



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Vesa Marttila

Hybridivalmistus

Metallin ainetta lisäävän valmistuksen ja moniakselikoneistuksen yhdistäminen
hybridivalmistusjärjestelmäksi

Opinnäytetyö

Syksy 2022

Insinööri (AMK), Konetekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (AMK), Konetekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Kone- ja tuotantotekniikka

Tekijä: Vesa Marttila

Työn nimi: Hybridivalmistus: Metallin ainetta lisäävän valmistuksen ja moniakselikoneistuksen yhdistäminen hybridivalmistusjärjestelmäksi

Ohjaaja: Samuel Suvanto

Vuosi: 2022

Sivumäärä: 107

Liitteiden lukumäärä: 6

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia metallin ainetta lisäävän valmistuksen ja moniakselikoneistuksen yhdistämistä niin sanotuksi hybridivalmistusjärjestelmäksi. Työn toimeksiantajana toimi Lillbacka Powerco Oy.

Metallin ainetta lisäävällä valmistuksella voidaan saavuttaa paljon moninaisia hyötyjä, sen tuoman geometrian vapauden ansiosta. Tästä huolimatta ainetta lisäävässä valmistuksessa on paljon haasteita, joista usein vaietaan. Näistä merkittävimpiä ovat kalliit valmistuskustannukset sekä valmistettujen kappaleiden riittämätön pinnanlaatu ja mittatarkkuus. Tämän vuoksi alan kehityksen kannalta on tärkeää tutkia, voidaanko näitä haasteita ratkaista yhdistämällä ainetta lisäävä valmistus sekä perinteisempi valmistusmenetelmä, koneistus, monimutkaisien metallisten kappaleiden tuotannossa.

Tutkimustyössä luotiin tehdyn kartoituksen perusteella konsepti hybridivalmistusjärjestelmästä. Luotua hybridivalmistusjärjestelmänkonseptia testattiin onnistuneesti kahden erilaisen tapaustutkimuksen avulla, käyttäen niissä Lillbacka Powerco Oy:n ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä ja 5-akselista työstökeskusta.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin lupaavia tuloksia hybridivalmistuksesta ja sillä saavutettavista hyödyistä. Lupaavista tuloksista huolimatta vaatii hybridivalmistus vielä jatkotutkimusta, ja toimeksiantajalle esitettiin erilaisia jatkotutkimus- ja kehityskohteita.

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree program: Mechanical Engineering

Specialization: Mechanical and Production Engineering

Author: Vesa Marttila

Title of thesis: Hybrid manufacturing: combining metal additive manufacturing and multi-axis machining into a hybrid manufacturing system

Supervisor: Samuel Suvanto

Year: 2022

Number of pages: 107

Number of appendices: 6

The thesis aimed to investigate the combination of metal additive manufacturing and multi-axis machining into a so-called hybrid manufacturing system. The thesis was made for Lillbacka Powerco Oy.

Metal additive manufacturing can achieve many diverse benefits, thanks to the freedom of geometry it brings. Despite this, there are many challenges in additive manufacturing, which are often kept silent. The most significant of these are the expensive manufacturing costs, insufficient surface quality, and lack of dimensional accuracy of the manufactured parts. Therefore, from the point of view of the development of the industry, it is important to investigate whether these challenges can be solved by combining additive manufacturing and the more traditional manufacturing method of machining together in the production of complex metal pieces.

Based on the mapping, a concept of a hybrid manufacturing system was created in the thesis. The created concept of a hybrid manufacturing system was successfully tested with the help of two different case studies, using Lillbacka Powerco Oy's additive manufacturing methods and a 5-axis machining center.

As a result of the thesis, promising results were obtained from the use of hybrid manufacturing and from the benefits it could achieve. Despite these promising results, hybrid manufacturing would still require further research. Further research and development targets were presented to Lillbacka Powerco Oy.

Keywords: additive manufacturing, multi-axis machining, CNC machining, hybrid manufacturing

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	1
Thesis abstract	2
SISÄLTÖ	3
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo	5
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	10
1 JOHDANTO	11
2 TEORIA.....	14
2.1 Ainetta lisäävä valmistus	14
2.2 Koneistus	24
2.3 Hybridivalmistus	38
3 TUTKIMUSTYÖN JA SEN TOIMEKSIANTAJAN ESITTELY	42
4 NYKYTILAN KARTOITUS JA KEHITYSKOHTTEIDEN MÄÄRITYS	44
4.1 Lillbacka Powercon valmiudet hybridivalmistukseen	44
4.2 Hybridivalmistuksen haasteiden määrittäminen tutkimustyötä varten	49
4.3 Tutkimus- ja kehitystyön suunnitelma haasteiden pohjalta.....	52
5 HYBRIDIVALMISTUSJÄRJESTELMÄKONSEPTIN LUOMINEN.....	54
5.1 Arvon muodostuminen hybridivalmistuksessa.....	54
5.2 Lähestymistapojen valinta	55
5.3 Esisuunnittelun merkitys hybridivalmistuksessa	56
5.4 Konesimulointi CAM-ohjelmistossa on tärkeä osa hybridivalmistusta	59
5.5 Hybridivalmistuksen tarkastelun kulku.....	61
6 TAPAUSTUTKIMUS: KONEISTETUT POHJAT HYBRIDIVALMISTUKSESSA.....	63
6.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet.....	63
6.2 Hybridivalmistusalueiden suunnittelu ja valmistus	64
6.3 Ainetta lisäävä valmistus koneistettujen pohjien päälle	67
6.4 Esimerkki koneistettujen pohjien käytöstä ainetta lisäävässä valmistuksessa	70
6.5 Erilaiset paikoitusvaihtoehdot hybridivalmistuksen hyödyntämiseksi käytännössä. .	74
7 TAPAUSTUTKIMUS: HYDRAULIIKKALOHKON VALMISTAMINEN	77

7.1	Tutkimuksen tausta ja tavoitteet	77
7.2	Valmistusprosessin suunnittelu ja valmistusohjelmien luomineen	77
7.3	Kappaleen 3D-tulostus	85
7.4	Kappaleen kiinnitys ja 3D-tulostamisen mittatarkkuuden tutkiminen	88
7.5	Kappaleen koneistus	94
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	99
8.1	Hybridivalmistusjärjestelmänkonsepti.....	99
8.2	Tapaustutkimus: koneistetut pohjat hybridivalmistuksessa	99
8.3	Tapaustutkimus: hydraulikkalohkon valmistus.....	100
8.4	Opinnäytetyöntekijän loppusana	101
	LÄHTEET	103
	LIITTEET	107

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Muottiosa ennen ja jälkeen koneistuksen. Lämpökamerakuvaus prosessin aikana.	23
Kuva 2. Levymäinen kiinnitysratkaisu usean työkappaleen samanaikaiseen valmistukseen.	33
Kuva 3. Tyypillinen hybridivalmistusprosessi, jossa yhdistyvät ainetta lisäävä valmistus DED-menetelmällä ja 5-akselikoneistus.....	39
Kuva 4. Haas UMC1000ss paletinvaihtojärjestelmällä.....	45
Kuva 5. ProX DMP 300 metallin 3D-tulostin.	47
Kuva 6. PostProcess merkinen Rador jälkikäsittelytärtytin.....	48
Kuva 7. Lillbacka Powercon käyttämät Prusa i3 MK3 muovi 3D-tulostimet.	48
Kuva 8. Vasemmalla pohjasta päin kuvattuna irrotettava pohjalevy, johon valmistusalusta kiinnitettynä kuusiokoloruuvein. Oikealla valmistusalusta ja Prox DMP300 metallin 3D-tulostimen pohjalevy kokoonpantuna.	58
Kuva 9. Vesileikattu aihio BÖHLER W300 kuumatyöteräksestä.....	65
Kuva 10. Vasemmalla hybridivalmistusalustat koneistuksen jälkeen kokoonpantuna pohjalevyille. Oikealla hybridivalmistusalustat kokoonpantuna tasopintojen hionnan jälkeen.	67
Kuva 11. Vasemmalla hybridivalmistusalustat ennen pulverin tasausta. Oikealla hybridivalmistusalustat pulverin tasauksen ja ensimmäisen pulverikerroksen levityksen jälkeen.	68
Kuva 12. Hybridivalmistusalustat niille valmistettuineen kappaleineen metallin 3D-tulostimessa ylijäämäpulverin poistamisen jälkeen.....	69
Kuva 13. Hybridivalmistusalusta muottiosineen lämpökäsittelyn ja kiinnittymisen testaamisen jälkeen.	70
Kuva 14. Havainnollistava muovitulostettu malli hydrauliiikkalohkosta.....	78
Kuva 15. Murtunut havainnollistava malli koneistuksen jälkeen.....	84

Kuva 16. Hydrauliiikkalohko tulostettuna pulverinpoiston jälkeen, ohessa tulostettuna myös Lillbacka pullonavaimia.	86
Kuva 17. Hydrauliiikkalohko kiinni valmistusalustassa.	87
Kuva 18. Hydrauliiikkalohko ennen ja jälkeen manuaalisesti suoritetun tukien poiston.	87
Kuva 19. Hydrauliiikkalohko jälkikäsitteilytärtyttimessä.	88
Kuva 20. Vasemmalla muotoleukojen asettaminen suoraan käyttäen heittokelloa. Oikealla työkappale kiinnitettynä muotoleukoihin ja kohdistettuna heittokellolla.	89
Kuva 21. Työkappaleen nollapisteet asetettuna työstökeskuksen ohjauksen tietoon.	89
Kuva 22. Vasemmalla hydrauliiikkalohkon ulostulot numeroituna. Oikealla elektroninen mittapää ja hydrauliiikkalohko.	91
Kuva 23. Hydrauliiikkalohkon koneistamisessa käytetyt lastuavat työkalut teräpitimineen.	95
Kuva 24. Hydrauliiikkalohkon tasopinnan koneistus käynnissä.	95
Kuva 25. Hydrauliiikkalohkon molemmat tasopinnat koneistuksen jälkeen.	96
Kuva 26. Vasemmalla kuvaa hydrauliiikkalohkon ulostulojen koneistuksesta. Oikealla hydrauliiikkalohkon ulostulot oikeisiin halkaisijamittoihin koneistettuna.	96
Kuva 27. Vasemmalla hydrauliiikkalohkon kierrejärsintää. Oikealla valmis hydrauliiikkalohko, jonka kierteille sovitettuna hydrauliiikkaliittimet.	97
Kuva 28. Hydrauliiikkalohkon ulommaisiin kierteisiin muodostunut lievä värinäjäälki.	98
Kuva 29. Hydrauliiikkalohko ennen jälkikäsitteilyä ja jälkikäsitteilyjen jälkeen.	98
Kuvio 1. Ainetta lisäävän valmistuksen liikevaihdon kasvu vuosina 2006–2018 tuotteille ja palveluille maailmanlaajuisesti.	11
Kuvio 2. Opinnäytetyön rakenne.	13
Kuvio 3. Ainetta lisäävän valmistuksen havainnekuva.	14

Kuvio 4. SLS-menetelmä ja sen osat.....	17
Kuvio 5. FDM/FFF-tulostimen osat.....	18
Kuvio 6. Topologian optimoinnin prosessi, esimerkkinä suihkumoottorin kannake.....	21
Kuvio 7. Vasemmalla perinteisillä valmistusmenetelmillä kanavisto, oikealla jouhevampi ainetta lisäävästi valmistettu kanavisto.....	22
Kuvio 8. 3D-tulostettuja kanavistovaihtoehtoja, oikealla perinteisillä menetelmillä valmistettu kanavisto.....	22
Kuvio 9. Ainetta poistavan valmistuksen eli koneistuksen havainnekuva.....	25
Kuvio 10. Havainnekuva erilaisista koneistuksen työstömenetelmistä ja niiden työstöliikkeistä.....	26
Kuvio 11. Vasemmalla 3-akselinen ja oikealla 5-akselinen työstökeskus akselistoituneen.....	28
Kuvio 12. Havainnekuva 5-akselisen työstökeskuksen saavutettavista työstösuunnista kappaleen valmistamiseksi.....	29
Kuvio 13. Erilaisia työkappaleen kiinnitysmenetelmiä.....	32
Kuvio 14. CNC-työstökeskukseen kiinnittyvä jyrsinistukka, johon lastuavat työkalut kiinnitetään (a), sekä yleisempiä CNC-työstökeskuksella käytettyjä lastuavia työkaluja (b-f).....	35
Kuvio 15. Hybridivalmistuksella saavutettavat hyödyt.....	40
Kuvio 16. Yhteenveto Lillbackan hyvästä valmiudesta hybridivalmistuksen kehittämiseksi...49	
Kuvio 17. Yhteenveto kartoitetuista haasteista, jotka ovat isossa roolissa hybridivalmistuksessa.....	51
Kuvio 18. Hybridivalmistuksen haasteet ja niihin tässä opinnäytetyössä käytettävät tutkimus- ja kehitysmenetelmät sekä opinnäytetyön osiot.....	52
Kuvio 19. Mindmap hybridivalmistuksen arvonmuodostumisesta sekä sen hyödyistä ja haasteista.....	54

Kuvio 20. Hybridivalmistuksen lähestymistapojen valinnan prosessi.....	55
Kuvio 21. Esisuunnittelun kulku 3D-mallien hallinnan näkökulmasta.....	57
Kuvio 22. Ainetta lisäävässä valmistuksessa käytettävän valmistusalustan 3D-malli.....	58
Kuvio 23. Esimerkki hybridivalmistuksen esisuunnittelusta.....	59
Kuvio 24. Luotu konesimulointimalli toiminnassa; simuloinnissa meneillään viistejyrsintä.....	60
Kuvio 25. Luotu konesimulointimalli törmäyksen sattuessa, kyseisessä esimerkissä varsijyrsin törmää käytettyyn puristimeen.	61
Kuvio 26. Hybridivalmistuksen tapauskohtaisen tarkastelun kulku prosessikaaviona.....	62
Kuvio 27. Hybridivalmistusalustojen 3D-malli. Vasemmalla puolella kuvattuna yläviistosta ja oikealla kuvattuna alaviistosta.....	64
Kuvio 28. Hybridivalmistusalustojen kiinnitysmekanismi.....	65
Kuvio 29. Esimerkki hybridivalmistuksen esisuunnittelusta.....	71
Kuvio 30. Esisuunnittelu ympäristöstä STEP-tiedostomuodossa tuotu 3D-mallien kokoonpano asettuu automaattisesti halutunlaisesti 3DXpert-ohjelmistossa, esisuunnittelun ansiosta.....	71
Kuvio 31. Kokoonpanosta jäljelle jätetyt ainetta lisäävästi valmistettavat geometriat asetettuna nolatasoon Z-akselilla 3DXpert-ohjelmistossa.....	72
Kuvio 32. Vasemmalla hybridivalmistuksen ainetta lisäävä geometria. Oikealla perinteisen ainetta lisäävän valmistuksen geometria.	73
Kuvio 33. DMP Calibration Tool -nimisen työkalun toimintaprosessin kuvaus.....	74
Kuvio 34. Hahmotelma DMP Calibration Tool-työkalun käytöstä virtuaalisessa esimerkissä.....	75
Kuvio 35. Hahmotelma ainetta lisäävien paikoituspintojen käytöstä hybridivalmistuksessa. .	75
Kuvio 36. Hahmotelma ainetta lisäävästi valmistettujen paikoituspintojen käytöstä työstökeskuksella kiinnityspintojen koneistamiseksi.	76

Kuvio 37. Muotoleukojen suunnittelua Fusion360 CAD-ohjelmalla.	79
Kuvio 38. Muotoleukojen upotus Fusion360 CAD-ohjelmassa.	80
Kuvio 39. Hydrauliiikkalohkon asettelu tukineen 3DXpert-ohjelmassa.	81
Kuvio 40. Valmistettava hydrauliiikkalohko ja kappaleen koneistuskiinnittimet Mastercam-ohjelmistossa.	81
Kuvio 41. Tasopintojen koneistuksen työstöradat Mastercam ohjelmistossa.....	82
Kuvio 42. Spiraalijyrsinnän työstöradat Mastercam-ohjelmistossa.	83
Kuvio 43. Kierrejiyrsinnän työstöradat Mastercam-ohjelmistossa.....	84
Kuvio 44. Kappaleen ulostulojen sijainnit toisiinsa nähden, mittayksikkönä millimetri (mm). Yllä Y-suuntaiset ja alla X-suuntaiset etäisyydet. Jokainen ulostulo myös nimettynä numerolla (kuvankaappaus CAD-mallista).	90
Kuvio 45. Reikien halkaisijatiedot reikien numerointeineen.	93
Kuvio 46. Tutkimustyössä saavutetun ainetta lisäävän valmistuksen tarkkuus suhteutettuna SFS-EN ISO 22768-1:1993 yleistoleranssitaulukkoon.	94
Taulukko 1. Esimerkki G-koodista 3-akseliselle CNC-työstökeskukselle lauseiden selityksineen.	27
Taulukko 2. 3D-mallin mukaiset etäisyydet reiän 1. sijaintiin nähden	91
Taulukko 3. Toteutuneet elektronisella mittapäällä saadut sijainnit työstökeskuksen kotiasemaan nähden.....	92
Taulukko 4. Elektronisella mittapäällä saadut sijaintiedot muutettuna reiän 1 sijainnin suhteen	92
Taulukko 5. Toteutuneet mittavirheet ainetta lisäävässä valmistuksessa	93
Taulukko 6. Taulukko halkaisijamittojen mittavirheestä ainetta lisäävässä valmistuksessa ...	94

Käytetyt termit ja lyhenteet

Ainetta lisäävä valmistus	Valmistusmenetelmä, jossa valmistettava esine muodostuu toisiinsa kiinnittyvistä kaksikulotteisista kerroksista.
CAD	Computer Aided Design, eli CAD tarkoittaa vapaasti suomennettuna tietokoneavusteista suunnittelua.
CAM	Computer Aided Manufacturing, eli CAM tarkoittaa vapaasti käännettynä tietokoneavusteista valmistusta.
CNC	Computer Numerical Control, eli CNC tarkoittaa vapaasti käännettynä tietokoneen ohjaamista numeerisesti.
Hybridivalmistus	Ainetta lisäävän valmistuksen ja koneistuksen yhdistäminen samaan prosessiin kappaleen valmistamiseksi.
Jauhepetisulatus	Ainetta lisäävä valmistusmenetelmä, jossa muovi- tai metallijauhetta sulatetaan kerroksittain toisiinsa kiinni kappaleen poikkileikkauksen mukaisesti.
Materiaalin pursotus	Ainetta lisäävä valmistusmenetelmä, jossa lämpömuovattava materiaali kuumennetaan sulamispisteeseen ja työnnetään pursottimen läpi kiinteiksi kaksikulotteisiksi kerroksiksi.
Koneistus	Valmistusmenetelmä, jossa haluttua kappaletta isommasta alkuaihionsta poistetaan materiaalia leikkaamalla, kunnes haluttu muoto on saatu esiin aihion sisältä.
Moniakselinen CNC-koneistus	Yleistynyt CNC-koneistuksen muoto, jossa työstäviä liikeakseleita on tavallista enemmän.

1 JOHDANTO

Valmistava teollisuus kehittyi merkittävästi vauhtia. Alan kovan kilpailun vuoksi valmistavassa teollisuudessa menestyminen edellyttää, että uusia teknologioita tutkitaan ja hyödynnetään laajasti. Uudenlaisilla valmistusmenetelmillä voidaan saada aikaan merkittäviä hyötyjä, mutta niiden hyödyntämisessä on haasteensa.

Tässä opinnäytetyössä perehdytään kahteen moderniin monimutkaisien metallisten kappaleiden valmistukseen soveltuvaan menetelmään: ainetta lisäävään valmistukseen (engl. additive manufacturing, AM), eli niin sanottuun 3D-tulostukseen (engl. 3D printing), sekä moniakselikoneistukseen.

Ainetta lisäävä valmistus on herättänyt paljon keskustelua niin Suomessa kuin maailmalla. Tekniikan nähdään tarjoavan paljon uusia mahdollisuuksia, esimerkiksi muodon ja geometrian vapauden vuoksi, joita ei pystytä saavuttamaan muilla valmistusmenetelmillä.

Kuviosta 1 voidaan nähdä, että kiinnostus ainetta lisäävään valmistukseen ei ole jäänyt pelkästään keskustelun tasolle. Kuviosta voidaan huomata, että ainetta lisäävän valmistuksen tuotteiden ja palveluiden maailmanlaajuinen liikevaihto on kokenut viime vuosina merkittävää kasvua ja tahti näyttää yhä kiihtyvän. Vuosina 2008–2018 liikevaihto kasvoi yli 8,5 kertaiseksi maailmanlaajuisesti.



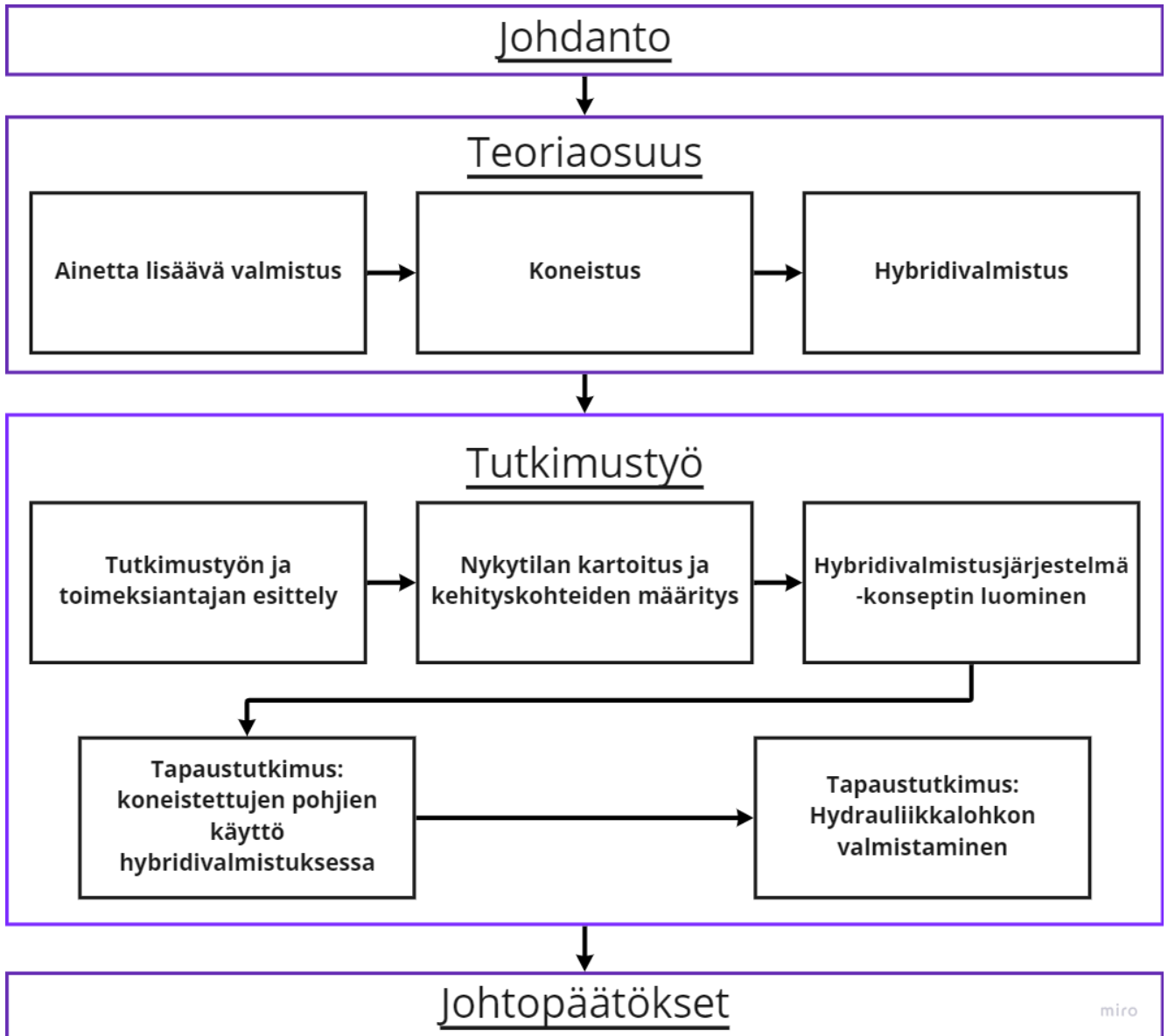
Kuvio 1. Ainetta lisäävän valmistuksen liikevaihdon kasvu vuosina 2006–2018 tuotteille ja palveluille maailmanlaajuisesti (Wohlert ym., 2019, s. 164, Piili ym., 2019, s. 8 mukaan).

Ainetta lisäävän valmistuksen potentiaalin ja sitä kohtaan suunnatusta mielenkiinnosta huolimatta metallien ainetta lisäävällä valmistuksella on myös rajoitteensa. Usein haasteeksi ainetta lisäävässä valmistuksessa osoittautuu sen tuottaman mittatarkkuuden ja pinnanlaadun riittämättömyys sekä prosessin hitaus ja suuret kustannukset. Ainetta lisäävän valmistuksen potentiaalin hyödyntämiseksi tulee huomioida sen rajoitteet ja tutkia keinoja niiden vaikutusten minimoimiseksi.

CNC-koneistaminen on ollut jo pitkään teollisuuden suosima valmistusmenetelmä metallisten kappaleiden sarjatuotantoon, koska sillä pystytään valmistamaan tehokkaasti suuria määriä kappaleita, jotka ovat mittatarkkoja ja omaavat hyvän pinnanlaadun. CNC-työstökoneiden kehittyminen keskittyy yhä enemmän koneiden tehokkuuden parantamiseen lisäämällä niihin enemmän akseleita, joiden ansiosta monimutkaisempien geometrioiden valmistamista on saatu parannettua.

Tämä opinnäytetyö on tehty Lillbacka Powerco Oy:n toimeksiannosta. Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia ainetta lisäävän valmistuksen ja moniakselikoneistuksen yhdistämistä niin sanotuksi hybridivalmistusjärjestelmäksi, kummankin menetelmän tuomien hyötyjen saavuttamiseksi monimutkaisien metallisten kappaleiden valmistuksessa. Tavoitteena on tutkia ainetta lisäävän valmistuksen ja moniakselikoneistuksen yhdistämisen vaatimuksia sekä sillä saavutettavia hyötyjä.

Opinnäytetyön rakenne muodostuu kuvion 2 mukaisesti johdannosta, teoriaosuudesta, tutkimustyöstä ja yhteenvedosta. Teoriaosuudessa annetaan lukijalle tutkimustyötä koskevaa tietoa ainetta lisäävästä valmistuksesta, koneistuksesta ja hybridivalmistuksesta. Ensiksi tutkimusosuudessa esitellään tutkimustyö ja sen toimeksiantaja. Tutkimustyön varsinainen tekeminen aloitetaan kartoittamalla toimeksiantajan nykytila ja määrittämällä kehityskohteet tutkimustyötä varten. Määritettyjen kehityskohteiden ollessa tehtynä, luodaan niiden pohjalta konsepti hybridivalmistusjärjestelmästä. Tämän jälkeen luotua hybridivalmistusjärjestelmänkonseptia ja sen tuotoksia käytetään kahden tapaustutkimuksen tekemisessä, joissa kummassakin valmistetaan metallista kappale hyödyntäen kummankin valmistusmenetelmän tuomia hyötyjä. Tapaustutkimuksien tavoitteena on testata hybridivalmistuksella saavutettavia hyötyjä, sekä sen haasteita ja luoda käsitys sen jatkokehitystarpeista. Lopuksi opinnäytetyön tuotoksista luodaan johtopäätökset, sekä esitetään mahdollisia kohteita jatkotutkimusta varten.



Kuvio 2. Opinnäytetyön rakenne.

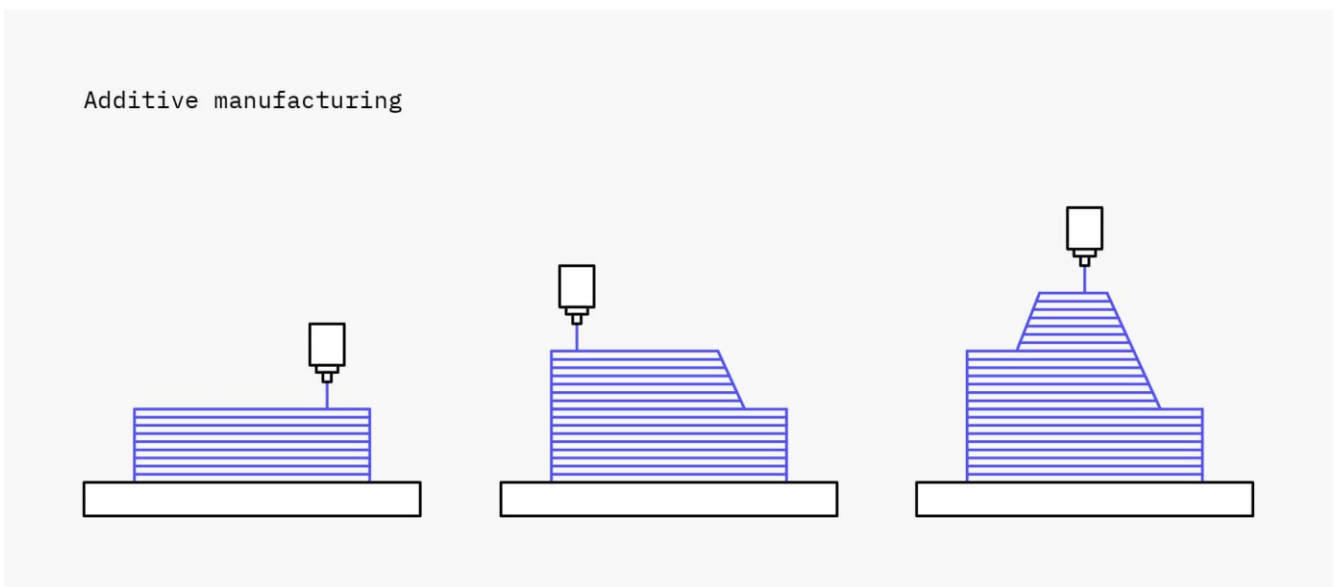
2 TEORIA

Tämän opinnäytetyön teoriaosuuden tarkoituksena on luoda ymmärrystä ainetta lisäävästä valmistuksesta ja koneistuksesta. Tämän lisäksi tässä teoriaosuudessa käsitellään näiden menetelmien hyötyjä ja rajoitteita. Teoriaosuudessa käsitellään myös ainetta lisäävän valmistuksen ja koneistuksen yhdistämistä niin sanotuksi hybridivalmistukseksi.

2.1 Ainetta lisäävä valmistus

Ainetta lisäävä valmistus, tai tavallisemmin 3D-tulostaminen on valmistusmenetelmä, jossa valmistettava esine muodostuu toisiinsa kiinnittyvistä kaksiuolotteisista kerroksista (Burriss, 2018; Heinonen & Kalliolahhti, 2020, s. 258; Hubs, 2022a; Komi, 2016, s. 3; Kujanpää, 2015a; Kujanpää, 2015b; Loughborough University, 2020a; Puukko ym., 2014; Sekhurov ym., 2017, s. 8-12; Valmistajat.fi, i.a.-b). Kerroksia valmistetaan toistensa päälle, kunnes haluttu kappale on valmis.

Kuvio 3 havainnollistaa menetelmän toimintaperiaatetta. Vaikka ainetta lisäävästä valmistuksesta on eri variaatioita, on kaikilla kuitenkin yhteistä se, että valmistettavat kappaleet koostuvat erillisistä toisiinsa kiinnittyvistä kerroksista.



Kuvio 3. Ainetta lisäävän valmistuksen havainnekuva (Hubs 2022a).

Kerroksittain valmistamisen lisäksi kaikille ainetta lisääville menetelmillä on myös yhteistä se, että valmistettavasta kappaleesta tulee ensin olla kolmiulotteinen virtuaalinen malli (Burriss, 2018; Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 258; Hubs, 2022a; Komi, 2016, s. 4; Piili ym., 2019, s. 11). Kolmiulotteinen tai tutummin 3D-malli luodaan tietokoneella käyttäen CAD-ohjelmistoa. CAD (Computer-aided design) tarkoittaa vapaasti suomennettuna tietokoneavusteista suunnittelua. Yleensä 3D-mallista puhuttaessa tarkoitetaan virtuaalista kopiota jostakin olemassa/suunnitteilla olevasta kappaleesta tai useamman kappaleen muodostamasta kokoonpanosta.

ISO/ASTM 52900:2021 standardin mukaan olemassa on seitsemän erilaista prosessia, jotka voidaan luokitella ainetta lisäävään valmistukseen (International Organization for Standardization (ISO), 2021, luku 3.2):

- Vat photopolymerization
- Powder bed fusion
- Material extrusion
- Material jetting
- Binder jetting
- Sheet lamination
- Directed energy deposition.

ISO/ASTM 52900:2021 standardin mukaiset seitsemän ainetta lisäävän valmistuksen prosessia jakautuvat useisiin alalajeihin. Näitä erilaisia ainetta lisäävän valmistuksen alalajeja, näiden eroavaisuuksia ja kunkin prosessin laitevalmistajia on kuvattuna tarkemmin liitteessä 1. Tässä opinnäytetyössä keskitytään kuitenkin kahteen eri Lillbacka Powercolla käytössä olevaan ainetta lisäävään valmistusmenetelmään, jotka ovat jauhepetisulatus (eng. Powder Bed Fusion) sekä materiaalin pursotus (eng. Material Extrusion).

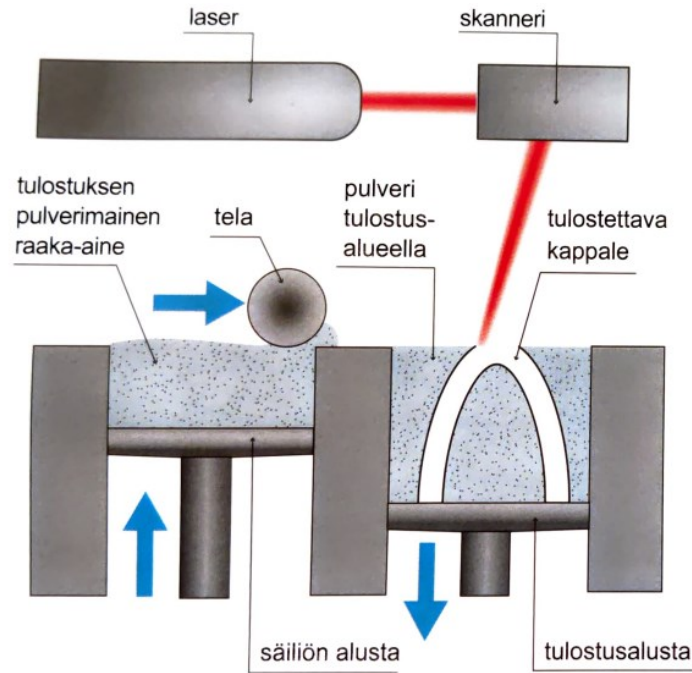
Jauhepetisulatus (eng. Powder Bed Fusion). Jauhepetisulatus on ainetta lisäävä valmistusmenetelmä, jossa muovi- tai metallijauhetta sulatetaan kerroksittain toisiinsa kiinni kappaleen poikkileikkauksen mukaisesti (Burriss, 2018; Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 260; Kokkonen ym., 2016, s. 5-6; Komi, 2016, s. 4-6; Piili ym., 2019, s. 10-11; Sekhurov ym., 2017, s. 9). Jauhepetisulatuksessa erittäin hienojakoista jauhetta levitetään valmistusalustalle, jonka jälkeen lasersäde tai elektronisuihku sulattaa jauheen osaksi kiinteätä kappaletta. Tämän jälkeen valmistusalusta laskeutuu kerrospaksuuden verran alaspäin (tyypillisesti noin 0,02–0,06

mm). Seuraavaksi valmistusalustalle levitetään uusi kerros, joka sulatetaan. Tämä työkierto toistuu, kunnes haluttu kappale on valmis.

Vaikka jauhepetisulatuksella voidaan valmistaa myös muovisia kappaleita, tässä opinnäytetyössä keskitytään vain jauhepetisulatukseen metallista valmistettaville kappaleille, joissa sulatus tapahtuu käyttäen laseria. Tämä jauhepetisulatuksen alalaji tunnetaan liitteen 1 mukaisilla englanninkielisillä nimityksillä Direct Metal Laser Sintering (DMLS) sekä Selective Laser Melting (SLM). Näistä alalajeista ei ole vakiintunut käyttöön vielä suomenkielisiä käännöksiä.

Metallin jauhepetisulatuksella valmistetaan tyypillisesti kappaleita, joilla on monimutkaiset geometriat ja vaativat käyttökohteet. Vaikka metalliosien valmistaminen onkin kallista, voi se silti olla kannattava vaihtoehto sillä saavutettavien hyötyjen ansiosta. Menetelmä onkin jo käytössä yhtenä valmistusmenetelmänä esimerkiksi autoteollisuudessa, sekä lentokone- ja avaruusteollisuudessa, joissa teknologiasta haetaan merkittäviä hyötyjä koneiden suorituskykyyn ja valmistuskustannuksiin (GE Additive, i.a.; Hubs, 2022b).

Kuviossa 4 on kuvattuna Selective Laser Sintering (SLS) menetelmällä toimivan jauhepetisulatuslaitteiston rakenne. SLS-menetelmä on yksi variaatio jauhepetisulatuksesta. Vaikka SLS-menetelmä onkin muovisten kappaleiden valmistukseen tarkoitettu, on toimintaperiaate kaikilla jauhepetisulatuksen variaatioilla sama, vaikka pieniä eroavaisuuksia onkin niiden välillä.



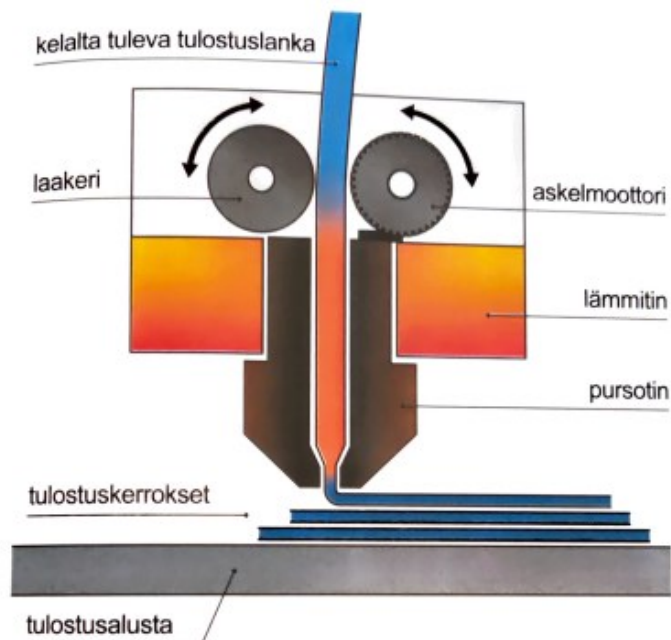
Kuvio 4. SLS-menetelmä ja sen osat (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 260).

Jauhepetisulatus on paljon tutkittu ja nopeasti kehittyvä ainetta lisäävä valmistusmenetelmä. Ominaispiirteitä menetelmälle on lueteltuna alla (Burriss, 2018; Engineering product design, i.a.; Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 260-262; Hubs, 2022b; Kujanpää, 2015a; Loughborough University, 2021a; Piili ym., 2019, s. 11; Riipinen ym., 2018, s. 9-11; Sirris, 2021; Tammela, 2020, s. 4):

- Nopeasti kasvava määrä saatavilla olevia materiaaleja.
- Saatavilla materiaaleja, joilla saavutetaan äärimmäisen hyvät materiaaliominaisuudet.
- Valmistettavan kappaleen maksimikoko riippuu tulostusalueen koosta, joka on tyypillisesti alle 500x500x500 mm.
- Kohtalaisen hyvä valmistustarkkuus ($> 0,1$ mm), tästä huolimatta usein tarvitaan jälkikäsittelyä.
- Suhteellisen hidas valmistusprosessi ($15\text{--}100\text{ cm}^3/\text{h}$).
- Valmistuksen karheahko pinnanlaatu ($Ra\ 8\text{--}18\mu\text{m}$), jonka vuoksi tarvitaan usein jälkikäsittelyä.
- Tulostimet (tyypillisesti alkaen 400 000 €) ja oheislaitteet kalliita, vaikka hinnat ovatkin laskusuhdanteessa.
- Metallitulosteiden kallis hinta, joten ei tyypillisesti sovellu helposti muilla menetelmillä valmistettaville kappaleille.
- Hienojakoinen pulveri tulee huomioida turvallisessa työskentelyssä.

Materiaalin pursotus (eng. Material Extrusion). Materiaalia pursottavalla periaatteella toimivat 3D-tulostimet ovat yleisin ja valtaväestölle tutuin ainetta lisäävä valmistusmenetelmä (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 258; Hubs, 2022a; S. Sekhurov ym., 2017, s. 8). Menetelmässä termoplastinen eli lämpömuovattava materiaali kuumennetaan sulamispisteeseen ja työnnetään pursottimen läpi kiinteäksi kaksikulotteiseksi kerrokseksi. Pursotettu kerros kiinnittyy jäähtyttyään edelliseen kerrokseen. Tämä työkierto toistuu, kunnes haluttu kappale on valmis. Materiaalin pursotuksessa käytetään tyypillisesti valmistettavana aineena erilaisia muoveja, mutta on myös erilaisia variaatioita olemassa, joissa pursotettava materiaali on esimerkiksi sementtiä.

Kuviossa 5 on kuvattuna FDM/FFF-menetelmällä toimivan materiaalia pursottavan laitteiston rakenne. Valmistettava materiaali on tyypillisesti kelattuna lankana, joka syötetään kuumennetun pursottimen hammastettujen pyörien avulla, jotka saavat liike-energiänsä askelmoottorilta.



Kuvio 5. FDM/FFF-tulostimen osat (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 259).

Materiaalia pursottavat 3D-tulostimet ovat hankinta- ja valmistuskustannukseltaan edullisia, tämän vuoksi ne ovatkin jo yleisessä käytössä (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 258; Hubs, 2022a; Loughborough University, 2020a). Materiaalia pursottavien 3D-tulostimien hankintahinnat alkavat noin muutamasta sadasta eurosta ja kalleimmat teollisuuden käyttöön suunnitellut maksavat satoja tuhansia euroja. Menetelmä on myös verrattain nopea ja sen käyttäminen on yleensä suhteellisen helppoa. Valmistettavat kappaleet ovat kuitenkin usein

pinnanlaadultaan ja mittatarkkuudeltaan epätarkkoja. Lisäksi valmistettavat kappaleet ovat usein hauraita verrattuna valamalla tehtyihin kappaleisiin. Menetelmällä valmistetaan teollisuudessa esimerkiksi prototyyppejä ja erilaisia visuaalisesti havainnollistavia malleja.

Ainetta lisäävän valmistuksen hyödyt ja rajoitteet. Ainetta lisäävällä valmistuksella saavutetaan paljon hyötyjä verrattuna perinteisempiin ainetta poistaviin valmistusmenetelmiin, kuten koneistukseen. Näitä hyötyjä on lueteltuna alla (Burris, 2018; Hubs, 2022a; Hubs, 2022b; Kokkonen ym., 2016, s. 7-8; Kujanpää, 2015a; Kujanpää, 2015b; Loughborough University, 2021b; Piili ym., 2019, s. 11; Puukko ym., 2014; Puukko ym., 2015; Riipinen ym., 2018, s. 10; Sirris, 2021; Valmistajat.fi, i.a.-b):

- Kaikista mullistavimpana hyötynä on kyky valmistaa erittäin monimutkaisia muotoja.
- Mahdollistaa kappaleiden keventämisen ja niiden ominaisuuksien optimoimisen.
- Mahdollistaa kappaleen sisäisten onkaloiden ja kanavistojen valmistuksen.
- Kappaleen sisäisten kennorakenteiden valmistaminen on mahdollista esimerkiksi kappaleiden keventämiseksi tai lämmönjohtamiseksi.
- Aiemmin perinteisesti yhteen kokoonpantuja osakokonaisuuksia voidaan nyt yhdistää samaksi osaksi, näin saadaan pienennettyä valmistettavien osien määrää ja päästään mahdollisista haasteista liitoksien tiiveyden takaamiseksi.
- Uuden tuotteen valmistusprosessin läpimenoaika on usein yksittäis- ja piensarjavalmistuksessa nopeampi kuin perinteisillä menetelmillä, tämän avulla voidaan esimerkiksi pitää pienempää määrää osia varastossa.
- Ainetta lisäävä valmistus on usein ympäristöystävällisempi menetelmä perinteisiin verrattuna, sillä tyypillisesti siinä ei synny juurikaan hukkamateriaalia, vaan osan valmistamiseksi käytetään vain tarvittava määrä materiaalia.
- Mahdollistaa myös kappaleiden joustavan muokkaamisen ja kustomoinnin.

