

Opinnäytetyö (YAMK)

Kemiantekniikka ja bioteknologia

2021

Mervi Hokkanen

# MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN SOVELLUKSET JA TEKNOLOGINEN KYPSYYS

– Puolustusvoimien ja puolustusteollisuuden  
näkökulmasta

OPINNÄYTETYÖ (YAMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Kemiantekniikka ja bioteknologia

2021 | 143 sivua, 6 liitesivua

Ohjaaja: Liisa Lehtinen, Turku AMK

Mervi Hokkanen

# MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN SOVELLUKSET JA TEKNOLOGINEN KYPSYYS

- Puolustusvoimien ja puolustusteollisuuden näkökulmasta

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä katsaus materiaalia lisäävän valmistuksen sovelluksiin, teknologiseen kypsytyteen sekä tulevaisuuden näkyisiin puolustuksen ja puolustusteollisuuden näkökulmasta. Erityisesti tarkasteltiin varaosien valmistukseen, lääkintähuoltoon ja energeettisten materiaalien valmistukseen liittyviä sovelluksia.

Euroopan Unionissa materiaalia lisäävän valmistuksen katsotaan olevan yksi merkittävimmistä teollisuutta muuttavista tekijöistä. Suomessa lisäävä valmistus on noussut eduskunnan tulevaisuusvaliokunnan laatimalle sadan yhteiskunnan toimintamalleja radikaalisti uudistavan teknologian listalle.

Materiaalia lisäävää valmistusta käytetään nykyisin niin ideoiden mallintamiseen, prototyyppien ja työkalujen valmistukseen kuin lopputuotteiden tuottamiseen. Sekä siviili- että puolustussektorin lisäävän valmistuksen sovelluksissa korostuvat teknologian eduista erityisesti mahdollisuus personoida, keventää ja optimoida tuotteita sekä kyky tuottaa rakenteita, joita perinteisillä valmistusmenetelmillä on joko hankala tai mahdoton tehdä. Tärkeänä pidetään myös mahdollisuutta vähentää tavaravarastoja ja lyhentää logistiikkaketjuja, varastoimalla tuotteet digitaalisessa muodossa ja valmistamalla ne 3D-tulostamalla tarvittaessa, lähellä käyttökohdetta.

Erityisesti puolustussektorilla nähdään tärkeänä kyky valmistaa varaosia järjestelmiin, joihin niitä ei joko ole enää saatavilla tai niiden hankinta on hidasta ja kallista. Toimintakyvyn nopeaa palautumista tukee mahdollisuus tuottaa varaosia tai tehdä korjauksia osana kenttähuoltoa.

Lääkintähuollossa 3D-tulostuksesta arvioidaan olevan hyötyä toimittaessa logistisesti hankalassa kohteessa ja sotilaiden ensihoitoon liittyvissä tarpeissa. Energeettisten materiaalien lisäävä valmistuksen tutkimusta tehdään monissa maissa.

Lisäävän valmistuksen tekniikat ovat monilla aloilla maailmalla jo teknologisesti kypsiä ja teollisia standardeja, vaikka teknologia on vielä nopean kehityksen ja muutoksen alla. Suomessa olemme jäljessä maailman kärjestä, mutta ala on selkeässä nousussa.

ASIASANAT:

Lisäävä valmistus, 3D-tulostus, puolustusvoimat, teknologinen kypsyys

MASTER'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Master's Degree Programme in Chemical Engineering and Biotechnology

2021 | 143 pages, 6 pages in appendices

Supervisor: Liisa Lehtinen, TUAS

Mervi Hokkanen

# APPLICATIONS AND TECHNOLOGICAL MATURITY OF ADDITIVE MANUFACTURING

- From the perspective of defence forces and defence industry

The aim of the present Masters' thesis is to review the applications, technological maturity, and future prospects of additive manufacturing from the defence and defence industries perspective. The focus is specifically on applications related to the manufacture of spare parts, field medical care and the manufacture of energetic materials.

In the European Union, additive manufacturing is considered one of the most important factors that change the industry. In Finland, the Parliamentary committee for the Future has placed additive manufacturing on the list of 100 technologies that radically reform the operation models of the society.

Additive manufacturing is currently used both to model ideas, manufacture prototypes and tools and to produce final products. In both civil and defence sectors, the advantages of technology emphasised in the additive manufacturing applications are, in particular, the ability to personalize, lighten, optimize, and produce complex structures that are either difficult or impossible to manufacture with traditional methods. The possibility of reducing inventories and shortening logistics chains by storing products in a digital form and manufacturing them with 3D printing on-demand close to the place of use is also considered important.

Especially in the defence sector, the ability to manufacture spare parts for systems for which spares are either no longer available or their procurement process is very slow and expensive is important. The rapid recovery of operational capability is supported by the possibility of producing spare parts or making repairs as part of field maintenance.

In the field of medical care, 3D printing is estimated to be useful in remote areas far from supply lines and in emergency medical care for soldiers. Research in 3D printing of energetic materials is carried out in many countries.

Additive manufacturing is already technologically mature and industrially standardised in many fields although the technology is still under rapid development and change. The Finnish industry in this field lags behind the world leaders, but the sector is on a clear rise.

KEYWORDS:

Additive manufacturing, 3D-printing, military, technology readiness

# SISÄLTÖ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>KÄYTETYT LYHENTEET</b>  | <b>9</b>  |
| <b>1 JOHDANTO</b>  | <b>13</b> |
| 1.1 Taustaa  | 13        |
| 1.2 Tutkimuksen tavoite ja rajaukset   | 15        |
| <b>2 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN MENETELMÄT</b>                                | <b>18</b> |
| 2.1 Sideaineen suihkutuspaine  | 18        |
| 2.2 Suorakerrostus   | 20        |
| 2.3 Materiaalin pursotus   | 23        |
| 2.4 Materiaalin suihkutuspaine   | 26        |
| 2.5 Jauhepetisulatus   | 27        |
| 2.6 Kerroslaminointi   | 30        |
| 2.7 Valokovetus altaassa   | 31        |
| <b>3 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN HYÖDYT</b>                                    | <b>33</b> |
| <b>4 MALLIKAPPALEESTA 3D-TULOSTEESI</b>  | <b>36</b> |
| 4.1 Suunnitteluvaihe   | 36        |
| 4.2 Valmistusvaihe   | 37        |
| 4.3 Jälkikäsittely   | 38        |
| <b>5 TEKNOLOGIAN KYPSYYDEN ARVIOINTI</b>   | <b>41</b> |
| <b>6 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN SOVELLUTUKSET JA KÄYTTÖ SIVIILISEKTORILLA</b> | <b>44</b> |
| 6.1 Materiaalia lisäävän valmistuksen sovellukset                                    | 47        |
| 6.2 Materiaalia lisäävä valmistus Suomessa   | 61        |
| 6.3 Materiaalia lisäävään valmistuksen käyttö Euroopassa                             | 74        |
| 6.4 Materiaalia lisäävän valmistuksen käyttö muualla maailmassa                      | 83        |
| <b>7 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN KEHITYSNÄKYMÄT SIVIILISEKTORILLA</b>          | <b>91</b> |
| 7.1 Gartnerin hypekäyrä  | 91        |
| 7.2 Ernst & Young kyselytutkimus   | 94        |

|   |            |
|---|------------|
| 7.3 Tulevaisuuden kehitystrendejä   | 95         |
| 7.4 3D-tulostuksen tila vuonna 2030   | 96         |
| 7.5 Suomen sata uutta mahdollisuutta  | 98         |
| <b>8 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS PUOLUSTUSSEKTORILLA</b>                        | <b>100</b> |
| 8.1 Pohjoismaat ja Eurooppa   | 102        |
| 8.2 Venäjä  | 112        |
| 8.3 USA   | 113        |
| 8.4 Kiina   | 120        |
| 8.5 Australia   | 121        |
| <b>9 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN KEHITYSNÄKYMÄT<br/>PUOLUSTUSSEKTORILLA</b> | <b>122</b> |
| <b>10 YHTEENVETO</b>  | <b>126</b> |
| <b>11 LOPUKSI</b>   | <b>131</b> |
| <b>LÄHTEET</b>  | <b>132</b> |

## LIITTEET

- Liite 1. Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät.  
 Liite 2. NASA:n ja DOD:n sekä EU:n määritelmät teknologian kypsyystasolle (TRL).  
 Liite 3. Hollannin armeijan infograafi 3D-tulostuksen tiekartasta.  
 Liite 4. BAE Systemsin infograafi tulevaisuuden sotilaslentokonetehtaasta.

## KUVAT

|  |    |
|--|----|
| Kuva 1. Sideaineen syöttö InkJet tulostinpäistä.   | 19 |
| Kuva 2. Sideainesuihkutuksella valmistettu hiekkavalumuotti moottorinlohkon valmistukseen vasemmalla ja metallinen pienoispatsas oikealla.       | 20 |
| Kuva 3. Vasemmalla Norsk Titaniumin RPD-tekniikalla valmistama kappale tulostuksen jälkeen ja oikealla siitä koneistamalla viimeistelty kappale. | 22 |
| Kuva 4. Hybridilaitte, jossa on yhdistettynä suorakerrostus ja CNC-koneistuskeskus.  | 23 |
| Kuva 5. Ylhäällä BAAM laite ja alhaalla hiilikuitukomposiitista BAAM laitetta käyttäen valmistettu sukellusveneen runko.                         | 25 |

|   |     |
|---|-----|
| Kuva 6. Vasemmalla täysväritulostuksena tehty lääketieteen koulutusmalli ja oikealla monimateriaaliprototyyppi, jossa on jäykkää, läpinäkymätöntä (valkoinen) ja joustavaa (musta) polymeeriä yhdistettynä.                               | 27  |
| Kuva 7. Vasemmalla HP:n MJF:llä tehty lapsen sydämen malli ja oikealla EOS:n DMLS-tekniikalla titaanista tehty huokoinen implantti.   | 29  |
| Kuva 8. Fabrisonicin UAM-tekniikalla valmistamia tuotteita; vasemmalla lämmönvaihdin ja oikealla kannakkeeseen upotetut venymäanturit.  | 31  |
| Kuva 9. Vasemmalla Nanosciben 2-fotoni polymerisaatiolla valmistettu skaffoldi eli tukirakenne (7,5 x 7,5 x 3,5 mm) ja oikealla kappaleen valmistusta valokovetus altaassa tekniikalla.   | 32  |
| Kuva 10. Moottorin kotelon toiminnallinen prototyyppi.  | 47  |
| Kuva 11. Hammasimplantin porausohjain vasemmalla ja muottityökalu sisäisillä jäähdytyskanavilla oikealla.   | 48  |
| Kuva 12. Betonista 3D-tulostamalla valmistettu tulvamuuri vasemmalla ja oikealla meluvalli.   | 49  |
| Kuva 13. Biokomposiitista 3D-tulostamalla valmistettu kajakki, silta ja olohuoneen pöytä.   | 50  |
| Kuva 14. Lisäävällä valmistusteknologialla valmistettuja selkärangan implantteja vasemmalla ja lonkkamaljan kuppi oikealla.   | 52  |
| Kuva 15. 3D-tulostamalla valmistettuja jalan, ylävartalon ja käden tukilaitteita sekä punaiseksi värjätty jalkaproteesi.  | 53  |
| Kuva 16. 3D-tulostettuja kuulolaitteiden osia sekä valmiita kuulolaitteita.   | 53  |
| Kuva 17. Tarvittaessa 3D-tulostettuja hengityslaitteen venttiilejä.   | 54  |
| Kuva 18. 3D-tulostettuja hammaskruunuja ja -siltoja tulostusalustalla vasemmalla ja titaaninen leukaluun osa oikealla.  | 55  |
| Kuva 19. Finnairin A320 koneen matkatavarahyllyn välisosapaneeli ylhäällä ja alhaalla Airbusin A350 XWB koneen lukon osia; vasemmalla prototyyppi vaiheessa jauhepetitulostimessa 3D-tulostuksen jälkeen ja oikealla valmiina kappaleina. | 57  |
| Kuva 20. LEAP-moottorin polttoainesuutin ja Boeing-lentokoneen ilmanvaihtojärjestelmän kanaviston osia.   | 57  |
| Kuva 21. 3D-tulostamalla valmistettuja ajoneuvon osia; jarrusatula, luottokorttikotelo, koristelista autonovessa ja räätälöity kojelautapaneeli.  | 58  |
| Kuva 22. 3D-tulostamalla valmistettu sähköauto vasemmalla ja urheiluauto oikealla.  | 59  |
| Kuva 23. AMOS-17 tietoliikennesatelliittiin asennettu 3D-tulostettu antenni.  | 60  |
| Kuva 24. Metallista 3D-tulostettu kappale, jonka sisään on integroitu elektroniikkaa.   | 72  |
| Kuva 25. Hiilikuidusta pursotustekniikalla valmistettu nostotyökalu.  | 73  |
| Kuva 26. Betonin 3D-tulostusta ja tulostamalla valmistettuja betonipilareita.   | 74  |
| Kuva 27. 3D-tulostettuja kaasuturbiinin polttimia, vasemmalla käyttämätön ja oikealla vuoden käytössä ollut poltin.   | 78  |
| Kuva 28. 3D-tulostamalla valmistetut käsinojat ja tartuntakahvat.   | 79  |
| Kuva 29. Snorklausmaskista 3D-tulostusta apuna käyttäen valmistettu ylipainehengitysmaski.  | 81  |
| Kuva 30. 3D-tulostetun pelastusveneeseen moottorin polttoainesuutin ja sen kuljetukseen käytetty drone.   | 82  |
| Kuva 31. Fieldmade NOMAD®01 liikuteltava 3D-tulostusyksikkö.  | 82  |
| Kuva 32. Organ.Aut biotulostin, joka on suunniteltu biologisen materiaalin tulostamiseen painottomissa olosuhteissa.  | 85  |
| Kuva 33. Rakettimoottorin suutin.   | 88  |
| Kuva 34. 3D-biotulostusyksikkö kansainvälisellä avaruusasemalla.  | 88  |
| Kuva 35. 3D-tulostusyksikkö NOMAD Cold Responce 2016-harjoituksessa (yläkuvat) ja NOMAD02 Trindent Juncture 2018-harjoituksessa (aläkuvat).   | 103 |
| Kuva 36. 3D-tulostamalla valmistettu AK5C rynnäkkökiväärin männänohjain, vasaran akseli ja patruunan ohjain.  | 104 |

|  |     |
|--|-----|
| Kuva 37. Ajoneuvon oveen kiinnitettävä kiväärin kannake.   | 105 |
| Kuva 38. TNO:n 3D-tulostamalla valmistettuja energettisiä materiaaleja.  | 108 |
| Kuva 39. EDAn 3D-tulostuskontin lastaus kuljetuslentokoneeseen ja sisäkuva kontista.   | 111 |
| Kuva 40. USA:n maavoimien liikutettava 3D-tulostusyksikkö, R-FAB.  | 115 |
| Kuva 41. AH-64D Apache helikopterin roottorin lapojen irrotuksessa ja asennuksessa käytettävä 3D-tulostamalla valmistettu apuväline. | 115 |
| Kuva 42. Perinteisesti valmistettu ja 3D-tulostamalla valmistettu MH-60R helikopterin sonar-järjestelmän kansi.                      | 116 |
| Kuva 43. C-17 Globemaster III sotilaskuljetuskoneen 3D-tulostettu jäähdytyskanava.   | 117 |
| Kuva 44. Helikopterikypärän visiirin 3D-tulostettu kiinnike.   | 118 |
| Kuva 45. 3D-biotulostettu haavaside.   | 119 |
| Kuva 46. Bunkkerin rakentaminen betonista 3D-tulostamalla.   | 120 |
| Kuva 47. Australian maavoimien WarpSPEE3D-tulostin sekä 3D-tulostetut ja koneistamalla viimeistellyt räikkä ja kannake.              | 121 |

## KUVIOT

|  |     |
|--|-----|
| Kuvio 1. Sideaineen suihkutuksen menetelmän toimintaperiaate.  | 19  |
| Kuvio 2. Suorakerrostusmenetelmän toimintaperiaatekuva.  | 21  |
| Kuvio 3. Materiaalin pursotuksen toimintaperiaate.   | 24  |
| Kuvio 4. Materiaalin suihkutuksen toimintaperiaate.  | 26  |
| Kuvio 5. Jauhepetisulatusmenetelmän toimintaperiaate.  | 28  |
| Kuvio 6. Kerroslaminoinnin toimintaperiaate.   | 30  |
| Kuvio 7. Valokovetus altaassa menetelmän (laskeva tulostusalusta) toimintaperiaate.  | 31  |
| Kuvio 8. Suurimmat AM-tekniikan käyttöön otosta saatavat hyödyt yritykselle.   | 34  |
| Kuvio 9. Materiaalia lisäävän valmistuksen prosessi.   | 39  |
| Kuvio 10. Metallikappaleen valmistus jauhepetisulatusmenetelmällä.   | 40  |
| Kuvio 11. Tekniikan hankinta- ja toimitusvalmiustasojen kuvaus.  | 43  |
| Kuvio 12. Lisäävän valmistuksen kysynnän mukaisen palvelutarjonnan jakautuminen eri aloille.   | 44  |
| Kuvio 13. Lisäävän valmistuksen sovelluskohteet.   | 45  |
| Kuvio 14. Teollisten lisäävän valmistuksen laitteiden jakauma maittain.  | 46  |
| Kuvio 15. 3D-elektronikkatekniikoiden sovellusten tilanne konseptista kaupallistamiseen kehityksellä.                                    | 60  |
| Kuvio 16. Metallien 3D-tulostuslaitteistojen sijainnit.  | 65  |
| Kuvio 17. Lisäävän valmistuksen laatupyramidi, jossa suomalaisten metalli 3D-tulostuspalvelu yritysten laatu sijoittuu tasoille 1–2.     | 69  |
| Kuvio 18. DIVA-projektissa luotu digitaalisten varaosien tiekartta.  | 71  |
| Kuvio 19. Modulaarinen, konttipohjainen lisäävän valmistuksen mobiilitehdas.   | 76  |
| Kuvio 20. Gartnerin 3D-tulostuksen hypekäyrä ennuste vuodelle 2019.  | 92  |
| Kuvio 21. AM-tekniikan käyttö lopputuotteiden valmistukseen.   | 95  |
| Kuvio 22. Raaka-aine- ja laitekustannusten sekä tulostusnopeuden vaikutus tulostettavan kappaleen tuotantokustannuksiin tulevaisuudessa. | 96  |
| Kuvio 23. Lisäävä valmistus sotilaallisissa ja humanitaarisissa operaatioissa.   | 107 |
| Kuvio 24. Toiminnalliset yksiköt ja niiden linkit asiantuntijaan.  | 109 |

## TAULUKOT

|  |     |
|--|-----|
| Taulukko 1. Sideaineen suihkutuksen yleiset ominaisuudet.                                    | 20  |
| Taulukko 2. Materiaalin pursotuksen tyypilliset ominaisuudet.                                | 24  |
| Taulukko 3. Materiaalin suihkutuksen tyypilliset ominaisuudet.                               | 26  |
| Taulukko 4. NASA:n ja DOD:n sekä EU:n määritelmät teknologian kypsyystasoille (TRL).         | 42  |
| Taulukko 5. Metallien 3D-tulostuslaitteet Suomessa.  | 64  |
| Taulukko 6. Suomalaisia eri materiaalien 3D-tulostuspalveluja tarjoavia yrityksiä.           | 66  |
| Taulukko 7. Esimerkki kappaleiden metalli 3D-tulostusajat ja vuotuinen tuotantokapasiteetti. | 67  |
| Taulukko 8. Maailmaa radikaalisti muuttuvat lisäävän valmistuksen teknologiakorit.           | 99  |
| Taulukko 9. Lisäävän valmistuksen sotilaalliset sovellukset.                                 | 101 |
| Taulukko 10. Varaosan valmistusprosessin osaamisvaatimukset.                                 | 109 |



## KÄYTETYT LYHENTEET

| Lyhenne | Lyhenteen selitys   |
|---------|---|
| AF      | Additive Fabrication. lisäävän valmistuksen vanha termi   |
| AM      | Additive Manufacturing, materiaalia lisäävä valmistus   |
| AMCE    | Additive Manufacturing Center of Excellence, Lisäävän valmistuksen osaamiskeskus, jonka perustamista Suomeen on suunniteltu                   |
| AMEXCI  | Additive Manufacturing Excellence Center for Industry, Ruotsin lisäävän valmistuksen osaamiskeskus teollisuudelle                             |
| AMF     | Additive Manufacturing File, materiaalia lisäävän valmistuksen tiedostoformaatti  |
| ANSI    | American National Standards Institute, Amerikan kansallinen standardointiorganisaatio   |
| BAAM    | Big Area Additive Manufacturing, materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä, jolla voidaan valmistaa erittäin suuria kappaleita                   |
| BIS     | U.S. Bureau of Industry and Security, USA:n Teollisuus ja Turvallisuusvirasto   |
| CAD     | Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu  |
| CAE     | Computer Aided Engineering, tietokoneavusteinen tekniikka, suunniteltujen rakenteiden lujuuksien ja toimivuuden analysointiin ja simulointiin |
| CNC     | Computer Numerical Control, työstökoneen numeerinen ohjaus  |
| DARPA   | Defense Advanced Research Project Agency, USA:n asevoimien tutkimusorganisaatio   |
| DED     | Direct Energy Deposition, suorakerrostusmenetelmä   |
| DIVA    | Digitaaliset varaosat -projektin nimilyhenne  |
| DfAM    | Design for Additive Manufacturing, lisäävän valmistuksen suunnittelu  |
| DLP     | Digital Light Processing, digitaalinen valonkäsittely   |
| DMD     | Direct Metal Deposition, suorakerrostukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia  |
| DMLS    | Direct Metal Laser Sintering, jauhepetisulatukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia   |

|      |  |
|------|--|
| DMP  | Direct Metal Printing, jauhepetisulatukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia   |
| DOD  | Department of Defence, puolustusministeriö   |
| EAKR | Euroopan Aluekehitysrachasto   |
| EBAM | Electron Beam Additive Manufacturing, suorakerrostukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia  |
| EBM  | Electron Beam Melting, elektronisuihkusulatus, jauhepetisulatukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia   |
| ECS  | Environmental Control System, ilmanvaihtojärjestelmä   |
| EDA  | European Defence Agency, Euroopan puolustusvirasto   |
| ESA  | European Space Agency, Euroopan avaruusjärjestö  |
| EU   | Euroopan unioni  |
| EY   | Ernst & Young Global Limited, on Yhdistyneen kuningaskunnan lakien mukainen yhtiö (company limited by guarantee)   |
| FAME | Finnish Additive Manufacturing Ecosystem, suomalainen 3D-tulostuksen ekosysteemi   |
| FDA  | Food and Drug Administration, Yhdysvaltain elintarvike- ja lääkevirasto  |
| FDM  | Fused Deposition Modeling, ensimmäinen materiaalin pursotukseen perustuva lisäävä valmistuksen teknologia  |
| FFF  | Fused Filament Fabrication, materiaalin pursotukseen perustuva lisäävän valmistuksen menetelmä   |
| FFI  | Forsvarets Forskninginstitut, Norjan puolustustutkimuslaitos   |
| FPI  | Фонд перспективных исследований, Russian Foundation for Advanced Research Projects, Venäjän puolustustutkimuslaitos uusien kehittyneiden teknologioiden tutkimukseen |
| HIP  | Hot Isostatic Pressing, kuuma isostaattinen puristus on lämpökäsittely, jossa käytetään korkeaa painetta materiaalien ominaisuuksien parantamiseksi                  |
| HSS  | High Speed Sintering, jauhepetisulatukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia  |
| IGES | Initial Graphics Exchange Specification, neutraali CAD-tiedonsiirtoformaatti tuotteen geometrian ja geometrian lisätietojen siirtämiseen laitteiden välillä          |
| IPR  | Immaterial property rights, immateriaalioikeudet   |
| IVDR | In Vitro Diagnostic Regulation, In vitro-diagnostiikka asetukset   |

|      |   |
|------|---|
| JTDI | Joint Technical Data Integration, verkkopohjainen tietolähde, joka sisältää huoltohenkilöstön tarvitseman teknisen tiedon.  |
| LC   | Laser Cladding, suorakerrostusprosessi, jossa materiaalia lisätään toisen päälle  |
| LDS  | Laser Direct Structuring, suora laserstrukturointi  |
| LENS | Laser Engineered Net Shaping, suorakerrostukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia   |
| LMD  | Laser Metal Deposition, suorakerrostukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia   |
| LMF  | Laser Metal Fusion, jauhepetisulatukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia   |
| MDR  | Medical Device Regulation, asetus lääkinnällisistä laitteista   |
| MJF  | Multi Jet Fusion, jauhepetisulatukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia   |
| MJP  | Multi Jet Printing, materiaalin ruiskutukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia  |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration, Yhdysvaltain liittohallituksen alainen ilmailu- ja avaruushallintovirasto  |
| NATO | North Atlantic Treaty Organization, Pohjois-Atlantin liitto   |
| NDT  | Non-destructive testing, ainetta rikkomaton testimenetelmä  |
| NSS  | Near-Net-Shape, lähes mittatarkka muoto   |
| NOx  | Typen oksidi  |
| OBJ  | 3D Object file, 3D-kuvatiedosto   |
| PEKK | Polyetherketoneketone, polyeetteriketoniketoni -polymeeri   |
| PLA  | People's Liberation Army, Kiinan kansan vapautusarmeija   |
| PPP  | Public-Private-Partnership, elinkaarimalli, jossa yksityinen yritys sitoutuu vastaamaan julkisen hankkeen toteutuksesta pitkällä aikavälillä palvelumaksuja vastaan |
| R&D  | Research & Development, T&K, tutkimus ja tuotekehitys   |
| RM   | Rapid Manufacturing, pikavalmistus  |
| RP   | Rapid Prototyping, prototyyppien pikavalmistus  |
| RPD  | Rapid Plasma Deposition, suorakerrostukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia  |
| SL   | Laser Sintering, lasersintraus, jauhepetisulatukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia   |

|      |   |
|------|---|
| SLA  | Stereolithography, stereolitografia, ensimmäinen valokovetukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia   |
| SLM  | Selective Laser Melting, jauhepetisulatukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia  |
| SLS  | Selective Laser Sintering, jauhepetisulatukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia  |
| STL  | Standard Triangle Language, kappaleen pintageometrian kolmioverkkoon perustuva esitysmuoto, jota käytetään 3D-geometriatiedon siirtoon 3D-tulostuslaitteelle    |
| STP  | STandard for the exchange of Product, standardi tuotemallin siirtoon  |
| TRA  | Technology Readiness Assessment, teknologian kypsyyden arviointi  |
| TRL  | Technology Readiness Level, teknologinen kypsyytaso   |
| UAM  | Ultrasonic Additive Manufacturing, laminointiin perustuva lisäävän valmistuksen teknologia  |
| UAV  | Unmanned Aerial Vehicle, miehittämätön ilma-alus  |
| UCLA | University of California, Los Angeles, Kalifornian yliopisto  |
| UK   | United Kingdom, Yhdistynyt kuningaskunta (Iso-Britannia ja Pohjois-Irlanti)   |
| UrFU | Ural Federal University, Uralin liittoyliopisto   |
| USA  | Amerikan yhdysvallat  |
| UV   | Ultravioletti   |
| VIAM | Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, All-Russian Institute Of Aviation Materials, Venäjän ilmailumateriaalien tutkimuslaitos |
| WAAM | Wire and Arc Additive Manufacturing, suorakerrostukseen perustuva lisäävän valmistuksen menetelmä   |

# 1 JOHDANTO

Materiaalia lisäävän valmistuksen sanotaan olevan yksi avainteknologioista eurooppalaisen teollisuuden kilpailukyvyn parantamisessa (European Union 2018). Konsulttiyhtiö Ernst & Young:n tekemien maailmanlaajuisten haastattelututkimusten mukaan vuonna 2019 yrityksistä 65 % käytti lisäävää valmistusta tuotannossaan, kun vuonna 2016 vastaava luku oli vain 24 %. Vuoden 2019 kyselyyn vastanneista yrityksistä 18 % käyttää lisäävää valmistusta asiakkaille ja kuluttajille menevien lopputuotteiden valmistukseen ja lähes joka toinen yritys aikoo käyttää lisäävää valmistusta lopputuotetuotantoon vuonna 2022. (Karevska, Steinberg, Müller, Wienken, Kilger & Krauss 2019, 4–15.) Lisäävä valmistus voi myös olla yksi ratkaisu huoltovarmuuden vahvistamiseksi, pitkien toimitusketjujen haasteiden ja riskien minimointiin, jolloin myös erilaisten häiriö- ja kriisitilanteiden sietokyky paranee. Lisäävää valmistusta käytetään Euroopassa sekä siviilisektorilla että puolustusteollisuudessa, mutta puolustusvoimissa ei kaikkia teknologian tarjoamia mahdollisuuksia ole vielä otettu käyttöön (Lopez Vicente 2017).

