestävyteen olennaisesti. 50 %:n vähentäminen poisti hyvin paljon materiaalia, mutta edelleen osassa on turhaa materiaalia. 75 %:n vähentäminen tuotti halutunlaisen osan, josta silmämääräisesti katsottuna lähes kaikki turha materiaali on poistettu. 90 %:n tavoite tuotti puolestaan hyvin kevyen, mutta mahdollisesti heikon näköisen lopputuloksen. Tästä eteenpäin jatkettiin 75 ja 90 %:n tavoitteilla optimoiduilla osilla, jotka näkyvät kuvassa 11.



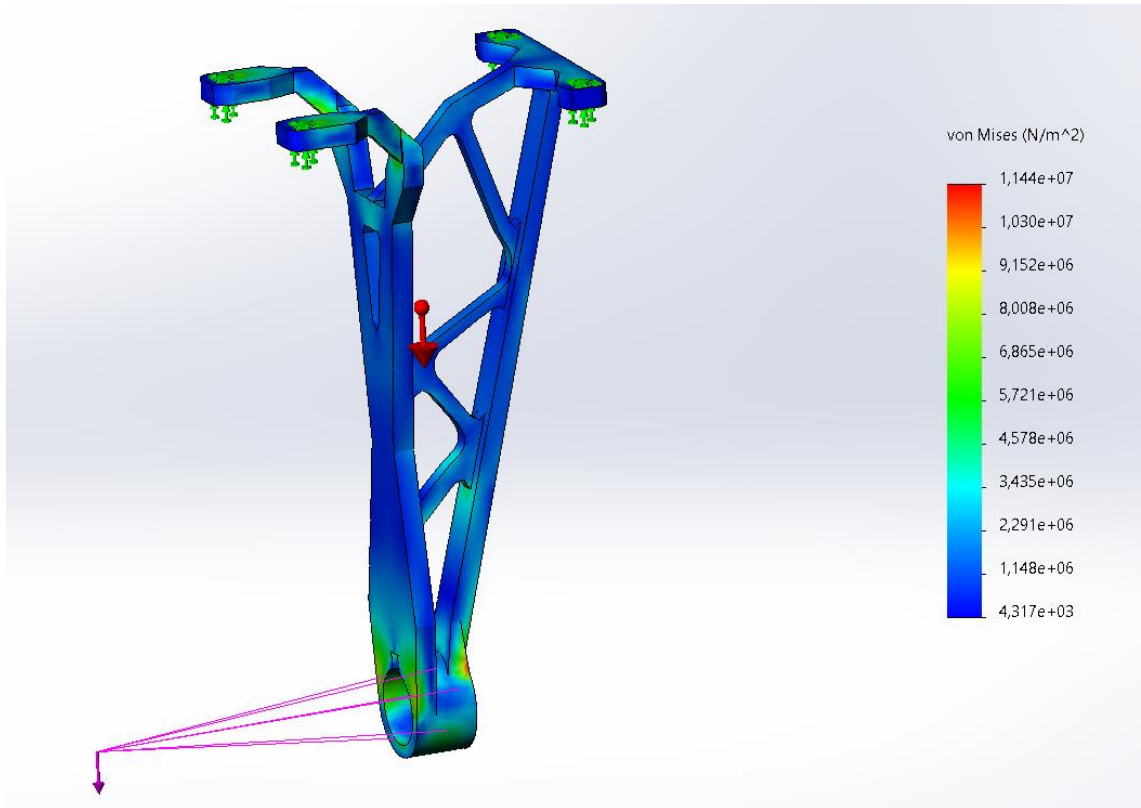
Kuva 11. 75 ja 90 %:n massan vähennysten tulokset.

Osien analysoimista varten optimointituloksista luotiin uudet, siistityt, kappaleet. Nämä kappaleet muotoiltiin optimointituloksen ääri viivojen mukaan, joten niistä tehtiin hieman optimoinnin tulosta paksumpia ja yksinkertaisempia, jolloin osat ovat optimoinnin tulosta raskaampia. Tällöin osien tulostettavuus paranee ja arvioiminen helpottuu. Tämä yksinkertaistaminen näkyy selvästi kuvia 11 ja 12 vertailemalla.

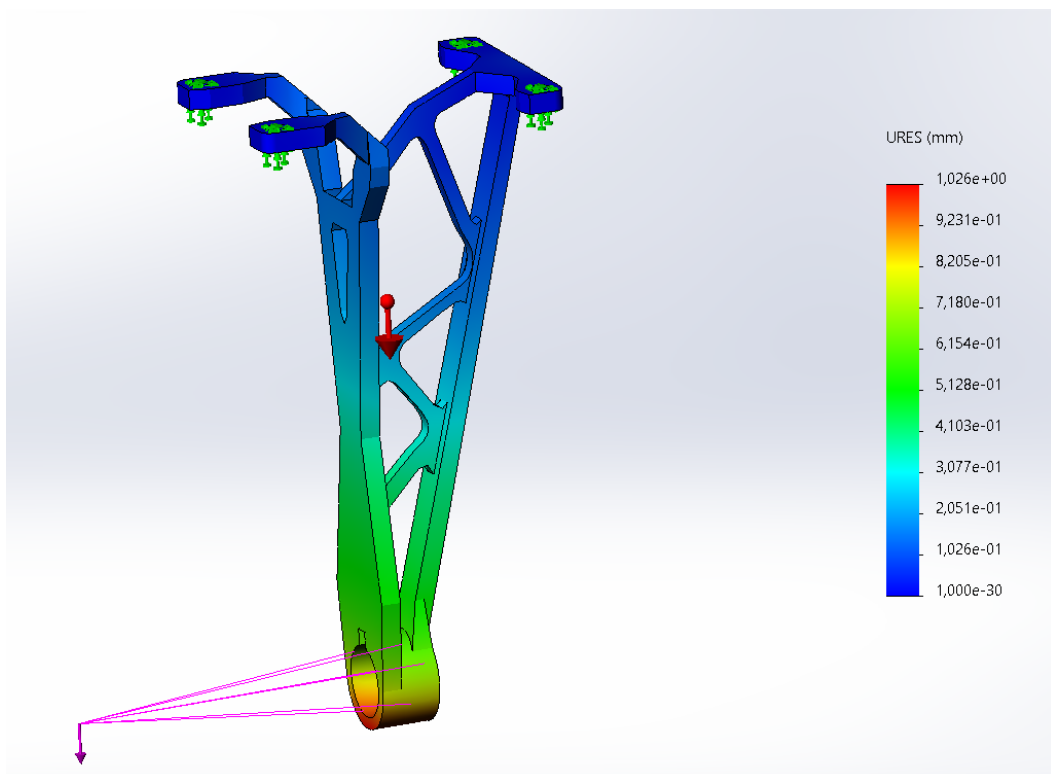


Kuva 12. Optimointitulosten pohjalta muokatut osat.