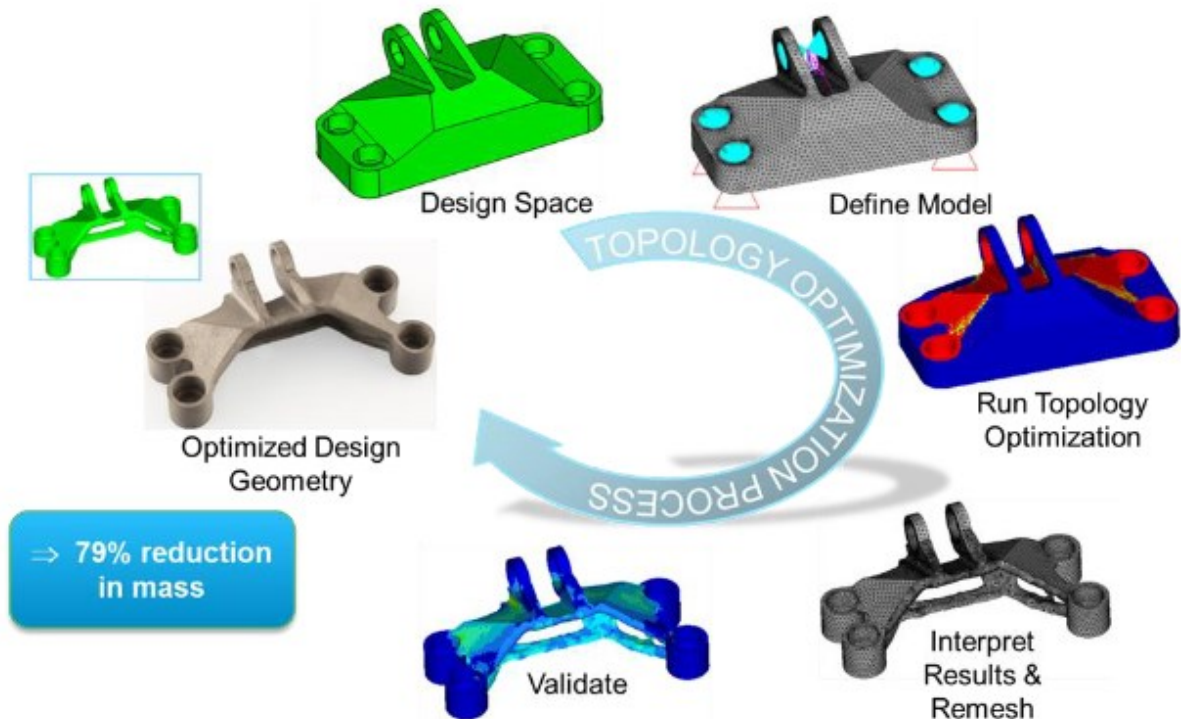
Vaikka ainetta lisäävä valmistus tuokin uusia hyötyjä ja mahdollisuuksia valmistaa kappaleita, on silläkin kuitenkin omat rajoitteensa, jotka tulee huomioida. Näitä rajoitteita on lueteltuna alla (Burris, 2018; Hubs, 2022a; Hubs, 2022b; Kokkonen ym., 2016, s. 7-8; Kujanpää, 2015a; Kujanpää, 2015b; Piili ym., 2019, s. 11; Puukko ym., 2015; Riipinen ym., 2018, s. 10; Sirris, 2021):

- Tukirakenteiden lisäämisen tarve kappaleen valmistamiseksi sekä tukimateriaalien poistaminen valmistamisen jälkeen.
- Valmistusprosessin laadun vaihtelevuus.

- Metallitulosteiden lämmöstä johtuvat muodonmuutokset prosessin aikana.
- Materiaaliominaisuuksien hallinta ja varmennus.
- Standardoinnin puute.
- Laadunvarmennuksen haasteet monimutkaisien kappaleiden vuoksi.
- Ainetta lisäävän valmistuksen kannattavuus on tällä hetkellä rajoittunut usein pieniin sarjakokoihin.
- Mittatarkkuuden sekä pinnanlaadun riittämättömyyden vuoksi usein vaaditaan viimeistelyä, kuten koneistusta.

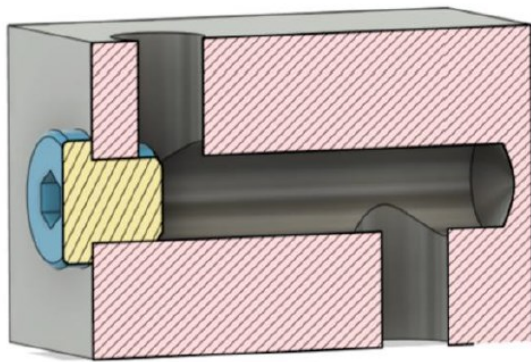
Suunnittelu ainetta lisäävässä valmistuksessa (eng. Design for Additive manufacturing, DFAM). Ainetta lisäävä valmistus mahdollistaa paljon uudenlaisia teknologisia sovelluksia, mutta niiden käytäntöön saattamiseksi tulee käyttää uudenlaista lähestymistapaa suunnittelun osalta (Burris, 2018; Dhokia ym., i.a; Hubs, 2022b; Kokkonen ym., 2016, s. 116-122; Komi, 2016, s. 3-22). Aiemmin mekaniikkasuunnittelussa on jouduttu keskittymään paljon helppoon valmistettavuuteen, tämä on osaltaan rajoittanut huomattavasti valmistettujen kappaleiden ominaisuuksia, kuten suorituskykyä ja painoa. Ainetta lisäävän valmistuksen yleistymisen myötä on alettu kiinnittämään huomiota yhä enemmän osien suunnitteluun teknologian mahdollistamien hyötyjen saavuttamiseksi.

Ainetta lisäävällä valmistuksella ei yleisesti ottaen ole kannattavaa valmistaa metallisia kappaleita, jotka voitaisiin valmistaa helposti perinteisillä valmistusmenetelmillä, kuten koneistamalla (Kokkonen ym., 2016, s. 116-117; Komi, 2016, s. 8-9). Hyötyjen saavuttamiseksi valmistettavat kappaleet tulisi suunnitella käytettävä ainetta lisäävä valmistusprosessi huomioiden. Yksi yleisistä keinoista saavuttaa ainetta lisäävästä valmistuksesta sen hyötyjä on topologian optimointi. Topologian optimoinnissa valmistettavan kappaleen alustavalle 3D-mallille, joka sisältää kappaleen toiminnan kannalta välttämättömät geometriat, määritetään säännöt käyttäen tähän soveltuvaa tietokoneohjelmistoa. Näiden määrityksien, sekä mallille annettujen materiaaliominaisuuksien pohjalta ohjelmisto laskee kappaleeseen syntyvät kuormitukset ja keventää kappaleen rakennetta sille halutun kestävyuden rajoissa. Tällä tavoin saadaan kappaleen valmistukseen kuluva aika pienennettyä ja kappaleen keveydestä syntyviä ominaisuuksia hyötyjä. Kuviossa 6 on esitettyä topologian optimointiprosessin eri vaiheet, esimerkikappaleena suihkumoottorin kannake. Kyseisessä esimerkissä kappaleen massa keveni 79 %.

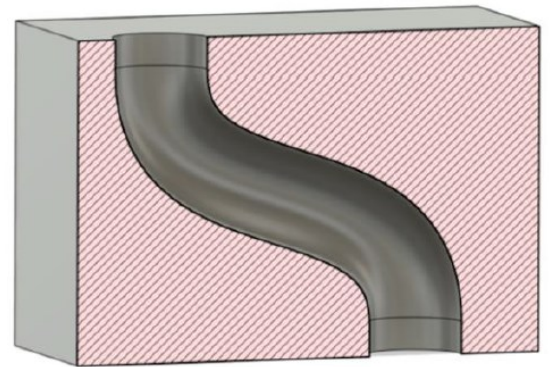


Kuvio 6. Topologian optimoinnin prosessi, esimerkiosana suihkumoottorin kannake (Kokkonen ym., 2016, s. 116).

Ainetta lisäävä valmistaminen mahdollistaa kappaleiden keventämisen lisäksi myös niiden toiminnallisten ominaisuuksien parantamisen (Dhokia ym., i.a). Tämä toiminnallinen ominaisuus voi esimerkiksi olla hydraulikkakomponentin hyötysuhteen parantaminen loivempien mutkien avulla, jolloin saadaan vähennettyä virtaushäviötä. Komponentin ominaisuuksien pienelläkin parantamisella voidaan saada isoja säästöjä sen pitkän elinkaaren aikana. Tämän vuoksi ainetta lisäävä valmistus voi tulla kannattavaksi, vaikka varsinainen valmistusprosessi olisi kalliimpi kuin vastaavan koneistetun kappaleen. Kuviossa 7 on havainnekuva, jossa vasemmalla puolella perinteisesti poraamalla/tulppaamalla valmistettu kanavisto ja oikealla ainetta lisäävällä menetelmällä valmistettu kanavisto.



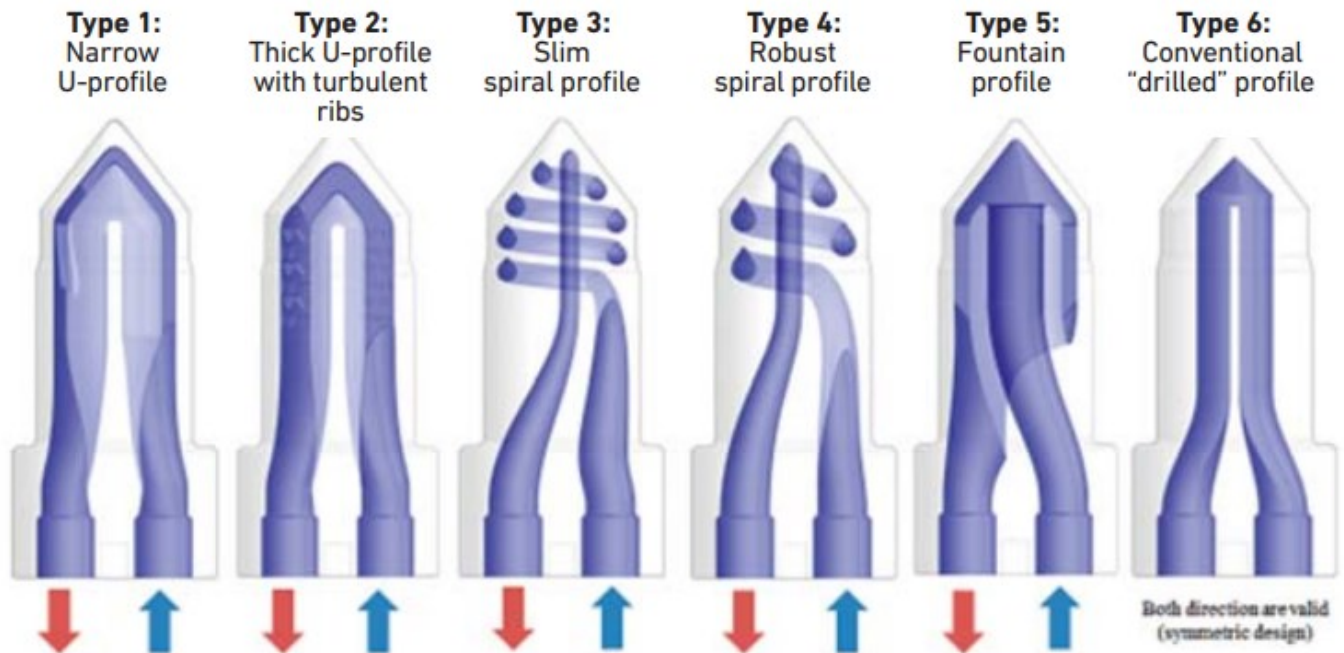
Traditional
Part



Additive Manufactured
Part

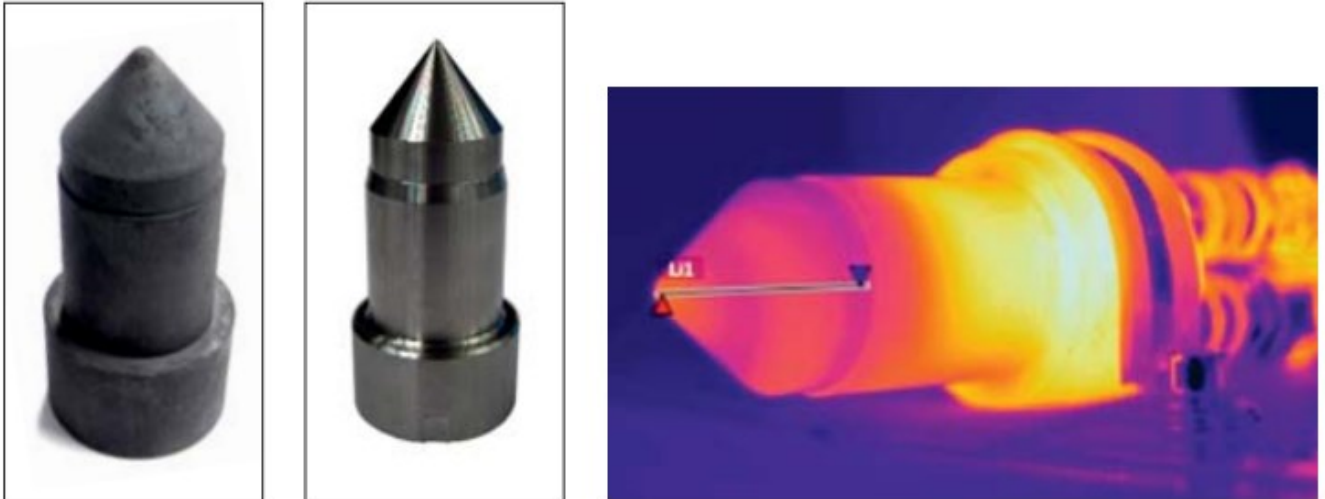
Kuvio 7. Vasemmalla perinteisillä valmistusmenetelmillä kanavisto, oikealla jouhevampi ainetta lisäävästi valmistettu kanavisto (Dhokia ym., i.a.).

Jouhevampien kanavistojen valmistaminen luo paljon mahdollisia käyttötarkoituksia myös erilaisien jäähdytyskanavistojen hyödyntämiseen. DIMECC MANU -ohjelman puitteissa tutkittiin erilaisia jäähdytyskanavistoja jauhepetisulatuksella valmistettaviin ruiskuvalumuotteihin (Sekhurov ym., 2017, s. 29). Kuviossa 8 on esitettyä tutkimuksessa käytettyjä erilaisia kanavistovaihtoehtoja.



Kuvio 8. 3D-tulostettuja kanavistovaihtoehtoja, oikealla perinteisillä menetelmillä valmistettu kanavisto (Sekhurov ym., 2017, s. 29).

Muottiosien prosessilämpötiloja tutkittiin infrapunakuvauksella ABB:llä (Sekhurov ym., 2017, s. 30). Kuvassa 1 on nähtävissä valmistettu muottiosa ennen ja jälkeen koneistuksen, sekä ote tutkimuksessa tehdystä lämpökamerakuvauksesta. Tutkimukset osoittivat, että muotin kärki jäähtyy tehokkaasti sisäisten kanavistojen vuoksi. Paremman jäähdytyksen ansiosta prosessia pystytään säätämään tarkemmin ja tahti aika lyheni yli 75 %, mikä synnyttää merkittäviä säästöjä muotin käyttöiän aikana.



Kuva 1. Muottiosa ennen ja jälkeen koneistuksen. Lämpökamerakuvaus prosessin aikana (Sekhurov ym., 2017, s. 30).

Ainetta lisäävän valmistuksen työvaiheet. Ainetta lisäävän valmistuksen työvaiheet voidaan karkeasti jakaa kuuteen eri vaiheeseen (Additive manufacturing media, i.a):

1. Ainetta lisäävästi valmistettavan osan suunnittelu. Tällä tarkoitetaan tyypillisesti, joko olemassa olevan osan muokkaamista tai uuden osan suunnittelua. Tässä työvaiheessa on tärkeää ymmärtää käytettävän menetelmän rajoitteet ja vahvuudet. Suunnittelussa on kannattavaa kiinnittää huomiota aiemminkin tässä opinnäytetyönosiossa käsiteltyyn suunnitteluun ainetta lisäävässä valmistuksessa (DFAM).
2. Valmistuksen esisuunnittelu, tämä työvaihe sisältää seuraavanlaisia tehtäviä: kappaleen tulostussuunnan asetus, tukimateriaalien lisääminen, useiden kappaleiden asettelu valmistusalustalle ja tulostusparametrien valinta, sekä asettaminen. Edellä mainitut tehtävät vaihtelevat hieman käytetystä ainetta lisäävästä menetelmästä riippuen.
3. Varsinainen valmistusvaihe. Esisuunnittelun ollessa toteutettuna voidaan varsinainen ainetta lisäävä valmistus aloittaa. Ainetta lisäävä valmistus on koneen itsenäisesti toteuttama prosessi, joka voi kestää minuuteista vuorokausiin.
4. Valmistetun kappaleen jälkikäsittely. Käytetystä menetelmästä riippuen mahdollisia erilaisia jälkikäsittelyyn kuuluvia tehtäviä ovat muun muassa: pulverinpoistaminen,

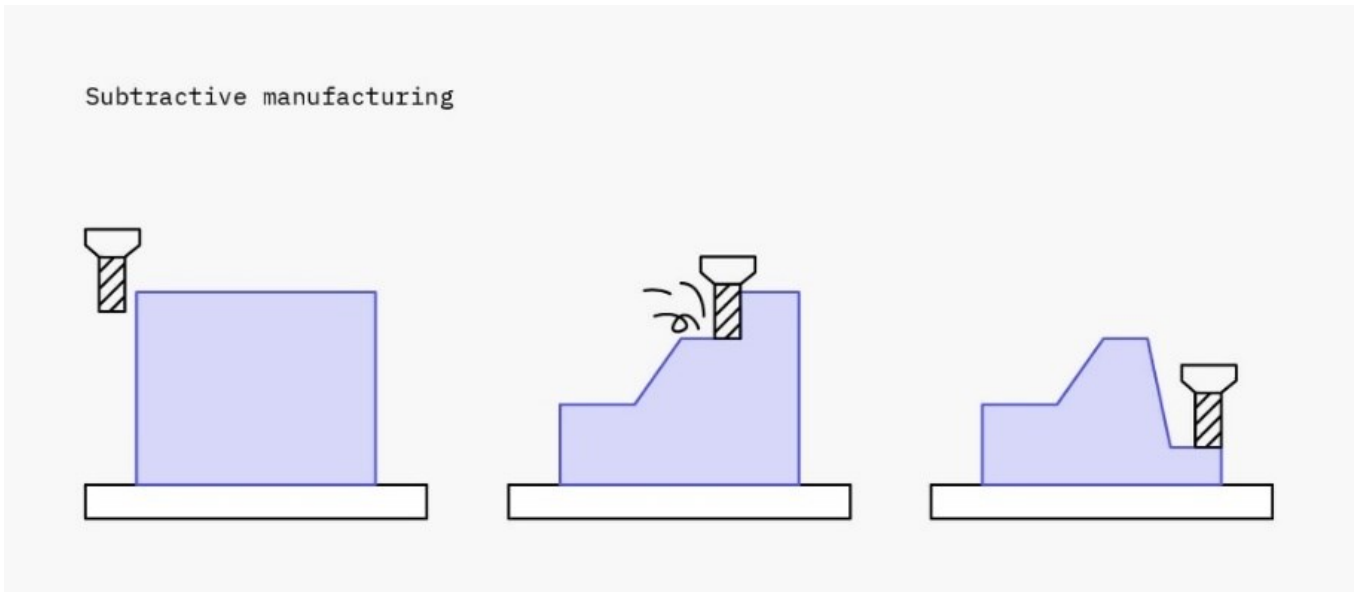
kappaleiden irrotus valmistusalustasta, kappaleiden puhdistaminen ja erilaiset lämpökäsittelyt.

5. Valmistetun kappaleen viimeistely. Usein ainetta lisäävällä valmistuksella ei saada sellaisenaan tuotettua lopulliseen käyttökohteeseen riittävää pinnanlaatua tai mittatarkkuutta. Tämän vuoksi kappaleille tehdään usein koneistamalla viimeistelyjä, kuten tasopintojen koneistamista, reikien poraamisia ja kierteityksiä. Näiden lisäksi saatetaan kappale myös pinnoittaa esimerkiksi maalaamalla.
6. Kappaleen laadunvarmennus. Kuten aina valmistavassa tekemisessä, viimeinen työvaihe on valmistetun kappaleen laadunvarmennus. Tässä työvaiheessa varmistetaan, että valmistettu kappale vastaa sille asettuja vaatimuksia. Yleisimmin käytettyjä laadunvarmennusmenetelmiä ovat erilaiset käsikäyttöiset mittavälineet. Haastavimmissa kohteissa joudutaan laadunvarmennus suorittamaan käyttämällä esimerkiksi koordinaattimittakonetta tai 3D-skannausta.

2.2 Koneistus

Koneistus koskettaa meidän jokaisen elämää päivittäin, sillä lähes tulkoon kaiken ympärilämme olevan tuottamiseksi on käytetty koneistettuja osia, koneita tai työkaluja. Vaikka koneistaminen valmistusmenetelmänä onkin jo kauan ollut teollisuuden suosima, on menetelmä kehittynyt paljon teknologian tuomien mahdollisuuksien ansiosta.

Koneistus on valmistusmenetelmä, jossa kuvion 9 mukaisesti haluttua kappaletta isommasta alkuaihioista poistetaan materiaalia leikkaamalla, kunnes haluttu muoto on saatu esiin aihion sisältä. Koneistus on siis ainetta poistava valmistusmenetelmä. Poistettava materiaali voi olla esimerkiksi metallia, puuta tai muovia (Hubs, 2022a; Maaranen, 2012, s. 15-16; Valmistajat.fi, i.a.-a). Materiaalia poistetaan työkappaleesta usein erilaisilla työkaluilla lastuina leikkaamalla, ja tämän vuoksi koneistusta kutsutaan myös lastuavaksi työstöksi. Koneistusta tekeviä koneita kutsutaan työstökoneiksi. Materiaalia poistavia työkaluja kutsutaan lastuaviksi työkaluiksi. Koneistettavan kappaleen tulee olla kiinnitettynä tukevasti siten, että se kestää leikkauksessa syntyvät voimat eikä irtoa kesken työstön.



Kuvio 9. Ainetta poistavan valmistuksen eli koneistuksen havainnekuva (Hubs, 2022a).

Koneistusmenetelmät ovat jo kauan aikaa olleet teollisuuden suosiossa, koska niillä voidaan luoda pinnanlaadultaan ja mittatarkkuudeltaan erittäin vaativia kappaleita (Heinonen & Kallio-lahti, 2020, s. 10-11; Maaranen, 2012, s. 11; Valmistajat.fi, i.a.-a). Koneistamalla tehtävien kappaleiden valmistustoleranssit ovat usein muutamien sadasosamillimetrien sisällä, joskus jopa tuhannesosamillimetrin sisällä.

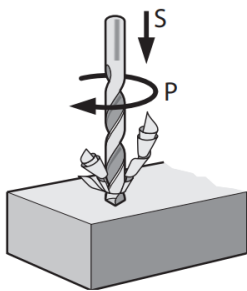
Erlaisia koneistusmenetelmiä on paljon, ja niissä vaihtelevat laajalti muun muassa seuraavat asiat:

- Lastuavaa työstöä tekevät työkalut.
- Soveltuvien kappaleiden geometriat.
- Työstettävän kappaleen kiinnitysmenetelmät.
- Käytettävän koneen tekemät liikkeet kappaleen valmistamiseksi.

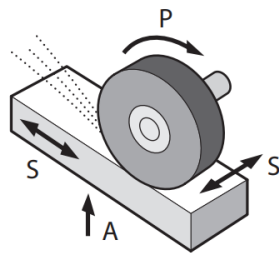
Yleisimmin käytetyt koneistusmenetelmät ja niiden liikkeet. Yleisimmin käytettyjä koneistusmenetelmiä ovat kuviossa 10 esitetyt poraus, hiominen, sorvaus ja jyrshintä. Käytettävän menetelmän valinta määräytyy usein kappaleen muodon mukaan. Sorvaus on usein sopivin menetelmä sellaisten kappaleiden valmistamiseen, joilla on ympyränmuotoinen poikkileikkaus. Käytössä olevien menetelmien paljouden takia keskitytään tässä opinnäytetyössä jyrshintään.

Koneistuksessa tapahtuvat liikkeet voidaan jakaa kuvion 10 mukaisesti kolmeen liikkeeseen:

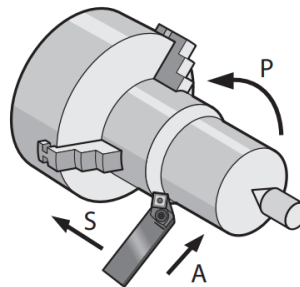
- Pää- eli lastuamisliikkeeseen, joka on lastuavaa työkalua tai lastuttavaa työkappaletta akselinsa ympäri kiertävä liike.
- Syöttöliikkeeseen, joka on lastuavaa työkalua ja lastuttavaa työkappaletta toisiaan kohti syöttävä liike.
- Asetusliikkeeseen, joka asettaa lastuavan työkalun tai lastuttavan työkappaleen haluttuun sijaintiin aineen poistamiseksi halutulta alalta.



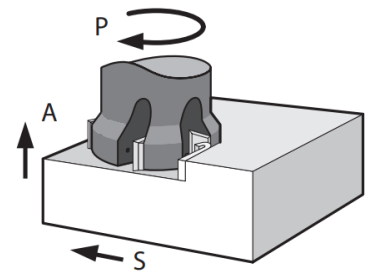
Työstöliikkeet porattaessa:
P = pää- eli lastuamisliike
S = syöttöliike



Työstöliikkeet hiottaessa tasohiomakoneella:
P = pää- eli lastuamisliike
A = asetusliike
S = syöttöliike (pitkittäis- ja poikittaissyöttöliike)



Työstöliikkeet sorvattaessa:
P = pää- eli lastuamisliike
A = asetusliike
S = syöttöliike



Työstöliikkeet jyrsettäessä jyrsimen otsapinnalla:
P = pää- eli lastuamisliike
A = asetusliike
S = syöttöliike

Kuvio 10. Havainnekuva erilaisista koneistuksen työstömenetelmistä ja niiden työstöliikkeistä (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 29).

CNC-koneistus. Erilaiset lastuavat työstökoneet voidaan jakaa niiden ohjaustavan perusteella manuaali- ja CNC-koneisiin (eng. Computer Numerical Control) (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 86-87; Maaranen, 2012, s. 365-366). Manuaalityöstökoneilla koneen liikkeitä ohjaa ihminen erilaisia hallintalaitteita käyttämällä. CNC-työstökoneen liikkeitä ja toimintaa ohjataan automaattisesti tietokoneen toimesta.

CNC tarkoittaa vapaasti käännettynä tietokoneen ohjaamista numeerisesti (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 86-87, s. 125-128, s. 136; Maaranen, 2012, s. 365-366). CNC-työstökoneetta ohjaavan tietokoneen toiminnan määrittää G-kooditiedostomuodossa oleva työstöohjelma, joka kertoo, mitä liikkeitä tai toimia CNC-koneen tulee toteuttaa. CNC-tekniikkaa on yleisesti käytössä myös koneistuksen ulkopuolella, esimerkiksi erilaisia 3D-tulostimia ohjataan usein G-koodilla.

Taulukossa 1 on kuvattuna esimerkki G-koodista. Kyseinen G-koodi on tehty myös kuviossa 11 kuvatulle 3-akseliselle CNC-työstökeskukselle. Yksinkertaistettuna G-koodi kertoo työstökoneen eri akseleille, mihin pisteeseen niiden täytyy liikkua, suhteessa aiemmin määritettyyn nollapisteeseen. Kyseisen liikkeen nopeus voidaan myös määrittää G-koodissa. Eri aksleita liikutetaan, kunnes haluttu muoto saadaan valmistettua. Erilaiset G-koodit eroavat hiukan toisistaan CNC-kone kohtaisesti, mutta koordinaattipohjainen toimintaperiaate on kaikissa pohjimmiltaan sama.

Taulukko 1. Esimerkki G-koodista 3-akseliselle CNC-työstökeskukselle lauseiden selityksiin (soveltaen Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 126).

G-koodin lause	Lauseen selitykset
%	
00107	Ohjelman numero
(Ylapinnan tasaus)	G-koodiin voidaan kirjoittaa sulkujen sisälle kommenttilauseita, ilman ääkkösiä
G00 G17 G40 G49 G80 G90	Valmistelevat koodit
T1 M6	Työkalun 1 kutsuminen ja työkalun vaihtaminen
G00 G90 G54 X-20. Y-10. S2000 M13	Siirtyminen työstön aloituskohtaan X- ja Y-akseleilla, S2000 = karan pyörimisnopeus (rpm), M13 = karan pyörimissuunnan valinta ja käynnistys
G43 H1 Z25.	Työkalun pituuskompensointi ja lähestyminen Z-akselilla
Z5.	
G01 Z0. F100.	Lähestyminen syöttöliikkeellä työstettävälle korkeudelle, G1 = syöttöliikkeen aktivointi, F100 = on syöttöliikkeen nopeus (mm/min)
X60. F300.	Ensimmäinen työstöliike kappaleen pinnassa.
Y-30.	Siirtyminen toisen työstöliikkeen aloituspisteeseen
X-20.	Toinen työstöliike
G0 Z65.	Poistuminen ylöspäin pikaliikkeellä. G0 = pikaliikkeen aktivointi
M5	Karan pyörimisen pysäytys
G91 G28 Z0. M9	Paluu Z- akselin referenssipisteeseen
G28 X0. Y0.	Paluu X- ja Y-akseleiden referenssipisteeseen.
M30	Ohjelman lopetus
%	

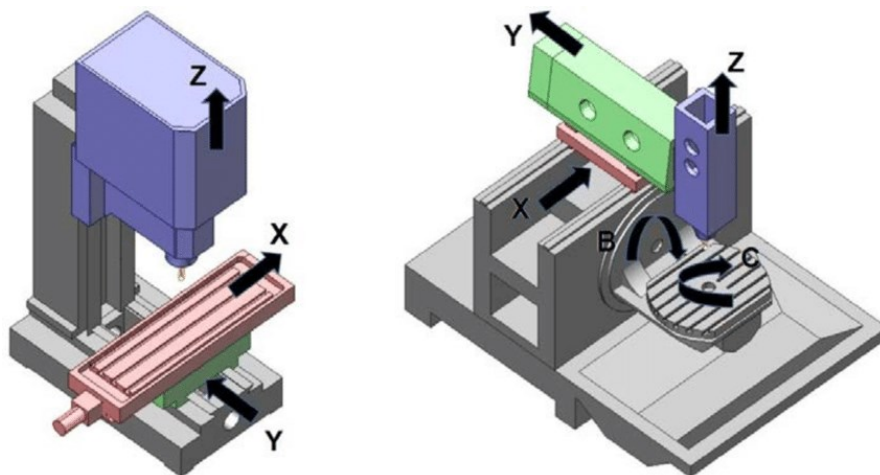
Nykypäivänä lastuavat työstökoneet teollisuudessa ovat lähes poikkeuksetta CNC-koneita, sillä niillä saadaan toistuvasti ja tehokkaasti valmistettua isoja määriä mittatarkkoja kappaleita (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 86; Maaranen, 2012, s. 365-366). Yleisimmät käytössä

olevat työstökoneet ovat CNC-sorvit ja CNC-työstökeskukset. CNC-työstökeskus on käytännössä ”CNC-yleisjyrsinkone”. Tätä nimitystä ei usein kuitenkaan käytetä.

Manuaalityöstökoneista CNC-koneisiin siirtymisen myötä ovat koneistajan työtoimenkuva ja tarvittavat taidot muuttuneet merkittävästi (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 89; Maaranen, 2012, s. 365-366). Nykypäiväisen koneistajan tulee hallita esimerkiksi erilaisia ohjelmistoja ja robotiikkaa. Kuitenkin varsinainen lastuaminen ja siihen liittyvät lainalaisuudet koskevat niin manuaali- kuin CNC-koneistusta.

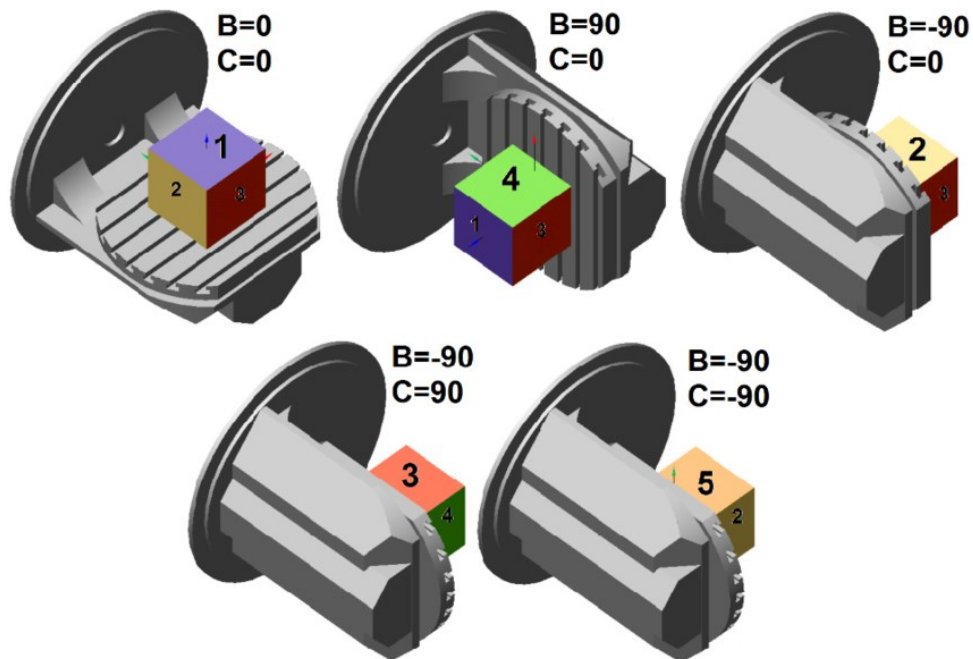
Moniakselinen CNC-koneistus. Tekniikan kehittyessä on CNC-työstökoneisiin alettu lisäämään enemmän toiminnallisuutta ja monipuolisuutta (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 87, s. 198). Lisäämällä työstökoneisiin lisää akseleita eli liikesuuntia on saavutettu kyky valmistaa monimutkaisempia kappaleita vähemmällä työvaiheilla. Myös koneiden ohjaukset ovat kehittyneet, mahdollistaen helpomman kommunikoinnin erilaisien automaattioratkaisujen, kuten robotiikan kanssa.

Kuviossa 11 on kuvattuna vasemmalla perinteisempi 3-akselinen CNC-työstökeskus. 3-akselisessa työstökeskuksessa on kolme liikkuvaa akselia, joita liikuttamalla koneistettava kappale valmistetaan (Bologa ym., 2016, s. 185-186; Wells, 2021). Nämä kolme akselia ovat X-, Y- ja Z-akselit. Kuviossa 11 oikealla on kuvattuna 5-akselinen CNC-työstökeskus. Perinteisestä 3-akselisesta CNC-työstökeskuksesta poiketen on koneessa X-, Y- ja Z-akselien lisäksi kaksi kiertävää akselia. Nämä kiertävät akselit ovat Y-akselin ympäri kiertoliikettä tekevä B-akseli, sekä Z-akselin ympäri kiertoliikettä tekevä C-akseli.



Kuvio 11. Vasemmalla 3-akselinen ja oikealla 5-akselinen työstökeskus akselistoineen (Bologa ym., 2016, s. 185).

Moniakselikoneistuksella saadaan merkittävästi tehokkaammin valmistettua kappaleita, jotka muuten vaatisivat useita työvaiheita ja kappaleenkiinnityksiä kappaleen valmistamiseksi (Bologna ym., 2016, s. 185-186; Wells, 2021). Kuviossa 12 olevasta havainnekuvasta nähdään, että 5-akselisella CNC-työstökeskuksella voidaan saavuttaa kuusikulmaisesta työkappaleesta viisi kuudesta sivusta. Jos kyseisessä työkappaleessa kaikki kuusi sivua tulisi koneistaa, vaatisi se 5-akselisella CNC-työstökeskuksella vain 2 kiinnitystä, kun taas perinteisemmällä 3-akselisella CNC-työstökeskuksella vaatisi kappaleen valmistaminen jopa kuusi eri kiinnitystä ja työvaihetta.



Kuvio 12. Havainnekuva 5-akselisen työstökeskuksen saavutettavista työstösuunnista kappaleen valmistamiseksi (Bologna ym., 2016, s. 186).

CNC-koneistuksen hyödyt ja haasteet. Erilaiset CNC-koneistusmenetelmät ovat nykypäiväisen valmistusteollisuuden selkäranka, koska sen avulla saavutetaan paljon merkittäviä hyötyjä. Koneistusmenetelmien kehittymisestä huolimatta on siltäkin vielä kuitenkin omat rajoitteensa ja ongelmansa.

CNC-koneistus on mainio valmistusmenetelmä mittatarkkojen kappaleiden sarjavalmistukseen. CNC-koneistuksella saavutettavia hyötyjä ovat muun muassa seuraavat (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 86-88; Maaranen, 2012, s. 367; Wells, 2021):

- CNC-tekniikan tuoma automaatio mahdollistaa koneen itsenäisen työskentelyn ilman koneistajaa, mikä kasvattaa tehokkuutta ja vapauttaa henkilöstöresursseja muihin tehtäviin.

- Yhdistämällä erilaisia automaattioratkaisuja CNC-koneistuksen rinnalle saadaan tehokkuutta lisättyä entisestään.
- CNC-koneiden liikkeiden toistotarkkuus on erittäin hyvä, mikä mahdollistaa monimutkaisien kappaleiden valmistamisen mittatarkasti.
- Moniakselisilla CNC-työstökoneilla voidaan valmistaa erittäin monimutkaisia kappaleita, minimoiden kappaleen valmistamiseksi tarvittavat kiinnitykset mikä kasvattaa valmistusprosessin tehokkuutta ja mittatarkkuutta.

Erilaisia haasteita CNC-koneistuksessa ovat muun muassa (Haas Automation, 2022; Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 88; Maaranen, 2012, s. 368; Wells, 2021):

- Uudenlaisen kappaleen valmistamiseksi tarvittavien työstöohjelmien ja kiinnitysmenetelmien luominen on usein aikaa vievää.
- Kappaleen paikoittamisen tarve työstöohjelman mukaisesti.
- Lastuavassa työstössä myös hukkaan menevän eli alkuaihiosta poistettavan materiaalin osuus on usein suuri.
- Monimutkaisien geometrioiden valmistaminen on usein haastavaa käytettävän koneen rajoittuneiden työstösuuntien ja kiinnitysmahdollisuuksien vuoksi, ja tällöin kappaletta joudutaan usein kiinnittämään ja työstämään useita kertoja sen valmistamiseksi.
- Tarvittavien lastuavien työkalujen määrä erilaisien kappaleiden valmistamiseksi on usein suuri.
- Koneistettavien osien suunnittelijoiden tulee usein huomioida helppo valmistettavuus kustannusten alentamiseksi, tämä osaltaan saattaa rajoittaa kappaleiden ominaisuuksia.
- Hyvästä mittatarkkuudesta huolimatta joudutaan valmistettujen kappaleiden mittoja usein varmentamaan.
- Valmistelevien työvaiheiden työläyden vuoksi tavoitellaan usein mahdollisimman isoja valmistettavia sarjakokoja.
- CNC-työstökoneen hankinta- ja ylläpitokustannukset ovat tyypillisesti suuria (esimerkiksi tässä opinnäytetyössä käytetyn 5-akselisen CNC-työstökeskuksen Haas UMC-1000SS:n lähtöhinnaksi on määritetty valmistajan kotisivuilla 206 995 €).

CNC-koneistuksen valmistelevat työvaiheet. Ensimmäistä kertaa uudenlaisen kappaleen valmistaminen koneistamalla on usein aikaa vievä ja haastava tehtävä, johon sisältyy paljon huomioitavia asioita. Valmistettavan kappaleen ominaisuudet kuten sen muoto, materiaali ja tarvittavan mittatarkkuuden vaatimukset vaikuttavat paljon tehtävän haastavuuteen sekä tarvittaviin välineisiin (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 87-92). Usein onkin järkevää suunnitella kappaleen valmistus hyvin ennen varsinaisten valmistavien työvaiheiden aloittamista.

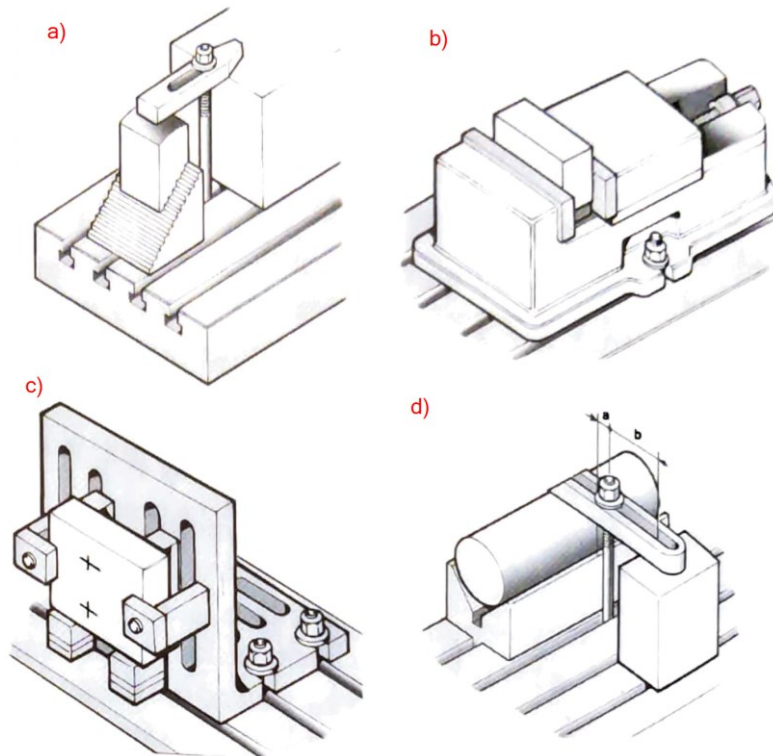
Kun kappale valmistetaan ensimmäistä kertaa koneistamalla työvaiheita ovat tyypillisesti (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 87-92):

- Kiinnityksien suunnittelu sekä mahdollisten kiinnitysvälineiden valmistus tai hankinta.
- Työkalujen valinta ja mahdollinen hankinta.
- Työstöohjelman luonti.
- Kappaleen kiinnittäminen ja paikoitus työstöohjelmassa määritetyllä tavalla.
- Testiajon tekeminen sekä mahdolliset muokkaukset.

Työkappaleen kiinnitys. Koneistettavan kappaleen valmistamiseksi tulee työkappale kiinnittää työstökoneeseen riittävän tukevasti, jotta se ei irtoa koneistuksessa muodostuvien voimien johdosta (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 72-92; Maaranen, 2012, s. 266-272). Myös ohuet koneistettavat rakenteet saattavat vaatia ratkaisuja niiden tukemiseksi, jotta kappaleen taipumiselta tai pienimuotoiselta liikehdinnältä eli värisemiseltä työstön aikana välttyttäisiin. Riittävän tukevan kiinnityksen lisäksi tulisi huomioida kiinnitystä suunniteltaessa, että kappaleen valmiille työpinoille ei jäisi jälkiä tai muodonmuutoksia kiinnityksestä johtuen. Työkappaleen kiinnityksen tulisi myös mahdollistaa kappaleen työstäminen mahdollisimman vähäisillä työvaiheilla. Isompia sarjakokoja valmistettaessa olisi hyvä, jos kiinnitysmenetelmä on yksinkertainen ja helposti skaalattavissa isompien valmistuserien mahdollistamiseksi. Myös kiinnityksen käytettävyys tulisi huomioida. Ihanteellinen kappaleenkiinnitys on sellainen, jonka avulla kappaleen irrottaminen ja kiinnittäminen on nopeaa ja kappaleen paikoittaminen tapahtuu aina täysin samaan asentoon. Monimutkaisien kappaleiden kiinnittäminen on usein haastava osa kappaleen valmistusprosessia.