## 1.1 Taustaa

Lisäävä valmistus (AM, Additive Manufacturing) on virallinen SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 (Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia) -standardin mukainen termi materiaalia lisäävälle valmistusteknologialle, mutta siitä on käytetty ja edelleenkin käytetään myös nimityksiä Rapid Prototyping (RP), Rapid Manufacturing (RM), Additive Fabrication (AF) ja 3D-tulostus. Termiä 3D-tulostus käytetään yleisesti erityisesti ei-teknisissä yhteyksissä synonyyminä lisäävälle valmistukselle ja siitä onkin tullut vakiotermi teknologialle (Wohlers Associates Inc. 2020, 18; SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017).

Materiaalia lisäävässä valmistuksessa tuotetaan kappaleita 3D-mallitiedon pohjalta liittämällä yhteen materiaalia, tyypillisesti kerros kerrokselta -periaatteella, toisin kuin perinteisissä materiaalia poistavissa ja muovaavissa menetelmissä (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017, 16-17). Alkujaan menetelmää käytettiin pääosin vain prototyyppien valmistukseen, mutta nykyisin AM-tekniikoilla valmistetaan entistä useammin suorituskykyisiä lopputuotteita. AM-teknologiaa käytetään yksittäisten kappaleiden

valmistukseen ja sarjatuotantoon monissa eri teknologiateollisuuden sovellutuksissa, kuten esimerkiksi auto- ja ilmailuteollisuudessa sekä muilla yhteiskunnan eri aloilla, kuten lääketieteessä, koulutuksessa, arkkitehtuurissa, kartografiassa sekä lelu- ja viihdeteollisuudessa. (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017, 5.)

Materiaalia lisäävällä valmistuksella on monia etuja verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin ja AM-menetelmien kehittyessä on painopiste enenevässä määrin siirtynyt ja siirtymässä prototyyppien valmistuksesta toiminnallisten lopputuotteiden valmistukseen, kuten aiemmin mainittu Ernst & Young:n tekemä tutkimuskin (Karevska ym. 2019, 4–15) osoittaa. AM-tekniikoiden käytöllä voidaan saavuttaa sekä taloudellisia että ajallisia säästöjä mm. pienemmän materiaalikulutuksen, nopeamman ja joustavamman tuotekehityksen sekä rakenteiden keventymisen ansiosta. Lisäksi AM-tekniikat mahdollistavat vapaamman suunnittelun ja sitä kautta hyvinkin monimutkaisten ja kompleksisten rakenteiden ja yksilöllisten tuotteiden tuottamisen, sekä valmistuksen käyttökohteessa ja tarvittaessa. (Alonen, Alonen & Hietikko, 2016, 6-11.)

Lisäävän valmistuksen tutkimus on lisääntynyt dramaattisesti viimeisten vuosien aikana lähinnä laajan teknologiaa kohtaan kasvaneen kiinnostuksen vuoksi. Edellytyksenä teknologian jatkuvalla kehityksellä sekä käyttöönotolle on onnistunut teknologian siirto yliopistoilta ja tutkimusryhmiltä teollisuudelle ja kaupalliseen käyttöön. (Wohlers Associates Inc. 2020, 231.) Lisäävän valmistuksen hyödyt ovat nykyisin jo monille tuttuja, mutta useat yritykset ovat kuitenkin epävarmoja siitä, mikä on oikea aika investoida teknologiaan ja hyöty omalle yritykselle. Teollisuusalojen välillä onkin suuria eroja teknologian omaksumisen, käyttöönoton ja kypsyyden tasossa. (Valdivieso 2019a.)

Lisäävä valmistus voi tuottaa uusia mahdollisuuksia toimitusketjuihin kuten aika- ja materiaalisäästöjä sekä toimitusketjun yksinkertaistumista ja sitä kautta myös kustannustehokkuutta. Lisäävän valmistuksen myötä asiakkaasta voikin tulla toinen tuottaja toimitusketjuun ja tarve toimittajille sekä kuljetus- ja varastointipalveluille voi vähentyä. (Uusipaavalniemi 2016.) Sotilaallisissa ja humanitaarisissa operaatioissa, erityisesti syrjäisillä alueilla toimittaessa, tarvittava toimitusketju poikkeaa muista toimitusketjuista mm. siksi, että päätavoitteena on toimivien joukkojen tehokkaan toiminnan edistäminen eikä niinkään taloudelliset näkökohdat ja että tuettavien joukkojen toimintaympäristöt ovat moninaisemmat (taistelu, katastrofit, rauhanturvaaminen). Tällöin toimitusketjuihin haasteita aiheuttavat vahingoittunut infrastruktuuri, kuljetuskaluston puutteellisuus, toimimaton paikallishallinto ja fyysinen väkivallan tai sen

uhkan sekä useiden loukkaantuneiden ja traumatisoituneiden yksilöiden läsnäolo. (Den Boer, Lambrechts & Krikke 2020.)

Puolustuvoimissa käytettävien järjestelmien ja kaluston käyttöikä on usein pitkä, mikä asettaa haasteita esimerkiksi varaosien saatavuudelle. Erityisesti poikkeusoloissa korostuu tarve nopealle ja toimitusvarmalle logistiikkaketjulle niin varaosien saatavuuden, vaurioiden korjauksen kuin kenttälääkinnänkin alueella. Lisäävä valmistus nähdään yhtenä ratkaisuna näihin haasteisiin. (Montero, Weber, Bleckmann, Atzberger, Wirths & Paetzold 2019, 1.)

Nopea, paikallinen ja joustava tuotantokyky tekee AM-tekniologiasta ideaalisen nopeisiin innovaatioihin ja edistyneeseen tekniikkaan pohjautuvalle teollisuudelle. Puolustuksen toimialoilla on nähtävissä AM-tekniologian tuomina etuina samat tuotekehitykseen ja tuotantoon liittyvät seikat kuin siviilisektorillakin. Pitkällä aikavälillä on nähtävissä, että AM-tekniologia tuo lisää tehokkuutta sotilasjärjestelmien ja kaluston valmistukseen, korjaukseen ja huoltoon sekä muuttaa merkittävästi logistiikkaa ja toimitusketjuja. Erityisesti tutkimuksen kohteena on ollut, kuinka logistisesti hankalien yhteyksien päässä toimittaessa voidaan nopeuttaa huoltoa ja korjauksia valmistamalla varaosia ja työkaluja suoraan niiden käyttökohteessa ja tarvittaessa. (AMFG 2018.)

AM-tekniikoiden käytön lisääntyminen lopputuotteiden valmistuksessa siviilisektorilla ja puolustusteollisuudessa tarkoittaa myös sitä, että entistä useammat uudet järjestelmät sisältävät AM-tekniikalla valmistettuja osia ja rakenteita, joilla sekä parannetaan suorituskykyä että saadaan aikaiseksi uusia ominaisuuksia. Defence IQ:n vuonna 2017 julkaistun tutkimuksen mukaan jopa 75 % puolustusalan teollisuusjohtajista uskoi tuolloin, että AM-tekniologiasta tulee yksi valmistusmenetelmä muiden menetelmien joukkoon seuraavan 10 vuoden aikana (AMFG 2018).

## 1.2 Tutkimuksen tavoite ja rajaukset

Puolustusvoimien tutkimuslaitoksessa on käynnissä ADDMAN – Materiaalia lisäävä valmistus Puolustusvoimien logistiikassa -tutkimus, jossa selvitetään materiaalia lisäävän valmistuksen merkitystä ja mahdollisuuksia kriisiajan varaosatuotannossa, vauriokorjauksessa ja lääkintähuollossa sekä energettisten materiaalien tuotannossa.

ADDMAN -tutkimuksen toimeksiantajan asettamia tutkimuskysymyksiä ja -tavoitteita, joihin tällä tutkimuksella haetaan vastauksia ovat:

- Arvio teknologian tämänhetkisestä suorituskyvystä ja sen mahdollisuuksista tulevaisuudessa.
- Onko muiden maiden puolustusvoimat ottaneet käyttöönsä taistelukentälle siirrettäviä 3D-tulostimia?
- Mitä Puolustusvoimien käytössä olevia komponentteja, laitteita tai järjestelmien osia voidaan valmistaa tai korjata kenttähuollon tukena?
- Mitkä on suomalaisten materiaalia lisäävää valmistusta tuottavien ja hyödyntävien yritysten valmiudet tukea puolustusvoimia tulevaisuudessa tarvittaessa poikkeusoloissa?

Tutkimuksessa pääpaino on puolustuksen ja siihen liittyvän teollisuuden materiaalia lisäävän valmistuksen sovelluksissa ja niiden tämänhetkisessä kypsytydessä sekä tulevaisuuden näkymissä seuraavasti:

- Selvityskohteena on erityisesti varaosavalmistus, vauriokorjaus, kenttälääkintä ja energettisten materiaalien valmistus.
- Selvitetään muiden maiden puolustusvoimien materiaalia lisäävän valmistuksen tutkimustilannetta ja sovelluskohteita (normaaliolot, poikkeusolot ja kenttäsovellukset).
- Luodaan katsaus materiaalia lisäävän valmistuksen käytöstä siviilisektorilla ja arvioidaan teknologian kypsyttä, suorituskykyä ja tulevaisuuden näkymiä puolustusvoimien näkökulmasta.
- Luodaan katsaus materiaalia lisäävän valmistuksen tasosta ja käytöstä Suomessa.

Lähdeaineistona tutkimuksessa käytetään julkisista lähteistä saatavaa materiaalia. Koska tutkimuksen tarkoituksena on selvittää lisäävän valmistusteknologian nykytilaa ja uusimpia sovellutuksia sekä tulevaisuuden näkymiä, käytetään lähdemateriaalina pääasiassa vuonna 2018 ja sen jälkeen tehtyjä julkaisuja.

Työssä esitellään ensiksi lisäävän valmistuksen seitsemän menetelmäluokkaa, menetelmien toimintaperiaatteet ja yleisimmät ominaisuudet, lisäävän valmistuksen edut verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin sekä AM-prosessin työvaiheet. Seuraavaksi kuvataan teknologian kypsyystason arviointiin ja määrittämiseen kehitetty TRL-asteikko (Technology Readiness Level), johon peilataan tutkimuksessa esitettäviä AM-teknologian sovelluksia. Siviili- sekä puolustussektorin uusimpia julkaistuja tutkimuskohteita ja sovelluksia esitellään maanosittain ja maittain jaoteltuna.



Tulevaisuuden näkymissä käydään läpi AM-tekniikkaan kohdistuvia odotuksia ja haasteita niin siviili- kuin puolustussektorilla.

## 2 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN MENETELMÄT

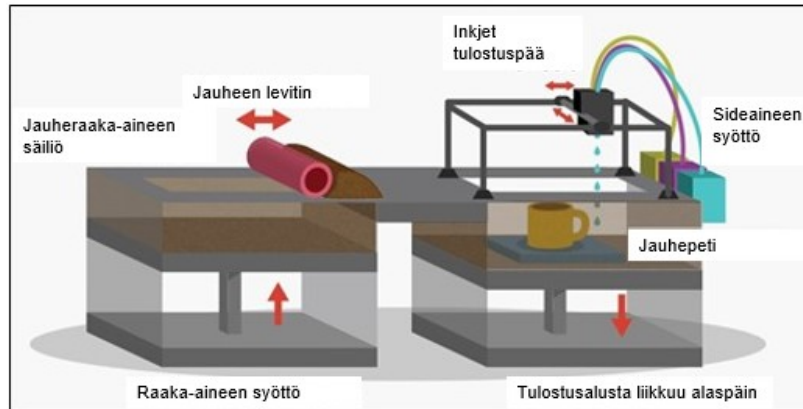
SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017-standardin mukaan materiaalia lisäävä valmistus jaetaan seitsemään menetelmäluokkaan: sideaineen suihkutetus, suorakerrostus, materiaalin pursotus, materiaalin suihkutetus, jauhepetisulatus, kerroslaminointi ja valokovetus altaassa. Tässä kappaleessa käsiteltävät materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät on esitetty kootusti liitteessä 1 (Ritter 2019a) jaoteltuna menetelmissä käytettävien valmistusmateriaalien mukaan. Koska lisäävät valmistusmenetelmät kehittyvät hyvin nopeasti, kaikki nykyiset materiaalia lisäävät valmistustekniikat eivät välttämättä sovi näihin standardissa määritettyihin luokkiin tai ne voivat sopia jopa useampaan luokkaan samanaikaisesti. (Wohlers Associates Inc. 2020, 50.)

Menetelmäluokkiin kuuluvia valmistusmenetelmiä kehitetään edelleen jatkuvasti ja valmistajat nimeävät niitä omilla tavoilla. Kehitys tuo myös muutoksia menetelmien yleisominaisuuksiin kuten käytettäviin materiaaleihin tai kerrospaksuuksiin, joten seuraavissa kappaleissa on esitetty menetelmien tämänhetkiset ominaisimmat yleiset peruspiirteet.

Käytössä on myös ns. hybridimenetelmiä, joissa yhdistetään joko lisäävän valmistuksen menetelmiä keskenään tai lisäävän valmistuksen menetelmä perinteisen valmistusmenetelmän kanssa. Hybridimenetelmät eivät sovellu suoraan minkään SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017-standardin menetelmäluokan alle. (Alonen ym. 2016, 43.)

### 2.1 Sideaineen suihkutetus

Sideaineen suihkutuksessa (Binder Jetting) nestemäistä sidosainetta sijoitetaan valikoivasti jauhemateriaalin liittämiseksi yhteen (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017, 7). Laitteen tulostustasolla mekaanisen levittäjän levittämän jauheen partikkelit kiinnitetään toisiinsa suuttimien läpi ruiskutettavalla nestemäisellä sideaineella kerroskerrokselta 3D-mallin mukaisesti. Jauhe toimii samalla valmistuvan kappaleen tukimateriaalina. Sideaineena voidaan käyttää UV-valolla kovettuvaa sideainetta tai jauhe voi itsessään sisältää sideaineen, jolloin ruiskutetaan selektiivisesti sideaineen aktivointiainetta. Sideaineen mukana voidaan ruiskuttaa myös väriaineita värillisten tuotteiden aikaansaamiseksi. (Alonen ym. 2016, 24.) Menetelmän periaate on esitetty kuviossa 1.

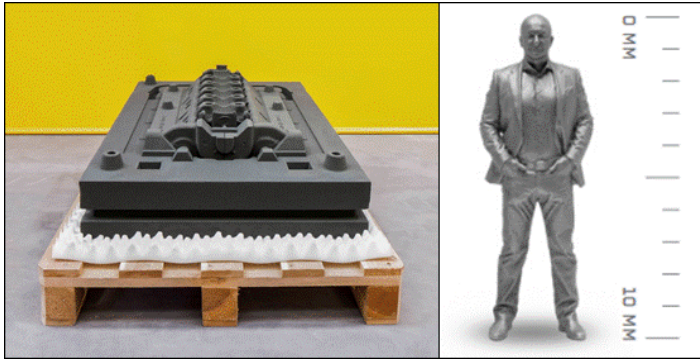


Kuvio 1. Sideaineen suihkutuksen menetelmän toimintaperiaate (mukailtu 3D Printing Industry).

Sideaineen suihkutuksella voidaan valmistaa kappaleita lähes kaikista jauheisista materiaaleista, kuten esimerkiksi muoveista, metalleista, hiekasta ja keraameista. Käytetyn materiaalin mukaan kappale voi tarvita jälkikäsittelyä, kuten sintrausta tai isostaattista kuumapuristusta (HIP) korkeamman materiaaliitiheyden ja tarvittavan kestävyuden aikaansaamiseksi. (Alonen ym. 2016, 25.) Kuvassa 1 on esitetty sideaineen annostelua tulostuspäistä ja kuvassa 2 on esimerkkejä sideaineen suihkutuksella valmistetuista kappaleista; hiekkavalumuotti moottorinlohkon valmistukseen ja 10 mm korkea metallinen pienoispatsas.



Kuva 1. Sideaineen syöttö InkJet tulostinpäistä (ExOne).



Kuva 2. Sideainesuihkutuksella valmistettu hiekkavalumuotti moottorinlohkon valmistukseen vasemmalla (Bournias-Varotsis 2020a) ja metallinen pienoispatsas oikealla (Digital Metal 2019).

Sideaineen suihkutusta käytetään yleisimmin muottiteollisuudessa. Käytössä on useita menetelmiä ja laitteistoja, tunnetuimpina Voxeljet ja ExOne, jotka valmistavat 3D-tulostimia metallivalujen hiekkamuottien tekoon (Alonen ym. 2016, 25.) Kuten kuvan 2 esimerkeistä nähdään, sideaineen suihkutuksella voidaan valmistaa sekä suuria että hyvin pieniä kappaleita. Taulukkoon 1 on koottu tiivistetysti sideaineen suihkutuksen yleisimpiä piirteitä.

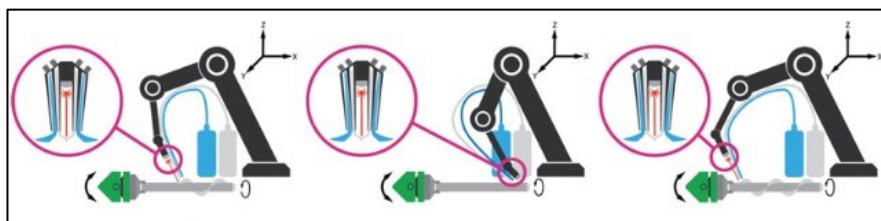
Taulukko 1. Sideaineen suihkutuksen yleiset ominaisuudet (Bournias-Varotsis 2020a).

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Materiaali</b>                | Metallit, keraamit (hiekkä), muovit  |
| <b>Mittatarkkuus</b>             | Metalli: $\pm 2\%$ tai 0.2 mm (aina $\pm 0.5\%$ tai $\pm 0.05$ asti)<br>Täysväri: $\pm 0.3$ mm<br>Hiekka: $\pm 0.3$ mm   |
| <b>Tyypillinen valmistuskoko</b> | Metalli: 400 x 250 x 250 mm (800 x 500 x 400 mm asti)<br>Täysväri: 200 x 250 x 200 mm (500 x 380 x 230 mm asti)<br>Hiekka: 800 x 500 x 400 (2200 x 1200 x 600 mm asti) |
| <b>Tavallinen kerrospaksuus</b>  | Metalli: 35–50 $\mu\text{m}$<br>Täysväri: 100 $\mu\text{m}$<br>Hiekka: 200–400 $\mu\text{m}$   |
| <b>Tukirakenne</b>               | Ei tarvetta  |

## 2.2 Suorakerrostus

Suorakerrostuksessa (DED, Direct Energy Deposition) käytetään kohdennettua lämpöenergiaa sulattamaan ja kiinnittämään materiaalia kohdennetusti (SFS-EN ISO/ASTM

52900:2017, 7). Suorakerrostuksessa kohteeseen samanaikaisesti syötetään materiaalia kerros kerrokselta ja kohdistetaan energiaa, joka kiinnittää sulattamalla materiaalin. (Alonen ym. 2016, 38.) Kuviossa 2 on esitetty suorakerrostusmenetelmän toimintaperiaate.



Kuvio 2. Suorakerrostusmenetelmän toimintaperiaatekuva (Alonen ym. 2016, 38).

Raaka-aine voidaan syöttää joko jauheena tai lankana ja tarvittava lämpöenergia voidaan tuottaa laser- tai elektronisäteellä tai plasmakaarella. Yleisimmin käytetyissä tekniikoissa raaka-aine on jauheena ja lämmönlähteenä toimii laser. Tulostettujen kappaleiden mikrorakenne vastaa sulattavilla jauhepetimenetelmillä valmistettujen kappaleiden rakennetta. (Alonen ym. 2016, 39.) Suorakerrostuksella saadaan valmistettua ns. near-net-shape (NNS) -osia eli lähes mittatarkkoja kappaleita, jotka on viimeisteltävä koneistamalla vaadittujen toleranssien täyttämiseksi (Wohlers Associates Inc. 2020, 62).

Suorakerrostuksessa voidaan syöttää yhtä tai useampaa raaka-ainetta samanaikaisesti. Useampaa raaka-ainetta käytettäessä saadaan materiaaliominaisuuksiltaan erilaisia monimetallikappaleita. Lisäksi koska useimmissa suorakerrostuslaitteissa tulostuspään liikuttamiseen käytetään robottikäsiä tai mekanisoitua 4- tai 5-akselista liikejärjestelmää, rakennusprosessi ei ole rajoittunut horisontaalisiin kerroksiin. (Wohlers Associates Inc. 2020, 62.)

Laittevalmistajien käyttämiä erilaisia termejä suorakerrostustekniikkaan perustuville menetelmille ja sovellutuksille ovat muun muassa:

- LENS (Laser Engineered Net Shaping) Optomec yrityksen rekisteröimä tuotemerkki DED-menetelmälleen, jossa käytetään materiaalina jauhetta ja lämmönlähteenä fokuoitetua lasersädettä.
- LMD (Laser Metal Deposition) on DED-prosessi, jossa käytetään raaka-aineena jauhetta ja lämmönlähteenä laseria.

- DMD (Direct Metal Deposition) on DM3D yrityksen rekisteröimä tuotemerkki menetelmälleen, jossa käytetään jauhemateriaalia ja lämmönlähteenä laseria.
- EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing) on Sciaky yrityksen nimitys prosessilleen, jossa käytetään kaksoislangansyöttöjärjestelmää ja elektronisuihkua tyhjiökammiossa.
- LC (Laser Cladding) on prosessi, jossa yhtä materiaalia lisätään toisenlaisen materiaalin päälle. Termillä tarkoitetaan myös yleisesti kappaleen pinnoitusta/päällystämistä.
- RPD (Rapid Plasma Deposition) on Norsk Titaniumin kehittämä DED-prosessi, jossa plasmakaarella sulatetaan titaaniseoslankaa.
- WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) menetelmässä lankamateriaalia sulatetaan valokaaren avulla. (Wohlers Associates Inc. 2020, 62–64; Alonen ym. 2016, 40–42.)

Suorakerrostusta käytetään metallituotteiden valmistamiseen ja erityisesti korjauksiin. Suorakerrostuksella voidaan valmistaa ja korjata huomattavan suuriakin kappaleita (Alonen ym. 2016, 39.)



Kuva 3. Vasemmalla Norsk Titaniumin RPD-tekniikalla valmistama kappale tulostuksen jälkeen ja oikealla siitä koneistamalla viimeistelty kappale (The Additive Report 2018).

Kuvassa 3 on esimerkki RPD-tekniikalla valmistetusta kappaleesta tulostettuna ja jälkikäsiteltynä (The Additive Report 2018). Yhdistämällä suorakerrostuslaitteeseen CNC-koneistuskeskus (kuva 4), voidaan valmistaa seinämiä ja erilaisia piirteitä huomattavasti tiukemmilla toleransseilla. Vuoden 2013 jälkeen useat yritykset ovat tuoneet markkinoille hybridilaitteita. (Wohlers Associates Inc. 2020, 64.) Kuvassa 4 vasemmalla näkyv

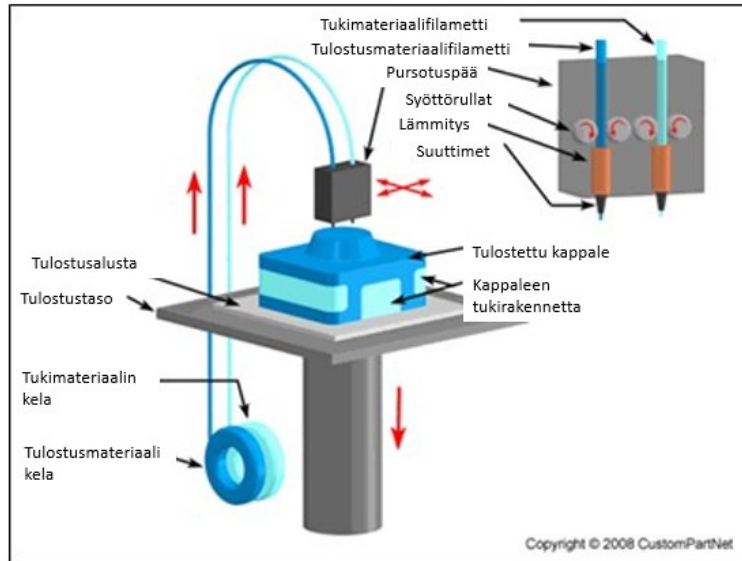
kappaleen valmistusta suorakerrostuksella ja oikealla tulostetun muodon koneistusta tarkkoihin mittoihin ja pinnanlaatuun.



Kuva 4. Hybridilaitte, jossa on yhdistettynä suorakerrostus ja CNC-koneistuskeskus (Hybrid Manufacturing Technologies).

### 2.3 Materiaalin pursotus

Materiaalin pursotus (material extrusion) on menetelmä, jossa materiaalia syötetään valikoivasti suuttimen tai suuaukon läpi tulostusalustalle (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017, 7). Kuluttajatason laitteissa materiaalin pursotus on yleisimmin käytetty lisäävän valmistuksen menetelmä. Puolijuokevaa materiaalia pursotetaan suuttimen läpi ja samanaikaisesti laitteesta riippuen joko tulostuspää tai -alusta liikkuu x-y -tasossa tulostettavan kappaleen 3D-mallin mukaisesti. Uusi kerros kiinnittyy aiemmin pursotettuun kerrokseen ja kovettuu muodostaen näin kerroksen valmistettavaan kappaleeseen. (Wohlers Associates Inc. 2020, 51.) Menetelmän toimintaperiaate on esitetty kuviossa 3. Materiaalin pursotusta ei voi tehdä ns. tyhjän päälle, joten esimerkiksi ulkonevat muodot tarvitsevat tukirakenteen. Laitteessa voi olla yksi tai useampi suutin. Usein käytettäessä kahta suutinta, toisesta suutimesta pursotetaan kappaleen rakennusmateriaalia ja toisesta tukimateriaalia, joka poistetaan kappaleesta tulostuksen jälkeen joko mekaanisesti työkaluja käyttäen tai liuottamalla.



Kuvio 3. Materiaalin pursotuksen toimintaperiaate (mukailtu CustomPartNet).

Tyypillisesti raaka-aineena on termoplastinen muovifilamentti, jota syötetään lämmitetyn suuttimen läpi, mutta pursotuksessa voidaan käyttää myös muita materiaaleja, kuten esimerkiksi keraameja, komposiitteja, metallitäytteistä savea, betonia, suklaata ja muita elintarvikkeita sekä hydrogeeliin suspensoituja eläviä soluja (Wohlers Associates Inc. 2020, 51). Muita tyypillisiä ominaisuuksia on esitetty taulukossa 2. Viskoosia nesteitä, geelejä ja suspensioita voidaan annostella ruiskulla, usein myös ilman lämmitystä. Tahnojen tai vahamaisten materiaalien kovettamiseen voidaan käyttää esimerkiksi kovetin- tai liuotainaineita, reaktiota ilman kanssa tai kuivumista ajan kuluessa. (Alonen ym. 2016, 19.)

Taulukko 2. Materiaalin pursotuksen tyypilliset ominaisuudet (Bournias-Varotsis 2020b).

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| <b>Mittatarkkuus</b>             | $\pm 0.5 \%$ (alaraja $\pm 0.5 \text{ mm}$ ) – desktop<br>$\pm 0.15 \%$ (alaraja $\pm 0.2 \text{ mm}$ ) – teolliset |
| <b>Tyypillinen valmistuskoko</b> | 200 x 200 x 200 mm – desktop<br>1000 x 1000 x 1000 mm - teolliset   |
| <b>Tavallinen kerrospaksuus</b>  | 50–400 $\mu\text{m}$  |
| <b>Tukirakenne</b>               | Tarvitaan joskus (saatavilla myös liukenevaa materiaalia)   |

Materiaalin pursotuksella voidaan valmistaa kestäviä kappaleita ja sitä käytetään kotitalouksissa erilaisten pienesineiden valmistukseen, mutta sillä on myös useita



ammattikäytön sovelluksia, kuten prototyyppien valmistus muodon, sopivuuden tai toiminnallisuuden testaukseen ja esitysmateriaalien valmistus sekä erilaisia terveydenhuollon ja elintarviketeollisuuden sovelluskohteita (CustomPartNet).