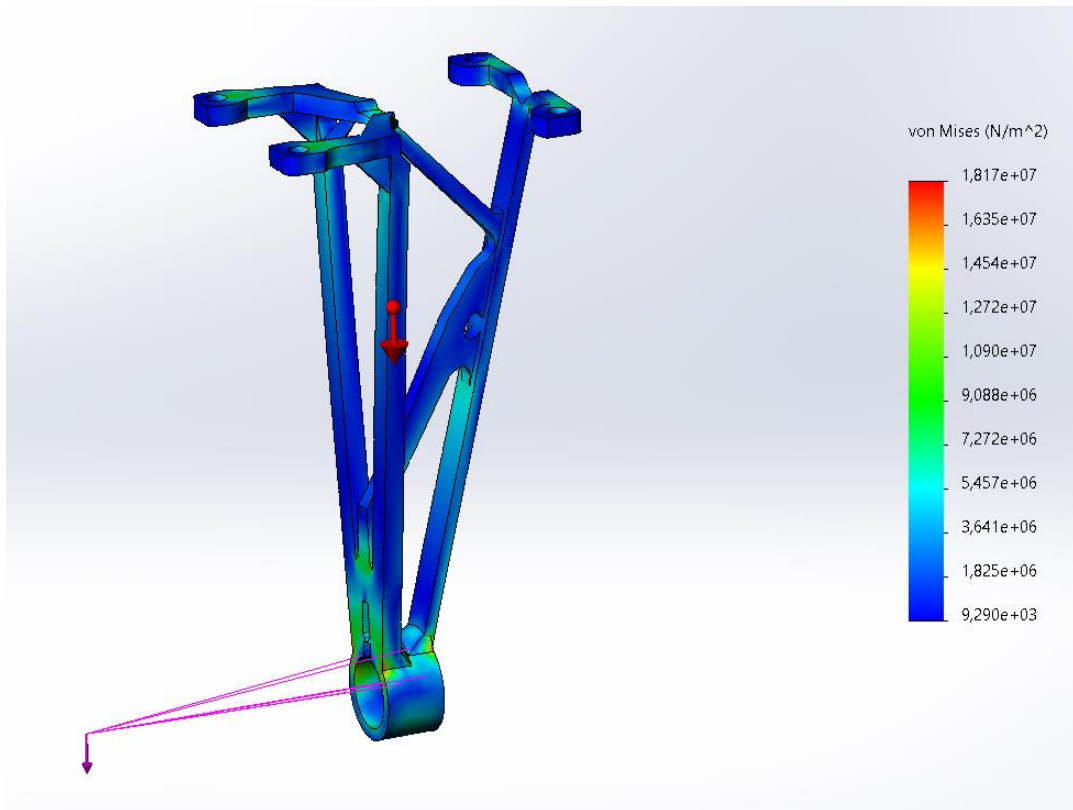
Siistimisen jälkeen osille tehtiin Solidworks Simulation -ohjelmassa Static Study -työkalulla staattinen tarkastelu jännityksille ja siirtymille. Static Study näytti, että 75 %:n optimoinnin tuloksien mukaan muokatussa kappaleessa siirtymät olivat suurimmillaan yhden millimetrin luokkaa ja von Mises -jännitykset olivat suurimmillaan 11,4 MPa:n suuruisia. Jännitykset ovat hyvin paikallisia, ja simulointia muuttamalla huomattiin, että kappaleen verkotus oli liian harva ja todelliset jännitykset olivat vieläkin pienemmät. Tutkimuksen epätarkkuuden vuoksi verkotustarkastelu jätettiin kuitenkin huomiotta muissa osissa, työmäärän keventämiseksi. 90 %:n tuloksista mallinnetun kappaleen suurin siirtymä oli 1,7 mm:n suuruinen, ja jännitykset olivat suurimmillaan 18 MPa:n suuruisia. Siirtymät ovat sovelluskohteessa merkityksettömän pienet, sillä laitteisto toimii virheettää, vaikka filamenttirulla lepäisikin hieman kallellaan. Kummankin osan jännitykset ovat alle vaaditun 30 MPa:n. Huomataan kuitenkin, että varmuuskerroin $n = 2$ ei täyty 90 %:n optimoinnilla. Tämä varmuuskerroin ei ole varsinaisesti vaatimus tässä tutkimuksessa, mutta se on huomion arvoisen, sillä optimointi on suoritettu tällä varmuuskertoimella. Nämä simulointitulokset ovat kuvissa 13–16.



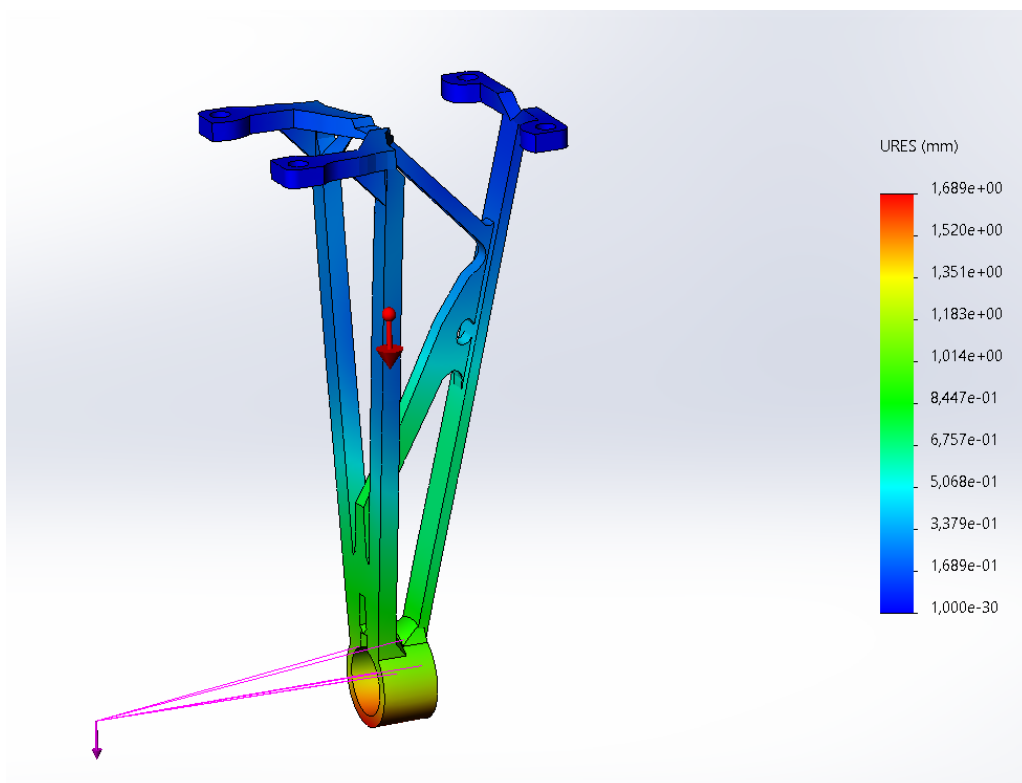
Kuva 13. 75 %:n tuloksista mallinnetun kappaleen jännitystarkastelu.



Kuva 14. 75 %:n tuloksista mallinnetun kappaleen siirtymätarkastelu.