Kuviossa 13 on esitettyä erilaisia työkappaleen kiinnitysmenetelmiä jyrksittävillä kappaleilla, ja erilaisia kiinnitysmenetelmiä on kuviossa näkyvien lisäksi lukuisia. Kuvion kohta a), esittää työkappaleen kiinnittämistä suoraan työstökoneen pöytää käyttäen apuna kiinnitysrautaa. Kuvion kohta b), esittää työkappaleen kiinnittämistä koneruuvipuristimeen. Kuvion kohta c),

esittää työkappaleen kiinnittämistä kiinteään 90° :n kulmatasoon. Kuvion kohdassa d), on työkappale kiinnitettynä kiinnitysraudan avulla V-kappaleeseen (kuviossa olevan mitan a, tulee olla pienempi kuin mitta b, jolloin ruuvi kiristää työkappaletta riittävällä voimalla). Tässä opinäytetyössä käytetään kuvion kohdan b) mukaista koneruuvipuristinta.



Kuvio 13. Erilaisia työkappaleen kiinnitysmenetelmiä (soveltaen Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 72).

Markkinoilla tarjolla olevien kiinnitysmenetelmien lisäksi on hyvin tyypillistä, että joskus koneistettavalle kappaleelle joudutaan suunnittelemaan ja valmistamaan räätälöity kiinnitin (CNC Cookbook, i.a.; Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 123). Tyypillisesti kappaleelle räätälöity kiinnitin valmistetaan koneistamalla, mutta muillakin valmistusmenetelmillä on mahdollista valmistaa erilaisia kiinnitysratkaisuja. Räätälöidyn kiinnittimen tarve voi johtua kappaleen monimutkaisista muodoista. Tarve voi johtua myös kappaleen herkästi naarmuuntuvasta pinnasta, jolloin pehmeämpi kiinnittimen materiaali, kuten alumiini, voi olla toimiva ratkaisu kappaleen kiinnittämiseksi ilman naarmuja. Räätälöityjen kiinnitysratkaisujen tekeminen on hyvin tyypillistä, myös kun halutaan maksimoida tuottavuus tuomalla työstökoneen työtilaan mahdollisimman paljon työstettäviä kappaleita.

Kuvassa 2 on esitettyä hyvin tyypillinen levymainen kiinnitysratkaisu tuottavuuden kasvattamiseksi. Kuvan mukaisella lähestymistavalla saadaan valmistettua tässä tapauksessa 16 kappaletta samalla kerralla, mikä vapauttaa koneistajan muihin tehtäviin työkappaleiden vaihtamisen sijasta. Kappaleen kiinnittäminen tässä tapauksessa tapahtuu pikakiinnittimillä.



Kuva 2. Levymäinen kiinnitysratkaisu usean työkappaleen samanaikaiseen valmistukseen (CNC Cookbook, i.a.).

Lastuavat työkalut ja niiden toiminta. Koneistettavan kappaleen valmistamiseksi tarvitaan usein paljon erilaisia lastuavia työkaluja (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 30, s. 66-69; Maaranen, 2012, s. 254-259; Warfield, i.a.-a; Warfield, i.a.-b; Warfield, i.a.-c). Lastuavat työkalut vaihtelevat laajalti muun muassa kappaleelle tehtävän työstön, valmistettavan piirteen kokoluokan sekä työstettävän materiaalin perusteella.

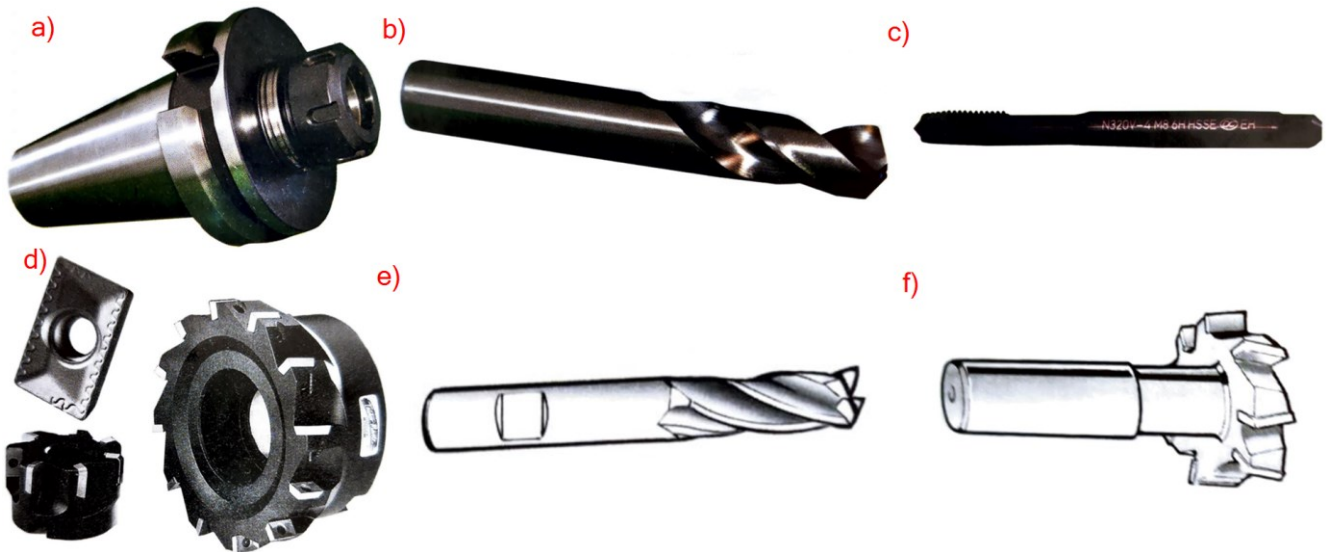
Lastuavissa työkaluissa käytetyt materiaalit, sekä mahdolliset pinnoitukset vaihtelevat myös paljon käyttökohteen mukaan (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 35-36; Maaranen, 2012, s. 25-29; Warfield, i.a.-a; Warfield, i.a.-b; Warfield, i.a.-c). Yleisimmät lastuavissa työkaluissa käytetyt materiaalit ovat erilaiset kovametallit ja niiden seokset, sekä pikateräkset (eng. High Speed Steel, HSS). Kovametalliset lastuavat työkalut valmistetaan sekoittamalla keskenään kovia aineita, kuten volframikarbideja, muita karbideja ja sideainetta, kuten kobolttia.

Pikateräksiset lastuavat työkalut on valmistettu seostetusta teräslajista, josta lämpökäsittelyn avulla saadaan sitkeä teräaine, joka kestää hyvin kulutusta. Kovametallista valmistetut lastuavat työkalut ovat syrjäyttäneet aiemmin yleisimmin käytetyt pikateräksiset työkalut kovametallin suuremman kovuuden sekä paremman kulutuksen- ja lämmönkeston ansiosta.

Työkalun kiinnittäminen CNC-työstökeskukselle tapahtuu käyttäen erilaisille lastuaville työkaluille tarkoitettuja jyrsinistukoita (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 69-70; Maaranen, 2012, s. 259-266). Erilaisia jyrsinistukoita on paljon, ja niiden soveltuvuudet vaihtelevat käytettävästä työstökoneesta ja käytettävästä lastuavasta työkalusta, sekä erilaisien työkappalekohtaisten vaatimusten mukaan. Tällaisia työkappalekohtaisia vaatimuksia jyrsinistukalle ovat esimerkiksi ulottuvuus, tukevuus ja pyörimisliikkeessä syntyvän epäkeskeisyyden suuruus. Jyrsinistukka asettuu CNC-työstökeskuksen karalle tarkasti käyttäen hyödyksi sekä jyrsinistukassa että karassa olevia kartiomaisia ohjauspintoja. Jyrsinistukka lukittuu CNC-työstökeskuksen karalle, mahdollistaen lastuavan työstön vaatiman pyörimisenergian siirtämisen karalta teräpitimen kautta käytettävälle lastuavalle työkalulle.

Kuvion 14 kohdassa a) on esitettyä esimerkki jyrsinistukasta, joka on tarkoitettu ER-holkkeille. Holkkityyppiset jyrsinistukat soveltuvat hyvin esimerkiksi erilaisille varsijyrsimille käytettäväksi. Holkkityyppisiin jyrsinistukoihin voidaan kiinnittää erikokoisia lastuavia työkaluja, erikokoisien työkalun ympärille supistuvien holkkien ansiosta.

Yleisimpiä CNC-työstökeskuksella käytettyjä lastuavia työkaluja on esiteltyä kuviossa 14 kohdissa b) – f), ja niistä jokaisesta on olemassa paljon variaatioita (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 30, s. 66-69; Maaranen, 2012, s. 254-259; Warfield, i.a.-a; Warfield, i.a.-b; Warfield, i.a.-c). Kuvion kohdassa b), on esitettyä reikien tekemiseen yleisesti käytetty kierukkapora. Kuvion kohdassa c), on kuvattuna kierteiden tekemiseen usein käytetty menetelmä, kierretappi. Kuvion kohdassa d), on esitettyä kaksi erilaista vaihtopalajyrsintä ja esimerkki teräpalasta, joka kiinnitetään jyrsimen runkoon. Vaihtopalajyrsimissä teräpala hoitaa varsinaisen lastuamistyön, joten kulumisen vuoksi tarvitsee vaihtaa vain teräpala eikä koko työkalua. Kuvion kohdassa e) on esitettyä yhdenlainen varsijyrsin. Varsijyrsimiä kutsutaan usein myös jyrsintapeiksi. Kuvion kohdassa f), on esitettyä yhdenlainen muotojyrsin. Muotojyrsimellä tarkoitetaan siis jonkin tietyn muodon koneistamiseen tarkoitettua jyrsintyökalua. Kyseisessä kuviossa on esitettyä T-urajyrsin. Muita yleisesti käytettyjä muotojyrsimiä ovat muun muassa erilaiset lohennysojyrsimet, sekä kierteiden jyrsintään tarkoitettut kierrejyrsimet.



Kuvio 14. CNC-työstökeskukseen kiinnittyvä jyrsinistukka, johon lastuavat työkalut kiinnitetään (a), sekä yleisempiä CNC-työstökeskuksella käytettyjä lastuavia työkaluja (b-f) (soveltaen Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 123, s. 112, s. 131, s. 66, s. 68).

Työstöarvot jyrsinissä. Lastuavan työkalun ja sille soveltuvan jyrsinistukan valitsemisen jälkeen tulee määrittää työkalulla työstettäessä käytettävät työstöarvot. Työstöarvoilla tarkoitetaan jo aiemmin kuviossa 10 esitettyjen pää- eli lastuamisliikkeen sekä syöttöliikkeen liikenopeuksia. Käytettävät työstöarvot vaihtelevat riippuen muun muassa tehtävästä työstöstä, työkappaleen kiinnityksestä, sekä työkappaleessa ja lastuavassa työkalussa käytetystä materiaalista (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 32, s. 76-79; Maaranen, 2012, s. 16-22). Tavoitteena työstöarvojen määrittämisessä on, että työstö käy mahdollisimman tehokkaasti, lastuavan työkalun kesto on mahdollisimman pitkä, työstettävä pinnanlaatu on riittävä ja mittatarkkuus pysyy tarvittavan hyvänä. Usein optimaalisia työstöarvoja joudutaan iteroimaan, joka ottaa aikansa. Kokenut koneistaja osaa työstettäessä syntyvien äänien perusteella luoda karkean arvion työstöarvojen oikeellisuudesta.

Pää- eli lastuamisliike on CNC-työstökeskuksen tapauksessa lastuavaa työkalua pyörittävä liike, ja puhuttaessa sen nopeudesta, käytetään termiä pyörimisnopeus (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 32; Maaranen, 2012, s. 16-22). Pyörimisnopeudesta käytetään suuretta kierrosta minuutissa (1/min) (eng. Revolutions per Minute, rpm, RPM, r/min).

Kaavassa 1 on esitettyä pyörimisnopeuden laskentakaava

$$n = \frac{v}{\pi d} \quad (1)$$

missä

- n on lastuavan työkalun pyörimisnopeus (1/min)
- V lastuamisnopeus, jonka suurena toimii metriä minuutissa (m/min)
- π vakio 3.14...
- d käytettävän työkalun työstävän pinnan / pintojen halkaisija (metreinä)

Syöttöliike on lastuavaa työkalua ja lastuttavaa työkappaletta toisiaan kohti syöttävä liike, tämän liikkeen nopeudesta puhuttaessa käytetään yleisesti termejä pöytäsyöttö, syöttö tai syöttönopeus (Heinonen & Kalliolahi, 2020, s. 76-79; Maaranen, 2012, s. 16-22). Tyypillisesti syöttönopeudesta käytetään suuretta millimetriä minuutissa (mm/min).

Kaavassa 2 on esitettyä pöytäsyötön laskentakaava

$$S = n \times Z \times S_z \quad (2)$$

missä

- S on pöytäsyöttö (mm/min)
- n on kaavassa 1 laskettu lastuavan työkalun pyörimisnopeus (1/min)
- Z jyrsimen leikkaavien terien määrä eli hammasluku
- S_z hammaskohtainen syöttö (mm)

Kaavassa 1 esitetyn lastuamisnopeuden (V) valintaan vaikuttaa ensisijaisesti käytettävän lastuavan työkalun materiaali, sekä työstettävän työkappaleen materiaali. Tyypillisesti lastuamisnopeus selvitetään käytettävän lastuavan työkalun toimittajan tarjoamasta taulukosta, jossa on teräkohtaiset lastuamisnopeudet eri materiaaleille. Työkalutoimittajan tarjoamasta taulukosta selvitetään tyypillisesti myös kaavassa 2 käytetyn hammaskohtaisen syötön (S_z) suuruus.

Nykypäiväiset edistyneet CAD- ja CAM-ohjelmistot laskevat työstöarvot ja syöttävät ne eri työkaluille työstöohjelmaan automaattisesti koneistajan antamien määrityksiensä perusteella. Tästä huolimatta tulisi jokaisen koneistajan osata laskea työstöarvot tarvittaessa myös manuaalisesti.

Työkappaleen paikoittaminen ja työkalujen mittatietojen syöttäminen. Jotta haluttu kappale pystytään valmistamaan käyttäen hyödyksi CNC-työstöä, täytyy haluttu kappale ensiksi paikoittaa työstökoneeseen halutulle sijainnille, haluttuun asentoon ja kiinnittää se siihen tukevasti (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 121-122). Työstettävän kappaleen haluttuun asentoon paikoittamiseen on erilaisia tapoja, paikoitustyökaluja ja erilaisia työmenetelmiä. Tavoitteena näissä kaikissa on saada kappale kiinnitettyä työstöohjelmaa luodessa määritettyyn asentoon työstökoneen eri akseleiden suhteen. Tämän jälkeen käyttäen kappaleenpaikotustyökalua, selvitetään työkappaleesta ns. nollapisteeksi kutsutun pisteen sijainti työstökoneen kotipisteeseen nähden. Työstökoneen jokaisen akselin arvo tässä nollapisteessä tallennetaan työstökoneen ohjaukseen, valmistuksen vaatiman sijaintitiedon saattamiseksi koneen tietoon. Varsinaisen työstön tapahtuessa työstöohjelmasta valitaan ohjaukseen syötetty nollapiste käytettäväksi, ja työstökone liikuttaa sen akseleita eri sijainteihin tähän nollapisteseen suhteutettuna.

CNC-työstöä varten täytyy työstökeskukselle määrittää myös käytettävien työkalujen mittatiedot (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 121-122). Näitä määrittämiä kutsutaan työkalukorjaimiksi. Työkalukorjaimiin on aina määritettävä käytetyn työkalun pituus, jonka työstökeskus osaa sitten lukea työstöohjelmassa pyydettäessä. Tämän ns. pituuskorjaimen osaa työstökeskus ottaa huomioon kappaleita valmistettaessa. Työkalukorjaimiin voidaan myös antaa työkalun halkaisijatietoja, jolloin työstökeskus osaa vastaavasti huomioida eri halkaisijalla olevien työkalujen käytön samalla työstöohjelmalla kappaleita valmistettaessa.

Monissa nykyaikaisissa CNC-työstökoneissa on nollapisteiden ottaminen ja ohjaukseen syöttäminen automatisoitu sähköisen mittapään avulla. Myös työkalujen mittatietojen mittaaminen ja ohjaukseen syöttäminen on usein automatisoitu työkalunmittauslaitteen avulla, jota työstökone käy koskettamassa työkalun halutuilla pinnoilla.

CAM-ohjelmointi. Työstöohjelmien luominen tapahtuu nykypäivänä tietokoneella käyttäen edistyneitä CAD- ja CAM-ohjelmistoja (Heinonen & Kalliolahti, 2020, s. 136). CAD (Computer Aided Design) tarkoittaa tietokoneavusteista suunnittelua. CAD-ohjelmistolla voidaan luoda virtuaalisia kolmiulotteisia kappaleita, jotka tunnetaan 3D-malleina. Erilaiset CAD-ohjelmistot ovatkin käytössä suunnittelutyön apuna kaikkialla. CAM (Computer Aided Manufacturing) taas tarkoittaa vapaasti käännettynä tietokoneavusteista valmistusta.

CAM-ohjelmistot mahdollistavat monimutkaisien kappaleiden työstöratojen luomisen käyttäen 3D-malleja ja 3D-mallien erilaisia piirteitä apuna niiden luomisessa (Heinonen & Kallio-lahti, 2020, s. 136). CAM-ohjelmointi poistaa paljon CNC-koneiden tuomia rajoitteita ohjelmoinnin näkökulmasta, koska enää ohjelmointia ei tarvitse suorittaa itse kirjoittamalla, ja sen ansiosta säästetään aikaa ja pienennetään virheen mahdollisuutta ohjelmoinnissa. CAM-ohjelmisto kääntää ohjelmiston käyttäjän tekemät työstöradat postproessorin avulla käytettävän koneen ymmärtämäksi G-koodiksi. Tämä helpottaa merkittävästi varsinkin monimutkaisien kappaleiden valmistamista. CAM-ohjelmistojen avulla voidaan tyypillisesti myös simuloida erilaisia työstöohjelmia, jotta voidaan varmentua G-koodin toimivuudesta.

2.3 Hybridivalmistus

Tässä opinnäytetyössä aiemmin käsitellyillä valmistusmenetelmillä, ainetta lisäävällä valmistuksella ja koneistuksella saavutetaan kummallakin paljon erilaisia hyötyjä, mutta on kummassakin menetelmässä silti omat rajoitteensa. Hybridivalmistus yhdistää nämä kaksi valmistusmenetelmää, jotta valmistettavista kappaleista saataisiin maksimoitua kummankin menetelmän edut ja minimoitua niiden luomia rajoitteita. Tämän opinnäytetyön osion tarkoituksena on tuoda lukijalle ymmärrystä hybridivalmistuksesta ja sen luomasta potentiaalista.

Hybridivalmistuksella tarkoitetaan siis erilaisien ainetta lisäävien ja ainetta poistavien valmistusmenetelmien yhdistämistä kappaleen valmistamiseksi (Carlota, 2020; Chu ym., 2014, s. 75-76; Hendrixson, 2019). Yleensä puhuttaessa hybridivalmistuksesta tarkoitetaan metallista valmistettavia kappaleita. Sanalla hybridivalmistus voidaan tarkoittaa kahta toisistaan hieman eroavaa valmistusmenetelmää. Hybridivalmistuksen toinen merkitys on saman koneen tai laitteiston sisällä tapahtuva valmistusprosessi, jossa yhdistyvät ainetta lisäävä valmistus ja ainetta poistava valmistus eli koneistus. Hybridivalmistuksesta puhuttaessa voidaan myös tarkoittaa useiden erillisten koneiden tai laitteiden käyttöä kappaleen valmistuksessa ainetta lisääviä ja ainetta poistavia menetelmiä käyttäen. Erillisten koneiden yhdistäminen on näistä yleisempi lähestymistapa, sillä metallista ainetta lisäävästi valmistetut kappaleet tarvitsevat usein viimeistelyyn avuksi koneistusta. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan erillisten koneiden käyttämistä hybridivalmistuksessa, ja miten kahta erilaista ja erillisillä laitteilla tapahtuvaa valmistusmenetelmää voidaan käyttää täydentämään toisiaan mahdollisimman tehokkaasti.

Yhden laitteiston sisässä tapahtuvassa hybridadvalmistuksessa ainetta lisäävä valmistusmenetelmä on tyypillisesti Direct energy deposition (DED) menetelmä (Carlota, 2020; Hendrixson, 2019; Jones, 2020). Hybridadvalmistuksen ainetta poistavan valmistuksen osuus toteutetaan yleensä moniakselikoneistusta hyödyntäen.

Oheisessa kuvassa 3 on esiteltyä hybridadvalmistusjärjestelmä ja sen hyödyntämät teknologiat. Kuvassa esitelty hybridadvalmistuslaitteisto on tunnetun DMG MORI -nimisen konevalmistajan kehittämä.



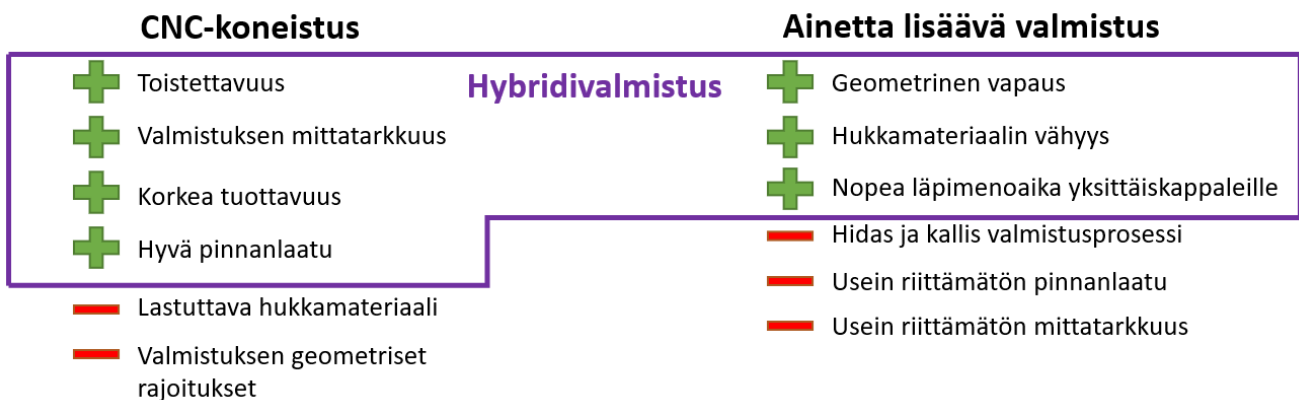
Kuva 3. Tyypillinen hybridadvalmistusprosessi, jossa yhdistyvät ainetta lisäävä valmistus DED-menetelmällä ja 5-akselikoneistus (DMG MORI, i.a.).

Hybridadvalmistuksen hyödyt. Hybridadvalmistus luo paljon uusia mahdollisuuksia valmistamaan teollisuuteen, koska ainetta lisäävän valmistuksen ja ainetta poistavan valmistuksen yhdistämisellä saadaan kummankin menetelmän hyödyt esiin ja rajoitteet minimoitua (Carlota, 2020; Chu ym., 2014, s. 75-76; Engineering product design, i.a.; Hendrixson, 2019). Ainetta lisäävä valmistus on tuonut valmistukseen uudenlaisia mahdollisuuksia sen tuoman geometrisen vapauden ansiosta, mutta usein valmistettavat osat ovat pinnanlaadullisesti ja mittatarkkuudeltaan riittämättömiä sellaisenaan. Metallin ainetta lisäävän valmistuksen tuotantokustannukset ovat tyypillisesti korkeat. Tämän vuoksi koneistettuun pohjaan monimutkaisien

muotojen lisääminen ainetta lisäävästi on jossain tapauksissa merkittävästi kustannuksia laskeva toimintatapa, jolla saadaan minimoitua ainetta lisäävän materiaalin massa. CNC-koneistuksella taas voidaan luoda mittatarkkoja kappaleita tehokkaasti, mutta se tuottaa paljon hukkamateriaalia ja sillä ei pystytä saavuttamaan samanlaista geometrista vapautta kuin ainetta lisäävällä valmistuksella. Hybridivalmistus mahdollistaa myös erilaisien materiaalien yhdistämisen toisiinsa, tosin tietyin rajoittein.

Alla olevassa kuviossa 15 havainnollistetaan menetelmien yhdistämisellä saavutettuja hyötyjä. Tämän lisäksi toisiaan täydentävät menetelmät poistavat toisiensa valmistusteknisiä rajoitteita. Lisää kummankin valmistusmenetelmän tuomista hyödyistä sekä niiden rajoitteista on kerrottuna tämän teoriaosuuden osioissa ainetta lisäävä valmistus ja koneistus.

Hybridivalmistus: parhaat puolet molemmista menetelmistä



Kuvio 15. Hybridivalmistuksella saavutettavat hyödyt (soveltaen Carlota, 2020; Chu ym., 2014, s. 75-76; Engineering product design, i.a.; Hendrixson, 2019; Jones, 2020).

Hybridivalmistuksen lähestymistavat. Hybridivalmistusta voidaan toteuttaa kahdella erilaisella lähestymistavalla (Carlota, 2020; Hendrixson, 2019; Jones, 2020). Ainetta lisäävällä valmistuksella valmistettua kappaletta voidaan koneistaa esimerkiksi sen mittatarkkuuden parantamiseksi tai koneistettuun kappaleeseen voidaan lisätä monimutkaisia muotoja käyttäen hyödyksi ainetta lisäävää valmistusta. Hybridivalmistuksen prosessissa nämä saattavat myös vuorotella ja kappaleen valmistusprosessi saattaa sisältää useita koneistuksia ja ainetta lisääviä vaiheita. Esimerkiksi voidaan koneistaa kappaleen ”pohja”, jonka päälle valmistetaan monimutkaisia geometrioita ainetta lisäävällä valmistuksella, jotka sitten viimeistellään koneistamalla.

Huomioon otettavaa hybridivalmistuksessa. Hybridivalmistuksen yhdistäessä kaksi erillistä valmistusmenetelmää avaa se paljon uudenlaisia mahdollisuuksia tuomalla kummankin menetelmän hyödyt käytettäväksi. Tämä kuitenkin vaatii sitä, että kummankin valmistusmenetelmän ominaispiirteet sekä haasteet osataan ottaa huomioon. Täten huomioonotettavia tekijöitä hybridivalmistuksessa ovat muun muassa (Carlota, 2020; Hendrixson, 2019; Jones, 2020):

- Hybridivalmistukselle soveltuvan kappaleen tunnistaminen.
 - Esimerkiksi monimutkainen geometria, jossa on tarkkoja vaatimuksia pinnanlaatuun tai mittatarkkuuteen liittyen voi olla toteutettavissa ainoastaan käyttämällä hybridivalmistusta.
 - Kappale joka omaa yksinkertaisen helposti koneistettavissa olevan geometrian, mutta jossa on monimutkainen yksittäinen piirre.
- Hybridivalmistuksen tapahtuessa kahden erillisen koneen välillä muodostuu herkästi haasteeksi kappaleen kiinnittäminen ja paikoittaminen koneiden välillä.
- Lastuavissa työkaluissa käytetyt materiaalit sekä mahdolliset pinnoitukset vaihtelevat myös paljon käyttökohteen mukaan (ks. luku 2.2, osa Lastuavat työkalut ja niiden toiminta).
 - Tämän vuoksi onkin tärkeätä huomioida työstettävä materiaali työkalunvalinnassa, sillä usein ainetta lisäävässä valmistuksessa käytetään normaalia lujempia teräksiä.
- Ainetta lisäävän valmistuksen yleistymisen myötä on alettu kiinnittämään huomiota yhä enemmän osien suunnitteluun teknologian mahdollistamien hyötyjen saavuttamiseksi (ks. luku 2.1, osa suunnittelu ainetta lisäävässä valmistuksessa).
 - Monimutkaiset geometriat tuovat hyvin esille ainetta lisäävän valmistuksen hyödyt, mutta jos kappale vaatii hybridivalmistuslähestymistapaa, on monimutkaisien geometrioiden työstäminen usein mahdotonta ilman CAM-ohjelmointia.
 - Lisäämällä työstökoneisiin lisää akseleita eli liikesuuntia on saavutettu kyky valmistaa monimutkaisempia kappaleita vähemmällä työvaiheilla (ks. 2.2, osa moniakselinen CNC-koneistus), täten moniakselinen CNC-koneistus soveltuu erinomaisesti ainetta lisääväälle valmistukselle ominaisien monimutkaisien geometrioiden työstämiseen.

3 TUTKIMUSTYÖN JA SEN TOIMEKSIANTAJAN ESITTELY

Tämän opinnäytetyön teoriaosuudessa on perehdytty kahteen erilliseen valmistusmenetelmään, joita voidaan käyttää metallisten kappaleiden valmistukseen; CNC-koneistukseen ja ainetta lisäävään valmistukseen. Teoriaosuudessa on myös perehdytty näiden kahden valmistusmenetelmän yhdistämiseen niin sanotuksi hybrdivalmistukseksi.

Seuraavaksi tulisikin miettiä, miten hybrdivalmistusta voidaan toteuttaa käytännön tasolla. Tämän tutkimustyön tavoitteena onkin perehtyä juuri tähän. Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Lillbacka Powerco Oy.

Tämän opinnäytetyön kehitystyölle on määritetty seuraavat tavoitteet:

- Lillbacka Powerco Oy:n valmiuksien kartoittaminen hybrdivalmistusjärjestelmän kehittämiseksi.
- Hybrdivalmistuksessa ilmenevien haasteiden kartoitus.
- Hybrdivalmistusjärjestelmäkonseptin luonti tehdyn kartoituksen pohjalta.
- Testata hybrdivalmistusta ja siitä luotua konseptia käytännössä tapaustutkimuksien kautta.
- Löytää kohteita jatkokehitystä varten.

Opinnäytetyön tutkimusosiossa perehdytään siis ensiksi hybrdivalmistuksessa tarvittaviin edellytyksiin, sekä hybrdivalmistuksen toteutuksen haasteisiin. Tavoitteena on kartoittaa Lillbacka Powerco Oy:n valmiudet hybrdivalmistukseen. Lisäksi tavoitteena on kartoittaa huomiioon otettavat asiat onnistuneen hybrdivalmistusjärjestelmän luomiseksi.

Näiden tehtyjen kartoitusten pohjalta luodaan mahdollisimman toimiva konsepti hybrdivalmistusjärjestelmästä. Hybrdivalmistusjärjestelmän konsepti keskittyy pitkälti esisuunnitteluympäristön luomiseen. Tehtyä konseptia ja hybrdivalmistusta testataan kahdessa tapaustutkimuksessa.

Lillbacka Powerco Oy on teollisuusneuvos Jorma Lillbackan vuonna 1969 perustama teollisuusyhtiö (Lillbacka, i.a.; Lillbacka Powerco, i.a.-a). Lillbacka Powerco Oy sijaitsee Pohjanmaalla Alahärmässä.

Lillbacka Powerco Oy. Lillbacka Powerco Oy valmistaa Lillbacka Finn-Power nimellä tunnettuja hydraulisia letkuliitinpuristimia ja niihin liittyviä työkaluja (Lillbacka, i.a.; Lillbacka Powerco, i.a.-a). Letkuliitinpuristimien lisäksi Lillbacka Finn-Power tuoteperheeseen kuuluu myös muita hydraulikkaletkuasetelmien valmistamiseen käytettäviä laitteistoja, kuten katkaisuleikkureita, kuorimakoneita, merkkuslaitteita sekä putkivalmistuksessa käytettäviä laajennuskoneita. Lillbacka Powerco Oy on hydraulisten letkuliitinpuristimien saralla maailmanlaajuinen markkinajohtaja. Noin 95 % Lillbacka Powerco Oy:n tuotannosta viedään ulkomaille, yli 60 maassa toimivan jälleenmyyjäverkoston kautta. Kun tässä työssä puhutaan Lillbackasta, tarkoitetaan sillä opinnäytetyön kirjoittamisen sujuvuuden vuoksi Lillbacka Powerco Oy:tä.

4 NYKYTILAN KARTOITUS JA KEHITYSKOHTTEIDEN MÄÄRITYS

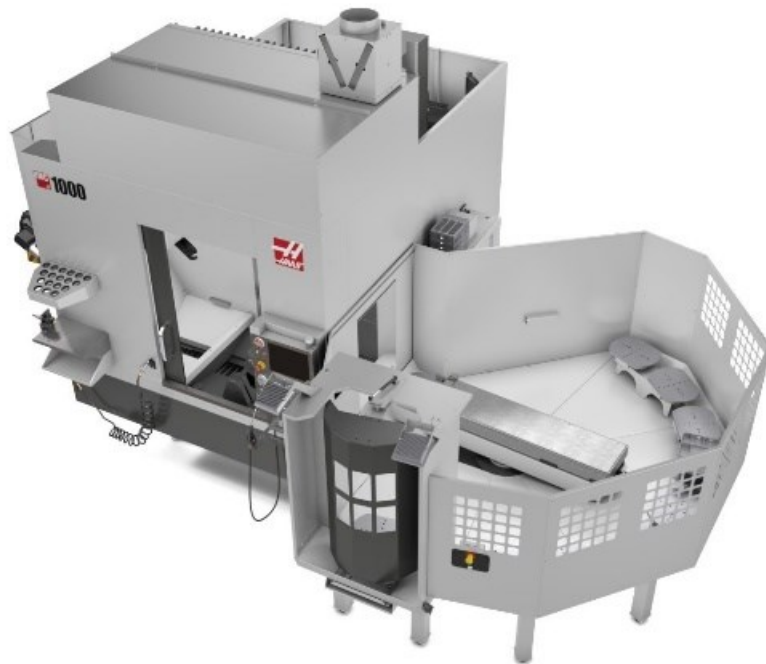
Tässä opinnäytetyön luvussa perehdytään hybridadmistuksessa tarvittaviin edellytyksiin, sekä hybridadmistuksen toteutuksen haasteisiin. Tavoitteena on kartoittaa Lillbacka Powerco Oy:n valmiudet hybridadmistukseen. Lisäksi tavoitteena on kartoittaa huomioon otettavat asiat onnistuneen hybridadmistusjärjestelmän luomiseksi.

4.1 Lillbacka Powercon valmiudet hybridadmistukseen

Valmiudet hybridadmistukseen koneistuksen osalta. Lillbacka Powercolla on pitkä ja vankka kokemus suomalaisesta valmistusteollisuudesta. Koneistaminen on toiminut valmistusmenetelmänä yrityksen alusta asti, joten siitä on olemassa erittäin vankka osaaminen. Lillbacka omaa monipuolisen kattauksen erilaisia CNC-työstökoneita. Tuoreimpana lisäyksenä konekantaan on 5-akselinen Haas UMC-1000SS CNC-työstökeskus. Monimutkaisien geometrioiden valmistuksen kyvykkyyden ansiosta 5-akselinen koneistuskeskus soveltuu loistavasti käytettäväksi osana hybridadmistusjärjestelmää (Haas Automation, 2022).

Lillbackan monipuolinen valikoima erilaisia työstökoneita sisältää myös erilaisia CNC-hiomakoneita. Hiomakoneilla voidaan saavuttaa parempi pinnanlaatu ja mittatarkkuus kuin esimerkiksi CNC-jyrsinnällä, joten CNC-hiontaa voidaan hyödyntää myös osana hybridadmistusta äärimmäisen hyvän pinnanlaadun ja mittatarkkuuden saavuttamiseksi. Haasteeksi tässä kuitenkin muodostuu kappaleiden kiinnitys ja paikoitus moniakselisuuden tuoman muodonvapauden puuttumisen vuoksi.

Lillbackan Haas UMC1000ss -koneistuskeskus sisältää myös paletinvaihtojärjestelmän, jonka avulla voidaan tehdä esivalmistelut useamman kappaleen koneistusta varten, ja koneistuskeskus pystyy itsenäisesti toteuttamaan kappaleenvaihdot ja niiden valmistukset (Haas Automation, 2022). Tämä kasvattaa luonnollisesti koneistuskeskuksen tuottavuutta samalla vähentämällä koneen käyttöön tarvittavia henkilöresursseja. Paletinvaihtojärjestelmä luo myös mahdollisuuden miehittämättömään ajoon esimerkiksi viikonloppujen ajaksi. Kuvassa 4 on kuvattuna Haas UMC1000ss koneistuskeskus paletinvaihtojärjestelmällä varustettuna.



Kuva 4. Haas UMC1000ss paletinvaihtojärjestelmällä (Haas Automation, 2022).

Haas UMC1000ss koneistuskeskus on varustettu myös automaattisella työkalujen mittausjärjestelmällä (Haas Automation, 2022). Automaattisen työkalujen mittausjärjestelmän avulla voidaan lastuavien työkalujen mittatiedot tuoda koneen ohjauksen tietoon automaattisilla työkiertoilla, ja se säästää koneen käyttöön tarvittavia henkilöresursseja sekä minimoi työkalunmittatietojen syötössä olevan virheen mahdollisuutta.

Haas UMC1000ss on varustettu sähköisellä Renishaw OMP40-2 mittapäällä, jonka avulla voidaan koneistettavien kappaleiden nollapisteet tuoda ohjauksen tietoon käyttämällä automaattisia työkiertoja (Haas Automation, 2022; Renishaw, 2022). Sähköisellä mittapäällä on myös mahdollista suorittaa monipuolisesti tarkastusmittauksia monimutkaisissakin kappaleissa, joiden mittatarkkuutta saattaisi olla haastavaa varmentaa käsimittalaitteilla. Laadunvarmentamisesta sähköisellä mittapäällä voidaan saada merkittäviä hyötyjä hybrdivalmistukseen, sillä usein ainetta lisäävästi valmistetut geometriat ovat haastavia varmentaa käyttäen käsimittalaitteita. OMP40-2 mittapään toistotarkkuus on $1,0 \mu m$ (0,001 mm), joten myös tarkkuutensa puolesta mittapää soveltuu erinomaisesti käytettäväksi laadunvarmennuksen työkaluna.

Lillbackan Haas UMC1000ss moniakselikoneistuskeskus soveltuu äärimmäisen hyvin osaksi hybridivalmistusjärjestelmää seuraavista syistä:

- 5-akseli koneistuksen tuoma muodonvapaus on omiaan täydentämään monimutkaisia geometrioita omaavien ainetta lisäävästi valmistettujen kappaleiden riittämätöntä pinnanlaatua ja mittatarkkuutta.
- Paletinvaihtojärjestelmän ansiosta voidaan asetuksen tekoa hybridivalmistuskappaleille suorittaa häiritsemättä koneen tekemää sarjatuotantoa.
- Haas UMC1000ss on varustettu elektronisella mittapäällä, jolla voidaan myös suorittaa laadunvarmennusta valmistetuille kappaleille.
- Nykyaikaiset automatisoidut mittalaitteet minimoivat inhimillisen virheen mahdollisuutta ja parantavat tuottavuutta.
- Ison työkalumakasiinin (50 työkalua) ansiosta voidaan käyttää erilaisia lastuavia työkaluja hybridivalmistuksessa, ilman että sarjatuotannossa käytettyihin vakiotyökaluihin tarvitsee koskea.

Valmiudet 3D-tulostamiseen osana hybridivalmistusta. Lillbacka on muutamien viime vuosien aikana tullut osaksi suomalaista ainetta lisäävää valmistusta (Lillbacka Powerco, i.a.-b). Lillbacka valmistaa 3D-tulostamalla metallista kappaleita alihankintaan. Tämän lisäksi ainetta lisäävästi valmistetaan myös osia ja työkaluja Lillbackan valmistamiin koneisiin, sekä erilaisia apuvälineitä tuotannon käyttöön.

Lillbackalla on tulostuslaboratorio, jonka konekantaan kuuluvat metallin 3D-tulostin, joka on 3D Systemsin valmistama ProX DMP 300. Kyseinen 3D-tulostin käyttää teoriaosiossa esiteltyä jauhepetisulatusmenetelmää (Powder Bed Fusion). ProX DMP 300 3D-tulostimelle luetaan valmistajan mukaan valmistustarkkuudeksi X- ja Y-akseleilla $100\ \mu\text{m}$ (0,1 mm) ja Z-akseleilla $20\ \mu\text{m}$ (0,02 mm) (Molitch-Hou, 2016). Vaikka valmistusprosessi onkin tarkkuudeltaan osassa käyttökohteista riittävä sellaisenaan, vaativat valmistetut kappaleet haastavimmissa käyttökohteissa vielä tätäkin parempaa mittatarkkuutta. ProX DMP 300 3D-tulostimen valmistusala on 250 x 250 x 330 mm, joten se soveltuu hyvin kappaleiden valmistamiseen monenlaisiin eri käyttökohteisiin. Kuvassa 5 on kuvattuna ProX DMP 300 metallin 3D-tulostin.



Kuva 5. ProX DMP 300 metallin 3D-tulostin (Molitch-Hou, 2016).

Lillbackalla on metallitulostuksen valmistusmateriaalina käytössä maraging-teräs (DIN 1.2709), joka on erittäin hyvillä lujuusominaisuuksilla varustettu työkaluteräs (3D Systems, i.a.; 3D Systems, 2019; Toulas, 2017). Maraging-teräksen suuren murtolujuuden ja kovuuden ansiosta se soveltuu erittäin hyvin käytettäväksi esimerkiksi erilaisien erikoistyökalujen ja muottien valmistukseen. Maraging-terästä käytetään myös muun muassa lentokone- ja avaruusteollisuudessa sen erinomaisten lujuusominaisuuksien ja kulutuksenkeston ansiosta. Maraging-teräs on ominaisuuksiensa puolesta myös hyvin hitsattavissa ja koneistettavissa. Maraging-teräs on myös helposti lämpökäsiteltävä materiaali, lämpökäsittelyn avulla saadaan sen materiaaliominaisuuksia parannettua vielä entisestään merkittävästi.

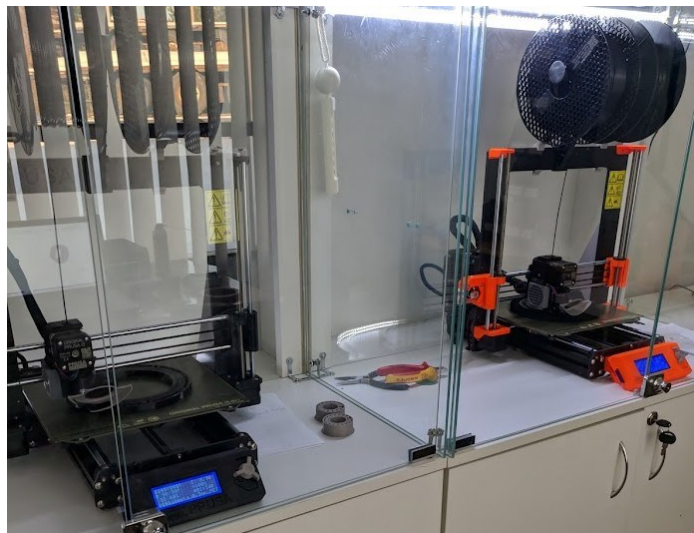
Maraging-teräkset ovat yleisesti fyysisiltä ominaisuuksiltaan hyvin stabiileja, ja sen ansiosta lämpökäsittelyn aiheuttamat mittamuutokset ovat siinä hyvin pieniä (Toulas, 2017). Lämpökäsittelyn aiheuttamien mittamuutoksien pienuuden ansiosta on tietyissä käyttökohteissa mahdollista koneistaa valmistettava kappale lopullisiin mittoihin jo ennen lämpökäsittelyä. Tämä mahdollistaa helpommin toteutettavan koneistusprosessin. Tarkempia tietoja maraging-teräksen materiaaliominaisuuksista on saatavilla tämän opinnäytetyön liitteenä 2 (3D Systems, 2019).

Lillbacka on investoinut myös PostProcess merkkiseen Rador jälkikäsittelytärtytimeen (PostProcess, 2022). Jälkikäsittelytärtytimellä voidaan parantaa metallitulosteiden pinnanlaatua merkittävästi, ja sen avulla pystytään saavuttamaan pinnankarheudeksi jopa $Ra\ 1,6\ \mu m$. Jälkikäsittelytärtytin käyttää hiovia kiviä, hiomanesteseosta ja laitteen tuottamaa tärinää poistaakseen kappaleiden pintojen epäpuhtauksia ja epätasaisuuksia. Kuvassa 6 on esiteltyinä kyseinen PostProcess Rador jälkikäsittelytärtytin.



Kuva 6. PostProcess merkinen Rador jälkikäsittelytärtytin (PostProcess, 2022).











Tämän lisäksi tulostuslaboratoriossa on kaksi kappaletta 3D-tulostimia, joilla valmistusmateriaalina toimivat erilaiset muovit. Tulostimet ovat malliltaan Prusa i3 MK3 (Prusa, i.a.). Muovin 3D-tulostimien toimintaperiaatteena toimii materiaalin pursotus, joka on esiteltyinä teoriaosiossa. Muovitulostimia käytetään pääasiassa tuotannon apuvälineiden, kuten koneistuskiinnittimien ja erilaisien prototyyppien valmistukseen. Kuvassa 7 on esiteltyinä kaksi kappaletta Prusa i3 MK3 3D-tulostimia, jotka ovat osa Lillbackan tulostuslaboratoriota.



