



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Markku Penninkangas

VARAOSAN VALMISTAMINEN

3D-TULOSTAMALLA

Case Wickström

Tekniikka
2022

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Markku Penninkangas
Opinnäytetyön nimi	Varaosan valmistaminen 3D-tulostamalla
Vuosi	2022
Kieli	suomi
Sivumäärä	67 + 2 liitettä
Ohjaaja	Juha Hantula ja Pekka Ketola

Vanhojen moottoreiden varaosille on kysyntää, sillä niitä on yhä aktiivi- ja harrastekäytössä. Varaosien heikko saatavuus asettaa haasteita moottoreiden käytölle. Opinnäytetyössä selvitettiin, kuinka suunnitella ja valmistaa varaosia lisäävällä valmistuksella. Aihetta tutkittiin valmistamalla yksi varaosa.

Opinnäytetyössä perehdyttiin lisäävän valmistuksen ja tulostettavan kappaleen suunnitteluun liittyvään teoriaan. Teoriaosuudessa avataan lisäävään valmistukseen liittyvää sanastoa ja käsitteistöä. Tarpeellisia varaosia, osaan kohdistuvia kuormituksia ja tulostukseen liittyviä yksityiskohtia selvitettiin haastatteleamalla asiantuntijoita. Valmistettava varaosa valittiin kysynnän ja optimointimahdollisuuksien perusteella.

Varaosan suunnittelu- ja valmistusprosessin tuloksena valmistetun varaosan lisäksi syntyi tietoa ja havaintoja asioita, joita täytyy ottaa huomioon suunniteltaessa tulostettavaa varaosaa. Opinnäytetyössä havaittiin, että varaosan valmistaminen 3D-tulostamalla on mahdollista. Jotta suunnittelu ja valmistusprosessi olisi tehokas, täytyy suunnittelijan hallita ja ymmärtää valmistusprosessin erityispiirteet.

Avainsanat lisäävä valmistus, 3D-tulostus, digitaaliset varaosat, sylinterinkansi

ABSTRACT

Author	Markku Penninkangas
Title	Manufacturing of a Spare Part with 3D-printing
Year	2022
Language	Finnish
Pages	67 + 2 Appendices
Name of Supervisor	Juha Hantula and Pekka Ketola

There is a demand for spare parts to old combustion engines, as they are still in active and recreational use. The poor availability of spare parts causes challenges to the use of the engines. The objective of the thesis was to research how to design and manufacture spare parts by using additive manufacturing. The subject was researched by manufacturing one spare part.

The theory of additive manufacturing and designing for additive manufacturing is introduced in thesis. The conceptual framework of thesis explains concepts and vocabulary related to additive manufacturing. Necessary spare parts, loads on the part and details related to printing were found out by interviewing specialists. The spare part to be manufactured was selected based on demand and optimization opportunities.

As a result of the designing and manufacturing process of the spare part an information was obtained and observations were formed that must be considered when designing the printable spare part. The main observation of the thesis was that the production of a spare part by 3D printing is possible. To make designing and manufacturing process efficient, the manufacturing technology must be familiar for the designer.

Keywords Additive manufacturing, 3D-printing, digital spare parts and cylinder head

LYHENTEET

MJF	Multi Jet Fusion
SLS	Selective Laser Sintering, valikoiva laser sintraus
DIN	Deutsches Institut für Normung, Saksan standardointi-instituutti
DfAM	Design for Additive Manufacturing, suunnittelu lisäävää valmistusta varten
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
SLM	Selective Laser Melting, valikoiva laser sulatus
HIP	Hot Isostatic Pressure
T6 HT	T6 Heat Treatment
LP	Laser Peening
LSP	Laser Shock Peening
kpm	kilopondimetri
rpm	revolutions per minute, kierrosta minuutissa

ESIPUHE

Tämä opinnäytetyö käsittelee varaosien valmistamista 3D-tulostamalla. Tutkimusta 3D-tulostamisen kyvystä vastata todelliseen varaosien tarpeeseen on vähän. Tämä työ osaltaan lisää tietoa aiheen ympäriltä. Opinnäytetyö tehtiin osana AM-akatemia hanketta.

Haluan erityisesti kiittää Vaasan Veteraaniautoseura ry:tä ja Moottoriharrastajien yhteisöä mahdollisuudesta tutustua työn aihealueeseen ja osien tarkasteltavaksi luovuttamisesta sekä kaikkia työssä auttaneita ja kommentteillaan eteenpäin vieviä henkilöitä. Kiitokset myös toimeksiantajalle 3DStepille innostavan aiheen tarjoamisesta.

Alajärvellä 2.5.2022

Markku Penninkangas

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	11
1.1	3DStep Oy	11
2	TARVE, NYKYTILA JA TAUSTA.....	13
2.1	Wickström Veljesten Moottoritehdas Oy.....	14
3	TEORIATAUSTA	17
3.1	Suunnittelu lisäävää valmistusta varten	17
3.1.1	Osan valinta ja ideointi.....	18
3.1.2	Suunnittelu ja optimointi	18
3.1.3	Tulostettavuuden arviointi.....	21
3.1.4	Jälkikäsittelyn määrittäminen	22
3.2	Metallien lisäävä valmistus	23
3.2.1	Valikoiva lasersulatus	25
4	PROJEKTIN TOTEUTUS	28
4.1	Projektsuunnitelma.....	28
4.2	Osan valinta	29
4.3	Osan muuttaminen digitaaliseen muotoon.....	31
4.3.1	Mittaus	32
4.3.2	3D-skannaus	33
4.3.3	Kuormitusten selvittäminen	35
4.3.4	Materiaalin valinta	37
4.3.5	Topologian optimointi ja osan kehittäminen.....	37
4.3.6	3D-mallintaminen ja FEM-simulointi	45
4.4	Osan valmistaminen.....	55
4.4.1	3D-tulostaminen ja jälkikäsittely.....	56
4.4.2	Koneistus	59

5	PROJEKTIN TUOTOKSET	60
5.1	3D-tulostettu Wickströmin W-typin sylinterinkansi	60
5.2	Tulostettavan varaosan suunnittelu	61
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	63
	LÄHTEET	65
	LIITTEET	68

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Wickström W-1 (edessä) ja W-2 (takana).....	16
Kuva 2. Topologian optimointiprosessi.	20
Kuva 3. Metallimateriaalien yksivaiheisten AM-prosessien toimintaperiaatteita.	24
Kuva 4. Metalli-, keraami- ja komposiittimateriaalien monivaiheisten AM- prosessien toimintaperiaatteita.....	25
Kuva 5. Kuvaus valikoivan lasersulatustekniikan toimintaprosessista.....	27
Kuva 6. Projektin toteutusvaiheen pääkohdat.	29
Kuva 7. Wickström W-tyypin sylinterinkansi petrolipalotilalla.	31
Kuva 8. Käytettyjä mittalaitteita.....	32
Kuva 9. Muovailuvahanegatiivi palotilasta.....	33
Kuva 10. Arctec Eva 3D-skanneri ja sylinterinkansi valmisteltuna skannaukseen.	34
Kuva 11. Skannattu pinta suunnitteluohjelmassa ennen jälkityöstöjä.	34
Kuva 12. Piirteiden sijainnin tarkastelu skannattua pintaa hyödyntäen.....	35
Kuva 13. Topologian optimoinnin versioille yhteiset määritykset.	39
Kuva 14. Jäähdytyskanavilla toteutettu versio.....	41
Kuva 15. Ristikkorakenteella toteutettu versio.....	42
Kuva 16. Kehitysideoiden perusteella muutettu malli.	43
Kuva 17. Topologian optimoinnissa muodostuneet jäykisteet sylinterinkannen sisälle.....	44
Kuva 18. Jännitykset (ylhäällä) ja siirtymät (alhaalla) optimoidussa mallissa.	45
Kuva 19. Mallinnettu sylinterinkansi ulkopuolelta (tulostettava versio).	47
Kuva 20. Pintojen tuentaratkaisut. a) tulpan- ja ryyppykupinreiän tuenta b) keskimmäisten pulttitornien tuenta c) takaseinämän tuenta d) takimmaisten pulttitornien tuenta.	49
Kuva 21. Topologian optimointia mukaillen mallinnetut jäykisteet.	50
Kuva 22. Elementtiverkotus, kuormitukset ja kiinnitys.....	51

Kuva 23. Ensimmäisen FEM-simuloinnin tulokset. Jännitykset (ylhäällä) ja siirtymät (alhaalla).....	52
Kuva 24. Lopulliset jäykisteet.	53
Kuva 25. Siirtymät valmiissa kannessa.	54
Kuva 26. Jännitykset valmiissa kannessa. a) sisäpuolen jännitykset b) jännitykset keskimmäisen pulttitornin alueella c) suurin jännitys d) jännitykset pinnapultin reiän alueella.....	55
Kuva 27. Muovista tulostettu testiversio. Mittojen tarkastamista kannentiivisteiden avulla.	57
Kuva 28. Tulostettu sylinterinkansi ennen tukirakenteiden poistoa.....	58
Kuva 29. Tulostetun sylinterinkannen alapuoli.	60
Kuva 30. Tulostetun sylinterinkannen yläpuoli.	61
Kuva 31. Sylinterinkannen koneistuspiirustus.....	68
Kuva 32. Jatkoholkkien koneistuspiirustus.....	69

LIITELUETTELO

LIITE 1. Sylinterinkannen koneistuspiirustus

LIITE 2. Jatkoholkkien koneistuspiirustus

1 JOHDANTO

Vaasan seudulla moottorit ja erityisesti veneenmoottorit ovat tunnettuja. Tähän on varmasti vaikuttanut meren läheisyys ja pitkä moottorinvalmistusperinne. 1900-luvulla Vaasan kaupungissa toimi useita moottorinvalmistukseen keskittyneitä yrityksiä, joiden päätuotteena olivat veneen keskimoottorit. Näistä merkittävimpänä esitellään Wickström Veljesten Moottoritehdas Oy:tä.

Vanhoja keskimoottoreita on yhä käytössä veneilijöillä ja moottoriharrastajilla. Moottorinvalmistajien lopetettua varaosia ei enää juurikaan ole saatavilla ja osan rikkoutuessa moottori saattaa jäädä käyttämättömäksi. Rikkoutuneiden tai kuluneiden osien tilalle pyritään löytämään ylimääräiseksi jääneitä osia muilta harrastajilta tai niitä yritetään korjata itse. Haasteena on, että tarjolla olevat käyttökelpoiset osat vähenevät koko ajan eikä niitä pysty loputtomiin korjaamaan.

Tässä opinnäytetyössä on tavoitteena selvittää kuinka tunnistaa ja suunnitella metallista 3D-tulostettavia varaosia moottoreihin, joihin niitä ei enää ole saatavilla. Prosessin vaiheita selvitetään valmistamalla yksi varaosa veneen keskimoottoriin. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii 3DStep Oy.

1.1 3DStep Oy

3DStep Oy on vuonna 2016 perustettu yritys, jonka kotipaikka on Ylöjärvi. Yritystyöllistää 7 henkilöä ja sen tuotantotilat sijaitsevat Ylöjärvellä. 3DStep palvelee suomalaista ja eurooppalaista teollisuutta 3D-tulostuksen palveluilla, niin tuotannon, koulutuksen kuin suunnittelunkin osalta. Yrityksen vahvuuksia ovat sarjavalmistus, toimitusvarmuus ja innovointi.

Tuotannossa 3DStepillä on käytössä laitteet muovin ja metallin 3D-tulostamiseen. Muovien tulostamisessa käytetään pääasiassa HP:n ja SLM:n teknologioita. Tulostettavia muovilaatuja on useita, aina joustavista ja kulumusta kestävästä materiaaleista vääntöjäykkiin ja lämmönkestäviin. MJF- ja SLS-jauhepetitulostetuille muo-

viosille on tarjolla laaja valikoima jälkikäsittelyitä. Jälkikäsittelyillä voidaan esimerkiksi parantaa osien pinnanlaatua ja tiiveyttä tai ne voidaan pinnoittaa likaa, kosteutta ja UV-säteilyä vastaan.

Metallien tulostamisessa yritys käyttää SLM Solutions:in teknologiaa. Tulostettavia metalleja on useita eri laatuja alumiinista titaaniin. Laaja materiaalivalikoima mahdollistaa osien valmistamisen vaativiinkin olosuhteisiin. Osilta voidaan vaatia niin hyviä mekaanisia ominaisuuksia ja keveyttä kuin sitkeyttä ja lämmönkestoa. Tulostetuille metalliosille on saatavilla erilaisia lämpökäsittelyjä mekaanisten ominaisuuksien parantamiseksi. Myös koneistukset ja muut asiakkaan vaatimat jälkikäsittelyt kuuluvat palveluihin.

3DStep tarjoaa myös koulutus- ja asiantuntijapalveluita liittyen 3D-tulostukseen. Yrityksen asiantuntijat ovat käytettävissä asiantuntijapuheenvuoroihin ja tapahtumiin. He ovat usein puhujina seminaareissa, tapahtumissa ja koulutuksissa. Vahvan verkoston ja kokemuksen kautta yritys pystyy tarvittaessa luomaan kokonaisen konferenssin 3D-tulostuksen ympärille. 3DStep tekee myös yhteistyötä korkeakoulujen ja kansainvälisten kehityshankkeiden kanssa, joissa tutkitaan 3D-tulostuksen uusia mahdollisuuksia. Yrityksessä otetaan avoimesti vastaan erilaiset ideat ja hankkeet lisäävän valmistuksen saralta.¹

¹ 3DStep Oy:n kotisivut.

2 TARVE, NYKYTILA JA TAUSTA

Opinnäytetyötä tehdessä kävi selväksi, että tietyille vanhojen keskimoottorien osille on selkeästi tarvetta. Tiedusteltaessa osien tarvetta harrastajilta esille nousivat erityisesti pakosarjat ja sylinterinkannet. Molempien osien tarve johtuu korroosiosta, joka syö ne käyttökelvottomiksi.

Kyseiset osat on valmistettu valuraudasta, eivätkä siis passivoidu korroosiota vastaan. Korroosiota edesauttaa moottoreiden jäähdytyksessä käytetty vesi, joka otetaan veneen ulkopuolelta raakavetenä. Jäähdytysvesi kiertää moottorinlohkossa, sylinterinkannessa sekä pakosarjassa, ja varsinkin merivesi aiheuttaa korroosiota veden sisältämien suolojen takia. Myös osien korkea lämpötila ja jäähdytysveden virtaus aiheuttavat korroosiota.²

Kaasuttimen kohoille ja joillekin magneeton osille alkaa myös olemaan tarvetta. Kohojen tapauksessa harrastajat ovat ottaneet nykyteknologiaa käyttöön ja alkaneet valmistamaan niitä muovista 3D-tulostamalla. Alkuperäiset kohot on valmistettu korkista ja niiden pinta on lakattu sellakalla, joka ei kestä nykyisten polttoainesten sisältämää etanolia. Korkkikohoilla on myös taipumus kutistua, muuttaa muotoaan ja kuivua ajan saatossa.³ Puhki syöpyneitä pakosarjoja on pyritty myös korjaamaan, mutta perinteisemmin menetelmin, eli hitsaamalla lisää rautaa syöpyneisiin kohtiin. Tällä tyylillä osaa pystyy vielä käyttämään kenties muutamia vuosia, mutta jossain vaiheessa alkuperäinen rakenne syöpyy niin pahoin, että korjaaminen käy haastavaksi.

² Laitinen, K. Korroosio artikkeli. s. 2.

³ Keränen, T. Moottoriharrastaja. Haastattelu.

2.1 Wickström Veljesten Moottoritehdas Oy

Wickström Veljesten Moottoritehdas Oy oli yksi monista Vaasassa toimineista moottoritehtaista. Yritys valmisti moottoreita moneen tarkoitukseen, niin vene-, maatalous- kuin teollisuusmoottoreiksi sekä esimerkiksi sähkölaitosten voimantähteiksi⁴.

Moottoritehtaan Vaasaan perustivat vuonna 1906 veljekset John ja Jacob Wickström. Tehdas aloitti toimintansa vaatimattomassa hirsirakennuksessa Onkilahden rannalla. Myöhemmin yrityksen tehdasrakennukset valimoineen ja kaikkine muine toimintoineen sijaitsivat Vaskiluodossa. Wickström Veljesten Moottoritehdas oli merkittävä moottorinvalmistaja. Vuonna 1914 Suomessa valmistettiin 579 moottoria, joista 252 kappaletta oli Wickströmin valmistamia. Suurimpaan vuotuisen tuotantomäärään yritys ylsi vuonna 1938, jolloin moottoreita valmistettiin 1 152. Samana vuonna tehtaassa työskenteli 142 työntekijää tuotannossa ja 14 työnjohdossa. Wickströmin Moottoritehdas valmisti runsaat 28 000 moottoria ennen toiminnan loppumista vuonna 1977 ollen suurin moottorinvalmistaja Vaasassa. Rauno Grönbacka arvioi kirjassaan, että Vaasan moottoritehtailla olisi valmistettu yhteensä noin 55 000–60 000 moottoria.⁵

Wickström Veljesten Moottoritehdas aloitti tuotantonsa monimutkaisen kaksoismäntämoottorin valmistuksella. Kaksitahtiperiaatteella toimivassa moottorissa oli samassa sylinterissä kaksi mäntää, jotka liikkuvat vaiheittain eri suuntiin. Kam-

⁴ WICKSTRÖM VELJESTEN moottoritehdas. Suomen moottorilehti. 1933. s. 43.

⁵ Grönbacka, R. MARAKATTEJA JA KISSANPÄITÄ – vaasalaisten moottoritehtaiden tarina s. 46, 57, 63, 74, 151.

piakseli sijaitti sylinterin sivussa ja sytytys oli toteutettu sytytysputkella, joka ennen käynnistystä kuumennettiin ja pidettiin lämpimänä moottorin käynnin ajan. Nämä moottorit eivät olleet kovin käyntivarmoja.⁶

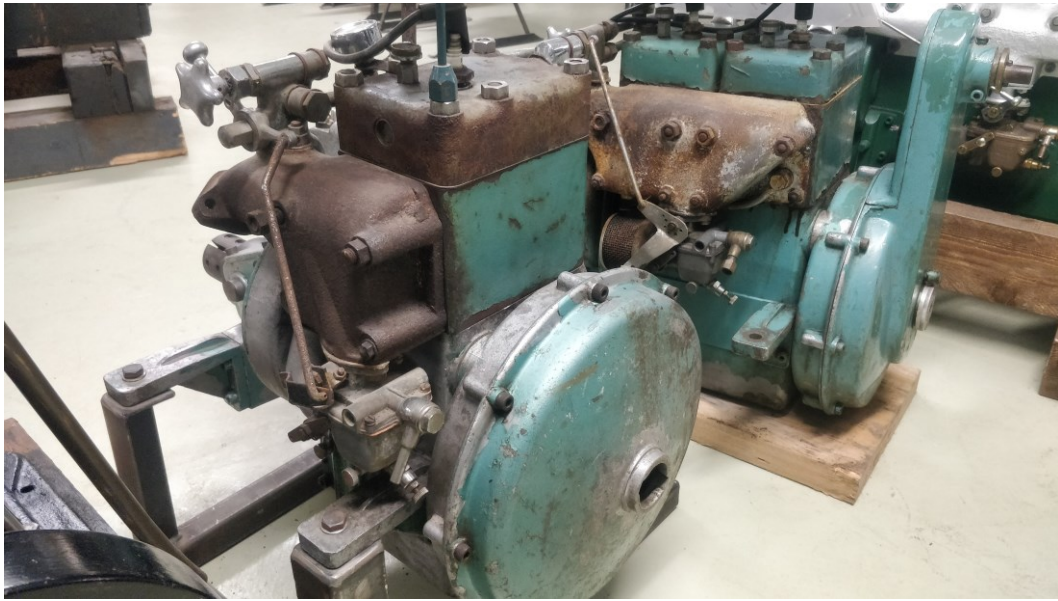
Tässä kappaleessa esitellään Wickströmin W-moottorisarjaa, johon opinnäyte-työssä suunniteltiin varaosa. W-sarja käsitti kolme mallia: yksisylinterisen W-1:n, joka esiteltiin 1958, kaksisylinterisen W-2:n, joka esiteltiin vuotta myöhemmin sekä kolmisylinterisen vuonna 1963 suunnitellun W-3:n⁷. Moottorit olivat nelitah-tisia sivuventtiilimoottoreita ja ne tuottivat tehoa seuraavasti: W-1 5 hp (DIN), W-2 11 hp ja W-3 17 hp, bensiinikannella tehoa voitiin lisätä noin 15 %⁸. W-sarjan moottoreita käytettiin bensiinillä ja petrolilla. Arvokasta bensiiniä käytettiin vain moottorin käynnistämisen ja lämpenemisen ajan ja tämän jälkeen vaihdettiin edullisemmalle petrolille. Moottori vaihdettiin käymään bensiinillä myös ennen sen sammuttamista, jotta käynnistäminen olisi helpompaa. W-sarjan mootto-reissa käytettiin samaa sylinteriä ja kytkinlaitetta valmistuskustannusten pienentämiseksi⁹. Kaikissa moottoreissa käytettiin myös samaa sylinterinkantta. Lisäteho moottoreihin saavutettiin sylintereiden lukumäärää lisäämällä, eli moottorit olivat modulaarisia. Kuvassa 1 Vaasan auto- ja moottorimuseossa esillä olevat Wickströ-min W-1 ja W-2 tyyppin moottorit.