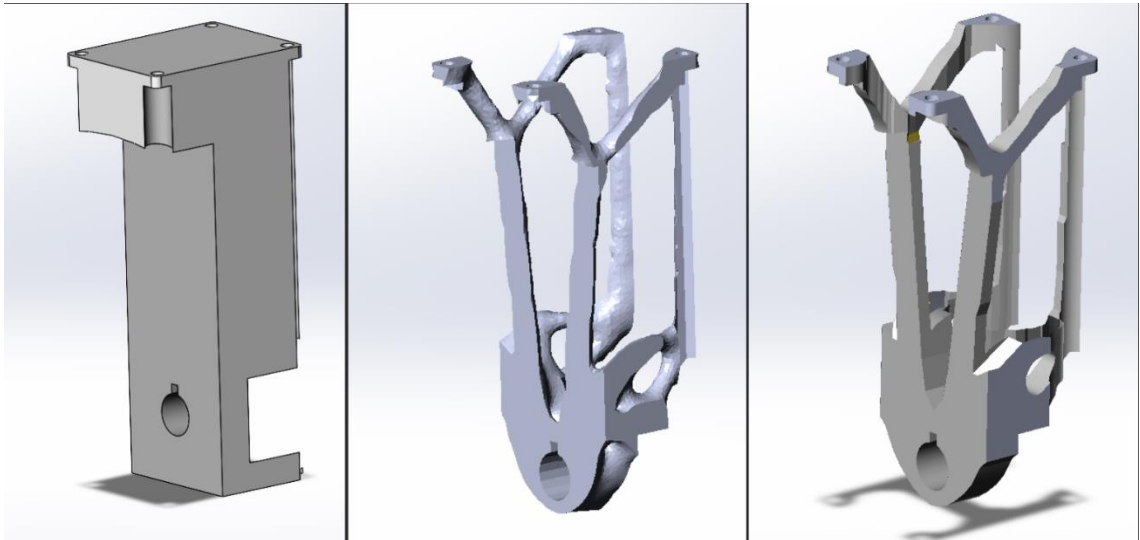


Kuva 15. 90 %:n tuloksista mallinnetun kappaleen jännitystarkastelu

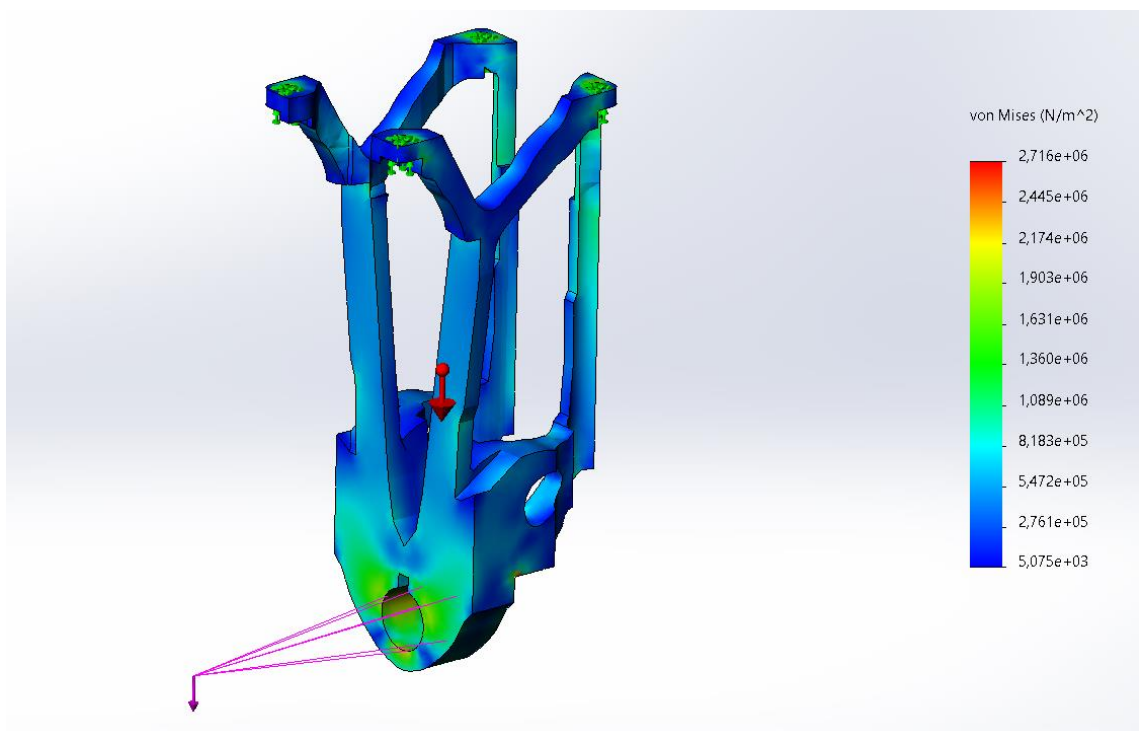


Kuva 16. 90 %:n tuloksista mallinnetun kappaleen siirtymätarkastelu

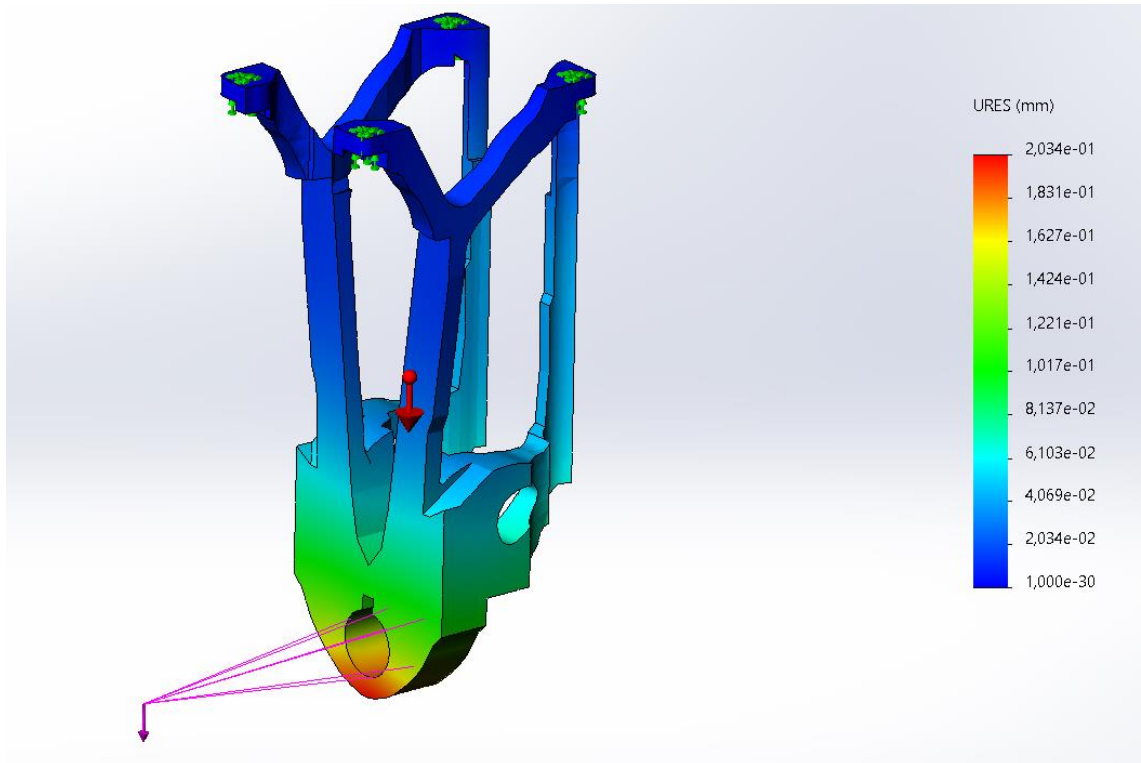
Isolla suunnittelualueella optimoidun kappaleen muoto oli alapäästään raskaampi, kuten kuvasta 17 nähdään, ja rakenne pyrkii vähentämään kuorman aiheuttaman momentin vaikutusta isolla kolmiomaisella rakenteella, joka on tuettu kiinnityspisteisiin ohuilla tuilla. Kuvien 18 ja 19 mukaan jännitykset olivat tässä kappaleessa 2,7 MPa, joka oli edellisiin kappaleisiin verrattuna pieni. Siirtymätkin olivat pienemmät.