Kuva 7. Lillbacka Powercon käyttämät Prusa i3 MK3 muovin 3D-tulostimet.

Yhteenveto Lillbackan valmiuksista hybrdivalmistukseen. Vahvan kyvykkyyden niin ainetta lisäävästä valmistuksesta, kuin CNC-koneistuksestaakin omaavalla Lillbackalla on erinomaiset edellytykset hybrdivalmistuksen aloittamiseen ja sen kehittämiseen. Isona etuna on, että erittäin hyvä konekanta hybrdivalmistukseen löytyy jo, joten uusille isommille investoinneille ei ole tarvetta. Myös vankka osaaminen ja kokemus niin ainetta lisäävän valmistuksen, kuin CNC-koneistuksenkin saralta ovat suurena apuna hybrdivalmistuksen kehityksessä. Tämän lisäksi Lillbackan hyvän suunnitteluosaamisen merkitys hybrdivalmistukselle on tärkeä, jotta valmistettavien kappaleiden suunnittelussa pystytään hyödyntämään ainetta lisäävän valmistuksen mahdollistavan muodonvapauden moninaisia hyötyjä. Alla olevassa kuviossa 16 on tiivistettynä Lillbackan hyvät valmiudet hybrdivalmistuksen aloittamiseksi ja sen kehittämiseksi.

Lillbackan valmiudet hybrdivalmistukseen

CNC-koneistus	Ainetta lisäävä valmistus
 Monipuolinen konekanta erilaisia CNC-työstökoneita.	 Metallitulostuksen hyvän mittatarkkuuden ansiosta käyttökohteesta riippuen vain kriittiset mitat vaativat koneistusta.
 Mahdollisuus hyödyntää myös CNC-hiomista osana hybrdivalmistusta.	 Käytössä oleva valmistusmateriaali Maraging-teräs soveltuu erinomaisesti hybrdivalmistukseen sen hyvien materiaaliominaisuuksien ja helpon koneistettavuuden ansiosta.
 Haas 5-akselinen työstökeskus mahdollistaa ainetta lisäävälle valmistukselle ominaisien monimutkaisien geometrioiden työstämisen.	 Jälkikäsittelytärtyin parantaa tulosteiden pinnanlaatua ja vähentää täten koneistusta vaativien pintojen määrää.
 Haas 5-akselinen työstökeskus on varustettu 50 työkalunmakasiinilla, joten sarjatuotannossa olevia työkaluja ei tarvitse välttämättä irrottaa, jos hybrdivalmistusta varten tarvitaan erikoistyökaluja.	 Muovin 3D-tulostimia voidaan hyödyntää monipuolisesti niin hybrdivalmistettavien kappaleiden, kuin varsinaisen valmistuksen suunnittelussa ja toteutuksessa
 Haas 5-akselinen työstökeskus on varustettu myös paletinvaihtojärjestelmällä, jonka ansiosta koneella tapahtuvaa sarjatuotantoa, ei tarvitse keskeyttää hybrdivalmistuksen valmisteluja varten.	
 Haas 5-akselinen työstökeskus mahdollistaa myös monimutkaisien kappaleiden laadunvarmennuksen sen erittäin tarkan (toistettavuus $1,0 \mu\text{m}$ / 0,001 mm) elektronisen mittapään ansiosta.	

Kuvio 16. Yhteenveto Lillbackan hyvästä valmiudesta hybrdivalmistuksen kehittämiseksi.

4.2 Hybrdivalmistuksen haasteiden määrittäminen tutkimustyötä varten

Tutkimustyön toteutusta varten tulee suorittaa hybrdivalmistuksen haasteiden kartoitus. Haasteiden kartoitus toteutettiin opinnäytetyön teoriaosuuden sekä Lillbackan ja opinnäytetyön tekijän kokemusten pohjalta. Hybrdivalmistuksen ollessa yhdistelmä kahdesta eri valmistusmenetelmästä, yhdistyvät siinä kummankin yksittäisen menetelmän omat haasteet

sekä haasteet, jotka muodostuvat menetelmien yhteen liittämisestä. Haasteiden kartoituksen tavoitteena oli hahmottaa kaikista merkittävimmät haasteet ja kehityskohteet.

Hybridivalmistuksessa työkappaleiden paikoitus ja kiinnitys on avainasemassa. Lillbackan tavoittelemassa hybridivalmistuksen lähestymistavassa, jossa hybridivalmistus tapahtuu erillisillä laitteistoilla, on työkappaleiden paikoitus ja kiinnitys tärkeässä roolissa. Työkappale tulisi pystyä paikoittamaan ja kiinnittämään mahdollisimman tarkasti metallin 3D-tulostimelle käytettäessä koneistettua työkappaletta valmistuksen pohjana. Käytettäessä toista hybridivalmistuksen lähestymistapaa, jossa ainetta lisäävästi valmistettua kappaletta koneistetaan, muodostuu myös haasteeksi työkappaleen paikoitus ja kiinnittäminen geometrioiden ollessa usein monimutkaisia. Täten tulisikin pohtia erilaisia ratkaisuja työkappaleiden paikoitukseen ja kiinnitykseen kahden erillisen koneen välillä.

Sähköisen valmistusketjun hallinta ja 3D-mallien sijaintitietojen säilyttäminen. Hybridivalmistus on täysin eri ohjelmistoihin pohjautuva monivaiheinen valmistusprosessi, ja haasteeksi siinä muodostuukin sähköisen valmistusketjun hallinta ja eritoten erilaisien 3D-mallien sijaintitiedon säilyttäminen. Tämän vuoksi on tärkeää ottaa tiedonsiirtoketju huomioon prosessissa ja tutkia tapoja, joilla saadaan 3D-mallit säilyttämään kaikki tarvittavat tiedot eri ohjelmistojen välillä.

CAM-ohjelmoinnin kehitys. CAM-ohjelmointi eli työstöratojen luominen on välttämätön ja kriittinen vaihe uuden kappaleen koneistusprosessia. Työstöratojen luomisessa on tavoitteena, että pystytään luomaan mahdollisimman kustannustehokas menetelmä vaatimukset täyttävän kappaleen valmistamiseksi. CAM-ohjelmointi on usein paljon aikaa vievä työvaihe koneistusprosessissa. CAM-ohjelmoinnissa tehdyn virheen vuoksi on myös mahdollista aiheuttaa suurta taloudellista vahinkoa CNC-koneelle. Tämän vuoksi onkin hybridivalmistuksen kannalta tärkeä tutkia keinoja tämän työvaiheen nopeuttamiseksi, helpottamiseksi ja sen turvallisuuden kehittämiseksi.

Koneistusvarat osana hybridivalmistusta. Koneistusvarat tulee huomioida hybridivalmistusta suunniteltaessa, jotta haluttuihin toleransseihin päästään. Koneistusvaroja on hyvä testata, jotta saadaan selville, kuinka paljon koneistusvaroja tulisi pinnoille jättää ainetta lisäävän valmistuksen jäljiltä, jotta koneistaminen on tehokasta ja haluttu pinta saadaan koneistettua puhtaaksi.

Prosessin monimutkaisuus ja sen ennakoiti aiheuttaa omat haasteensa. Hybridivalmistuksen ollessa kahden erilaisen valmistusmenetelmän yhdistelmä, on hybridivalmistuksen prosessi väistämättäkin monimutkainen. Hybridivalmistuksen prosessin moninaiset muuttujat muodostavat tarpeen valmistuksessa tapahtuvien muuttujien ennakoitiin.

Potentiaalin kartoitus ja hyödyntäminen. Hybridivalmistuksella on opinnäytetyön teoriaosuuden pohjalta paljon olemassa olevaa potentiaalia. Täten tulisi tutkia erilaisia lähestymistapoja, joita voidaan käyttää tämän potentiaalin ja hybridivalmistuksen hyötyjen saavuttamiseksi.

Yhteenveto hybridivalmistuksen haasteista. Oheisessa kuviossa 17 on yhteenveto hybridivalmistuksen merkittävimmistä haasteista, joita tulisi tutkia ja kehittää hybridivalmistuksen täyden potentiaalin saavuttamiseksi.



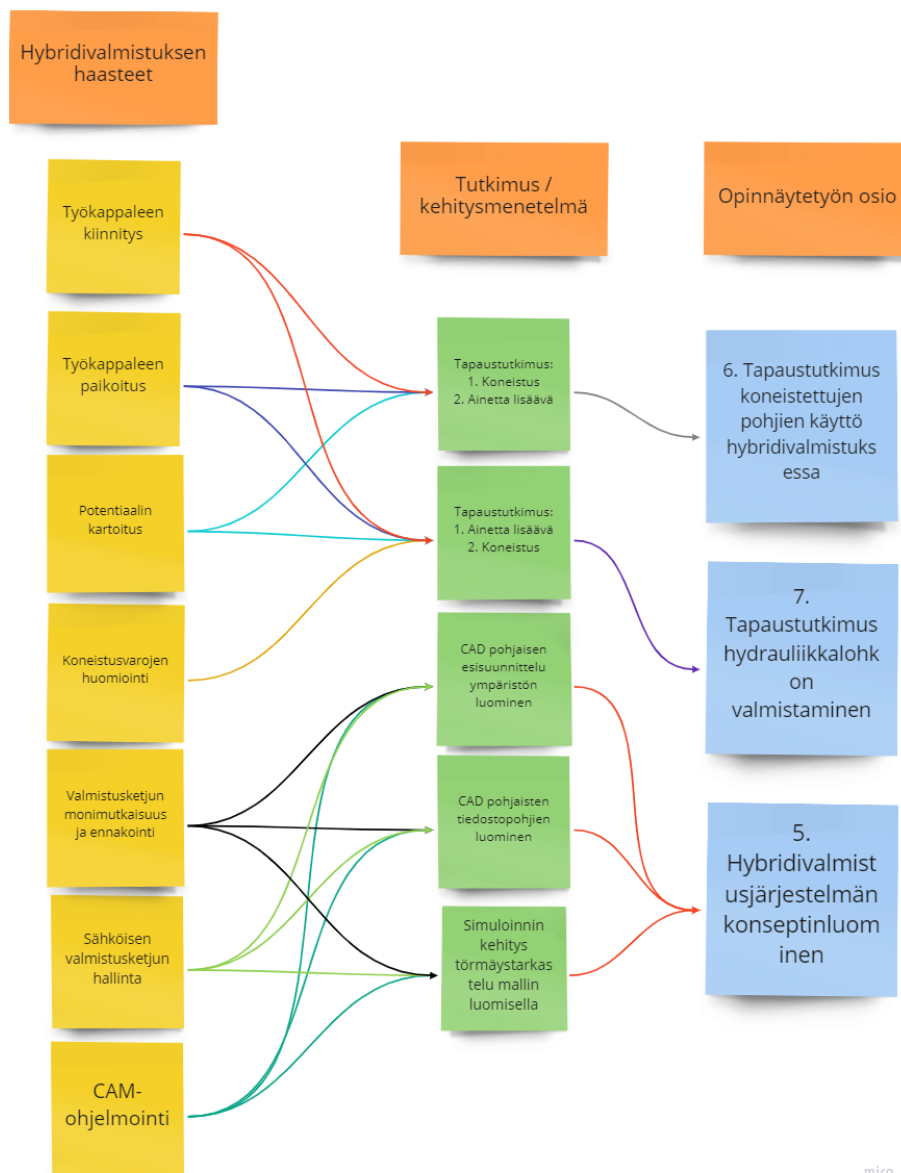
miro

Kuvio 17. Yhteenveto kartoitetuista haasteista, jotka ovat isossa roolissa hybridivalmistuksessa.

4.3 Tutkimus- ja kehitystyön suunnitelma haasteiden pohjalta

Aiemmin tehdyssä kartoituksessa pohdittiin hybrdivalmistukseen liittyviä haasteita. Hybrdivalmistuksen tehokas hyödyntäminen vaatiikin siis näiden haasteiden laajempaa tutkimista ja hybrdivalmistuksen kehittämistä näiden haasteiden pohjalta.

Alla olevassa kuviossa 18 on kuvattuna havaitut hybrdivalmistuksen haasteet. Haasteiden pohjalta valittiin käytettävät tutkimus- ja kehitysmenetelmät kullekin haasteelle. Kuviossa on myös kuvattuna se, missä opinnäytetyön osiossa mitäkin tutkimus- ja kehitysmenetelmää käytetään.



Kuvio 18. Hybrdivalmistuksen haasteet ja niihin tässä opinnäytetyössä käytettävät tutkimus- ja kehitysmenetelmät sekä opinnäytetyön osiot.

Hybridivalmistusjärjestelmän konseptin luominen. Hybridivalmistuksen ollessa uudenlainen valmistustapa, josta Lillbackalla ei ole vielä kokemusta, tulee hybridivalmistusjärjestelmästä ja sen käytöstä luoda konsepti. Konseptin luomisessa on tavoitteena luoda toimintatavat ja menetelmät, joita tehokkaassa hybridivalmistuksessa käytetään.

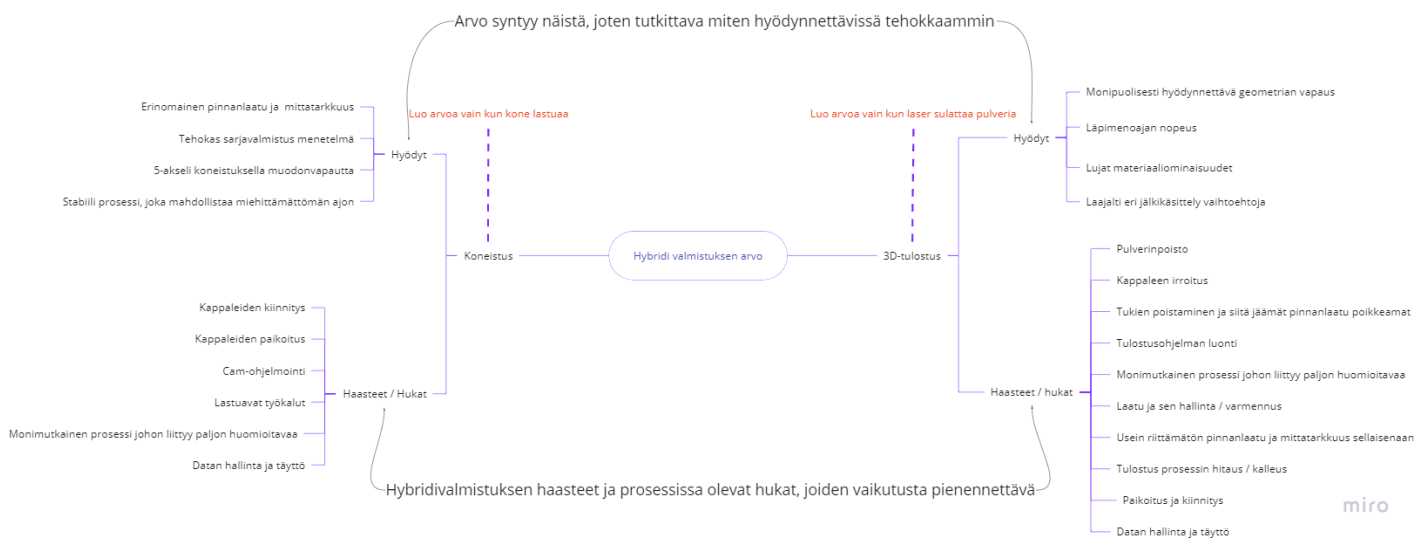
Tapaustutkimus koneistettujen pohjien käyttö hybridivalmistuksessa. Hybridivalmistuksessa voidaan käyttää kahta erilaista lähestymistapaa, jonka vuoksi tulisi kumpaankin perehtyä paremmin. Tässä tutkimustyössä tehdään tapaustutkimus, jossa tutkitaan koneistettujen pohjien käyttämistä hybridivalmistuksessa. Tavoitteena on saada parempi käsitys sen haasteista, lähestymistavoista ja hyödyistä.

Tapaustutkimus hydraulikkalohkon valmistaminen. Tässä tutkimustyössä tehdään myös toinen tapaustutkimus, jossa tutkitaan toista hybridivalmistuksen lähestymistapaa. Tapaustutkimuksessa valmistetaan hydraulikkalohko, käyttäen ensiksi ainetta lisäävää valmistusta monimutkaisen kappaleen valmistamiseksi, jonka jälkeen moniakselikoneistuksen avulla hydraulikkalohko viimeistellään.

5 HYBRIDIVALMISTUSJÄRJESTELMÄKONSEPTIN LUOMINEN

5.1 Arvon muodostuminen hybridivalmistuksessa

Ennen hybridivalmistuksen suunnittelua tulee painaa mieleen niin koneistuksen kuin ainetta lisäävän valmistuksen tuomat hyödyt ja haasteet. Arvon muodostumisen tulisi ajaa hybridivalmistuksen suunnittelussa tehtäviä päätöksiä. Kuviossa 19 on kuvattu hybridivalmistuksessa syntyvän arvon muodostumista. Kuvio on esitettyä myös liitteenä 3 suuremmissa koossa.



Kuvio 19. Mindmap hybridivalmistuksen arvonmuodostumisesta sekä sen hyödyistä ja haasteista.

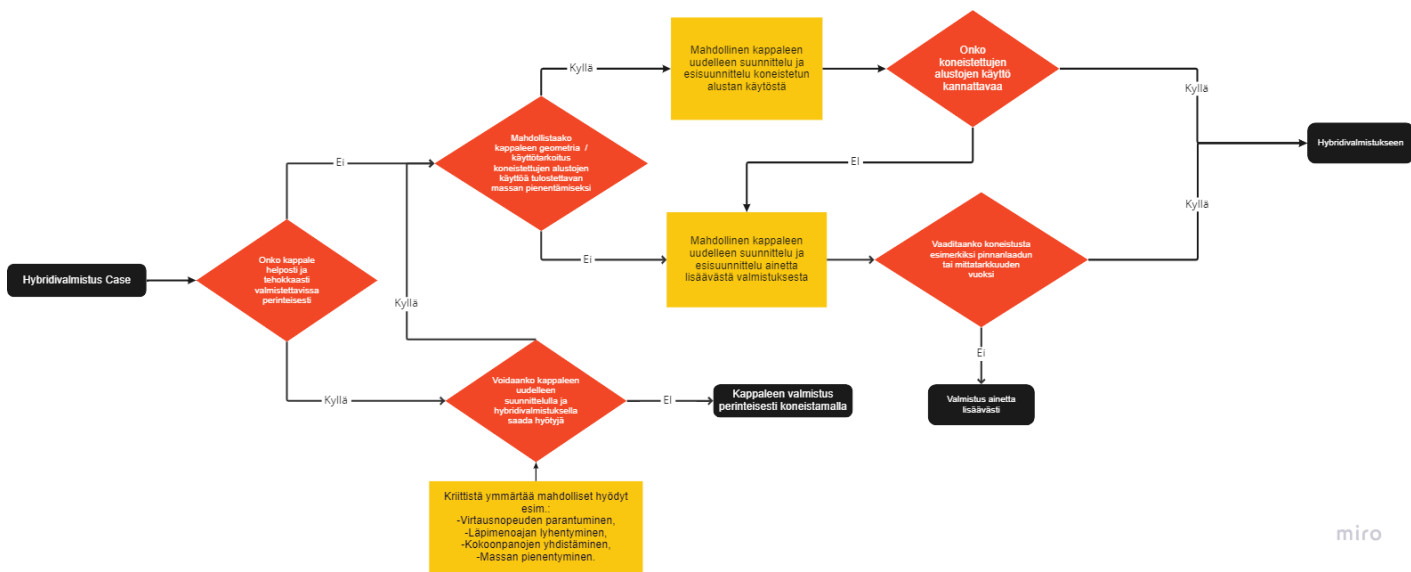
Hybridivalmistuksen suunnittelussa tulee myös pitää mielessä se, että ainetta lisäävällä valmistuksella harvoin pystytään kilpailemaan koneistamista vastaan puhtaasti kustannuksia tarkkailemalla. Hybridivalmistuksesta tulisikin pyrkiä löytämään muita hyötyjä, jotka perustelisivat valmistuskustannuksien kasvun kappaleen ominaisuuksia parantamalla.

Hybridivalmistettavan kappaleen suunnitteluun käytettävän ajan määrään on myös syytä kiinnittää huomiota. Yksittäisen kappaleen hybridivalmistuksen suunnitteluun ei tule käyttää liikaksi aikaa. Jos kappaleita valmistetaan säännöllisesti isoina sarjoina, on hybridivalmistuksen suunnitteluun ja eri lähestymistapojen pohdintaan kannattavaa käyttää reilusti aikaa, jotta parhaimmat ratkaisut saataisiin varmasti valittua käytettäväksi.

5.2 Lähestymistapojen valinta

Hybridivalmistusta voidaan toteuttaa monella erilaisella lähestymistavalla. Täten ensimmäinen vaihe hybridivalmistuksessa tulisikin olla eri lähestymistapojen pohdinta. Hybridivalmistus tuo paljon mahdollisuuksia, mutta sen kalliiden kustannusten vuoksi se ei ole oikea vaihtoehto joka tilanteeseen.

Alla olevassa kuviossa 20 on kuvattuna hybridivalmistuksen lähestymistapojen valinnan prosessi. Kuvio on esitettyä myös liitteenä 4 suuremmissa koossa.



Kuvio 20. Hybridivalmistuksen lähestymistapojen valinnan prosessi.

CNC-koneistamisen ollessa erittäin kustannustehokas valmistusmenetelmä yksinkertaisille kappaleille, tulisi CNC-koneistusta käyttää kappaleille, jotka ovat sillä helposti ja tehokkaasti valmistettavissa. Poikkeuksena tähän on tapaukset, joissa kappaleen uudelleen suunnittelulla saavutetaan sellaisia hyötyjä, jotka ylittävät valmistuskustannusten mahdollisen nousun. Tällaisia hyötyjä voisi esimerkiksi olla virtaushäviöiden pienentyminen hydraulikkajärjestelmässä tai useiden kappaleiden yhdistäminen kokoonpanotyön vähentämiseksi.

Jos valmistettava kappale muodostuu selkeästi helposti koneistettavissa olevasta osuudesta ja monimutkaisesta geometriasta, voi silloin olla järkevää pienentää ainetta lisäävän valmistuksen osuutta kappaleen massasta. Tämä voidaan toteuttaa käyttämällä koneistettua alustaa, jonka päälle monimutkaiset geometriat valmistetaan. Huomioitavaa on kuitenkin, että koneistettava alusta täytyy pystyä kiinnittämään ja paikoittamaan ainetta lisäävää valmistusta varten. Koneistettavan alustan tulee myös omata tasaiset pohja- ja kansipinnat ainetta

lisäävää valmistusta varten. Tämänlainen lähestymistapa voisi olla hyödyllinen esimerkiksi muottiosien valmistuksessa, jossa kappaleet usein muodostuvat yksinkertaisemmasta pohjaosasta, sekä monimutkaisemmasta muottigeometriasta. Koneistettuja alustoja voidaan kustannustehokkaasti valmistaa isompia sarjoja ennalta. Tällöin läpimenoajan pituus lyhenee kappaleen valmistuksen ollessa jo osittain valmiina, ja monimutkaiset geometriat voidaan valmistaa sen päälle tarvittaessa.

Kappaleen valmistuksen ollessa kannattavaa ainetta lisäävästi, mutta jos sen valmistuksessa ei voida käyttää koneistettavaa alustaa valmistettavan massan pienentämiseksi tuleekin pohjata kappaleen tarvetta koneistukselle. Pääsyyt ainetta lisäävästi valmistetun kappaleen koneistamiseksi ovat sen pinnanlaadun ja mittatarkkuuden parantaminen. Jos kappaleen pinnanlaadun ja mittatarkkuuden vaatimukset ovat toteutettavissa ainetta lisäävällä valmistuksella, on hyvin epätodennäköistä, että hybridivalmistustoteutuksella saataisiin tuotua merkittävää lisäarvoa kappaleelle.

5.3 Esisuunnittelun merkitys hybridivalmistuksessa

Hybridivalmistuksen sujuvan toteutettavuuden vuoksi tulee ennen varsinaisen valmistusprosessin aloitusta suunnitella sen toteutus etukäteen. Tämän avulla osataan paremmin määrittää tarvittavat koneistusvarat ja mahdolliset muut koneistukseen tarvittavat geometriset muutokset, kuten paikoituspinnat tai tulostettavat lisäkkeet, kappaleelle tehtävää kiinnitystä varten. Tämän avulla osataan myös ennakoita mahdollisia muita haasteita, joita valmistusprosessissa voi ilmetä, sekä arvioida valmistuskustannuksia.

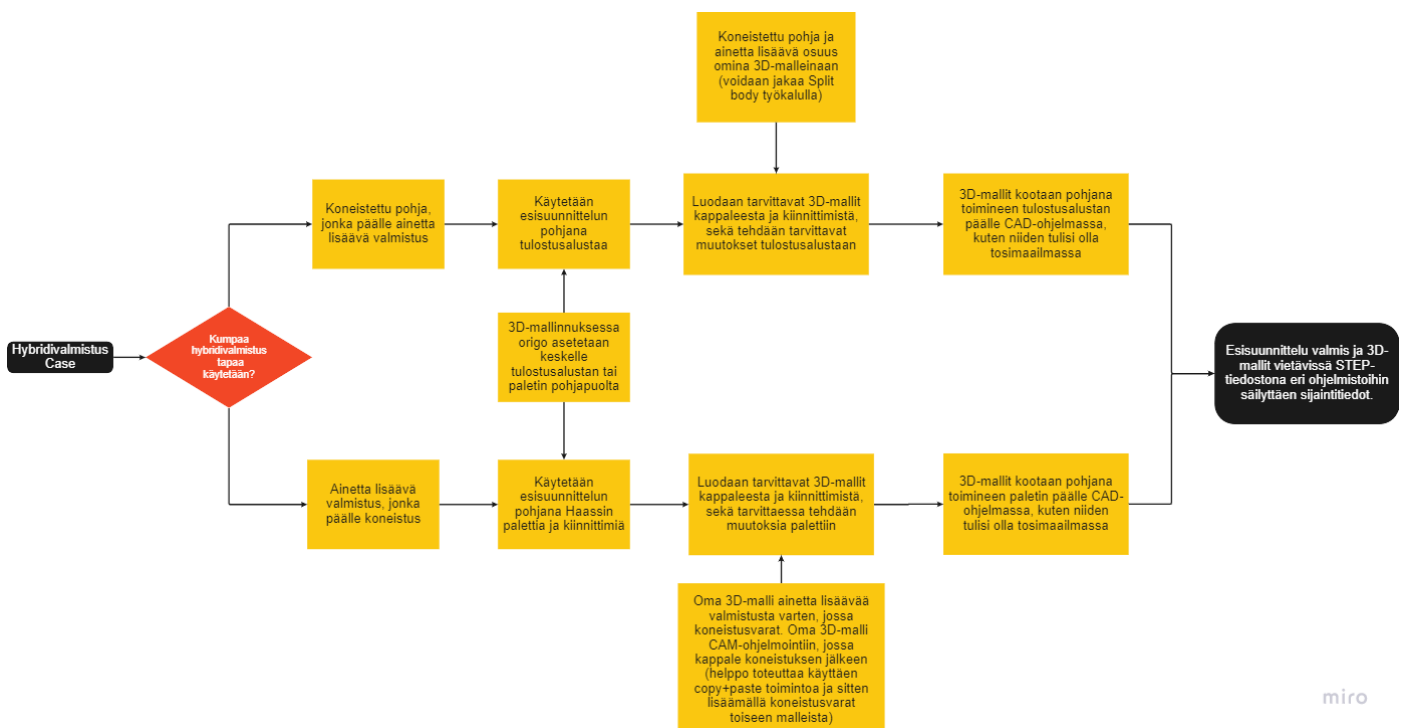
Valmistusprosessin suunnittelu on hybridivalmistuksessa merkittävä haaste, koska huomioitavia asioita on paljon. Tämän vuoksi onkin järkevää hyödyntää CAD-mallinnusohjelmistoja monipuolisesti esisuunnittelun työkaluna. Luomalla jo esisuunnitteluvaiheessa CAD-ohjelmistossa valmistettavan kappaleen eri 3D-mallit helpotetaan valmistusohjelmien luomista niin ainetta lisäävää valmistusta, kuin moniakselikoneistusta varten. 3D-malleihin pohjautuvalla esisuunnittelulla pystytään monipuolisesti tutkimaan erilaisia lähestymistapoja, sekä ennakoimaan niiden haasteita.

Lillbackan käyttämä Mastercam CAM-ohjelmisto on erittäin pätevä työkalu nykyaikaisien työstöratojen luomiseen. Vaikka siinä onkin sisäänrakennettuja CAD-ominaisuuksia, eivät ne ole Lillbackan kokemusten mukaan yhtä helppokäyttöisiä kuin varsinaisien CAD-

ohjelmistojen ominaisuudet. Tekemällä esisuunnittelu Fusion 360-CAD ohjelmistolla voidaan kiinnitykset koneistusprosessia varten sekä eri työvaiheiden 3D-mallit (jos esimerkiksi työväroja on tarvetta lisätä kappaleille) suunnitella ja luoda helpommin.

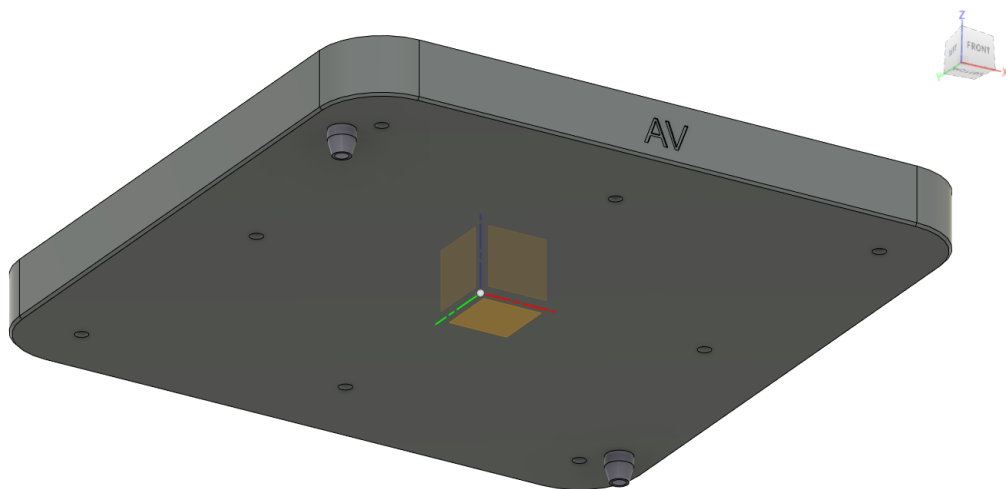
Tässä opinnäytetyössä luotiin Haas-työstökeskuksella käytettävän Schunk-merkkisen hydrauliliikkapuristimen ja ainetta lisäävässä valmistuksessa käytettävien alustojen 3D-mallit. Schunk-puristimen 3D-mallit olivat saatavissa valmistajalta. Ainetta lisäävässä valmistuksessa käytettävät valmistusalustat 3D-mallinnettiin itse. Tämän lisäksi Lillbackalla on jo aiemmin 3D-mallinnettu Haas työstökeskuksen palettijärjestelmässä käytetyt paletit. Erilaisia 3D-malleja ja niistä kokoonpanoiksi esivalmisteltuja pohjia voidaan helposti kopioida käytettäväksi esisuunnittelussa apuna.

Kun esisuunnittelussa 3D-mallit ovat rakennettuna oikein, voidaan ne tuoda STEP-tiedostomuodossa olevana kokoonpanona sekä Mastercamiin että ainetta lisäävien valmistusohjelmien teossa käytettävään 3DXpert-ohjelmistoon. Tämän avulla saadaan säilytettyä 3D-mallien sijaintitiedot toisiinsa nähden, joka on kriittistä hybridivalmistuksen sujuvalle ja tehokkaalle hyödyntämiselle. Oheisessa kuviossa 21 on prosessikaaviolla kuvattuna esisuunnittelussa tehtävien 3D-mallien hallinta, jotta eri kappaleiden sijaintitiedot säilyisivät tallessa. Prosessikaavio on esitettyä myös liitteenä 5 suuremmissa koossa.

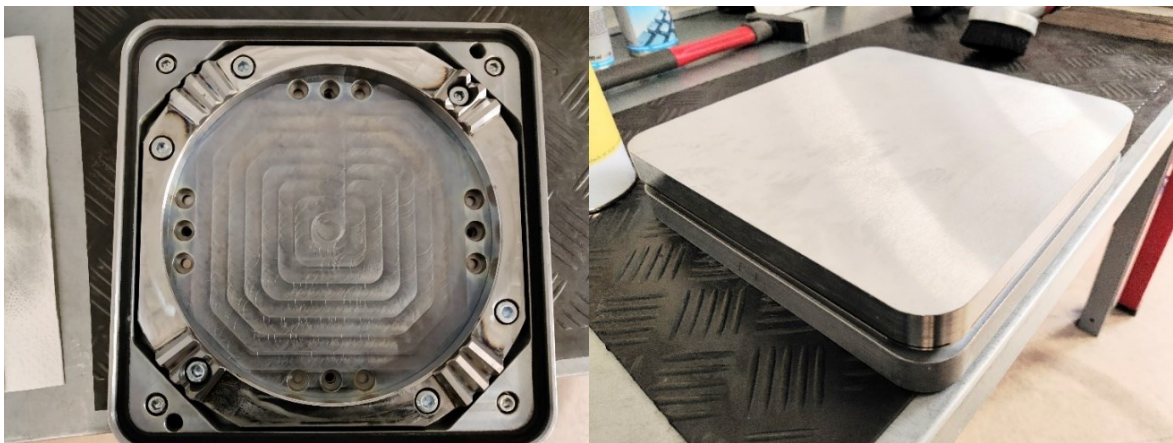


Kuvio 21. Esisuunnittelun kulku 3D-mallien hallinnan näkökulmasta.

Kuviossa 22 on esitettyä ainetta lisäävässä valmistuksessa käytettävä valmistusalusta, joka 3D-mallinnettiin osana tätä opinnäytetyötä. Kuviossa 3D-mallinnuksen origo on asetettuna keskelle valmistusalustan pohjaa. Esisuunnittelussa tarvittavat 3D-mallit rakennetaan tämän päälle. Valmistusalusta kiinnitetään Prox DMP300 metallin 3D-tulostimen irrotettavaan pohjalevyyn, joka on esitettyä kuvassa 8. Kuviossa 22 näkyvien paikoitustappien avulla valmistusalusta paikoitetaan suhteessa pohjalevyyn. Kuvassa 8 vasemmalla on kuvattuna valmistusalusta ja pohjalevy kokoonpantuna alapäin kuvattuna. Oikealla kuvassa 8 on kuvattuna valmistusalusta ja pohjalevy kokoonpantuna ylhäältäpäin kuvattuna.



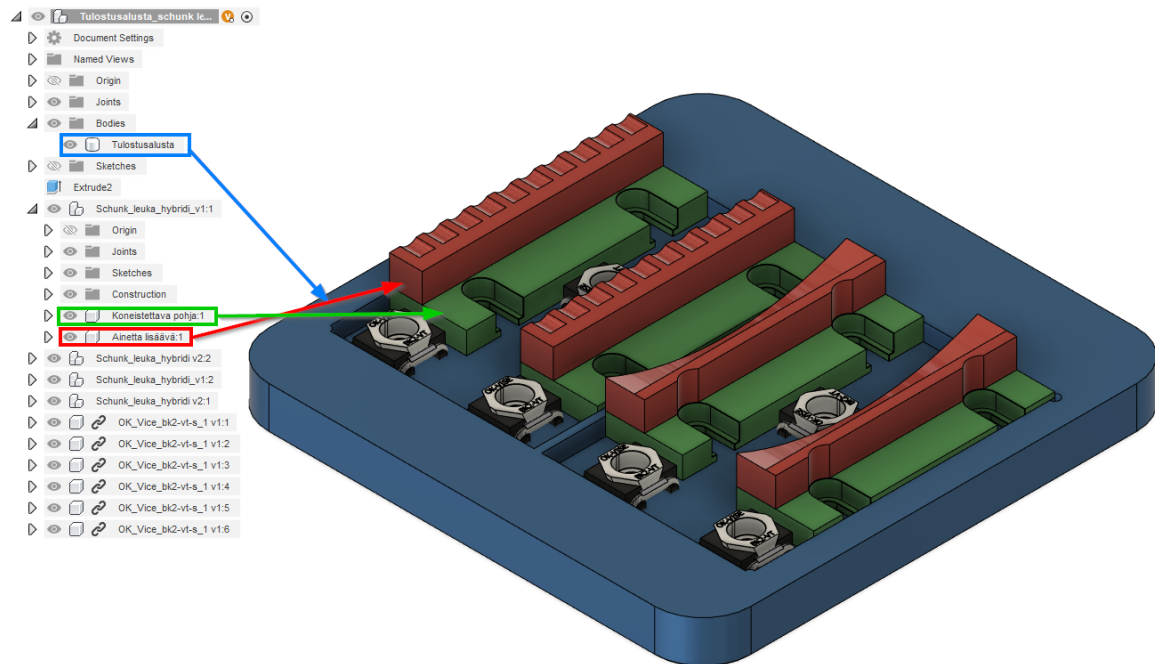
Kuvio 22. Ainetta lisäävässä valmistuksessa käytettävän valmistusalustan 3D-malli.



Kuva 8. Vasemmalla pohjasta päin kuvattuna irrotettava pohjalevy, johon valmistusalusta kiinnitettyä kuusiokoloruuvein. Oikealla valmistusalusta ja Prox DMP300 metallin 3D-tulostimen pohjalevy kokoonpantuna.

Kuviossa 23 on kuvattuna esimerkki hybridi valmistuksen esisuunnittelusta, jossa valmistetaan Schunk-puristimelle muotoleukoja käyttäen koneistettuja alustoja ainetta lisäävästi valmistettavan massan pienentämiseksi. Suunnittelun pohjana toiminut tulostusalusta on kuvattuna sinisellä värillä. Koneistettavat muotoleukojen pohjat ovat kuvattuna vihreällä värillä.

Koneistettujen muotoleukapohjien päällä on punaisella värillä kuvattuna muotoleukojen ainetta lisäävä osuus. Kappaleiden kiinnitys tulostusalusta tapahtuisi pikakiinnittimillä.



Kuvio 23. Esimerkki hybridivalmistuksen esisuunnittelusta.

Esisuunnittelussa luodaan siis niin tarkat virtuaaliset kopiot valmistukseen liittyvistä kappaleista, että tarve fyysisesti koneelle menemisestä työstösuunnittelussa poistuu, mikä mahdollistaisi katkeamattoman tuotannon työstökeskuksen palettijärjestelmän ansiosta. Esisuunnittelulla saavutetaan 3D-mallit, joiden sijaintitiedot toisiinsa nähden säilyvät, vaikka ne siirretäisiin eri ohjelmistoon käytettäväksi. Tämä mahdollistaa hybridivalmistuksen tehokkaan toteutuksen.

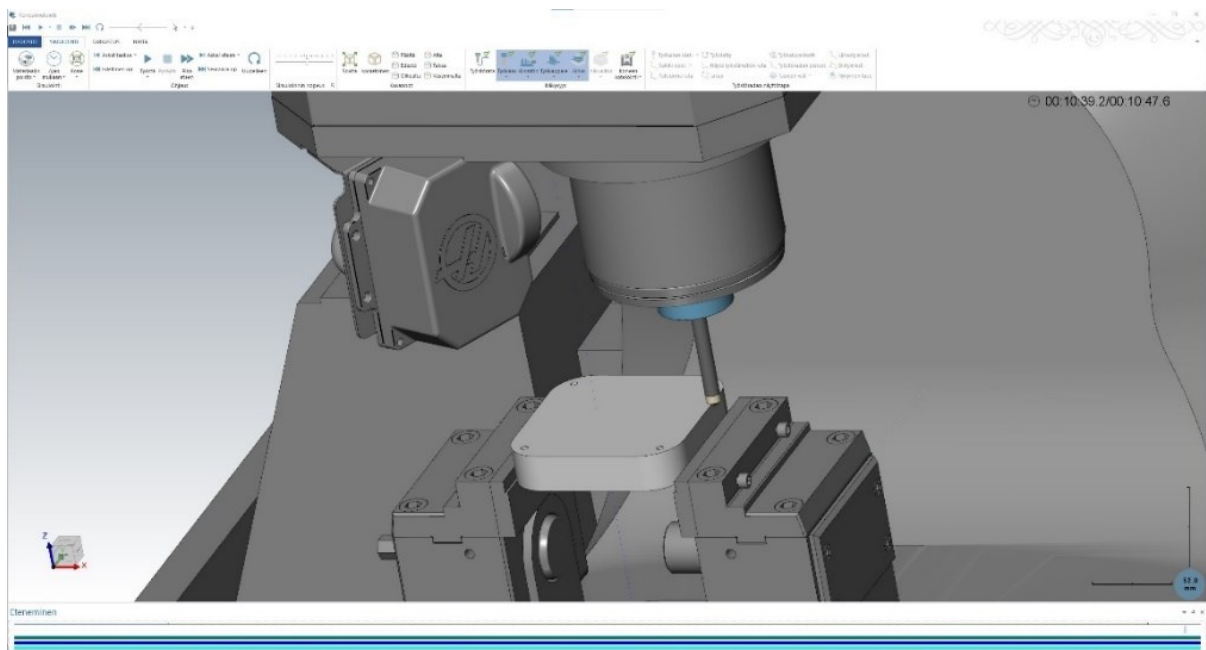
5.4 Konesimulointi CAM-ohjelmistossa on tärkeä osa hybridivalmistusta

Moniakselikoneistuksen CAM-ohjelmointi on haastava tehtävä, jossa moni asia voi epäonnistua. Työstöratojen suunnittelussa tapahtuneella virheellä voi olla kalliita seurauksia.

Jotta hybridivalmistuksesta saataisiin täysi potentiaali irti, tässä opinnäytetyössä luotiin konesimulointimalli Mastercam-ohjelmistoon, koska sellaista Lillbackalla ei ollut vielä käytössä. Konesimulointimallin avulla voidaan ajaa koneistusohjelma virtuaalisesti ja varmentua siitä, että koneistusprosessin aikana ei tapahdu yhteentörmäystä esimerkiksi lastuavan työkalun ja koneistuskiinnittimen välillä. Konesimulointimalli on siis täydellinen kopio käytettävästä työstökoneesta.

Toimiakseen konesimulointi vaatii varsinaisen työstökeskuksen 3D-mallin lisäksi täydelliset kopiot käytettävistä kiinnittimistä ja työstettävistä työkappaleista. Tämän lisäksi Mastercamiin tulee luoda työkalugeometriat huolellisesti, jotta konesimuloinnilla on oikeat tiedot työkaluista ja niiden pitimistä.

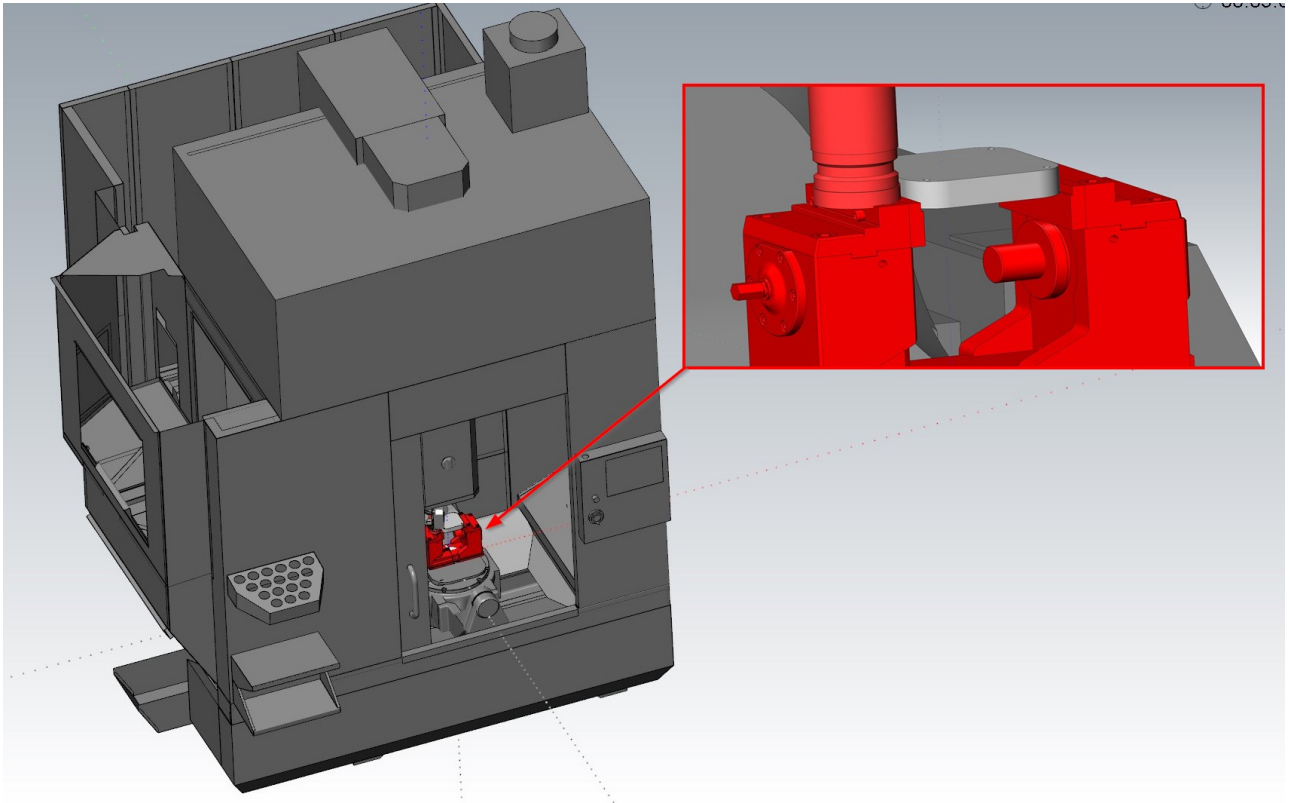
Alla olevassa kuviossa 24 on kuvattuna tässä opinnäytetyössä luotu konesimulointimalli. Simuloinnissa työkaluna on käytössä viistejyrsin.