⁶ Grönbacka, R. MARAKATTEJA JA KISSANPÄITÄ – vaasalaisten moottoritehtaiden tarina s. 43–44.

⁷ Wickström W-moottorit. Esite. Vaasan auto- ja moottorimuseo.

⁸ WICKSTRÖM Ohjekirja. s. 2.

⁹ Grönbacka, R. MARAKATTEJA JA KISSANPÄITÄ – vaasalaisten moottoritehtaiden tarina s. 66–67.



Kuva 1. Wickström W-1 (edessä) ja W-2 (takana).

3 TEORIATAUSTA

3.1 Suunnittelu lisäävää valmistusta varten

Lisäävä valmistus tai materiaalia lisäävä valmistus (myös Additive Manufacturing, AM) poikkeaa merkittävästi perinteisistä valmistusmenetelmistä. Valmistusprosessin erilaisuuden vuoksi tulostettavan tuotteen suunnitteluvaiheessa täytyy kiinnittää huomiota moniin asioihin. Perinteiset suunnittelumenetelmät, ohjelmistot ja työkalut eivät yleensä ole täysin kykeneviä tukemaan suunnitteluprosessia, joka ottaisi kaiken irti lisäävän valmistuksen eduista¹⁰. Tässä luvussa esitellään keskeisiä asioita, jotka liittyvät suunnitteluun lisäävää valmistusta varten.

Suunnittelusta lisäävää valmistusta varten käytetään yleisesti sen englanninkielistä nimitystä Design for Additive Manufacturing. DfAM on suunnittelutyö, joka koostuu menetelmistä ja tiedosta, jolla pyritään täysimääräisesti hyödyntämään lisäävän valmistuksen suomia etuja¹¹. DfAM:ssä tuotteen elinkaaren kannalta tärkeitä näkökohtia kuten toiminnallista suorituskykyä, valmistettavuutta, luotettavuutta ja kustannuksia optimoidaan lisäävän valmistuksen teknologian mukaan¹².

Suunnittelijan näkökulmasta DfAM voidaan jakaa neljään ryhmään: osan valinta ja ideointi, suunnittelu ja optimointi, tulostettavuuden arviointi sekä jälkikäsittelymäärittäminen¹³. Seuraavissa luvuissa paneudutaan näihin osa-alueisiin syvemmin.

¹⁰ Simpson, Trade-offs with AM, s. 66.

¹¹ Wiberg ym., An optimisation framework for designs for additive manufacturing combining design, manufacturing and post-processing. s. 90.

¹² Yunlong ym., A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance. s. 570.

¹³ Wiberg ym., An optimisation framework for designs for additive manufacturing combining design, manufacturing and post-processing. s. 91.

3.1.1 Osan valinta ja ideointi

Lopputuotteiden näkökulmasta lisäävä valmistus tarjoaa neljä etua ideoinnin ja osan valinnan tueksi verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Ensimmäinen näistä on kokoonpanon erillisten osien yhdistäminen yhdeksi osaksi. Yhdistämällä osia voidaan pienentää suunnittelu- ja valmistusvirheiden riskiä, vähentää valmistettavien osien määrää ja nopeuttaa kokoonpanoa. Toinen etu on lisäävän valmistuksen suoma mahdollisuus osien yksilöinnille. Koska lisäävä valmistus ei vaadi kiinnittimiä ja työkaluja, kuten perinteinen valmistus, voidaan osien yksilöinti tehdä kustannustehokkaasti ja siten saavuttaa kilpailuetua. Kolmas etu on mahdollisuus valmistaa kevytrakenteisia osia. Tavoiteltaessa kevyttä rakennetta saattaa osan geometriasta tulla monimutkainen. Tämä tuo esiin yhden merkittävän eron lisäävän valmistuksen ja perinteisen valmistuksen välillä, sillä yleensä monimutkaisuus lisää kustannuksia jälkimmäisessä tapauksessa, jossa valmistus tapahtuu materiaalia poistamalla. Lisäävän valmistuksen kohdalla kappale rakentuu materiaalia lisäämällä. Materiaalin kulutuksen ja valmistusajan pienentämiseksi kappaleeseen tulee lisätä materiaalia vain sinne missä sitä tarvitaan. Vallitsevat kuormitukset tulee olla hyvin tiedossa, jotta osan rakennetta voidaan keventää turvallisesti. Neljäntenä etuna on mahdollisuus valmistaa monimutkaisia kappaleita, jotka sisältävät esimerkiksi sisäisiä kanavia ja integroituja toimintoja.¹⁴

3.1.2 Suunnittelu ja optimointi

Suunniteltaessa kappaletta, joka valmistetaan lisäävällä valmistuksella, pyritään materiaalin käyttö minimoimaan. Topologian optimointi on eräs merkittävimmistä optimointimenetelmistä, jota hyödynnetään tulostettavien kappaleiden suunnittelussa. Topologian optimointi perustuu matemaattisiin algoritmeihin, joiden

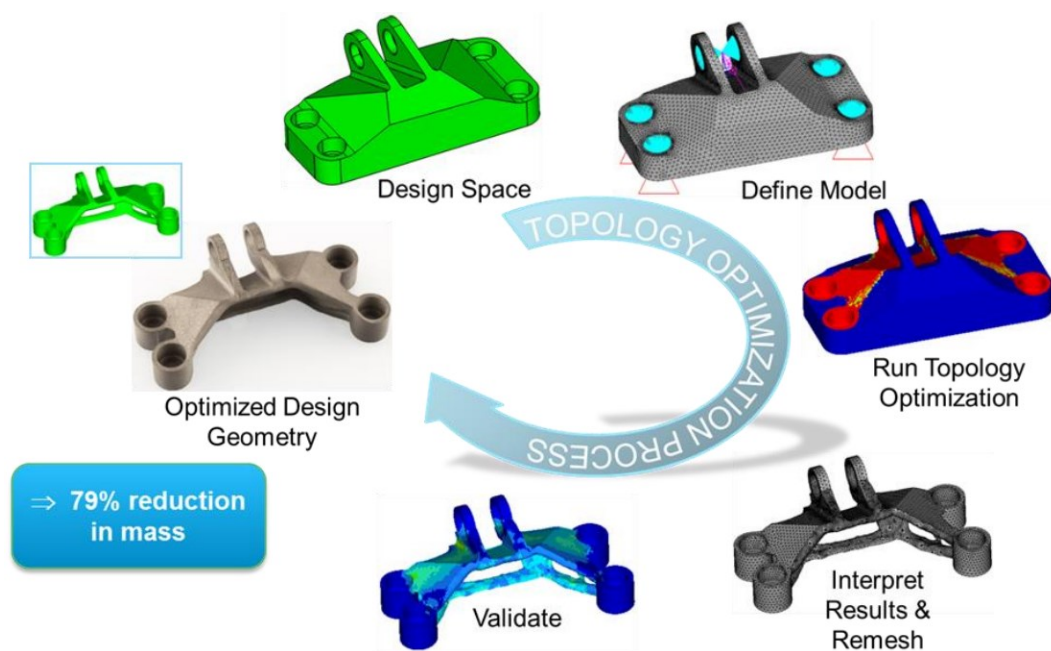
¹⁴ Klahn ym., Design for additive manufacturing - Supporting the substitution of components in series products. s. 139.

avulla elementtiverkon tiheyttä säädellään suunnittelutilassa, tavoitteena kappaleen optimaalinen geometria ja maksimaalinen suorituskyky. Materiaalin sijoittuminen suunnittelutilaan määrittyy ennalta annettujen reunaehtojen mukaan. Näitä reunaehtoja ovat vaikuttavat kuormitustapaukset, kappaleen kiinnittyminen sekä suunnittelutilaa ja optimoitua muotoa koskevat rajoitteet. Topologian optimointi käyttää yleisesti hyväkseen elementtimenetelmää, jonka avulla se arvioi rakenteeseen kohdistuvia jännityksiä annettujen materiaaliominaisuuksien perusteella. FEM menetelmä sopii erityisen hyvin lisäävän valmistuksen tarpeisiin, koska sillä pystytään pienentämään tulostettavaa tilavuutta.^{15,16,17} Topologian optimointiprosessin eteneminen on esitetty kuvassa 2.

¹⁵ Wiberg ym., An optimisation framework for designs for additive manufacturing combining design, manufacturing and post-processing. s. 92.

¹⁶ Christensen ym., An Introduction to Structural Optimization. s. 179—199.

¹⁷ Topology Optimization for Designers Help. Käyttöopas. Siemens NX12



Kuva 2. Topologian optimointiprosessi¹⁸.

Merkittävässä roolissa tulostettavan kappaleen suunnitteluvaiheessa on myös tukirakenteiden välttäminen. Tarve tukirakenteelle johtuu siitä, että lisäävä valmistus nimensä mukaisesti lisää materiaalia kerroksittain muodostaakseen CAD-mallissa annetun geometrian. Mikäli tulostettavassa kerroksessa on kohta, joka on liian sivussa edellisestä kerroksesta eikä sen alla ole materiaalia, täytyy siihen useimmissa tulostusmenetelmissä tehdä tukirakenne. Erityisesti sarjavalmisteen tuotteen kohdalla tukirakenteita kannattaa välttää, sillä ne lisäävät materiaalin ja energian kulutusta sekä jälkityöstön määrää, mikä kasvattaa lopputuotteen hintaa.¹⁹ Tukirakenteita voidaan ehkäistä ottamalla ne huomioon kappaleen geometrian ja tulostussuunnan suunnittelussa. Esimerkiksi tulostettavat kanavat kannat-

¹⁸ Komi, E. Design for Additive Manufacturing. s. 9.

¹⁹ Jian ym., Support structures for additive manufacturing: A review. s. 2.

taa suunnitella itseään tukeviksi esimerkiksi pisanan tai ovaalin muotoisiksi. Suunnittelijan tulee olla tietoinen edellä kuvatun kaltaisista lisäävän valmistuksen rajoitteista ja eduista, jotta sen suomia mahdollisuuksia pystytään hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti.²⁰

3.1.3 Tulostettavuuden arviointi

Tulostuksen onnistumista voidaan arvioida ennalta geometristen suunnittelusääntöjen ja tietokonesimulaatioiden avulla²¹.

Geometriset suunnittelusäännöt antavat yleisesti ohjeita vain tiettyyn lisäävän valmistuksen teknologiaan²². Tästä esimerkkinä VTT:n julkaisema Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process-suunnitteluopas, jossa annetaan ohjeita SLM-teknologialla tulostettavien kappaleiden suunnitteluun. Oppaassa annetaan ohjeita esimerkiksi ulokkeiden maksimikulmille ja reikien muodoille, niin että tukirakennetta ei synny sekä esitetään esimerkiksi tulostuskulman vaikutuksia pinnanlaatuun.

Kehitettyjen simulaatiomenetelmien avulla voidaan ennustaa esimerkiksi kappaleen kutistumista, jäännösjännityksiä ja lämmönjakautumista²³. 3D-mallinnusohjelmissa voi myös olla valmiina työkaluja, joilla analysoida tulostettavaa kappaletta. Tästä esimerkkinä Siemens NX12-suunnitteluohjelman DfAM-lisäosa, jossa on työkalut seinämävahvuuksien, tulostuskulmien analysointiin. Miinuspuolena on, että ohjelmat, joilla voidaan tehdä simulaatioita, vaativat usein kalliin lisenssin²⁴.

²⁰ Kokkonen ym., Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process. s. 5, 28.

²¹ Wiberg ym., An optimisation framework for designs for additive manufacturing combining design, manufacturing and post-processing. s. 92.

²² Adam ym., On design for additive manufacturing: Evaluating geometrical limitations s. 662.

²³ Bikas ym., Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. s. 398.

²⁴ Wiberg ym., An optimisation framework for designs for additive manufacturing combining design, manufacturing and post-processing. s. 92.

3.1.4 Jälkikäsittelyn määrittäminen

Valtaosa 3D-tulostetuista kappaleista vaatii jälkikäsittelyä riippumatta tulostusmenetelmästä. Ilmeisimpiä näistä ovat ylimääräisen tulostuspulverin poistaminen, kappaleen irrottaminen tulostusalustasta ja tukirakenteiden poistaminen²⁵. Mikäli kappaleen mittatarkkuudelle, geometrialle, pinnanlaadulle, materiaali- tai lujuusominaisuuksille on erityisvaatimuksia, niin muitakin jälkikäsittelyjä tarvitaan.

Mittatarkkuutta, geometriaa ja pinnanlaatua voidaan parantaa tavanomaisilla työstömenetelmillä, kuten koneistamalla ja hiomalla. Kyseiset menetelmät ovat yleisesti käytössä teollisuudessa ja ovat siksi hyvin tunnettuja ja saatavilla.²⁶

Pinnanlaadun parantamiseen on myös muita vähemmän tunnettuja menetelmiä, kuten laserkiillotus. Laserkiillotuksessa kappaleen pintaan kohdistetaan lasersäde, joka sulattaa pinnassa olevat materiaalihaijut. Sula materiaali tasoittuu matalampiin kohtiin painovoiman ja pintajännityksen ansiosta. Kun lasersäde lakkaa skannaamasta pintaa, sula jähmettyy ja pinnanlaatu paranee.²⁷

Materiaali- ja lujuusominaisuuksien parantamiseen käytetään yleisesti erilaisia lämpökäsittelyjä. Lämpökäsittelyillä pystytään vähentämään halkeilua, pienentämään jäännösjännityksiä ja homogenoimaan mikrorakennetta. Käytettäviä menetelmiä ovat esimerkiksi liuoshehkutus, HIP ja T6 HT. HIP on laajasti käytetty lämpömekaaninen käsittelymenetelmä, joka yhdistää korkean paineen ja lämpötilan. Käsiteltävä kappale asetetaan suljettuun tilaan, jonka lämpötila on yleensä 1000–2000 °C prosessin aikana. Tilaan johdetaan myös inerttiä kaasua, jonka paine voi saavuttaa jopa 200 MPa. Kappaleeseen kohdistuva lämpötila ja paine parantavat

²⁵ Wiberg ym., An optimisation framework for designs for additive manufacturing combining design, manufacturing and post-processing. s. 92.

²⁶ Peng ym., A Review of Post-Processing Technologies in Additive Manufacturing. s. 16.

²⁷ Peng ym., A Review of Post-Processing Technologies in Additive Manufacturing. s. 12.

sen tiheyttä ja yhtenäistävät kiderakennetta. Tutkimuksissa on myös havaittu, että käsittely parantaa merkittävästi kappaleen väsymislujuutta.²⁸

Väsymislujuutta voidaan parantaa myös paikallisesti LP-menetelmällä, joka tunnetaan myös nimellä LSP. LP:ssä voimakas pulssitettu lasersäde kohdistetaan työkalupaleen metallipintaan, jonka yli virtaa vesi. Veden ja metallipinnan väliin syntyy plasmaa, joka tuottaa painesykäyksiä kappaleeseen ja saa aikaan paikallisia plastisia muodonmuutoksia ja täten haluttuja puristavia jäännösjännityksiä.²⁹

3.2 Metallien lisäävä valmistus

Lisäävä valmistus on yleisnimitys teknologioille, jotka liittävät materiaalia yhteen kerroksittain luoden fyysisen objektin 3D-mallitiedon perusteella³⁰. Lisäävällä valmistuksella pystytään valmistamaan kappaleita monista eri materiaaleista, kuten muoveista, keraameista, komposiiteista ja metalleista. Tässä luvussa paneudutaan metallien lisäävään valmistukseen tutustumalla yhteen yleisesti käytössä olevaan teknologiaan.

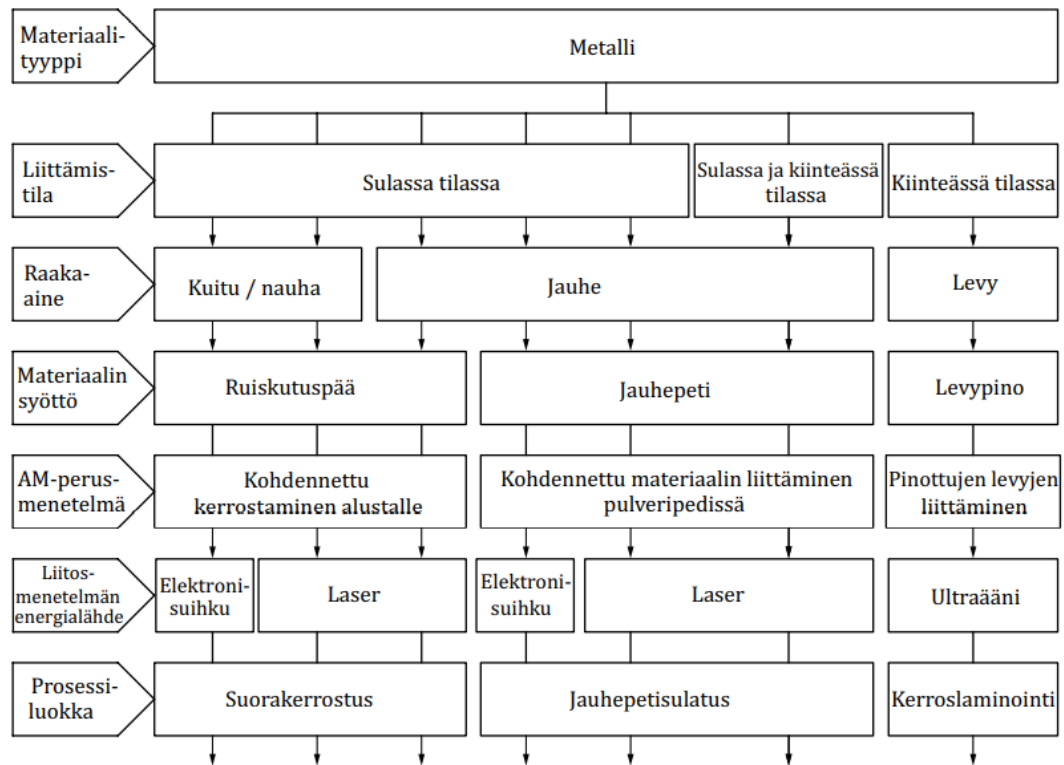
Metallien lisäävä valmistus käsittää monia erilaisia teknologioita. Nämä teknologiat voidaan jakaa kahteen kategoriaan: yksivaiheiset AM-prosessit (Kuva 3) sekä monivaiheiset AM-prosessit (Kuva 4). Yksivaiheisessa AM-prosessissa kappale saavuttaa geometrisen muotonsa ja toivotut materiaaliominaisuudet yhdessä proses-

²⁸ Peng ym., A Review of Post-Processing Technologies in Additive Manufacturing. s. 2.

²⁹ Peng ym., A Review of Post-Processing Technologies in Additive Manufacturing. s. 7.