Kuva 17. Optimoinnin lähtötilanne, optimoinnin tulos ja tuloksesta siistitty versio.



Kuva 18. Ison suunnittelualueen optimointituloksen mukaan siistityn kappaleen jännitystarkastelu.

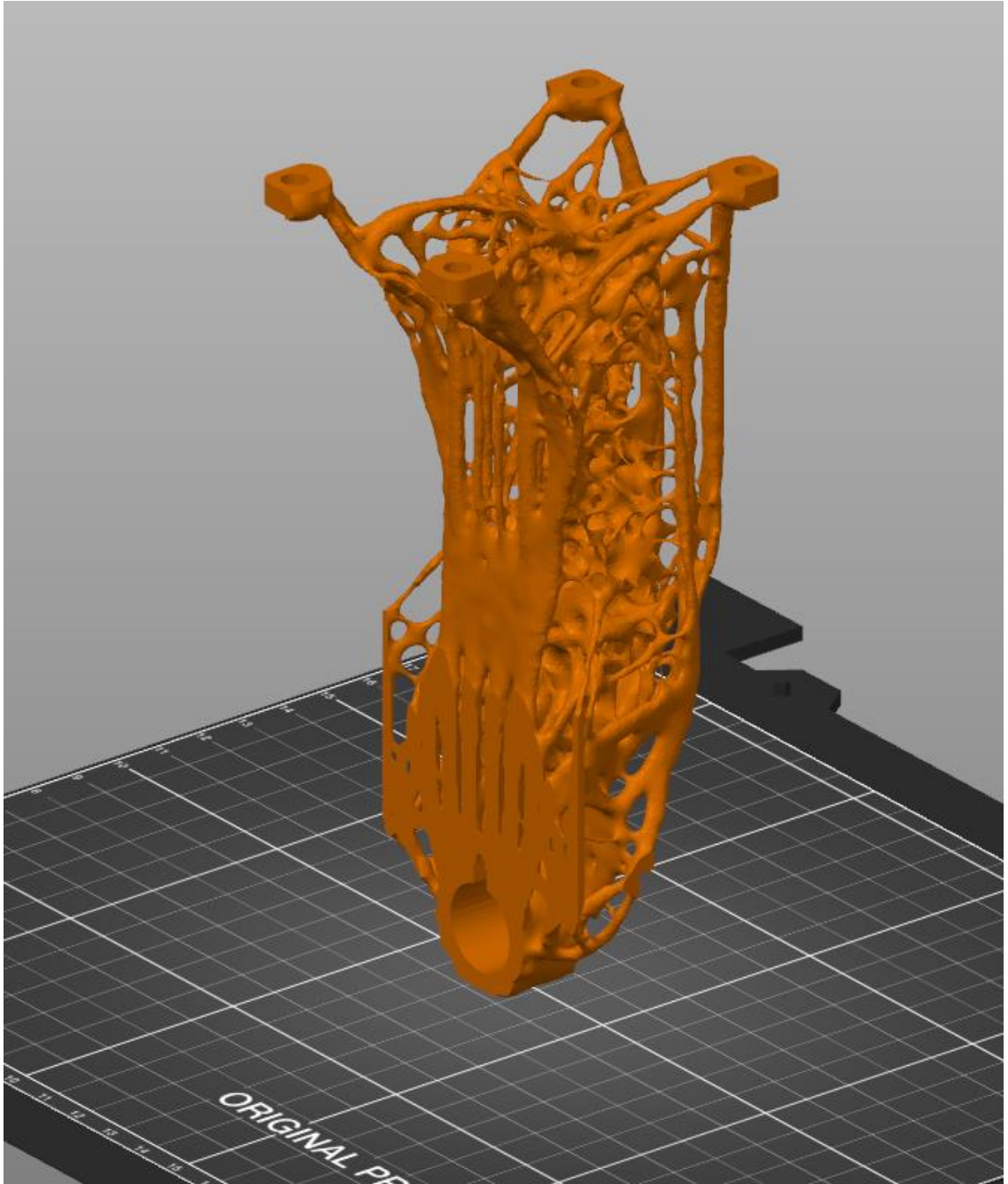


Kuva 19. Ison suunnittelualueen optimointituloksen mukaan siistityn kappaleen siirtymätarkastelu.

Isoon suunnittelualueeseen lisätty Solidworks Simulation-ohjelman Thickness control -rajoite tuotti erittäin monimutkaisen rakenteen, kuten kuvasta 20 voidaan nähdä. Tämäkin optimoinnin tulos on alapäästä hieman raskaampi kuin yläpäästä.

Solidworks Simulation -ohjelma ei saavuttanut tässä kappaleessa 90 %:n massanvähennystavoitetta. Noin 18 tunnin simulaation jälkeen ohjelmisto ei enää vähentänyt massaa, ja massa jäi hieman tavoitteen yläpuolelle noin 85 %:iin.

Rakenne oli niin monimutkainen, ettei sen tarkastelu onnistunut Solidworks-ohjelmassa, vaan se oli avattava PrusaSlicer-ohjelmassa, kuva 20, jossa sen tarkasteleminen oli helpompaa. Tästä syystä kappaletta ei voinut kohtuullisella työllä mallintaa itse uudestaan eikä myöskään rasiustarkastelua pystytty suorittamaan. Monimutkaisuuden ja optimointityökalun hitauden takia osan mallintamisen tarkastelu lopetettiin, sillä tämä optimointitapa ei tuottanut toivottuja tuloksia kohtuullisella vaivalla.



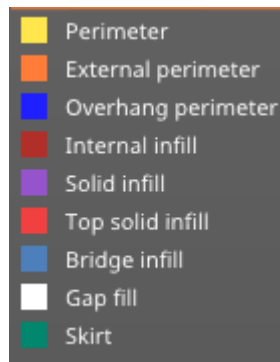
Kuva 20. Ison suunnittelualueen kappaleen optimointituloks *Thickness control* -rajoitteella.