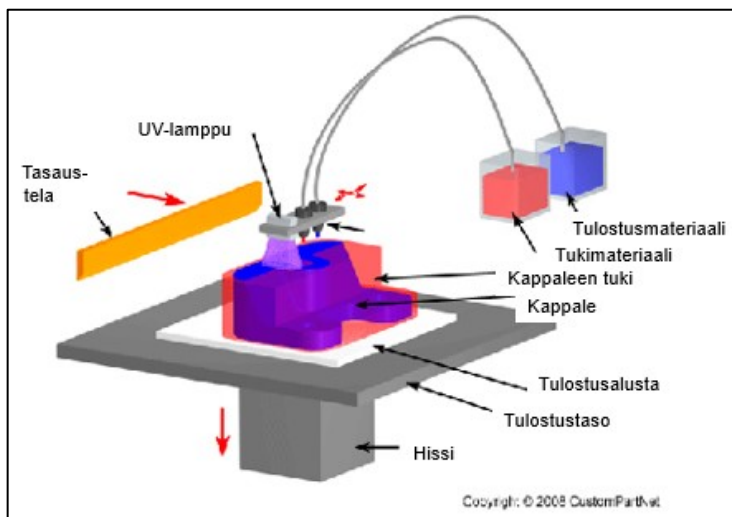
Verrattuna muihin materiaalia lisääviin valmistustekniikoihin materiaalin pursotus on usein edullisin vaihtoehto ja lisäksi pursotuslaitteita on myös suhteellisen helppo suunnitella, valmistaa sekä käyttää. Kaikista lisäävän valmistuksen laitteista materiaalin pursotuslaitteita on lukumääräisesti eniten. (Wohlers Associates Inc. 2020, 51.) Laittevalmistajien rekisteröimiä tai käyttöönottamia termejä materiaalin pursotusmenetelmilleen ovat esimerkiksi Stratasys Inc:n FDM (Fused Deposition Modeling), RepRap projektin FFF (Fused Filament Fabrication) ja Cincinnati Inc:n BAAM (Big Area Additive Manufacturing), jolla voidaan tulostaa termoplastisesta materiaalista erittäin suuria kappaleita. Suurimman BAAM-laitteen tulostusala on noin 6,1 m x 2,3 m x 1,8 m (Savonia; Cincinnati Inc.). Kuvassa 5 ylhäällä on BAAM-laite ja alhaalla sukellusveneenrunko, joka on valmistettu kuudesta BAAM-laitteella tulostetusta hiilikuitukomposiittiosasta. Runko oli Yhdysvaltojen laivaston proof-of-concept prototyyppimalli (Jackson 2017).



Kuva 5. Ylhäällä BAAM laite (Cincinnati Inc.) ja alhaalla hiilikuitukomposiittista BAAM laitetta käyttäen valmistettu sukellusveneen runko (Jackson 2017).

## 2.4 Materiaalin suihkutetus

Materiaalin suihkutetus (material jetting) on menetelmä, jossa raaka-ainepisaroita kovetaan kohdennetusti. Raaka-ainemateriaalina voidaan käyttää esimerkiksi UV-kovettuvaa muovia tai vahaa. Tulostusprosessissa käytetään mustesuihkukirjoittimen kaltaisia tulostuspäitä, joista suihkutetaan materiaalia kohdennetusti kerros kerrokselta. Toinen tulostuspää suihkuttaa kappaleen materiaalin ja toinen tukimateriaalin. Materiaalin kovettaminen tehdään UV-valolla. (Alonen ym. 2016, 22.) Kuviossa 4 on esitetty materiaalin suihkutuksen toimintaperiaate ja taulukkoon 3 on koottu tiivistetysti menetelmän tyypillisimmät ominaispiirteet.



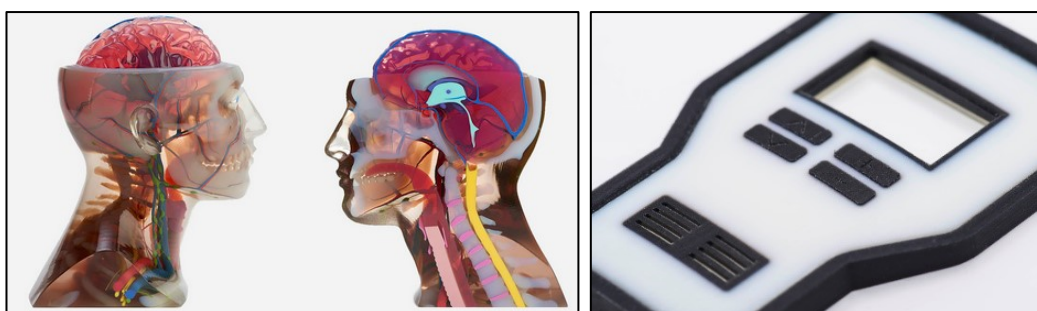
Kuvio 4. Materiaalin suihkutuksen toimintaperiaate (mukailtu CustomPartNet).

Taulukko 3. Materiaalin suihkutuksen tyypilliset ominaisuudet (Bournias-Varotsis 2020c).

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Materiaali</b>                | Akryylipohjaiset fotopolymeerit, muovit, vahat     |
| <b>Mittatarkkuus</b>             | $\pm 0.1 \%$ (alaraja $\pm 0.05$ mm)               |
| <b>Tyypillinen valmistuskoko</b> | 380 x 250 x 200 mm (aina 1000 x 800 x 500 mm asti) |
| <b>Tavallinen kerrospaksuus</b>  | 16–32 $\mu\text{m}$                                |
| <b>Tukirakenne</b>               | Tarvitaan aina (käytetään liukenevaa materiaalia)  |

Useat tulostuspäät mahdollistavat eri materiaalien samanaikaisen suihkutuksen. Näin menetelmällä voidaan valmistaa sekä kokoväri- että monimateriaalikappaleita.

Materiaalin suihkutuksessa tarvitaan aina tukimateriaalia, joka poistetaan joko paineistetulla vesisuihkulla tai ultraäänihauteessa. (Bournias-Varotsis 2020c.) Sovelluskohteina ovat mm. erittäin realistisen näköiset näköismallit esimerkiksi lääketieteelliseen tai arkkitehtuuriseen käyttöön ja ruiskuvalumuottien valmistus (Gregurić 2019). Kuvan 6 esimerkeistä on nähtävissä, kuinka materiaalin suihkutuksella voidaan valmistaa sekä monivärisiä, läpinäkymättömiä ja läpikuultavia rakenteita että eri muovimateriaaleista koostuvia kappaleita. Kuvassa 6 on vasemmalla täysväritulostuksena tehty lääketieteen koulutusmalli, jossa on läpikuultavia rakenteita ja oikealla monimateriaaliprototyyppi, jossa on yhdistettynä jäykkää, läpinäkymätöntä (valkoinen) ja joustavaa (musta) polymeeriä.



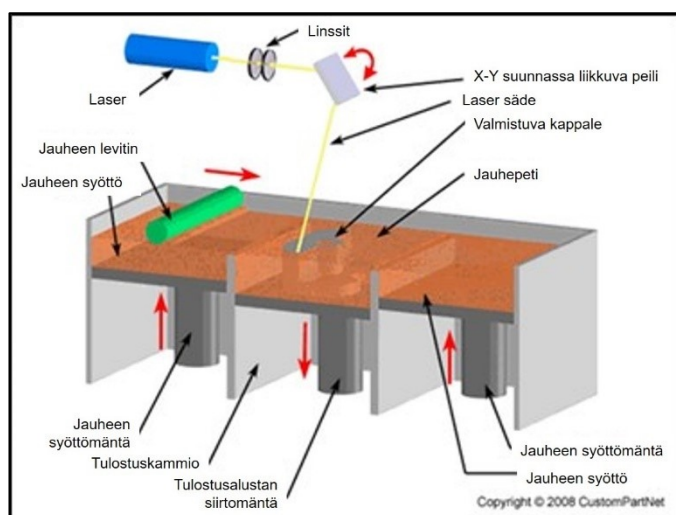
Kuva 6. Vasemmalla täysväritulostuksena tehty lääketieteen koulutusmalli ja oikealla monimateriaaliprototyyppi, jossa on jäykkää, läpinäkymätöntä (valkoinen) ja joustavaa (musta) polymeeriä yhdistettynä (Bournias-Varotsis 2020b).

Materiaali suihkutuksen sanotaan olevan yksi nopeimmista ja tarkimmista materiaalia lisäävistä valmistusmenetelmistä. Mutta sen sanotaan olevan myös yksi kalleimmista menetelmistä, johtuen sekä laitteiden että materiaalien korkeista hinnoista. Nopeuden ja tarkkuuden lisäksi menetelmän etuna on erittäin hieno pinnanlaatu. Menetelmän heikkoutena on valmistettujen kappaleiden huono kestävyys rasitusta vastaan sekä se, että valmistuksessa syntyy runsaasti tukirakennejätettä. (Gregurić 2019.)

## 2.5 Jauhepetisulatus

Jauhepetisulatuksessa (powder bed fusion) lämpöenergialla sulatetaan jauhepedin kohdennettuja alueita (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017, 7). Jauhepetisulatuksessa raaka-aine, metalli tai muovi, on jauhemaisessa muodossa. Raaka-aineen levitin levittää ohuen kerroksen jauhetta alustalle, jossa lämpöenergialla kohdennetusti liitetään jauhepartikkelit toisiinsa. Tämän jälkeen levitetään uusi jauhekerros ja liitetään jauhepartikkelit sekä

edelliseen kerrokseen että toisiinsa. Näin jatketaan kerros kerrokselta. Sulattamaton jauhe toimii valmistettaville kappaleille tukirakenteena ja se voidaan kierrättää uudelleen käyttöön seulonnan jälkeen. Partikkelit liitetään toisiinsa joko sintraamalla tai kokonaan sulattamalla. Lämmönlähteenä käytetään laseria tai elektronisuihkua. (Alonen ym. 2016, 31–33.) Kuviossa 5 on esitetty jauhepetisulatusmenetelmän toimintaperiaate.



Kuvio 5. Jauhepetisulatusmenetelmän toimintaperiaate (mukailtu CustomPartNet).

Jauhepetisulatus tekniikkaan perustuvia laseria tai elektronisuihkua lämmönlähteenä käyttäviä eri laitevalmistajien patentoimia menetelmiä ja niistä käytettäviä termejä on useita:

- SLS (Selective laser sintering) ja SL (laser sintering) polymeerien jauhepetisulatusmenetelmistä käytettyjä termejä.
- SLM (Selective laser melting) on Fraunhofer Instituutin kehittämä ja patentoima menetelmä, jossa metalli sulatetaan täysin kuitulaserilla.
- DMLS (Direct metal laser sintering) on EOS-yrityksen hallitsema patentti. Kaikki metallien jauhepetisulatusmenetelmät perustuvat jollain tavoin tähän menetelmään.
- LMF (Laser metal fusion) on Trumpf-yrityksen käyttämä nimi jauhepetisulatusmenetelmälleen
- LaserCusing on Concept Laser -yrityksen termi heidän jauhepetimenetelmälensä, jossa on erona perusjauhepetisulatus menetelmiin yrityksen kehittämän laseralgoritmi.

- DMP (Direct metal printing) on 3DSystemsin käyttämä termi prosessille, jossa materiaali sulatetaan täysin.
- EBM (Electron beam melting) on ruotsalaisen Arcamin kehittämä prosessi, jossa lämmönlähteenä on elektronisäde. (Alonen ym. 2016, 31–38.)

Laserin ja elektronisuihkun lisäksi voidaan lämmönlähteenä käyttää infrapunasäteilyä. Jauhepetisulautusmenetelmistä, jotka käyttävät jauhepartikkeleiden sulatukseen infrapunasäteilyä käytetään termejä *multi jet fusion* (MJF) ja *high speed sintering* (HSS). Tulostuspäistä syötetään pieninä pisaroina infrapunasäteilyä absorboivaa sideainetta (noin 300 miljoonaa pisaraa sekunnissa) tulostuspedillä olevan polymeerijauhekerroksen niihin kohtiin, joiden halutaan sulavan lämmitettäessä infrapunavalolla. Lisäksi HP:n laitteissa käytetään kappaleen reuna-alueisiin syötettävää ns. detailjointiainetta, joka vaihmentaa infrapunasäteilyn vaikutusta toimien lämmöneristeenä. Näin kontrolloidaan täsmällisemmin sulatusprosessia ja saadaan tehtyä teräviä reunoja ja kulmia. (Formnext 2019, 14; Wohlers Associates Inc. 2020, 61.) Kuvassa 7 on kaksi esimerkkiä eri jauhepetisulatusmenetelmän käyttösovelluksesta.



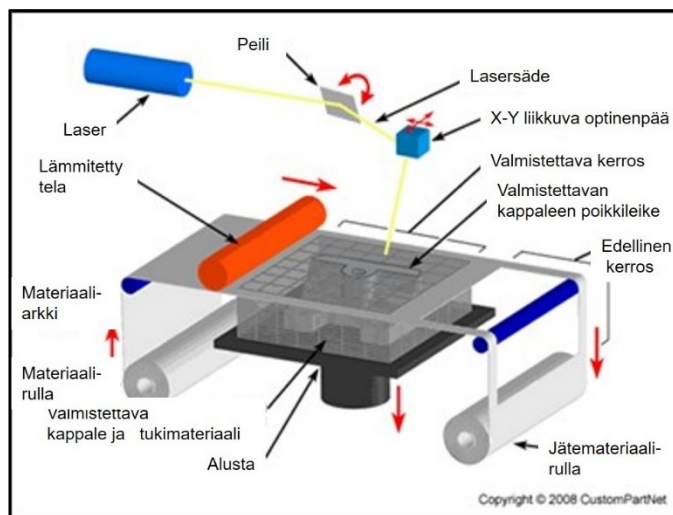
Kuva 7. Vasemmalla HP:n MJF:llä tehty lapsen sydämen malli (Rady Children´s Hospital) ja oikealla EOS:n DMLS-tekniikalla titaanista tehty huokoinen implantti (EOS).

Jauhepetisulatus käytetään yleisesti sekä muovi- että metalliosien valmistusmenetelmänä. Yleisimmin käytettyjä muovimateriaaleja ovat nylon, polyamidi, polystyreeni sekä erilaiset elastomeerit. Myös erilaisia komposiittimateriaaleja voidaan käyttää raaka-aineena. Metalleista yleisimmin käytettyjä ovat erilaiset rauta- ja alumiiniseokset, pronssi, kobolttikromi sekä titaani. Jauhepetisulatus käytetään sekä prototyyppien että

erilaisten toiminnallisten lopputuotteiden valmistukseen. Metallista valmistetaan esimerkiksi lääketieteellisiä implantteja sekä lentokoneiden ja ajoneuvojen osia.

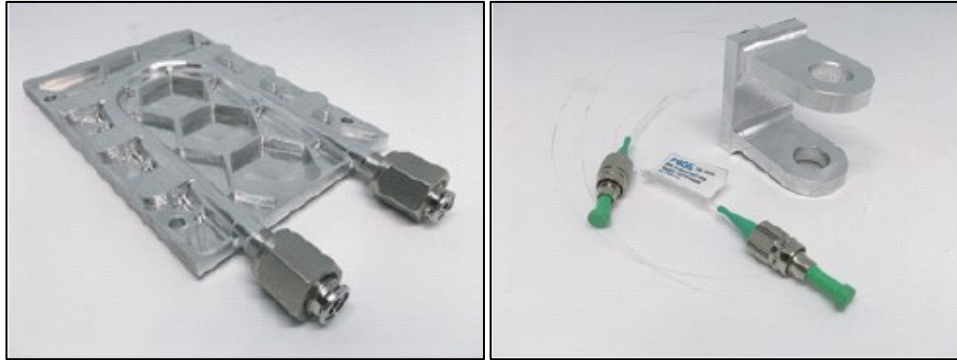
## 2.6 Kerroslaminointi

Kerroslaminointi (Sheet Lamination) on menetelmä, jossa materiaalikalvoja yhdistetään toisiinsa kappaleen aikaan saamiseksi. Materiaalikalvot voivat olla lähes mitä tahansa materiaalia, kuten paperia, muovia, metallia tai komposiittia. Kappaleen muoto tehdään leikkaamalla laserilla tai veitsellä. Laminoitava materiaali voi olla arkkeina tai rullana, kuten menetelmän toimintaperiaatetta esittävässä kuviossa 6. (Alonen ym. 2016, 25–26.)



Kuvio 6. Kerroslaminoinnin toimintaperiaate (mukailtu CustomPartNet).

Materiaalikalvojen liittäminen tehdään usein liimaamalla. Metallikalvoja voidaan liittää toisiinsa myös ultraäänen avulla ns. ultraäänihitsaamalla. (Alonen ym. 2016, 25–26.) UAM (Ultrasonic additive manufacturing) ultraäänihitsauksessa ohuet metallikalvot hitsataan kiinni toisiinsa käyttäen ultraäänienergiaa ja puristusvoimaa. Menetelmällä on mahdollista yhdistää erilaisia metalleja sekä upottaa elektroniikkaa, kuten erilaisia sensoreita rakenteiden sisään. Markkinoilla on myös laitteita, joissa on yhdistetty ultraäänihitsaus perinteisen CNC-työstökeskuksen kanssa. (Wohlers Associates Inc. 2020, 57.) Kuvassa 8 on esimerkkinä UAM-tekniikalla valmistettu lämmönvaihdin ja kannake, johon on upotettu venymäanturit (Fabrisonic).

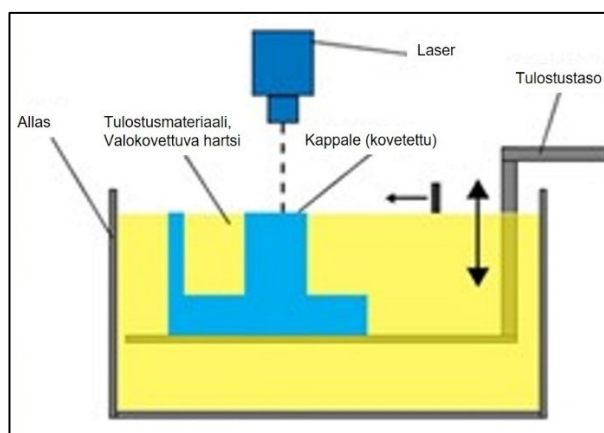


Kuva 8. Fabrisonicin UAM-tekniikalla valmistamia tuotteita; vasemmalla lämmönvaihdin ja oikealla kannakkeeseen upotetut venymäanturit (Fabrisonic).

Kerroslaminoinnilla voidaan valmistaa erilaisia havainnollistavia malleja, mutta myös toimivia lopputuotteita mm. keraameista ja metallista. Kerroslaminointi on usein edullinen ja nopea menetelmä valmistaa havainnollisia esineitä. Tarvittava jälkityöstö on riippuvainen käytetystä materiaalista ja menetelmästä.

## 2.7 Valokovetus altaassa

Valokovetus altaassa (Vat Photopolymerization) menetelmässä nestemäistä muovia, fotopolymeeriä, kovetetaan kohdennetusti käyttäen valoaktivoituvaa polymerointia (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017, 8). Riippuen siitä tulostetaanko kappale tulostusalustan päälle vai alapuolelle, tulostusalustaa joko lasketaan tai nostetaan kerroksittain. Kappale kovetetaan UV-valolla. Kuviossa 7 on esitetty valokovetus altaassa menetelmän toimintaperiaate laskevalla tulostusalustalla.

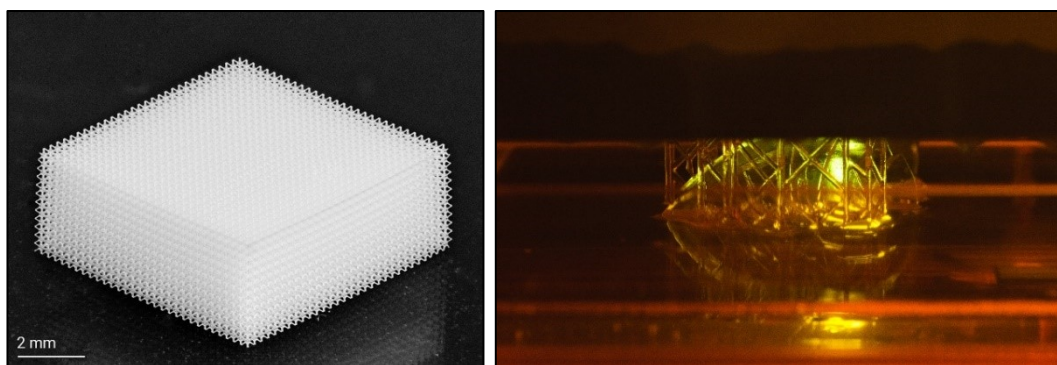


Kuvio 7. Valokovetus altaassa menetelmän (laskeva tulostusalusta) toimintaperiaate (mukailtu Loughborough University).

Menetelmästä käytetään nimitystä stereolitografia (SLA) ja sen etuja ovat valmistettujen kappaleiden hyvä mittatarkkuus ja pinnanlaatu, suhteellisen nopea prosessi sekä se, että menetelmä soveltuu hyvin kookkaidenkin kappaleiden valmistukseen. Menetelmän heikkouksia ovat kalleus, kappaleiden jälkikäsittelyn ja puhdistuksen tarve, vähäinen materiaalivaihtoehtojen määrä, kappaleiden tukirakenteiden sekä jälkikövetuksen tarve. (Loughborough University.)

Monissa uudemmissa valokovetus altaassa prosesseissa käytetään energian lähteenä valodiodeja (LED-valoja) yhdistettynä DLP-teknologiaan (digital light processing). Tällä tekniikalla saadaan kovetettua kokonainen kerros yhdellä kertaa, mikä tekee prosessista huomattavasti nopeamman verrattuna siihen, että pyyhittää pinta pistepisteeltä laserilla. DLP-teknologian korkea resoluutio mahdollistaa tarkkojen, pieniä yksityiskohtia sisältävien osien valmistuksen, mutta se on huonosti skaalattavissa suurelle pinnalle ja tulee tällöin teknisesti haastelliseksi ja kalliiksi. (Wohlers Associates Inc. 2020, 58.)

Monilla valokovetus altaassa tekniikkaan perustuvilla laitteilla voidaan tulostaa 10 µm paksuista kerrosta, mikä on ohuempaa kuin useimmilla muilla lisäävän valmistuksen tekniikoilla. Monifotonililografia systeemeillä voidaan tuottaa kappaleita alle mikrometrin (submikronin) resoluutiolla esimerkiksi mikroelektronikan ja lääketieteen sovellutuksiin (kuva 9). (Wohlers Associates 2020, 58.)



Kuva 9. Vasemmalla Nanoscriben 2-fotoni polymerisaatiolla valmistettu skaffoldi eli tukirakenne (7,5 x 7,5 x 3,5 mm) (Nanoscribe) ja oikealla kappaleen valmistusta valokovetus altaassa tekniikalla (Redwood).

Valokovetus altaassa tekniikka sopii tarkkojen prototyyppien, mallien ja muottien valmistukseen niin koruteollisuuteen kuin hammaslääketieteellisiin ja lääketieteellisiin sovelluksiin. Menetelmällä voidaan valmistaa myös käyttöesineitä, kuten kuulolaitteiden kuoria tai biohajoavia tukirakenteita kudosteknologian käyttöön.



### 3 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN HYÖDYT

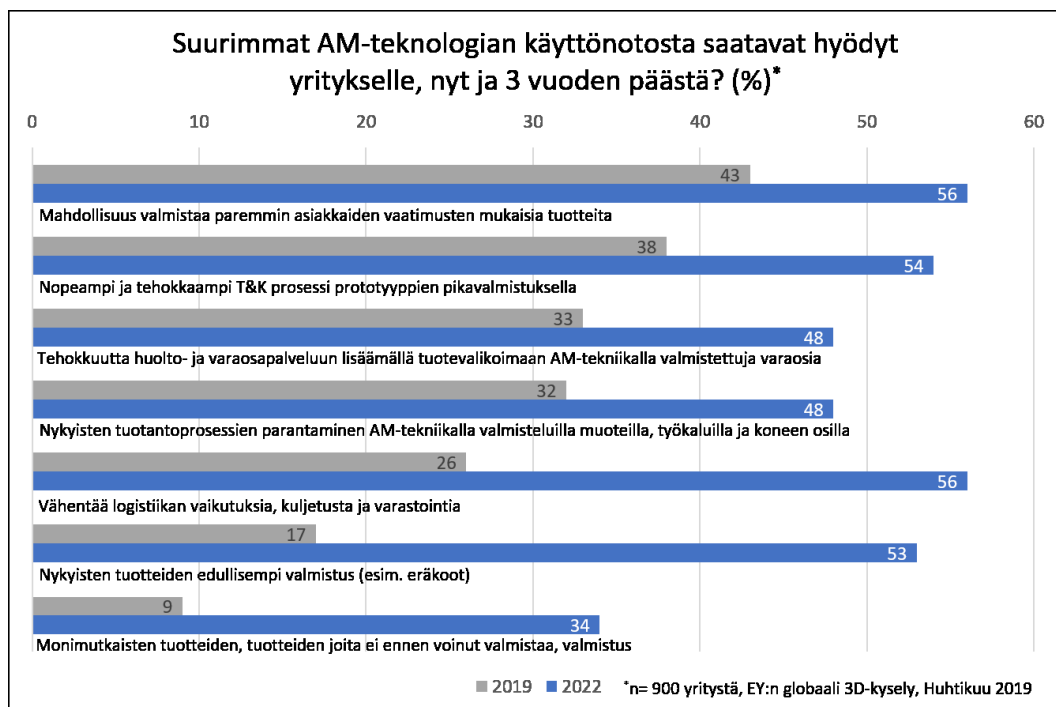
Materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä on monia etuja verrattuna perinteisiin materiaalia poistaviin tai muovaaviin valmistusmenetelmiin, vaikkakin lisäävän valmistuksen menetelmiinkin liittyy monia rajoitteita. Onkin tärkeää tuntea lisäävän valmistuksen mahdollisuudet ja haasteet, jotta voi löytää ne sovelluskohteet, joissa on kannattavaa käyttää lisäävää valmistusta perinteisen valmistuksen sijasta tai ohessa.

Materiaalia lisäävän valmistuksen käytön etuja ovat muun muassa:

- Materiaalisäästö, sillä valmistuksessa syntyy hyvin vähän hukkamateriaalia ja perinteisiä valmistusmenetelmiä vapaampi kappaleiden muotojen optimointi mahdollistaa sen, että materiaalia käytetään vain siellä missä sitä kappaleen toiminnallisuuden vuoksi tarvitaan. Kappaleita voidaan keventää esimerkiksi käyttäen kennomaisia sisärakenteita tai yhdistäen useita kappaleita yhdeksi osaksi, jolloin myös kokoonpantavuus paranee. (Alonen ym. 2016, 6.)
- Mahdollisuus valmistaa kappaleisiin hyvinkin monimutkaisia rakenteita, joiden valmistaminen perinteisin menetelmin on hankalaa tai jopa mahdotonta. Monimutkaisten sisäisten rakenteiden valmistus mahdollistaa kappaleiden toiminnan tehostamisen, esimerkiksi jäähdytyskanavien tai erilaisten virtauskanavien avulla voidaan lisätä jäähdytyspinta-alaa tai hallita paremmin kaasun- tai nestevirtauksia. (Alonen ym. 2016, 6-7.)
- Valmistuksen sekä tuotekehityksen tehokkuus ja joustavuus. Menetelmä soveltuu erityisen hyvin pienille tuotantomäärille ja valmistus voidaan tehdä nopeasti ilman kalliita muottikustannuksia. Digitaalisessa muodossa oleville malleille muutosten tekeminen on helppoa ja nopeaa. Lisäävä valmistustekniikka mahdollistaa myös yksilöllisten (räätälöityjen) tuotteiden valmistuksen samassa tuotantoerässä. (Alonen ym. 2016, 6-7.)
- Tuotteita voidaan tehdä lähellä käyttökohdetta ja tilattaessa, jolloin varastoinnin tarve pienenee, logistiikkaketju lyhenee ja saatavuus paranee.
- Mahdollisuus valmistaa kappaleita, kuten esimerkiksi varaosia nopeammin ja kokonaistaloudellisemmin silloin, kun alkuperäisiä varaosia tai niiden valmistuksessa tarvittavia työkaluja, muotteja tai laitteita ei enää ole käytettävissä.

- Suunnittelun vapaus, sillä suunnittelussa ei tarvitse huomioida perinteisten valmistusmenetelmien ja aihoiden asettamia rajoitteita. Suunnittelun lähtökohtana on kappaleen ja kokoonpanon optimaalinen muoto sekä toiminnallisuus eikä valmistusmenetelmä itse, vaikkakin tiettyjä valmistusteknisiä asioita tulee ottaa huomioon myös lisäävän valmistuksen tekniikalla valmistettavan kappaleen suunnittelussa. (Alonen ym. 2016, 10-11.)

Kansainvälisen Ernst & Young (EY) yrityksen tekemässä laajassa kyselytutkimuksessa, Global 3D Printing Report 2019, selvitettiin mitä lisäävään valmistukseen liittyviä hyötyjä yritykset pitivät tärkeimpinä tutkimuksen tekohetkellä vuonna 2019 sekä tulevaisuudessa vuonna 2022 (kuvio 8). Vuonna 2019 suurin hyöty koettiin syntyvän kyvystä tuottaa paremmin asiakkaiden vaatimusten mukaisia lopputuotteita sekä tuotekehityssyklin nopeutumisen ja tehostumisen kautta. Kuviosta 8 voidaan nähdään, että hyötyjen oletetaan myös kasvavan kaikilla kyselyssä kysytyillä alueilla. (Valdivieso 2019b.)