³⁰ SFS-EN ISO/ASTM 52900. Additive manufacturing. General principles. Fundamentals and vocabulary. s. v.

sivaiheessa. Monivaiheisessa AM-prosessissa on kaksi tai useampia vaiheita. Kapale voi esimerkiksi saada geometrisen muotonsa ensimmäisessä prosessivaiheessa ja materiaaliominaisuutensa toisessa prosessivaiheessa.^{31,32}

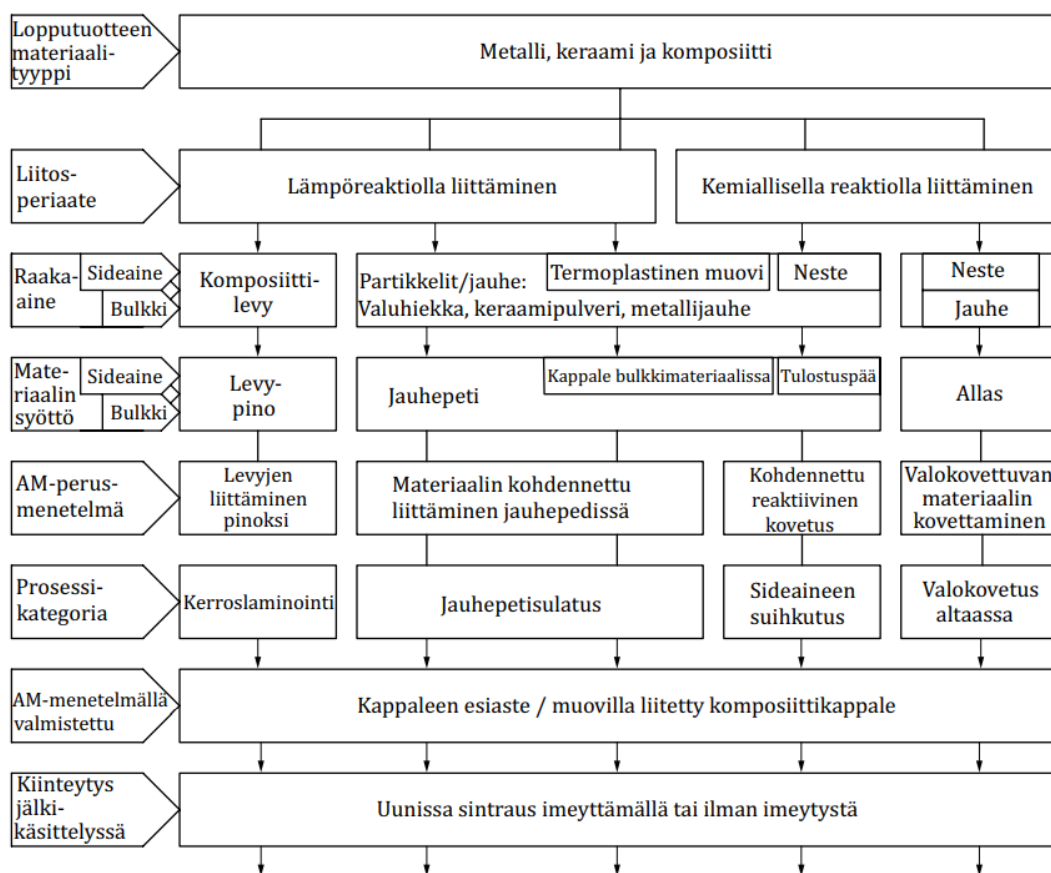


Kuva 3. Metallimateriaalien yksivaiheisten AM-prosessien toimintaperiaatteita³³.

³¹ Farooq ym. An In-Depth Review on Direct Additive Manufacturing of Metals. s. 2.

³² SFS-EN ISO/ASTM 52900. Additive manufacturing. General principles. Fundamentals and vocabulary. s. 21.

³³ SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. s. 18.



Kuva 4. Metallin-, keraamin- ja komposiittimateriaalien monivaiheisten AM-prosessien toimintaperiaatteita³⁴.

3.2.1 Valikoiva lasersulatus

Valikoiva lasersulatus on yksi teollisuuden johtavista lisäävän valmistuksen teknologioista metalleille. Menetelmä on tarkka ja nopea ja sillä pystytään saavuttamaan lähes sadan prosentin tiheys tulostetussa materiaalissa.³⁵ Valikoiva lasersulatus on yksivaiheinen AM-prosessi ja lukeutuu jauhepetisulatustekniikoiden joukkoon.

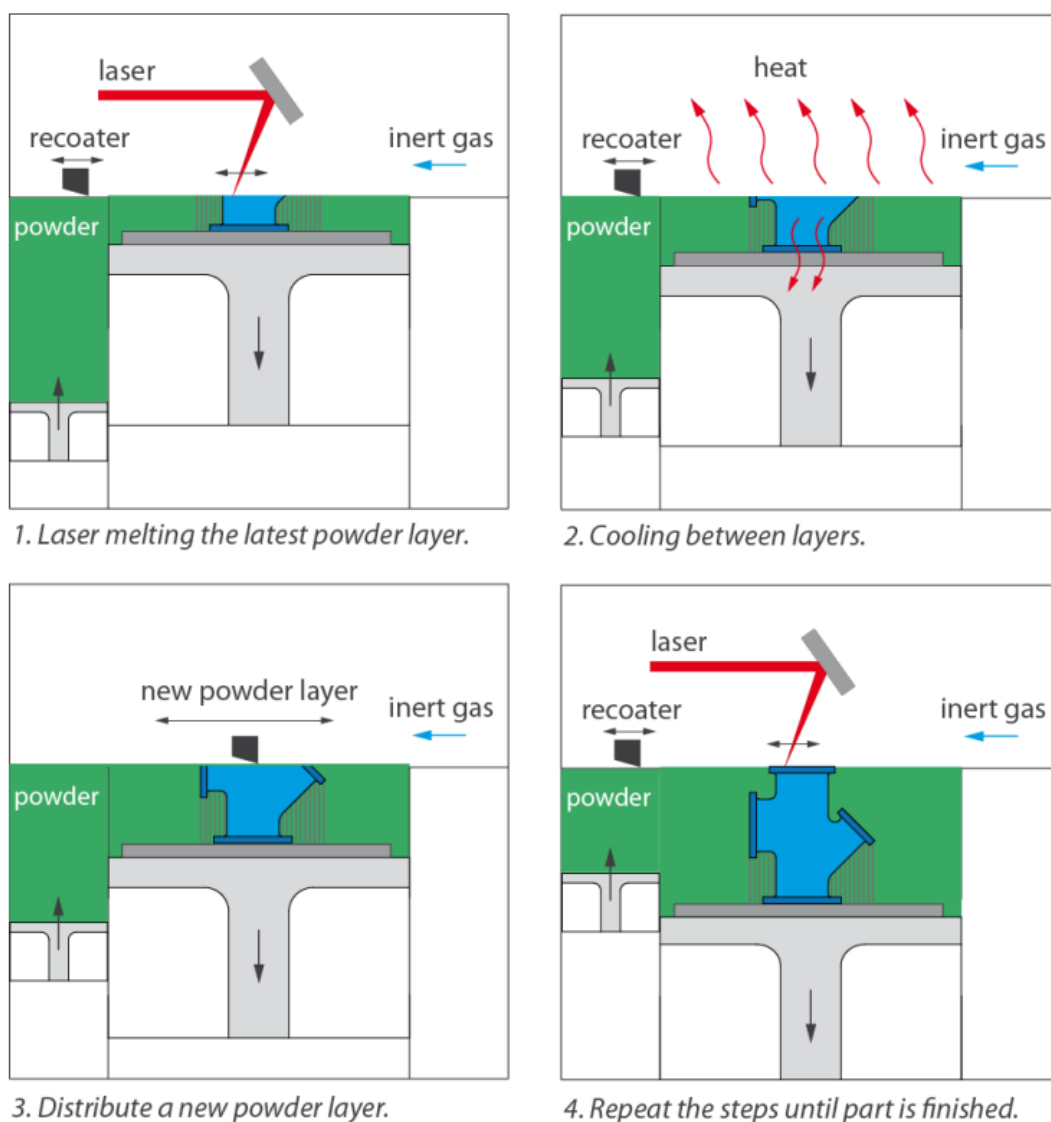
Tulostusprosessi alkaa tulostettavan geometrian määrittämisellä 3D-mallitiedostosta. Tämän jälkeen geometria viipaloidaan kerroksiksi, joiden välinen etäisyys on tyypillisesti 20–100 µm. Viipalointikerrosten paksuus määrittää myös tulostuskerroksen paksuuden. Viipalointikerroksista luodaan 2D-kuvat, joiden perusteella

luodaan ja valitaan tulostimen tulostuksen aikana tarvitsemat parametrit sekä määritetään tukirakenteiden sijainti ja muoto. Tulostettava kappale valmistetaan tulostuskammiossa, joka on täytetty inertillä kaasulla. Kappaleen tulostusprosessi alkaa hienojakoisen metallipulverin (partikkelin koko 10–60 μm) tasaisella levityksellä pystysuunnassa liikkuvan valmistusalustan päälle. Kun pulveri on levitetty valmistusalustalle, 2D-kerros kappaleen geometriasta sulatetaan siihen yhdellä tai useammalla korkeatehoisella lasersäteellä. Lasersäteen energia on riittävä sulattamaan metallipartikkelit ja muodostamaan yhtenäistä metallia. Kun kerros on sulatettu, annetaan sen jäähtyä hetki ja lasketaan valmistusalustaa kerrospaksuuden verran. Valmistusalustalle levitetään uusi kerros metallipulveria ja sulatetaan seuraava poikkileikkaus kappaleen geometriasta. Tätä prosessia toistetaan niin kauan, kunnes kappale on tulostettu.³⁶ Kuvassa 5 on esitetty tulostusprosessin toimintaperiaate.

³⁴ SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. s. 20.

³⁵ Farooq ym. An In-Depth Review on Direct Additive Manufacturing of Metals. s. 2.

³⁶ Komi, E. Design for Additive Manufacturing. s. 4,5



Kuva 5. Kuvaus valikoivan lasersulatustekniikan toimintaprosessista³⁷.

Valikoivalle lasersulatusmenetelmälle on tarjolla useita metallitulostusmateriaaleja. Erilaisia seoksia on olemassa esimerkiksi normaalille teräkselle, työkaluteräkselle, ruostumattomalle teräkselle, titaanille, nikkeli pohjaisille seoksille, kuten Inconel, alumiinille, kuparille, magnesiumille ja wolframille³⁸.

³⁷ Kokkonen ym., Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process. s. 9.

³⁸ Yap, C. Y. ym. Review of selective laser melting : materials and applications.

4 PROJEKTIN TOTEUTUS

Tässä luvussa selostetaan projektin toteutusvaiheen eteneminen ja varaosan luomisprosessi.

4.1 Projektisuunnitelma

Opinnäytetyön alussa tehtiin projektisuunnitelma, jossa kuvattiin projektin toteutusvaiheen kulku ja siihen liittyvät asiat. Tässä luvussa esitetään projektin toteutusvaiheen pääkohdat (Kuva 6).

Projekti aloitetaan kriteereihin sopivan osan etsimisellä. Osan tulee olla veneen keskimoottorista ja toimeksiantajan toiveen mukaan mieluummin Wickström tai Olympia merkkisestä. Valintaa ohjaa myös se, että valmistettavan osan tulisi mennä käyttöön, eli moottorimallin tulee olla yleisesti käytössä ja osalle todellinen tarve. Osan täytyy soveltua tulostettavaksi metallista, se saisi olla maksimissaan nyrkin kokoinen ja sopia 3D-tulostimen valmistustilaan. Olisi myös hyvä, jos valmistustekniikka mahdollistaisi osan parantamisen.

Kun osa on valittu, se muutetaan digitaaliseen muotoon CAD-tiedostoksi, joka sisältää osan piirteet. Tämä tulee käsittämään ainakin mittauksia, 3D-mallintamista ja topologian optimointia. Osaa ei pyritä digitoimaan alkuperäisenmuotoisena, vaan se muutetaan mahdollisimman hyvin 3D-tulostukseen soveltuvaksi. Rakennetta pyritään myös parantamaan, mikäli se on mahdollista.

Seuraavaksi valitaan valmistusmateriaali. Osaa ei ole tarkoitus valmistaa alkuperäisestä materiaalista, mikäli osan toiminta ei sitä vaadi. Oletuksena on, että käyttämällä nykyaikaisia materiaaleja osan suorituskykyä voidaan parhaassa tapauksessa parantaa. Materiaalivaihtoehtoina on 3DStepillä käytössä olevat tulostusmateriaalit.

Kun materiaali on valittu ja 3D-malli tehty, osa voidaan valmistaa. Technobothnian tulostuslaboratoriossa on mahdollista valmistaa muovinen testikappale. Lopullinen metallinen osa valmistetaan 3DStepin tiloissa Ylöjärvellä. Valmistukseen kuuluu myös vaadittavat jälkikäsittelyt ja koneistukset.

Viimeisenä vaiheena on osan testaaminen. Testaamalla todetaan, sopiiko osa moottoriin paikalleen ja kuinka se toimii käytössä olevassa moottorissa.



Kuva 6. Projektin toteutusvaiheen pääkohdat.

4.2 Osan valinta

Projektin toteutusvaihe käynnistyi valmistettavan osan valinnalla. Aluksi kartoitettiin mille osille olisi tarvetta. Kartoitus toteutettiin kahden Wickström moottori-harrastajien Facebook-ryhmän kautta. Ryhmissä julkaistiin päivitykset, joissa tiedusteltiin, onko joillekin osille tarvetta ja olisiko joku halukas osallistumaan projektiin esimerkiksi luovuttamalla osan malliksi.

Päivityksiin tuli kiitettävästi vastauksia ja niissä nousivat esiin erityisesti Wickström W-moottorityypin pakosarjat. Myös sylinterinkansille ja joillekin magneeton osille ilmeni tarvetta. Pakosarja todettiin kuitenkin liian suureksi osaksi ja siinä ei myöskään ollut riittävästi potentiaalia tilavuuden- tai geometrian optimointiin. W-tyypin sylinterinkansi sen sijaan vaikutti mielenkiintoiselta, vaikka sekin oli hieman liian suuri alkuperäiseen kokomääritykseen nähden. Kannessa kuitenkin todettiin

olevan potentiaalia tilavuuden pienentämiseen ja rakenteen parantamiseen. Myös valmistusmateriaalin vaihdolla nähtiin olevan positiivinen vaikutus sylinterinkannen elinikään, joka on aiemmin lyhentynyt korroosion vuoksi. Valmistettavaksi varaosaksi valittiin siis Wickströmin valmistaman W-typin moottorin sylinterinkansi (Kuva 7) petrolipalotilalla.



Kuva 7. Wickström W-tyyppin sylinterinkansi petrolipalotilalla.

4.3 Osan muuttaminen digitaaliseen muotoon

Kannen dokumentoinnissa ja muuttamisessa digitaaliseen muotoon käytettiin niin perinteisiä kuin nykyaikaisiakin menetelmiä. Kaikki 3D-mallinnusvaiheet, topologian optimointi ja FEM-simulointi tehtiin Siemens NX 12 -suunnitteluohjelmalla.

4.3.1 Mittaus

Kannesta otettiin päämittoja mallinnuksen perustaksi. Tavoitteena oli, että valmistettava sylinterinkansi voidaan vaihtaa vanhan tilalle ilman muutoksia moottorin alkuperäisiin rakenteisiin ja ettei kannen vaihto muuttaisi sylinterikohtaista tehoa.

Mittaukset suoritettiin Technobothnian mittauslaboratoriossa. Kannesta mitattiin esimerkiksi kiinnityspulttienreikien halkaisija ja jako, tulpan, ryyppykupin ja termostaattikotelon kierteiden koko sekä muiden toiminnan kannalta olennaisten piirteiden sijainti ja koko. Sylinterinkannen ja termostaattikotelon välisen rajapinnan säilyttäminen alkuperäisellä paikalla oli olennaista, sillä W-tyyppin moottoreissa termostaattikoteloon liittyvä jäähdytysvesilinja on jäykkää teräsputkea. Mittauksissa käytettiin perinteisiä mittalaitteita (Kuva 8) piirteiden yksinkertaisuuden ja vähäisen määrän vuoksi. Käytössä olisi myös ollut koordinaattimittauskone.



Kuva 8. Käytettyjä mittalaitteita.

Sylinterikohtaisen tehon pitäminen lähellä alkuperäistä koettiin tärkeäksi siitä syystä, ettei moottorin rakenteisiin kohdistuisi suurempia kuormituksia kuin alkuperäistä kantta käytettäessä. Asiassa huomioitiin myös se, että mikäli kansi vaih-

detaan esimerkiksi W-2-tyyppisen moottorin toiseen sylinteriin, niin niiden tuotama teho pysyisi samana. Kyseisen sylinterinkannen osalta tehoon eniten vaikuttaviksi tekijöiksi arvioitiin palotilan muoto ja tilavuus, joten ne pyrittiin taltioimaan mahdollisimman tarkasti.

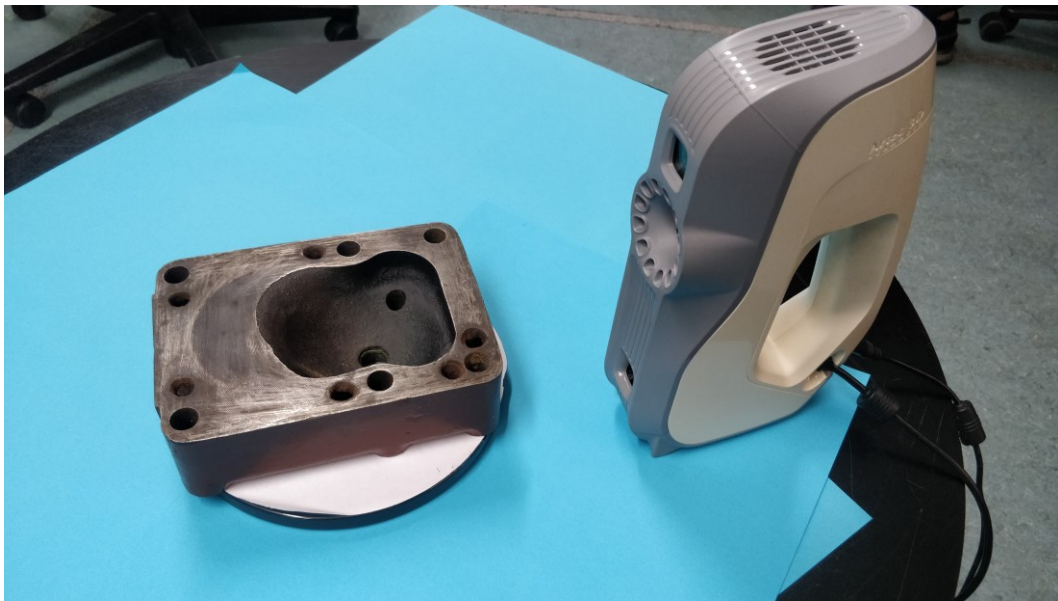
Palotila oli alun perin tarkoitus 3D-skannata muodon taltioimiseksi, mutta mitauksia tehdessä projektin alkuvaiheessa, 3D-skanneri ei ollut vielä käytettävissä. Palotilasta päätettiin tehdä muovailuvahanegatiivi (Kuva 9), josta saatiin karkeat mitat, ja osan mallintaminen voitiin aloittaa.



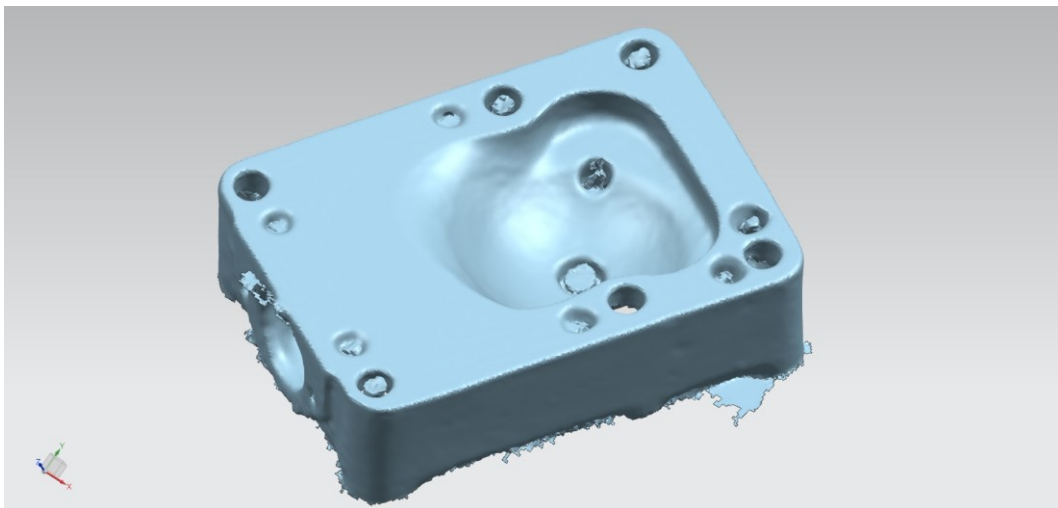
Kuva 9. Muovailuvahanegatiivi palotilasta.