3.5 Osien tulostettavuuden arviointi

Osa viipaloitiin PrusaSlicer -ohjelmassa. Analyysissä käytettiin taulukosta 1 löytyviä arvoja. PrusaSlicer näyttää eri väreillä erilaisen pursotustyyppin, kuvassa 21. Siltojen (Bridge infill) pursottaminen merkataan siniharmaalla värillä ja roikkuvien osien (Overhang Perimeter) pursottaminen tummansinisellä. Kuvaa analysoidaan värien perusteella ja sinisiin osiin tulee kiinnittää huomiota. Oranssi, keltainen ja punainen pursotus ovat järjestyksessä: ulkoseinät (external perimeter), sisäseinät (Perimeter), katto (Top solid infill). Nämä tiedot riittävät tässä tapauksessa arviointiin.

Taulukko 1. *PrusaSlicer-2.3.3. -ohjelman asetukset*

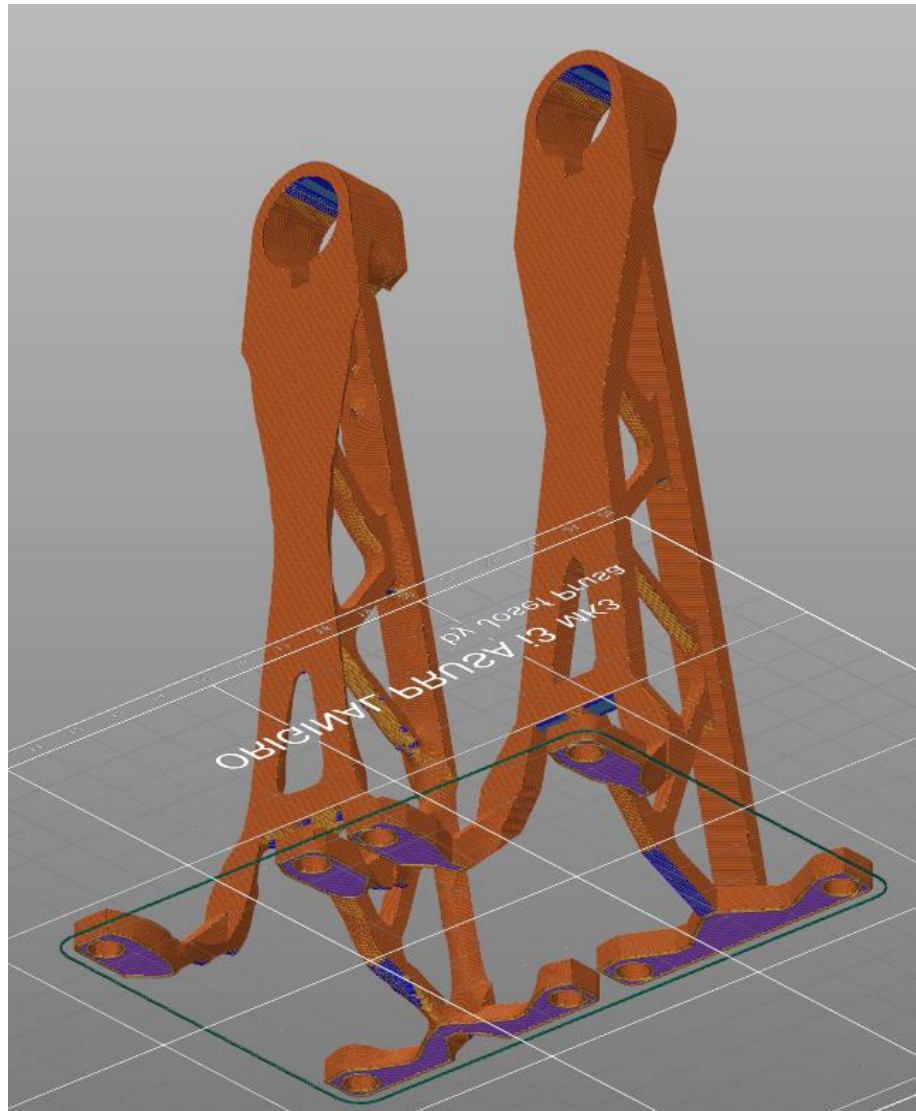
Print settings:	0,2 mm Quality
Filament:	Prusament PETG
Printer:	Original Prusa i3 MK3S & MK3S+
Supports:	None
Infill:	15 %
Nozzle diameter:	0,4 mm
Nozzle temperature:	240/250 °C
Bed temperature:	85/90 °C



Kuva 21. *PrusaSlicer-ohjelman selite.*

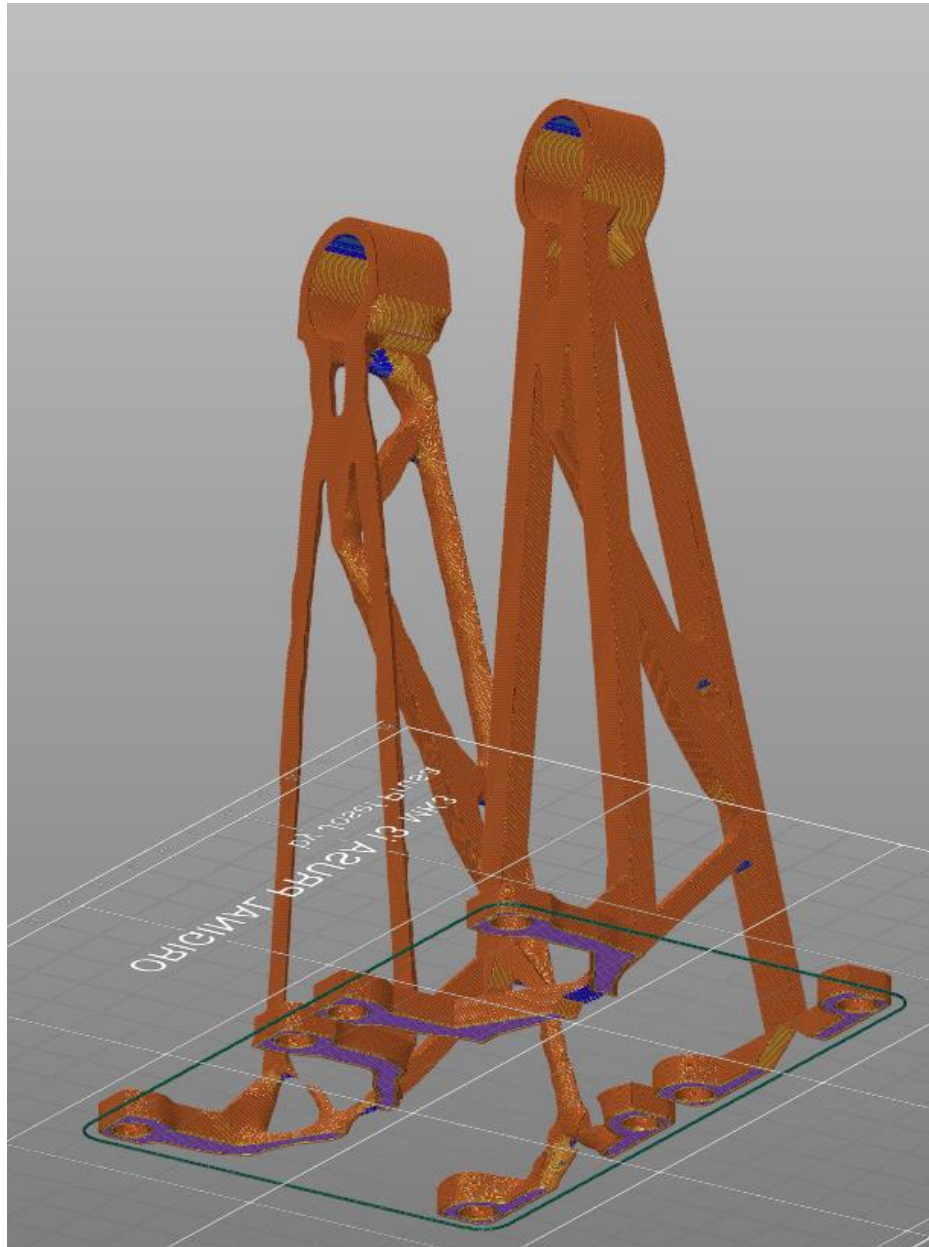
Optimoitu jalka tallennettiin STL-tiedostomuodossa ja avattiin PrusaSlicer -ohjelmassa. Jalka laitettiin yläpäästään tulostusalustalle, jolloin se on ylösalaisin. Näin saatiin tasainen ja suuri pinta ensimmäiselle kerrokselle, joka on tärkeää tulostamisen onnistumisen kannalta. Osa viipaloitiin taulukon 1 arvoilla.