Kuvio 8. Suurimmat AM-tekniikan käyttöönotosta saatavat hyödyt yritykselle (mukailtu Valdivieso 2019b).

Suurimpina hidasteina materiaalia lisäävän valmistuksen käyttöönotolle tutkimuksessa nähtiin materiaalien ja laitteiden hinta sekä puutteet tiedoissa ja osaamisessa. Edellä mainitun EY:n kyselytutkimuksen mukaan tutkimukseen vastanneista 90 % piti

tulostusmateriaaleja yhä liian kalliina ja 87 % piti laitteistojen hintaa liian korkeana. Lisäksi 50 % vastanneista koki, että joko suunnittelu- tai valmistusosaamisessa on sellaisia puutteita, jotka jarruttavat investointien tekemistä AM-tekнологiaan. (Valdivieso 2019b.)

Lisäävän valmistuksen haasteina tällä hetkellä nähdään vielä muun muassa se, että teknologia on yhä nopean kehityksen ja muutoksen vaiheessa. Haasteita on muun muassa sarjatuotannon tehokkuudessa, taloudellisuudessa ja standardoinnissa, mutta nämä haasteet ovat pääosin ratkaistavissa teknologian käytön laajentumisen ja vakiintumisen myötä, kun osaaminen ja työmenetelmät kehittyvät. Tarvitaan nopeampaa tulostusta sekä kapasiteetiltaan isompia laitteita, jotta saadaan enemmän tehokkuutta ja taloudellisuutta valmistukseen. (Wohlers Associates Inc. 2020, 296.)

## 4 MALLIKAPPALEESTA 3D-TULOSTEEKSI

Lisäävällä valmistusmenetelmällä ei yleensä ole järkevää eikä kannattavaakaan tehdä täysin samanlaista kappaletta kuin perinteisellä valmsitusmenetelmällä valmistettaisiin. Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa moninaiset muodot ja rakenteet sekä raaka-aineen täsmäkäytön, joten kappale kannattaa suunnitella käyttökohteen vaatimusten mukaisesti huomioiden valitun AM-menetelmän erityispiirteet. (Alonen ym. 2016, 5-9.)

Valmistettavan kappaleen käyttökohde ja -ympäristön vaatimukset esimerkiksi kemikaalien kestävyiden ja mekaanisen lujuuden suhteen määrittävät valmistukseen soveltuvan AM-menetelmän ja käytettävän raaka-aineen. Kappaleen 3D-tulostus on vain yksi osa monivaiheista valmistusprosessia, jonka työvaiheiden määrä ja sisältö ovat riippuvaisia käytettävästä lisäävän valmistuksen menetelmästä, materiaalista sekä muista valmistettavaan kappaleeseen liittyvistä tekijöistä. Jotkut prosessit tai prosessin osat voivat sisältää paljon manuaalista käsityötä, kun taas jotkut prosessit voivat olla jo korkeasti automatisoituja. Laadunvarmistus on tärkeä prosessin työvaiheisiin kuuluva osa, jolla varmistetaan se, että saadaan halutunlainen ja käyttökohteeseen sopiva kappale.

### 4.1 Suunnitteluvaihe

Materiaalia lisäävässä valmistuksessa tarvittava 3D-malli voidaan tehdä piirtämällä 3D-mallinnusohjelmistolla tai olemassa olevasta kappaleesta 3D-skannaamalla (takaisin mallinnus, reverse engineering) tai valokuvista kokoamalla. 3D-malli optimoidaan valmistettavan kappaleen käyttökohteen vaatimusten ja valmistusmenetelmän mukaisesti. Topologian optimoinnilla kappaleen materiaalinkäyttöä optimoidaan niin, että saadaan kappaleeseen kevennystä rakenteen lujuuden kärsimättä. Simulointiohjelmien avulla voidaan tutkia erilaisten rakenneratkaisuiden ja optimoinnin vaikutusta valmiin kappaleen kestävyteen.

3D-malli muunnetaan tulostusta varten sovittuun tiedostomuotoon. Tällähetkellä ehkä yleisimmin käytetty tiedostomuoto on STL-formaatti, jolla määritetään 3D-mallin geometria. STL-formaatin rinnalle on kehitetty AMF-formaatti, joka sisältää geometrian 3D-pintatiedon sekä tuen värien, materiaalien, ristikkorakenteiden, tekstuurin, kokoonpanojen ja metatietojen välittämiseen. STL- ja AMF-formaatin lisäksi tiedon

siirtoon voidaan käyttää mm. IGES-, STP- tai OBJ-formaattia. (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017, 11-12.)

Koska materiaalia lisäävä valmistus tapahtuu kerros kerrokselta, täytyy .STL, .AMF tai muussa tiedostoformaattissa oleva malli viipaloida tulostuskerroksiksi. Ennen tulostusta mallille määritetään mahdolliset valmistustuet ja niiden sijoittelu, tulostuskerrosten paksuus sekä muut tulostusprosessiin vaikuttavat tekijät. Tämän tiedoston perusteella 3D-tulostuslaite valmistaa kappaleen. (González & González Álvarez 2018, 10–11.)

## 4.2 Valmistusvaihe

Kun tulostuksen prosessiparametrit on säädetty, kappale orientoitu optimaaliseen tulos-  
tasentoon ja paikkaan tulostusalustalla ja valmistusraaka-aine on syöttöastiassa, voi-  
daan tulostusprosessi käynnistää. Käytettävän lisäävän valmistuksen menetelmän mu-  
kaisesti raaka-aine laitetaan joko sellaisenaan tai esikäsiteltynä (esimerkiksi lämmitet-  
tynä, seulottuna tai kuivattuna) raaka-ainesäiliöön. Raaka-aineen laadun tulee olla var-  
mennettu menetelmän vaatimusten mukaisesti ennen tulostusprosessin aloitusta. Vaa-  
joki & Metsä-Kortelainen 2016, 6–7.)

Kappaleen valmistuksessa käytettävän raaka-aineen hallinta aina hankinnasta jätteiden  
hävitykseen asti on oleellinen osa prosessia. Raaka-aineen oikealla käsittelyllä ja  
laadunvalvonnalla varmistetaan niin työturvallisuus kuin se, että prosessissa käytetään  
valmistettavan kappaleen käyttökohteen vaatimusten mukaista materiaalia. (Vaajoki &  
Metsä-Kortelainen 2016, 6–7.)

AM-menetelmästä ja -laitteistosta riippuen tulostusprosessia voidaan seurata erilaisilla  
menetelmillä. Kappaleen tulostuksen aikaisella online-monitoroinnilla seurataan tulos-  
tustapahtumaa ja tarvittaessa voidaan joko tehdä korjauksia parametreihin tai keskeyt-  
tää viollisen kappaleen valmistus. Tulostuksesta kerätyn datan avulla voidaan myös tar-  
vittaessa jälkikäteen tarkastaa tulostuksen kulku ja havaita poikkeamia. (Vaajoki &  
Metsä-Kortelainen 2016, 7–8.)

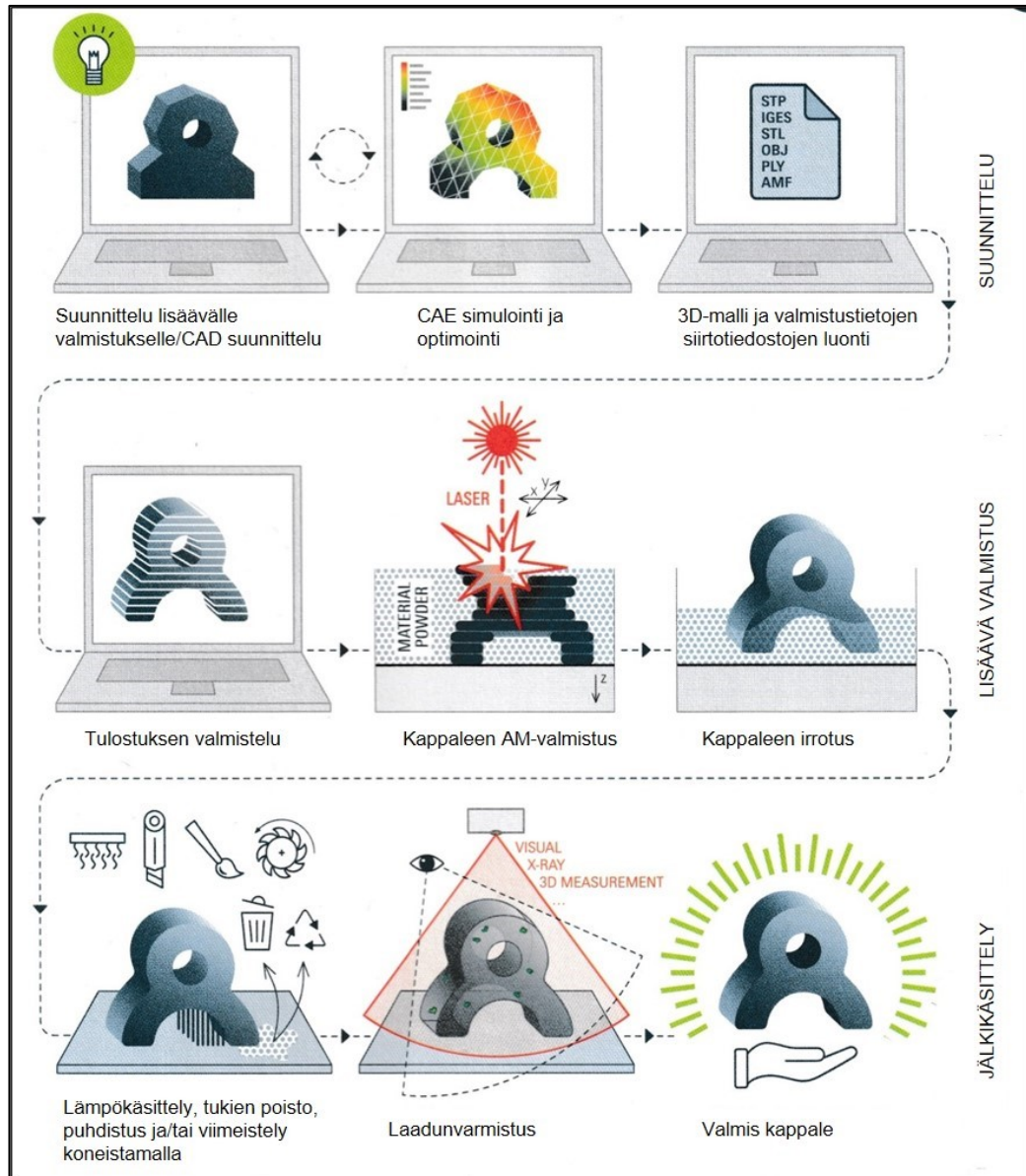
Tulostuksen jälkeen kappale poistetaan laitteesta. Käytettävän AM-menetelmän mukaan  
kappale on poistettavissa joko suoraan tai vasta kappaletta ympäröivän ylimääräisen  
raaka-aineen poiston jälkeen. Laitteisto puhdistetaan ja valmistellaan seuraavaa tulos-  
tusta varten ja tulosteet siirretään jälkikäsitteilyyn. (Vaajoki & Metsä-Kortelainen 2016, 8.)

### 4.3 Jälkikäsittely

Käytettävä lisäävän valmistuksen menetelmä sekä kappaleen loppukäyttökohde määrittävät tarvittavat jälkikäsittelytoimet; kappaleen irrottaminen tulostusalustasta, puhdistus ylimääräisestä raaka-aineesta, pesu, tukirakenteiden poisto, erilaiset lämpökäsittelyt, koneistus, hionta, kiillotus ja pinnoitus. Esimerkiksi metallien jauhepetisulatukseen perustuvassa valmistusprosessissa käytetään lämpökäsittelyitä vähentämään kappaleen jäännösjännityksiä ja parantamaan kappaleen mekaanisia ominaisuuksia. Metallikappaleista tukirakenteiden poisto on usein työläs ja aikaavievä jälkikäsittelytoimenpide. Jälkikäsittelyllä voidaan parantaa kappaleen niin mekaanisia ominaisuuksia ja pinnanlaatua kuin visuaalisuuttakin. (Vaajoki & Metsä-Kortelainen 2016, 10.)

Valmistusprosessin viimeinen vaihe ja laadunvarmistuspiste on lopputarkastus, jossa varmistetaan, että kappale on rakenteeltaan, mitoiltaan ja pinnanlaadultaan sille asetettujen vaatimusten mukainen. Tarkastus voi olla yksinkertainen silmämääräinen tarkastelu tai työntömitalla tehty mittausta. Tarkempi kuva kappaleen mitoista ja mahdollisista vääristymistä saadaan käyttämällä esimerkiksi laserskannausta tai koordinaattimitausta. Ainetta rikkomattomilla tarkastusmenetelmillä (NDT, non-destructive testing) selvitetään kappaleessa mahdollisesti olevia virheitä ja epäsäännöllisyyksiä, kuten sisäisiä halkeamia, huokosia tai sisäpuolisiin muotoihin jäänyt raaka-aine. Tällaisia ainetta rikkomattomia menetelmiä ovat esimerkiksi röntgentomografia, ultraääni-, pyörrevirta- ja radiologiset mittaukset sekä tunkeumanesteet. Kaikki perinteiset ainetta rikkomattomat menetelmät eivät sovellu hyvin AM-tekniikalla valmistettujen kappaleiden tarkastamiseen. Esimerkiksi tunkeumanesteet eivät sovellu hyvin työstämättömien kappaleiden tarkastukseen kappaleen karkean pinnan vuoksi. Tarkastusmenetelmiä kehitetäänkin jatkuvasti, jotta voitaisiin luotettavasti tarkastaa myös AM-tekniikalla valmistettuja kappaleita. (Vaajoki & Metsä-Kortelainen 2016, 22–24.)

Kuviossa 9 on esitetty AM-prosessin suunnittelun, valmistuksen ja jälkikäsittelyn vaiheet tiivistetysti ja kuviossa 10 on esitetty viitteellisesti esimerkkinä jauhepetisulatustekniikalla valmistettavan metallikappaleen valmistusprosessin työvaiheet.



Kuvio 9. Materiaalia lisäävän valmistuksen prosessi (mukailtu Ritter 2019b, 5).

| AM-kappaleen suunnittelu  | Raaka-aineen hallinta   | AM-kappaleen valmistus   | Jälkikäsittely  | Lopputarkastus   | Kokoonpano, käyttö |
|---|---|--|---|--|--------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• CAD</li> <li>• Reverse engineering</li> <li>• Topologian optimointi</li> <li>• Tukirakenteen suunnittelu</li> <li>• STL-muunnos</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hankinta, valmistus</li> <li>• Seulonta</li> <li>• Kuivaus</li> <li>• Säiliön täyttö</li> <li>• Laadun monitorointi</li> <li>• Hävittäminen</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tukirakenteen suunnittelu</li> <li>• Prosessiparametrien suunnittelu</li> <li>• Laitteen valmistelu</li> <li>• Tieodoston siirto laitteeseen</li> <li>• Valmistus</li> <li>• Jauheen poisto ja kierrätys</li> <li>• Kappaleen poisto laitteesta</li> <li>• ONLINE monitorointi</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Jännityksenpoistohehkutus</li> <li>• Lämpökäsittely</li> <li>• Tukirakenteiden poisto</li> <li>• Koneistus</li> <li>• Ominaisuuksien parantaminen (pinnanlaatu, puristusjännitys)</li> <li>• Hionta</li> <li>• Kiillotus</li> <li>• Pinnoitus</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mittatarkkuus</li> <li>• Pinnanlaatu</li> </ul> |                    |

Kuvio 10. Metallikappaleen valmistus jauhepetisulatustekniikalla (mukailtu Vaajoki & Metsä-Kortelainen 2016, 5).

Koko prosessin läpi kulkeva laadunvarmistusjärjestelmä minimoi valmiin kappaleen virheet ja maksimoi kappaleen sopivuuden käyttökohteeseen. Suunnittelun aikaisella laadunvarmistuksella luodaan pohja onnistuneelle valmistusprosessille. Esimerkiksi mittavirhe mallissa voi estää kappaleen asennuksen käyttökohteeseen, rakenteen liika keventäminen tai epäedullinen tulostusasento voivat heikentää kappaleen kestävyyttä ja aiheuttaa vaurioita käyttökohteessa. Raaka-aineen laadunvalvonta on myös tärkeää, sillä huonolaatuinen raaka-aine voi johtaa epäonnistuneeseen tulostusprosessiin. Tulostusprosessin aikaisella laadunvalvontajärjestelmällä voidaan vähentää prosessin jälkeistä tarkistusta ja näin nopeuttaa koko valmistusprosessia.



## 5 TEKNOLOGIAN KYPSYYDEN ARVIOINTI

Teknologian kypsyyden arviointia (Technology Readiness Assessment, TRA) käytetään vähentämään teknologian kehitykseen ja käyttöönottoon liittyviä riskejä. Teknologian kypsyydystason (Technology Readiness Level, TRL) määrittäminen on työkalu, jolla voidaan arvioida organisaation tutkimus- ja kehitystyön edistymistä. Määrittämällä teknologialle TRL voidaan tuottaa yleinen ymmärrys teknologian tilasta ja käyttää tätä tietoa hyväksi mm. riskienhallinnassa sekä tehtäessä teknologian rahoitukseen ja käyttöönottoon liittyviä päätöksiä. (Hook-Barnard, Posey Norris & Alper 2013.)

Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallintovirasto NASA (National Aeronautics and Space Administration) kehitti TRL-luokitukseen perustuvan konseptin jo 1970-luvun puolivälissä luodakseen uusien teknologioiden arviointiin entisiä menetelmiä tehokkaamman mallin. NASAn ja Yhdysvaltojen puolustusministeriön (Department of Defence, DOD) lisäksi TRL-luokitusta käyttävät tutkimus- ja kehitystyön hallinnointityökaluna mm. UK:n puolustusministeriö, Nato, Australian puolustusorganisaatiot ja Turkin puolustusteollisuus sekä Euroopan avaruusjärjestö ESA (European Space Agency). (Ristinen 2010, 6.)

Myös monet muut organisaatiot ovat implementoineet tämän alun perin avaruus- ja sotilasteknologioiden hallintaan kehitetyn mallin. Euroopan Unioni (EU) on muokannut TRL-asteikon määritelmät kuvaamaan paremmin muidenkin teollisuuden alojen kuin avaruustutkimuksen kypsyyttä. (TWI Ltd.) ISO-standardi 16290:2013 (Space systems — Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment) määrittää TRL-luokat sekä niiden arviointikriteerit ja on pääasiassa tarkoitettu avaruudessa käytettävälle tekniikalle, mutta määritelmiä voidaan käyttää hyväksi myös monissa muissa sovelluksissa (ISO 16290:2013).

TRL määritetään teknologian kypsyyden arvioinnissa (TRA), joka on muodollinen, systemaattinen, mittaristoon perustuva prosessi teknologian valmiustason arviointiin ja raportointiin. TRL-luokan käyttö mahdollistaa yhdenmukaisen, samanmuotoisen teknisen kypsyyden käsittelyn kaiken tyyppisille teknologioille. Eri organisaatiot käyttävät TRL-mittaristoa eri tarkoituksiin ja käytössä on joitakin rinnakkaisia systeemejä TRL:n määrittämiseen. NASA, Yhdysvaltojen puolustusministeriö sekä EU käyttävät 9 portaista järjestelmää, jota käytetään erityisesti teknologian kehittämisen riskienhallinnassa. Tasolla 9 on valmiustasoltaan kypsä teknologia. Joidenkin teknologioiden, kuten kaupallisten, markkinaorientoitujen teknologioiden arvioinnissa käytetään myös 5 tai 7 portaista TRL-

järjestelmää, jossa tasot on nimetty helpommin ymmärrettävällä tavalla. Tällöin jokainen taso sisältää useita toimenpiteitä ja siirtyminen tasolta toiselle vaatii ison panostuksen. (Ristinen 2010, 6–7.)

Taulukoon 4 on listattu vasemmalle NASAn ja DOD:n, ja oikealle EU:n TRL-asteikon määritelmät. Vaatimukset ovat molemmissa asteikoissa samat, mutta määritelmät poikkeavat termeiltään hieman toisistaan. Alkuperäiset englanninkieliset määritelmät on esitetty liitteessä 2. Taulukosta voidaan havaita, että TRL 1 vastaa suunnilleen perustutkimusta, TRL 2–3 soveltavaa tutkimusta, TRL 3–5 kokeellista kehittämistä, TRL 6–8 demonstrointia ja TRL 9 täysimittaista käyttöönottoa. Karkeasti voidaan jakaa kypsyydetasot 1–3 tutkimukseen, 4–6 kehitystoimintaa ja 7–9 käyttöönottoon liittyviin vaiheisiin.

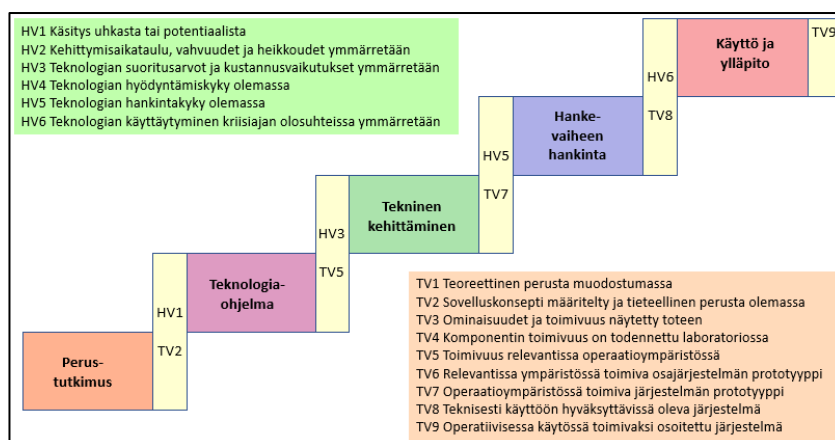
Taulukko 4. NASAn ja DOD:n sekä EU:n määritelmät teknologian kypsyydetasolle (TRL) (mukaillen Hook-Barnard ym. 2013; Horizon 2020).

|              | TRL | NASAn ja DOD:n määritelmä  | EU:n määritelmä  |
|--------------|-----|--|--|
| Tutkimus     | 1   | Peruseriaatteet tunnistettu ja raportoitu  | Peruseriaatteet tunnistettu  |
|              | 2   | Teknologiakonsepti ja/tai sovelluskonsepti on laadittu   | Teknologiakonsepti on laadittu   |
|              | 3   | Konsepti on analyttisesti ja kokeellisesti todennettu huomioiden kriittiset toiminnot ja/tai erityispiirteet   | Konsepti on kokeellisesti todennettu   |
| Tuotekehitys | 4   | Komponentin ja/tai testijärjestelmän toimivuuden todentaminen laboratorioympäristössä                          | Teknologian toimivuus on todennettu laboratoriossa   |
|              | 5   | Komponentin ja/tai testijärjestelmän toimivuuden todentaminen asiaan kuuluvassa (todellisessa) ympäristössä    | Teknologian toimivuus on todennettu asiaan kuuluvassa (todellisessa) ympäristössä  |
|              | 6   | Järjestelmä/osajärjestelmän mallin tai prototyypin demonstraatio asiaan kuuluvassa (todellisessa) ympäristössä | Teknologian toimivuus on demonstroitu asiaan kuuluvassa (todellisessa) ympäristössä  |
| Käyttöönotto | 7   | Järjestelmän prototyypin demonstrointi toimintaympäristössä  | Systeemin prototyyppi on demonstroitu toimintaympäristössä   |
|              | 8   | Varsinainen järjestelmä on osoitettu valmiiksi ja toimivaksi testeillä ja demonstraatioilla                    | Järjestelmä on valmis ja toimiva   |
|              | 9   | Operatiivisessa käytössä toimivaksi osoitettu järjestelmä  | Järjestelmän lopullinen toimivuus on todennettu sen toimintaympäristössä (kilpailukykyinen teollinen valmistus; avaruudessa) |

Perustutkimus (TRL 1) koostuu teoreettisesta tai kokeellisesta työstä, jossa tavoitteena on hankkia uutta tietoa ilmiöiden tai havaittavissa olevien tosiasioiden peruseriaateista. Perustutkimuksella ei ensisijaisesti pyritä mihinkään käytännön sovellukseen tai

käyttötapaan. Soveltava tutkimus (TRL 2–3) on ensisijaisesti tiettyyn käytännön tarkoitukseen tai tavoitteeseen liittyvää uuden tiedon hankkimista. Kokeellisen kehittämisen (TRL 3–5) vaiheiden työt pohjautuvat tutkimukseen tai käytännön kokeista saatuihin tietoihin ja niiden tavoitteena on käynnistää uusien materiaalien, laitteiden tai tuotteiden valmistus sekä uusien prosessien, järjestelmien tai palveluiden käyttöönotto tai jo olemassa olevien merkittävä parantaminen. Kokeelliseen kehittämiseen voi sisältyä laitteet, joilla esitellään uuden käsitteen tai uuden tekniikan toimintaa asiaankuuluvassa tai tyyppillisessä ympäristössä. Demonstraatioissa (TRL 6–7) esitellään uuden käsitteen tai uuden tekniikan toimivuutta asiankuuluvassa tai tunnusomaisessa ympäristössä käyttäen teknistä esittelylaitetta, demonstraattoria tai prototyyppiä. TRL 8 sisältää varsinaisen tuotteen demonstraatiot ja testit. TRL 9 kuvaa valmista ja operatiivisessa käytössä toimivaksi osoitettua tuotetta. Näin siis kehittyessään teknologia käy läpi peräkkäisten kypsyystasojen lähtien periaatteiden esittämisestä edeten erilaisten laboratoriotutkimusten, prototyyppien, testien ja demonstraatioiden kautta teknologian toimivuuden osoittamiseen todellisessa käyttöympäristössä ja päätyen operatiiviseen käytössä toimivaksi osoitetuksi järjestelmäksi tai komponentin laajamittaiseen teolliseen tuotantoon soveltuvaksi menetelmäksi. (Talliniemi 2016.)

Puolustusvoimien Pääesikunnan laatimassa Puolustusvoimien teknologiastrategia 2012 esitellään kuviossa 11 näkyvät DODn käyttämiin TRL-tasoihin perustuvat toimitusvalmiustasot (TV), jotka käytännössä kuvaa osajärjestelmätoimittajan valmiutta toimittaa laitteisto järjestelmään. Tasot eivät kuitenkaan kuvaa hankkivan organisaation kykyä toimia kyseisen teknologian osaavana ostajana (hankintavalmius, HV). Koska puolustusvoimat on ensisijaisesti teknologian ostaja, eikä kehittäjä, pelkkä toimitusvalmius ei ole riittävä teknologisen kypsyyden kuvaaja. (Pääesikunta 2012, 11.)

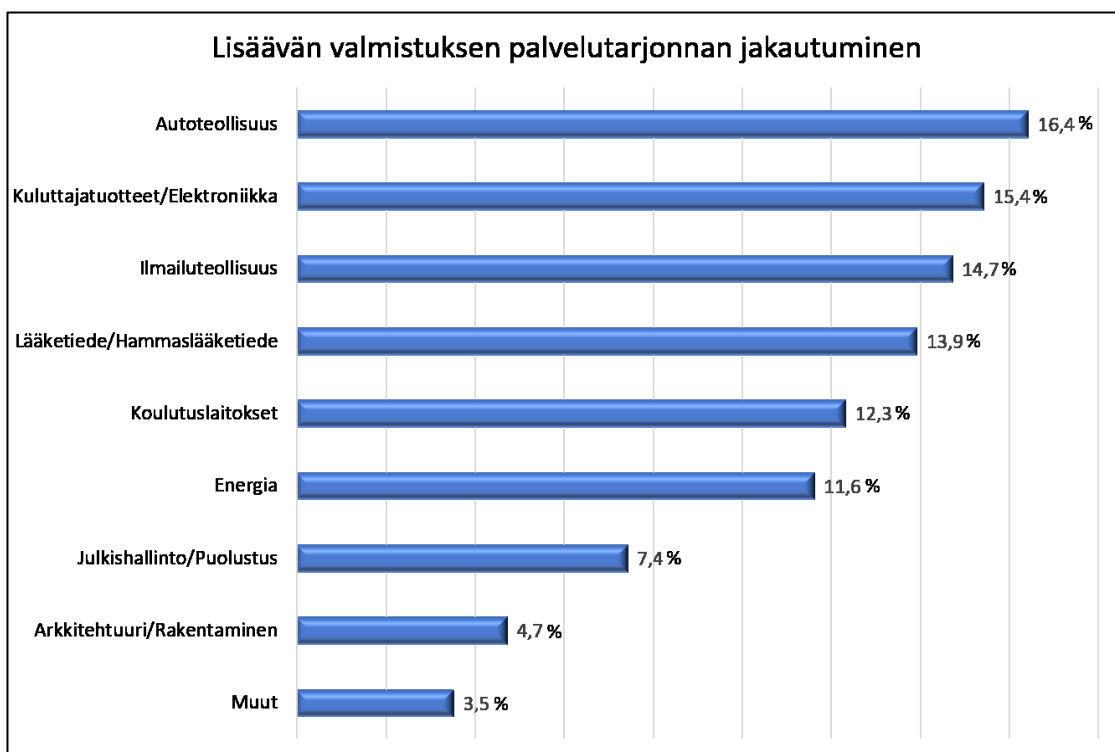


Kuvio 11. Teknologian hankinta- ja toimitusvalmiustasojen kuvaus (Pääesikunta 2012).