Kuvio 24. Luotu konesimulointimalli toiminnassa; simuloinnissa meneillään viistejyrsintä.

Konesimuloinnin merkittävin hyöty on se, että oikein toteutettuna se ilmoittaa simuloinnin aikana tapahtuvasta törmäyksestä. Tämä on erittäin tärkeää moniakselikoneistuksessa, koska tehtävät kappaleet ovat usein erittäin monimutkaisia geometrioiltaan ja parhaimmillaan koneen kaikki akselit liikkuvat yhtäaikaaisesti, mikä tekisi työstökeskuksen seuraamisesta muutoin erittäin haastavaa. Usein koneistuksen valmistusajat ovat useita tunteja, ja tämän vuoksi ei ole kannattavaa toteuttaa koneistusta ensiksi hitaammilla syöttönopeuksilla käsi hätäseispainiketta hipoillen. Konesimuloinnin avulla voidaan koneistustapahtuma simuloida muutamissa minuuteissa varmentuen siitä, että mitään odottamatonta ei tapahdu.

Kuviossa 25 on kuvattuna luotu konesimulointimalli törmäyksen sattuessa. Törmäys tapahtuu varsijyrsimen ja hydraulikkapuristimen välillä.



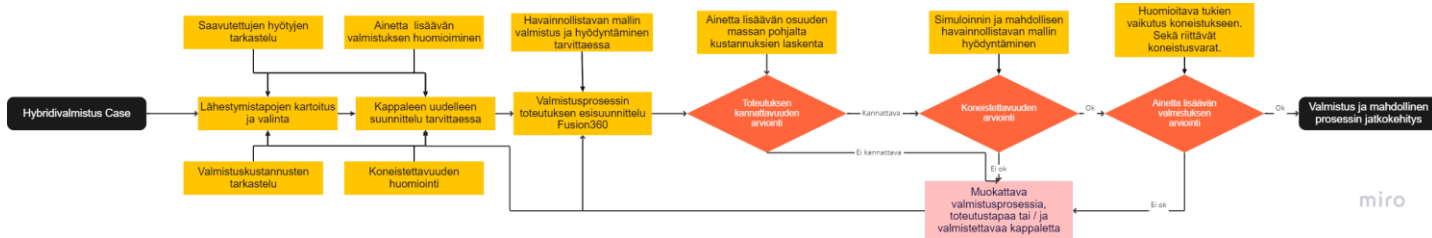
Kuvio 25. Luotu konesimulointimalli törmäyksen sattuessa, kyseisessä esimerkissä varsijyr-sin törmää käytettyyn puristimeen.

Konesimuloinnin käyttö on tärkeä osa hybridivalmistusta, koska valmistettavat geometriat ovat usein monimutkaisia ja täten on haastavaa varmentua siitä, että odottamattomia yhteen-törmäyksiä ei tapahdu. Konesimulointi mahdollistaa myös palettijärjestelmän tehokkaamman käytön, koska miehittämätöntä ajoa varten voidaan valmistusohjelmat simuloida ennalta.

5.5 Hybridivalmistuksen tarkastelun kulku

Tyypillisesti valmistusprosessista pyritään luomaan tarkka prosessikaavio, jota noudatetaan sääntillisesti. Hybridivalmistuksen laajojen mahdollisuuksien vuoksi ei voida luoda hybridivalmistuksen toteutuksesta tarkkaa prosessikaaviota. Hybridivalmistusta tulisi tarkastella tapauskohtaisesti, jotta löydetäänärkevimmät toteutustavat. Hybridivalmistuksen tarkastelun kulusta voidaan kuitenkin luoda karkea prosessimääritelmä. Luomalla prosessimääritelmä saadaan luotua raamit toiminnalle, ja täten saatavilla on aina samalla tavalla kulkeva tapahtu-mien ketju, jota pystytään määrätietoisesti kehittämään ja arvioimaan.

Kuviossa 26 on kuvattuna hybrdivalmistuksen tapauskohtaisen tarkastelun kulku prosessikaavion muodossa. Hybrdivalmistuksessa yleisesti koneistuksen kustannuksien osuus on pienempi kuin ainetta lisäävästä valmistuksesta muodostuvat kustannukset, joten ainetta lisäävän valmistuksen kustannuksiin onkin kiinnitettävä erityisesti huomiota. Koneistaminen asettaa valmistukselle tyypillisesti enemmän rajoituksia kuin ainetta lisäävä valmistus, joten on yleisesti järkevää arvioida kappaleen koneistettavuus ennen ainetta lisäävän valmistuksen osuutta. Prosessikaavio on esitettyä myös liitteenä 6 suuremmissa koossa.



Kuvio 26. Hybrdivalmistuksen tapauskohtaisen tarkastelun kulku prosessikaaviona.

6 TAPAUSTUTKIMUS: KONEISTETUT POHJAT HYBRIDIVALMISTUKSESSA

6.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Tässä opinnäytetyönosiossa tutkitaan toista hybridivalmistuksen lähestymistavoista, jossa valmistus tapahtuu ainetta lisäävästi koneistettua pohjalevyä käyttäen. Pohjalevyjä käyttämällä voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä pienentämällä tarvittavaa ainetta lisäävästi valmistetun materiaalin määrää.

Käytettäessä koneistettua pohjalevyä hybridivalmistuksessa tulee kiinnittää huomiota seuraaviin asioihin.

- Koneistetun pohjalevyn ja käytössä olevan ainetta lisäävän materiaalin tulee olla materiaaliominaisuuksiltaan samankaltaisia. Eritoten lämpölaajenemiskertoimen tulisi olla molemmilla materiaaleilla lähellä toisiaan ainetta lisäävän valmistuksen onnistumiseksi.
- Koneistettu pohjalevy ei saa olla liian ohut, jotta ainetta lisäävää materiaalia siihen kiinni sintratessa ei pääse tapahtumaan lämmöstä johtuvaa vääntyilyä.
- Koneistettu pohjalevy täytyy saada kiinnitettyä metallin 3D-tulostimen pohjalevyyn tukevasti.
- Koneistettu pohjalevy täytyy saada paikoitettua mahdollisimman tarkasti metallin 3D-tulostimelle, jotta ainetta lisäävät muodot saadaan valmistettua mittatarkasti pohjalevyille.
- Koneistetun pohjalevyn pinta täytyy olla tasainen, jotta ainetta lisäävän valmistuksen vaatima pulverikerrostus onnistuisi.

Tässä osiossa perehdytään syvällisemmin koneistettujen pohjien käyttöön hybridivalmistuksessa. Koneistettujen pohjien käyttöä tutkitaan valmistamalla yksinkertaiset koneistetut pohjat, joiden päälle pyritään lisäämään muotoja ainetta lisäävää valmistusta käyttäen. Tämän lisäksi tutkitaan ainetta lisäävän valmistuksen kiinnittymistä koneistettuihin pohjalevyihin. Lopuksi esitetään esimerkkitapauksen muodossa erilaisia saavutettuja hyötyjä ja erilaisia paikoitus keinoja jatkotutkimista varten.

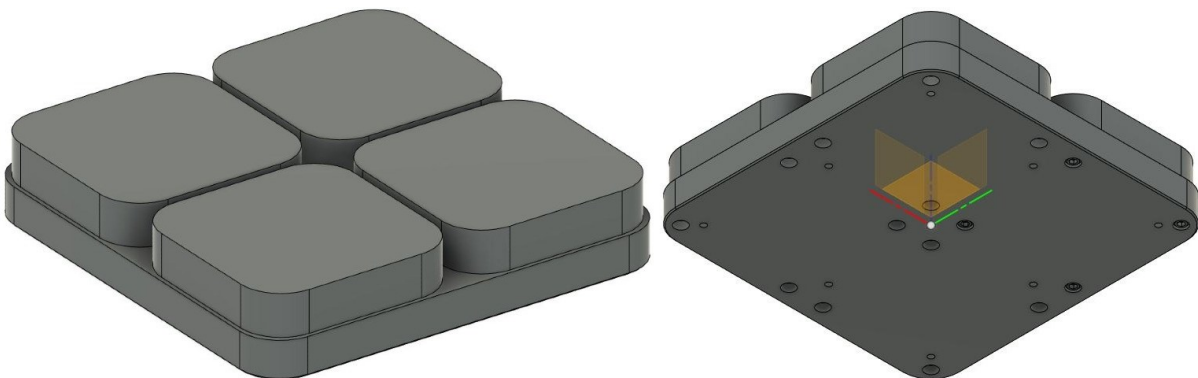
Tavoitteeksi tässä tutkimusosiossa määritettiin seuraavat asiat.

- Testata hybridivalmistusprosessia käytännössä ja löytää kehityskohteita jatkoa varten.
- Valmistaa koneistamalla alusta, jonka päälle ainetta lisäävä valmistus toteutetaan.
- Tutkia ainetta lisäävän valmistuksen kiinnittymistä koneistettuun alustaan.
- Tutkia koneistusalustoilla saavutettavia hyötyjä esimerkin avulla.
- Pohtia erilaisia paikoitusratkaisuja koneistettujen alustojen käyttämiseksi.

6.2 Hybridivalmistusalustojen suunnittelu ja valmistus

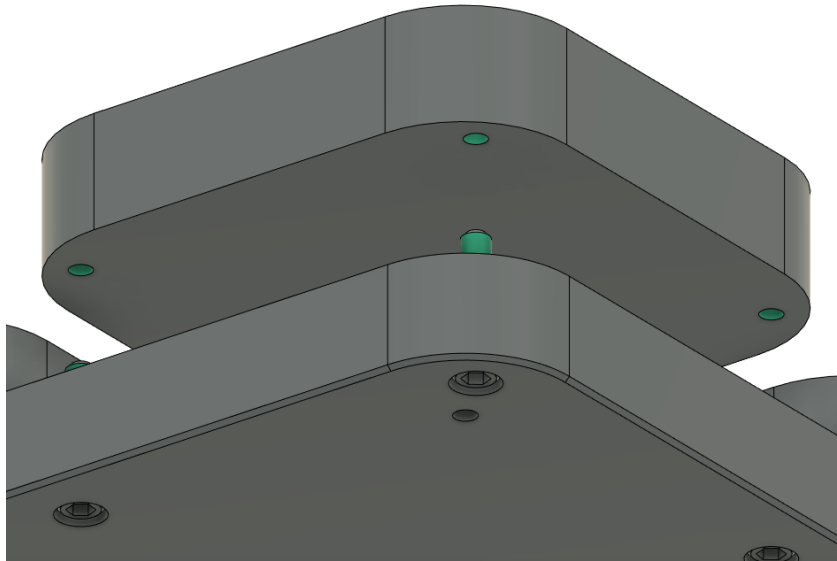
Tässä tapaustutkimuksessa valmistetaan Prox DMP300 metallin 3D-tulostimelle hybridivalmistusalusta. Hybridivalmistusalustalla tarkoitetaan koneistettua pohjalevyä, jonka päälle ainetta lisäävä valmistus voidaan toteuttaa. Hybridivalmistusalustojen valmistus aloitetaan suunnittelulla. Hybridivalmistusalusta haluttiin pitää yksinkertaisena, koska tarkoitus on tutkia alustojen käytön mahdollisuuksia ja ainetta lisäävän valmistuksen kiinnittymistä koneistettuun alustaan.

Kuviossa 27 on kuvattuna 3D-malli tässä tapaustutkimuksessa käytettävästä hybridivalmistusalustasta. Vasemmalla puolella kuviossa on kuvattuna suunniteltu hybridivalmistusalusta yläviistosta. Oikealla puolella kuviossa on esitettyä suunniteltu hybridivalmistusalusta alaviistosta kuvattuna. Oikealla puolella kuviossa on nähtävissä myös kappaleen suunnittelun koordinaatiston keskipiste Fusion360 3D-mallinnusohjelmassa. Asettamalla koordinaatiston keskipiste keskelle 3D-tulostimenpohjalevyä saadaan pidettyä mallinnettujen kappaleiden sijaintitiedot hallinnassa.



Kuvio 27. Hybridivalmistusalustojen 3D-malli. Vasemmalla puolella kuvattuna yläviistosta ja oikealla kuvattuna alaviistosta.

Hybridivalmistusalustat kiinnitetään kierrereikiä käyttämällä pohjalevyyn kuvion 28 mukaisesti. Pohjalevyssä on koneistettuna upotukset käytettyjen kuusiokolopulttien kannoille.



Kuvio 28. Hybridivalmistusalustojen kiinnitysmekanismi.

Käytettynä materiaalina toimi BÖHLER W300 kuumatyöteräs, aihiot tilattiin vesileikkeinä. Alla olevassa kuvassa 9 on esitettyä hybridivalmistusalustan aihio, ennen sille tehtäviä koneistuksia.



Kuva 9. Vesileikattu aihio BÖHLER W300 kuumatyöteräksestä.

Käytettävän materiaalin valinta toteutettiin yhdessä Lillbackan Masi Tammelan kanssa (Tammela, 2021). Materiaalin valinnassa konsultoitiin myös Stén & Co Oy Ab:n osaavaa henkilökuntaa. BÖHLER W300 ominaisuuksia on esitetty paremmin liitteessä 7 (Stén & Co, 2016).

Materiaaliksi valittiin BÖHLER W300 kuumatyöteräs, sillä

- se on suunniteltu käytettäväksi kohteisiin, joissa esiintyy korkeita lämpötiloja
- se on ilmaankarkeneva teräs, kuten Lillbackan ainetta lisäävässä valmistuksessa käytetty Maraging-teräs
- sen lämpölaajeneminen vastaa erittäin hyvin Maraging-teräksen lämpölaajenemista
- se on helposti työstettävissä lastuamalla.

Hybridivalmistusalustat valmistettiin yksitellen, työstökeskuksella koneistamalla. Hybridivalmistusalustojen koneistamisen lisäksi, myös 3D-tulostimen pohjalevyyn tehtiin koneistamalla reiät ja kuusiokolokantojen upotukset hybridivalmistusalustojen kiinnitystä varten.

Tarvittavien kiinnityksien koneistuksen jälkeen, suoritettiin hybridivalmistusalustojen kokoonpano. Kokoonpanon jälkeen kiinnitettiin pohjalevy hybridivalmistusalustoihin Lillbackan tasohiomakoneelle, jossa hybridivalmistusalustoiden tasopinnat hiottiin. Tasopintojen hiomisen ansiosta saavutettiin pinnanlaadullisesti ja tasomaisuudeltaan erittäin hyvä pinta ainetta lisäävän valmistuksen pulverinkerrostumiselle.

Kuvassa 10 vasemmalla on esitettyä valmistetut hybridivalmistusalustat kiinnitettynä pohjalevyyn. Oikealla kuvassa on esitettyä hybridivalmistusalustat tasopintojen hionnan jälkeen.



Kuva 10. Vasemmalla hybridivalmistusalustat koneistuksen jälkeen kokoonpantuna pohjalevyille. Oikealla hybridivalmistusalustat kokoonpantuna tasopintojen hionnan jälkeen.

6.3 Ainetta lisäävä valmistus koneistettujen pohjien päälle

Hybridivalmistusalustojen ollessa valmiina voitiin luoda tulostusohjelmat valmistusta varten. Tämä toteutettiin tuomalla halutut 3D-mallit Fusion360 CAD-ohjelmaan. Paikoittamalla valmistettavat kappaleet CAD-ohjelmistossa, vältetään kappaleiden paikoituksen haasteellisuudelta tulostusohjelmien luonnissa 3DXpert-ohjelmistossa.

Tulostusohjelmien luomisen jälkeen voitiin hybridivalmistusalustat kiinnittää Prox DMP300 metallitulostimelle käyttämällä automaattista työkiertoa. Kiinnittämisen lisäksi haettiin automaattisella työkierrolla myös hybridivalmistusalustojen kokoonpanon korkeus 3D-tulostimen tietoon. Tämän jälkeen voitiin aloittaa pulverin tasaaminen hybridivalmistusalustojen päälle. Hybridivalmistusalustojen välisien rakojen vuoksi kerrostamista nopeutettiin täyttämällä manuaalisesti pulveria rakoihin. Lopuksi tasaus viimeisteltiin käyttämällä automaattista työkiertoa, ja työkiertoa toistettiin, kunnes saatiin muodostettua yhtenäinen rakoilematon pulverikerros valmistusalustalle. Pulverikerrostukset onnistuivat hyvin ja hybridivalmistusalustoille saatiin hyvälaatuinen ohut pulverikerros, jonka päälle ainetta lisäävä valmistus voitiin aloittaa.

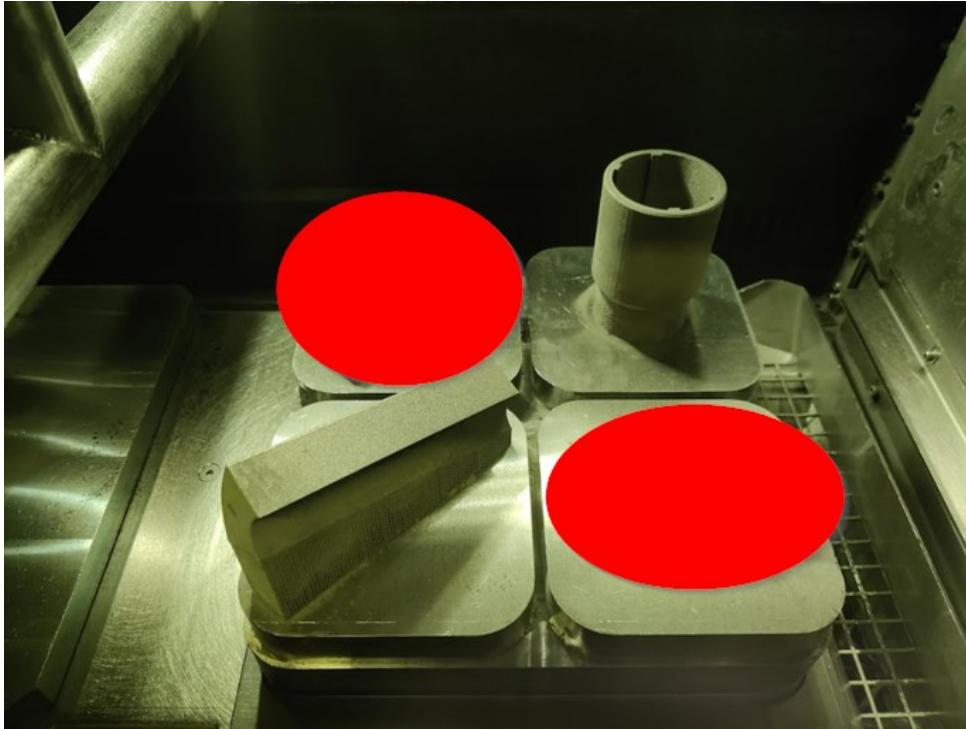
Kuvassa 11 vasemmalla hybridivalmistusalustat Prox DMP300 metallin 3D-tulostimeen kiinnitettynä ennen pulverinlevittämistä. Oikealla hybridivalmistusalustat pulverin tasaamisen ja ensimmäisen pulverikerroksen levittämisen jälkeen.



Kuva 11. Vasemmalla hybridivalmistusalustat ennen pulverin tasausta. Oikealla hybridivalmistusalustat pulverin tasauksen ja ensimmäisen pulverikerroksen levityksen jälkeen.

Pulverikerroksen tasaamisen ja levittämisen jälkeen voitiin Prox DMP300 metallin 3D-tulostin jättää valmistamaan kappaleita valmistusohjelman mukaisesti. Tulostimen saatua ainetta lisäävä valmistus valmiiksi, voitiin tulostimen valmistuskammiosta poistaa sulattamaton ylijäämäpulveri valmistettujen kappaleiden ympäriltä.

Kuvassa 12 on esitettyä hybridivalmistusalustat ja niiden päälle ainetta lisäävästi valmistetut kappaleet ylijäämäpulverin poistamisen jälkeen. Valmistettavat kappaleet valikoituivat Lillbackan ainetta lisäävän tuotannon mukaan. Kuvassa vasemmalla alhaalla on Lillbackan valmistamissa hydrauliiikkapuristinlaitteissa käytettävä erikoisleuka. Kuvassa oikealla ylhäällä on esitettyä erikoistyökalu, jota tarvittiin Lillbackan työstökoneiden vuosihuollon yhteydessä. Kuvasta peitetyt kappaleet toimivat varsinaisena tutkimuskohtena. Kappaleet ovat muottiosia, joita kehitettiin yhdessä asiakkaan kanssa. Tutkimuskohteen ulkopuoliset kappaleet valmistettiin alustojen päälle käyttäen tukimateriaalia kappaleiden irrottamiseksi valmistuksen jälkeen. Muottiosat valmistettiin suoraan hybridivalmistusalustojen päälle.



Kuva 12. Hybridivalmistusalustat niille valmistettuineen kappaleineen metallin 3D-tulostimessa ylijäämäpulverin poistamisen jälkeen.

Lopputuloksena saatiin onnistunut ainetta lisäävä valmistus kaikille neljälle kappaleelle käyttäen hybridivalmistusalustoja. Pulverinpoiston jälkeen voitiin pohjalevy hybridivalmistusalustoinen poistaa metallin 3D-tulostimesta käyttäen automaattista työkiertoa.

Käytössä olevan Maraging-teräksen materiaaliominaisuuksia voidaan parantaa merkittävästi lämpökäsittelyn avulla. Tämän vuoksi päädyttiin valmistetut muottiosat lämpökäsittämään, jotta pystyttiin testaamaan kahden erilaisen materiaalin käyttäytymistä lämpökäsittelyn aikana. Kuvassa 13 on esitettyä hybridivalmistusalusta sille valmistettujen muottiosien kanssa, lämpökäsittelyjen jälkeen. Tutkittaessa liitospintoja koneistetun pohjalevyn ja ainetta lisäävästi valmistetun materiaalin välillä ei havaittu silmämääräisesti halkeamia tai muita poikkeamia. Liitospintojen pitävyyttä testattiin myös lyömällä muottiosia teräskärkisellä pajavasarella, koneistetun hybridivalmistusalustan ollessa kiinnitettynä ruuvipenkkiin. Toistuvista yrityksistä huolimatta liitos tuntui olevan kiinteä ja liitospintaan ei muodostunut poikkeamia isku- ja kuormituksesta huolimatta. Kuvassa 13 nähdään myös ainetta lisäävästi valmistetun muottiosan vaurioituminen vasaraniskujen seurauksena. Vaikka tulokset ovatkin lupaavia, tulee silti liitospintoja tällaisessa hybridivalmistuksessa tutkia jatkossa tieteellisemmällä menetelmällä.



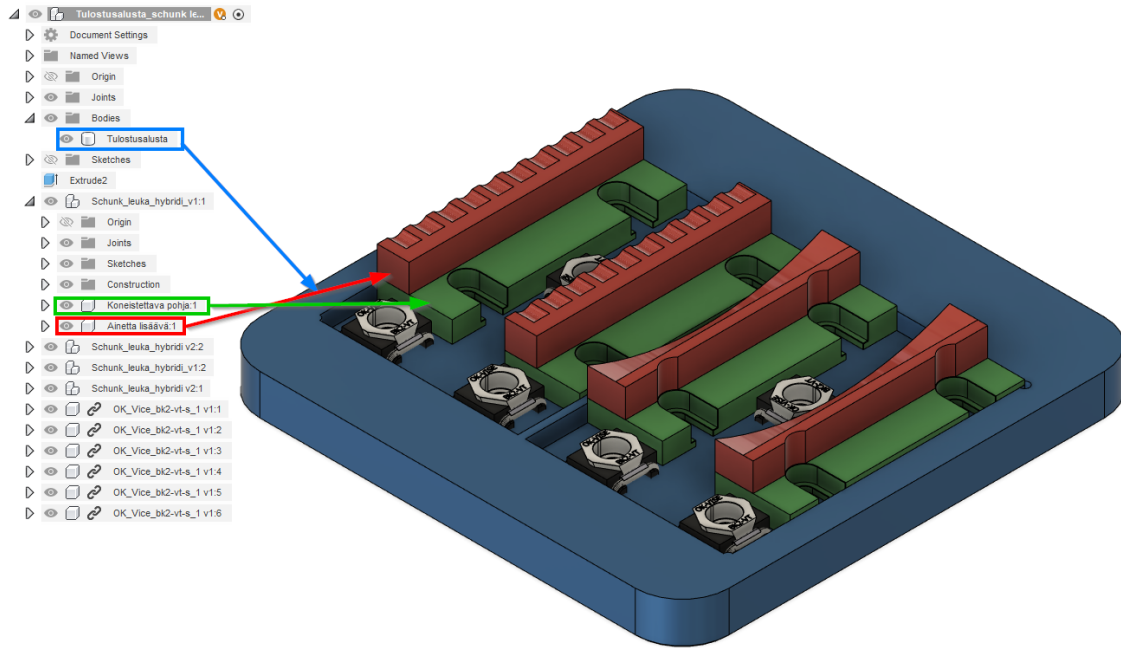
Kuva 13. Hybridivalmistusalusta muottiosineen lämpökäsittelyn ja kiinnittymisen testaamisen jälkeen.

6.4 Esimerkki koneistettujen pohjien käytöstä ainetta lisäävässä valmistuksessa

Tässä opinnäytetyönosiossa luodaan virtuaalinen esimerkki koneistettujen pohjien käytöstä ainetta lisäävässä valmistuksessa. Tavoitteena virtuaalisella esimerkillä on esittää mahdollinen käyttökohde, jossa koneistettavia pohjia voitaisiin hyödyntää osana hybridivalmistusta, sekä esittää tällä lähestymistavalla saavutettavia hyötyjä. Esimerkkiä käyttäen esitetään myös kolme erilaista lähestymistapaa, joiden avulla koneistetun alustan paikoittaminen voidaan toteuttaa metallin 3D-tulostimelle. Esimerkin varsinainen valmistus jätettiin tämän opinnäytetyön ulkopuolelle.

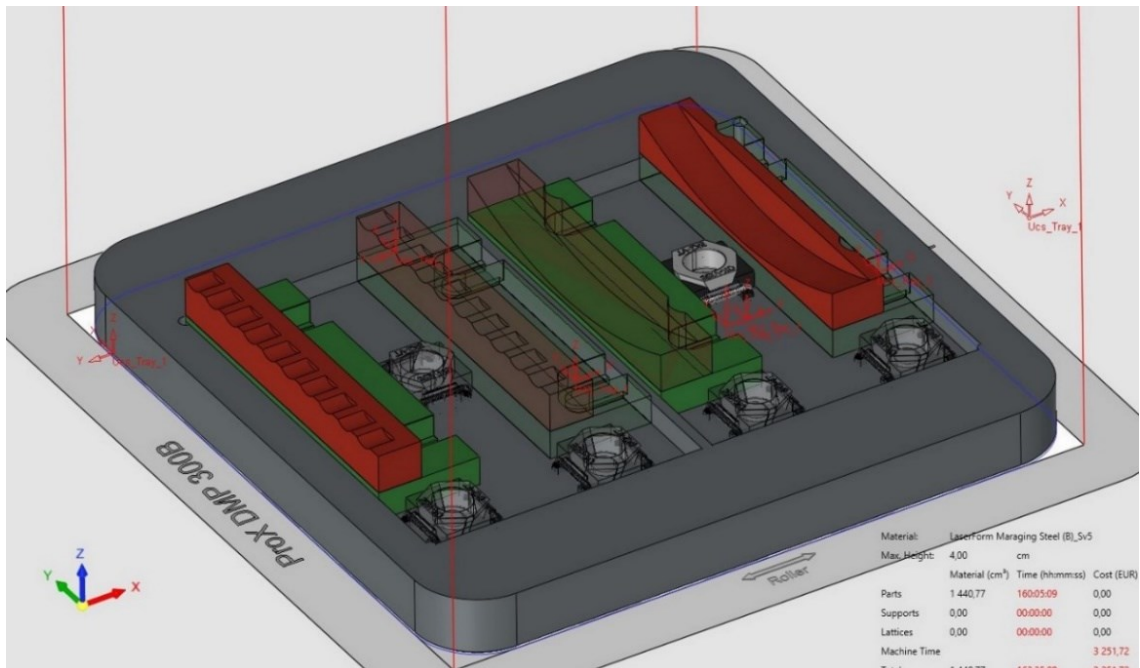
Virtuaalinen esimerkki hybridivalmistuksesta. Käytettäväksi virtuaaliseksi esimerkiksi valikoitui Schunk-puristimien muotoleuat, sillä Schunk-merkkisiä hydraulikkapuristimia on käytössä Haas- moniakselikoneistuskeskuksella. Moniakselikoneistuskeskukselle on aiemminkin valmistettu ainetta lisäävästi metallisia muotoleukoja ainetta lisäävän valmistuksen tuoman muodonvapauden vuoksi.

Kuviossa 29 on kuvattuna esimerkki hybridivalmistuksen esisuunnittelusta, jossa valmistetaan Schunk-puristimelle muotoleukoja käyttäen koneistettuja alustoja ainetta lisäävästi valmistettavan massan pienentämiseksi. Suunnittelun pohjana toiminut tulostusalusta on kuvattuna sinisellä värillä. Koneistettavat muotoleukojen pohjat ovat kuvattuna vihreällä värillä. Koneistettujen muotoleukapohjien päällä on punaisella värillä kuvattuna muotoleukojen ainetta lisäävä osuus. Kappaleiden kiinnitys tulostusalustaan tapahtuisi pikakiinnittimillä.



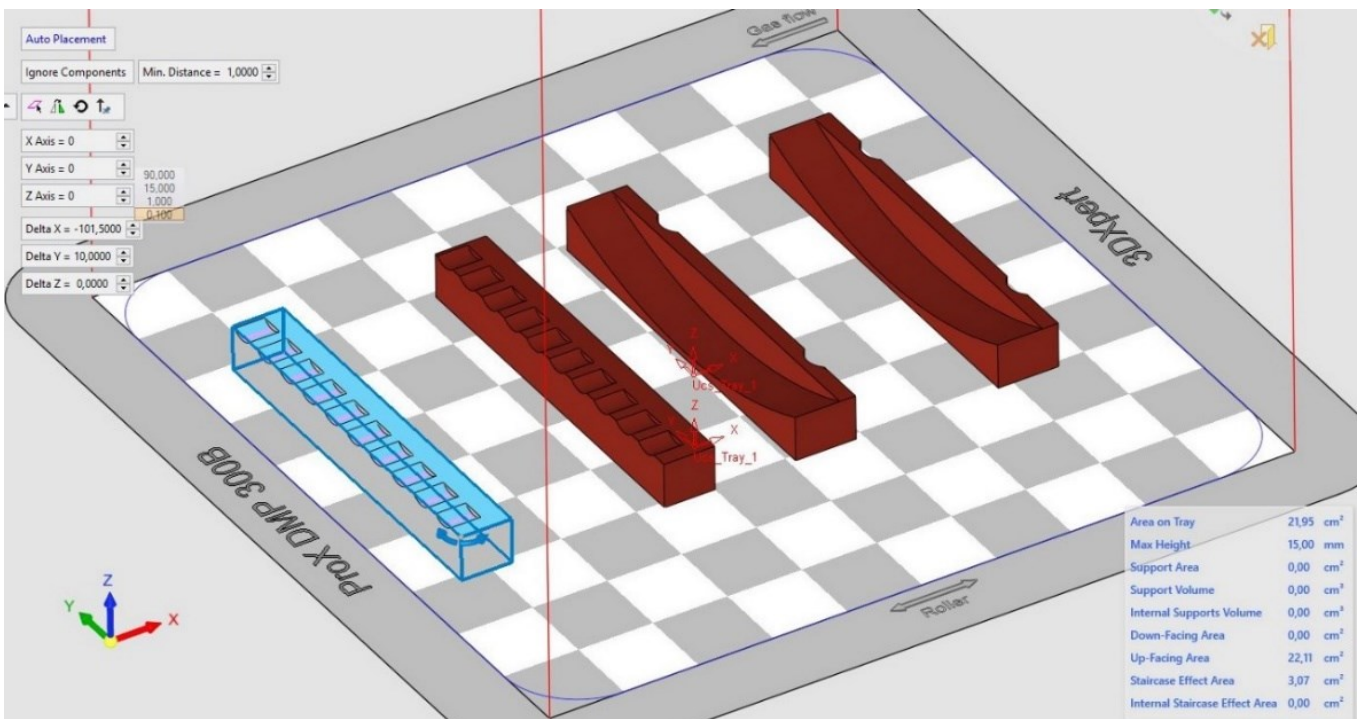
Kuvio 29. Esimerkki hybridivalmistuksen esisuunnittelusta.

Esisuunnittelussa luotiin 3D-mallit, joiden sijaintitiedot toisiinsa nähden säilyvät, vaikka ne siirrettäisiin eri ohjelmistoon käytettäväksi. Tämä mahdollistaa hybridivalmistuksen tehokkaan toteutuksen. Kuviossa 30 on esitettyä STEP-tiedostomuodossa tuotu 3D-mallien kokoonpano, joka asettuu automaattisesti halutulle sijainnille 3DXpert-ohjelmistossa.



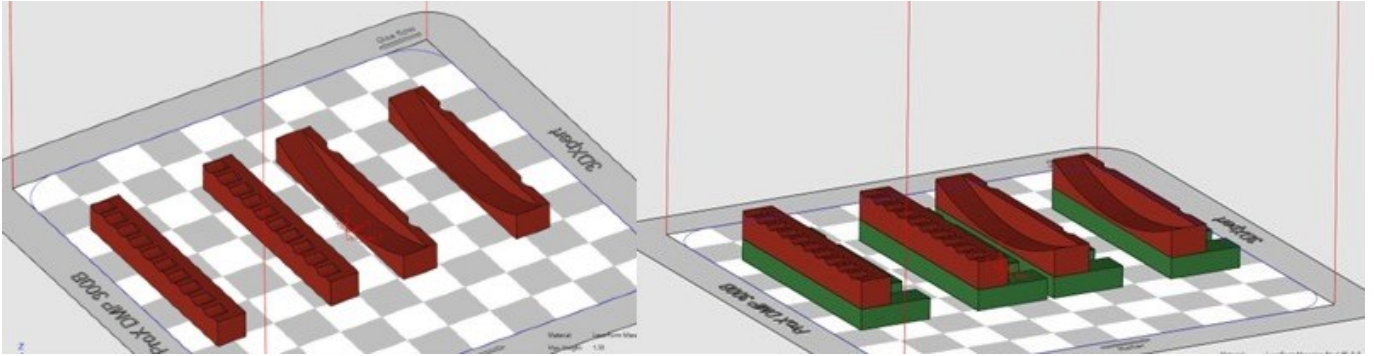
Kuvio 30. Esisuunnittelu ympäristöstä STEP-tiedostomuodossa tuotu 3D-mallien kokoonpano asettuu automaattisesti halutunlaisesti 3DXpert-ohjelmistossa, esisuunnittelun ansiosta.

Tulostusohjelmien luomiseksi voidaan tuodusta 3D-mallien kokoonpanosta helposti poistaa ylimääräiset kappaleet siten, että vain halutut koneistettavien pohjien päälle ainetta lisäävästi valmistettavat geometriat jäävät jäljelle. Tämän jälkeen ainetta lisäävästi valmistettavat geometriat voidaan vaivattomasti asettaa 3DXpert-ohjelmiston virtuaaliselle tulostusalustalle nolatasoon Z-akselilla, säilyttäen yhä halutut sijainnit X- ja Y-akseleiden suhteen. Kuviossa 31 on esitettyä kokoonpanosta jäljelle jääneet ainetta lisäävästi valmistettavat geometriat, jotka on asetettu nolatasoon Z-akselilla.



Kuvio 31. Kokoonpanosta jäljelle jätetyt ainetta lisäävästi valmistettavat geometriat asetettuna nolatasoon Z-akselilla 3DXpert-ohjelmistossa.

Hybridivalmistuksella saavutettavat hyödyt. Virtuaalisen esimerkin hybridivalmistuksen hyötyjä verrattiin tavalliseen ainetta lisäävään valmistuksen toteutustapaan. Perinteisessä ainetta lisäävässä valmistuksessa myös hydraulikkapuristimen leukojen pohjageometriat jouduttaisiin valmistamaan ainetta lisäävästi. Kahden toteutustavan vertailu suoritettiin luomalla kummastakin toteutustavasta valmistusohjelma 3DXpert-ohjelmistolla. Kuviossa 32 vasemmalla on esitetty hybridivalmistuksen ainetta lisäävä geometria. Kuviossa oikealla on esitettyä perinteisesti ainetta lisäävästi valmistettava geometria, jolle tosin tulostusasento tällaisena ei olisi järkevin vaihtoehto; tämä ei kuitenkaan vaikuta tulostettavan materiaalin määrään, eikä valmistuksen nopeuteen negatiivisesti.



Kuvio 32. Vasemmalla hybridivalmistuksen ainetta lisäävä geometria. Oikealla perinteisen ainetta lisäävän valmistuksen geometria.

Vertailun pohjalta havaittiin, että tämänlaisella hybridivalmistuksen lähestymistavalla saadaan moninaisia hyötyjä verrattuna tavalliseen ainetta lisäävään valmistukseen. Näitä hyötyjä ovat

- ainetta lisäävästi valmistettavan massan pienentyminen
 - valmistettavan materiaalin tilavuus hybridivalmistuksella $104,59 \text{ cm}^3$
 - valmistettavan materiaalin tilavuus perinteisesti $311,07 \text{ cm}^3$
- ainetta lisäävän valmistuksen kesto
 - hybridivalmistuksella 12 h 33 min
 - perinteisellä ainetta lisääväällä valmistuksella 36 h 13 min.

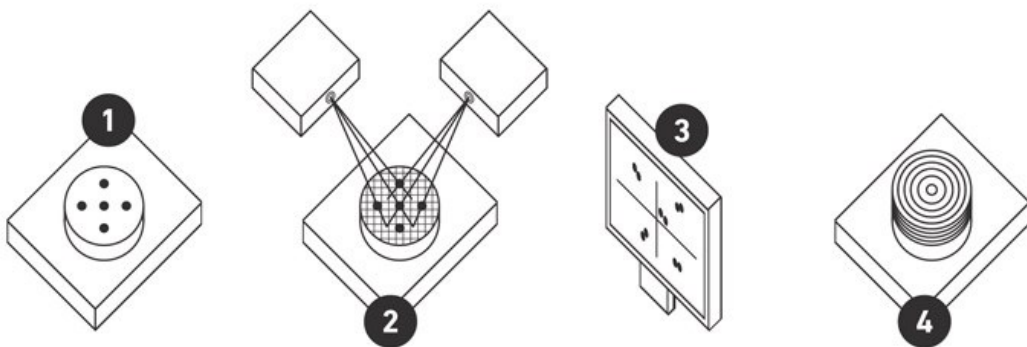
Koneistettuja pohjia käyttämällä virtuaalisessa esimerkissä ainetta lisäävä massa sekä valmistuksen kesto saatiin tiputettua lähes kolmannekseen perinteiseen ainetta lisäävään toteutukseen verrattuna. Tämän lisäksi yhtenä hybridivalmistuksella saavutettuna hyötynä on tukimateriaalin käytön tarpeen poistuminen ja täten myös tarve kappaleen irrottamiselle murtamalla tukimateriaali sen alta poistuu.

Käytännössä kyseinen esimerkki voitaisiin toteuttaa koneistamalla iso sarja koneistettuja pohjageometrioita valmiiksi, tällä tavalla valmistuskustannuksia saataisiin pienennettyä koneistuksen osalta. Täten voitaisiin hyvin nopeasti toteuttaa hybridivalmistus hydrauliiikkapuristimen leukojen tarpeen ilmetessä. Jo aiemmin koneistetut pohjageometriat voitaisiin kiinnittää valmistusalustalle, toteuttaa näiden pintojen tasaaminen tasohiomakoneella, jonka jälkeen valmistus voitaisiin aloittaa. Tällä tavalla saataisiin koneistuskiinnittimiä valmistettua, jopa jo seuraavaksi päiväksi käytettäväksi, mikä toisi merkittävää hyötyä monimutkaisien geometrioiden kiinnittämiseen.

6.5 Erilaiset paikoitusvaihtoehdot hybridivalmistuksen hyödyntämiseksi käytännössä.

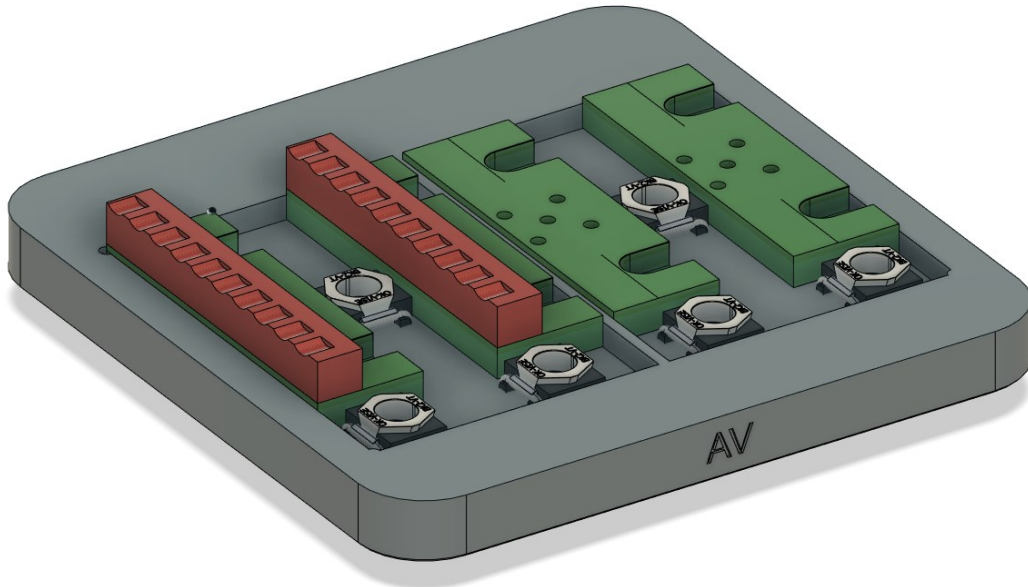
Vaikka hybridivalmistuksella saavutettavissa olevat hyödyt ovat lupaavia, tulee niiden käyttöön saattamiseksi pystyä valmistamaan ainetta lisäävät geometriat halutuille sijainneille koneistettujen pohjien suhteen. Tätä tutkimustyötä tehtäessä löydettiin kolme erilaista tapaa hybridivalmistuksen paikoitukseen.

Ohjelmistopohjainen sijainnin korjaaminen. GF Machining Solutions on luonut yhteistyössä 3D Systems:in kanssa DMP Calibration Tool -nimisen työkalun (Carlota, 2020). Kyseinen työkalu toimii kuvion 33 mukaisesti. Ensiksi kappaleeseen porataan reikiä sen sijainnin ja asennon hahmottamiseksi. Tämän jälkeen käyttäen laseria sulatetaan yksi kerros kappaleen pintaa kalibrointia varten. Ohjelmisto tunnistaa sulatetun alan ja koneistetuilla rei'illä varustetun kappaleen sijaintien eron. Tämän jälkeen ohjelmisto korjaa erotuksen, jotta ainetta lisäävä valmistus voidaan toteuttaa tarkasti halutuille sijainneille.