75 %:n optimoinnin tuloksien viipalointikuvista, kuva 22, nähdään, että tulostussuunnan alaosissa oli kummassakin hieman sinisiä alueita, mutta silmämääräisesti riski epäonnistumiselle oli vähäinen. Siistittyä osaa olisi voinut tämän kuvan pohjalta muokata vielä helpommin tulostettavaksi viisteillä.



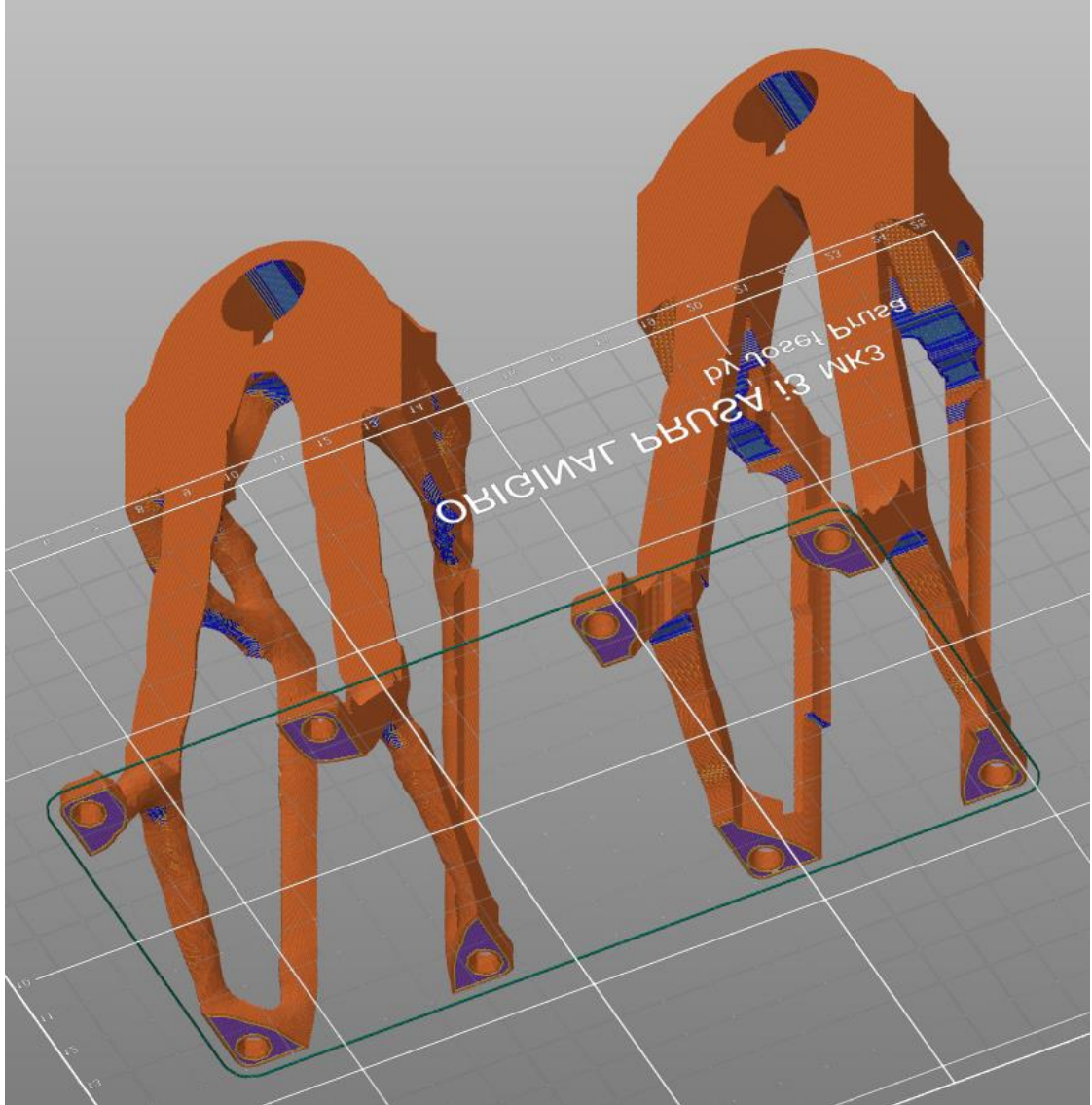
Kuva 22. 75 % kevennyksen tuloksen ja siistityn version viipalointikuva.

90 %:n optimoinnin tuloksista sekä siistitty, että siistimätön versio ovat lähes ongelmattomia tulostaa. Kummassakin on kuvassa 23 pieniä sinisiä alueita, alapäässä, joka voi aiheuttaa pieniä ongelmia. Optimoinnin tuloksessa on ohuet säikeet jalkojen etuosassa, jotka eivät tulostuisi oikein. Nämä kohdat on siistityssä versiossa korjattu ja siistitty osa on helppo tulostaa, vaikka PrusaSlicer näyttääkin pieniä roikkuvia osioita osassa. Nämä roikkuvat osiot kuitenkin ovat niin pieniä, etteivät ne haittaa tulostamista ja toimivat osittain myös siltoina.