## 6 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN SOVELLUTUKSET JA KÄYTTÖ SIVIILISEKTORILLA

Amerikkalainen konsulttiyritys Wohlers Associates Inc. on 25 vuoden ajan kerännyt tietoa lisäävän valmistuksen alan toimijoilta ja analysoinut AM-tekniologiassa tapahtuneita muutoksia ja kehitystä globaalisti. Vuoden 2020 Wohlers Report -raportissa esitetään tuloksia kyselytutkimuksesta, johon oli osallistunut yhteensä 283 lisäävän valmistuksen toimijaa teollisten AM-laitteistojen valmistajista, AM-palveluntuottajista sekä kolmannen osapuolen, kuten materiaalien ja pöytämallisten 3D-tulostimien tuottajista. (Wohlers Associates Inc. 2020, 22.)

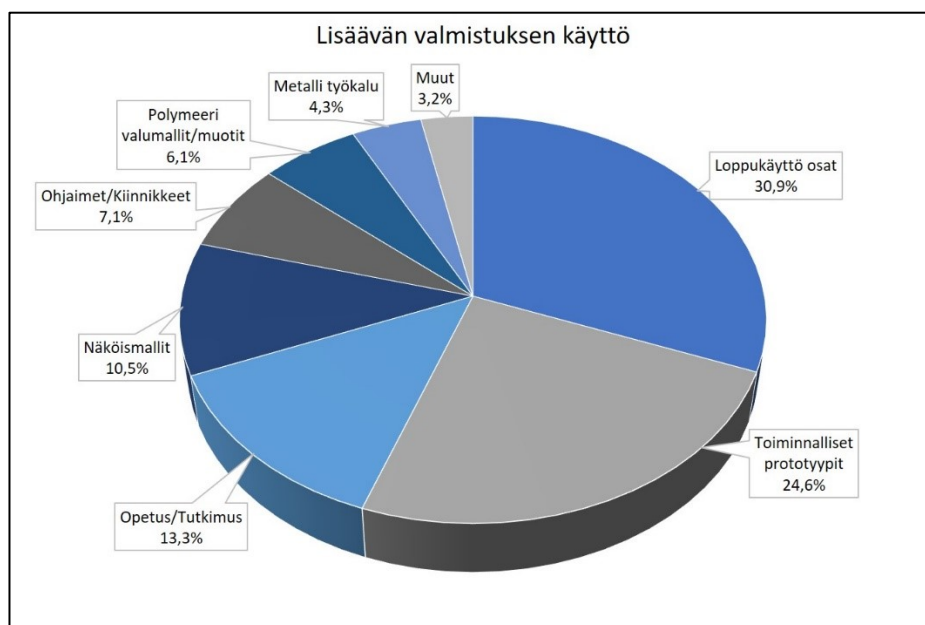
Kyselyssä pyydettiin vastaajia ilmoittamaan mitä teollisuuden aloja he palvelevat ja arvioimaan niistä kustakin saamansa tuotot prosentuaalisesti. Annetut vastaukset ovat nähtävissä kuviossa 12. Eniten lisäävä valmistusta käytetään autoteollisuudessa ja seuraavana tulevat kuluttajatuotteet/elektroniikka ja kolmantena ilmailuteollisuus. (Wohlers Associates Inc. 2020, 22.)



Kuvio 12. Lisäävän valmistuksen kysynnän mukaisen palvelutarjonnan jakautuminen eri aloille (mukailtu Wohlers Associates Inc. 2020, 23).

Muut kategoriat sisältää alatyökalut, jotka eivät sopineet kyselyssä nimettyihin kategorioihin, kuten mm. kaivosteollisuus, kemikaalit, veden käsittely sekä puu- ja paperiteollisuus. Kuluttajatuotteet/elektroniikka kategorian kuuluvat tuotteet ovat pääasiassa sellaisia, joita tuotetaan isoissa määrin ja joiden elinkaari on melko lyhyt. Tällöin lisäävän valmistuksen tuoma lisäarvo on tuotekehityksen tehostuminen sekä massakustomoinnin mahdollisuus. Autoteollisuudessa on investoitu lisäävään valmistukseen jo 1980-luvun loppupuolelta asti. Myös ilmailuteollisuudessa on otettu lisäävän valmistuksen menetelmiä käyttöön jo 1990-luvulla. (Wohlers Associates Inc. 2020, 23–24.)

Wohlersin Associates Inc:n (2020, 25–26) kyselytutkimuksen vastanneiden mukaan heidän asiakkaistansa noin 31 % käyttää lisäävää valmistusta lopputuotteiden ja liki 25 % toiminnallisten prototyyppien valmistukseen. Kolmanneksi yleisin lisäävän valmistuksen käyttökohde on koulutus ja tutkimus, jonka osuus oli noin 13 %. Kuviossa 13 on esitetty piirakkakaaviona, kuinka yritykset käyttävät lisäävää valmistusteknologiaa. On hyvä huomata, että lisäävällä valmistusmenetelmällä tehtyä kappaletta käytetään usein kahdessa tai useammassa käyttötarkoituksessa, esimerkiksi sekä ulkoasun tarkasteluun että toiminnallisuuden testaukseen.



Kuvio 13. Lisäävän valmistuksen sovelluskohteet (mukailtu Wohlers Associates Inc. 2020, 26).

Wohlers Associates Inc. on kerännyt myös tietoa myydyistä teollisista lisäävän valmistuksen laitteistosta. Kuviossa 14 on esitetty kumulatiivinen laskelma (prosentuaalinen jakauma) eri puolille maailmaa asennetuista laitteistoista aina lisäävän valmistuksen käyttöönotosta alkaen vuoteen 2019 asti. Käytettynä myydyt laitteet eivät ole laskelmassa mukana ja luvut perustuvat laitevalmistajilta saatuihin tietoihin. (Wohlers Associates Inc. 2020, 32.)



Kuvio 14. Teollisten lisäävän valmistuksen laitteiden jakauma maittain (mukailtu Wohlers Associates Inc. 2020, 32).

USA:ssa on kolme kertaa enemmän teollisen tason AM-laitteita kuin Kiinassa, jossa niitä on toiseksi eniten maailmassa. Kiinalla, Japanilla ja Saksalla on käytössä huomattavasti enemmän laitteita kuin useimmilla muilla mailla. Edelliseen laskelmaan verrattuna USA:n osuus kokonaisuudesta pieneni 35,3 %:sta 34,4 %:iin ja samalla muut-ryhmän osuus kasvoi 13,9 %:sta 14,5 %:iin. Ryhmään muut kuuluu monia maita, joissa on vielä tällä hetkellä suhteessa vähemmän asennettuja laitteita, mutta määrät ovat kasvussa lisäävän valmistuksen omaksumisen myötä. (Wohlers Associates Inc. 2020, 32.)

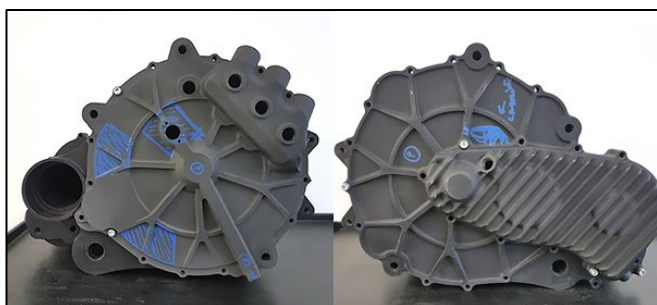
## 6.1 Materiaalia lisäävän valmistuksen sovellukset

Materiaalia lisäävää valmistusta käytetään tänä päivänä niin ideoiden mallinnuksessa, prototyyppien ja työkalujen valmistuksessa kuin lopputuotteiden tuotannossa. Yhä useampi kolmiulotteiseen kappaleeseen liittyvä tuotantohaaste voidaan ratkaista nopeammin, paremmin ja usein myös edullisemmin käyttämällä lisäävää valmistusteknologiaa. (Wohlers Associates Inc. 2020, applications liite.)

### 6.1.1 Visuaaliset mallit ja toiminnalliset prototyypit

Prototyypit ovat olleet ensimmäisiä AM-tekniikan sovelluskohteita, ja ne ovat edelleen yksi suosituimmista työkaluista tuotekehityksessä. 3D-tulostamalla valmistetuilla prototyypeillä voidaan nopeasti ja helposti visualisoida ideoita, testata kappaleen toiminnallisuutta sekä sopivuutta ja asennettavuutta käyttökohteeseen.

3D-tulostettujen visuaalisten mallien avulla voidaan havainnollistaa suunnittelua sekä selvittää CAD-malleja ja teknisiä piirustuksia, ja näin nopeuttaa tuotekehitysprosessia ja optimoida lopullisen tuotteen ulkoasua. Malleja voidaan käyttää myös johdon tai asiakkaiden kanssa käytävissä neuvotteluissa. Toiminnallisten prototyyppien avulla voidaan identifioida mm. toleranssit sekä testata ja validoida suunnitellun kappaleen toimivuus ja sopivuus kokoonpanoon ennen tuotannon aloitusta. (Wohlers Associates Inc. 2020, 26–27.)



Kuva 10. Moottorin kotelon toiminnallinen prototyyppi (CRP Meccanica 2018).

Kuvassa 10 on esimerkki moottoripyörän sähkömoottorin kotelon suunnittelun apuna olleesta SLS-tekniikalla komposiitista valmistetusta toiminnallisesta prototyypistä, jota on

käytetty kotelon asennettavuuden ja käytettävyyden testaukseen (CRP Meccanica 2018). Toiminnallisten prototyyppien valmistamisella säästetään kustannuksissa, koska niiden avulla voidaan minimoida virheellisen lopputuotteen valmistuksesta aiheutuva uudelleen suunnittelun tarve ja työkaluvalmistus sekä jättemäärä.

### 6.1.2 Työkaluvalmistus ja metallivalu

Lisäävän valmistuksen menetelmiä voidaan käyttää erilaisten työkalujen, kuten kokoonpanotelineiden (jigien), kiinnikkeiden, porauslevyjien, koettimien sekä poraus- ja leikkausohjaimien valmistukseen. AM-tekniikka soveltuu hyvin työkalujen valmistukseen, koska niitä valmistetaan yleensä pieniä määriä ja työkaluvalmistus perinteisillä menetelmillä ja materiaaleilla saattaa olla hyvin kallista ja aikaa vievää. Lääketieteessä käytettävien operoitavan kohteen muotoja täsmällisesti noudattavien poraus- ja leikkausohjaimien valmistus on myös perinteisillä menetelmillä usein vaikeaa tai mahdotonta. Valutyökalujen ja -muottien valmistuksessa voidaan hyödyntää lisäävän valmistusmenetelmän mahdollisuuksia luoda moninaisempia jäädytyskanavia, joiden avulla nopeutetaan jäätymisprosessia. Kuvassa 11 on esimerkkeinä työkaluvalmistuksesta hammasimplantin porausohjain (Valluri 2019) vasemmalla ja oikealla valumuottityökalu, jonka sisäiset jäähdytyskanavat on hahmotettu kuvaan vihreällä (Renishaw plc.).



Kuva 11. Hammasimplantin porausohjain vasemmalla ja muottityökalu sisäisillä jäähdytyskanavilla oikealla (Valluri 2019; Renishaw plc.).

AM-tekniikalla valmistettuja vahamalleja käytetään paljon vahamallivalussa esimerkiksi autoteollisuudessa, lääketieteessä ja korunvalmistuksessa. Vahamallivalu prosessissa käytetään epäsuorasti 3D-tulostusta metallikappaleen aikaansaamiseksi. 3D-tulostettu vahamallin päällystetään keraamilla, valukuoren aikaansaamiseksi. Päällystyksen jälkeen vahamalli poistetaan polttamalla ja suoritetaan valu halutulla metallilla. Keraaminen



kuori rikotaan pois valukappaleen jäähtyttyä. (Wohlers Associates Inc. 2020, applications liite; Välimaa 2020, 88.)

### 6.1.3 Arkkitehtuuri ja rakentaminen

Lisäävällä valmistusteknologialla on merkittävä rooli arkkitehtuurisen suunnittelun visualisoinnissa. 3D-tulostus on tänä päivänä kypsä teknologia skaalattujen arkkitehtonisten näköismallien valmistukseen. Monet arkkitehtitoimistot ovat jo investoineet omiin 3D-tulostuslaitteisiin sen sijaan, että hankkisivat kaikki tarvitsemansa näköismallit ostopalveluna. (Wohlers Associates Inc. 2020, 45.)

Sen lisäksi, että 3D-tulostamalla tehdään näköismalleja eri käyttötarkoituksiin, on viime aikoina 3D-tulostuksen käyttö lisääntynyt sekä kookkaiden seinärakenteiden että pienempien rakennuselementtien valmistuksessa. Betonirakenteiden 3D-tulostusta tehdään sekä itse rakennuskohteessa että tuotantotiloissa, joista tulostetut elementit kuljetetaan valmiina kohteeseen. Monenlaisia prototyyppirakennuksia on valmistettu betonista purotusmenetelmällä ja esimerkiksi Shanghailainen yritys Winsun on rakentanut 3D-tulostamalla mm. erilaisia rakennuksia, meluvalleja ja peitemuureja tulvaesteiksi. 3D-tulosteissa tulvaeste-elementeissä on käytetty verkkomaista rakennetta, jolloin päästään pienempään betoniraaka-aineen kulutukseen ja mahdollistetaan kasvillisuuden leviäminen uudelle rakennetulle jokirannalle. Tämän tyyppisistä edullisista, nopeasti valmistettavista tulvaesterakenteista voi tulla tärkeä sovellusalue betonin 3D-tulostukselle, jos ilmastonmuutoksesta johtuvat tulvat yleistyvät. (Wohlers Associates Inc. 2020, 44.) Kuvassa 12 on esimerkkeinä 3D-tulostetuista betonirakenteista joenrantaan rakennettu tulvamuuuri sekä valtatie varteen rakennettu meluvalli (Winsun 2020).



Kuva 12. Betonista 3D-tulostamalla valmistettu tulvamuuuri vasemmalla ja oikealla meluvalli (Winsun 2020).

Betonin valmistuksessa sideaineena käytettävän sementin tuotanto aiheuttaa 8 % maapallon hiilidioksidipäästöistä, joten betonin 3D-tulostusmenetelmien lisäksi kehitetään voimakkaasti ympäristöystävällisempiä materiaaleja. Esimerkiksi Winsun on julkaissut kierrätysmateriaalista tehdyn kustomoidun ”musteen” ja Kalifornian yliopisto (UCLA) sai vuonna 2019 1,5 miljoonan dollarin apurahan ympäristöystävällisen, 3D-tulostettavan betonin kehittämiseen. (Wohlers Associates Inc. 2020, 44; Vialva 2019.)

Betonin lisäksi pienempien rakenteiden ja esineiden valmistuksessa voidaan käyttää erilaisia polymeerejä ja komposiittimateriaaleja. UPM Formi 3D-biokomposiittia, joka koostuu selluloosakuiduista ja polymeeristä, on käytetty mm. huonekalujen, kajakin ja kävelysillan valmistukseen (UPM Formi). Kuvassa 13 on UPM Formi biokomposiitista 3D-tulostamalla valmistettu kajakki, 2 m pitkä lehtisilta sekä olohuoneen pöytä. Kuvan esimerkeistä nähdään kuinka 3D-tulostus lisää muotoilun vapautta.



Kuva 13. Biokomposiitista 3D-tulostamalla valmistettu kajakki, silta ja olohuoneen pöytä (UPM Formi).

3D-tulostuksen käyttö rakentamisessa on tällä hetkellä ns. hypekäyrällä nousuvaiheessa ja odotukset kohdistuvat ennen kaikkea mahdollisuuteen vähentää rakentamisen ympäristövaikutuksia, kustannuksia sekä työvoiman tarvetta. Perinteiseen rakentamiseen verrattuna lisäävässä valmistuksessa on vähemmän geometrisiä rajoituksia ja enemmän mahdollisuuksia käyttää erilaisia ristikkorakenteita ja orgaanisia muotoja. On arvioitu, että betonin lisäävästä valmistuksesta tulee merkittävä rakennusmenetelmä erityisaluille seuraavan 10 vuoden kuluessa. (Wohlers Associates Inc. 2020, 44.)

#### 6.1.4 Lääketiede

Lisäävän valmistuksen lääketieteelliset sovellukset ovat levinneet laajasti sairaaloihin ja lääkinnällisten laitteiden tuotantoon. Lisäävää valmistusta käytetään sekä anatomisten mallien, että ortopedisten implanttien valmistukseen. Lisäävän valmistuksen kasvava

käyttö lääketieteen sovelluksissa perustuu siihen, että 3D-tulostamalla voidaan valmistaa joustavasti sekä personoituja, yksilöllisiä tuotteita samassa valmistuserässä, että erittäin monimutkaisia rakenteita. (Wohlers Associates Inc. 2020, 32.)

Yhdysvalloissa lisäävän valmistuksen käyttöä lääketieteen ja terveydenhuollon sovelluksissa valvoo Yhdysvaltain elintarvike- ja lääkevirasto FDA (Food and Drug Administration), joka julkaisi vuonna 2017 ensimmäisen lääkinnällisten laitteiden lisäävää valmistusta koskevan ohjeen niitä valmistavalle teollisuudelle ”Technical Considerations for Additive Manufactured Medical Devices Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff ” (FDA 2017). Euroopassa lääkinnällisiä laitteita ja sen myötä myös 3D-tulostuksen käyttöä säädellään lääkinnällisten laitteiden MDR (Medical Device Regulation) ja in-vitro diagnostiikan IVDR (In Vitro Diagnostic Regulation) asetuksella (Euroopan Komissio).

Terveydenhuollossa personoinnilla on suuret mahdollisuudet, sillä nykyisin useimmat lääkinnälliset laitteet ovat vielä standardikokoisia, vaikka jokainen potilas on erilainen erilaisine tarpeineen. Personointiin liittyviä lisäävän valmistuksen avainsovelluksia ovat anatomiset mallit, virtuaalinen leikkauksen suunnittelu ja mallintaminen ja potilaskohtaiset implantit. Suuntauksena on, että lisäävää valmistusta tehdään sairaalassa, lähellä potilasta. (Wohlers Associates Inc. 2020, 33.)

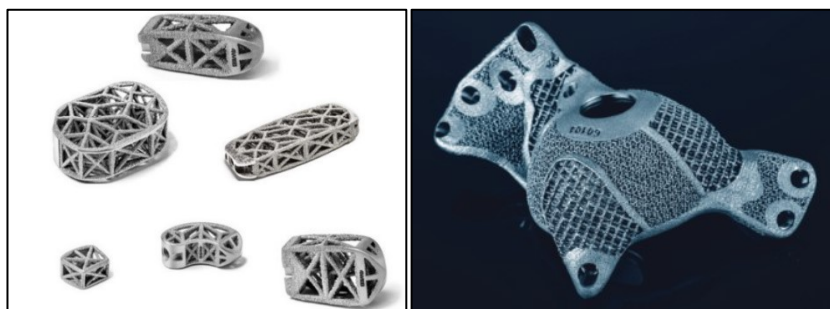
Kirurgit ovat olleet ensimmäisten lisäävän valmistuksen hyödyntäjien joukossa. 3D-tulostettua 1:1 anatomista mallia kirurgit voivat käyttää sekä ennen leikkausta että sen aikana. 3D-tulosteen avulla kirurgit voivat suunnitella ja harjoitella leikkausta ennakkoon sekä selvittää paremmin potilaalle tämän sairautta ja tulevaa leikkausta. Leikkauksen aikana 3D-tulostettu malli voi toimia referenssinä selkeyttämään kirurgille operoitavan kohteen rakennetta sekä leikkauksen etenemistä. Anatomisia malleja käyttävät maailmanlaajuisesti eri alojen kirurgit; ortopediassa, neurologiassa, selkärangan, suun ja leuan alueen kirurgiassa, plastiikkakirurgiassa, kalloon ja kasvoihin liittyvässä kirurgiassa, korva-, nenä- ja kurkkukirurgiassa, sydänkirurgiassa sekä urologiassa. (Wohlers Associates Inc. 2020, 33–34.)

Virtuaalisessa leikkauksen suunnittelussa ja mallinnuksessa leikkaus suunnitellaan tietokoneella, jonka jälkeen suunnitelma siirretään leikkaussaliin. Suunnitelman siirrossa käytäntöön valmistetaan 3D-tulostamalla leikkauksessa tarvittavia potilaskohtaisia ohjaimia, tulkkeja ja malleja. Tekniikoita on kehitetty korjaavaan luun leikkaukseen, kasvaimen poistoon ja korvaamiseen siirteellä sekä nivelen korvaamiseen. Virtuaalisella

suunnittelulla ja potilaskohtaisilla leikkausapuvälineillä lyhennetään leikkausaikaa sekä parannetaan lopputulosta. (Wohlers Associates Inc. 2020, 34–35.)

Vaikka personoiduista implanteista puhutaan paljon, niin suurin osa tänä päivänä käytettävistä ortopedisistä implanteista on kuitenkin vielä valmistettu standardikokoisina ja perinteisillä valmistusmenetelmillä. Kuitenkin metallisten ja polymeeristen lääkinnällisten laitteiden sarjavalmistus lisäävällä valmistusteknologialla on lisääntynyt. (Wohlers Associates Inc. 2020, 37–38.) Lokakuussa 2018 raportoitiin, että FDA oli hyväksynyt yli 100 lisäävän valmistuksen lääkinnällistä laitetta, joista useimmat olivat implantteja (Wohlers Associates Inc. 2020, 38).

Yleisimpiä lisäävän valmistuksen sovelluksia implanttien sarjavalmistukseen ovat selkärangan liitoskappaleen valmistus titaaniseoksesta tai PEKK-polymeeristä tai esimerkiksi lonkkamaljan, sääriluun tukilevyjen sekä raajojen täyttökiilojen valmistus titaaniseoksesta. (Wohlers Associates Inc. 2020, 38.) Kuvassa 14 on lisäävällä valmistustekniikalla titaaniseoksesta valmistettuja selkärangan implantteja vasemmalla sekä potilaskohtainen lonkkamaljan kuppi oikealla (4WEB Medical; Osis Ltd.).



Kuva 14. Lisäävällä valmistusteknologialla valmistettuja selkärangan implantteja vasemmalla ja lonkkamaljan kuppi oikealla (4WEB Medical; Osis Ltd.).

Kehon ulkopuolisilla tukivälineillä ja proteeseilla tuetaan ja avustetaan käyttäjän liikkuvuutta. 3D-tulostamalla valmistettaessa saadaan näihin välineisiin optimaalinen anatominen istuvuus ja sopivuus käyttäjän tarpeisiin. Kuvassa 15 on esimerkkejä jalan, ylävartalon ja käden tukilaitteista sekä jalkaproteesi (EOS).



Kuva 15. 3D-tulostamalla valmistettuja jalan, ylävartalon ja käden tukilaitteita sekä pu-naiseksi värjätty jalkaproteesi (EOS).

Korvan sisäisistä kuulolaitteista suurin osa valmistetaan nykyisin 3D-tulostusta hyödyn-täen. Korvan sisäisten kuulolaitteiden lisäksi myös korvan taakse ja korvakäytävään asennettavia kuulokojeita valmistetaan 3D-tulostamalla. Jo 2010-luvun puolivälissä arvi-oiitiin, että maailmalla olisi käytössä kymmeniä miljoonia 3D-tulostettuja kuulolaitteita. 3D-tulostus mahdollistaa yksilöllisten kuulolaitteiden valmistamisen kustannustehok-kaammin ja nopeammin kuin perinteinen monia vaiheita sisältävä ja käsityöhön painot-tuva valmistus. (Alonen, Suhonen, Hietikko, Vihelä, Goldsteine & Heinonen 2016, 52.) Kuvassa 16 on EnvisionTEC:n 3D-tulostimella valmistettuja kuulolaitteiden osia ja So-novan valmiita kuulolaitteita (EnvisionTEC; Sonova).



Kuva 16. 3D-tulostettuja kuulolaitteiden osia sekä valmiita kuulolaitteita (EnvisionTEC; Sonova).

3D-tulostus on osoittautunut varteenotettavaksi valmistusmenetelmäksi myös silloin, kun tarvitaan nopeasti tarvikkeita esimerkiksi humanitaarisessa avussa katastrofialueilla tai

muutoin äkillisesti lisääntyneeseen tarpeeseen. COVID-19 pandemian aiheuttaessa maaliskuussa 2020 Pohjois-Italiassa hengityslaitteiden venttiileiden (kuva 17) puutteen, Isinnova -yritys pystyi 3D-mallinnuksen ja -tulostuksen avulla alle 2 päivässä aloittamaan venttiileiden valmistuksen. Näin pystyttiin pikaisesti auttamaan kymmentä hengityslaitetta tarvitsevaa potilasta. (Hahn 2020.)



Kuva 17. Tarvittaessa 3D-tulostettuja hengityslaitteen venttiilejä (Hahn 2020).

#### 6.1.5 Hammaslääketiede

Lisäävä valmistus sopii hyvin hammaslääketieteen sovelluksiin koska osat ovat pieniä ja kompleksisia muodoiltaan ja usein myös hinnaltaan arvokkaita. Lisäävän valmistuksen käyttöä hammaslääketieteessä on edistänyt myös 3D-mallitietoa tuottavien laitteistojen ja systeemien kehitys. Aiemmin mainittujen erilaisten kirurgisten apuvälineiden ja työkalujen valmistuksen lisäksi 3D-tulostusta käytetään hammaslääketieteessä hammasimplanttien, kruunujen ja siltojen sekä hampaiden oikomislaitteiden valmistukseen.

Metallien 3D-tulostusta käytetään pääasiassa päällysteiden, hammasproteesien, kruunujen ja siltojen valmistukseen. Yleisimmin käytetään materiaalina kobolttikromia sen lujuuden, korroosiokestävyyden ja bioyhteensopivuuden vuoksi. Lisäksi titaanista valmistetaan erilaisia implanteja ja rakenteita ylä- ja alaleuan korjauksiin. (Wohlert Associates Inc. 2020, 39.) Kuvassa 18 on vasemmalla metallista jauhepetitulostamalla valmistettuja hammaskruunuja ja -siltoja tulostusalustalla (EOS) ja oikealla titaanista valmistettu leukaluun osa kiinnitettynä potilaan kallon 3D-mallin mukaisesti tehtyyn 3D-tulosteeseen (Ferrier 2015).



Kuva 18. 3D-tulostettuja hammaskruunuja ja -siltoja tulostusalustalla vasemmallä ja titaaninen leukaluun osa oikealla (EOS; Ferrier 2015).

Myös erilaisia keraameja, kuten esimerkiksi zirkoniumoksidia, hydroksiapatiittia ja trikalsiumfosfaattia voidaan käyttää erilaisten implanttien valmistuksessa ja luukudosvaurion korjauksessa. Keraamista valmistettu huokoinen skafoldi mahdollistaa luukudoksen kasvun tähän huokoiseen materiaaliin, jota ei myöskään tarvitse poistaa vaurion korjaututtua. (Wohlers Associates Inc. 2020, 40.)

Yksi suurimmista lisäävän valmistuksen sovelluskohteista hammaslääketieteessä on hampaiden oikomislaitteiden valmistus, jossa käytetään 3D-tulostamalla tehtyä yksilöllistä muottia. Oikomislaitteita valmistetaan teollisesti kymmeniä miljoonia kappaleita vuodessa. (Wohlers Associates Inc. 2020, 24.)