4.3.2 3D-skannaus

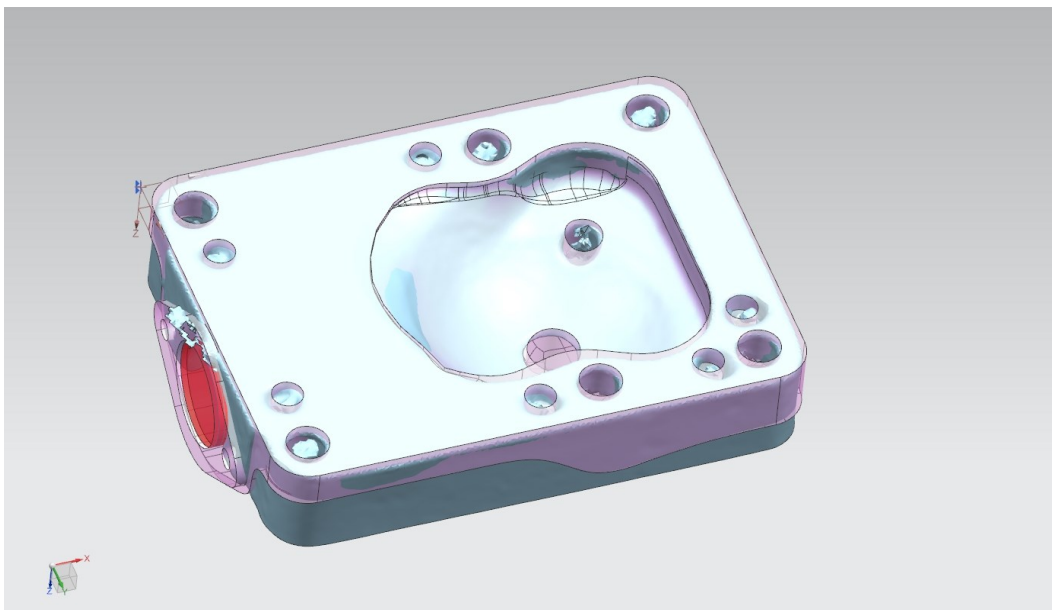
3D-skannausta hyödynnettiin palotilan muodon taltioimisessa ja piirteiden sijainnin tarkastamisessa. Skannaus suoritettiin Arctec Eva-3D -skannerilla (Kuva 10). Sylinterinkannesta katsottiin tarpeelliseksi skannata ainoastaan alapinta ja sivut.



Kuva 10. Arctec Eva 3D -skanneri ja sylinterinkansi valmisteltuna skannaukseen. Skannatusta pinnasta (Kuva 11) eristettiin palotilan muoto, jonka mukaan palotila mallinnettiin. Skannatun pinnan avulla tarkistettiin myös mittausten perusteella mallinnettujen piirteiden, kuten pinnapultinreikien, jäähdytysveden menoaukkojen ja tulpan- sekä ryyppykupin reikien sijainnit (Kuva 12).



Kuva 11. Skannattu pinta suunnitteluohjelmassa ennen jälkityöstöjä.



Kuva 12. Piirteiden sijainnin tarkastelu skannattua pintaa hyödyntäen.

4.3.3 Kuormitusten selvittäminen

Sylinterinkanteen kohdistuvien kuormitusten selvittäminen on olennaista topologian optimoinnin ja FEM-simuloinnin kannalta. Kanteen kohdistuvista kuormituksista päädyttiin selvittämään kaksi ilmeisintä, eli kiinnitysmuttereiden kiristyksestä aiheutuva voima niiden vastinpinnoille kannessa ja moottorin käynnistä aiheutuva paineenvaihtelu palotilassa. Myös kannen lämpötilanvaihtelut aiheuttavat jännityksiä, mutta ne rajattiin pois tarkastelusta.

Kansi kiristetään paikalleen kuudella M12 pinnapulttiin kierrettävällä mutterilla. Taulukosta³⁹ katsottiin yhden mutterin tuottamaksi esijännitysvoimaksi 42 000 N, kitkakertoimella 0,1 kiristysmomentin ollessa 71 Nm. Taulukon esijännitysvoima valittiin käytettäväksi topologian optimoinnissa. Wickströmin käyttöohjekirjassa

³⁹ Valtanen, E. Tekniikan taulukkokirja. s. 799

sylinterinkannen kiristysmomentiksi on ilmoitettu 6 kpm⁴⁰, joka on noin 59 Nm, eli käytettävässä esijännitysvoimassa on hieman varmuutta.

Moottorin käynnistä aiheutuva paineenvaihtelu palotilassa tuottaa sylinterinkanteen tykyttävän kuormituksen, joka väsyttää rakennetta. Palotilaan kohdistuvaa maksimipainetta selvitetiin haastatteleamalla moottoriasiantuntijaa, jonka arvion mukaan viittäkymmentä baaria, eli viittä megapascalia voisi käyttää paineena, joka on varmasti turvallisella puolella⁴¹. Tätä arviota tukee myös Heyo Geokin ym. vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöön liittyvän tutkimuksen tiedot. Tutkimuksessa käytettäessä bensiiniä polttoaineena moottorissa, jonka puristussuhde oli 9,2:1 palotilaan muodostui noin 4,3 MPa:n huippupaine käyntinopeuden ollessa 2 000 rpm⁴². Wickströmin W-tyyppin moottoreilla puristussuhde käytettäessä petrolikantta on 4,3:1 ja huipputeho saavutetaan esimerkiksi W3-tyyppin moottorissa 1 700 rpm:llä, jossa tämä kierrosluku on korkein⁴³. Tästä voidaan päätellä, että W-tyyppin moottoreiden palotilan maksimipaine on pienempi kuin 4,3 MPa. Topologian optimoinnissa käytettäväksi paineeksi valittiin siis 5 MPa.

Palotilan kuormituksen väsyttävää luonnetta ei huomioitu topologian optimoinnissa eikä FEM-analyysissä. Väsyttävän kuormituksen vaikutusten selvittäminen olisi laajentanut opinnäytetyötä merkittävästi ja vienyt resursseja muusta selvitystyöstä.

⁴⁰ WICKSTRÖM Ohjekirja. s. 7.

⁴¹ Salminen, H. J. Technical Advisor. Finno Exergy Oy Ltd. Haastattelu.

⁴² Heyo Geok, H. ym. Experimental Investigation of Performance and Emissions of a Sequential Port Injection Compressed Natural Gas Converted Engine.

⁴³ WICKSTRÖM Ohjekirja. s. 2,3.

4.3.4 Materiaalin valinta

Sylinterinkannen valmistusmateriaaliksi päädyttiin valitsemaan AISi10Mg-alumiiniseos. Kyseisen materiaalin valintaa tulostuksen näkökulmasta puoltaa tulostusjauheen edullisuus ja pienet tulostuskustannukset verrattuna muihin metallimateriaaleihin. Pienet tulostuskustannukset johtuvat alumiinin hyvästä lämmönjohtokyvystä, jonka ansiosta sitä voidaan sulattaa suurilla laserenergioilla. Alumiini on noin kaksi kertaa nopeampaa tulostaa kuin ruostumaton teräs.⁴⁴

Kannen toiminnallisuuden kannalta alumiinin valintaa puoltaa myös sen hyvä lämmönjohtokyky sekä se, että alumiinia käytetään yleisesti sylinterinkansien valmistusmateriaalina. Hyvän lämmönjohtokyvyn ansiosta alumiininen sylinterinkansi siirtää tehokkaasti lämpöä pois palotilan pinnalta.

4.3.5 Topologian optimointi ja osan kehittäminen

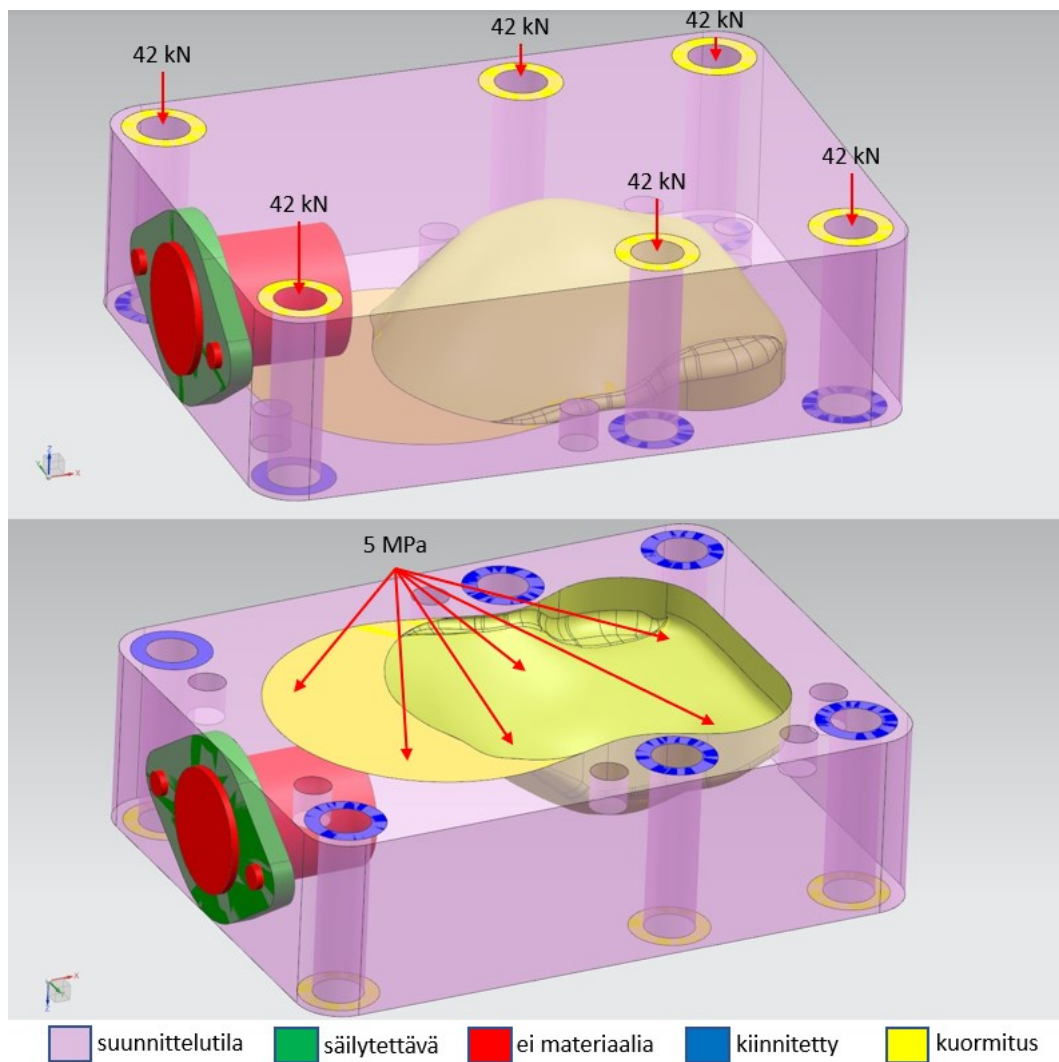
Tulostettavan sylinterinkannen rakenteesta suunniteltiin kaksi versiota, joista molemmille tehtiin topologian optimointi. Toinen versioista valittiin jatkokehitettäväksi arvioinnin jälkeen ja sille tehtiin uusi topologian optimointi muutosten valmistuttua. Seuraavassa kappaleessa esitetään kaikille versioille yhteiset perusmääritykset.

Topologian optimointiin määritettiin ensiksi suunnittelutila, eli alue, johon materiaalia voi muodostua. Suunnittelutilaksi määritettiin alkuperäisen sylinterinkannen muoto, josta rajattiin pois pinnapulttien vaatima tila, jäähdytysveden tuloaukot ja palotilan muoto. Termostaattikotelon vastinpinta pakotettiin optimoinnissa säilytettäväksi piirteeksi. Sylinterinkannen sisään tulevan termostaatin kohdalle määritettiin tilavuus, johon materiaalia ei saa muodostua. Seinämien vahvuuksia

⁴⁴ Kananen, V. Chief Technology Officer. 3DStep Oy. Haastattelu.

pakotettiin offset thickness- ja shell-toiminnoilla. Esimerkiksi edempänä esiteltävässä ristikkorakenteella toteutetussa kannessa pohjapintaan määrättiin 3 mm offset thickness ja ulkokuoriin 2 mm. Suunnittelutila kiinnitettiin pohjasta pinnapulttien reikien ympäriltä. Kuormituksiksi määritettiin edellisessä luvussa esiintulleet palotilaan kohdistuva 5 MPa:n paine ja muttereiden 42 kN:n esijännitysvoima. Vallitsevaksi lämpötilaksi asetettiin 100 °C, joka kuvaa paremmin sylinterinkannen käyttöolosuhdetta, kuin oletuksena oleva huoneenlämpö. Tämä laski optimoinnissa käytetyn materiaalin myötölujuutta. Optimoinnissa käytettiin varmuuskerrointa 2, mutta todellinen varmuuskerroin, jonka ohjelma ilmoitti optimoinnin päätteeksi, oli yleensä pienempi. Esimerkiksi viimeisessä optimoinnissa varmuuskerroin oli 1,56. Materiaaliksi valittiin suunnitteluohjelmassa valmiina oleva Al_6061, jonka myötölujuus on 241,7 MPa huoneenlämmössä ja noin 221 MPa 100 °C:ssa. Tulostettavan AlSi10Mg seoksen myötölujuus on 259 MPa huoneenlämmössä kerrospaksuuden ollessa 60 µm ja tulostustehon 400 W, ilman lämpökäsittelyä⁴⁵. Lämpökäsitellyn seoksen myötölujuus on 154 MPa. Osa ryhtyi suunnittelemaan ajatellen, että sille ei tehdä lämpökäsittelyä, joka laskee myötölujuutta merkittävästi. Versioille yhteiset perusmääritykset esitettynä kuvassa 13.

⁴⁵ SLM-SOLUTIONS. Al-Alloy AlSi10Mg. Materiaalitietoesite.

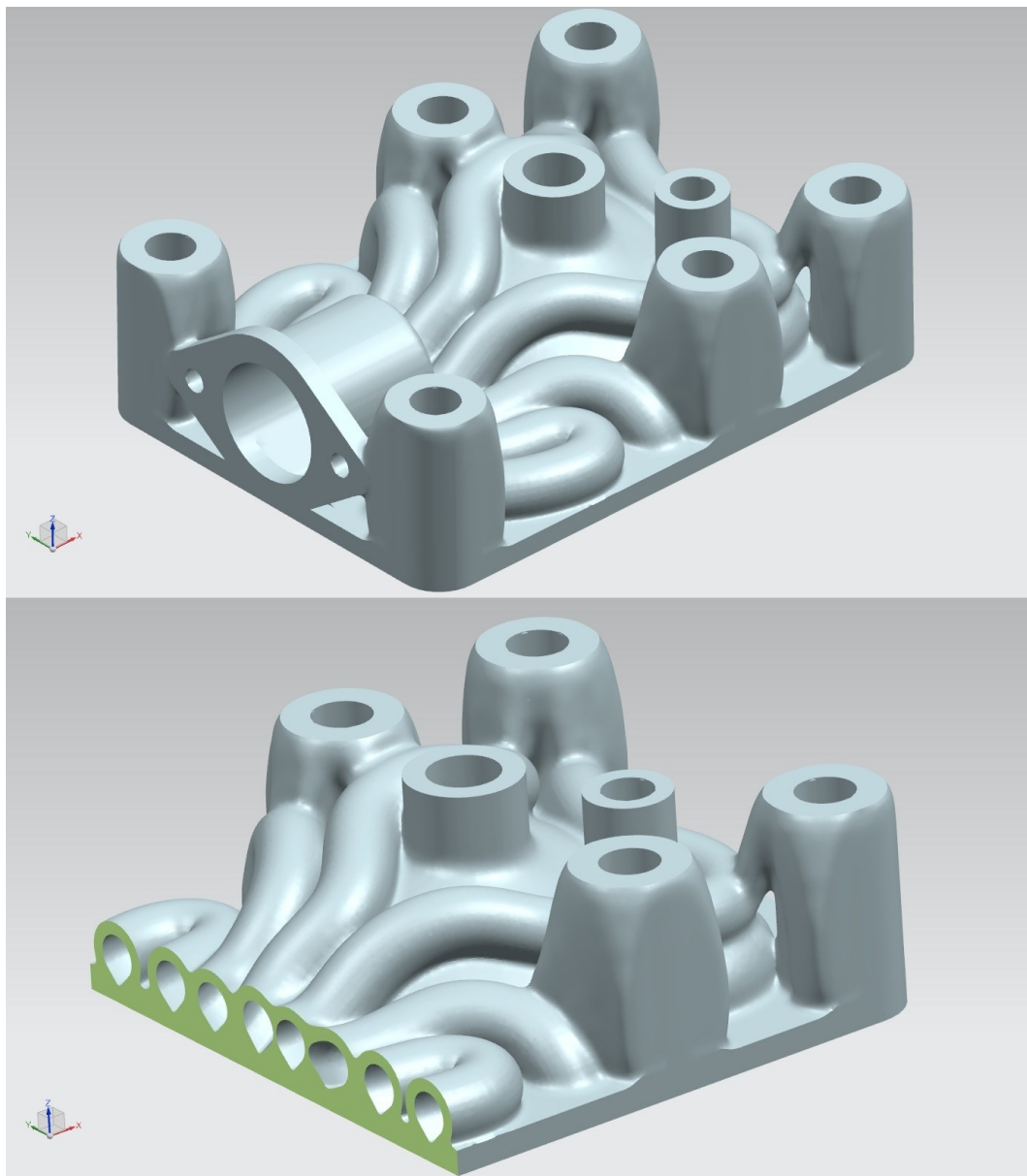


Kuva 13. Topologian optimoinnin versioille yhteiset määrittymiset.

Sylinterinkansista suunnitellut versiot poikkesivat toiminnallisuudessa toisistaan merkittävästi vain jäähdytysvedenkierron toteutuksen osalta. Ensimmäiseen malliin (Kuva 14) suunniteltiin kanavat, joita pitkin jäähdytysvesi kulkisi. Kansi suunniteltiin tulostettavaksi yläpuoli tulostusalustaa vasten, jotta palotilaan ei tulisi tukirakennetta, joka heikentäisi pinnanlaatua. Palotilan pinnanlaatuun kiinnitettiin

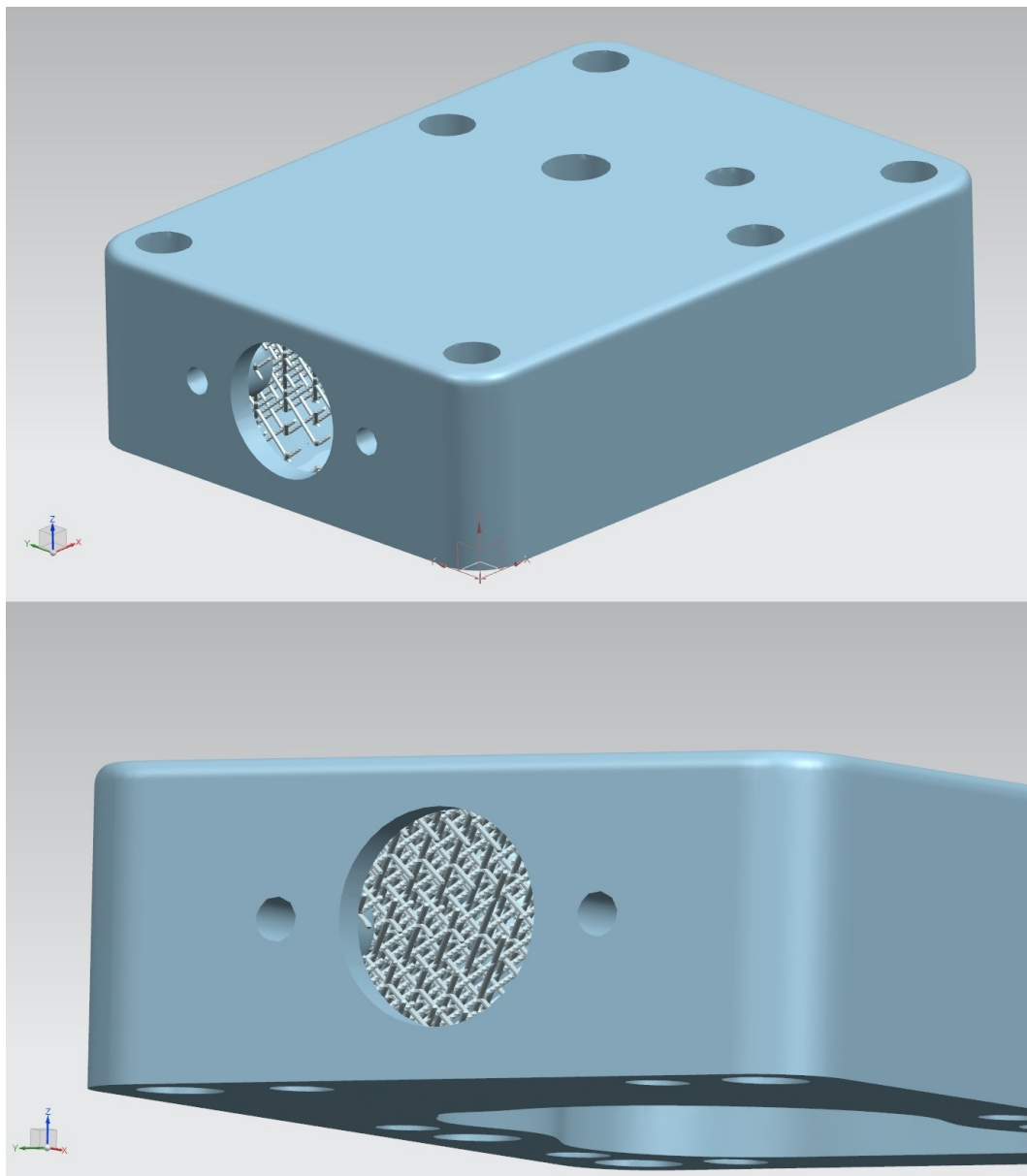
erityisesti huomiota, koska huonolaatuinen pinta lisää väsymismurtumien muodostumisen riskiä⁴⁶. Tukirakenteen muodostuminen jäähdytyskanaviin vältettiin suunnittelemalla niistä pisaran muotoiset.