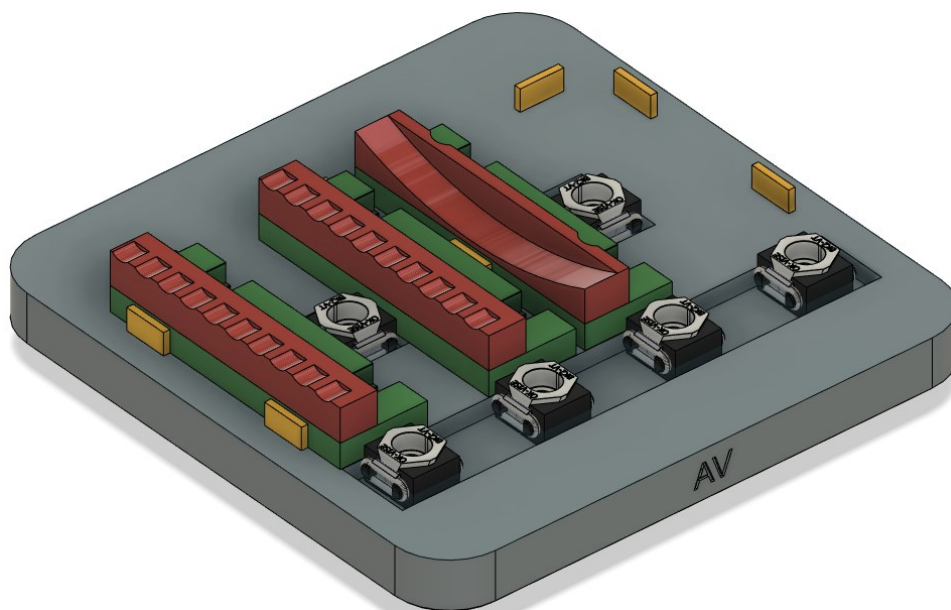
Kuvio 33. DMP Calibration Tool -nimisen työkalun toimintaprosessin kuvaus (Carlota, 2020).

Kuviossa 34 on esitetty hahmotelma DMP Calibration Tool-työkalun käytöstä virtuaalissa esimerkissä. Käyttöä varten tulisi porata koneistettuihin pohjiin reikiä, mikä ei välttämättä ole soveltuva vaihtoehto jokaisessa tapauksessa. Tämänlaisen sijainninkorjausmenetelmän tarkkuudesta ei myöskään löydetty tietoa tämän tutkimustyön yhteydessä. Kuviossa ainetta lisäävä osuus on esitetty punaisella värillä ja koneistettu pohjamuoto on kuvattuna vihreällä värillä.



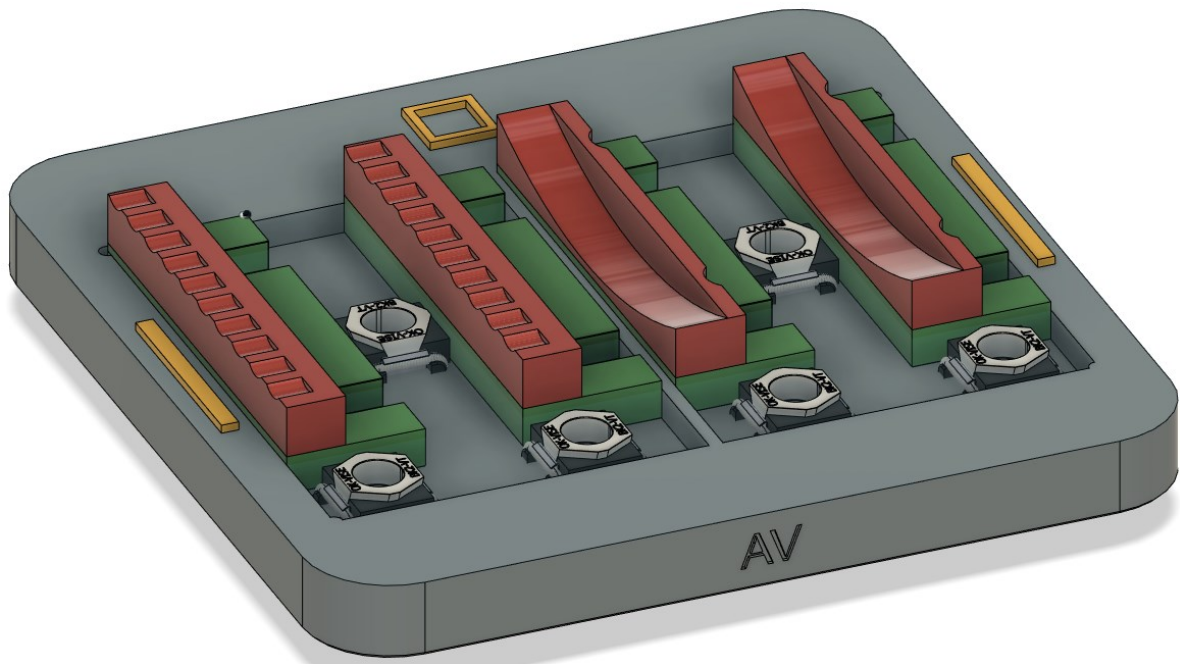
Kuvio 34. Hahmotelma DMP Calibration Tool-työkalun käytöstä virtuaalisessa esimerkissä.

Ainetta lisäävästi valmistetut paikoituspinnat. Toinen vaihtoehto kappaleiden sijainnin paikoittamiseksi, olisi valmistaa ainetta lisäävästi paikoituspinnat kappaleille suoraan valmistusalustaan kiinni. Tämän jälkeen koneistettu pohja-alusta voitaisiin kiinnittää vasten valmistettuja paikoituspintoja. Tämän opinnäytetyön yhteydessä ei löydetty tietoa tällaisella paikoitustavalla saavutettavasta tarkkuudesta. Kuviossa 35 on esitettyä hahmotelma tällaisesta paikoitusmenetelmästä. Kuviossa ainetta lisäävästi valmistetut paikoituspinnat ovat esitettyinä keltaisella värillä. Hybridivalmistetun kappaleen ainetta lisäävä osuus on esitettyinä punaisella värillä ja koneistetut pohjamuodot ovat esitettyinä vihreällä värillä.



Kuvio 35. Hahmotelma ainetta lisäävien paikoituspintojen käytöstä hybridivalmistuksessa.

Ainetta lisäävästi valmistetut paikoituspinnat työstökeskuksella käytettäväksi. Kolmas tätä opinnäytetyötä tehdessä havaittu paikoitustapa hybridivalmistuksessa käytettäväksi on ensiksi valmistamalla ainetta lisäävästi paikoituspinnat valmistusalustalle. Käyttämällä valmistettuja paikoituspintoja voidaan valmistusalusta kiinnittää työstökeskukselle. Työstökeskuksella voitaisiin valmistusalusta kiinnittää ja paikoittaa erittäin tarkasti näitä pintoja, sekä elektronista mittapäätä käyttäen. Työstökeskuksella saavutettavissa olevaa erinomaista mittatarkkuutta hyödyntäen voidaan koneistetuille pohjamuodoille valmistaa kiinnittämistä varten tarvittavat poterot tai muut muodot, suhteessa valmistettuihin paikoituspintoihin. Myöskään tällaisesta lähestymistavasta ei löydetty tietoa tämän opinnäytetyön yhteydessä. Kuviossa 36 on esitettyä hahmotelma tämänlaisesta lähestymistavasta. Kuviossa paikoituspinnat ovat esitettyinä keltaisella värillä. Hybridivalmistetun kappaleen ainetta lisäävä osuus on esitettyinä punaisella värillä ja koneistetut pohjamuodot ovat esitettyinä vihreällä värillä.



Kuvio 36. Hahmotelma ainetta lisäävästi valmistettujen paikoituspintojen käytöstä työstökeskuksella kiinnityspintojen koneistamiseksi.

7 TAPAUSTUTKIMUS: HYDRAULIIKKALOHKON VALMISTAMINEN

7.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Tässä tapaustutkimuksessa valmistetaan hydrauliiikkalohko hyödyntäen tässä opinnäyte-työssä kerättyä tietoa sekä luotua hybridivalmistusjärjestelmää. Hydrauliiikkalohko valmistettiin ja suunniteltiin osana Vaasan ammattikorkeakoulun ja Merinovan hanketta nimeltä EnergyVaasa 3D-center (Merinova, i.a.). Hankkeen tavoitteena on lisätä alueen yritysten ja korkeakoulujen 3D-metallitulostamiseen liittyvää yhteistyötä ja osaamista.

Hydrauliikkalohkon uudelleen suunnitteli Jukka Järvi Lillbacka Powercon tuotesuunnittelusta. Suunnittelussa hyödynnettiin taitavasti ainetta lisäävän valmistuksen hyötyjä, jonka avulla hydrauliikkalohkon kanavistojen virtausnopeus kasvoi merkittävästi verrattuna alkuperäiseen koneistamalla valmistettuun hydrauliikkalohkoon.

Hydrauliikkalohkon valmistusprosessi suunniteltiin ja hydrauliikkalohko valmistettiin osana tätä tutkimustyötä. Tapaustutkimuksen tavoitteeksi määritettiin seuraavat asiat.

- Testata hybridivalmistusprosessia käytännössä ja löytää kehityskohteita jatkoa varten.
- Tutkia muovista 3D-tulostamalla valmistettujen muotoleukojen valmistusta ja käytettävyyttä.
- Tutkia ainetta lisäävän valmistuksen tarkkuutta sekä kappaleen mittaamista käyttämällä digitaalista mittapäätä työstökeskuksessa.
- Testata luotua digitaalista valmistusketjua.
- Testata havainnollistavien muovitulostettujen mallien käytettävyyttä apuna hybridivalmistuksessa.

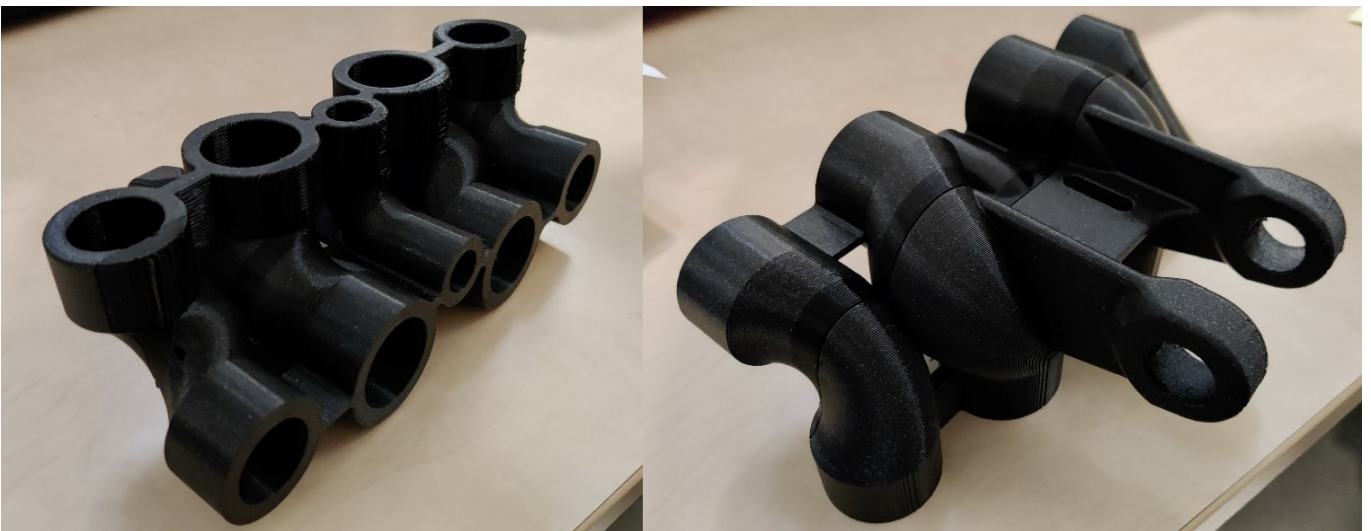
7.2 Valmistusprosessin suunnittelu ja valmistusohjelmien luomineen

Hybridivalmistuksen sujuvan toteutettavuuden vuoksi, tulee ennen varsinaisen valmistusprosessin aloitusta suunnitella sen toteutus etukäteen. Tämän avulla osataan paremmin määrittää tarvittavat koneistusvarat ja mahdolliset muut geometriset muutokset, kuten paikoituspinnat tai tulostettavat lisäkkeet kappaleen kiinnitystä varten. Tämän avulla osataan myös ennakoita mahdollisia muita haasteita, joita valmistusprosessissa voi ilmetä. Valmistuksen

toteutus suunniteltiin ennalta käyttäen apuna tässä kehitystyössä luotua konseptia hybridivalmistuksesta.

Havainnollistava malli. Hydraulikkalohkon valmistusprosessi aloitettiin 3D-tulostamalla muovista yhden suhde yhteen (1:1) mittakaavassa oleva havainnollistava malli valmistettava kappaleesta. Havainnollistavan mallin avulla on helpompi hahmottaa kappaleen todellista kokoa. Sen avulla on myös helpompi lähteä miettimään erilaisia valmistusteknisiä teki-
jöitä, kuten kappaleen kiinnitystä ja paikoitusta.

Havainnollistava mallikappale valmistettiin PETG-muovista käyttämällä Lillbackan Prusa merkkisiä 3D-tulostimia. Alla olevassa kuvassa 14 on esiteltynä kyseinen havainnollistava malli.



Kuva 14. Havainnollistava muovitulostettu malli hydraulikkalohkosta.

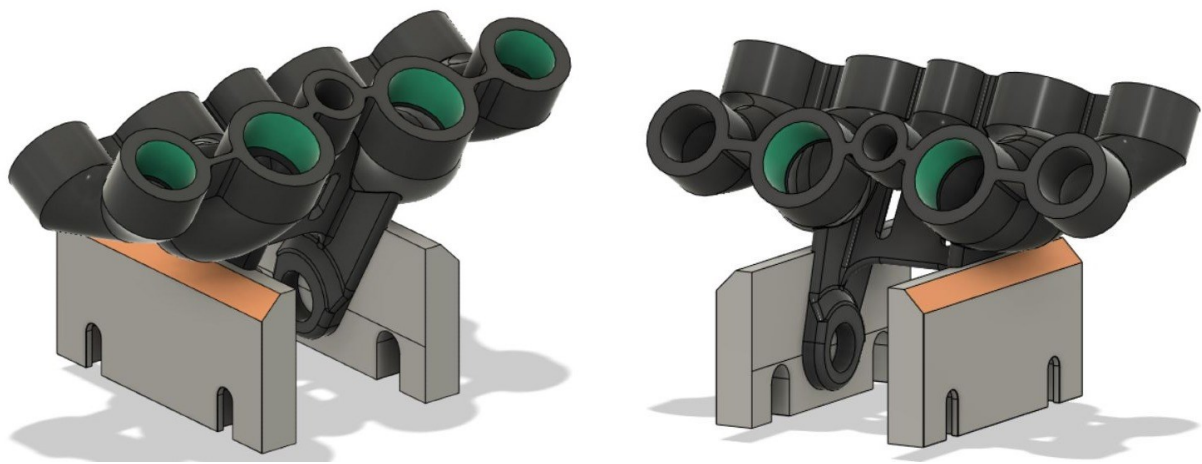
Havainnollistavaa mallia käytettiin apuna tapaustutkimuksessa

- Kappaleen tulostusasennon suunnittelussa.
- 3D-tulostamiseen vaadittavien tukien sijaintien suunnitteluun.
- Riittävien koneistusvarojen suunnitteluun.
- Koneistuksen kiinnityksen suunnitteluun.
- Koneistuksen työstörajojen luomisessa.
- Koneistuksen testiajossa.

Yksi merkittävimmästä hyödyistä havainnollistavan mallin käytössä on mahdollisuus ajaa koneistuksen testiajot pehmeämpään materiaaliin. Tällä tavoin esimerkiksi ohjelmointivirheen sattuessa voidaan välttyä kalliiden lastuavien työkalujen särkymiseltä, muovin antaessa periksi ja murtuessa ennen työkalujen rikkoutumista. Täten voidaan välttyä myös mahdollisilta vaurioilta varsinaiseen valmistettavaan metalliseen työkappaleeseen.

Koneistuksessa käytettävän kiinnitysmenetelmän suunnittelu. Koneistuksen toteuttamiseksi tulee ensiksi suunnitella kappaleen kiinnitys työstökeskukselle. Kiinnitysmenetelmänä päädyttiin käyttämään Schunkin valmistamaa hydraulikka-avusteista puristinta sen helpon käytettävyyden ja vaihtoleukamahdollisuuksien vuoksi.

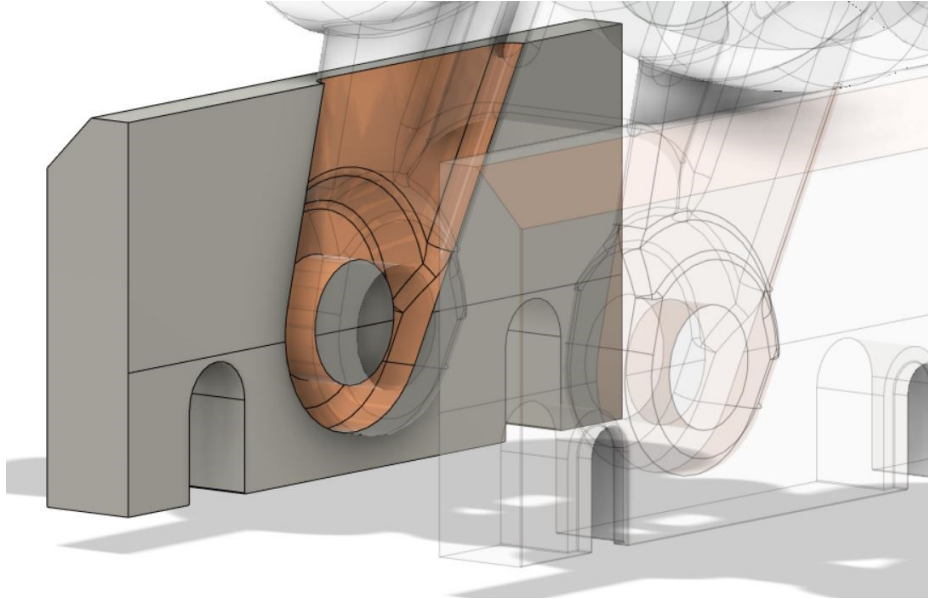
Schunkin puristimeen asennettiin muovista 3D-tulostetut muotoleuat, joilla kappale saadaan asetettua haluttuun asentoon koneistuksen mahdollistamiseksi. Muotoleukojen suunnittelu tapahtui Fusion360 CAD-ohjelmalla. Kuviossa 37 on kuvankaappaus muotoleukojen suunnitteluprosessista.



Kuvio 37. Muotoleukojen suunnittelua Fusion360 CAD-ohjelmalla.

Tavoitteena oli löytää kappaleelle riittävän tukeva kiinnitysasento, jossa koneistettavat pinnat ovat helposti tavoitettavissa leikkaavilla työkaluilla. Kappaleen kiinnityksen suunnittelun lopputuloksena päädyttiin yllä olevan kuvion 37 mukaiseen asentoon. Tässä asennossa kummatkin koneistettavat pinnat ovat helposti tavoitettavissa koneistuksen mahdollistamiseksi.

Suunniteltuihin muotoleukoihin luotiin kappaleen geometriaa vastaavat muodot upotuksena, käyttämällä hydraulikkalohkoa leikkaavana työkaluna CAD-ohjelmassa. Tällä tavalla pystytään kiinnittämään hyvinkin monimutkaisia ja muuttuvamuotoisia kappaleita tukevasti. Tätä havainnollistetaan kuviossa 38.



Kuvio 38. Muotoleukojen upotus Fusion360 CAD-ohjelmassa.

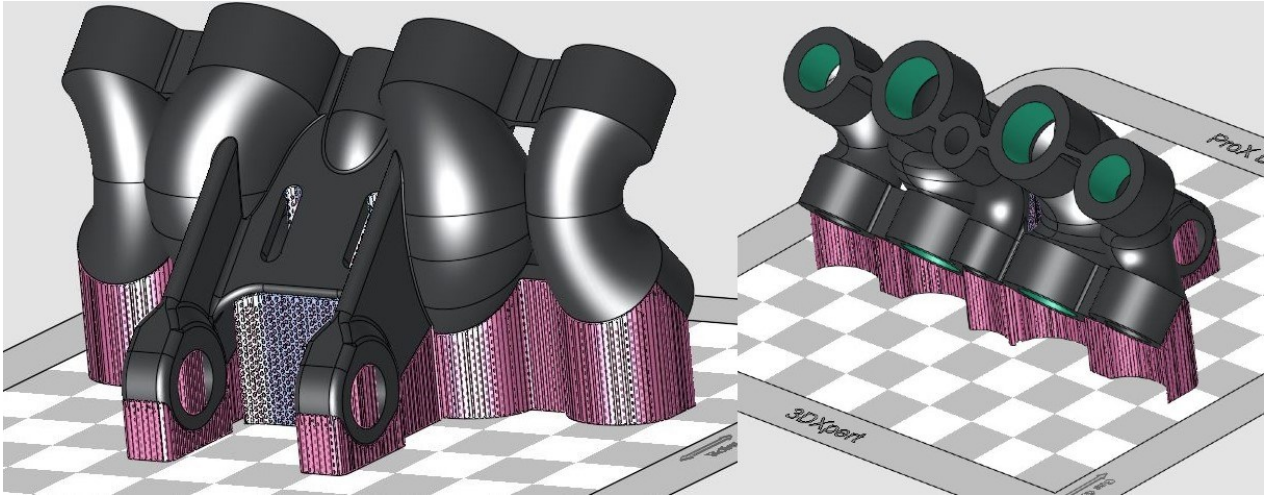
Valmistusohjelman luominen Prox DMP300 metallitulostimelle. Kappaleen 3D-tulostaminen aloitettiin tulostusohjelman luomisella. Tulostusohjelman luontiin käytettiin 3DXpert-ohjelmistoa. Tulostusohjelman pohjalta 3DXpert-ohjelmisto luo tulostimen ymmärtämän valmistustiedoston, joka sisältää laserointiradat ja valmistettävien kerroksien paksuudet, sekä muut tulostimen tarvitsemat tiedot kappaleen valmistamiseksi.

3DXpert-ohjelmistossa luotiin valmistusohjelma, jota varten määritetään seuraavat asiat.

- Kappaleen tulostusasennon valinta ja kappaleen paikoitus valmistusalustalla.
- Materiaali- ja tulostusparametrisoitua lämpökutistumisen kompensoinnin määrittäminen, jonka suuruus on Lillbackalla aiemmin selvitetty.
- Tukimateriaalien sijainnit ja geometriat, sekä näiden lisääminen valmistettavaan malliin.

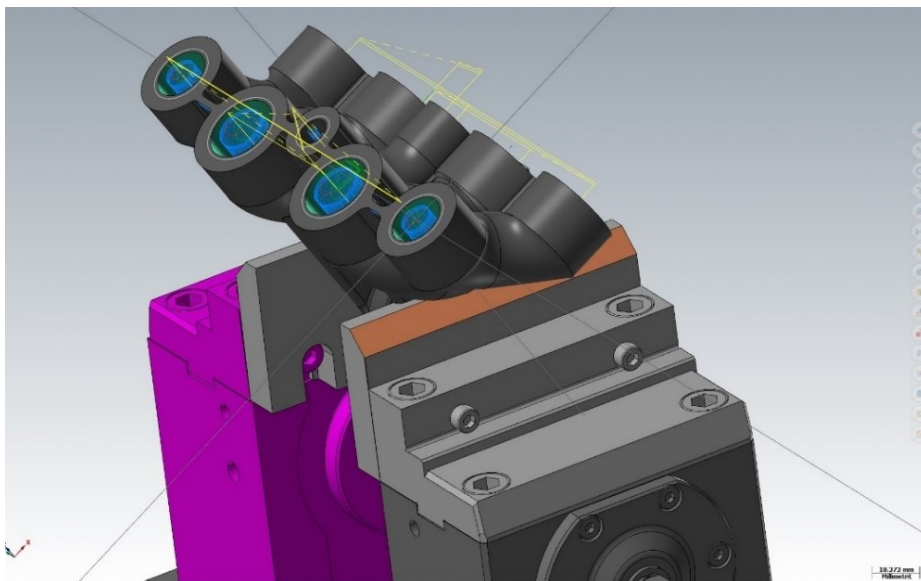
Yllä mainittujen määritysten lisäksi voidaan tehdä paljon muitakin määrittämiä 3DXpert-ohjelmistossa, kuten luoda kappaleen sisälle kennorakenteita tai sen pinnoille erilaisia tekstuurireita. Tässä tapaustutkimuksessa muille määrittämisille ei kuitenkaan ollut tarvetta.

Kappaleen tulostusasennon osalta päädyttiin alla olevan kuvion 39 mukaiseen ratkaisuun. Tässä asennossa tulostettaessa vältetään tukemasta hydraulikkalohkon kanavistoja, joista tukien irrottaminen on haastavaa. Tämän lisäksi tässä asennossa tulostettaessa ei tarvitse tukea myöskään koneistettavia pintoja mikä helpottaa kappaleen paikoittamista sekä koneistuksen toteutusta.



Kuvio 39. Hydraulikkalohkon asettelu tukineen 3DXpert-ohjelmassa.

Kappaleen työstöohjelmien luonti. Ainetta lisäävän valmistusohjelman luomisen jälkeen on vuorossa kappaleen työstöohjelmien luonti Haas-työstökeskukselle. Mastercam-ohjelmistoon tuotiin Fusion360 CAD-ohjelmistossa luodut 3D-mallit kappaleen koneistuskiinnittimistä ja varsinaisesta työkappaleesta. Työstöohjelmien tekeminen aloitettiin asettamalla kappaleelle nollapiste, jonka suhteen työstökeskuksen akseleita liikutetaan kappaleen valmistuksessa. Kuviossa 40 on kuvattuna hydraulikkalohko ja sen valmistuksessa käytettävät koneistuskiinnittimet Mastercam ohjelmistossa. Kappaleen nollapisteeksi määritettiin kuviossa näkyvä etummaisena reiän keskipiste, siten että x- ja y-akselit ovat tasossa hydraulikkalohkon tasopintaan nähden. Z-akselin nollapisteeksi määritettiin hydraulikkalohkon tasopinta.



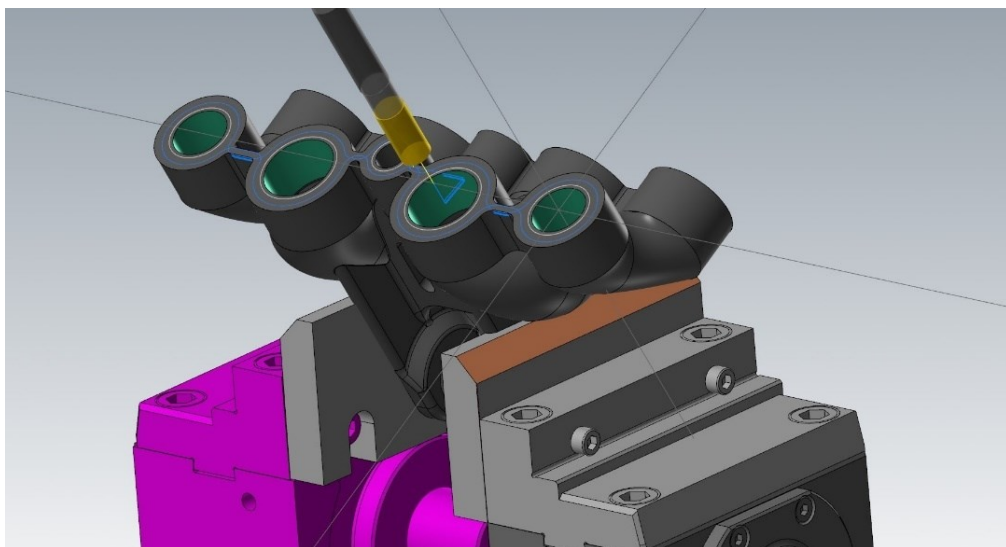
Kuvio 40. Valmistettava hydraulikkalohko ja kappaleen koneistuskiinnittimet Mastercam-ohjelmistossa.

Kappaleen kiinnityspinta-alan ollessa kohtuullisen pieni ja muotoleukojen materiaalin ollessa muovia, ajo valmistusohjelmien suunnittelua mahdollisimman vähän koneistusvoimia muodostavat työstötavat. Tällainen lähestymistapa hidastaa koneistusprosessia hiukan, mutta sillä ei ole juurikaan merkitystä kappaleen tuotantomäärien ja lastuttavien pinta-alojen ollessa vähäiset. Tällaisella lähestymistavalla voidaan varmentua, että kappale tulee valmistettua kerrasta oikein.

Koneistuksessa työstettävänä olivat hydraulikkalohkon tasopinnat, sekä kierteet hydraulikkalohkon liittimiä varten. Työstöt päädyttiin toteuttamaan seuraavanlaisessa järjestyksessä:

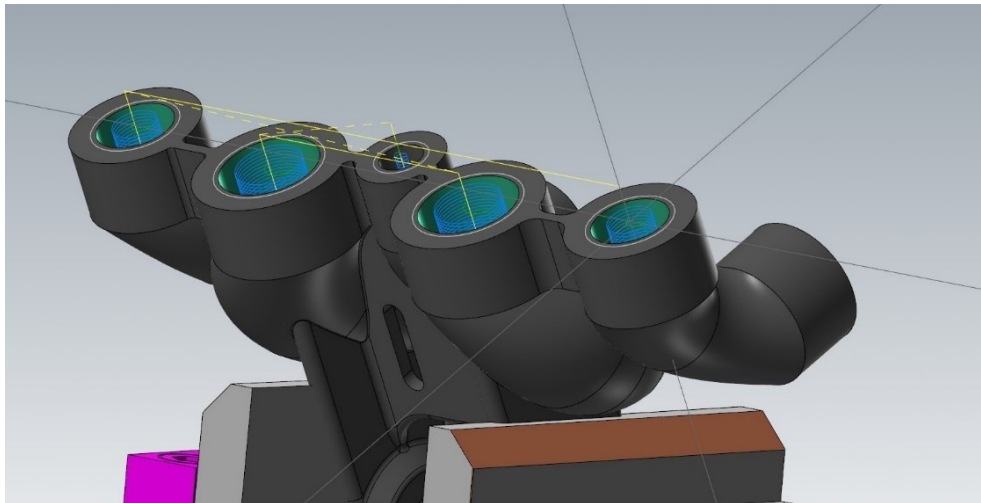
1. Tasopintojen koneistus 12 mm:n kovametallitappijyrsimellä.
2. Reikien jyrsintä oikeaan halkaisijaan kierrejyrsintää varten 12 mm:n kovametallitappijyrsimellä.
3. Kierrejyrsinnät.

Tasopintojen koneistuksessa käytettiin 12 mm kovametallista tappijyrsintä. Tappijyrsimellä kierrettiin lohkon tasopinnat kuvion 41 mukaisesti. Lastuamisen syvyys oli 1 mm. Koska kappaleelle ei tehty lämpökäsittelyä, kovametallinen pinnoittamaton tappijyrsin oli riittävä työkalu työstöön. Lastuamisnopeutena työkalulle käytettiin 70 m/min ja hammaskohtaisena syöttönä 0.05 mm. Koneistusvaroja tasopinnoilla oli 2 mm. Käyttämällä tappijyrsintä ison vaihtopalaajyrsimen sijaan saadaan koneistusvoimat pidettyä maltillisina, vaikka työstäminen onkin hitaampaa. Jyrsintäpin työstöarvojen valintaan käytettiin Maraging-teräksen koneistettavuudesta tehtyä tutkimusta (Bhukya, R., & Rao, C., 2014).



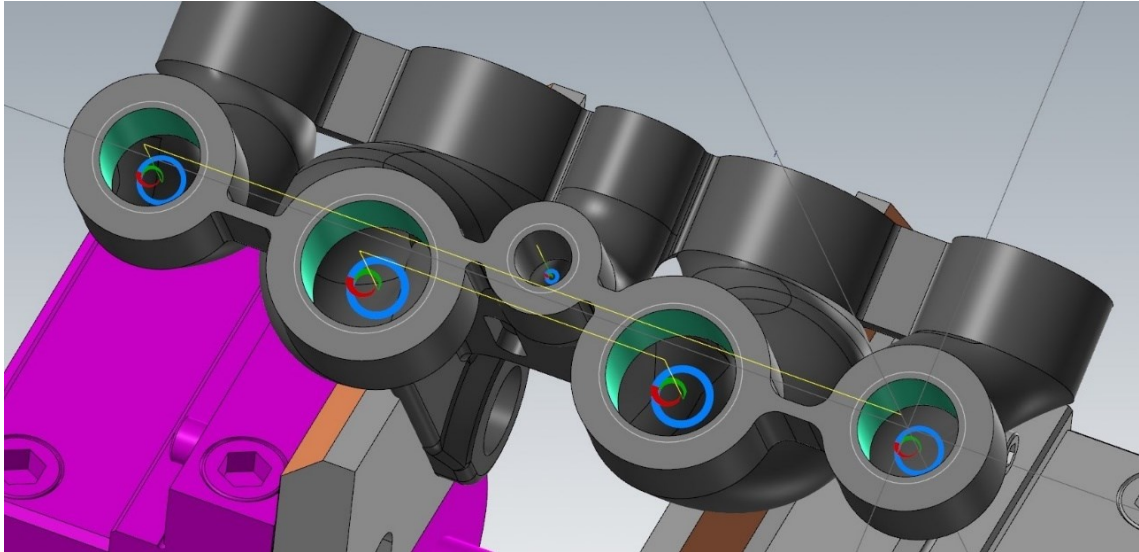
Kuvio 41. Tasopintojen koneistuksen työstöradat Mastercam ohjelmistossa.

Reikien koneistaminen oikeaan halkaisijaan tapahtui käyttämällä samaista 12 mm kovametalista tappijyrsintä kuin tasopintojenkin koneistuksessa. Tappijyrsimelle asetettiin samat lastuamisarvot kuin tasopintojenkin koneistuksessa. Työstötapana käytettiin spiraalijyrsintää, jossa työkalu tekee ympyrämäistä liikettä asetetun halkaisijan mukaisesti samalla syöttäen työkalua jatkuvasti alaspäin. Lastunsyvyys ilmoitetaan tässä tapauksessa muodossa millimetriä kierroksella (mm / 1), tässä tapauksessa lastuamissyvyytenä toimi 1 mm kierrosta kohden. Kuviossa 42 on esitettyä luodut spiraalijyrsinnän työstöradat Mastercam-ohjelmistossa. Tappijyrsimellä suoritettu spiraalijyrsintä muodostaa vähemmän koneistusvoimia kuin reikien koneistaminen poraamalla, tämän lisäksi voidaan kaikki reiät valmistaa samalla työkalulla, kunhan reiät ovat isompia halkaisijaltaan kuin käytettävä jyrsintappi. Perinteisempää poraamista käytettäessä oltaisiin hydraulikkalohkon valmistukseen tarvittu kolme erikokoista poratyökalua.



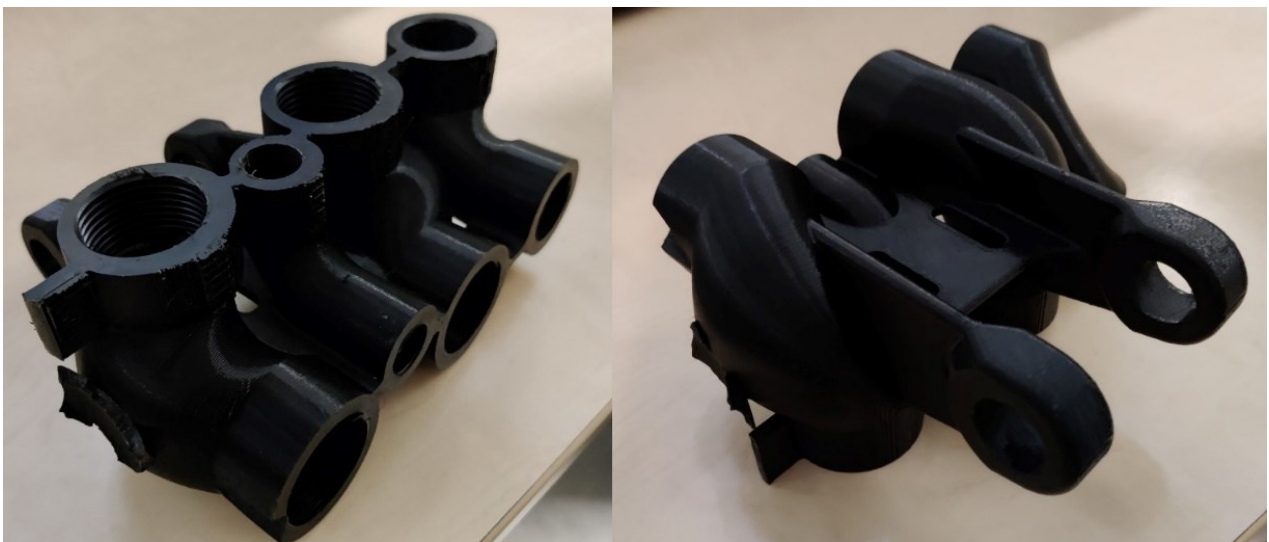
Kuvio 42. Spiraalijyrsinnän työstöradat Mastercam-ohjelmistossa.

Reikien ollessa valmistettuna oikeaan halkaisijaan, voidaan viimeiseksi toteuttaa kierrejyrsinnät. Koska hydraulikkalohkossa on kolme eri kierrekokoja, tarvitaan sen valmistukseen kolme erilaista kierrejyrsintä. Käytetyt kierrejyrsimet olivat Guhring-merkkisiä ja TMU-mallisarjaa. Kierrejyrsinnässä työkalu syötetään kierteitettävän reiän pohjalle, mistä työkalua syötetään kohti haluttua kierteen ulkohalkaisijaa samalla nostaen työkalua ylöspäin minimissään kierteen nousun verran. Kierrejyrsimille käytetyt työstöarvot saatiin valmistajan taulukoista. Kuviossa 43 on kuvattuna kierrejyrsinnän työstöradat Mastercam-ohjelmistossa. Kierrejyrsintä on työstövoimiltaan usein hellävaraisempi kuin perinteinen kierretapilla tehtävä kierteitys. Tämän lisäksi kierretapin hajotessa vahingoittuu usein samalla työstettävä kappale, kun taas kierrejyrsimen hajotessa kappale todennäköisemmin säilyy ilman vaurioita.



Kuvio 43. Kierrejrystin työstöradat Mastercam-ohjelmistossa.

Testikoneistuksen suorittaminen käyttäen havainnollistavaa mallia. Kyseisessä tapaus- tutkimuksessa työstöradoille ajettiin testikoneistukset käyttäen havainnollistavaa mallia ennen varsinaisen metallikappaleen koneistamista. Kierrejrystin lastunpaksuuden asetuksessa tapahtuneen virheen vuoksi havainnollistavan mallin ensimmäisessä testikoneistuksessa kappale murtui koneistusvoimien alla. Kappaleen murtumisesta huolimatta pystyttiin testiko- neistus suorittamaan loppuun jäljelle jääneelle havainnollistavalle mallille työstöratojen kor- jaamisen jälkeen. Havainnollistavan mallin käytön ansiosta työstöratojen tekemisessä aiheu- tuneet virheet onnistuttiin havaitsemaan sekä korjaamaan, ilman että niistä aiheutui vahinkoa varsinaiselle työkappaleelle tai lastuaville työkaluille. Kuvassa 15 on esitettyä koneistuk- sessa murtunut havainnollistava malli.



Kuva 15. Murtunut havainnollistava malli koneistuksen jälkeen.

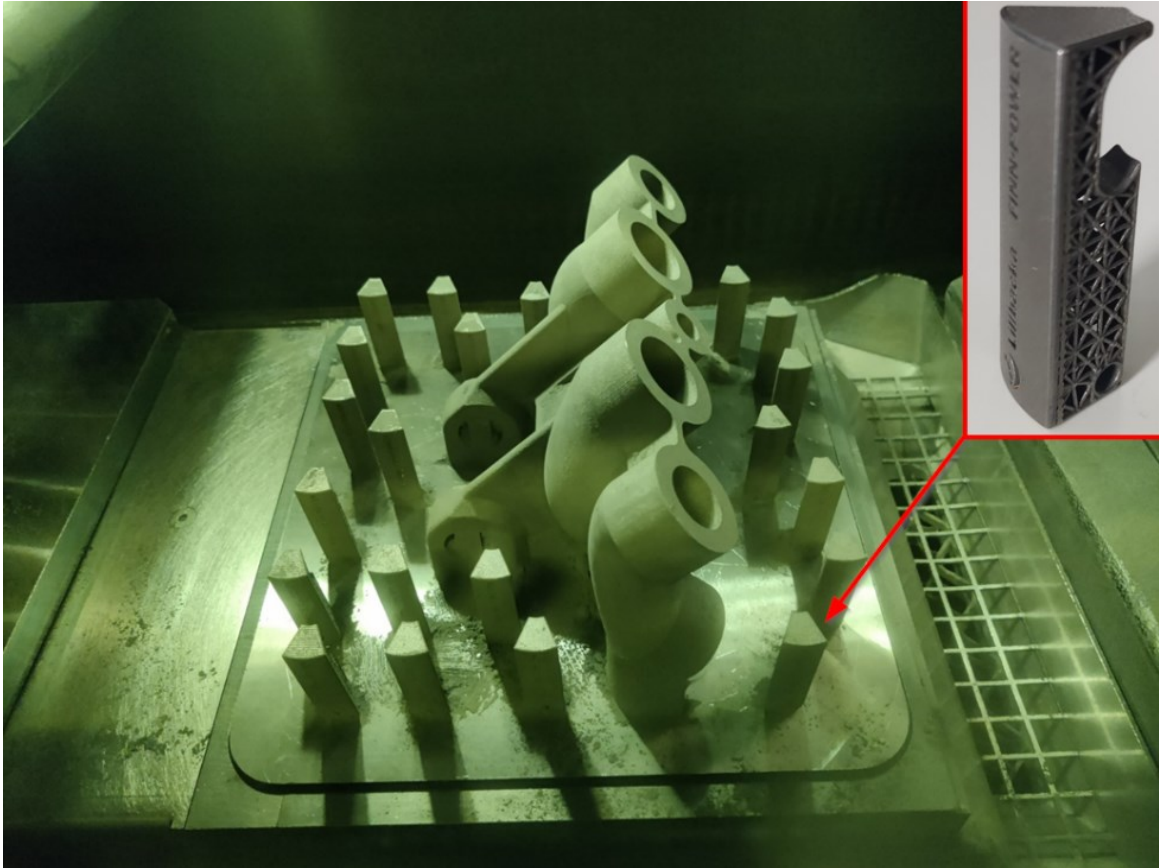
7.3 Kappaleen 3D-tulostus

Tulostimen valmisteleva operointi. Tulostimen valmistelevässä operoinnissa syötetään uusi puhtaaksi hiottu metallinen valmistusalusta Prox DMP300 metallitulostimen sisään ja paikoitetaan sen korkeus tulostimen levitysrullaan nähden käyttäen automatisoituja työkierroja. Pulverisäiliön pinta tulee myös tasata, jotta valmistuslevylle saadaan levitettyä riittävä kerros pulveria. Tulostimen laserointi-yksikön linssi tulee myös puhdistaa ennen valmistuksen aloitusta. Tämän jälkeen voidaan valmistusohjelma ladata tulostimelle. Lopuksi ennen valmistusta laitetaan tulostimen ohjauksesta typpikaasun (N_2) syöttö päälle, sillä typpikaasun ansiosta tulostusprosessi on stabiilimpi ja laserin tekemän sulatusprosessin laatu parempi. Tiiviin valmistuskammion sisäisen happipitoisuuden asetuttua halutulle tasolle voidaan tulostaminen aloittaa.

Varsinainen metallitulostamisen valmistusprosessi ei vaadi läsnäoloa. Tulostin tulkitsee aiemmin tehtyä valmistusohjelmaa minkä pohjalta se valmistaa kappaleen itsenäisesti. On kuitenkin yleensä järkevää tarkkailla valmistusprosessia sen alkuvaiheessa, jotta voidaan varmentua tarpeeksi hyvästä kerrostuksesta ja ensimmäisien kerroksien kiinnittymisestä tulostusalustaan.

Kappaleen jälkikäsittely. Tulostuksen valmistuttua tulee suorittaa kappaleen jälkikäsittelyvaiheet. Kappaleen jälkikäsittely aloitetaan kappaleen purkamisella metallitulostimesta. Ylijäämäinen laseroimaton pulveri poistetaan kappaleen ympäriltä ja se kierrätetään automaattisen siivilöintijärjestelmän lävitse takaisin pulverisäilöön uudelleen käyttöä varten. Ylijäämäpulverin poistossa käytettiin sutia ja koneen sisäistä imurijärjestelmää.