#### 6.1.6 Muu lopputuotteiden valmistus

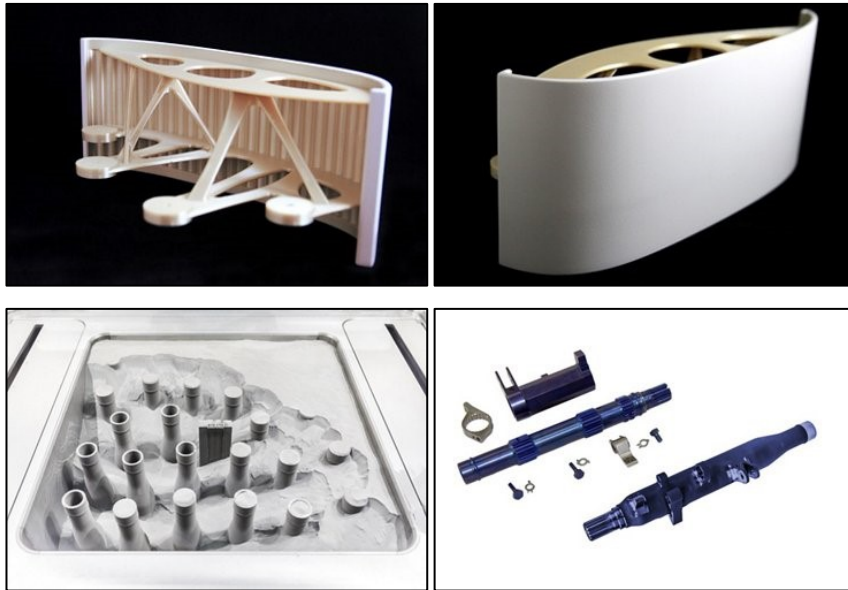
Lisäävää valmistusta käytetään monilla aloilla varaosien ja personoitujen, yksilöllisten tuotteiden valmistuksessa sekä erikoiserä- ja piensarjatuotannossa ja jopa sarjatuotantomenetelmänä. Sovelluksia on erityisesti ilmailun (lentokone- ja avaruusteollisuus), autoteollisuuden ja lääketieteen aloilla, mutta myös monilla muilla, kuten kuluttajatuotteiden (korut, taide, kodin tarvikkeet, jalkineet) valmistuksen ja moottoriurheilun aloilla.

Vaikka ilmailussa on korkeat turvallisuusvaatimukset ja kappaleiden ja niiden valmistuksessa käytettävien materiaalien tulee täyttää tiukat lentokelpoisuusvaatimukset, ilmailualan yritykset ovat olleet ensimmäisten lisäävän valmistuksen käyttöönottajien joukossa. Lisäävän valmistuksen sovellutusten kehitystä ilmailussa on edistänyt erityisesti mahdollisuus keventää rakenteita ja sitä kautta saada aikaan merkittäviä säästöjä mm. polttoainekulutuksessa. Boeing ja Bell Helicopter aloittivat polymeerien lisäävä valmistuksen käytön ei-kantavien rakenteiden tuotannossa jo 1990-luvun puolivälissä.

Boeing on tähän mennessä asentanut yli 60 000 lentokelpoista osaa ja luonut satoja uniikkeja malleja 16 erilaiseen liikenne- ja sotilaslentokoneeseen. Myös Airbus, Honeywell Aerospace, Lockheed Martin ja Northrop Grumman ovat merkittäviä lisäävän valmistuksen käyttäjiä. NASA, ESA, Space X ja muut avaruusjärjestöt käyttävät lisäävää valmistusta mm. rakettimootorin polttimien, ruiskutussuuttimien ja polttokammioiden valmistuksessa. (Wohlers Associates Inc. 2020, 24–25.)

Lentokonevalmistajat käyttävät lisäävää valmistusta sekä muovi- että metalliosien valmistuksessa. Muovista valmistetaan mm. erilaisia kannattimia, kiinnikkeitä sekä muita tarvikkeita johtojen, letkujen sekä putkistojen kiinnittämiseen. Metallista valmistetaan mm. erilaisia kannattimia, kiinnikkeitä ja moottorin osia. Esimerkkeinä ilmailun sovelluksista voidaan esitellä kuvassa 19 oleva polymeeristä valmistettu väliilapaneeli, ja prototyyppivaiheessa jauhepetitulostimessa ja valmiina kappaleina olevat titaaniset oven lukon osat sekä kuvassa 20 olevat moottorin polttoainesuutin ja ilmanvaihtokanaviston (environmental control system, ECS) osat. Finnairin A320 lentokoneisiin on asennettu ensimmäiset matkustajille näkyvät 3D-tulostetut kappaleet. Koneiden matkatavarahyllyjen paneelien uudistuksessa, vanhan ja uuden paneelin väliin tarvittiin välikappaleet (kuvan 19 yläosa), jotka valmistettiin 3D-tulostamalla polymeeristä (Airbus 2018). Airbus Helicopter julkaisi vuonna 2018 valmistavansa A350 XWB matkustajakoneeseen titaanista ovien lukkosalpojen osia (kuva 19 alaosa). 3D-tulostamalla valmistetut salvat ovat 45 % kevyempiä ja 25 % edullisempia kuin perinteisesti valmistetut osat. A350 XWB -koneessa on 16 lukkosalpaa, joten 45 % painonvähennys merkitsee yli 4 kilon kevenystä per lentokone. Näiden osien arvioitiin olevan lentokäytössä vuonna 2020. (Airbus Helicopter 2018.) GE Aviation valmistaa metallin 3D-tulostusta käyttäen polttoaineen suuttimia (kuvassa 20 vasemmalla) LEAP-moottoriin sarjatuotantona. Lisäävän valmistusmenetelmän avulla on kappaleen osien määrä pudonnut noin 20 osasta yhteen, painosta on saatu leikattua pois noin 25 % ja rakennetta on voitu optimoida niin että suutin on 15 % tehokkaampi kuin perinteisesti valmistettu ja sen typen oksidien (NOx) päästöt ovat 50 % pienemmät (GE Additive 2018; Leino 2020).





Kuva 19. Finnairin A320 koneen matkatavarahyllyn välisapaneeli ylhäällä (Airbus 2018) ja alhaalla Airbusin A350 XWB koneen lukon osia; vasemmalla prototyyppi vaiheessa jauhepetitulosuussa 3D-tulostuksen jälkeen ja oikealla valmiina kappaleina (Airbus Helicopter 2018).



Kuva 20. LEAP moottorin polttoainesuutin (GE Additive 2018) ja Boeing-lentokoneen ilmanvaihtojärjestelmän kanaviston osia (Wohlers Associates Inc. 2020, applications liite).

Edellä mainittujen esimerkkien lisäksi lisäävää valmistusta käytetään miehittämättömien ilma-alusten (UAV) osien, niissä käytettävien laitteistojen suojakuorien ja kiinnikkeiden sekä muiden vastaavien tarvikkeiden valmistukseen (Wohlers Associates Inc. 2020 applications liite).

Myös autoteollisuus kuuluu niihin aloihin, jotka ovat ottaneet lisäävän valmistuksen käyttöön jo varhaisessa vaiheessa. AM-menetelmiä on käytetty autoteollisuudessa erityisesti prototyyppien valmistamiseen, ja lopputuotteiden AM-tuotannon kehitys on ollut hitaampaa ja rajoittunut piensarjoihin, vaikkakin viime aikoina on näkynyt lisääntymistä

autonosien valmistuksesta kertovissa esimerkeissä. (Wohlers Associates Inc. 2020 134.) Suurilla autonvalmistajilla on käytössään omia lisäävän valmistuksen keskuksia, joissa tehdään sekä tutkimus- ja kehitystyötä että työkalujen, prototyyppien ja lopputuotteiden valmistusta (Sher 2020a).

Kaikki suuret autonvalmistajat käyttävät lisäävää valmistusta sekä henkilöautojen että raskaan liikenteen ajoneuvojen, kuten linja-autojen ja rekkojen osien valmistukseen. Lisäävän valmistuksen sovelluksia on erityisesti kohteisiin, joissa tarvittavat tuotantomäärät ovat pienempiä, kuten kilpa-autot, luksusautot ja vanhat klassikkoautot, mutta suuntaus ja tavoitteet on kehittää lisäävän valmistuksen menetelmiä suuren skaalan tuotantomenetelmiksi. Massaräätälöinti sovellukset tarjoavat asiakkaille laajemmat vaihtoehdot esimerkiksi erilaisiin sisustusyksityiskohtiin tai jopa mahdollisuuden itse suunnitella niitä. Sähköautojen ja autonomisten kulkuvälineiden kehitystyö on vauhdittanut uusien valmistustekniikoiden käyttöönottoa. Kuvassa 21 on esimerkkejä 3D-tulostamalla valmistetuista ajoneuvojen osista; Bugatin jarrusatula (ylhäällä vasemmalla), Daimler Buses-yrityksen valmistama kuljettajan oveen asennettava luottokorttikotelo (ylhäällä oikealla), joka perinteisellä valmistusmenetelmällä valmistettaessa koottaisiin useasta eri osasta, DS3 Dark Side Edition -automallin titaaninen koristelista ovesa (alhaalla vasemmalla) ja Minin räätälöity kojelautapaneeli (alhaalla oikealla). (Sher 2020a.)



Kuva 21. 3D-tulostamalla valmistettuja ajoneuvon osia; jarrusatula, luottokorttikotelo, koristelista autonovessa ja räätälöity kojelautapaneeli (Sher 2020a).

Sen lisäksi, että lisäävää valmistusta käytetään erilaisten ajoneuvojen osien ja varaosien valmistukseen, sillä on mahdollista valmistaa kokonaisia ajoneuvoja (O'Neal 2020; Sher 2020a). Italialainen sähköautovalmistaja XEV on kehittänyt 3D-tulostettavia

sähköautoja, joita voidaan valmistaa massatuotantona asiakaskohtaisesti räätälöitynä (O’Neal 2020). Divergent 3D esitteli jo vuonna 2016 ensimmäisen 3D-tulostetun prototyypin urheiluautosta, jossa myös runko ja alusta on valmistettu 3D-tulostamalla (Sher 2020a). Kuvassa 22 on esitelty XEV-sähköauto ja Divergent 3D:n Blade urheiluauto.



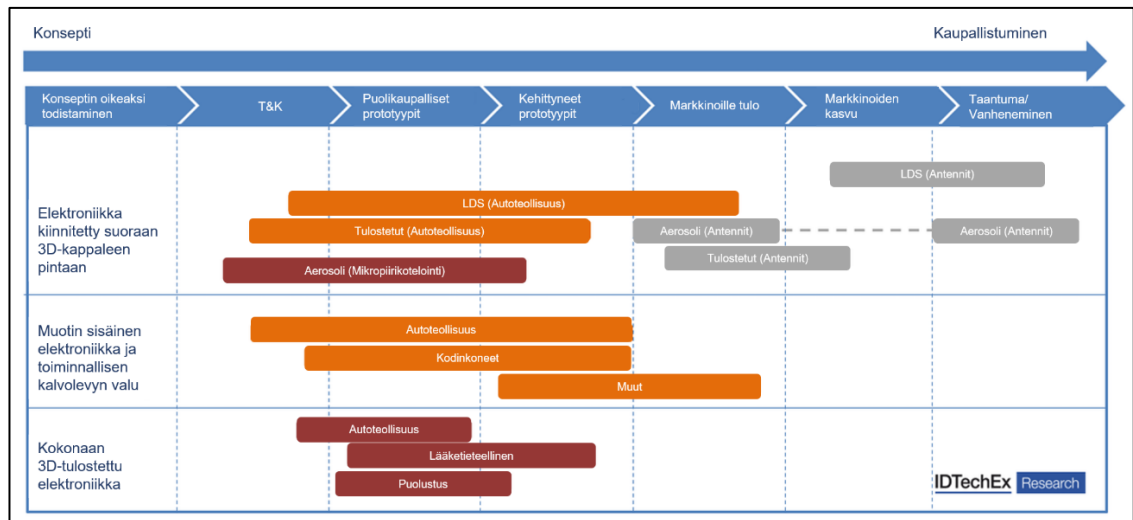
Kuva 22. 3D-tulostamalla valmistettu sähköauto vasemmalla ja urheiluauto oikealla (O’Neal 2020; Sher 2020a).

Jalkineen valmistuksessa lisäävää valmistusta käytetään sekä jalkineiden että räätälöityjen pohjallisten valmistukseen. Urheilujalkine valmistajista esimerkiksi Adidas valmistaa juoksukenkien välipohjia 3D-tulostamalla ja Nike on valmistanut jalkapallokenkiä sekä juoksukenkien kangaspäällisiä 3D-tulostusta käyttäen. Vaikka kuluttajien on jo mahdollista hankkia osittain 3D-tulostamalla valmistettuja jalkineita, niin tällä hetkellä suunnittelijat käyttävät 3D-tulostusta pääasiassa vielä tuotekehityksessä prototyyppien valmistukseen ja räätälöityihin tuotteisiin. (Delray Systems 2019.)

Lisäävää valmistusta käytetään myös mm. erilaisten korujen, silmälasikehysten, huonekalujen, sisustuselementtien, valaisimien, muistoesineiden, soittimien ja design asusteiden valmistukseen. Tavoitteena tällöin on valmistaa uniikkeja tuotteita ja pieniä tuotantomääriä. (Wohlers Associates Inc. 2020, Applications liite.)

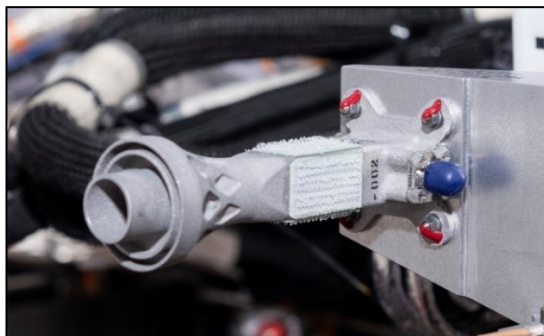
Elektroniikan 3D-tulostus on nouseva sovellusala, joka mahdollistaa elektroniikan integroimisen joko kappaleen sisälle tai pinnalle. Muotin sisäinen elektroniikka ja 3D-tulostettu elektroniikka mahdollistavat kokonaisen piirin integroimisen kappaleeseen, mikä yksinkertaistaa valmistusta ja mahdollistaa uusien muotojen käytön. 3D-tulostettu elektroniikka ei enää vaadi jäykän, tasaisen piirilevyn sisällyttämistä esineeseen ja siihen kuuluvien kytkimien, antureiden, virtalähteiden ja muiden ulkokoisten komponenttien kytke- mistä. Kuviossa 15 on esitetty eri 3D-elektroniikka sovellusten tilanne konseptista

kaupallistamiseen kulkevalla kehityksellä. LDS (Laser direct structuring) menetelmässä sähköinen toiminnallisuus lisätään 3D-esineen pinnalle suoralla laserstrukturoidulla, jolloin muovin lisäaine aktivoidaan valikoivasti laserilla. Aerosolisuihkutuksessa suutetaan suhteellisen alhaisen viskositeetin omaavaa johtavaa mustetta. Tällä hetkellä vähiten kehittyneet on kokonaan 3D-tulostetun elektroniikan valmistustekniikka, jossa dielektriset, eristävät materiaalit (yleensä kestumuovit) ja johtavat materiaalit tulostetaan peräkkäin. (Dyson, Ghaffarzadeh & Collins 2019.)



Kuvio 15. 3D-elektroniikkateknologioiden sovellusten tilanne konseptista kaupallistamiseen kehityksellä. (mukailtu Dyson ym. 2019).

Avaruusteknologiassa käytettävistä lisäävän valmistuksen sovelluksista voidaan mainita mm. erilaiset antennit ja vaimentimet. Kuvassa 23 on ensimmäinen 3D-tulostamalla metallista valmistettu antenni, joka asennettiin vuonna 2019 laukaistuun AMOS-17 tietoliikennesatelliittiin (Listek 2019).



Kuva 23. AMOS-17 tietoliikennesatelliittiin asennettu 3D-tulostettu antenni (Listek 2019).

## 6.2 Materiaalia lisäävä valmistus Suomessa

Suomessa lisäävän valmistuksen tutkimus on alkanut jo 1990-luvun alkupuolella, mutta teknologian käyttöönotto ja leviäminen yritystoimintaan on ollut melko hidasta. Euroopan ensimmäinen stereolitografialaite asennettiin Suomeen Electoluxille vuonna 1996 (Ajatec Prototyping Oy), mutta esimerkiksi ensimmäinen metallien 3D-tulostuspalveluja tarjoava yritys perustettiin vasta vuonna 2014 (Hämeenaho, Tölander, Nordenberg, Komi, Rytönen & Karjalainen 2019, 16). Stereolitografia ja muut muovien 3D-tulostusmenetelmät ovatkin olleet yritysten käytössä metallien 3D-tulostusta pidempään ja vasta 2010-luvun puolivälin jälkeen on teollisuuden kiinnostus metallien lisäävään valmistukseen alkanut lisääntyä. Viimeisten viiden vuoden aikana monet yritykset ja laitokset ovat investoineet tasokkaisiin teollisen mittakaavan materiaalia lisäävän valmistuksen laitteistoihin ja niissä erityisesti metallien ja polymeerien tulostuslaitteisiin (Wohlers Associates 2020, 209). Suomessa on tuotanto-, tutkimus-, koulutus- ja tuotekehityskäytössä kaikkia seitsemän eri menetelmäluokan laitteita. (Firpa ry. 2018.) Kuluttajatasen FDM-pursotuslaitteita löytyy tänä päivänä mm. monen kodista sekä kirjastoista ja kouluista.

Lokakuussa 2020 perustettua Suomen 3D-tulostuksen ekosysteemiä FAME (Finnish Additive Manufacturing Ecosystem) fasilitoi DIMECC Oy ja sitä rahoittaa ekosysteemin jäsenyritykset sekä työ- ja elinkeinoministeriö. Käynnistyneen FAME-ekosysteemin perustajajäseniä ja avaintoimijoita ovat 3DStep, 3D Formtech, Andritz, CITEC, Danfoss, DBE Core, Delva, Elomatic, EOS Finland, Etteplan, Huld, Lillbacka Powerco, MiniFactory, Origo Engineering, Patria, Raute, Vossi ja Wärtsilä. Ekosysteemi perustaa Vaasaan Wärtsilän Smart Technology Hubiin kaikille avoimen 3D-tulostuksen kokeilukeskuksen ja Lappeenrantaan LUT-yliopistoon (Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto) perustetaan modulaarinen 3D-tulostuskoulutus insinööritasosta tohtoritasolle. FAME-ekosysteemin tavoitteena on nostaa Suomi maailman johtavien maiden tasolle 3D-tulostuksen hyödyntämisessä, myynnissä ja osaamisessa ja saavuttaa 5 % maailman 3D-tulostuksen markkinavolyymista vuoteen 2030 mennessä. Jotta tämä kunnianhimoinen tavoite voidaan saavuttaa, tarvitaan laajempaa ja vahvempaa luottamusta 3D-tulostuksen mahdollisuuksiin ja kykyä nähdä se vaihtoehtona nykyisille valmistusmenetelmille. FAME-ekosysteemin yksi keskeinen tavoite onkin vaikuttaa koulutukseen sekä valmistuvien suunnittelijoiden asenteisiin niin, että 3D-tulostus on mekaanisessa suunnittelussa lähtökohtana tasavertainen valamisen tai koneistamisen kanssa. (DIMECC 2020.)

### 6.2.1 Koulutus ja osaaminen

Lisäävän valmistuksen tekniikkaan ja prosessiin liittyvää osaamista voi saada niin peruskoulussa kuin korkeakouluissakin, mutta erot opetuksen laajuudessa samalla kouluasteella olevien eri oppilaitosten välillä on suuret. Suomessa on esimerkiksi yliopistoja, joissa ei ole lainkaan lisäävän valmistuksen koulutusta. Pelkästään lisäävää valmistusta käsitteleviä kursseja on tarjolla vain LUT-yliopistossa, Aalto-yliopistossa ja Vaasan yliopistossa. Kaikissa konetekniikan laitoksen omaavissa yliopistoissa (Aalto, LUT, Tampere, Oulu) 3D-tulostusta kuitenkin opetetaan ainakin osana jotain muuta kurssia. Suomen yliopistoista Aalto-yliopisto ja LUT-yliopisto tarjoavat suurimman osan materiaalia lisäävän valmistuksen opetuksesta. (Hämeenaho ym. 2019, 23; Piili, Salminen, Korpela, Kurvinen, Pikkarainen, Riikonen, Heiskanen, Westman 2019, 9-10.) Suomen ammattikorkeakouluista yli puolessa on tarjolla vähintään 3D-mallinnuksen kursseja ja pursotustekniikkaan perustuvia 3D-tulostimia. Tällä hetkellä lisäävän valmistuksen menetelmien ja laitteistojen osalta laajin koulutus- ja tutkimusinfrastruktuuri on Savonia ammattikorkeakoululla ja sen yhteistoimintaverkostolla (Savonia).

Osaamisen kehittämiseksi ja laadukkaan koulutusympäristön aikaansaamiseksi monet ammattiopistot, ammattikorkeakoulut ja yliopistot ovat yhdistäneet voimiaan. Eri kouluasteiden ja yritysmaailman yhteistyötä on kehitetty erityisesti mm. erilaisten EAKR-hanketukien (Euroopan aluekehitysrahasto) avulla. Esimerkiksi Pirkanmaalle on rakennettu 3D Pirkanmaa -verkosto, joka yhdistää eri koulutusasteita ja antaa pienille ja keskisuurille yrityksille (PK-yrityksille) mahdollisuuden tutustua uuteen teknologiaan ja testata sitä omassa tuotannossa (Lahti 2017). Etelä-Karjalan alueella käynnistyi vuoden 2018 syksyllä 2-vuotinen Teollisuuden 3D-tulostus (Me3DI) -hankkeeseen liittyvä metallien 3D-tulostamiseen erikoistunut koulutuspaketti, jossa LUT-yliopisto antaa koulutusta teollisuuden yrityksille. Hankkeen tavoitteena on, että yritysten tietoisuus metallien 3D-tulostamisesta lisääntyisi ja että tekniikkaa alettaisiin hyödyntämään laajemmin Suomessa. (Piili ym. 2019, 12-13). Myös Savonia ammattikorkeakoulun monipuolinen 3D-tulostusympäristö on eri osatoteuttajien ja EARK-rahoituksen tulosta. Turun ammattikorkeakoulun MMAM-projekti (Multikomponent Materials Center of Expertise for Additive Manufacturing) vahvistaa Turun seudun asemaa edelläkävijänä biomateriaalien tutkimuksessa sekä niiden lisäävään valmistukseen sovellusten kehittämisessä. Kumppaneina Turun ammattikorkeakoululla MMAM-projektissa on Turun yliopisto, Åbo Akademi, LUT-yliopisto, Koneteknologiakeskus, 3DTech Oy sekä

Brinter Oy. MMAM Osaamiskeskuksen tavoitteena on vahvistaa ja parantaa alueellista yhteistyötä lisäävän valmistuksen, lääketieteen, hammaslääketieteen, lääkeannostelun ja biomateriaalien tutkimusalueilla, ja näin edistää uusien materiaaliyhdistelmien ja 3D-tulostusprosessin tutkimusta ja kehittämistä. Turun ammattikorkeakoululla on laaja ja monipuolinen valikoima eri menetelmiin perustuvia lisäävän valmistuksen laitteita tutkimusten toteuttamiseksi. (MMAM.)

Nähdään, että Suomessa on vielä suhteellisen vähän osaajia, etenkin metallien lisäävän valmistuksen alalla. Tarvitaankin lisää koulutusta yliopistoihin ja ammattikorkeakouluihin AM-osaamisen ja -osaajien määrän lisäämiseksi sekä suunnittelun (DfAM, Design for Additive Manufacturing) että AM-tekniikoiden teoreettisen ja käytännön osaamisen alueilla. (Hämeenaho ym. 2019, 25-26).

### 6.2.2 Laitteistot ja 3D-tulostuspalvelut

Monet yritykset ovat ottaneet muovien 3D-tulostuksen tuotekehityksen ja tuotannon tueksi sekä lopputuotteiden valmistusmenetelmäksi. Yritykset hankkivat tarvitsemansa 3D-tulosteet joko tuottamalla ne itse omilla laitteilla tai käyttämällä kotimaisia tai ulkomaisia 3D-tulostuspalveluja. Suomessa teollisuuden ja yritysten käytössä olevien muovien 3D-tulostuslaitteiden määrästä ei ole olemassa tietoa. Hämeenaho ja muut (2019, 27) arvioivat, että Suomessa olisi tyydyttävässä määrin muovien 3D-tulostuspalveluja tarjoavia yrityksiä. Näillä yrityksillä on käytössä pääasiassa SLS-tekniikkaan perustuvia jauhepetisulatuslaitteita. Myöskään ei ole tarkkaa tietoa metallien 3D-tulostuslaitteita omassa tuotannossaan käyttävistä yrityksistä. Valmet Oyj, V.A.V. Group Oy ja Lillbacka Powerco Oy ovat julkaisseet omistavansa metallien 3D-tulostuslaitteiston (Hämeenaho ym. 2019, 21).

Suomesta on kaksi 3D-tulostuslaitevalmistajaa; Prenta Oy ja MiniFactory Oy LTD. Molemmat yritykset valmistavat pursotustekniikkaan perustuvien 3D-tulostimia. Suomen suurin lisäävän valmistuksen alan yritys on kansainvälisen laitevalmistajan EOS GmbH:n EOS Finland Oy, joka kehittää metallien jauhepetitulostuslaitteiden prosesseja sekä materiaaleja. (Wohlers Associates 2020, 209.)

Metallien 3D-tulostuspalveluiden tuottajien määrä on kasvanut muutamalla toimijalla vuoden 2014 jälkeen, jolloin Suomessa aloitti ensimmäinen metallien tulostuspalveluja tuottava yritys. Nykyisin metallien 3D-tulostuspalveluja tarjoavat 3DStep Oy,

3DFormtech Oy, Materflow Oy, Delva Oy, HT-laser Oy ja Salon Metalelectro Oy. Heillä kaikilla on käytössään yksi tai useampi jauhepetisulatustekniikkaan perustuva laite.

Tutkimus- ja opetuskäytössä on useita metallien 3D-tulostuslaitteita eri oppilaitoksissa, kuten LUT-yliopistossa, Aalto-yliopistossa, Vaasan yliopistossa, Savonia ammattikorkeakoulussa, Turun ammattikorkeakoulussa ja Saskyssa (Sastamalan koulutuskuntayhtymä), sekä tutkimuslaitoksissa, kuten EOS:n tutkimuskeskuksessa, VTT:llä ja Nivalan Teollisuuskylä Oy:llä (Firpa ry. 2018; Hämeenaho ym. 2019 23; Vossi 2020). Lisäksi metallien suorakerrostukseen perustuva DED-laitteisto on mm. Tampereen yliopistossa, Aalto-yliopistossa, Turun ammattikorkeakoulussa ja Savonia ammattikorkeakoulussa. Savoniassa on käytössä myös pursotukseen ja sintraukseen perustuva Markforged Metal X -laite metallikappaleiden valmistukseen. Taulukkoon 5 on koottu suomalaisten teollisuus- ja 3D-tulostuspalveluyritysten metallien 3D-tulostimet sekä koulutus- ja tutkimuskäytössä olevat metallien 3D-tulostuslaitteistot. Kuvioon 16 on havainnollistettu laitteiden jakauma maantieteellisesti.

Taulukko 5. Metallien 3D-tulostuslaitteet Suomessa (mukailtu Hämeenaho ym. 2019, 17 ja 23; Vossi 2020; Valmet 2016; Koivisto 2019).

| Toimija  | Sijainti             | Laitteisto   |
|--|----------------------|--|
| 3D Formtech Oy   | Jyväskylä            | EOS M290   |
| 3D Step Oy   | Ylöjärvi             | SLM 280HL twin (400 W)   |
| Delva Oy   | Hämeenlinna          | EOS M270, EOS M290   |
| HT Laser Oy  | Keuruu               | SLM 280 2.0 twin (700 W)   |
| Materflow Oy   | Lahti                | Concept Laser M1, SLM 280HL  |
| Salon Metalelectro Oy                                      | Salo                 | SLM 280 2.0 twin (700W)  |
| Aalto yliopisto  | Espoo                | EOS M290, Suorakerrostuslaite                                      |
| EOS Finland Oy   | Turku                | useita EOS:n laitteita   |
| LUT-yliopisto  | Lappeenranta         | EOS M270, EOS M290   |
| Nivalan teollisuuskylä Oy yhteistominnessa Oulun yliopisto | Nivala               | SLM 280HL  |
| Jyväskylän ammattikorkeakoulu                              | Jyväskylä            | Jauhepetisulatuslaite (hankintasuunnitelma 2020)                   |
| Savonia ammattikorkeakoulu                                 | Kuopio               | SLM 280 2.0 twin (700W)<br>Markforged Metal X, Suorakerrostuslaite |
| SASKY  | Sastamala            | SLM 125HL  |
| Turun ammattikorkeakoulu                                   | Turku                | 2 kpl SLM280, suorakerrostuslaite                                  |
| Tampereen yliopisto  | Tampere              | Suorakerrostuslaite  |
| Vaasan yliopisto   | Vaasa                | jauhepetisulatuslaite (hankintasuunnitelma 2020)                   |
| VTT  | Espoo                | SLM 125HL, Desktop Metal Shop System                               |
| Valmet Oyj   | Sundsvall,<br>Ruotsi | jauhepetisulatuslaite  |
| V.A.V. Group Oy  | Ii                   | SLM 125HL  |
| Lillbacka Powerco Oy                                       | Härmä                | ProX DMP 300   |





Kuvio 16. Metallien 3D-tulostuslaitteistojen sijainnit.