⁴⁶ European Aluminium Association. Applications – Power train – Cylinder heads. s. 6.



Kuva 14. Jäähdytyskanavilla toteutettu versio.

Toinen malli (Kuva 15) oli ulkomuodoltaan hyvin samanlainen, kuin alkuperäinen kansi. Se suunniteltiin myös tulostettavaksi yläpuoli tulostusalustaa vasten. Kannen sisäpuolelle luotiin ristikkorakenne, jonka tarkoituksena oli hallitusti välttää tukirakenteen syntyminen ja johtaa lämpöä pois palotilan pinnasta.



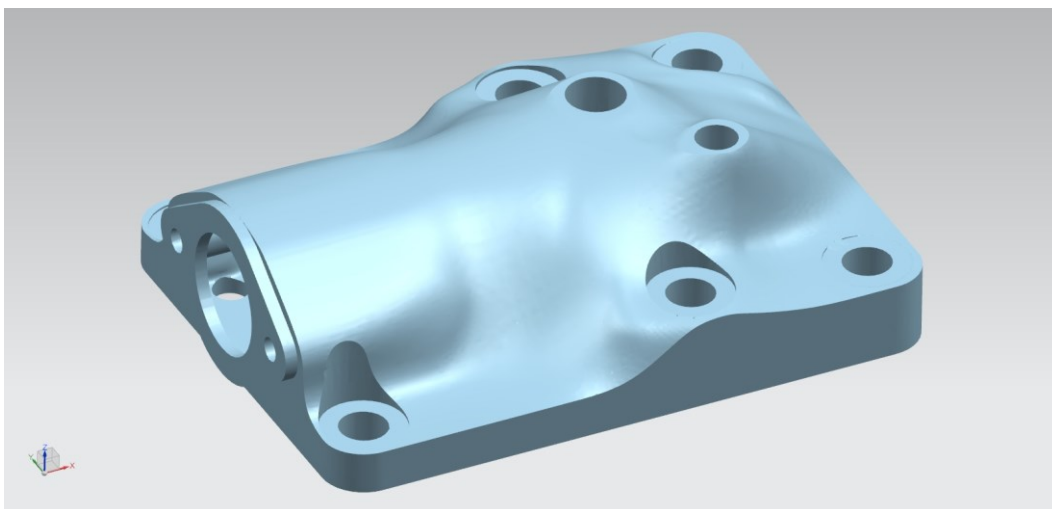
Kuva 15. Ristikkorakenteella toteutettu versio.

Versioita vertailtiin 3DStepin asiantuntijan kanssa ja ristikkorakenteella toteutettu versio valittiin jatkokehittäväksi. Valintaa tuki vastaavan jäähdytysratkaisun kuin alkuperäisessäkin kannessa säilyttäminen ja sen oletettava toiminta sekä se, että kannen tasaiselle yläpinnalle ei kertyisi likaa niin paljon kuin kanavaversiossa.

Valittua kantta päädyttiin kehittämään muuttamalla sen tulostusasento pystyyn siten, että termostaattikotelon vastinpinta on tulostusalustaa vasten. Tällä muutoksella alle 45 asteen kulmassa tulostusalustaan nähden olevien pintojen pinta-

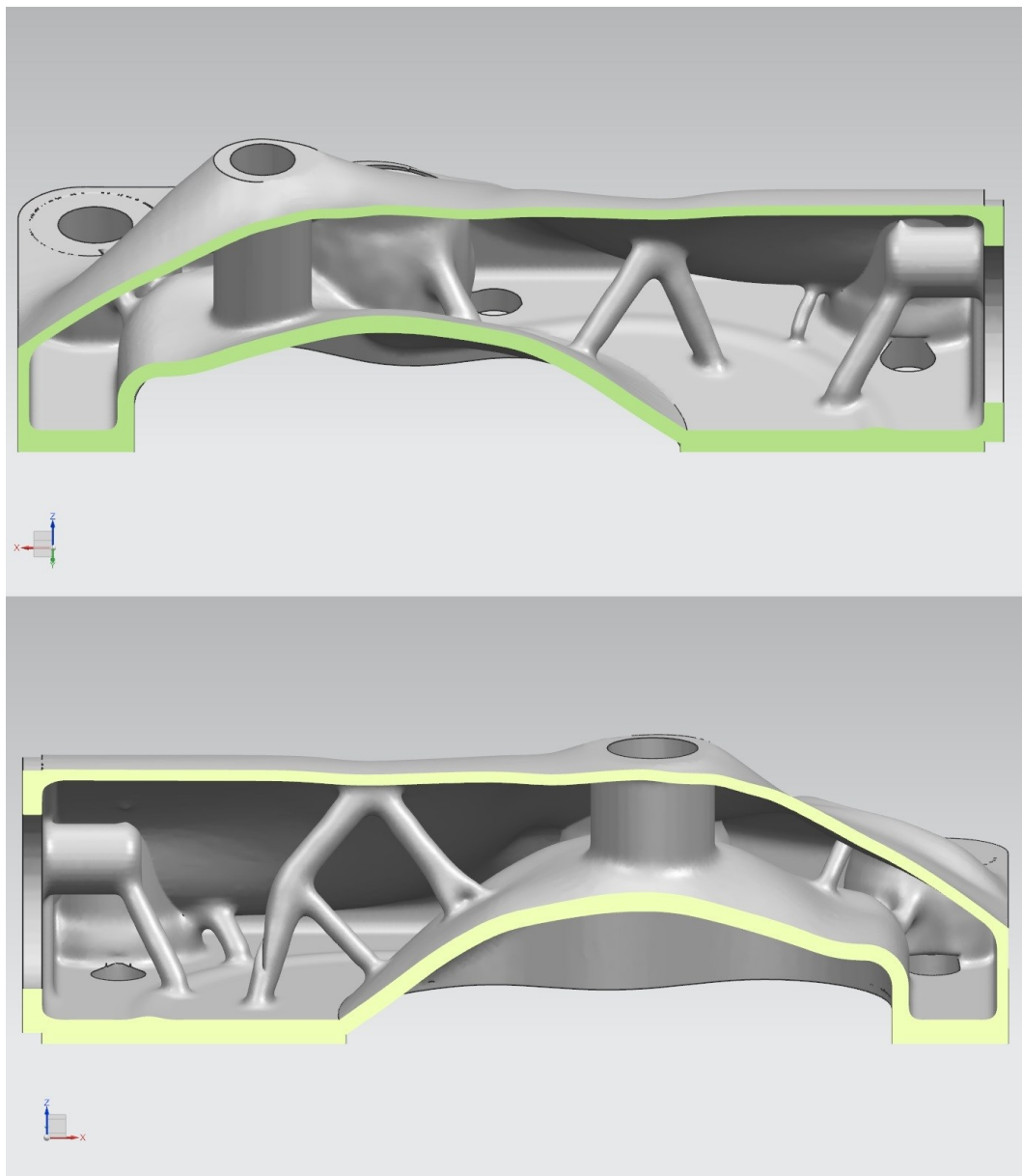
alaa pystyttiin pienentämään ja sisälle tulevasta ristikkorakenteesta luovuttiin. Kannen yläpintaa päätettiin myös laskea ja muuttaa palotilan muotoa myötäilevämmäksi, tavoitteena oli tulostettavan tilavuuden pienentäminen ja ulkonäön parantaminen. Tulostettavaa tilavuutta pienennettiin myös poistamalla kannen kiinnitykseen pinnapulteilla liittyvää materiaalia. Poistetun materiaalin tilalle päätettiin koneistaa metalliset jatkoholkit, jotta alkuperäisiä pinnapultteja voidaan käyttää myös uudella sylinterinkannella.

Suunnittelutilaa muutettiin kehitysideoiden pohjalta ja optimoinnissa käytetty toiminto, jolla vältetään alle 45 asteen kulmassa syntyvät ulokkeet tulostusalustaan nähden, määritettiin uuden tulostussuunnan mukaan. Kuvassa 16 uudelleen muotoiltu malli.



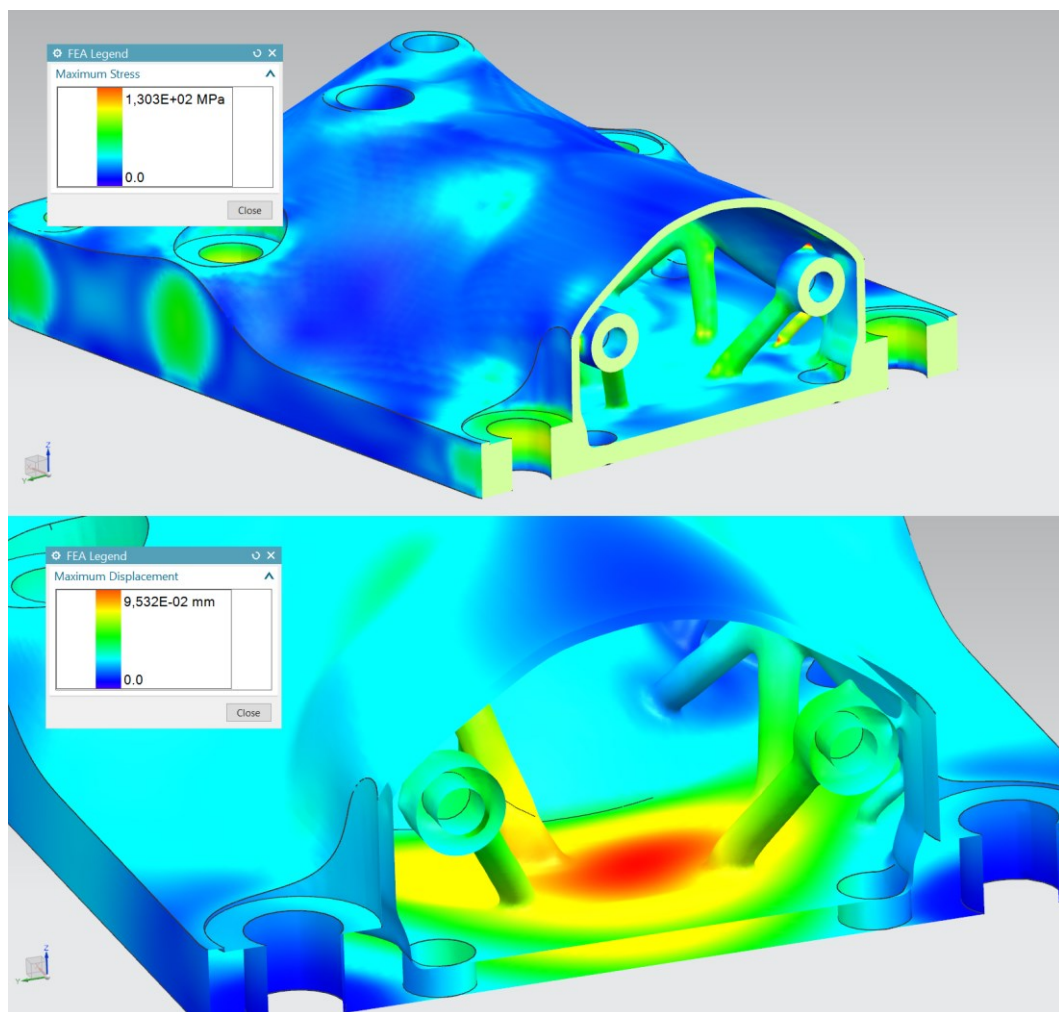
Kuva 16. Kehitysideoiden perusteella muutettu malli.

Topologian optimoinnissa kannen sisäpuolelle muodostui jäykisteitä erityisesti palotilan etuosaan männän iskukohtaan yläpuolelle sijaitsevalle alueelle, kuten kuvasta 17 käy ilmi.



Kuva 17. Topologian optimoinnissa muodostuneet jäykisteet sylinterinkannen sisälle.

Suunnitteluohjelman topologian optimointiosiossa on mahdollista tarkastella siirtymiä ja jännityksiä, joskin melko epätarkasti. Kuvasta 18 nähdään, että suurin siirtymä noin 0,1 mm esiintyy palotilan etuosassa. Kappaleessa vaikuttavat jännitykset, jotka on esitetty myös kuvassa 18 olivat suurimmillaan noin 130 MPa ja esiintyivät pistemäisissä kohdissa jäykisteissä. Pääsääntöisesti jäykisteissä vaikuttavat jännitykset olivat noin 70 MPa ja pulttorneissa enimmillään noin 100 MPa.



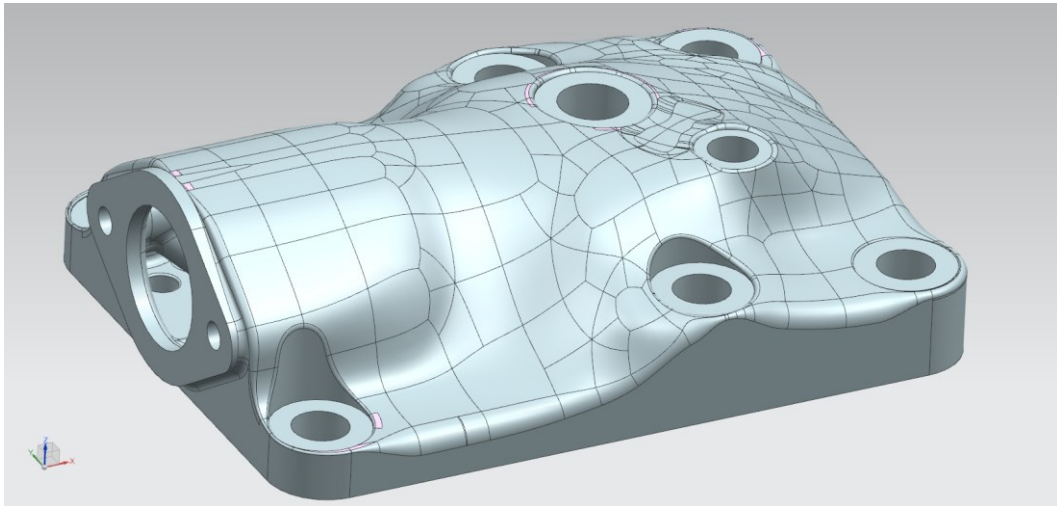
Kuva 18. Jännitykset (ylhällä) ja siirtymät (alhaalla) optimoidussa mallissa.

4.3.6 3D-mallintaminen ja FEM-simulointi

Optimoinnista syntyneet mallit ovat fasettimalleja ja kuten edellisen luvun kuvasta 17 näkyy, niin niihin muodostuvat rakenteet voivat olla monimutkaisia. Fasettimalleja ei pysty muokkaamaan perinteisillä mallinnustyökaluilla, joka tekee niiden käsittelystä haastavaa. NX12-suunnitteluohjelmassa on kyllä joitakin työkaluja fasettimallien muokkaamiseen, mutta ne eivät sovellu suurten muutosten tekemiseen. Sylinterinkansi päätettiin siis mallintaa uudelleen perinteisillä mallinnustyökaluilla, käyttäen ohjenuorana viimeisintä optimoitua fasettimallia. Uudelleenmallinnuksella pyrittiin luomaan kannen piirteistä selkeitä sekä lisäämään sisäpuolelle piirteitä, joilla vältetään tukirakenteiden muodostuminen. 3DStepin asiantuntijat

arvioivat kappaleen tulostettavuutta ja antoivat neuvoja sen kehittämiseen. Ensimmäinen FEM-simulointi tehtiin, kun kanteen oli mallinnettu tukirakenteita ehkäisevät piirteet sekä jäykisteet topologian optimoinnin perusteella.

Tulostettavan sylinterinkannen mallintaminen aloitettiin ulkokuorista. Ulkopuolen seinämien riittäväksi vahvuudeksi todettiin 2 mm ja pohjapinnan, mukaan lukien palotilan pinnan lopulliseksi vahvuudeksi koneistuksen jälkeen 4 mm. 3D-skannaus alkuperäisestä kannesta oli mallinnusvaiheessa käytettävissä ja palotila pystyttiin mallintamaan tarkasti tulostettavaan kanteen. Pohjan ja termostaattikotelon koneistettaviin tasopintoihin lisättiin 1,5 mm koneistusvaraa, sillä ne ovat koneistettavia tiivistepintoja eikä tulostuksessa saavutettava pinnanlaatu ole riittävä. Koneistuspiirustuksia varten tehtiin myös malli, josta koneistusvarat oli poistettu. Kaikki kierrereivät mitoitettiin kierteen alkuporauksen kokoisiksi, jotta kierreet voidaan tehdä suoraan ilman porauksia. Kierrereikien ulkoseinämät mitoitettiin siten, että valmiin kierteen harjasta on vähintään 3 mm ulkoseinämään. Pinnanapulttien reikien ympärille mallinnettiin pulttitornit, jotka ottavat kiinnitysmuttereiden esijännitysvoiman vastaan. Kuvassa 19 esitettynä valmiiksi mallinnettu kansi ulkopuolelta. Kuva on tulostettavasta versiosta, eli termostaattikotelon pinnassa ja kannen pohjassa on 1,5 mm ylimääräistä materiaalia.

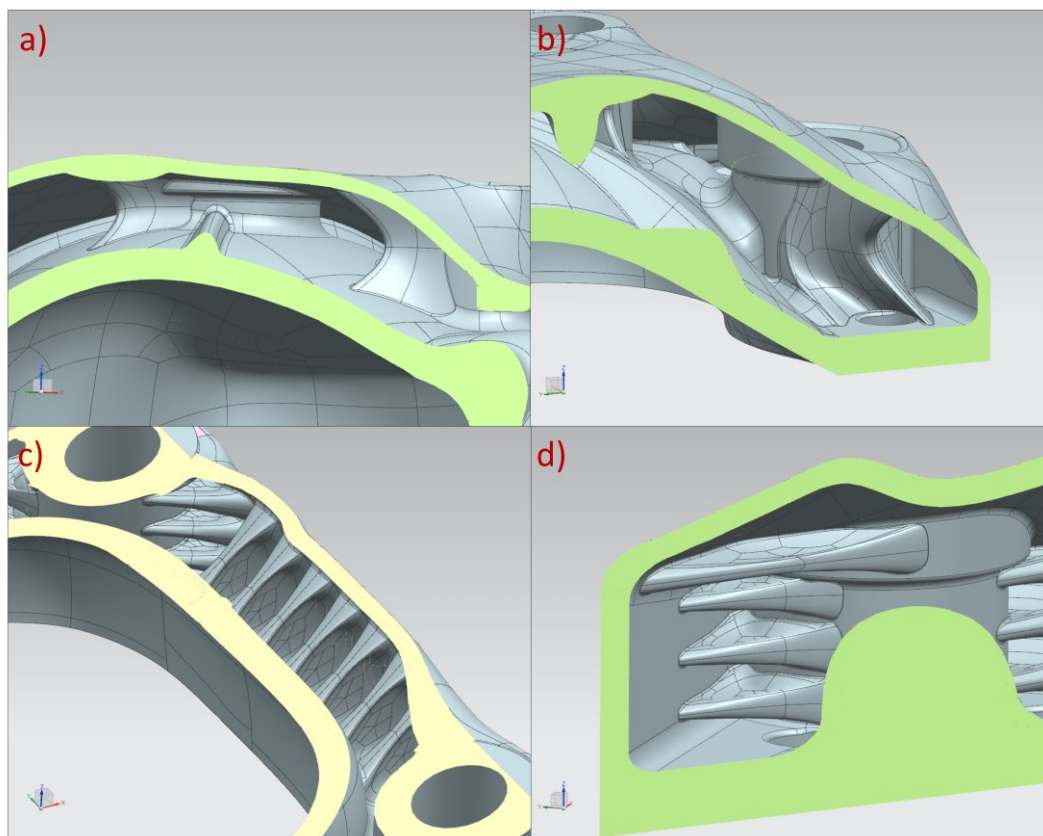


Kuva 19. Mallinnettu sylinterinkansi ulkopuolelta (tulostettava versio).