Kuvassa 16 hydraulikkalohko tulostettuna ylijäämäpulverin poiston jälkeen. Ohessa myös valmistettiin markkinointitarkoitukseen Lillbacka pullonavaimia. Kuvassa valmistetut kappaleet ovat vielä kiinni valmistusalustassa.



Kuva 16. Hydrauliikkalohko tulostettuna pulverinpoiston jälkeen, ohessa tulostettuna myös Lillbacka pullonavaimia.

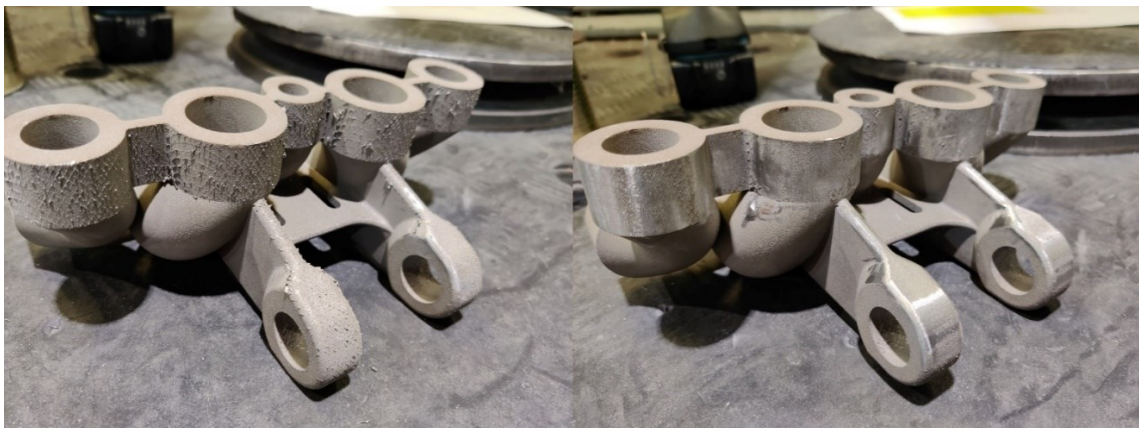
Ylijäämäpulverin puhdistamisen jälkeen valmistusalusta poistetaan koneesta automaattisen työkierron avulla, kappaleiden ollessa yhä kiinni alustassa. Tulostusalustan ollessa irrallaan koneesta, voidaan kappale irrottaa siitä murtamalla tukimateriaalit, joiden varaan osa on tulostettu. Tukimateriaalien murtamiseen käytettiin manuaalisia työtapoja ja välineinä vasaraa ja talttaa. Usein kappaleiden irrotukseen käytetään maailmalla joko metallivannesaha tai lankasahausta.

Kuvassa 17 on esitettyä hydrauliikkalohko kiinni valmistusalustassa. Valmistusalusta on poistettuna koneesta ja valmiina kappaleen irrotusta varten.



Kuva 17. Hydraulikkalohko kiinni valmistusalustassa (Timo Hautamäki / Lillbacka Powerco Oy).

Kappaleen irrottamisen jälkeen parhaan pinnanlaadullisen lopputuloksen saavuttamiseksi hydraulikkalohkole suoritettiin käsityökaluja käyttäen viimeistely. Käsintehdyssä viimeistelyssä poistettiin tukimateriaalien jäämät tuentojen alaisilta pinnoilta. Käsityökaluina toimi paineilmatoiminen hiomakone, sekä erilaiset hiomaviilat. Kuvassa 18 on esitettyä valmistusalustasta irrotettu hydraulikkalohko ennen ja jälkeen käsin tehdyn viimeistelyn.



Kuva 18. Hydraulikkalohko ennen ja jälkeen manuaalisesti suoritettujen tukien poiston.

Pinnanlaadun parantamiseksi entisestään Lillbackalla on käytössä PostProcess merkinen jälkikäsittelytärtytin. Jälkikäsittelytärtytimellä käsiteltiin kappale ensiksi käyttäen karkeampaa hiovaa kivimateriaalia ja sen jälkeen käyttäen hienompaa kiillottavaa kivimateriaalia. Kuvassa 19 on hydraulikkalohko jälkikäsittelytärtytimessä. Kappaleen pinnassa oleva kirjavuus johtuu prosessissa käytettävästä hiomanesteestä.



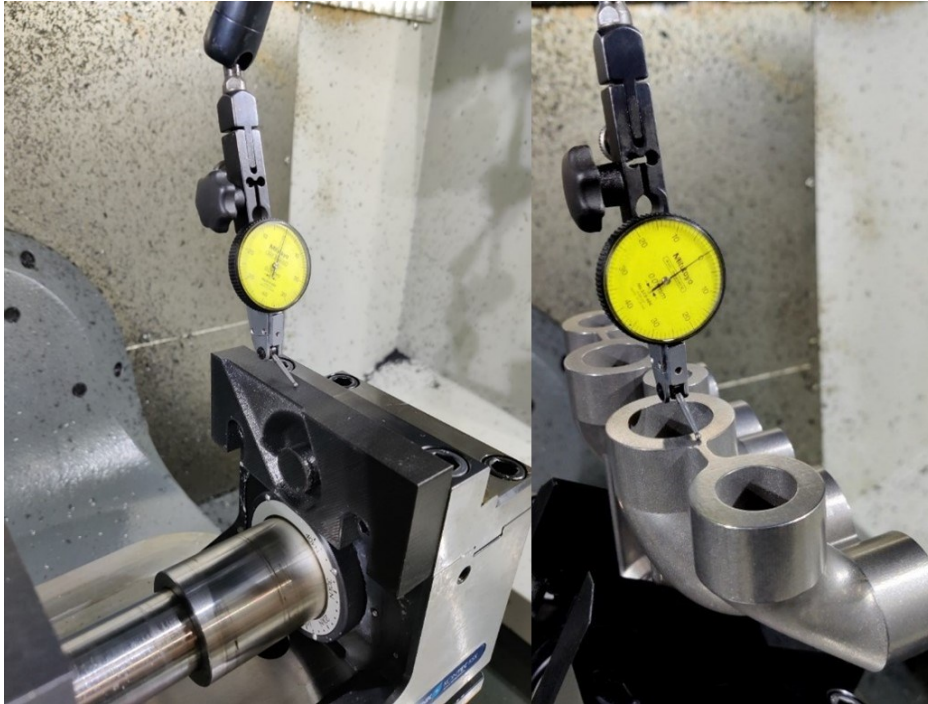
Kuva 19. Hydrauliiikkalohko jälkikäsittelytärtyttimessä.

7.4 Kappaleen kiinnitys ja 3D-tulostamisen mittatarkkuuden tutkiminen

Kappaleen jälkikäsittelyjen jälkeen voidaan kappale kiinnittää Haas-työstökeskukseen aiemmin suunniteltua kiinnitysmenetelmää käyttäen. Tässä vaiheessa hydrauliikkalohkon koneistamiseksi tehdyt valmistelut ovat jo tehtynä ja kappale voidaan paikoittaa työstökeskukseen koneistamista varten. Kuitenkin ennen koneistamista tulee osana tätä tutkimustyötä tutkia muovitulosteisten muotoleukojen paikoitustarkkuutta sekä ainetta lisäävällä valmistuksella saavutettua mittatarkkuutta.

Työkappaleen kiinnitys ja paikoitus muotoleukojen avulla. Työkappaleen kiinnittäminen ja paikoittaminen aloitettiin kiinnittämällä muovista 3D-tulostamalla valmistetut muotoleuat Schunk-merkkiseen hydrauliikkapuristimeen. Jotta voidaan varmentua muotoleukojen asettamisesta oikein, käytettiin apuna tässä heittokelloa. Heittokelloa liikuttamalla koneen akseleita käyttäen ja hienosäätämällä asettumista kumivasaralla napauttelemalla, saatiin muotoleuat asettumaan hyvin paikoilleen. Tämän jälkeen kappale kiinnitettiin hydrauliikkapuristimeen muotoleukojen avulla. Käyttäen heittokelloa apuna haettiin hydrauliikkalohko työstöohjelmien tekovaiheessa määritettyyn asentoon.

Kuvassa 20 vasemmalla muotoleukojen asettamista puristimeen ja oikealla työkappaleen kohdistamista. Kummassakin kuvassa näkyvillä heittokello, jota käytettiin apuvälineenä.



Kuva 20. Vasemmalla muotoleukojen asettaminen suoraan käyttäen heittokelloa. Oikealla työkappale kiinnitettynä muotoleukoihin ja kohdistettuna heittokellolla.

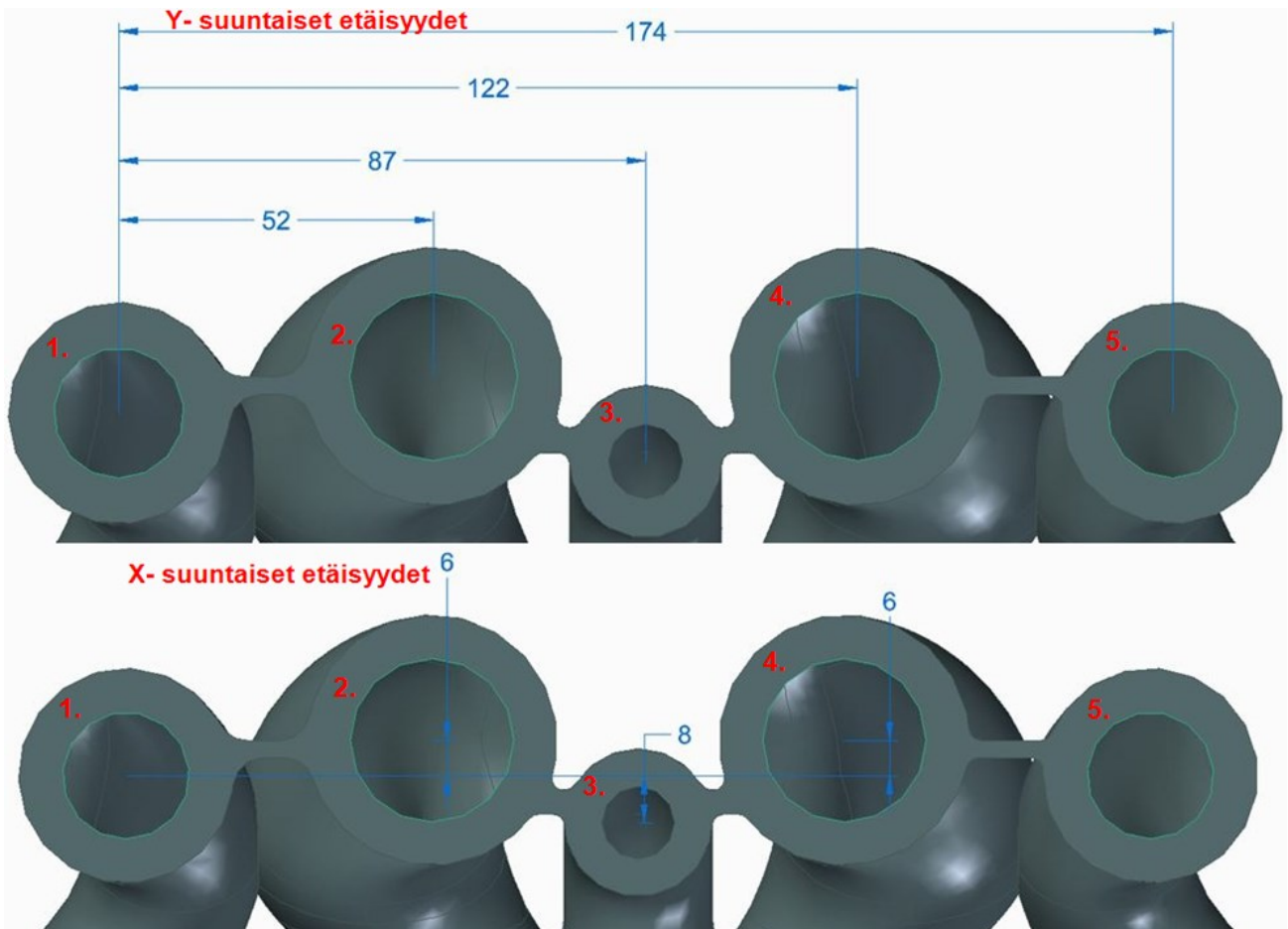
Kun työkappale on saatu kohdistettua työstöohjelmassa tehdyn määrittelyn mukaisesti, tulee heittokellon avulla selville saadut B-akselin arvot syöttää koneen ohjauksen tietoon. B-akselin arvoksi saatiin -30.093 astetta, tilanteessa jossa hydraulikkalohkon tasopinta oli tasossa X- ja Y-akseleihin nähden. Muotoleukojen paikoittaessa työkappale ilman heittoja olisi tämä arvo ollut tasan -30 astetta, joten muotoleukojen paikoituksessa havaittiin pientä epätarkkuutta. Kuvassa 21 on kuvattuna työkappaleen nollapistet asetettuna Haas työstökeskuksen tietoon. Koneistuksessa työstöohjelma liikuttaa koneen akseleita suhteessa tähän nollapisteseen.

G Code	X Axis	Y Axis	Z Axis	B Axis	C Axis
G52	0.	0.	0.	0.	0.
G54	-312.230	-431.439	-343.157	-30.093	-90.000

Kuva 21. Työkappaleen nollapistet asetettuna työstökeskuksen ohjauksen tietoon.

Ainetta lisäävän valmistuksen saavuttaman mittatarkkuuden tutkiminen. Mittatarkkuuden arviointi on oleellinen osa hybridivalmistuksen kehittämistä, jotta tiedetään tarvittavien koneistusvarojen tarpeista sekä niiden suuruudesta. Tavoitteena on myös samalla tarkastella ja kokeilla mittapään käyttöä mittalaitteena.

Mittatarkkuuden tutkiminen toteutettiin ottamalla ensiksi talteen 3D-mallista saatuja mittoja, joiden mukaan työkappale valmistettiin ainetta lisäävästi. Talteen otettuja mittoja verrattiin toteutuneisiin mittaustuloksiin, jotka selvitettiin käyttäen elektronista mittapäätä. Kuviossa 44 on esitettyä hydraulikkalohkon ulostulojen sijainnit toisiinsa nähden X- ja Y-suunnissa, ja niitä verrataan toteutuneisiin sijainteihin. Kuvio on kuvankaappaus kappaleen 3D-mallista. Jokainen ulostulo myös nimettiin numeroilla. Käytettynä mittayksikkönä toimi millimetri (mm).



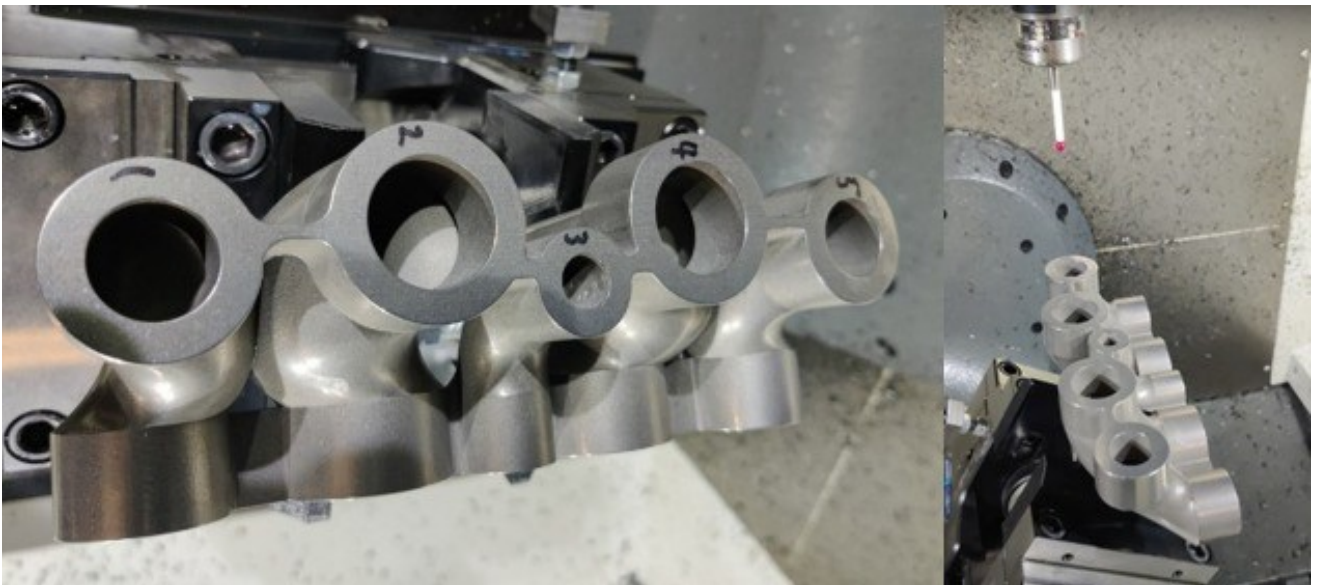
Kuvio 44. Kappaleen ulostulojen sijainnit toisiinsa nähden, mittayksikkönä millimetri (mm). Yllä Y-suuntaiset ja alla X-suuntaiset etäisyydet. Jokainen ulostulo myös nimettynä numerolla (kuvankaappaus CAD-mallista).

3D-mallista selvitettyjen sijaintien pohjalta luotiin Excel-taulukko, joka on esitettyä taulukossa 2.

Taulukko 2. 3D-mallin mukaiset etäisyydet reiän 1. sijaintiin nähden.

3D-mallin mukaiset etäisyydet reiän 1. sijaintiin nähden.			
Mittauspisteet	X- sijainnit	Y- sijainnit	
1. - 2.		6	-52
1. - 3.		-8	-87
1. - 4.		6	-122
1. - 5.		0	-174

Hydrauliikkalohkon ulostulot numeroitiin samalla tavalla, kuin aiemmin 3D-mallin vastaavat ulostulot. Käyttäen elektronista mittapäätä, mitattiin jokaisen ulostulon sijainti. Kuvassa 22 vasemmalla hydrauliikkalohko ulostulojen numerointineen. Kuvassa 22 oikealla elektroninen mittapäätä, jolla mittaukset suoritettiin. Elektronisella mittapäällä mittaaminen toteutettiin käyttäen työstökeskuksen ohjauksesta löytyviä helppokäyttöisiä mittaustyökiertoja.



Kuva 22. Vasemmalla hydrauliikkalohkon ulostulot numeroituna. Oikealla elektroninen mittapäätä ja hydrauliikkalohko.

Elektronisella mittapäällä saadut numeroitujen ulostulojen keskipisteiden X- ja Y-akseleiden suuntaiset sijainnit työstökeskuksen kotiasemaan nähden otettiin talteen. Taulukossa 3 on esitettyinä mittaamalla saadut sijainnit numeroiduille ulostuloille.

Taulukko 3. Toteutuneet elektronisella mittapäällä saadut sijainnit työstökeskuksen kotiasemaan nähden.

Toteutuneet reikien sijainnit probella mittaamalla		
Reikä numero	X-akseli	Y-akseli
1.	-312,222	-431,431
2.	-318,185	-379,405
3.	-304,155	-344,401
4.	-318,149	-309,389
5.	-312,149	-257,371

Taulukossa 3 esitetyt työstökeskuksen kotiasemaan nähden olevat mittaustulokset muunnettiin reiän numero 1 sijaintiin nähden oleviksi etäisyyksiksi. Muuntamisen jälkeen saadut X- ja Y-akseleiden suuntaiset etäisyydet reiän 1. sijaintiin nähden on kuvattuna taulukossa 4.

Taulukko 4. Elektronisella mittapäällä saadut sijaintiedot muutettuna reiän 1 sijainnin suhteen.

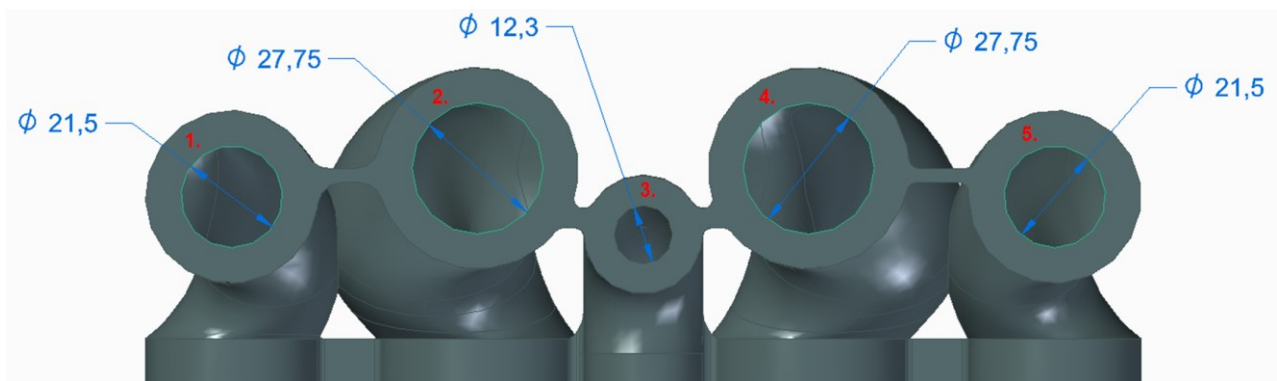
Toteutuneet probella mitatut etäisyydet reiän 1. sijaintiin nähden.		
Mittauspisteet	X- sijainnit	Y- sijainnit
1. - 2.	5,963	-52,026
1. - 3.	-8,067	-87,03
1. - 4.	5,927	-122,042
1. - 5.	-0,073	-174,06

Vertaamalla elektronisella mittapäällä mitattuja hydraulikkalohkon ulostulojen välisiä etäisyyksiä 3D-mallissa esiintyviin etäisyyksiin saatiin valmistuksessa tapahtuneen mittavirheen suuruus tietoon. Ainetta lisäävässä valmistuksessa muodostuneet epätarkkuudet ovat esitettyinä taulukossa 5. Tulosten pohjalta voidaan todeta mittatarkkuuden ainetta lisäävässä valmistuksessa olevan erittäin hyvällä tasolla, suurimman mittavirheen ollessa vain 0,073 mm.

Taulukko 5. Toteutuneet mittavirheet ainetta lisäävässä valmistuksessa

Reikien sijaintien erotus (3D-malli - Toteutunut)		
Mittauspisteet	X- sijainnit	Y- sijainnit
Mittauspiste 1 -2	0,037	0,026
Mittauspiste 1 -3	0,067	0,03
Mittauspiste 1 -4	0,073	0,042
Mittauspiste 1 -5	0,073	0,06

Vastaavanlainen vertailupohjainen tutkimus tehtiin myös hydraulikkalohkon ulostulojen halkaisijoille. Kuviossa 45 esitettyjä hydraulikkalohkon CAD-mallin mukaisia halkaisijamittoja verrattiin toteutuneisiin halkaisijamittoihin. Mittausvälineenä käytettiin tässä tapauksessa käsikäyttöistä työntömittaa.



Kuvio 45. Reikien halkaisijatiedot reikien numerointineen.

Taulukossa 6 on kuvattuna havaitut halkaisijamittojen kohdalla esiintyvät mittavirheet. Havaittujen tulosten perusteella voidaan jälleen todeta ainetta lisäävän valmistuksen mittatarkkuuden olevan erittäin hyvällä tasolla, suurimman mittavirheen ollessa suuruudeltaan 0,09 mm. Tuloksia tarkasteltaessa on kuitenkin syytä ottaa huomioon käytetyn työntömitan epätarkkuus ja inhimillisen virheen mahdollisuus käsimittavälineiden käytössä. Halkaisijamitoista saadut tulokset ovat kuitenkin hyvin samankaltaisia kuin elektronisella mittapäällä saadut tulokset.

Taulukko 6. Taulukko halkaisijamittojen mittavirheestä ainetta lisäävässä valmistuksessa.

Reikä numero	3D-mallin halkaisija	Tuloksessa toteutunut halkaisija	Reikien halkaisijoiden erotukset (3D-malli - Toteutunut)
1.	21,5	21,46	0,04
2.	27,75	27,74	0,01
3.	12,3	12,21	0,09
4.	27,75	27,73	0,02
5.	21,5	21,48	0,02

Tässä opinnäytetyön osiossa tehtyjen mittausten perusteella Lillbackan ainetta lisäävän valmistuksen tarkkuus riittää suurimpaan osaan SFS-EN ISO 22768-1:1993 yleistoleranssitaulukon luokista. Mittaustuloksien pohjalta ainetta lisäävällä valmistuksella päästään mitta-tarkkuudeltaan kuviossa 46 sinisellä rajatulla alueella oleviin yleistoleransseihin.

TOLERANSSILUOKKA		Pituusmittojen sallitut poikkeamat viistettyjä kulmia lukuun ottamatta, standardin SFS-EN ISO 22768-1:1993 mukaan.							
TUNNUS	KUVAUS	> 0,5 ≤ 3	> 3 ≤ 6	> 6 ≤ 30	> 30 ≤ 120	> 120 ≤ 400	> 400 ≤ 1000	> 1000 ≤ 2000	> 2000 ≤ 4000
f	hieno	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5	-
m	keskikarkea	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2
c	karkea	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2,0	±3,0	±4
v	erittäin karkea	-	±0,5	±1	±1,5	±2,5	±4,0	±6,0	±8

Kuvio 46. Tutkimustyössä saavutetun ainetta lisäävän valmistuksen tarkkuus suhteutettuna SFS-EN ISO 22768-1:1993 yleistoleranssitaulukon (soveltaen Camcut, i.a.).

7.5 Kappaleen koneistus

Kappaleen kiinnittämisen, paikoittamisen, lastuavien työkalujen asettamisen ja työkappaleelle määritetyn nollapisteen ottamisen jälkeen, on työstökeskuksella tarvittavat tiedot varsinaisen CNC-koneistamisen aloittamiseksi.

Kuvassa 23 on esitettyä kappaleen valmistuksessa käytetyt työkalut. Vasemmalla kuvassa on halkaisijaltaan 12 mm kovametalli tappijyrsin, jonka valmistajasta ei ole tietoa. Kolme muuta työkalua ovat Guhring-valmistajan TMU-mallisarjaa olevia kierreyrsimiä. Kappaleessa olevat kolme erilaista letkuliitöntäkierrettä vaativat jokainen oman työkalunsa, kierteiden nousujen erotessa toisistaan. Työkappaleeseen valmistettavat letkuliitöntäkierteet olivat G 3/8", G 3/4" ja G 1".



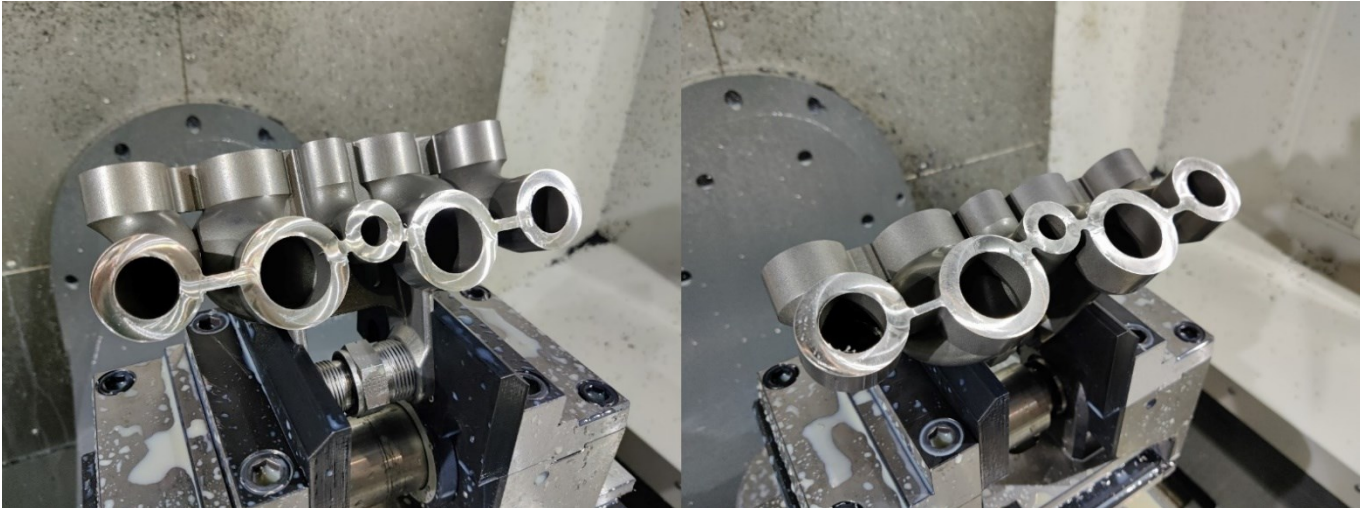
Kuva 23. Hydraulikkalohkon koneistamisessa käytetyt lastuavat työkalut teräpitimineen.

Tasopintojen koneistukset. Kuten työstöohjelman luomisessakin jo suunniteltiin, tapahtui valmistus koneistamalla ensiksi kummatkin hydraulikkalohkon tasopinnot puhtaaksi 12 mm kovametallisella tappijyrsimellä. Kummaltakin tasopinnoilta poistettiin 2 mm koneistusvaroina toiminutta materiaalia, jotka oli lisätty ainetta lisäävää valmistusta varten luotuun 3D-malliin. Kuvassa 24 on esitettyä toisen tasopinnojen koneistusta tappijyrsimellä.



Kuva 24. Hydraulikkalohkon tasopinnojen koneistus käynnissä.

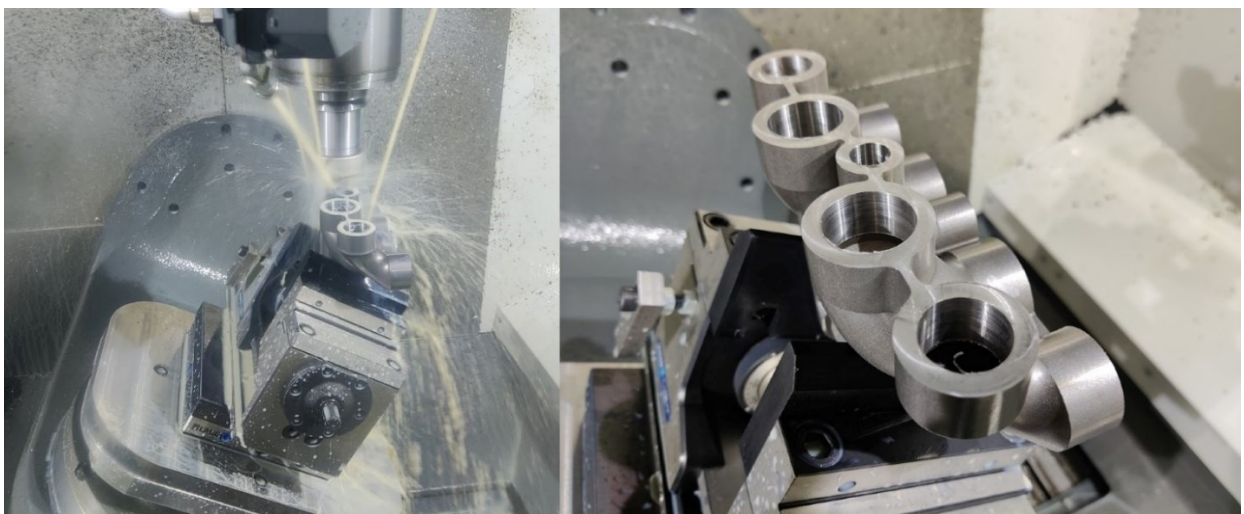
Kuvassa 25 on esitettyä hydraulikkalohkon molemmat tasopinnot koneistuksen jälkeen. Koneistuksessa ei ollut havaittavissa mitään ylimääräisiä ääniä, jotka viittaisivat kappaleen värähtelyyn koneistusvoimien alla. Koneistettujen tasopinnojen pinnanlaatu oli myös kiitettävää, mikä viittaisi siihen, että käytetyt työstöarvot olivat oikeansuuntaiset.



Kuva 25. Hydraulikkalohkon molemmat tasopinnot koneistuksen jälkeen.

Ulostulojen koneistus oikeisiin halkaisijamittoihin. Tasopintojen koneistamisen ollessa valmiina, koneistetaan seuraavaksi hydraulikkalohkon ulostulot oikeisiin halkaisijamittoihin kierrejrystöjen toteutusta varten. Jokaisen ulostulon halkaisijaan oli lisätty myös 2 mm koneistusvaroja ennen ainetta lisäävää valmistusta. Koneistaminen toteutettiin samalla 12 mm tappiyrsimellä kuin tasopintojen koneistamisetkin.

Kuvassa 26 on esitettyä vasemmalla hydraulikkalohko koneistuksen ollessa meneillään. Kuvassa oikealla puolella on esitettyä hydraulikkalohko, jossa ulostulojen halkaisijat koneistettuna oikeaan halkaisijaan kierteiden jrsintää varten. Ulostulojen koneistaminen onnistui hyvin ilman ylimääräisiä ääntelyitä. Ulostulojen reunoille jääneet purseet viittaisivat siihen, että käytetty tappiyrsimen saattaisi vaatia hiukan teroitusta.



Kuva 26. Vasemmalla kuvaa hydraulikkalohkon ulostulojen koneistuksesta. Oikealla hydraulikkalohkon ulostulot oikeisiin halkaisijamittoihin koneistettuna.

Ulostulojen kierrejärsinnät. Ulostulojen halkaisijamittojen ollessa haluttuja, voidaan lopuksi vielä toteuttaa kappaleelle kierrejärsinnät, käyttämällä kolmea eri kierrejärsintä. Kuvassa 27 vasemmalla on kuvattuna kierrejärsintä G 1” letkuliitinkierteelle. Kuvassa oikealla on hydraulikkalohko kierrejärsintöjen toteuttamisen jälkeen. Hydraulikkalohkoon on testimielessä asennettuna hydraulikkaliittimet.



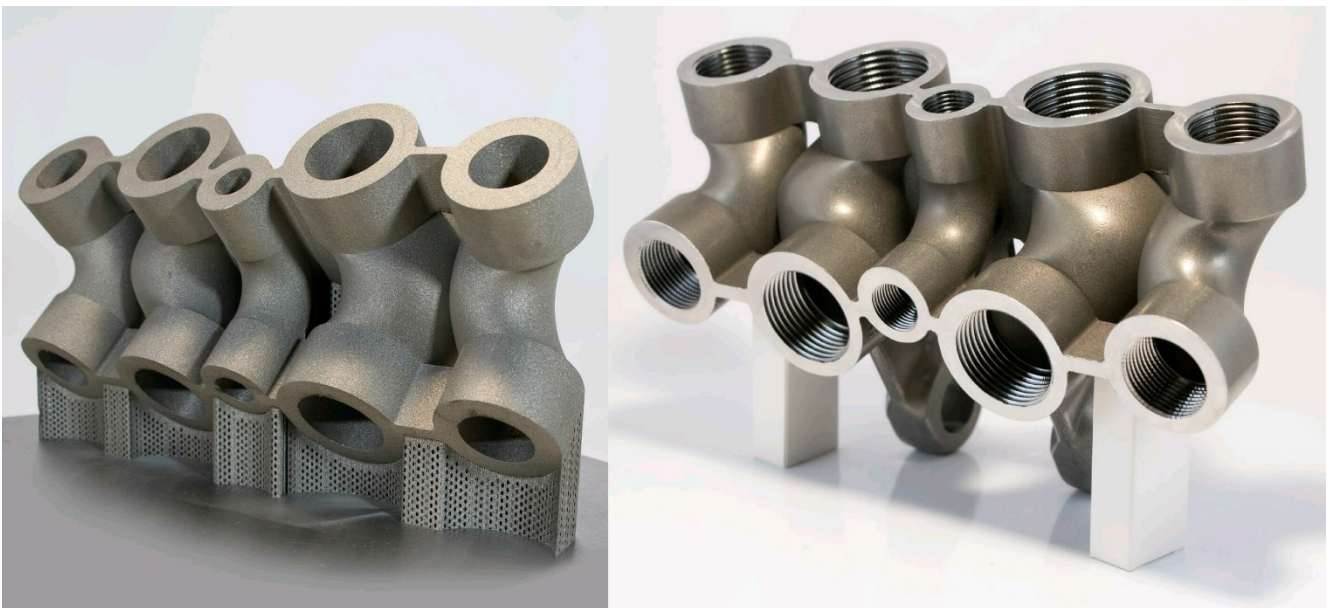
Kuva 27. Vasemmalla hydraulikkalohkon kierrejärsintää. Oikealla valmis hydraulikkalohko, jonka kierteille sovitettuna hydraulikkaliittimet.

Kierrejärsinnät ja täten hydraulikkalohkon hybridivalmistus saatiin onnistuneesti valmiiksi. Kierrejärsintä onnistui hyvin, vaikkakin ulommaisien ulostulojen kierteiden koneistamisen aikana syntyi hiukan kappaleen värinään viittaavia ääniä. Tarkasteltaessa valmistettuja ulomaisia kierteitä, on niissä huomattavissa hiukan pinnanlaadullista epätarkkuutta, mutta tästä huolimatta valmistetut kierteet toimivat moitteetta. Kuvassa 28 on esitettyä ulomaisiin kierteisiin muodostunut värinäjälki. Yleisesti koneistuksen aikaiseen värinäjälkeen vaikuttaa moni tekijä, kuten kappaleen kiinnityksen tukevuus, työkalupitimien pituus, sekä käytetyt työstöarvot. Muodostunut värinäjälki saattaisi olla merkki siitä, että muovista valmistetut muotoleuat eivät ole riittävän tukevat käytettäväksi apuvälineenä koneistuksessa.



Kuva 28. Hydraulikkalohkon ulommaisiin kierteisiin muodostunut lievä värinäjälki.

Hydraulikkalohkon valmistus saatiin suoritettua onnistuneesti. Hydraulikkalohkon valmistusprosessista tuotettiin Lillbackan toimesta myös YouTube-video. YouTube-videon kuvauksesta ja editoinnista vastasi Veli-Pekka Koskinen Lillbackalta. Opinnäytetyöntekijä oli tuke-
massa YouTube-videon tuottamisprosessissa. YouTube-video on löydettävissä "Lillbacka Powerco"-nimiseltä YouTube-kanavalta, nimellä "AM BLOCK". Kuvassa 29 vasemmalla on esitettyä hydraulikkalohko ennen sille tehtyä jälkikäsittelyä. Kuvassa oikealla on esitettyä valmistunut hydraulikkalohko.



Kuva 29. Hydraulikkalohko ennen jälkikäsittelyä ja jälkikäsittelyjen jälkeen (Timo Hautamäki / Lillbacka Powerco Oy).

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

8.1 Hybridivalmistusjärjestelmänkonsepti

Opinnäytetyön tuotoksena luotiin konsepti hybridivalmistusjärjestelmästä. Hybridivalmistusjärjestelmänkonsepti luotiin Lillbackan valmiuksiin ja hybridivalmistuksen haasteisiin pohjautuvan kartoituksen pohjalta. Osana tehtyä konseptia luotiin CAD-ohjelmistopohjainen esisuunnitteluympäristö, jolla voidaan helpottaa tiedonhallintaa. Esisuunnitteluympäristön avulla voidaan myös hahmotella tulevaa valmistusprosessia, jotta mahdolliset siinä ilmenevät haasteet havaittaisiin ennen sen aloitusta. Tarkoituksena esisuunnitteluympäristössä on poistaa tarve fyysiselle työstökoneelle menemisestä ennen varsinaisen valmistusprosessin aloitusta, ja tämän ansiosta mahdollista tuotantoa ei tarvitse keskeyttää uuden kappaleen työstön suunnittelemiseksi. Monimutkaisien geometrioiden valmistamisen kehittämiseksi luotiin törmäystarkastelumalli, jotta koneistusprosessia voitaisiin simuloida entistä paremmin ennen sen toteuttamista.

Jatkokehityksen kannalta tulisi Lillbackan tutustua luotuun konseptiin, jotta sen toimivuutta voitaisiin tutkia tarkemmin käytännön tuotannossa. Luotu esisuunnitteluympäristö vaatii myös erilaisien kiinnittimien 3D-mallinnusta, jotta esisuunnitteluympäristöä päästäisiin hyödyntämään tehokkaammin. Myös erilaisia työkaluja, sekä niiden pitimiä tulisi 3D-mallintaa, jotta niitä voitaisiin hyödyntää simuloinnissa törmäystarkastelumallia käyttäen. Mahdollisesti tehtävät muutokset erilaisiin valmistukseen liittyviin kiinnittimiin, lastuaviin työkaluihin, sekä kappaleiden paikoitusvälineisiin tulee myös päivittää esisuunnitteluympäristöön, sillä esisuunnitteluympäristö on parhaimmillaan täydellinen virtuaalinen kopio valmistuksesta.

8.2 Tapaustutkimus: koneistetut pohjat hybridivalmistuksessa

Tässä tapaustutkimuksessa tavoitteena oli tutkia koneistettujen pohjien käyttöä hybridivalmistuksessa. Tapaustutkimuksessa suunniteltiin ja valmistettiin koneistetut pohjat, joiden päälle onnistuttiin valmistamaan ainetta lisäävästi geometrioita. Tapaustutkimuksessa luotiin myös esimerkki koneistettujen pohjien käytöstä hybridivalmistuksessa, sekä erilaisista paikoitusvaihtoehdoista tämän lähestymistavan hyödyntämiseksi.

Tapaustutkimuksen pohjalta, saatiin lupaavia tuloksia hybridivalmistuksesta ja siinä käytettävästä lähestymistavasta, jossa ainetta lisäävä valmistus toteutetaan koneistetun pohjalevyn päälle. Tällä lähestymistavalla voidaan saavuttaa tietyntyyppisien kappaleiden valmistuksessa merkittäviä kustannussäästöjä pienentämällä ainetta lisäävästi valmistettavan materiaalin määrää. Metallien ainetta lisäävän valmistuksen yksi merkittävimpiä haasteita onkin juuri sen valmistuskustannuksien suuruus.

Vaikka tapaustutkimuksessa saatiinkin lupaavaa näyttöä koneistettujen pohjien käytöstä hybridivalmistuksessa, vaatii aihe vielä jatkotutkimusta sen hyödyntämiseksi. Seuraavaksi tulisi jatkotutkia sekä testata erilaisia ratkaisuja, joiden avulla ainetta lisäävä materiaali saadaan valmistettua haluttuun sijaintiin hybridivalmistusalustalla. Ilman kykyä toteuttaa ainetta lisäävä valmistus riittävällä tarkkuudella suhteessa koneistettuun hybridivalmistusalustaan, ei tällä hybridivalmistuksen lähestymistavalla ole juurikaan käyttöä vaativissa mekaanisissa käyttökohteissa mihin sitä tulisi käyttää. Toinen mahdollinen aihe jatkotutkimusta varten on koneistettujen pohjien ja ainetta lisäävän valmistuksen välisten liitospintojen lujuusominaisuudet, sekä miten erilaiset koneistettujen pohjien materiaalit vaikuttavat niihin.

8.3 Tapaustutkimus: hydraulikkalohkon valmistus

Tämän opinnäytetyön toisessa tapaustutkimuksessa tutkittiin toista hybridivalmistuksen lähestymistapaa eli sitä, miten ainetta lisäävästi valmistettujen kappaleiden pinnanlaadun- ja mittatarkkuuden ominaisuuksia voidaan parantaa poistamalla valmistetusta kappaleesta materiaalia koneistamalla. Tässä tapaustutkimuksessa valmistettiin hydraulikkalohko käyttäen edellä mainittua hybridivalmistuksen lähestymistapaa. Tapaustutkimuksessa hyödynnettiin muovista 3D-tulostettuja kiinnittimiä, hydraulikkalohkon koneistuksessa. Käyttäen elektronista mittapäätä moniakselisella CNC-työstökeskuksella tutkittiin metallin ainetta lisäävän valmistuksen mittatarkkuutta, sekä elektronisen mittapään käyttöä laadunvarmennusvälineenä.

Tapaustutkimuksessa valmistettiin hydraulikkalohko onnistuneesti käyttäen hybridivalmistusta. Tapaustutkimuksessa saatiin siis hyviä tuloksia moniakselisen CNC-työstön käyttämisestä ainetta lisäävästi valmistetun kappaleen ominaisuuksien parantamiseen. Tapaustutkimuksen pohjalta voidaan todeta moniakselisen CNC-koneistuksen soveltuvan erinomaisesti osaksi hybridivalmistusta, sillä se on omiaan monimutkaisien geometrioiden valmistuksessa. Muovin ainetta lisäävän valmistuksen käytöstä koneistuskiinnittimissä saatiin ristiriitaista

tietoa: toisaalta kappale saatiin onnistuneesti valmistettua, mutta kierrejärsinnöissä ilmeni jonkin verran värinää. Tämä voi kuitenkin johtua monesta tekijästä, eikä muodostuneesta värinäjäljestä voida vetää suoraa johtopäätöksiä. Tapaustutkimuksessa havaittiin elektronisen mittapään soveltuvan erinomaisesti käytettäväksi laadunvarmennuksessa ja sen avulla havaittiin Lillbackan metallin ainetta lisäävän valmistuksen tarkkuuden olevan erittäin hyvällä tasolla. Tässä on kuitenkin syytä huomioida, että kyseessä oli vain yksittäisen kappaleen mittaamiseen pohjautuva tutkimus mittatarkkuudesta, ja sen perusteella ei voida vetää isompia johtopäätöksiä. Tämän ansiosta voidaan kuitenkin sanoa, että pääsääntöisesti riittävät koneistusvarat hybrdivalmistuksessa käytettäväksi koneistusta vaativilla pinnoilla ovat yksi millimetri tapaustutkimuksessa käytetyn kahden millimetrin koneistusvarojen sijaan.