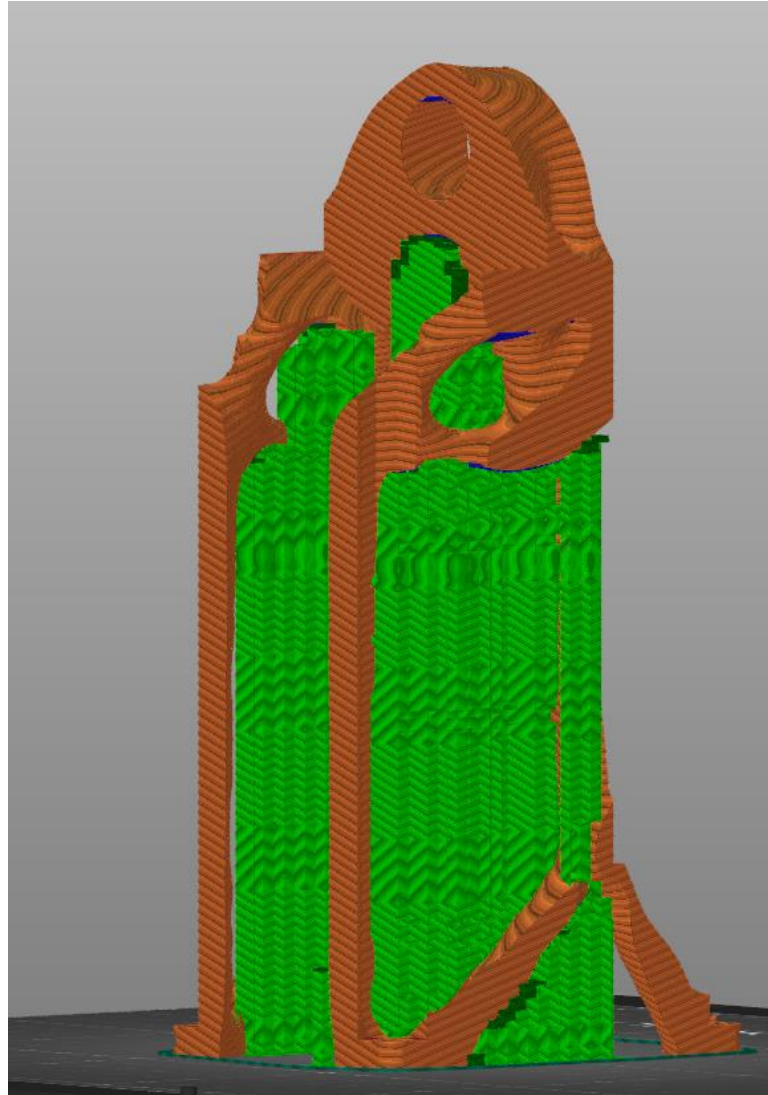


Kuva 23. 90 % kevennyksen tuloksen ja siistityn version viipalointikuva.

Kuvasta 24 nähdään, että suuremmalla suunnittelualueella tehty optimointi tuotti hankalasti tulostettavissa olevan rakenteen. Tämä vaatisi suuren määrän tukea, kuten kuvassa 25 näkyy, tai siistittyä versiota pitäisi muokata huomattavasti, jolloin osan muoto muuttuisi olennaisesti. Tuen lisääminen optimointitulokseen pidensi tulostusaikaa noin 50 % ja materiaalia käytettäisiin noin 75 % enemmän.

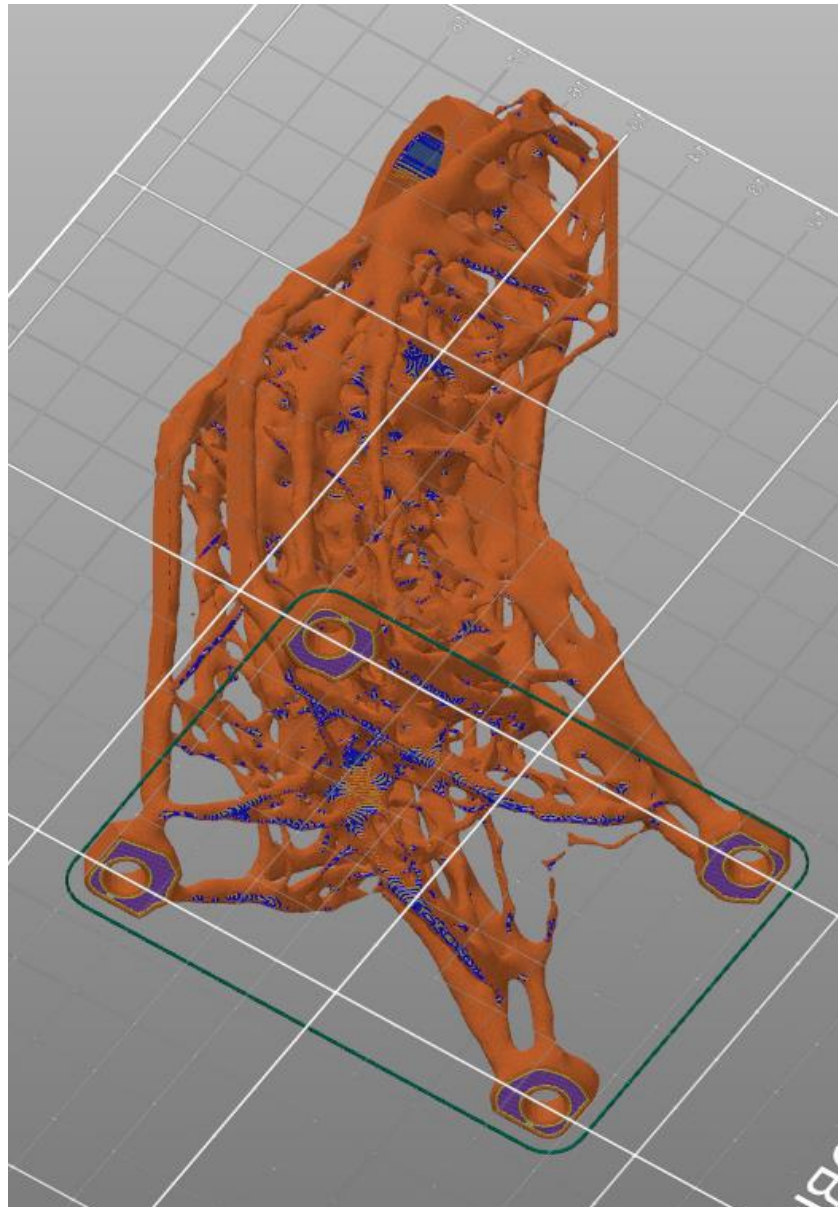


Kuva 24. Ison suunnittelualueen optimoinnin tuloksen ja siistityn version viipalointikuva.



Kuva 25. *Ison suunnittelualueen optimoinnin tulos viipaloituna tukien kanssa PrusaSlicer-ohjelmassa.*

Isolla suunnittelualueella ja Thickness control -rajoituksella optimointi tuotti hankalasti tulostettavan osan, jossa on kuvan 26 mukaan paljon roikkuvia osioita ja ylimääräisiä säikeitä, jotka leijuvat osittain ilmassa. Tämän osan tulostaminen vaatisi suuren määrän tukea, joiden poistaminen olisi hankalaa. Jos tämän osan haluaisi valmistaa, olisi SLA-tekniikalla 3D-tulostaminen huomattavasti parempi vaihtoehto tulostettavuuden helppouden kannalta, sillä SLA tulostin tuottaisi osan pienemmällä määrällä tukea ja osan pinnat ja muoto onnistuisivat paremmin. SLA-tulostimella tulostaminen olisi kuitenkin kalliimpi vaihtoehto, sillä on SLA materiaalien kilohinta on usein korkeampi, kuin käytetyn FFF-tulostimen filamentin.