Kun kannen peruspiirteet oli mallinnettu, keskityttiin tulostettavan tukirakenteen tarpeen minimoimiseen. Tulostettavaa kappaletta suunniteltaessa nyrkkisääntönä pidetään, että alle 45 asteen kulmassa tulostusalustaan nähden oleville pinnoille täytyy tehdä tukirakenne. Kannesta siis pyrittiin poistamaan kaikki tämän ehdon täyttävät suuret pinnat. Mikäli pinta on pieni, tukirakenne ei ole välttämätön, mutta pinnanlaatu voi huonontua. Tukirakenteen tarve pyrittiin minimoimaan, koska sen poistaminen lisää valmistuskustannuksia ja pinnanlaatu heikkenee kohdissa, joihin sitä muodostuu. Kannen sisäpuolella tarvittavia tukirakenteita pyrittiin erityisesti välttämään, koska niiden poistaminen sieltä voisi olla mahdotonta ja ne saattaisivat irrota kannen ollessa käytössä, aiheuttaen ongelmia.

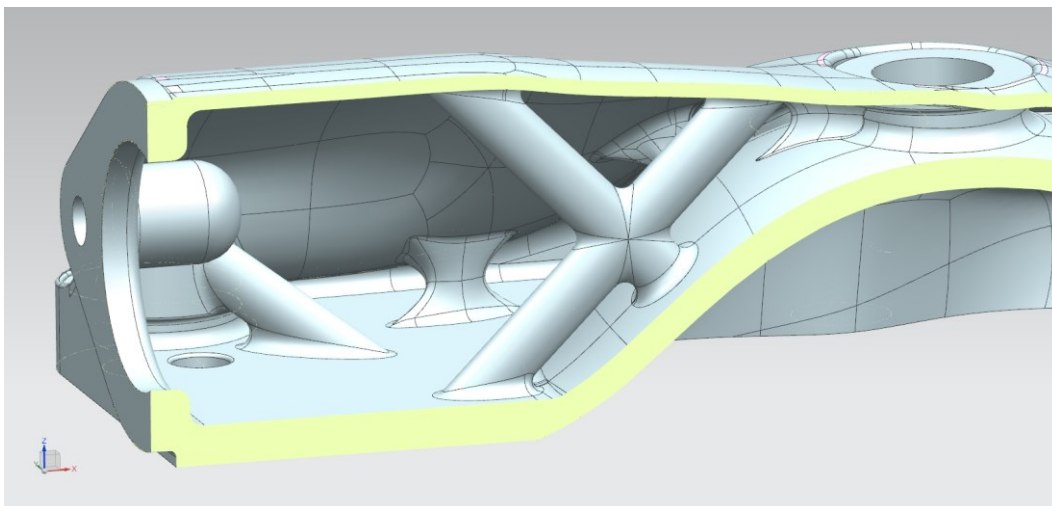
Sisäpuolella oleviksi kohdiksi, jotka vaativat tukirakenteen, tunnistettiin keskimäisten ja takimmaisten pulttitornien seinämien, tulpanreiän seinämien ja ryyppykupinreiän seinämien alapinnat (tulostussuuntaan nähden) sekä takaseinämän pinta. Ulkopuolella tukirakennetta vaativiksi kohdiksi havaittiin kaikki reiät, niin pinnapultteja kuin kierteitäkin varten sekä palotilan takaosa. Näitä piirteitä ei ryhdytty kuitenkaan muuttamaan, sillä niiden muodot päätettiin säilyttää alkuperäisinä.

Kannen sisäpuolella tulpan- ja ryyppykupinreiän kohdalle muodostuvat tukirakenteet vältettiin luomalla niiden alapuolelle holvikaaren muotoiset piirteet. Piirteet kiinnittyvät kannen ylä- ja alapintaan ja ainoastaan niiden keskikohdalle jää pieni alue, jossa kulma on alle 45 astetta. Keskimmäisten pulttitornien alapuolelle luotiin myös holvikaaren muotoiset piirteet. Kaarien muotoilulla pyrittiin lisäksi tehostamaan palotilanpinnan jäähdytystä muotoilemalla ne ohjaamaan jäähdytysveden virtausta pintaa kohti. Takimmaisten pulttitornien ja takaseinämän tukirakenteet vältettiin kolmionmuotoisilla piirteillä, joiden etureunan kulma on yli 45 astetta. Kolmioita sijoiteltiin vierekkäin kattamaan koko tuettava alue. Käyttämällä hieman hitaasti mallinnettavia kolmioita pystyttiin tulostettavaa tilavuutta pienentämään verrattuna nopeasti mallinnettavaan tasaiseen viisteeseen. Kuvassa 20 esitettyinä käytetyt ratkaisut tukirakenteiden välttämiseksi.



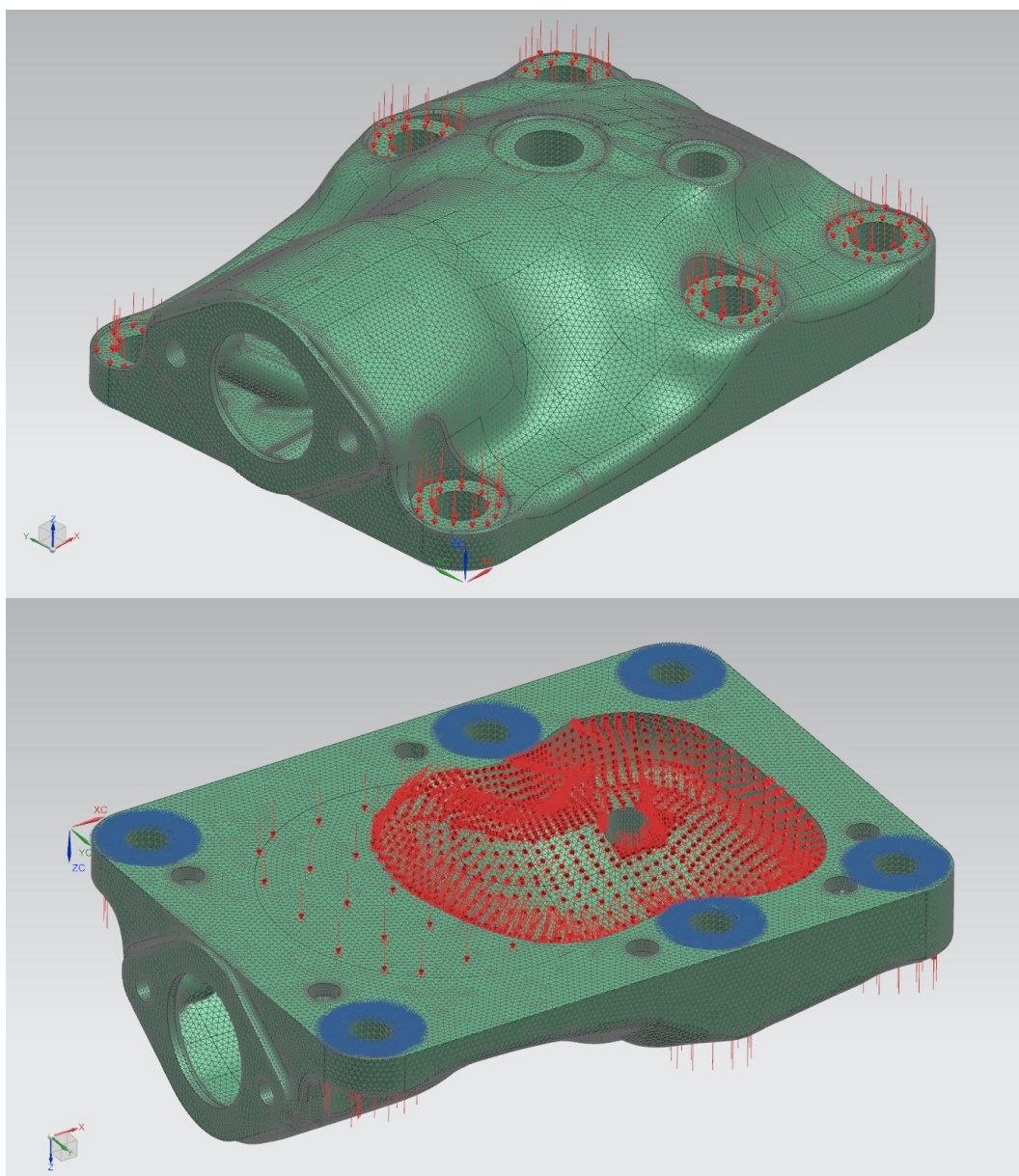
Kuva 20. Pintojen tuentaratkaisut. a) tulpan- ja ryyppykupinreiän tuenta b) keskimmäisten pulttitornien tuenta c) takaseinäman tuenta d) takimmaisten pulttitornien tuenta.

Kun tukirakenteita ehkäisevät piirteet oli saatu valmiiksi, aloitettiin jäykisteiden mallintaminen topologian optimoinnista saatua mallia mukailien. Jäykisteiden muotoon ja sijoitteluun vaikutti 45 asteen kulmaehto ja termostaatin tilavaraus vesitilan keskellä. Jäykisteitä lisättiin symmetrisesti, eli kannen molemmille puolille tehtiin aina samanlaiset jäykisteet peilikuvina. Ensimmäiset jäykisteet ennen FEM-simulointia on esitetty kuvassa 21.



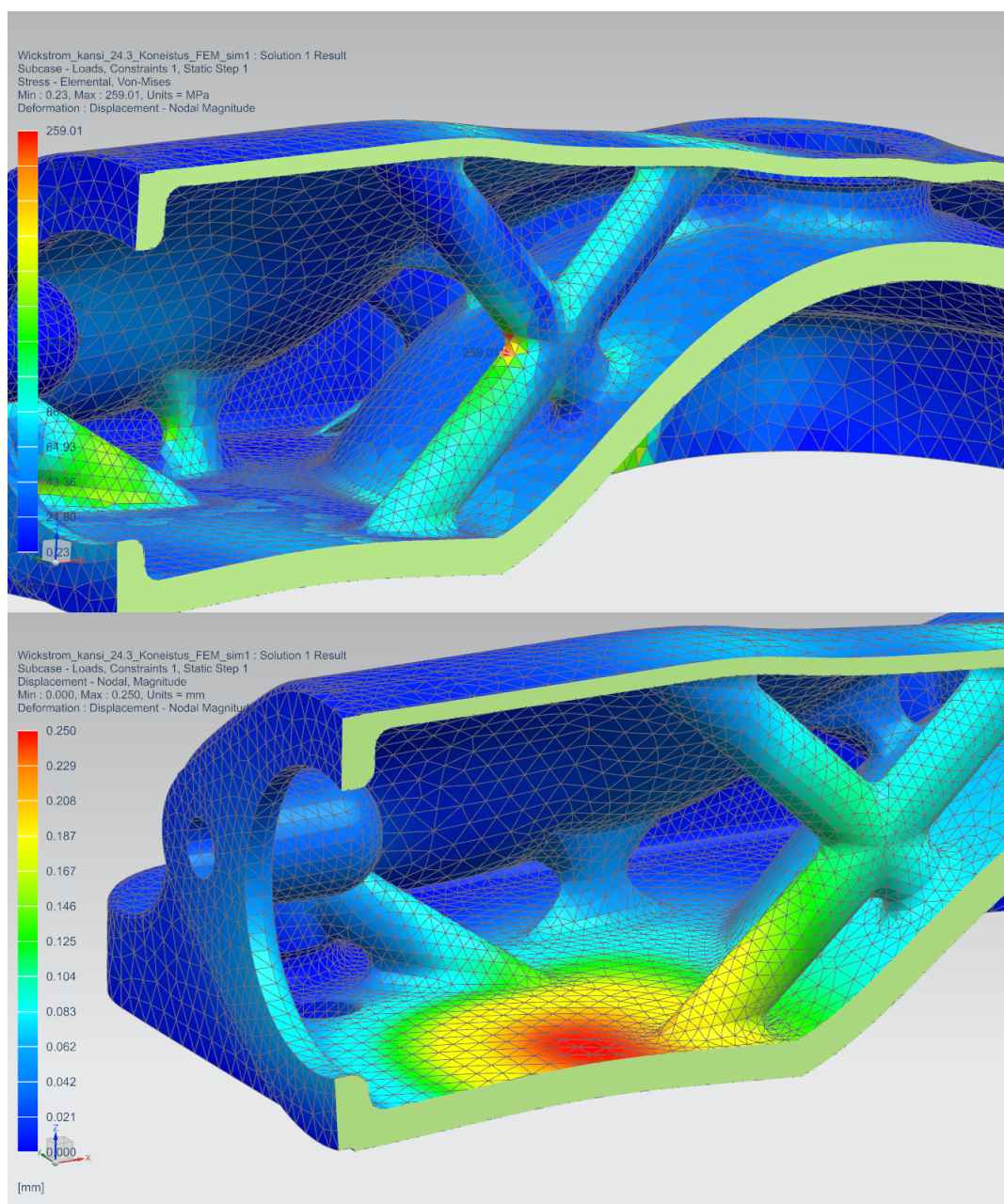
Kuva 21. Topologian optimointia mukaillen mallinnetut jäykisteet.

Jäykisteiden mallintamisen jälkeen sylinterinkannelle tehtiin ensimmäinen FEM-simulointi, jolla selvitettiin kappaleessa vaikuttavia jännityksiä ja siirtymiä. Tehdyt simuloinnit eivät huomioineet kuormituksen väsyttävää luonnetta, vaan kuvasivat kuormituksen staattista ääritilannetta. Ratkaisijana käytettiin NX Nastrania ja elementteinä 2 mm kokoisia 3D-tetroja välisolmuilla. Käytetyt kuormitukset ja kiinnityspisteet olivat samoja, kuin kuvassa 13 esitetyt. Verkotettu elementtimalli, johon on lisätty kuormitukset ja kiinnitykset esitettynä kuvassa 22.



Kuva 22. Elementtiverkotus, kuormitukset ja kiinnitys.

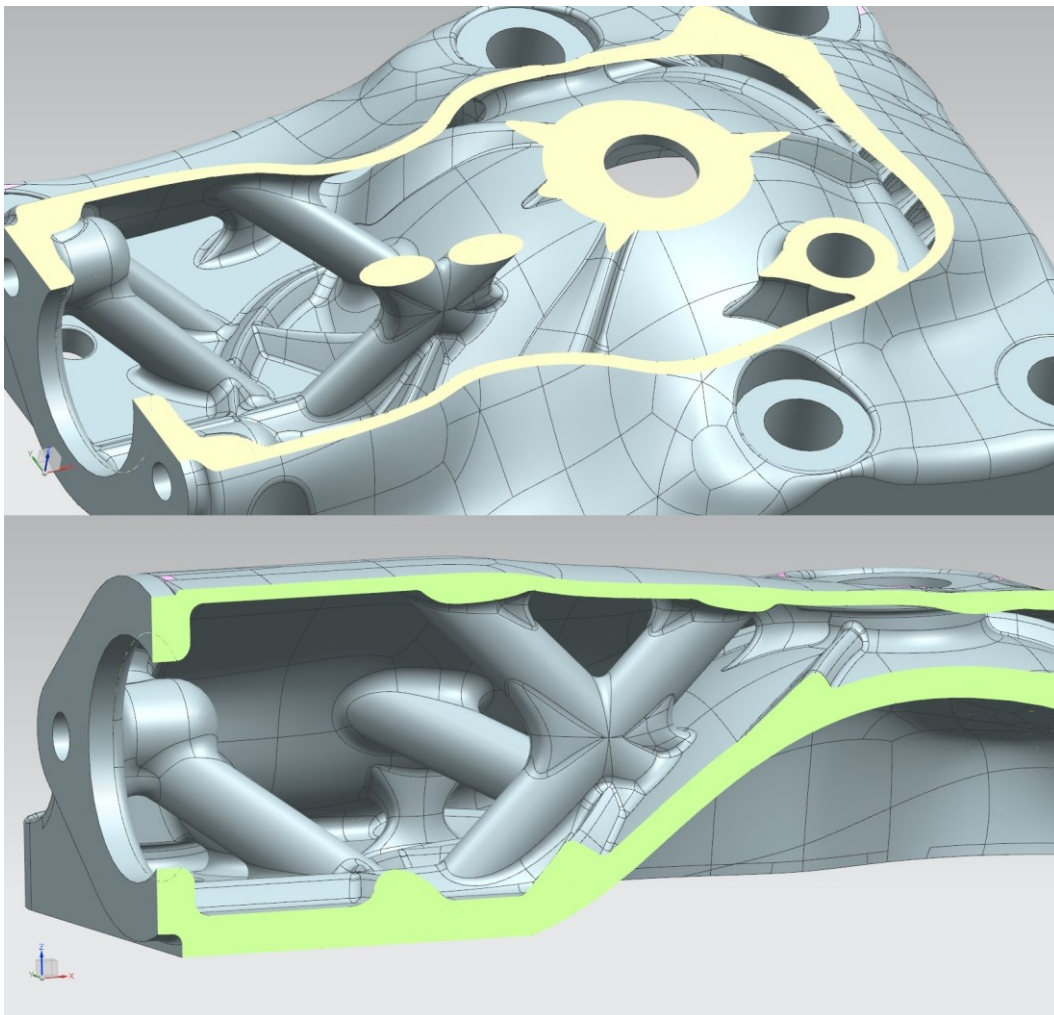
Ensimmäinen FEM-simulointi osoitti, että topologian optimoinnin mukaan mallinnetut jäykisteet ovat riittämättömiä. Palotilan etuosan siirtymä oli 0,25 mm ylöspäin ja suurin jännitys, joka esiintyi ristituen leikkauskohdassa, oli 259 MPa. Tulostettavan materiaalin myötölujuus ilman lämpökäsittelyä on 259 MPa. Siirtymät ja jännitykset esitettyinä kuvassa 23.



Kuva 23. Ensimmäisen FEM-simuloinnin tulokset. Jännitykset (ylhäällä) ja siirtymät (alhaalla).

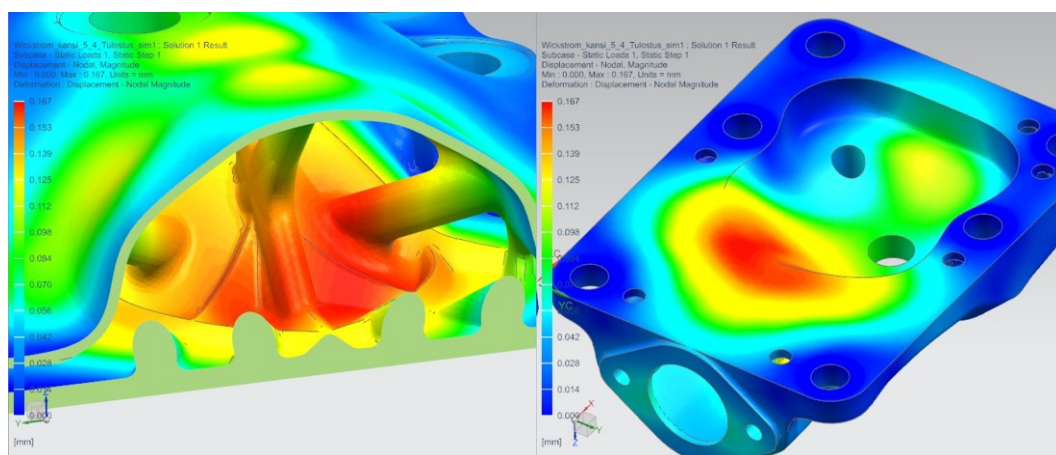
Simuloinnista saatujen tulosten perusteella olemassa olevia jäykisteitä kasvatettiin ja lisättiin uusia, tavoitteena oli palotilan etuosan siirtymän pienentäminen ja jännitysten pienentäminen. Simuloinnissa ilmaantui myös joitain jännityskeskittyymiä, joita pienennettiin lisäämällä materiaalia ja kasvattamalla pyörityssäteitä. Muutoksien jälkeen tehtiin aina uusi FEM-simulointi, tarkastettiin vaikutukset ja

tehtiin lisää muutoksia, mikäli tarpeen. Kuvassa 24 on esitettyä valmiiksi mallinnettuun sylinterinkanteen lisätyt jäykisteet. Yläkuvassa näkyy palotilan pinnalle, etusivuille ja taakse lisätyt kolmionmuotoiset jäykisteet, joilla pyrittiin pienentämään siirtymiä.