Jatkokehityksen kannalta Lillbackan olisi järkevää kehittää CAM-ohjelmointia edelleen luomalla sinne laaja vakiotyökalukirjasto. Jotta elektronisesta mittapäästä saataisiin kaikki hyödyirti, vaatisi tämä elektronista mittapäästä tukevan CAM-ohjelmiston tai nykyiseen CAM-ohjelmistoon saatavilla olevan lisäosan hankkimisen. Hybrdivalmistuksen kehityksen kannalta mielenkiintoisia tutkimuskohteita voisivat olla erilaisien muovien testaaminen ainetta lisäävästi valmistettujen koneistuskiinnittimien käytössä. Tämän lisäksi jatkokehityksessä voitaisiin tutkia ainetta lisäävästi valmistettujen kappaleiden irrottamista valmistusalusta käyttäen siinä välineenä koneistusta. Hybrdivalmistuksen kehittämiseksi tulisi tutkia myös erilaisia lastuavia työkaluja, sekä niissä käytettyjä materiaaleja ja pinnoitteita, eritoten lämpökäsitellyn Maraging-teräksen työstämiseksi.

8.4 Opinnäytetyöntekijän loppusana

Opinnäytetyön aihe oli itselle erittäin mielekäs, sillä siinä pääsin hyödyntämään aiemmin CNC-koneistajana kartuttamaani osaamista, yhdistäen sen jo kauan mielenkiinnon kohteeksi toimineeseen metallien ainetta lisäävään valmistukseen.

Opinnäytetyön tekeminen toimeksiantajana toimineelle Lillbacka Powerco Oy:lle oli erittäin mielekästä. Opinnäytetyön prosessin tekoa tuettiin erinomaisen hyvin, ja pääsin oppimaan paljon uutta ainetta lisäävästä valmistuksesta. Haluan kiittääkin toimeksiantajan puolelta opinnäytetyönohjaajina toimineita henkilöitä, Masi Tammela, Johannes Tyniä, sekä Esko Kallionpää, erinomaisesta työstä kyseisessä tehtävässä. Eritoten haluan kiittää Masi Tammela, joka opetti opinnäytetyöntekijälle ainetta lisäävän valmistuksen salat, oli aina

käytettävissä prosessin aikana, sekä auttoi suuresti opinnäytetyön rakenteen suunnittelussa. Haluan myös kiittää Lillbackan liiketoimintajohtajaa Mika Luopajärveä tästä erinomaisesta mahdollisuudesta tehdä opinnäytetyö näin mielenkiintoisesta aiheesta. Haluan kiittää myös opinnäytetyön ohjaajana toiminutta Samuel Suvantoa kannustavasta ja motivoivasta ohjaustyöstä. Iso kiitos kuuluu myös läheisilleni, jotka olivat tukenani ja patistivat minua eteenpäin opinnäytetyöprosessin aikana, sekä antoivat opinnäytetyön tekemisen tasapainoksi mahdollisuuden palautua mukavassa seurassa.

LÄHTEET

- 3D Systems. (i.a.). *LaserForm Maraging Steel (B)*. <https://www.3dsystems.com/materials/maraging-steel>
- 3D Systems. (2019). *LaserForm Maraging Steel (B) Datasheet*. <https://www.3dsystems.com/materials/maraging-steel>
- Additive manufacturing media. (i.a.). What is additive manufacturing, *Additive Manufacturing Workflow*. <https://www.additivemanufacturing.media/kc/what-is-additive-manufacturing/additive-manufacturing-workflow>
- Bhukya, R., & Rao, C. (2014). *Evaluation and comparison of Machinability characteristics of Maraging Steel and AISI 304 Steels*. <https://www.iitg.ac.in/aimtdr2014/PROCEEDINGS/papers/473.pdf>
- Burris, M. (2018). *Metal Additive Manufacturing - Basics Zero to One*. [Diaesitys]. https://www.slideshare.net/MatthewBurris/metal-additive-manufacturing-basics-zero-to-one-june-2018b?from_action=save
- Bologa, O., Breaz, R., Racz, S., & Crenganis, M. (2016). *Decision-making Tool for Moving from 3-axes to 5-axes CNC Machine-tool*. *Procedia Computer Science*. 91. 184-192. https://www.researchgate.net/publication/305954209_Decision-making_Tool_for_Moving_from_3-axes_to_5-axes_CNC_Machine-tool/download
- Camcut. (i.a.). *Ladattavat taulukot- Toleranssitaulukko*. <https://www.camcut.fi/tuki/ladattavat/ladattavat-tilukot/>
- Carlota, V. (2020). *GF Machining Solutions facilitates the manufacture of hybrid parts*. <https://www.3dnatives.com/en/hybrid-manufacturing-gf-machining-solutions-011020204/>
- Chu, WS., Kim, CS., Lee, HT., Choi, JO., Park, JI., Song, JH., Jang, KH., & Ahn, SH. (2014). Hybrid Manufacturing in Micro/Nano Scale: A Review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 1. 75-92. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40684-014-0012-5.pdf>
- CNC Cookbook. (i.a.). *Total Guide to CNC Jigs, Fixtures, and Workholding Solutions for Mills*. <https://www.cnccookbook.com/cnc-jigs-fixtures-workholding-solutions-milling/>
- Dhokia, V., Essink W., Flynn, J., & Goguelin, S., (i.a.). *DESIGN for Additive Manufacturing*. [Verkkokurssi]. <https://gen3d.com/learning/>
- DMG MORI. (i.a.). *LASERTEC 125 DED hybrid*. <https://fi.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-nozzle/lasertec-125-ded-hybrid>

- Engineering product design. (i.a.). *Hybrid Manufacturing*. <https://engineeringproductdesign.com/hybrid-manufacturing/>
- GE Additive. (i.a.). *Take to the skies with metal additive solutions*. <https://www.ge.com/additive/industry/aerospace>
- Haas Automation. (2022). *UMC-1000SS*. <https://www.haascnc.com/fi/machines/vertical-mills/universal-machine/models/umc-1000SS.html>
- Heinonen, M., & Kalliolahti, J. (2020). *Koneistustekniikka* (L. Koskua, kuvitus). Sanoma Pro.
- Hendrixson, S. (2019). *AM 101: Hybrid Manufacturing* <https://www.additivemanufacturing.media/articles/am-101-hybrid-manufacturing>
- Hubs A Protolabs Company. (2022a). *Additive vs traditional manufacturing*. <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/#chap>
- Hubs A Protolabs Company. (2022b). *How to design parts for metal 3D printing*. <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-design-parts-metal-3d-printing/#process>
- Jones, J. (4.9.2020). *What is Hybrid Manufacturing* [webinaari]. Hybrid Manufacturing Technologies. https://www.youtube.com/watch?v=s8tL-pTiCO0&t=940s&ab_channel=Hybrid-ManufacturingTechnologies
- International Organization for Standardization (ISO). (2021). *Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary*. (ISO/ASTM 52900:2021). <https://www.iso.org/standard/74514.html>
- Kokkonen, P., Salonen, L., Virta, J., Hemming, B., Laukkanen, P., Savolainen, M., Komi, E., Junttila, J., Ruusuvuori, 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 Research Report Vol. VTT-R-03160-16. <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 Research Report Vol. VTT-R-03159-16. <https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2016/VTT-R-03159-16.pdf>
- Kujanpää, V., (2015a) *Ainetta lisäävä valmistus -lisäarvoa tuotteisiin*. [Diaesitys]. <http://docplayer.fi/8229874-Ainetta-lisaava-valmistus-lisaarvoa-tuotteisiin.html>
- Kujanpää, V., (2015b) *3D-tulostuksella lisäarvoa tuotteisiin*. [Diaesitys]. <http://docplayer.fi/5263275-3d-tulostuksella-lisaarvoa-tuotteisiin.html>
- Lillbacka. (i.a.). *Unelmista totta / Etusivu*. <https://www.lillbacka.com/>

- Lillbacka Powerco. (i.a.-a). *HIGH-QUALITY CRIMPING WITH 50 YEARS OF EXPERIENCE*. <https://finnpower.fi/>
- Lillbacka Powerco. (i.a.-b). *Additive Manufacturing*. <https://finnpower.fi/additive-manufacturing/>
- Loughborough University. (2021a). *About Additive Manufacturing*. <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/>
- Loughborough University. (2021b). *What is Additive Manufacturing*. <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/whatisam/>
- Maaranen, K. (2012). *Koneistus* (P. Könönen & P. Immonen, kuvitus). Sanoma Pro Oy.
- Merinova. (i.a.). *EnergyVaasa 3D-Center*. [Diaesitys]. https://www.merinova.fi/wp-content/uploads/2019/12/EnergyVaasa-3D-Center_hanke-very-short.pdf
- Molitch-Hou, M. (05.05.2016). *3D Systems ProX DMP 300 is a metal 3D printer for batch production*. <https://www.engineering.com/story/prox-dmp-300>
- Piili, H., Salminen, A., Korpela, M., Riikonen, N., Heiskanen, A., Kohtanen, K., & Westman, S., (2019). *Katsaus metallien 3D-tulostukseen*. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159875/190815%20Katsaus%20metallien%203D-tulostukseen%20FVV.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- PostProcess. (2022). *RADOR Surface Finish*. <https://www.postprocess.com/product/rador-surface-finishing/>
- Prusa. (i.a.). *Original Prusa i3 MK3S+*. <https://www.prusa3d.com/category/original-prusa-i3-mk3s/>
- Puukko, P., Eklund, P., & Linna, H., (13.2.2014). *Materiaalia lisäävä valmistus (AM) ja 3D-tulostus*. [Diaesitys]. <http://docplayer.fi/2277862-Materiaalia-lisaava-valmistus-am-ja-3d-tulostus.html>
- Puukko, P., Laakso, P., Eklund, P., Simons, M., & Komi, E., (17.9.2015). *Metallien 3D-tulostus – uudet liiketoimintamahdollisuudet*. [Diaesitys]. <http://docplayer.fi/3373827-Metallien-3d-tulostus-uudet-liiketoimintamahdollisuudet.html>
- Renishaw. (2022). *Standard accuracy machine tool touch probes*. <https://www.renishaw.com/en/standard-accuracy-machine-tool-touch-probes--32926>
- Riipinen, T., Kujanpää, V., Komi, E., Kilpeläinen, P., Savolainen, M., Puukko, P., Vihinen, J., Coatanea, E., & Mokhtarian, H. (2018). *Industrialization of hybrid and additive manufacturing - Implementation to Finnish industry (HYBRAM)*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Report No. VTT-R-06411-18. https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/22519412/Report_VTT_R_06411_18.pdf

- Sekhurov, S., Eklund, P., Kujanpää, V., Pekkarinen, J., Syrjälä, K., & Vihinen, J. (2017). *3D-tulostuksen suunnittelu- ja päätöksenteko-opas yrityksille. DIMECC. DIMECC Publications Series No. 12.* https://www.teknologiainfo.net/sites/teknologiainfo.net/files/download/DI-MECC_3D_tulostuksen_suunnittelu_ja_paatoksenteko_opas_yrityksille.pdf
- Sirris (22.02.2021). *Inside Metal AM* [Diaesitys]. <https://sirris.be/sites/default/files/page/inside-metal-am-final-event-v1.1-final.pdf>
- Stén & Co. (6.5.2016). *Kuumatyöteräs BÖHLER W300.* https://www.sten.fi/document/1/86/c92fe6b/tuote_e0c6524_W300FIN.pdf
- Tammela, M. (2020). *Implementation of metal additive manufacturing for customized dies.* <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/44277>
- Toulas, B. (21.9.2017). *Maraging Steel: Unique Properties and Uses.* <https://www.engineeringclicks.com/maraging-steel/>
- Valmistajat.fi. (i.a.-a). *Koneistus.* <https://valmistajat.fi/menetelmat/koneistus>
- Valmistajat.fi. (i.a.-b). *Materiaalia lisäävät menetelmät.* <https://valmistajat.fi/menetelmat/materiaalia-lisaavat-valmistusmenetelmat>
- Warfield, B. (i.a.-a) *How Can I Figure Out What Tool to Use On My CNC Mill Or Router? (Part 1 – Holes)* <https://www.cnccookbook.com/can-figure-tool-use-cnc-mill-router-part-1-holes/>
- Warfield, B. (i.a.-b) *How Can I Figure Out What Tool to Use On My CNC Mill Or Router? (Part 2: 2D Profiling)* <https://www.cnccookbook.com/can-figure-tool-use-cnc-mill-router-part-2-2d-profiling/>
- Warfield, B. (i.a.-c) *How Can I Figure Out What Tool to Use On My CNC Mill Or Router? (Part 3: Pocketing)* <https://www.cnccookbook.com/can-figure-tool-use-cnc-mill-router-part-3-pocketing/>
- Wells, L. (08.24.2021). *Milling the Future with 5-Axis CNC Machines.* Fictiv. <https://www.fictiv.com/articles/milling-the-future-with-5-axis-cnc-machines>

LIITTEET

Liite 1. Ainetta lisäävät valmistusteknologiat ja isoimmat laitevalmistajat

Liite 2. Maraging steel (B)

Liite 3. Hybridivalmistuksen tuoman arvon muodostuminen

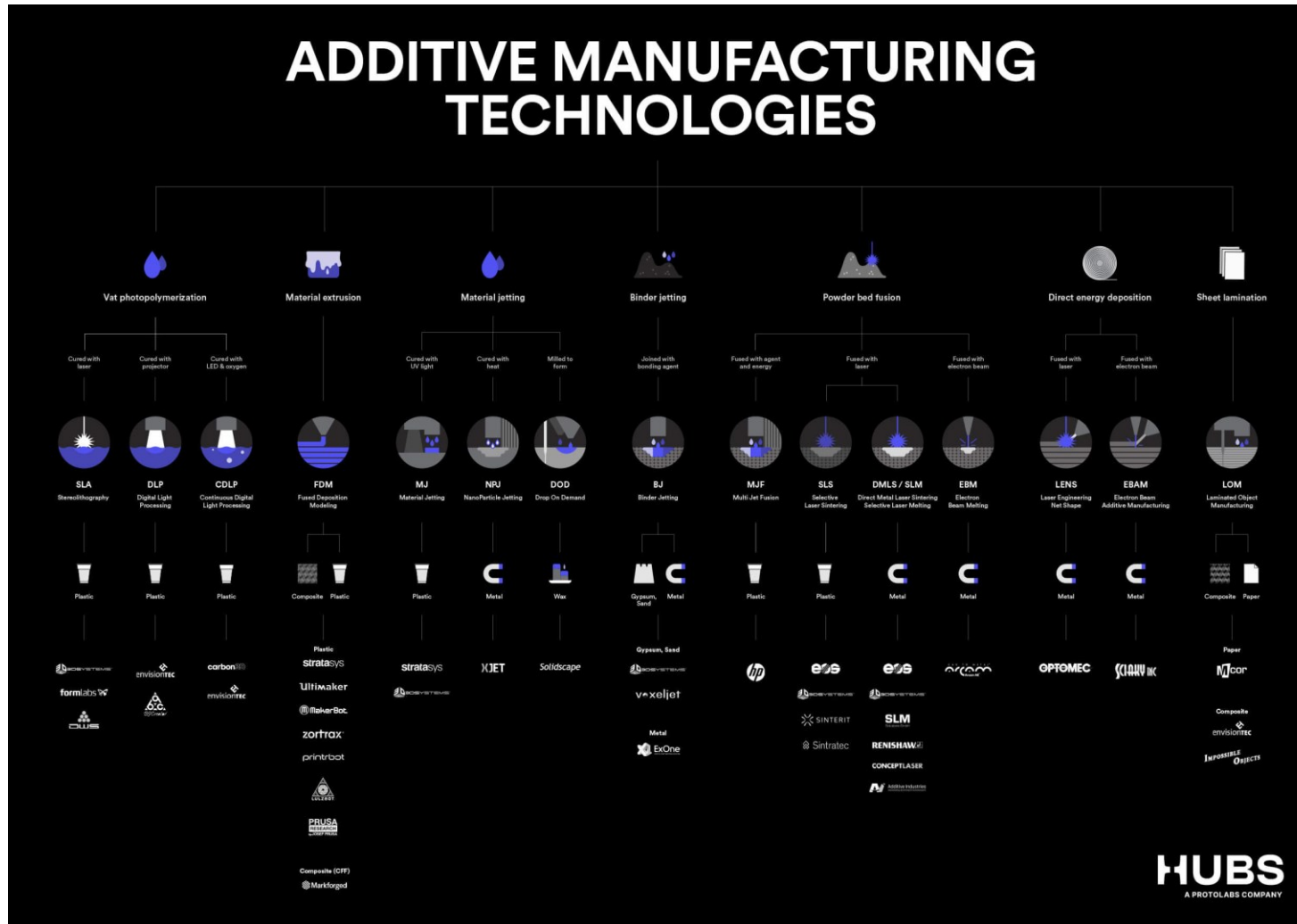
Liite 4. Hybridivalmistuksen lähestymistapojen valinta prosessikaaviona

Liite 5. Hybridivalmistuksen esisuunnittelun 3D-mallien hallinta prosessikaaviona

Liite 6. Hybridivalmistuksen tapauskohtaisen tarkastelun kulku prosessikaaviona

Liite 7. BÖHLER W300

Liite 1. Ainetta lisäävät valmistusteknologiat ja isoimmat laitevalmistajat



Ainetta lisäävät valmistusteknologiat ja isoimmat laitevalmistajat (Hubs, 2022)

Liite 2. Maraging steel (B)

LaserForm[®] Maraging Steel (B)

Maraging Steel fine-tuned for use with ProX[®] DMP 200 and ProX[®] DMP 300 metal printers producing industrial parts and tool inserts with a combination of high-strength and excellent hardness.

LaserForm Maraging Steel (B) is formulated and fine-tuned specifically for 3D Systems ProX DMP 200 and 300 metal 3D printers to deliver high part quality and consistent part properties. The print parameter database that 3D Systems provides together with the material has been extensively developed, tested and optimized in 3D Systems' part production facilities that hold the unique expertise of printing 500,000 challenging metal production parts in various materials year over year. For a 24/7 production operation 3D Systems' thorough Supplier Quality Management System guarantees consistent, monitored material quality for reliable process results.

Material Description

With properties like 1.2709, this steel is easily heat-treatable in a simple age-hardening process resulting in excellent hardness and strength. LaserForm Maraging Steel (B) has good wear resistance. In regards to post-processing, the material shows good weldability and machinability. LaserForm Maraging Steel (B) is ideal for innovative tool and mold designs including conformal cooling channels for injection molding, die casting and extrusion. The material is also used for high-performance aerospace, automotive and other industrial applications which require high strength and wear resistance.

Classification

The chemical composition of LaserForm Maraging Steel (B) with additional restrictions compared to the DIN 1.2709 standards is indicated in the table below in % of weight.

Mechanical Properties^{1,2}

MEASUREMENT	CONDITION	METRIC			U.S.		
		AS BUILT	AFTER STRESS RELIEF	AFTER AGEING	AS BUILT	AFTER STRESS RELIEF	AFTER AGEING
Youngs modulus (GPa ksi)	ASTM E8M						
Horizontal direction - XY Vertical direction - Z		160 ± 30 145 ± 30	160 ± 20 155 ± 20	185 ± 20 165 ± 20	23200 ± 4400 21000 ± 4400	23200 ± 2900 22500 ± 2900	26800 ± 2900 24000 ± 2900
Ultimate strength (MPa ksi)	ASTM E8M						
Horizontal direction - XY Vertical direction - Z		1180 ± 20 1050 ± 40	1130 ± 20 1100 ± 40	2190 ± 50 2140 ± 50	170 ± 3 150 ± 6	165 ± 3 160 ± 6	320 ± 7 310 ± 7
Yield strength Rp0.2% (MPa ksi)	ASTM E8M						
Horizontal direction - XY Vertical direction - Z		950 ± 60 780 ± 60	800 ± 50 790 ± 50	1870 ± 80 1750 ± 80	140 ± 9 115 ± 9	115 ± 7 115 ± 7	270 ± 12 255 ± 12
Elongation at break (%)	ASTM E8M						
Horizontal direction - XY Vertical direction - Z		13 ± 3 13 ± 3	13 ± 3 13 ± 3	3 ± 1.5 1.5 ± 0.5	13 ± 3 13 ± 3	13 ± 3 13 ± 3	3 ± 1.5 1.5 ± 0.5
Reduction of area (%)	ASTM E8M						
Horizontal direction - XY Vertical direction - Z		55 ± 5 60 ± 5	55 ± 10 50 ± 10	12 ± 5 7 ± 5	55 ± 5 60 ± 5	55 ± 10 50 ± 10	12 ± 5 7 ± 5
Hardness, Rockwell C	NF EN ISO 6508-1	36 ± 2	33 ± 2	55 ± 3	36 ± 2	33 ± 2	55 ± 3

Maraging-teräksen ominaisuudet (3D Systems, 2019)

LaserForm[®] Maraging Steel (B)

Thermal Properties¹

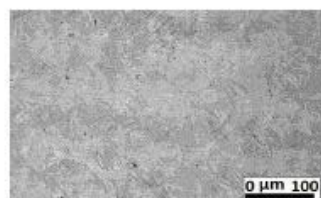
MEASUREMENT	CONDITION	METRIC	U.S.
Thermal conductivity (W/(m.K) Btu/(h.ft.°F))	at 20°C / 120 °F	20.9	12.1
CTE - Coefficient of thermal expansion (µm/(m.°C) µ inch/(inch . °F))	in the range of 20 to 600 °C	10	5.6
Melting range (°C °F)		1430 - 1450	2610 - 2640



Microstructure as built



Microstructure after stress relief



Microstructure after ageing

Electrical Properties¹

MEASUREMENT	METRIC	U.S.
Electrical resistivity (µΩ.m µΩ.in)	0.44	17.32

Physical Properties

MEASUREMENT	METRIC	U.S.
	AS BUILT, AFTER STRESS RELIEF AND AFTER AGEING	AS BUILT, AFTER STRESS RELIEF AND AFTER AGEING
Density		
Relative, based on pixel count ² (%)		>99,5
Absolute theoretical ¹ (g/cm ³ lb/in ³)	8.06	0.291

Chemical Composition

ELEMENT	% OF WEIGHT
Fe	Bal.
Ni	17.00-19.00
Co	9.00-11.00
Mo	4.00-6.00
Ti	0.90-1.10
Si	≤1.00
Mn	≤1.00
C	≤0.03

¹ Values based on literature

² Parts manufactured with standard parameters on a ProX DMP 200 and 300



www.3dsystems.com

Warranty/Disclaimer: The performance characteristics of these products may vary according to product application, operating conditions, or with end use. 3D Systems makes no warranties of any type, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability or fitness for a particular use.

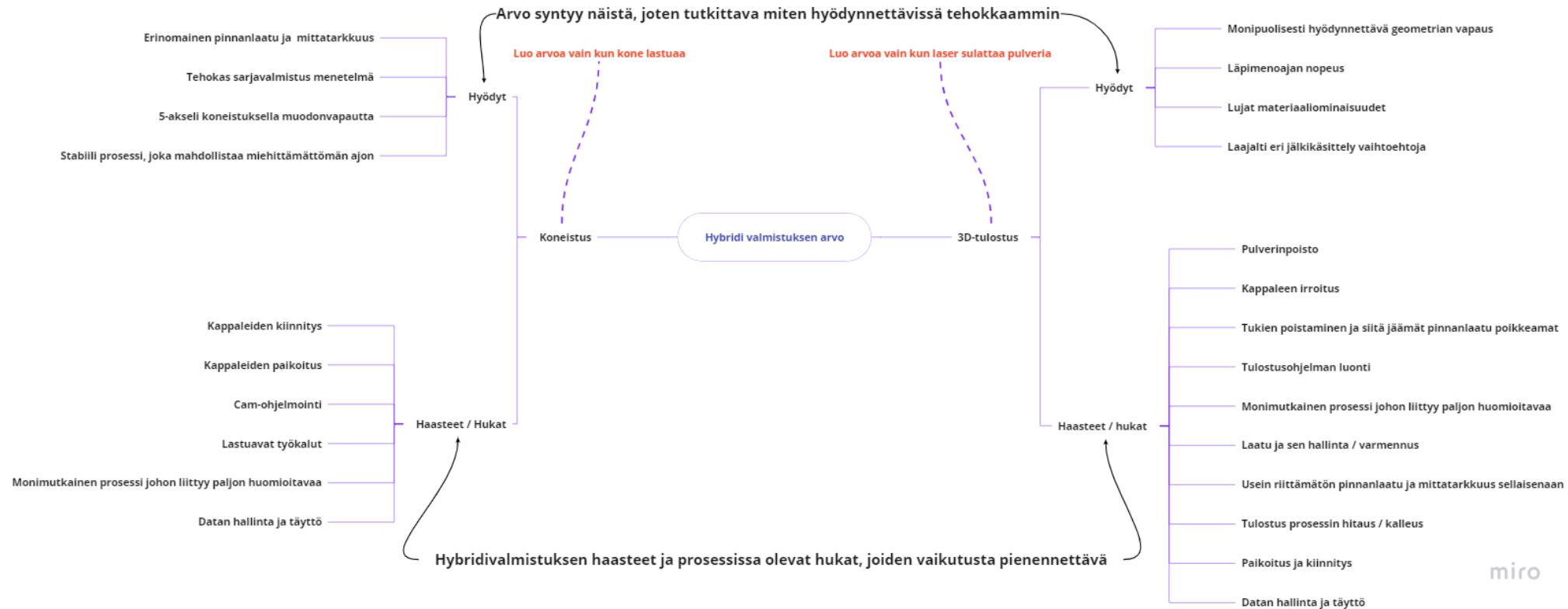
©2019 by 3D Systems, Inc. All rights reserved. Specifications subject to change without notice. 3D Systems, ProX and LaserForm are registered trademarks and the 3D Systems logo is a trademark of 3D Systems, Inc.

PN 10122A

03-15

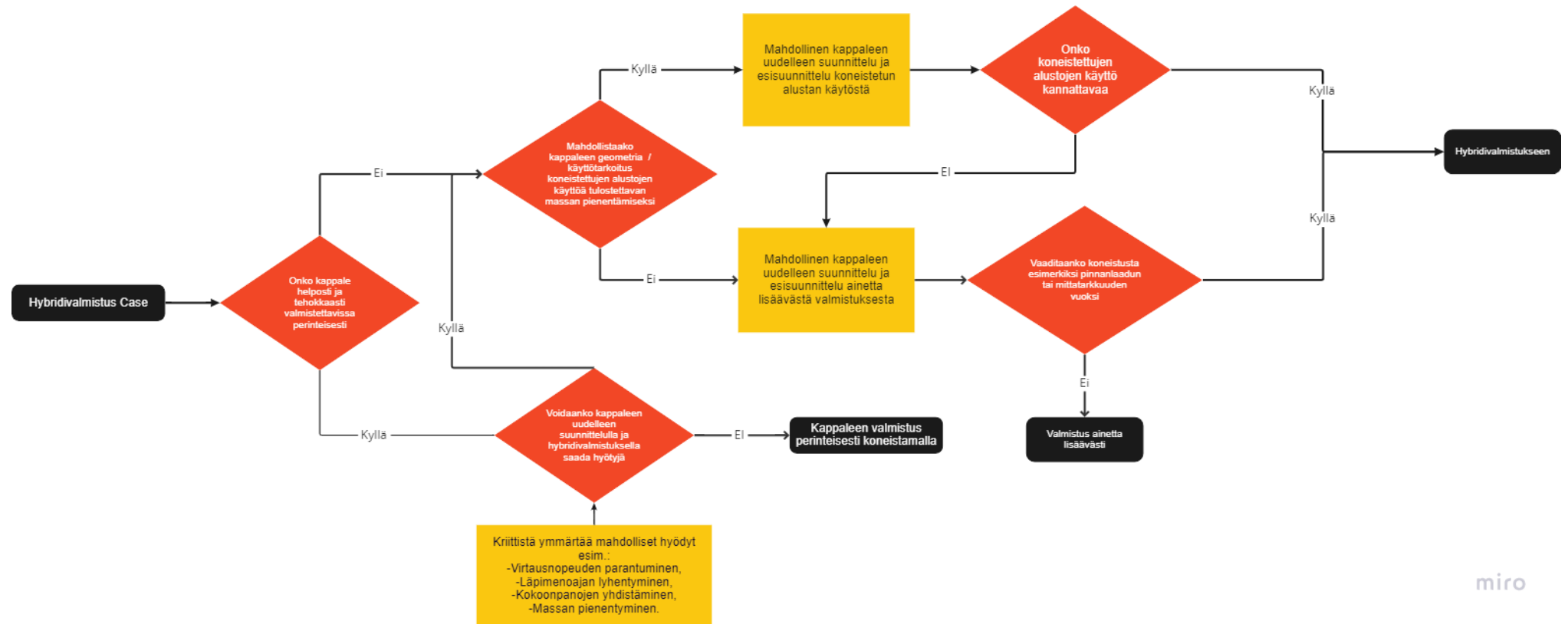
Maraging-teräksen ominaisuudet (3D Systems, 2019)

Liite 3. Hybridivalmistuksen tuoman arvon muodostuminen



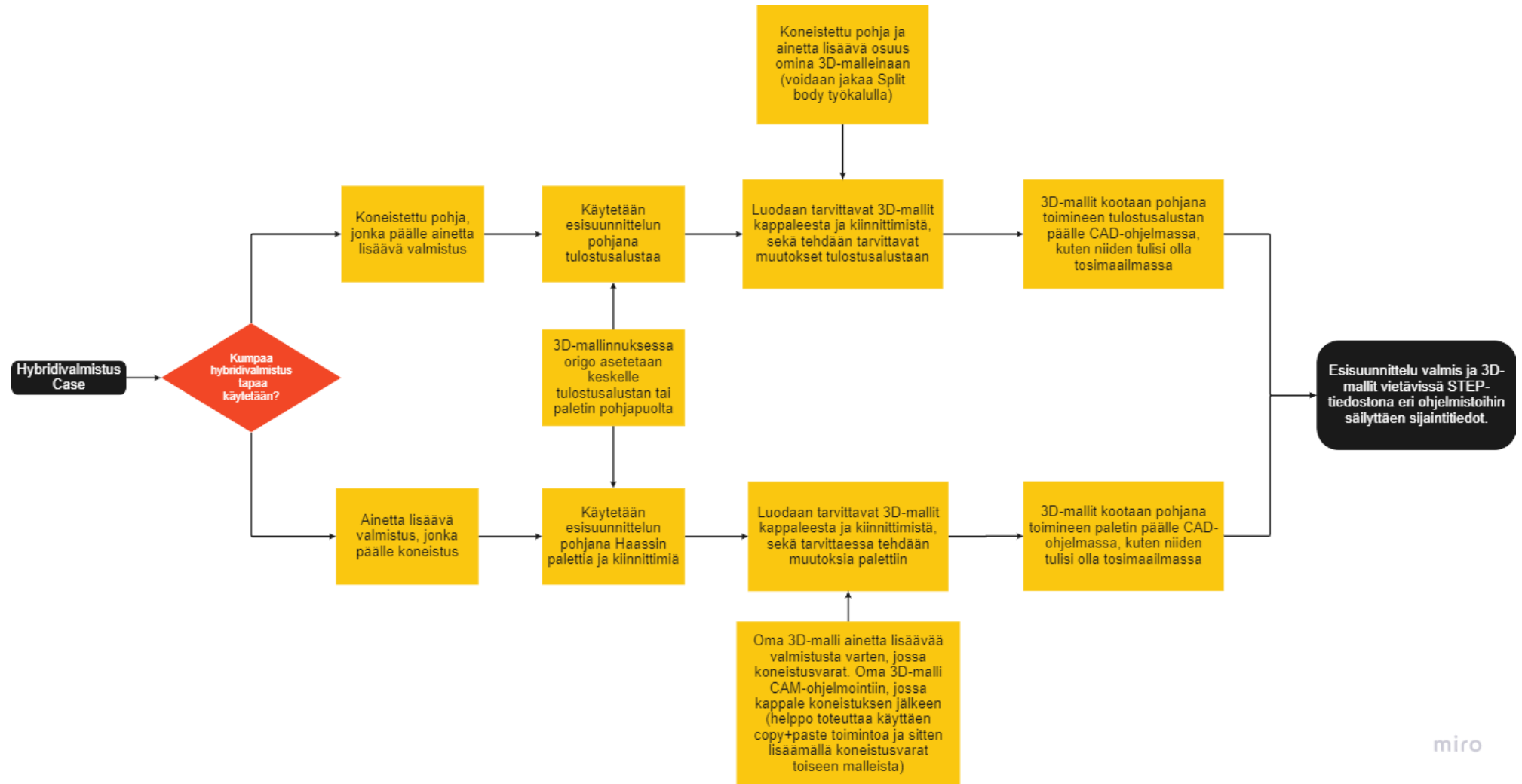
Mindmap hybridivalmistuksen arvonmuodostumisesta, sekä sen hyödyistä ja haasteista.

Liite 4. Hybridivalmistuksen lähestymistapojen valinta prosessikaaviona



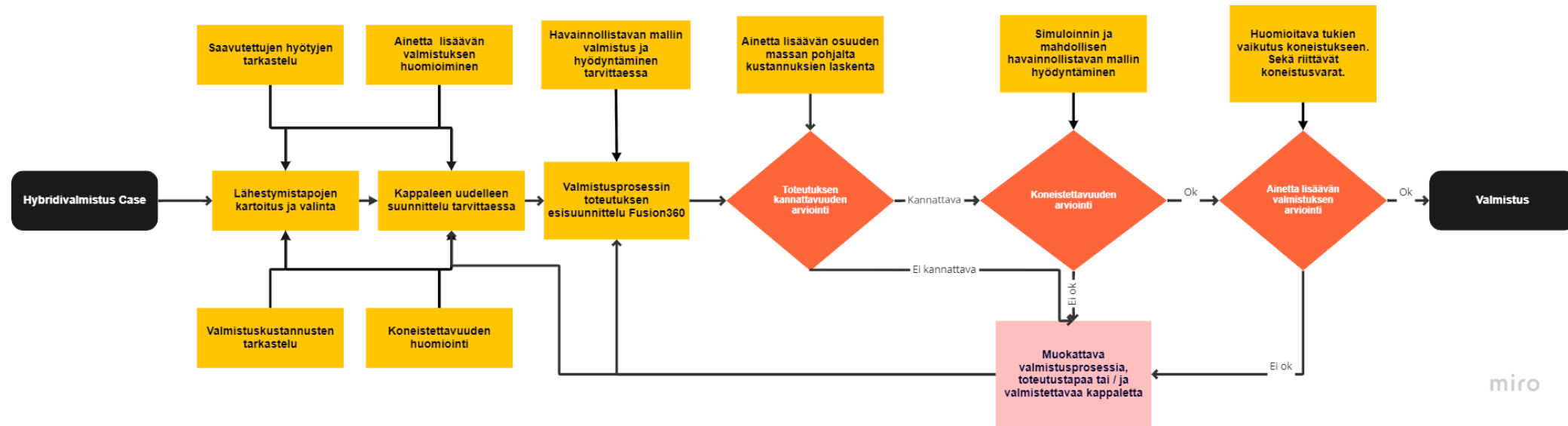
Hybridivalmistuksen lähestymistapojen valinta kuvattuna prosessikaaviona.

Liite 5. Hybridivalmistuksen esisuunnittelun 3D-mallien hallinta prosessikaaviona



Hybridivalmistuksen esisuunnittelun prosessikaavio 3D-mallien hallinnan näkökulmasta.

Liite 6. Hybridivalmistuksen tapauskohtaisen tarkastelun kulku prosessikaaviona



Hybridivalmistuksen tapauskohtaisen tarkastelun kulku prosessikaaviona.

Liite 7. BÖHLER W300



KUUMATYÖTERÄS

BÖHLER W300

BÖHLER W300 on kuumatyöteräs, jolla on hyvä iskutkeys ja kuumalujuus. Ilmaan karkeneva. Työkalut voidaan jäähdyttää vedellä. Soveltuu nitrattavaksi.

KEMIALLINEN KOOSTUMUS

Taulukko 1. BÖHLER W300 kemiallinen koostumus ja vastaavat normit.

Kemiallinen koostumus					
(keskim. paino-%)					
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,38	1,10	0,40	5,00	1,30	0,40
Vastaavat normit					
W.Nr/DIN	ISO/EN	AISI			
1.2343	X37CrMoV5-1	H11			
X38CrMoV5-1					

KÄYTTÖ

Kuumatyökalut kevytmetallien työstöön. Pursotustyökalut, tuurnat ja matriisit. Työkalut ruuvien, pulttien ja niittien valmistukseen. Painevalutyökalut, insertit, kuumamuovaustyökalut, kuumaleikkausterät ja muovimuotit.

LÄMPÖKÄSITTELY

Pehmeäksihehkus

750 – 800 °C / hidas uunijäähdytys 10 – 20 °C/h noin 600 °C asti, jonka jälkeen loppujäähdytys ilmassa. Kovuus pehmeäksihehkutettuna max 205 HB.

Jännitystenpoistohehkus

600 – 650 °C / hidas uunijäähdytys. Lämpökäsittelyn jälkeen pito 1 – 2 tuntia täydessä lämmössä neutraalissa atmosfäärissä.

Karkaisu

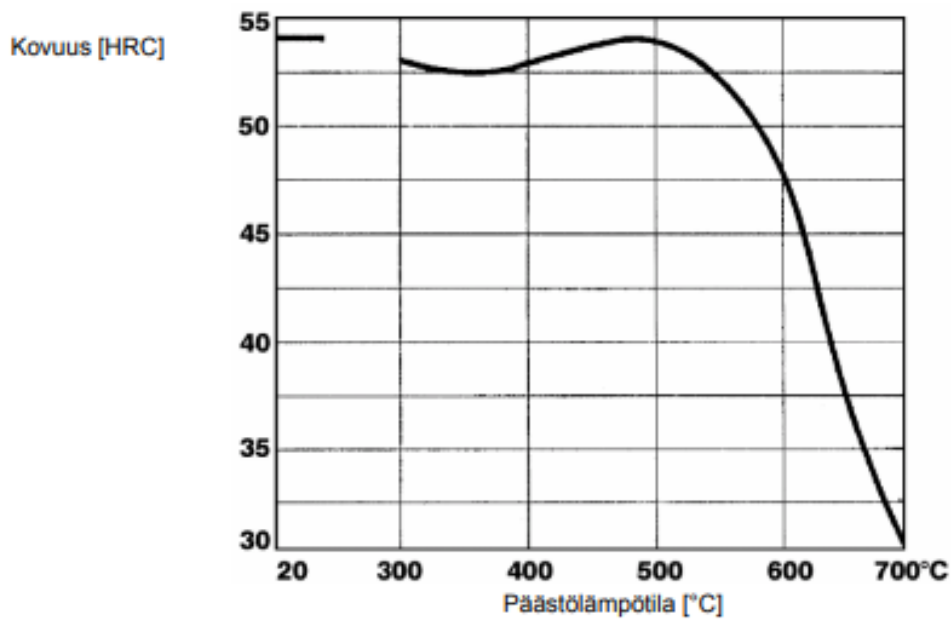
1000 – 1040 °C / öljy, ilma tai lämpökylpy 500 – 550 °C. Lämpökäsittelyn jälkeen pito 15 – 30 min. Saavutettava kovuus 52 – 56 HRC öljy- tai suolakylpykarkaisulla, 50 – 54 HRC ilmakarkaisulla.

BÖHLER W300 kuumatyöteräksen ominaisuudet (Stén & Co Oy Ab).

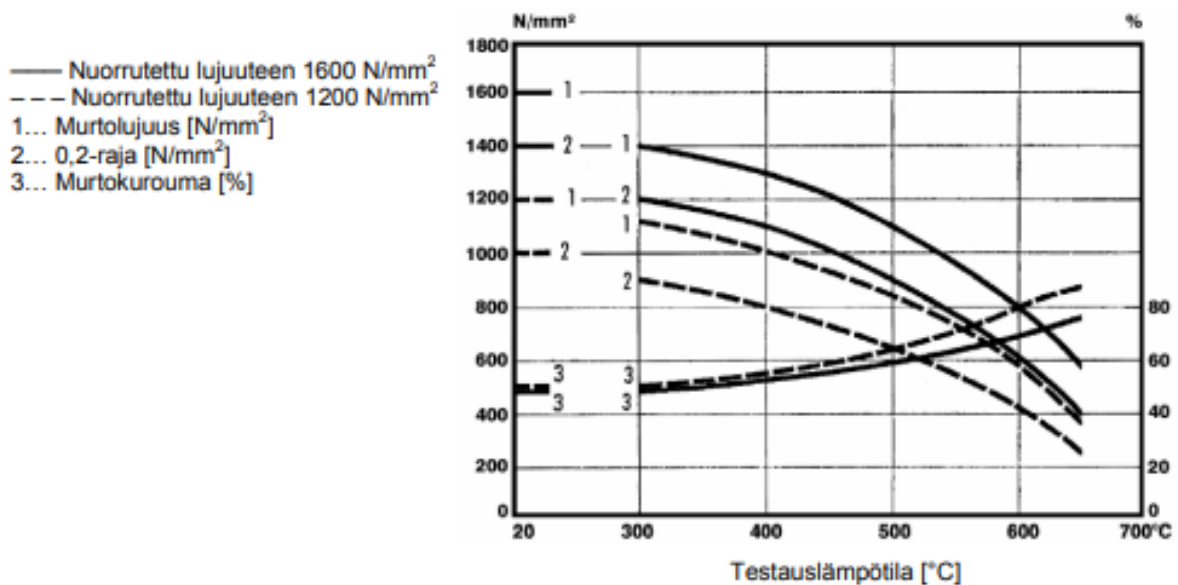


Päästö

1. Suurimpaan kovuuteen n. 500 °C.
 2. Työkovuuteen (katso päästökäyrä).
 3. Viimeinen päästö 30 – 50 °C alle kohdan 2. lämpötilan.
- Hidas kuumennus päästölämpötilaan ja pito 1 h / 20 mm, kuitenkin vähintään 2h, jäähditys ilmassa. Katso kovuudet päästökäyrästä.



KUUMALUJUUS



BÖHLER W300 kuumatyöteräksen ominaisuudet (Stén & Co Oy Ab).



FYSIKAALISET OMINAISUUDET

Taulukko 2. Fysikaalisia ominaisuuksia.

Tiheys:	20 °C.....	7,80.....	kg/dm ³
	500 °C.....	7,64.....	kg/dm ³
	600 °C.....	7,60.....	kg/dm ³
Ominaislämpökapasiteetti:	20 °C.....	460.....	J/kgK
	500 °C.....	550.....	J/kgK
	600 °C.....	590.....	J/kgK
Sähkönjohtavuus:	20 °C.....	0,52.....	Ωmm ² /m
	500 °C.....	0,86.....	Ωmm ² /m
	600 °C.....	0,96.....	Ωmm ² /m
Kimmomoduli:	20 °C.....	215 x 10 ³	N/mm ²
	500 °C.....	176 x 10 ³	N/mm ²
	600 °C.....	165 x 10 ³	N/mm ²

Taulukko 3. Lämpölaajeneminen.

	Lämpötila [°C]	10 ⁻⁶ m/mK
Lämpölaajeneminen 20 °C... °C, 10 ⁻⁶ m/mK	100	11,5
	200	12,0
	300	12,2
	400	12,5
	500	12,9
	600	13,0
	700	13,2

Taulukko 4. Lämmönjohtavuus nuorutettuna.

	Lämpötila [°C]	[W/(mK)]
Lämmönjohtavuus [W/(mK)]	100	26,0
	200	27,7
	300	28,9
	400	29,5
	500	29,5
	600	29,1
	700	29,2

S-käyrät ja koneistusarvosuositukset ovat saatavilla pyydettäessä.

Stén & Co Oy Ab	Puhelin	Faksi	Sähköposti	Kotisivu	Kotipaikka Nurmijärvi
Iivesvuorenkatu 4	0207 434 610	0207 434 629	myynti@sten.fi	www.sten.fi	Y-tunnus 0114140-3
01900 Nurmijärvi					

BÖHLER W300 kuumatyöteräksen ominaisuudet (Stén & Co Oy Ab).