Taulukkoon 6 on kerätty suomalaisia eri materiaalien, kuten polymeerien, komposiittien, metallien, hiekan ja betonin 3D-tulostuspalveluja tarjoavia yrityksiä. Tiedot taulukkoon on kerätty yritysten omilta verkkosivuilta (3DFormtech Oy; 3DStep Oy; 3DTech Oy; Ajatec Prototyping Oy; Delva Oy; Hetitec Oy; HT-Laser Oy; Hyberion Robotics; Maker3D Oy; Materflow Oy; Plastmode Oy; Protohouse Finland Oy; Salon Metalelektro Oy; Toivalan metalli Oy).

Taulukko 6. Suomalaisia eri materiaalien 3D-tulostuspalveluja tarjoavia yrityksiä.

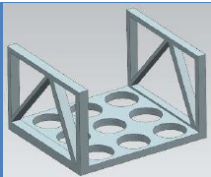
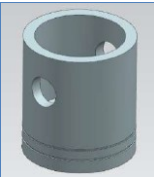
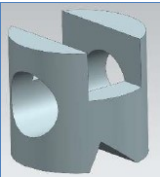
| Toimija               | Toimiala   | AM-tekniikat   |
|-----------------------|--|--|
| 3DFormtech Oy         | Muovien ja metallien 3D-tulostuspalvelut, 3D-mallinnus, konsultointi-, kartoitus- ja koulutuspalvelut.   | Polymeerit<br>- SLS-jauhepetisulatus<br>Metallit<br>- DMLS-jauhepetisulatus  |
| 3DStep Oy             | Muovien ja metallien 3D-tulostuspalvelut, koulutus, suunnittelu-, tutkimus- ja kehityspalvelut.  | Polymeerit<br>- SLS-jauhepetisulatus<br>- MJF-jauhepetisulatus<br>Metallit<br>- SLM-jauhepetisulatus<br>- DMLS-jauhepetisulatus (alihankkijalta) |
| 3DTech Oy             | 3D-tulostus, 3D-skannaus, 3D-suunnittelu, konsultointi ja koulutus palvelut ja biomateriaalien tulostusprosesseja kehittäminen.<br>Brinter®-biotulostimen kehittäminen, valmistus ja myynti                          | Polymeerit<br>- MJF-jauhepetisulatus   |
| Ajatec Prototyping Oy | Prototyyppien ja piensarjojen valmistus 3D-tulostamalla ja pikavalutekniikoilla.   | Polymeerit<br>- MJF-jauhepetisulatus<br>- SLS-jauhepetisulatus<br>- Stereolitografia (SLA)   |
| Delva Oy              | Metallien 3D-tulostus ja siihen liittyvät palvelut   | Metallit<br>- DMLS-jauhepetisulatus  |
| Hetitec Oy            | Valuosien nopeisiin toimituksiin erikoistunut proto-, varaosa- ja piensarjavalimo.<br>Hiekkamuottien/hiekkatulosteiden valmistus.  | Hiekka<br>- sideaineen suihkutus (Voxeljet AG:n laite)   |
| HT-Laser Oy           | Metallien 3D-tulostus, 3D-suunnittelu, lujuuslaskenta ja topologiaoptimointi.<br>Laser-, vesi-, plasma- ja polttoleikkaus, särmäys, hitsaus, laserhitsaus, koneistus, pintakäsittely, kokoonpano ja setitys palvelut | Metallit<br>- SLM-jauhepetisulatus   |
| Hyberion Robotics     | Betoni 3D-tulostus ja robotiikka<br>Ison skaalan 3D tulostusteknologian kehittäminen arkkitehtuuriin, rakentamiseen ja infrastruktuuriin   | Betoni<br>- materiaalin pursotus   |
| Maker3D Oy            | 3D-tulostuspalvelut<br>Ultimaker, Formlabs, Sinterit -laitteiden maahan tuonti<br>kotimaisen miniFactoryn jälleenmyyjä   | Polymeerit<br>- materiaalin pursotus<br>- SLS-jauhepetisulatus<br>- Stereolitografia (SLA)<br>- MJP-materiaalin ruiskutus                        |
| Materflow Oy          | Muovien ja metallien 3D-tulostuspalvelut   | Polymeerit<br>- materiaalin pursotus<br>- SLS-jauhepetisulatus<br>- Stereolitografia (SLA)<br>Metallit<br>- SLM-jauhepetisulatus                 |
| Plastmode Oy          | Teollisuudella ja yrityksille muovien 3D-tulostus ja 3D-suunnittelu  | Polymeerit<br>- MJF-jauhepetisulatus   |
| Protohouse Finland Oy | Prototyyppien valmistus, 3D-tulostus, koneistus ja laserleikkaus   | Polymeerit<br>- Stereolitografia (SLA)   |
| Salon Metalektro Oy   | Komposiittien ja metallin 3D-tulostus<br>Mekaniikan ja elektroniikan sopimusvalmistus  | Komposiitit<br>- materiaalin pursotus<br>Metallit<br>- SLM-jauhepetisulatus  |
| Toivalan metalli Oy   | Teollisuustason 3D-komposiittitulostus<br>Laserleikkasu, levyleikkeiden hionta, ohutlevytyöt, putkentaivutukset, särmäys, osavalmistus ja alumiinihitsaus  | Komposiitit<br>- materiaalin pursotus  |

3D-tulostuspalveluita tuottavat yritykset ovat verkkosivujensa mukaan verkottuneet laajasti ja käyttävät myös usein koti- ja ulkomaisia yhteistyökumppaneitaan täydentämään palvelujaan eri tulostusmenetelmillä ja -materiaaleilla sekä muilla 3D-tulostuksen oheispalveluilla, kuten suunnittelulla ja jälkikäsittelyllä.

### 6.2.3 Metallikappaleiden tuotantokapasiteetti ja kyky

Hämeenaho ja muut (2019, 19–20) ovat esittäneet karkean laskelmaesimerkin tyypillisen, keskikokoisen metallien jauhepetisulatukseen perustuvan laitteen tuotantokapasiteetista ja arvioineet sen avulla suomalaisten 3D-tulostuspalveluyritysten kapasiteettia ja kykyä vastata äkilliseen kysynnän nousuun. Taulukossa 7 on esitetty Hämeenahon ja muiden (2019, 19–20) tekemä laskelma kolmen erilaisen kappaleen tulostusajasta ja sen mukaan kullekin kappaleelle lasketusta vuotuisesta tuotantokapasiteetista. Laskennassa on käytetty karkeita arvioita useiden tulostusaikaan vaikuttavien tekijöiden kohdalla, eikä kaikkia laskennassa käytettyjä parametrejä kerrottu raportissa. Esimerkit antavat suuntaa antavan arvion jauhepetituloslaitteen vuosittaisen tuotantokyvyn suuruusluokasta, joka voi kuitenkin poiketa todellisuudesta suurestikin riippuen tulostettava kappaleelta vaadittavista ominaisuuksista sekä tulostuksen optimointiasteesta.

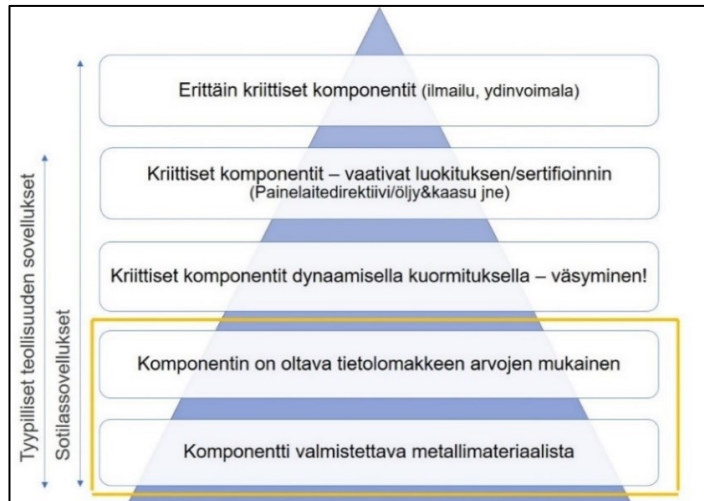
Taulukko 7. Esimerkki kappaleiden metalli 3D-tulostusajat ja vuotuinen tuotantokapasiteetti (mukailtu Hämeenaho ym. 2019, 20).

|   |  |  |  |
|---|---|--|---|
| Kappale                                 | Teline  | Mäntä  | Blokki  |
| Koko (mm)                               | 140 x 120 x 85  | Ø50 x 56   | Ø185 x 170  |
| Tilavuus (cm <sup>3</sup> )             | 115   | 57   | 2180  |
| Kappaleita per tulosuserä (kpl)         | 6   | 13   | 1   |
| Arvioitu tulostusaika per kappale (h)   | 13  | 4,5  | 180   |
| Potentiaalinen vuosittainen määrä (kpl) | 420   | 1220   | 30  |

Aiemmin esitetystä taulukosta 6 voidaan laskea, että Suomessa on tällä hetkellä yhteensä ainakin yli 15 keskikokoista metallien jauhepölytulostuslaitetta. Kertomalla yksittäisen laitteen potentiaalinen tuotantomäärä Suomen koko laitekapasiteetilla päästäisiin esimerkkikappaleista telineen ja männän osalta vuositasolla sarjatuotantomääriin, mutta blokin osalta ei.

Kaikki tällä hetkellä toiminnassa olevat metallien 3D-tulostuspalveluja tuottavat yritykset on joko perustettu tai ne ovat ottaneet metallien 3D-tulostuksen tuotevalikoimaansa vuonna 2016 tai sen jälkeen. Osittain näiden yritysten nuoresta iästä johtuen menetelmät ja laatujärjestelmät eivät vielä ole sillä tasolla, että niillä olisi kyky valmistaa kriittisiä, korkean vaatimustason komponentteja. Kuviossa 17 on esitetty Etteplanin ja 3DStep Oy:n laatima metallien 3D-tulostuksen 5-tasoinen laatupyramidi. Siirryttäessä pyramidin tasoilla ylöspäin vaatimukset valmistusprosessin kaikkien vaiheiden osalta (suunnittelu, tulostus, jälkikäsittely, testaus ja tarkastus) kasvavat ja näin ollen myös vaatimukset tarvittavien osaamisten ja resurssien osalta lisääntyvät. (Hämeenaho ym. 2019, 14–15.)

Suomalaiset metallien 3D-tulostuspalveluyritykset ylittävät tällä hetkellä laatutasoille 1 ja 2. Laatutaso 1 täyttyy silloin, kun yrityksellä on kyky valmistaa metallista kappaleita, joihin ei kohdistu mitään erityisiä vaatimuksia mekaanisten ominaisuuksien suhteen, riittää että kappale on valmistettu metallista. Laatutaso 2 täyttyy silloin, kun yrityksellä on kyky valmistaa kappaleita, jotka täyttävät sille tietolomakkeessa asetut vaatimukset. Tällöin kappaleen tulee olla suunniteltu, valmistettu ja jälkikäsittely niin, että sen materiaaliominaisuudet täyttyvät tai ylittävät tietolomakkeen arvot. Metallien lisäävässä valmistuksessa voidaan kappaleen lopullisiin materiaaliominaisuuksiin vaikuttaa myös tulostusprosessin jälkeen tehtävillä erilaisilla lämpökäsittelyillä. (Hämeenaho ym. 2019, 14, 18.)



Kuvio 17. Lisäävän valmistuksen laatupyramidi, jossa suomalaisten metalli 3D-tulostuspalvelu yritysten laatu sijoittuu tasoille 1–2 (Hämeenaho ym. 2019, 19).

Kansainvälistä yhteistyötä tekemällä myös suomalaiset yritykset ovat olleet kehittämässä ja valmistamassa kriittisiä komponentteja erilaisiin käyttökohteisiin, kuten esimerkiksi Patrian General Electric F404 -suihkumoottorin osa F/A-18 Hornet -monitoimihävittäjään sekä Wärtsilän metallinen moottorin osa ja komposiitista valmistettu nostotyökalu (Lentoposti.fi 2018; Sher 2020b).

3D-tulostettavan kappaleen käyttökohde ja -tarkoitus määrittävät valmistusprosessilta vaadittavan laatutason. Vaatimusten alittamisen seurauksena voi olla kappaleen rikkoutuminen ennenaikaisesti tai turvallisuuden vaarantuminen, kun taas ns. yliaadun tekeminen lisää turhaan tuotantokustannuksia ja prosessiin kuluva aikaa.

#### 6.2.4 Lisäävän valmistuksen tutkimus ja käyttösovelluksia

Suomessa tehdään tasokasta, kansanvälisestikin arvostettua materiaalia lisäävään valmistusteknologiaan liittyvää tutkimusta ja kehitystyötä korkeakouluissa, tutkimuslaitoksissa ja yrityksissä. Lisäävää valmistusta käytetään Suomessa sekä prototyyppien, työkalujen, muottien että lopputuotteiden tuotantomentelmänä. Seuraavana joitakin esimerkkejä tutkimuksista, kehitysprojekteista ja käyttökohteista eri teknologioiden alalta.

Tampereen yliopiston Silmäryhmä on onnistunut ensimmäisenä maailmassa tulostamaan elävistä soluista 3D-biotulostimella silmän sarveiskalvon kaltaista kudosta.

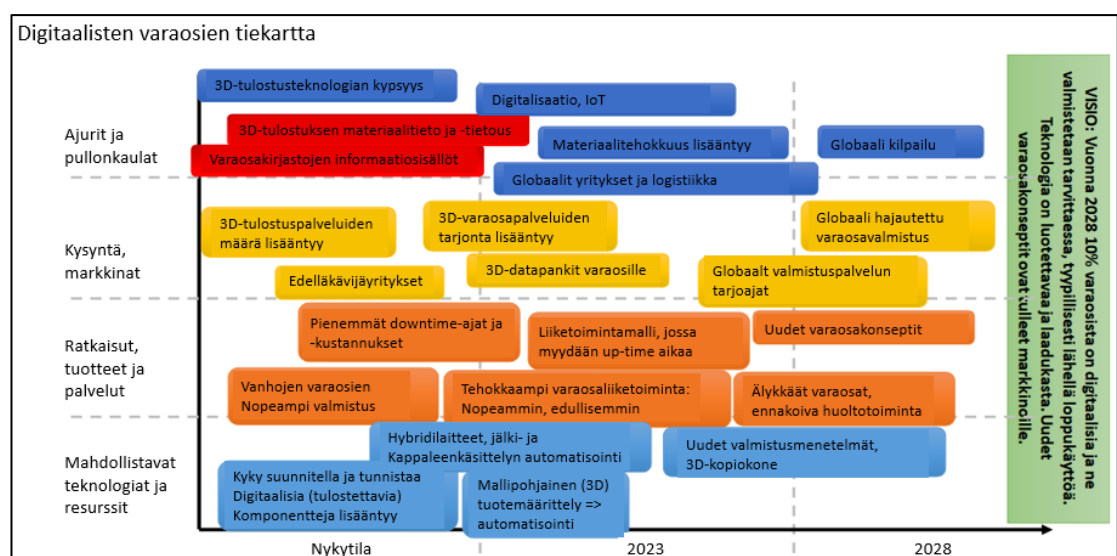
Silmäryhmä on 3D-tulostanut sarveiskalvon kerroksista pintakudosepiteelin ja keskiosan strooma-solukon yhdessä sekä muut osat erikseen. Jatkossa heidän tavoitteena on yhdistää kaikki osat toimivaksi rakenteeksi. Yksinkertaisen kudoksen, kuten ihon, 3D-tulostuksessa käytetään potilaan omia, jo kypsiä soluja ja uskotaan että näitä yksinkertaisia kudoksia voidaan saada käyttöön jo 3-4 vuoden kuluttua, jos kliiniset kokeet käynnistyvät pian. Ihmisen monikykyisiä kantasoluja käyttävien kudosis- ja solutyypin ja niistä tehtyjen 3D-biotulosteiden osalta vie ainakin 8–10 vuotta, ennenkuin ne ovat kliinisessä käytössä. Silmän osien korvaaminen 3D-tulosteella on näissä hoidossa edelläkävijänä. (Keränen 2020, 736-737.)

Itä-Suomen yliopiston farmasian teknologiassa tutkitaan lääkevalmisteiden 3D-tulostamista ja erityisesti FDM-pursotusmenetelmän hyödyntämistä kiinteiden lääkevalmisteiden valmistuksessa. 3D-tulostus mahdollistaa lääkevalmisteen ominaisuuksien muokkaamisen, kuten esimerkiksi erimuotoisten ja -kokoisten tai kerroksittaisten valmisteiden tuottamisen. Yksilöllisen lääkehoidon kannalta 3D-tulostuksen hyötynä voidaan nähdä se, että potilaalle voidaan annostella juuri hänen tarpeitaan vastaava määrä lääkettä ja yhteen valmisteeseen voidaan yhdistää useampia vaikuttavia aineita sekä lääkeaineen vapautumiseen elimistöön voidaan vaikuttaa huomattavasti nykyistä enemmän. (Itä-Suomen yliopisto.)

Hammaslääketieteessä 3D-tulostusta on käytetty hyödyksi maailmalla jo pitkään ja myös Suomessa käytetään 3D-tulostusta asiakastuotteiden valmistukseen. Esimerkiksi Materflow Oy valmistaa mm. rankaproteeseja sekä siltarunkoja SLM-tekniikalla Remanium®star (sertifioitu kobolttikromi) -metalliseoksesta, joka on suunniteltu erityisesti hammaslääketieteellisiin sovellutuksiin (Materflow Oy). Rayo 3D-Toothfill Oy on kehittänyt hampaan restauration valmistusmenetelmän, jossa käytetään 3D-tulostusta muotin valmistamiseen ja dentaalirobottia muotin täyttämiseen. Menetelmän ja laitteiston tuotekehitys on siinä vaiheessa, että ensimmäisten tuotteiden pitäisi olla markkinoilla vuoden 2021 aikana (Rayo 3D-Toothfill Oy). Planmeca Oy tarjoaa hammashoidon ammattilaisille Planmeca Creo® C5 3D-tulostinta, joka mahdollistaa kirurgisten ohjaimien, hammasmallien ja kalvo-oikomiseen tarkoitettujen työmallien valmistamisen helposti ja erittäin nopeasti (Planmeca).

Digitaaliset varaosat (DIVA) oli VTT:n ja Aalto yliopiston johtama tutkimushanke, johon osallistui useita suomalaisia yrityksiä. Digitaaliset varaosat on konsepti, jossa varaosat ja niihin liittyvä valmistustieto säilytetään ja siirretään digitaalisessa muodossa. Varaosien valmistus tapahtuu 3D-tulostamalla vasta tilattaessa ja yleensä lähellä

käyttökohdetta. Tutkimusprojektissa luotiin digitaalisten varaosien liiketoimintakonsepti ja rakennettiin edellytyksiä toimivalle verkostolle, selvitettiin 3D-tulostamalla valmistettujen varaosien suoritus- ja kilpailukykyä nyt ja tulevaisuudessa sekä rakennettiin digitaalisten varaosien tiekartta. Kuviossa 18 on projektissa luotu digitaalisten varaosien tiekartta, johon on kirjattu digitaaliset varaosat konseptin mahdollistajia ja edistäviä asioita sekä haasteita. (Salmi, Partanen, Tuomi, Chekurov, Björkstrand, Huotilainen, Kukko, Kretschmar, Akmal, Jalava, Koivisto, Vartiainen, Metsä-Kortelainen, Puukko, Jussila, Riipinen, Reijonen, Tanner, & Mikkola, 2018, 1–3.)

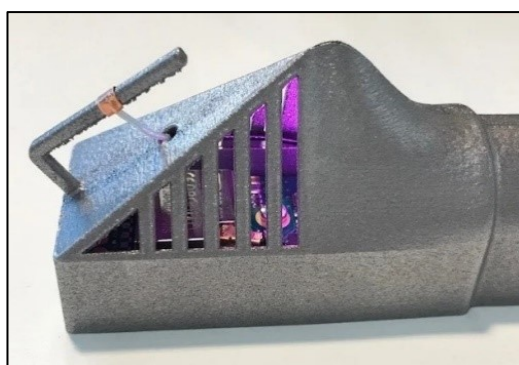


Kuvio 18. DIVA-projektissa luotu digitaalisten varaosien tiekartta (Salmi ym. 2018, 47).

VTT:n ja Aalto-yliopiston Uutta liiketoimintaa digitaalisista varaosista (DIVALIITO) -projekti, jonka loppuraportti julkaistiin lokakuussa 2020 oli jatkoa DIVA-projektille. DIVALIITO-projektissa kehitettiin metodeja tunnistaa 3D-tulostettavat varaosat varaosakirjastosta, koottiin ja tuotettiin tietoa 3D-tulostusmateriaaleista sekä vertailtiin niiden ominaisuuksia perinteisiin valmistusmateriaaleihin ja -prosesseihin huomioon ottaen erilaiset jälkikäsittelyprosessit. Projektissa tutkittiin uusia varaosaliiketoimintakonsepteja, kuten älykkäitä varaosia, joihin upotetaan valmistusvaiheessa erilaisia tunnisteita ja sensoreita sekä selvitettiin koko valmistusprosessiketjuun liittyvien vaiheiden toisiinsa kytkeä erityisesti digitaalisen tiedonsiirron, työnkulun ja automaation kannalta. (Metsä-Kortelainen, Reijonen, Riipinen, Vaajoki, Puukko, Salmi, Chekurov, Kretschmar, Akamal, Puttonen & Partanen 2020.)

VTT koordinoi eurooppalaista 3DREMAG-yhteistyöprojektia, jossa kehitetään kestmagneettien 3D-tulostukseen soveltuvaa uutta materiaalia, jota voidaan käyttää tulevaisuuden sähkö- ja hybridiajoneuvojen sähkömoottoreissa. Pitkän tähtäimen tavoitteena on täysin 3D-tulostettava sähkömoottori, joka olisi noin 30 % nykyisiä moottoreita kevyempi. Tavoitteen saavuttamiseksi tarvitaan kuitenkin paljon monitieteellistä yhteistyötä ja eri teknologioiden yhdistämistä. Projektissa kehitetään neodyymia (Nd), rautaa (Fe) ja booria (B) sisältävää jauhemateriaalia kestmagneettien 3D-tulostusraaka-aineeksi. 3D-tulostuksen avulla voitaisiin sekä optimoida magneetin muotoa että minimoida sen valmistuksessa syntyvää hukkamateriaalia. Kehitettävä NdFeB-jauhe on ensimmäinen 3D-tulostukseen räätälöity kestmagneettimateriaali. (Uusiteknologia.fi 2020.)

Etteplan Oy on kehittänyt yhteistyössä saksalaisen 3D-tulostuslaittevalmistaja EOS GmbH:n kanssa sarjatuotantoon soveltuvia 3D-tulostettuja metallikappaleita, joiden sisälle on integroitu elektroniikka. He valmistivat demokappaleen (kuva 24), joka sisään oli integroitu piirilevy antureineen ja kappaleen metallikuori toimi antennina. (Etteplan Oy.)



Kuva 24. Metallista 3D-tulostettu kappale, jonka sisään on integroitu elektroniikkaa (Etteplan Oy).

Wärtsilän suunnittelema ja Markforged- laitteella hiilikuidusta valmistama nostotyökalu (kuva 25) on ensimmäinen 3D-tulostamalla valmistettu työkalu, mikä on saanut CE-merkinnän. Työkalun sertifioitu nostokapasiteetti on 240 kg, mutta se kestää 960 kg painoisen kappaleen noston 4-kertaisen turvamarginaalin vuoksi. 3D-tulostamalla valmistettu työkalu on 75 % kevyempi ja noin 1000 € edullisempi kuin perinteisesti teräksestä valmistettu. Wärtsilä on valmistanut aiemmin myös muita tuotannossaan tarvitsemiaan työkaluja ja apuvälineitä samalla tekniikalla kuin nostotyökalu valmistettiin. (Markforged.)



Lukumääräisesti suurin osa Wärtsilän 3D-tulosteista on erilaisia asennustyökaluja ja tuotannonapuvälineitä, kuten esimerkiksi kiinnikkeitä, vasteita, tarttujia ja suoja. Wärtsilä onkin saavuttanut yli 100 000 euron vuotuiset säästöt työvälineiden 3D-tulostuksella. 3D-tulostusta pidetään kannattavana valmistusmuotona, jos sillä säästetään joko aikaa tai rahaa, tai saadaan lisää suorituskykyä. (Tervola 2020, 24–25.)

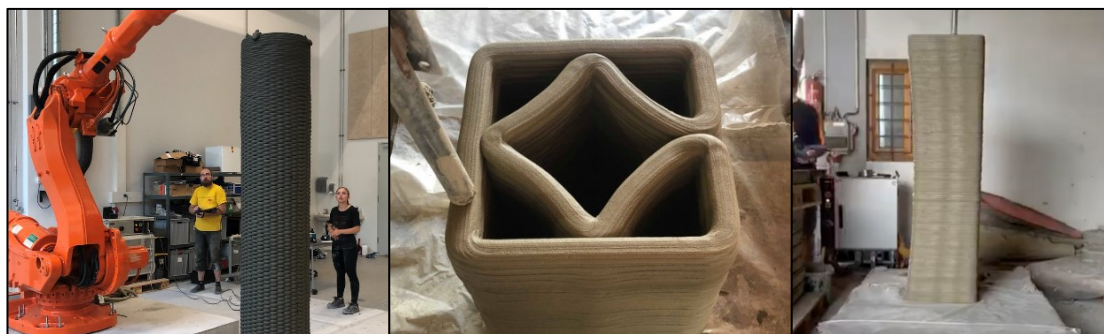


Kuva 25. Hiilikuidusta pursotustekniikalla valmistettu nostotyökalu (Markforged).

V.A.V. Group Oy käyttää 3D-metallitulostinta tuotteidensa, silikonin- ja TPE-profiilien, valmistuksessa tarvittavien ekstruusiotyökalujen valmistukseen (Harju 2018). Valmet Oyj. valmistaa muotteja ja Lillbacka Powerco valmistaa komponentteja omiin tuotteisiin metallien 3D-tulostuksella (Hämeenaho ym. 2019, 21).

Metso Oyj esitteli vuonna 2018, että yritys on ottanut käyttöön lisäävän valmistuksen ja valmistaa työkaluja ja prosessiteollisuuden venttiilejä metallien 3D-tulostuksella. Nykyisin venttiilien valmistusta tekee kesällä 2020 Metson osittaisjakautumisessa syntynyt Neles Oyj. (Scott 2018; Neles 2020.)

Hyperion Robotics kehittää suuren skaalan betonin 3D-tulostusteknologiaa arkkitehtuurin, rakentamisen ja infrastruktuurin kehittämisen tarpeisiin. Rakennuselementtien lisäksi betonin 3D-tulostus taipuu taiteen ja käyttöesineiden, kuten pöytien tai istuimien valmistusmenetelmäksi. Kuvassa 26 näkyy vasemmalla betonin 3D-tulostusta robotin avulla. Kuvassa 26 keskellä oleva pilari valmistui 30 minuutissa ilman muottia ja siihen tarvittiin 40 % vähemmän betonia kuin perinteiseen pilariin, oikealla olevan palkin valmistukseen meni alle 40 minuuttia. (Hyperion Robotics.)



Kuva 26. Betonin 3D-tulostusta ja tulostamalla valmistettuja betonipilareita (Hyperion Robotics).

Suomessa toimii yrityksiä, jotka käyttävät lisäävää valmistusteknologiaa joko yksittäis- tai sarjatuotettujen lopputuotteiden valmistusmenetelmänä, jonka teknologinen kypsyyden taso on tasolla 9. Suuri osa Suomessa lisäävällä valmistuksella tuotetuista kappaleista on kuitenkin vielä kypsyystasolla 5–8 olevia prototyyppisiä, demonstraatiota menetelmän toimivuudesta tai yksittäisiä sovelluksia, joita ei vielä ole kehitetty kaupallisesti kannattaviksi tuotteiksi.

### 6.3 Materiaalia lisäävään valmistuksen käyttö Euroopassa

Euroopassa erityisesti Saksa on edelläkävijä maa materiaalia lisäävän valmistuksen tutkimuksessa ja käyttöönotossa ja aiemmin esitetystä kuvioista 14 on nähtävissä, että Saksassa on ylivoimaisesti eniten teollisen tason AM-laitteistoja Euroopassa. Seuraavana tulevat Iso-Britannia, Italia ja Ranska. Pohjoismaista eniten AM-laitteita on Ruotsissa. (Wohlers Associates Inc. 2020, 32).