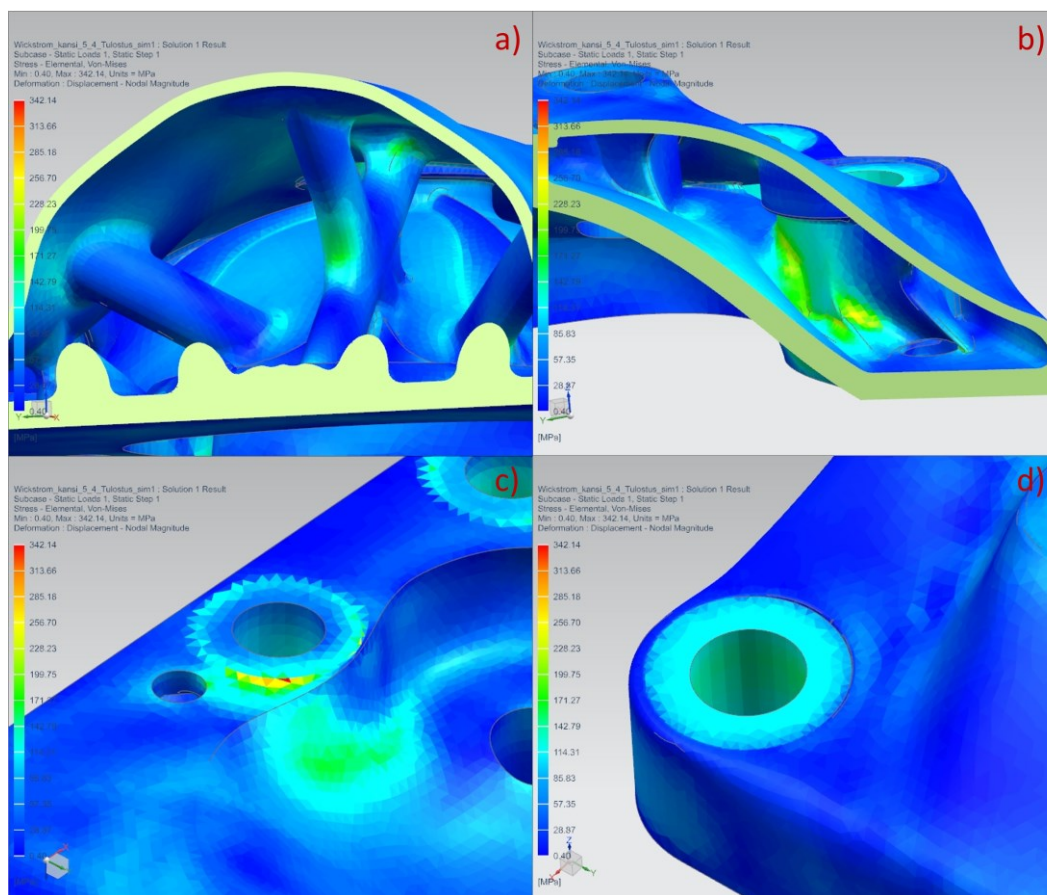
Kuva 24. Lopulliset jäykisteet.

Jäykisteitä lisäämällä ja muuttamalla suurin siirtymä saatiin pienennettyä 0,167 milliin, eli noin 33 % pienemmäksi verrattuna ensimmäiseen FEM-malliin. Siirtymän sijainti muuttui samalla hieman. Kuvassa 25 esitettyä valmiissa sylinterinkannessa esiintyvät siirtymät.



Kuva 25. Siirtymät valmiissa kannessa.

Ensimmäisessä FEM-mallissa ristituen leikkauskohdassa ollutta jännitystä saatiin pienennettyä noin 38 % 160 MPa:han. Sisäpuolen jäykisterakenteissa jännitys ei ylittänyt missään 170 MPa:ta. Jäykisterakenteissa suurimmat jännitykset esiintyvät pyörityksissä ja niihin vaikuttavat jännitykset ovat enimmäkseen puristavia. Kuvan 26 b-kohdassa on esitettyä keskimmäisen pulttitornin kyljessä esiintyvät jännityskeskittymät. Jännityksiä saatiin pienennettyä ja levitettyä suuremmalle alueelle kasvattamalla pyörityssäteitä. Suurin jännitys tällä alueella on noin 230 MPa. Alueella vaikuttava jännitys on puristavaa. Kuvan c-kohdasta käy ilmi suurimman sylinterinkannessa vaikuttavan jännityksen sijainti. Jännityksen suuruus on 342 MPa ja se sijaitsee kiinnitetyn ja vapaan pinnan rajalla. Myös muiden kiinnitettyjen pintojen reunoissa on jännityskeskittymät. Tästä pääteltiin, että rajalla sijaitsevat terävät jännityskeskittymät syntyvät vain FEM-mallissa kiinnitysratkaisun vuoksi, eikä niitä todellisessa käytössä muttereilla kiristettäessä muodostu niin terävinä, joten ne jätettiin huomiotta. Kuvan d-kohdassa on esitettyä pulttitornin sisäpintaan muodostunut noin 150 MPa:n jännitys. Jännitys pysyi kaikissa pulttitorneissa maltillisena.



Kuva 26. Jännitykset valmiissa kannessa. a) sisäpuolen jännitykset b) jännitykset keskimmäisen pulttitornin alueella c) suurin jännitys d) jännitykset pinnapultin reiän alueella.

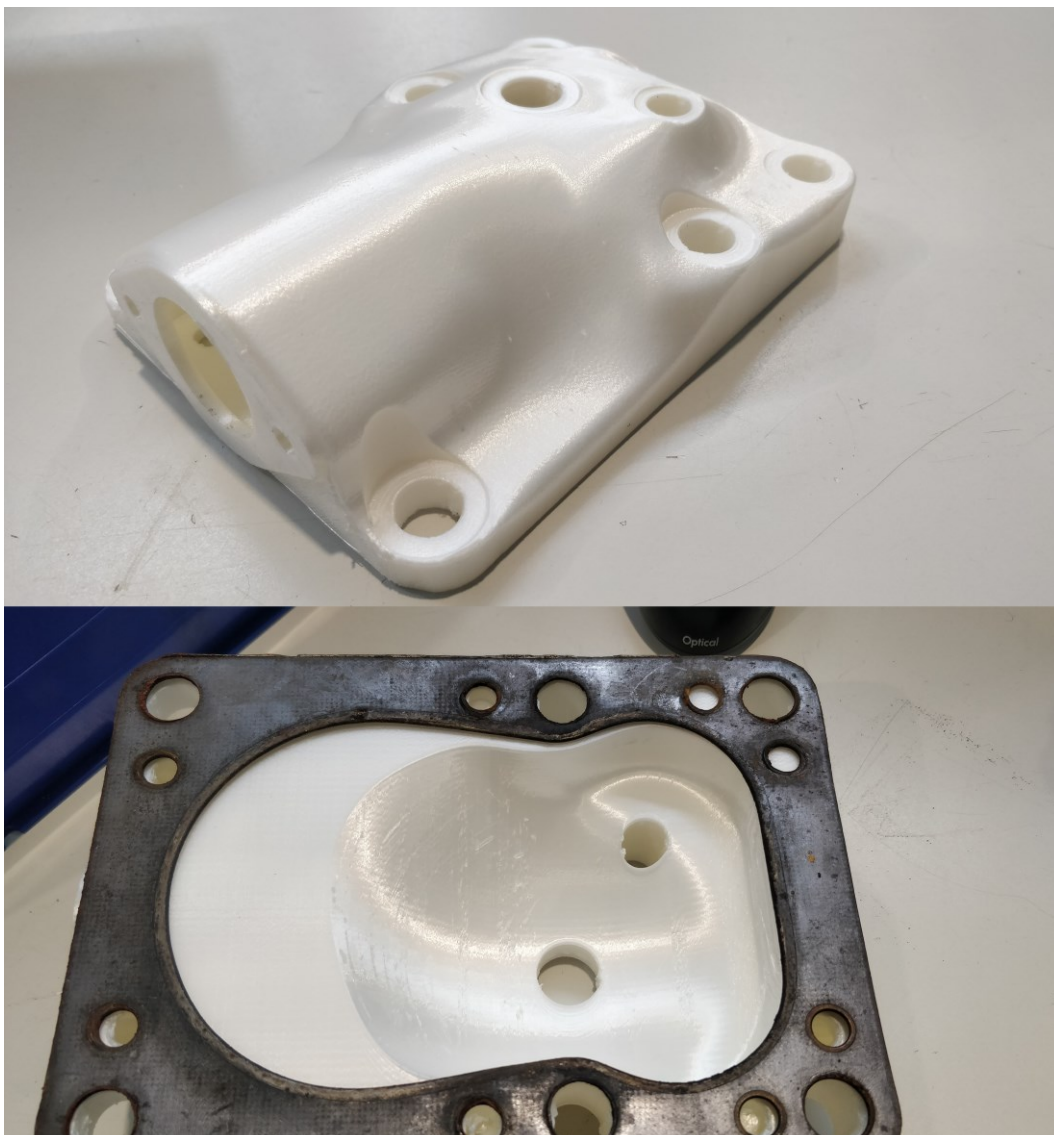
FEM-simuloinnin avulla sylinterinkannesta pyrittiin löytämään ja korjaamaan kaikkein selkeimmät mahdollisen rikkoontumisen aiheuttavat paikat. Kannen todellinen toiminta ja kestävyys selvitetään testikäytöllä moottorissa.

4.4 Osan valmistaminen

Digitaaliseen muotoon muuttamisen päätyttyä, eli kun osasta oli luotu valmis 3D-malli, voitiin aloittaa valmistusvaihe. Valmistusvaiheeseen kuului kannen 3D-tulostaminen, tulostukseen liittyvät jälkikäsittelyt ja -työstöt sekä osan toiminnallisuuteen liittyvät koneistukset.

4.4.1 3D-tulostaminen ja jälkikäsittely

Ennen metallisen osan tulostamista osasta tulostettiin muovinen testiversio. Testiversiolla pyrittiin varmistamaan, että kaikki mitat ja muodot ovat oikein, ennen metallisen osan valmistamista. Mittojen oikeellisuutta selvitettiin vertaamalla muovista ja alkuperäistä sylinterinkantta sekä kannentiivistettä tosiinsa. Kahden jäähdytyskanavan sijaintia sekä ryyppykupin ja sytytystulpan väliin jäävää ulkopintaa muutettiin hieman tarkastuksen perusteella. Muovinen kappale tulostettiin Technobothnian tulostuslaboratoriossa Ultimaker 3 Extended 3D -tulostimella. Kuvassa 27 muovista tulostettu testiversio.



Kuva 27. Muovista tulostettu testiversio. Mittojen tarkastamista kannentiivisteiden avulla.

Metallinen sylinterinkansi tulostettiin SLM:n valmistamalla 280 HI Twin -mallisella 3D-tulostimella toimeksiantajan tiloissa. Tulostus onnistui hyvin ja siinä käytettiin 50 μm kerrospaksuutta. Kuvasta 28 nähdään tulostettu sylinterinkansi ja kannen ulkopuolelle tulostetut tukirakenteet. Palotilan takaosa oli suurin pinta, joka vaati tukirakenteen. Sen olisi voinut tukea palotilan etuosasta lähtevällä ja palotilan sisällä nousevalla tukirakenteella, mutta etuosan pinnanlaadun säilyttämiseksi hy-

vänä, tukirakenne päätettiin muodostaa tulostusalustasta lähtien. Tämä lisäsi hie-
man materiaalin kulutusta, mutta palotilan etuosan heikentämistä pyrittiin välttä-
mään, siihen kohdistuvien suurien siirtymien vuoksi.



Kuva 28. Tulostettu sylinterinkansi ennen tukirakenteiden poistoa.

Alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen kannelle päätettiin tehdä lämpökäsittely, joka poistaisi jäännösjännityksiä. Lämpökäsittely tehdään kappaleiden ollessa tulostusalustassa kiinni. Vaikka lämpökäsittely laskee myötölujuutta merkittävästi se todettiin kuitenkin tarpeelliseksi, koska ilman lämpökäsittelyä kannen pelättiin murtuvan. Käsittelemättömän valmiiksi jännityksessä olevan ohutseinämäisen sylinterinkannen murtumista pidettiin melko todennäköisenä, sillä kanteen kohdistuu jatkuvasti vaihtuva kuormitus ja sen lämpötila muuttuu epätasaisesti. Pahimmaksi rikkoutumisen aiheuttavaksi skenaarioksi arvioitiin tilanne, jossa moottorin käydessä palotilan pinta on kuuma ja kannen ulkokuori kylmä, lämpötilaero kasvattaa tulostuksesta jääneitä jäännösjännityksiä ja moottorin käynnissä tapahtuu häiriö, joka aiheuttaa normaalia suuremman paineen palotilaan. Lämpökäsittely tehtiin pitämällä osaa 300 °C:ssa kaksi tuntia. Käsittely laskee tulostusmateriaalin

myötölujuutta noin 41 % 259 MPa:sta 154 MPa:han. Myötölujuuden merkittävän laskun ja FEM-simuloinnin tulosten perusteella sylinterinkannessa tulee tapahtumaan materiaalin myötämistä.

Lämpökäsittelyn jälkeen osa irrotettiin tulostusalustasta tähän soveltuvalla tarkkuusvannesahalla. Irrotuksen jälkeen tukirakenteet poistettiin ja osa lasikuulapuhallettiin. Lasikuulapuhallus tasoittaa kappaleen pintaa ja poistaa osin sintraantuneen tulostusjauheen.

4.4.2 Koneistus

Tulostetulle sylinterinkannelle täytyy tehdä koneistuksia. Koneistuksen vaativat tiivistepinnat ja kierteet. Tiivistepinnat täytyy koneistaa, koska tulostuksen jälkeinen pinnanlaatu ei ole riittävä ja koneistamalla varmistetaan myös riittävät geometriset toleranssit. Kierteet olisi voitu tulostaa myös suoraan ja avata kierretapilla, mutta ne päädyttiin koneistamaan kokonaan laadun varmistamiseksi. Sylinterinkantta varten koneistetaan myös ruostumattomasta teräksestä jatkoholkit, jotka mahdollistavat alkuperäisten pinnapulttien käytön tulostetun kannen kanssa. Koneistukset eivät olleet valmiita raporttia julkaistaessa.

Koneistuspiirustukset löytyvät liitteistä 1 ja 2. Piirustuksista näkee koneistettavat kohdat ja valmiin sylinterikannen päämitat.

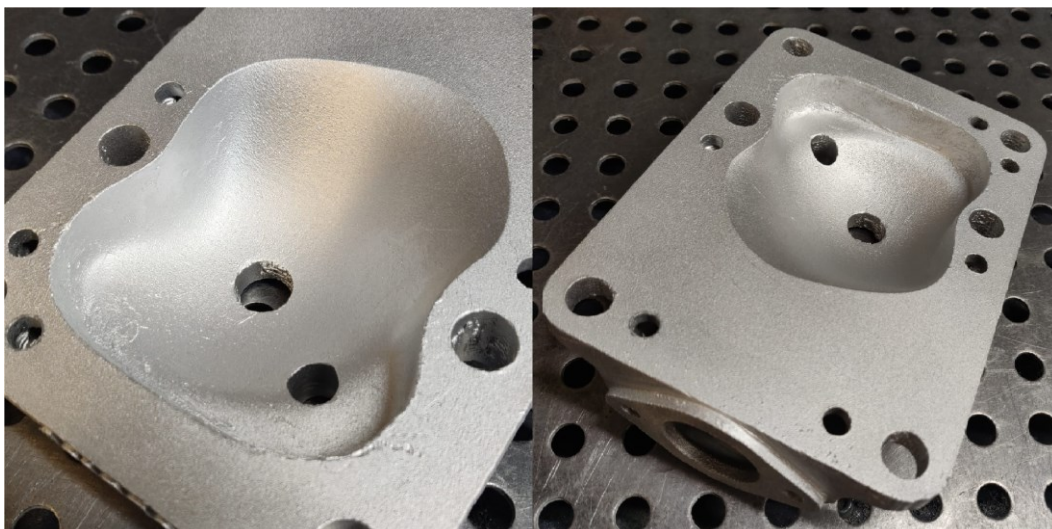
5 PROJEKTIN TUOTOKSET

Projektin konkreettisimpana tuotoksena syntyi metallista 3D-tulostettu sylinterinkansi. Sylinterinkannen lisäksi kertyi myös paljon tietoa 3D-tulostettavan varaosan suunnitteluprosessista. Seuraavissa luvuissa kuvaillaan projektin tuotoksia yksityiskohtaisemmin.

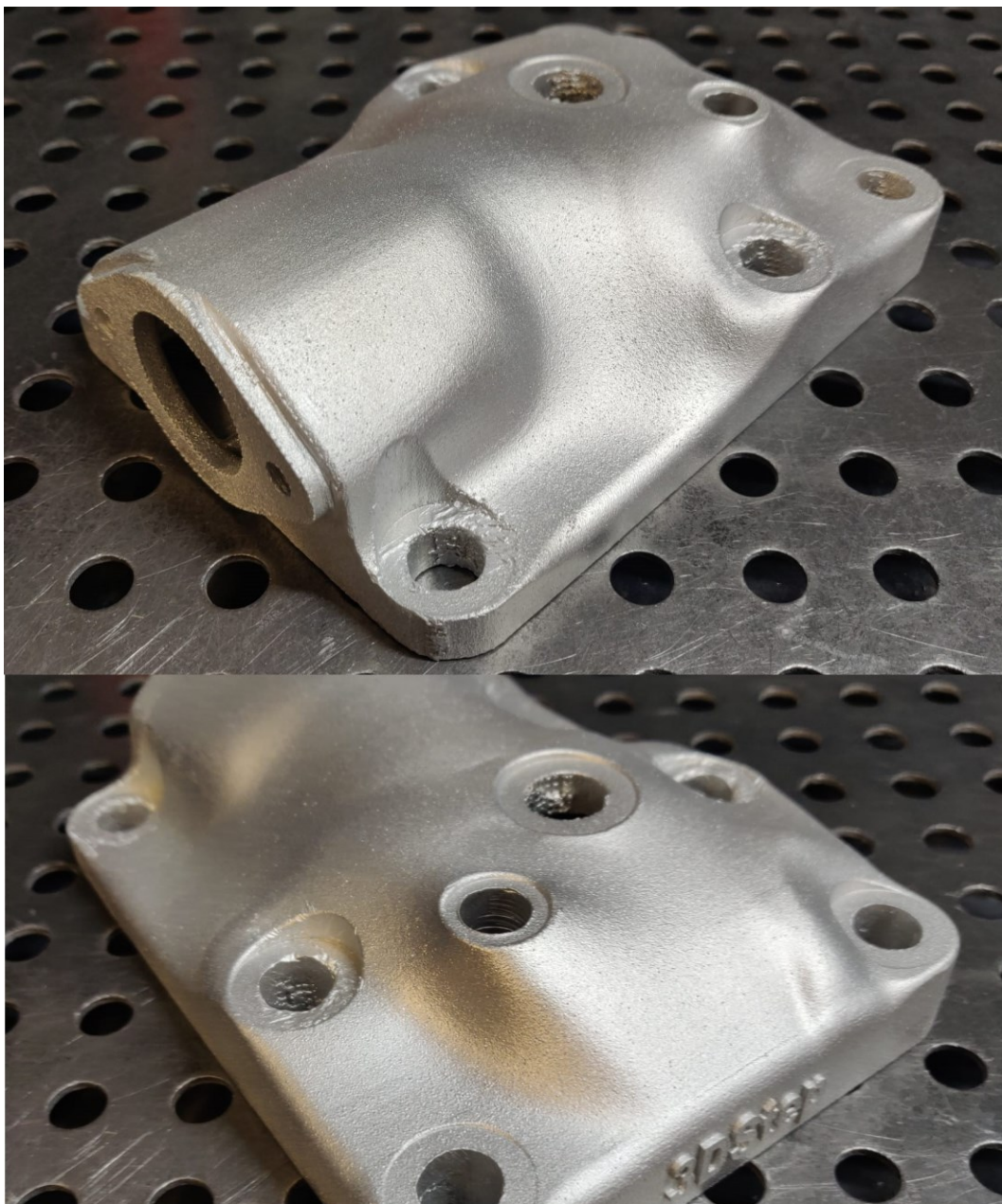
5.1 3D-tulostettu Wickströmin W-tyyppin sylinterinkansi

Wickströmin tulostettavia sylinterinkansia tulostettiin yksi kappale koekäytettäväksi. Yhden valmiin kannen myyntihinnaksi 0 % arvonlisäverolla arvioitiin noin 1 200 €. Jos kansia tulostetaan 8 kappaletta, eli täysi tulostusalustallinen, hinta on noin 700 € kappale.