Kuva 26. Ison suunnittelualueen ja Thickness control -rajoitteen optimoinnin tuloksen viipalointikuva.

3.6 Osien taloudellisuuden vertailu

Osien tulostettavuutta tutkiessa osat viipaloitiin. Tämä tuottaa myös arviot tulostukseen käytettävän materiaalin määrästä, sekä kulutetusta ajasta. Näitä arvioita käytettiin alkuperäisen ja optimoitujen osien vertailussa. Tulokset on esitetty taulukossa 2, josta nähdään, että alkuperäistä osaa keventämällä saavutetaan suurin aika- ja rahastäästö.

Taulukko 2. Osien taloudellisuuden vertailu.

Versio	Tulostusaika	Massa (g)	Hinta (€)
Alkuperäinen	5 h 40 min	58,58	2,13
75 % vähennys	4 h 9 min	21,99	0,80
75 % vähennys,, siistitty	4 h 21 min	24,73	0,90
90 % vähennys	3 h 32 min	15,85	0,58
90 % vähennys siistitty	4 h 23 min	23,09	0,84
Iso suunnittelualue	5 h 55 min	40,11	1,46
Iso suunnittelualue, siistitty	6 h 15 min	47,78	1,74
Iso suunnittelualue, thickness control	12 h 32 min	69,44	2,52

3.7 Parhaan osan valinta

Parhaan taloudellisen hyödyn, joka täytti osalle asetetut vaatimukset, tuotti 90 %:n massanvähennys, josta saatiin siistimällä helposti tulostettava kappale. 75 %:n vähennyksellä saatiin ilman siistimistä osa, joka on kaikkein taloudellisin vaihtoehto, joka ehkä täyttää myös vaatimukset, sillä siistimätön 90 % massavähennyksellä tuotettu osa on silmämääräisesti liian heikko. Optimoituja, mutta siistimättömiä osia ei pystytty tarkistamaan simulaatiolla, sillä Solidworks Simulation -ohjelma ei pysty käsittelemään pintamalleja.

Ison suunnittelualan käyttäminen tuotti alkuperäistä osaa jäykemmän lopputuloksen, mutta sen kaikki versiot olivat hankalat tulostaa ja aikaa kuluu enemmän. Kuitenkin ilman Thickness control -rajoitetta nämäkin kappaleet ovat halvempia alkuperäistä kevyempinä. Nämä osat eivät kuitenkaan olleet kevyempiä, kuin alkuperäistä osaa keventämällä tuotetut. Tämä oli odotettavissa, mutta näiden osien muotokaan ei ollut merkittävästi parempi. Isolla suunnittelualueella olisi pitänyt kokeilla myös suurempaa massan poistoa, jotta massa olisi oikeasti vertailukelpoinen.

Thickness control -rajoite tuotti täysin odottamattoman tuloksen sekä rakenteena, että tulostusajassa ja materiaalin käytössä. Tämä kappale oli lopulta alkuperäistä painavampi ja hitaampi tulostaa.

Vaikka 75 %:n massan vähennystavoitteella optimoitu kappale olikin taloudellisin vaihtoehto, valittiin silti siistitty versio 90 %:n massanvähennyksen tuloksesta, sillä tämän osan kestävyys pystyttiin tarkistamaan ja hintaero 75 %:n vähennystavoitteen osan kanssa on vain 4 senttiä ja tulostusaika 14 minuuttia pidempi.

3.8 Osan tulostaminen ja kestävyys testaus

Osa tulostettiin vertailuun käytetyillä asetuksilla. Osa tulostui hyvin ja siinä oli vain pientä epätasaisuutta, jota kuvasta 27 ei edes erota. PrusaSlicer-ohjelmassa näkyneet sillat ja roikkuvat osiot tulostuivat moitteetta siitä huolimatta, että osa tulostettiin PETG-muovilla. Telineellä tehtiin onnistunut kestävyystesti, jossa kokoonpanoa kuormitettiin yhtä aikaa kahdella filamenttirullalla, joiden yhteispaino oli 1,2 kg. Teline kesti rasituksen ilman huomattavaa taipumista. Kuvassa 27 jalkaan on asennettu akseli ja mutteri.



Kuva 27. Tulostettu teline optimoidulla jalalla.

4. YHTEENVETO

Tavoitteena oli optimoida olemassa oleva telineen jalka eri reunaehdoilla ja tuottaa taloudellisempi, kestävä ja toimiva osa. Osaa optimoitiin Solidworks Simulation -ohjelmassa, ensin osaa keventämällä, sitten näitä kevennettyjä osia siistimällä ja lopuksi luotiin uusi osa suuremmalla suunnittelualueella ja kevennettiin ja siistittiin uudelleen, sekä kokeiltiin rajoittaa rakenteiden paksuutta simuloidessa.

Työssä selvisi, että suunnittelualan suurentaminen vaikeuttaa tulostamista ja tulostusta varten suunniteltua osaa kannattaakin optimoida suoraan keventämällä sitä. Taloudellisesti suurin hyöty saavutettiin alkuperäisestä osasta materiaalia reilusti poistamalla, kun taaskin isommalla suunnittelualueella rakenne oli vahvempi. Toisaalta huomattiin myös, että tavoite massan vähentämiseen pitäisi olla suurempi, kun suunnittelualuekin on suurempi.

Työ rajoittui vain yhteen tulostusmenetelmään yhdellä muovityypillä. Tämän lisäksi tämän osan optimoinnista ei välttämättä saada yleisiä tuloksia. Yksin tämän tutkimuksen perusteella ei voida sanoa, onko valmiin kappaleen optimoiminen yleisesti parempi tapa saavuttaa taloudellista säästöä, kuin suunnittelualan suurentaminen.

Jatkotutkimuksen tästä voisi tehdä vähentämällä enemmän massaa suurella suunnittelualueella ja tutkia, voiko taloudellista hyötyä saavuttaa ja miten rakenne muuttuu tavoitteesta riippuen. Tutkimuksen voisi myös toistaa toisenlaisille kappaleille ja tutkia, onko muunkin tyyppisissä osissa valmiin keventäminen parempi lähestymistapa, kuin suunnittelualan suurentaminen.

LÄHTEET

Meng, L. et al. (2020) From Topology Optimization Design to Additive Manufacturing: Today's Success and Tomorrow's Roadmap. Archives of computational methods in engineering. 27 (3), 805–830.

Mirzendehtel, A. M. & Suresh, K. (2016) Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing. Computer aided design 81, 1–13.

Prusa Polymers PETG Technical data sheet:

https://prusament.com/media/2020/01/PETG_TechSheet_ENG.pdf (viitattu 6.4.2022)

Saadlaoui, Y. et al. (2017) Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes. Journal of manufacturing systems. 43 (1), 178–186.

Sigmund, O. & Maute, K. (2013) Topology optimization approaches: A comparative review. Structural and multidisciplinary optimization. 48 (6), 1031–1055.