Lähes valmis sylinterinkansi esitettynä kuvissa 29 ja 30. Ainoastaan kanteen tehtävät koneistukset puuttuvat.



Kuva 29. Tulostetun sylinterinkannen alapuoli.



Kuva 30. Tulostetun sylinterinkannen yläpuoli.

5.2 Tulostettavan varaosan suunnittelu

Projektissa tehtiin havaintoja tulostettavan varaosan suunnitteluprosessiin liittyen. Tähän lukuun on koottu keskeisimmät huomiot.

- Tulostettavaksi varaosaksi tulee valita sellainen osa tai kokoonpano, jonka suorituskykyä pystytään parantamaan, materiaalin määrää pienentämään

tai osien määrää vähentämään 3D-tulostuksen suomien mahdollisuuksien avulla

- Alkuperäisen osan rajapinnat ympäröiviin osiin tulee säilyttää myös tulostettavassa osassa, mikäli tulostetun osan halutaan olevan vaihtokelpoinen ilman muutoksia ympäröivään rakenteeseen
- Osan toiminnan kannalta merkityksettömien, mutta esimerkiksi kiinnitykseen vaadittavien piirteiden mahdollisuutta valmistaa perinteisin menetelmin tulee punnita tulostettavan materiaalin vähentämiseksi
- 3D-skannaus soveltuu monimutkaisten muotojen digitoimiseen
- Tulostusasennon valinnalla voidaan vähentää tukirakenteiden määrää
- Tulostusjälki vaihtelee, mikäli kappaleen pinnanlaadulle tai geometrialle on vaatimuksia, tulee suunnittelussa huomioida mahdolliset työstövarat
- Tulostetulle kappaleelle tehtävät jälkikäsittelyt tulee olla tiedossa ennen suunnittelun aloittamista, koska ne voivat vaikuttaa materiaaliominaisuuksiin
- Osan tulostussuunta tulee olla tiedossa, kun suunnittelu aloitetaan, jotta tukirakenteita ehkäisevät muodot voidaan suunnitella oikeisiin paikkoihin
- Topologian optimoinnista saadut tulokset tulee tarkastaa FEM-simuloinnilla kuormitusten vaikutusten varmistamiseksi.

Osa havainnoista on yleisesti tunnettuja ohjeistuksia 3D-tulostettavien kappaleiden suunnitteluun liittyen. Ohjeistusten merkitys konkretisoitui suunnitteluprosessin aikana.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää kuinka tunnistaa ja suunnitella metallista 3D-tulostettavia varaosia moottoreihin, joihin niitä ei enää ole saatavilla. Prosesiin kuuluvia vaiheita selvitettiin valmistamalla varaosa veneen keskimoottoriin. Tuotoksina syntyi yksi varaosa Wickströmin W-tyyppin keskimoottoriin ja listattiin tulostettavan varaosan suunnittelussa huomioon otettavia seikkoja. Opinnäytetyölle asetetut tavoitteet saavutettiin.

Tulosten luotettavuuden kannalta merkittävämmäksi ongelmaksi jää valmistetun osan kestävyys, koska osaan kohdistuvan kuormituksen väsyttävää luonnetta ei otettu suunnittelussa huomioon. Osan kestävyys testataan koekäyttämällä, mutta tämän tulokset eivät aikataulullisista syistä ehdi raporttiin. Toisaalta osaa on analysoitu huomattavasti suuremmalla paineella kuin siihen todellisuudessa kohdistuu, joka antaa hieman varmuutta. Osan kestämiseen liittyvä epävarmuus olisi voitu välttää valitsemalla valmistettavaksi sellainen osa, jossa kuormitukset olisivat olleet yksinkertaisempia ja niiden vaikutukset helpommin ymmärrettäviä.

Projektin etenemistä viivästyttivät 3D-skannerin rajalliset käyttömahdollisuudet ja metallisen osan tulostamisaikatauluun liittyneet tuotannolliset syyt. Palotilan skannaaminen ei ollut mahdollista suunnittelun alkuvaiheessa, joten osasta ei voitu luoda tarkkaa mallia, joka siirsi muita vaiheita eteenpäin. Tuotannolliset syyt, jotka viivästyttivät aikataulua, liittyivät eri tulostusmateriaalien käyttöön. Kun osan 3D-malli oli valmis, 3D-tulostimella, jolla osa piti valmistaa, tulostettiin eri materiaalia. Ilman näitä viivästyksiä osan testaaminen olisi saattanut ehtiä raporttiin.

Projekti jatkuu valmistetun osan testaamisella ja koeajolla moottorissa, johon se on suunniteltu. Testaaminen on projektin viimeinen vaihe. Mikäli osa rikkoutuu testausvaiheessa, voidaan siitä valmistaa helposti vahvistettu versio muokkaamalla 3D-mallia ja tulostamalla uusi osa.

Opinnäytetyön aihe oli todella mielenkiintoinen. Työ opetti paljon uutta lisäävästä valmistuksesta yleensä ja erityisesti metallien lisäävästä valmistuksesta. Projektin aikana uutta ja varmasti tarpeellista tietoa karttui tulostettavan kappaleen suunnittelusta.

Opinnäytetyö toi ilmi, että vanhojen laitteiden varaosille on kysyntää. Työssä valmistettiin varaosa harvinaiseen moottoriin, eikä sillä ole suurta kaupallista potentiaalia. Tulostettavien varaosien potentiaalia olisi mielenkiintoista tutkia kaupallisesta näkökulmasta valmistamalla haluttu osa yleisesti käytössä olevaan laitteeseen, tavoitellen mahdollisimman pieniä valmistuskustannuksia.

Varaosan valmistaminen 3D-tulostamalla on mahdollista. Valmistustekniikka myös mahdollistaa osan suorituskyvyn parantamisen ja helpottaa muutosten tekemistä osaan jälkikäteen. Resurssitehokkaan tulostettavan varaosan suunnittelu edellyttää valmistustekniikan ja käyttökohteen tuntemista.

LÄHTEET

3DStep. Kotisivut. Viitattu 9.2.2022. <https://www.3dstep.fi>

Adam, G.A.O. & Zimmer, D. 2015. On design for additive manufacturing: Evaluating geometrical limitations. *Rapid Prototyping Journal*, 21,6 662-670. Viitattu 10.3.2022. <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-06-2013-0060>

Aikakauslehtiartikkeli. 1933. WICKSTRÖM VELJESTEN moottoritehdas. Suomen moottorilehti. 12. 43–44. Viitattu 4.2.2022. <https://digi.kansalliskirjasto.fi/aikakausi/binding/1012578?page=45>.

Bikas, H., Stavropoulos, P. & Chryssolouris, G. 2016. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 83, 389–405. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>

Christensen, P.W. & Klarbring, A. 2009. An Introduction to Structural Optimization, Linköping. Springer

European Aluminium Association. 2011. Applications – Power train – Cylinder heads. Viitattu. 18.4.2022. <https://www.european-aluminium.eu/media/1580/aam-applications-power-train-4-cylinder-head.pdf>

Farooq, A., Ahmad, M. A. R., Khurram, A., Rao, T. V. V. L. N., & Haizum, A. Z. 2018. An In-Depth Review on Direct Additive Manufacturing of Metals. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 328. Viitattu 31.3.2022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/328/1/012005>

Grönbacka, R. 2014. MARAKATTEJA JA KISSANPÄITÄ – vaasalaisten moottoritehtaiden tarina. Vaasa. Vaasan Veteraaniautoseura ry

Heoy Geok, H. Abdullah, S. Yusoff, A. Shamsudeen, A. & Mohamad, T. 2009. Experimental Investigation of Performance and Emissions of a Sequential Port Injection Compressed Natural Gas Converted Engine. *SAE Technical Papers*. 32. Viitattu 5.4.2022. <https://www.researchgate.net/publication/260810767>

Jiang, J., Xu, X., & Stringer, J. 2018. Support structures for additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2,4. Viitattu 10.3.2022. doi:<http://dx.doi.org/10.3390/jmmp2040064>

Kananen, V. 2022. Chief Technology Officer. 3DStep Oy. Haastattelu. 19.4.2022

Keränen, T. 2022. Moottoriharrastaja. Haastattelu 17.2.2022

Klahn, C., Leutenecker, B. & Meboldt, M. 2014. Design for additive manufacturing - Supporting the substitution of components in series products. *Procedia CIRP* 21, 138-143. Viitattu 8.3.2022. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.145>

Kokkonen, P., Salonen, L., Virta, J., Hemming, B., Laukkanen, P., Savolainen, M., Komi, E., Junntila, J., Ruusuvoori, K., Varjus, S., Vaajoki, A., Kivi, S., & Welling, J. 2016. Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT-R-03160-16. Viitattu 10.3.2022. <https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2016/VTT-R-03160-16.pdf>

Komi, E. 2016. Design for Additive Manufacturing. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT-R-03159-16. Viitattu 1.4.2022. <https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2016/VTT-R-03159-16.pdf>

Laitinen, K. 2012. Korroosio. Teräsrakenneyhdistys. Viitattu 15.2.2022. <https://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/151/8ac778e/korroosio.pdf>

Peng, X., Kong, L., Fuh, J.Y.H. & Wang H. 2021. A Review of Post-Processing Technologies in Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 5,2:38. Viitattu 11.3.2022. <https://doi.org/10.3390/jmmp5020038>

Salminen, H. J. 2022. Technical Advisor. Finno Exergy Oy Ltd. Haastattelu 10.2.2022

Salmi, M., Partanen, J., Tuomi, J., Chekurov, S., Björskstrand, R., Huutilainen, E., Kukko, K., Kretschmar, N., Akmal, J., Jalava, K., Koivisto, S., Vartiainen, M., Metsä-Kortelainen, S., Puukko, P., Jussila, A., Riipinen, T., Reijonen, J., Tanner, H. & Mikkola, M. 2018. Digitaaliset varaosat. Aalto university. Viitattu 3.2.2022. <https://aaltodoc.aalto.fi:443/handle/123456789/30188>.

SFS-EN ISO/ASTM 52900. Additive manufacturing. General principles. Fundamentals and vocabulary. 2. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 2021. 32 s.

SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 (kumottu). Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 2017. 47 s.

Siemens Industry Software Inc. Topology Optimization for Designers Help. Käyttöopas. Siemens NX12 -suunnitteluohjelma

Simpson, T. W. 2017. Trade-offs with AM. *Modern Machine Shop* 90,1, 66,68. Viitattu 7.3.2022. <https://www.proquest.com/trade-journals/trade-offs-with-am/docview/1903824061/se-2?accountid=27304>

SLM-SOLUTIONS. Al-Alloy AlSi10Mg. Materiaalitietoesite. Viitattu 13.4.2022. <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/powders/>

Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkokirja. 21. painos. Jyväskylä. Genesis-kirjat

WICKSTRÖM Ohjekirja. Oy Vaasan moottori. Viitattu 21.2.2022.
<https://manuall.fi/wickstrom-w2-venemoottori/>

Wickström W-moottorit. Esite. Viitattu 21.2.2022. Vaasan auto- ja moottorimuseo.

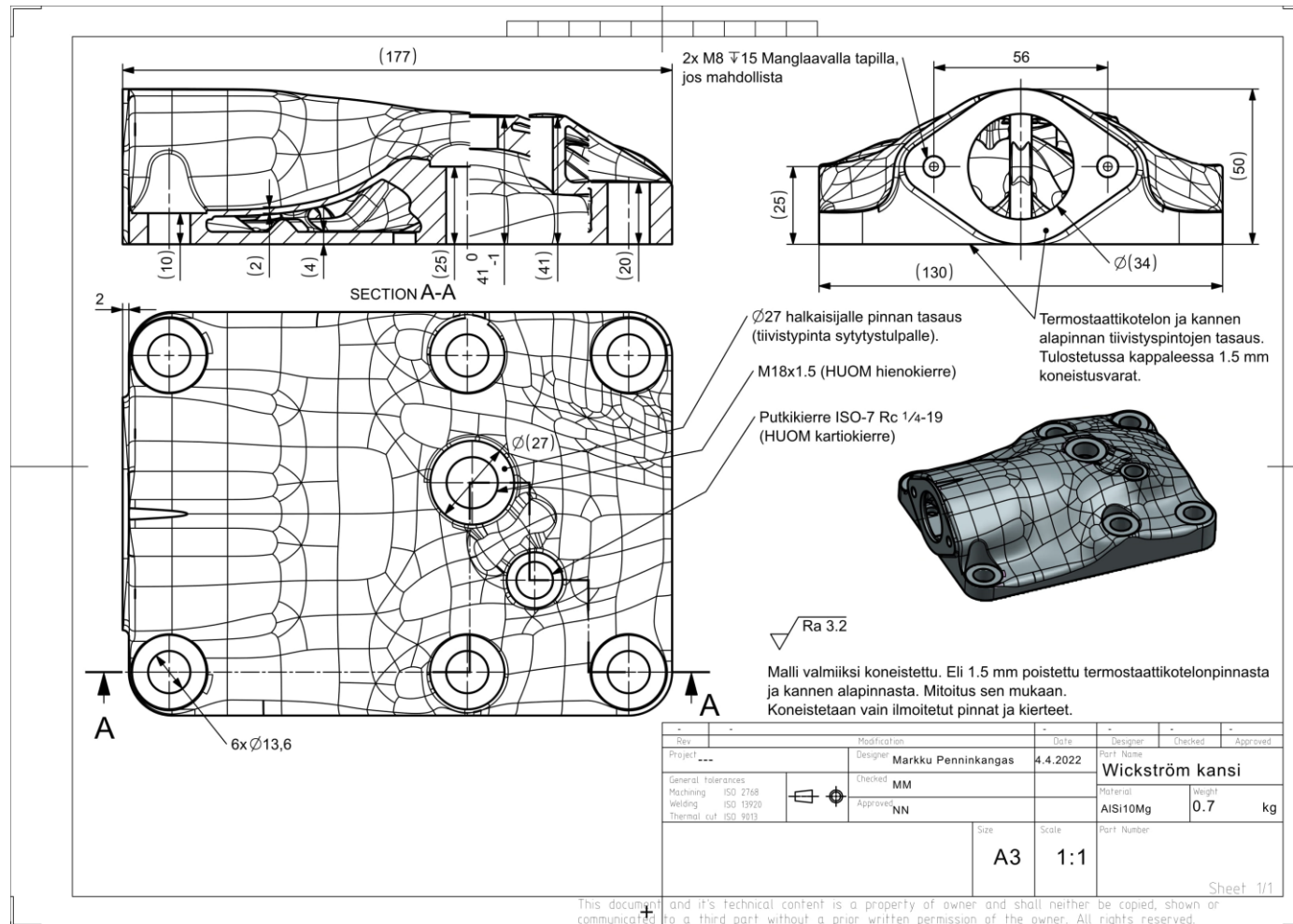
Wiberg, A., Persson, J., & Ölvander, J. 2021. An optimisation framework for designs for additive manufacturing combining design, manufacturing and post-processing. *Rapid Prototyping Journal* 27,11, 90-105. Viitattu 7.3.2022.
<http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-02-2021-0041>

Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. 2015. Review of selective laser melting : materials and applications. *Applied Physics Reviews*. 2,4. Viitattu 1.4.2022. <https://doi.org/10.1063/1.4935926>

Yunlong, T. & Yaoyao Fiona, Z. 2016. A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance. *Rapid Prototyping Journal* 22,3, 569-590. Viitattu 28.2.2022. <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-01-2015-0011>

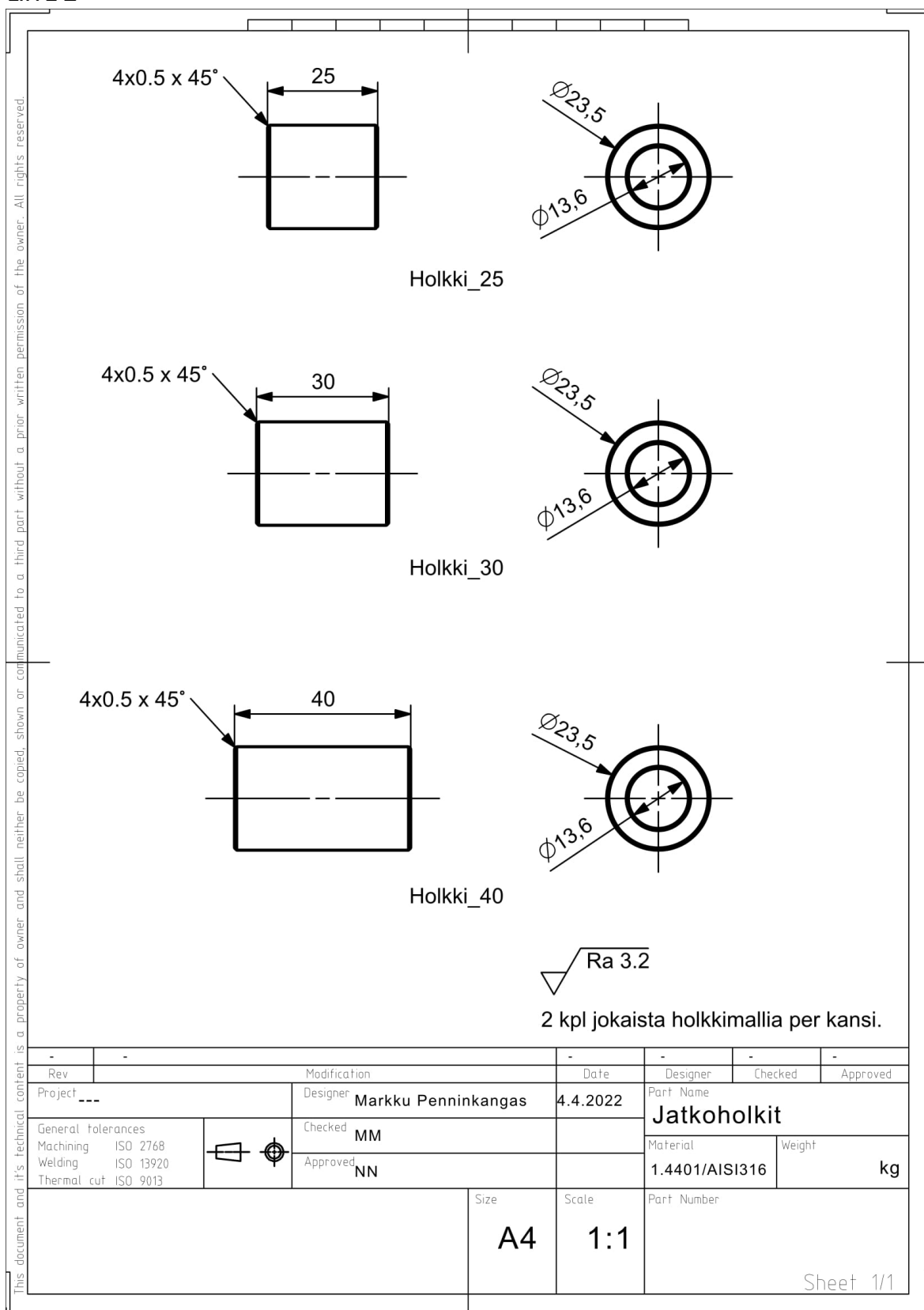
LIITTEET

LIITE 1



Kuva 31. Sylinterinkannen koneistuspiirustus.

LIITE 2



Kuva 32. Jatkoholkkien koneistuspiirustus.