#### 6.3.1 Saksa

Saksan hallituksen vuonna 2011 julkaisemassa ”Industrie 4.0” hankkeessa 3D-tulostus on huomioitu osana digitaalitekniikoita. On arvioitu, että Saksassa on 148 tutkimuslaitosta, joissa on lisäävän valmistuksen aktiviteetteja. Näistä laitoksista ehkä suurin on Fraunhofer-Gesellschaft, joka koostuu 74 erilaisesta tutkimuslaitoksesta ja -yksiköstä. Lisäävällä valmistuksella on oma tutkimuslaitos Fraunhofer IAPT (Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien), mutta lisäävää valmistusta tutkitaan myös monissa muissa Fraunhofer-Gesellschaftin tutkimuslaitoksissa. Tutkimuslaitosten lisäksi

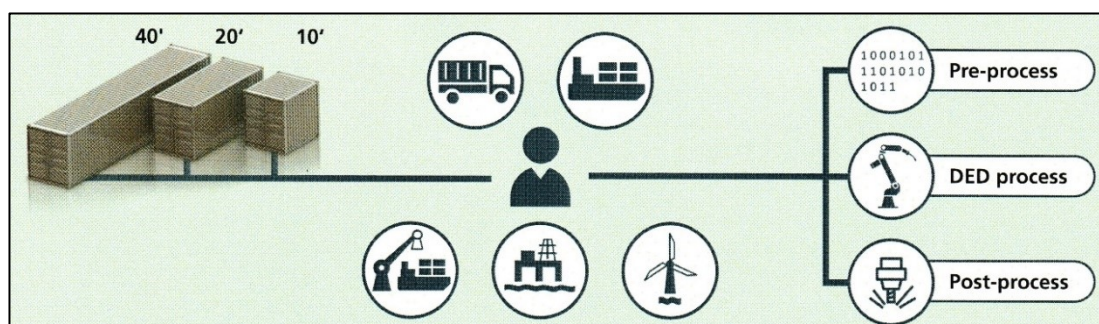
tutkimusta tehdään useissa yliopistoissa ja esimerkiksi Münchenin teknillinen yliopisto sai kaksi uutta lisäävän valmistuksen professuuria vuonna 2019. (AMFG 2019; Fraunhofer-Gesellschaft 2020; Wohlers Associates Inc. 2020, 213.)

Saksassa lisäävästä valmistuksesta on tullut osa tuotekehitystä ja tuotantoa. Viime vuosina on laadittu tiekartta teollisen 3D-tulostusprosessin automatisoinnin lisäämiseksi sekä rakennettu lisäävän valmistuksen ekosysteemiä. Saksassa on lukuisia teollisen tason metallien ja polymeerien 3D-tulostuslaitevalmistajia sekä ohjelmisto- ja raaka-ainevalmistajia. Suurimpia laitevalmistajia ovat mm. Envisiontec, EOS ja SLM Solutions, ohjelmistovalmistajista voidaan mainita mm. Materialise, Siemens ja 3YOURMIND, jotka mm. kehittävät ohjelmistoja prosessin hallintaa. Yrityksistä esimerkiksi lentokonevalmistaja Airbus, autonvalmistajat BMW ja Volkswagen sekä rautatieyhtiö Deutsche Bahn käyttävät lisäävää valmistusta erilaisten osien ja työkalujen valmistukseen. (Wohlers Associates Inc. 2020, 212.)

Vuonna 2019 Saksan valtion julkaisi lisäävän valmistuksen prosessien linjaintegraatio -ohjelman (Linienintegration additiver Fertigungsverfahren, LAF), jonka kokonaisrahoitus on yli 66 miljoonaa euroa. Ohjelmalla rahoitetaan neljää suurta lisäävän valmistuksen teollistamisprojektia. Saksan valtion, tutkimuslaitosten, yliopistojen ja yksityisten yritysten merkittävät investoinnit lisäävän valmistuksen tutkimus- ja kehittämistoimintaan sekä implementointiin kannattavaksi tuotantoteknologiaksi yritysmaailmassa pitävät Saksan Euroopan lisäävän valmistuksen kehityksen ja käyttöönoton kärkimaana tulevaisuudessakin. (Wohlers Associates Inc. 2020, 212; AMFG 2019.)

Lentokonemoottoreita valmistava GE Aviation perusti vuonna 2016 3D-tulostuksen kehittämiskeskuksen, GE Additive, Saksan Müncheniin, koska siellä on alan paras osaaminen sekä suurimmat markkinat. GE Additive toimii usealla eri paikkakunnalla eripuolella maailmaa. Asiakaspalvelupäällikkö Christian Rensch sanoi Metalliteknikka lehdessä julkaistussa haastattelussa, että lisäävään valmistukseen lähteminen kestää noin kuusi vuotta ja että kappale pitää sekä suunnitella että pystyä valmistamaan onnistuneesti useita kertoja ja sen elinkelpoisuus pitää kyetä todistamaan. LEAP moottorin polttoainesuuttimen lisäksi GE:n ylpeys on ATP Turboprop -pienmatkustajakoneen moottori, josta yli kolmannes on valmistettu 3D-tulostamalla. Moottorissa tarvitaan 3D-tulostuksen ansiosta 855 osan sijaan vain 12 erillistä osaa. Pienempi osamäärä vähentää massan lisäksi tarvittavien tiivisteiden määrää, jolla taas on positiivinen vaikutus moottorin huoltoväliin. (Leino 2020, 27–29.)

Fraunhofer IAPT on kehittänyt lisäävän valmistuksen mobiiliin tehtaan, liikutettavan konttipohjaisen 3D-tulostusyksikön, jossa on tilat suunnittelulle (pre-process), 3D-tulostukselle suorakerrostustekniikalla (DED process) sekä jälkikäsittelylle (post-process). Yksikköä voidaan käyttää erilaisiin teollisuuden sovelluksiin esimerkiksi satamissa, laivoissa tai energiantuotannon yksiköissä kuin myös sotilassovelluksissakin. Kuviossa 19 on havainnekuva mobiiliin tehtaan mahdollisista sovellusalueista ja toiminnoista. (Fraunhofer IAPT 2019.)



Kuvio 19. Modulaarinen, konttipohjainen lisäävän valmistuksen mobiilitehdas (Fraunhofer IAPT 2019).

Saksassa vuosittain järjestettävät Formnext-messut on yksi suurimmista lisäävän valmistuksen tapahtumista. Esimerkiksi vuonna 2019 Formnext-messuilla oli yli 34 500 osallistujaa, mikä oli 28 % enemmän kuin edellisellä vuonna ja näytteilleasettajien määrä kasvoi 35 % edellisvuodesta ollen 852. (Wohlers Associates Inc. 2020, 213.)

### 6.3.2 Ruotsi

Ruotsin lisäävän valmistuksen alan toimijat ovat nelinkertaistaneet 3D-tulostuskapasiteettiaan vuoden 2018 alun vuoden 2019 lopun välisenä ajanjaksona. Viime aikoina kiinnostus on kasvanut erityisesti lisäävän valmistuksen mahdollisuuksiin kunnossapitoon liittyvillä aloilla, kuten varaosavalmistuksessa. Viimeisimmän tutkimuksen mukaan 35 erikokoista ruotsalaisyritystä käyttää lisäävä valmistusta metalliosien valmistukseen ja vajaat 20 tutkimuslaitosta ja yliopistoa on mukana metallien lisäävän valmistuksen tutkimusprojekteissa. Kuitenkin metallien lisäävän valmistuksen kehitys metalliosien valmistusmenetelmäksi etenee hitaasti ja vain pieni osa yrityksistä käyttää lisäävän valmistuksen tekniikoita kaupalliseen tuotantoon. (Wohlers Associates Inc. 2020, 221.)

Ruotsissa on sekä 3D-tulostusmateriaalien että 3D-tulostuslaitteiden valmistusta, josta merkittävin on GE Additive yritykseen kuuluvan Arcam EBM:n elektronisuihkusulatusteknologiaan perustuvien laitteiden valmistus (GE Additive). Sandvikin titaani jauheita ja nikkeli superseoksia valmistava tehdas ja lisäävän valmistuksen yksikkö ovat saaneet vuonna 2020 AS 9100D-laatusertifikaatin (AS 9100D, Quality Management Systems - Requirements for Aviation, Space, and Defense Organizations, Laatu järjestelmä- vaatimukset ilmailu, avaruus ja puolustus organisaatioille). Lisäksi Sandvik sai vuonna 2020 titaani jauhetuotannolle terveydenhuollon laitteita ja tarvikkeita koskevan ISO 13485:2016-laatusertifikaatin (ISO 13485:2016, Terveydenhuollon laitteet ja tarvikkeet. Laadunhallintajärjestelmät. Vaatimukset viranomais määräyksiä varten), joten Sandvikin valmistamaa titaani jauhetta voidaan käyttää myös lääketieteen AM-sovelluksiin. (Sandvik 2020.) Quintus Technologies AB valmistaa mm. kriittisten kappaleiden HIP-lämpökäsittelyssä tarvittavia laitteita (Quintus Technologies AB). Terveysteknologia alan yritys OssDsign kehittää ja valmistaa regeneratiivisia implantteja luuvaurioiden korjaamiseen (OssDsign).

Ruotsissa on laadittu metallien lisäävän valmistuksen teollistamisen tiekartta ja metallien lisäävän valmistuksen teknologian kehittämiseksi, tietoisuuden lisäämiseksi ja teollistamisen vauhdittamiseksi on perustettu yhteishanke nimeltä The Swedish Arena for Additive Manufacturing of Metals. Vuonna 2020 on myös julkaistu raportti, Standardization of Metal Additive Manufacturing – needs from Swedish industry, joka käsittelee metallien lisäävän valmistuksen standardoinnin tilaa ja Ruotsin teollisuuden tarpeita standardoinnille. (Swerim.) Upsalan yliopistossa on mahdollista suorittaa ylempi korkeakoulututkinto lisäävän valmistuksen koulutusohjelmassa (Uppsala Universitet 2020).

Siemens Energyn valmistama kaasuturbiinin polttimen valmistus on hyvä esimerkki metallien 3D-tulostuksen sarjatuotantokäytöstä. Perinteisellä menetelmällä valmistettaessa polttimeen tarvitaan 13 osaa ja 18 hitsausliitosta, mutta 3D-tulostamalla poltin voidaan valmistaa kerralla yhdessä osassa. Uudelleensuunnittelulla ja optimoinnilla poltin on saatu kevyemmäksi ja sen hyötysuhde on parempi sisään rakennettujen jäähdytyskanavien takia. Kuvassa 27 on kaksi 3D-tulostamalla valmistettua kaasuturbiinin poltinta, vasemmalla käyttömätön ja oikealla yhden vuoden käytössä ollut poltin. Pilottivaiheessa polttimia tarkastettiin 2000 käyttötunnin sekä yhden vuoden jälkeen. Polttimet läpäisivät käyttötestin ja olivat testijakson jälkeen hyväksyttävässä kunnossa. (Breuer 2018.)



Kuva 27. 3D-tulostettuja kaasuturbiinin polttimia, vasemmalla käyttämätön ja oikealla vuoden käytössä ollut poltin (Siemens Energy 2018).

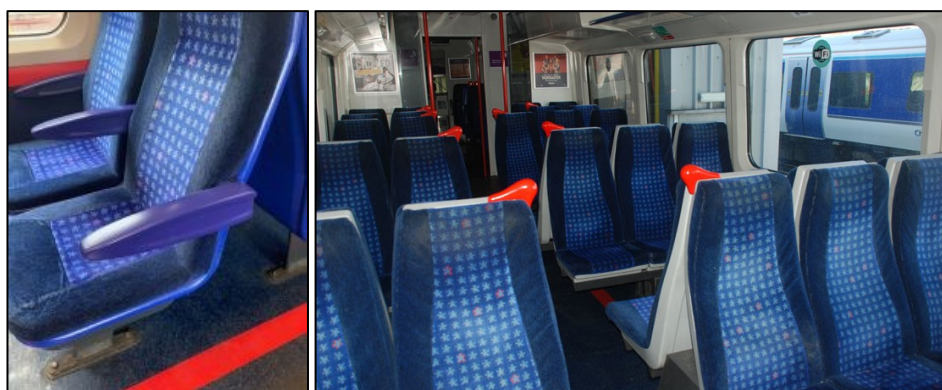
Karlskogan kunta ilmoittaa olevansa maan johtava lisäävän valmistuksen alue. Karlskogan ja Örebron kunnat omistavat yhdessä Örebron läänin kanssa Alfred Nobelin tiedepuiston (Alfred Nobel Science Park), jossa sijaitsee monipuolinen teollisuustason laitteita käsittävä AM-keskus. Alueella on useita yrityksiä, kuten esimerkiksi SAAB Bofors Dynamics ja BAE Systems Bofors sekä Örebron yliopisto. (Karlskoga kommun 2020; Alfred Nobel Science Park.) Karlskogassa toimii myös teollisuusyritysten omistama Ruotsin teollisuuden lisäävän valmistuksen osaamiskeskus, Additive Manufacturing Excellence for Industry (AMEXCI AB), joka tarjoaa asiakkailleen pilottivalmistusta, parametrien ja prosessien kehitystä, testausta, koulutusta ja kehitysprojekteja metallien ja polymeerien lisäävästä valmistuksesta (AMEXCI).

### 6.3.3 Iso-Britannia (UK)

UK:ssa on lisäävä valmistus otettu käyttöön jo 1990-luvulla prototyyppien pikavalmistus sovelluksien myötä. Vuonna 2014 kehitettiin kansallista lisäävän valmistuksen strategiaa ja vuonna 2017 hallitus julkaisi teollistamisstrategian, ohjelman UK:n kehittämiseksi lisäävän valmistuksen kärkimaaksi. Vaikka yksi maan vahvuuksista on lisäävän valmistuksen tutkimus- ja kehitystyö ja useat yliopistot tekevät lisäävän valmistukseen liittyvää tutkimusta, teknologian siirto kaupalliseksi tuotantomenetelmäksi on kuitenkin hidasta. (AMFG 2019.) UK:n tavoitteena on saada 10 % maailmanlaajuisesta avaruusmarkkinoista vuoteen 2030 mennessä ja lisäävä valmistus on avainroolissa tavoitteen saavuttamisessa (Wohlers Associates Inc. 2019, 278).

Suuresta määrin UK:ssa lisäävää valmistusta käyttävät esimerkiksi Bowman Additive Production mm. laakerikehien, Croft Additive Manufacturing mm. erilaisten suodattimien, Metron Additive Engineering mm. polkupyörien osien ja GKN Additive ilmailun ja autoilun komponenttien valmistukseen. Renishaw on UK:n suurin 3D-tulostuslaittevalmistaja, joka tuottaa myös muita valmistusprosessissa tarvittavia laitteita, kuten skannereita ja ohjelmistoja. (AMFG 2019; Renishaw 2001–2020.) Lisäävän valmistuksen toimitusketjun vahvistamiseksi on tehty merkittäviä investointeja viime vuosina. Esimerkiksi Siemens avasi vuonna 2018 digitaalisen tehtaan, jossa on yli 50 jauhepetituloslaitetta sekä takaisinmallinnus ja jälkikäsittely mahdollisuudet. (Wohlers Associates Inc. 2019, 279.)

Chiltern Railways -yhtiön juniin asennettiin UK:n ensimmäiset 3D-tulostetut osat vuonna 2019. Tavoitteena oli esitellä, kuinka 3D-tulostamalla voidaan saada vanhoihin juniin osia nopeammin ja edullisemmin, etenkin silloin kun alkuperäisiä osia ei enää ole saatavissa tai tarvittava erä koko on pieni. Esimerkiksi kuvassa 28 olevan käsinojan toimitusaika perinteisellä menetelmällä valmistettaessa olisi ollut noin 4 kuukautta, kun 3D-tulostamalla toimitusaika oli noin yksi viikko. Kuvassa 28 on esitetty myös punaiset tartuntakahvat, joiden valmistus oli huomattavasti nopeampaa ja edullisempaa 3D-tulostamalla kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä. Merkittävän ajallisen säästön lisäksi valmistuskustannuksissa oli mahdollista saavuttaa 50 %:n säästö, sillä perinteiseen valmistukseen olisi tarvittu uusi valmistustyökalu, hinnaltaan 15 000 puntaa ja toimitusaika olisi ollut 2,5 kuukautta. (Global Railway Review.)



Kuva 28. 3D-tulostamalla valmistetut käsinojat ja tartuntakahvat (Global Railway Review).

BAE Systems, kansainvälinen puolustus-, turvallisuus- ja ilmailuteollisuuden yritys on käyttänyt lisäävää valmistusta jo yli kaksivuosisikymmentä ja valmistaa AM-tekniikalla mm. osia Typhoon hävittäjälentokoneeseen. (Wohlers Associates Inc. 2020, 224.)

#### 6.3.4 Italia

Italiassa on viime aikoina keskitytty kehittämään ja parantamaan lisäävän valmistuksen laitteiden luotettavuutta käyttämällä digitaalisia työkaluja ja prosessin simulointi -ohjelmistoja. Lisäksi huomioita on kiinnitetty massadatan käsittelyyn, tekoälyyn ja tietoturvalisuuteen. Sekä lääketieteen että ilmailun aloilla käytetään lisäävää valmistusta metallikappaleiden sarjatuotannossa. Autoteollisuus käyttää lisäävää valmistusta pääosin prototyyppien ja pienten sarjojen valmistukseen autourheilussa. Italian valtion tukee lisäävän valmistuksen sovellusten kehitystä Impresa 4.0 -vero-ohjelmalla, josta tarjotaan yrityksille merkittävää taloudellista tukea. (Wohlers Associates Inc. 2020, 214.)

Italian lisäävän valmistuksen markkinoista polymeerien 3D-tulostuksen osuus on noin 60 % ja metallien 3D-tulostuksen osuus on 40 %. Arviolta 50 % asennetuista laitteista on palveluntuottajilla ja seuraavaksi eniten laitteita on lääketieteen, ilmailun ja autoteollisuuden sektoreilla. (Wohlers Associates Inc. 2019, 268.)

Covid-19-pandemia on aiheuttanut eripuolilla maailmaa mm. puutetta terveydenhuollon tarvikkeista ja johtanut monien innovaatioiden syntyyn. Sen lisäksi, että Isinnova yritys valmisti hengityslaitteiden venttiilejä hätäapuna sairaalan tarpeeseen, se on kehittänyt snorklaus maskiin venttiilin, jonka avulla maskista voidaan tehdä ylipainehoitomaski potilaan hengitysvaikeuksien helpottamiseksi. Maskilla (kuva 29) ei ole lääkinnällisen laitteen hyväksyntää ja se onkin tarkoitettu käytettäväksi hätätilanteessa, kun varsinaista ylipainehengitysmaskeista on puute. Yrityksen verkkosivuilla on kuvassa 29 näkyvän keltaisen venttiilin 3D-malli ja valmistusohjeet vapaasti ladattavissa. (Isinnova 2020.) Tällainen venttiilin valmistus on yksi hyvä esimerkki 3D-tulostuksen mahdollisuuksista, ketteryydestä ja nopeudesta tuotekehitystyössä ja tarvittaessa tehtävästä valmistuksesta.





Kuva 29. Snorklausmaskista 3D-tulostusta apuna käyttäen valmistettu ylipainehengitysmaski (Isinnova 2020).

### 6.3.5 Norja

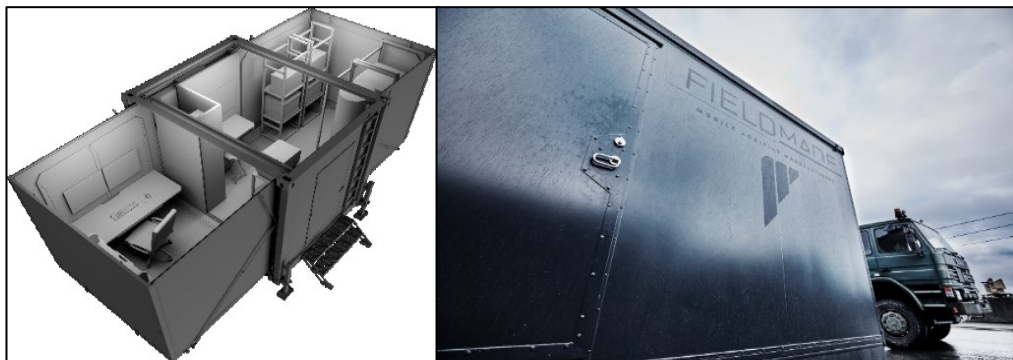
Norjassa kiinnostus materiaalia lisäävään valmistukseen on kasvussa, ja alalle on tullut useita uusia toimijoita, mutta teknologian teollinen käyttöönotto on ollut vielä melko vaatimatonta. Erityisesti merellä ja meren alla toimivat yritykset ovat julkaisseet useita lisäävän valmistuksen ja digitaalisuuden hyödyntämiseen liittyviä hankkeita. Muita merkittäviä lisäävän valmistuksen käyttäjiä ovat ruiskupuristus-, valimo- ja puolustusteollisuus sekä lääketiede. (Wohlers Associates Inc. 2020, 215; Wohlers Associates Inc. 2019, 269.)

Norjalainen öljy- ja kaasuyhtiö, Equinorin tavoitteena on ottaa lisäävä valmistus osaksi toimitusketjua ja kehittää digitaalista varaosavarastoa. Equinorin öljykentille on 3D-tulostamalla valmistettu mm. kriittisiä osia palontorjuntajärjestelmään sekä pelastusveneeseen moottorin polttoainesuutin, joka on saanut myös Norjan luokitus ja sertifiointijärjestö DNV-GL:n verifiointin. Equinorissa nähdään, että lisäävällä valmistuksella on suuri potentiaali huollossa ja korjauksessa tarvittavien varaosien tuotannossa etenkin, jos on kyseessä vanhempi järjestelmä, johon varaosia ei enää ole saatavissa. Digitaalisten varaosavarastojen uskotaan myös tuovan merkittäviä säästöjä. (Wohlers Associates Inc. 2020, 215; Wohlers Associates Inc. 2019, 269.) Equinor on myös esitellyt 3D-tulostettujen varaosien toimittamista öljykentälle miehittämättömän ilma-aluksen eli dronen avulla (Valdivieso 2020). Kuvassa 30 on 3D-tulostettu pelastusveneeseen moottorin polttoainesuutin sekä drone, jolla polttoainesuutin kuljetettiin mantereelta noin 80 kilometrin päähän Troll A -kaasunporauslautalle (Valdivieso 2020; Equinor 2020).



Kuva 30. 3D-tulostetun pelastusveneen moottorin polttoainesuutin ja sen kuljetukseen käytetty drone (Equinor 2020).

Fieldmade kehittää ja valmistaa konttipohjaisia kentälle siirrettäviä 3D-tulostusyksiköitä, mikrotehtaita, jotka voidaan kuljettaa kohdealueelle maa-, meri- tai ilmatietä pitkin. 3D-tulostusyksiköt soveltuvat sekä sotilas- että siviilikäyttöön ja erityisesti kohteisiin, joissa ollaan hankalien kulkuyhteyksien päässä ja tarvitaan nopeaa varaosatoimitusta. Kuvan 31 NOMAD®01 yksikkö, jossa voidaan valmistaa väliaikaisvaraosia polymeeristä ja komposiitista teollisuustason materiaalin pursotustekniikalla, on Fieldmaden 3D-tulostusyksiköistä pienin ja varustukseltaan yksinkertaisin. Fieldmade tarjoaa asiakkaille myös digitaalista varastointiratkaisua (Wohlers Associates Inc. 2020, 215; Wohlers Associates Inc. 2019, 269; Fieldmade 2020.)



Kuva 31. Fieldmade NOMAD®01 liikuteltava 3D-tulostusyksikkö (Fieldmade 2020).

## 6.4 Materiaalia lisäävän valmistuksen käyttö muualla maailmassa

Tässä kappaleessa esitellään Venäjän, Israelin, USAn sekä Aasian/Tyynenmeren alueelta Kiinan ja Japanin lisäävän valmistuksen käyttöä sekä joitakin sovellusesimerkkejä.

### 6.4.1 Venäjä

Venäjällä toimivan J`son & Partners Consulting -yhtiön vuonna 2019 tekemässä The 3D printing market in Russia and in the world on 2018-raportissa, esitetään analyysin Venäjän 3D-tulostus markkinoista. Raportin mukaan Venäjän materiaalia lisäävä valmistus olisi teknologisesti samalla kehitysasteella maailman johtavien maiden kanssa. Tästä osituksena pidetään mm. sitä, että Venäjällä on sekä tulostusraaka-aineiden että kalliiden teollisuustason tulostimien valmistusta, ja lisäävää valmistusta on käytetty menestyksekkäästi moottoreiden, turbiinien sekä rakennusten valmistuksessa. Lisäävän valmistuksen teollisuus on myös sisällytetty valtion teknologiseen agendaan ja johtavat teollisuuskeskukset sekä valtion yhtiöt ovat siirtymässä prototyyppien ja työkalujen valmistuksesta sekä teknologian tarjoamien mahdollisuuksien tutkimuksesta toiminnallisten tuotteiden korjaamiseen ja valmistukseen. Kuitenkin johtuen käyttöönoton haasteista, sijoitus- ja kaupallisista olosuhteista sekä heikosta yhteistyöstä, siviilitoimialoilla ollaan kaukana jäljessä lisäävän valmistuksen sovellusten ja kaupallisten palvelujen tarjonnan osalta. (J`son & Partners Consulting 2019.)

J`son & Partners Consultingin (2019) raportin mukaan Venäjällä tehdään aktiivista työtä lisäävän valmistuksen teknologian kehittämiseksi mm. perustamalla osaamiskeskuksia ja laatimalla kansallisia standardeja. Yrityksille, jotka haluavat testata 3D-tulostuksen mahdollisuuksia on perustettu useita lisäävän valmistuksen osaamiskeskuksia eripuolille Venäjää. Venäjällä on olemassa omaa laitteiden ja raaka-aineiden valmistusta sekä ohjelmistokehitystä. Nämä muodostavat tiimin, joka kykenee tuottamaan kaikki lisäävän valmistuksen palvelut ns. avaimen käteen periaatteella. Vaikka Venäjällä on omaa tuotantoa ja osaamista, kaupallistaminen globaalille tasolle on haasteellista, koska he ovat vielä liian riippuvaisia sekä tuonnista että tutkimus- ja kehittämisrahoituksesta. (J`son & Partners Consulting 2019.)

Venäjän 3D-tulostuslaitteiden ja palveluiden markkinat ovat olleet vakaassa kehityksessä viimeiset kahdeksan vuotta, kasvaen kymmenkertaisesti. Venäjällä on

samanlainen, yleismaailmallinen lisäävän valmistuksen markkinoiden rakenne – teollisuus, ilmailu ja lääketiede ovat perinteisiä johtavia aloja toiminnallisten tuotteiden valmistuksessa. Rahallisesti 3D-tulostus laitteiden, materiaalien ja palveluiden (mukaan lukien T&K) myynnin kasvun arvioitiin vuonna 2018 olevan 4,5 biljoonaa ruplaan vuodessa (noin 52 miljoonaa euroa). Venäjällä 3D-tulostus laitteiden, lisälaitteiden ja materiaalien oston osuus oli noin 80 % markkinoista, kun taas globaalisti tulostuspalveluiden ja tekniikan osuus on 60 %. Myydyistä laitteista noin 30 % oli venäläisvalmisteisia. Suurimpia Venäjälle 3D-tulostuslaitteita ja materiaaleja vieviä maita ovat Saksa, USA ja Kiina. (J`son & Partners Consulting 2019.)

Rosatom aloitti vuonna 2014 metallien jauhepetisulatuslaitteiden kehitystyön, vuonna 2016 perustettiin tekninen komitea numero 182 ”Lisäävät teknologiat” ja vuonna 2019 RusMelt 300M ja RusMelt 600M merkkisille 3D-tulostimille oli rakennettu massatuotanto valmius. Vuonna 2019 valmistettiin viisi tulostinta valtionyhtiö Rosatomin yrityksille sekä yksi tulostin kaupallisten sopimusten puitteissa. Rosatomiin kuuluvan Rusatom Additive Technologies (RusAT) yhtiön avainalueita ovat 3D-tulostimien ja niiden komponenttien valmistus, lisäävän valmistuksen materiaalien ja metallijauheiden luominen sekä ohjelmistojen kehittäminen ja 3D-tulostuspalvelujen tuottaminen sekä AM-teknologian käyttöönoton edistäminen (Rusatom Additive Technologies.) Uralin liittoyliopisto (UrFU) on myös kehittänyt jauhepetisulatukseen perustuvia laitteita, joista suurimmassa on 1,25 x 1,25 m suuruinen tulostusala. (Wohlers Associates Inc. 2019, 273.) Laser ja hitsaus teknologioiden instituutti (Institute of Laser and Welding Technologies) on kehittänyt suora-kerrostus teknologiaan perustuvia suuren mittakaavan laitteita, joilla voidaan valmistaa aina 2,5 m pitkiä ja 1000 kg painavia kappaleita. Laitteelle on käyttösovelluksia mm. laivanrakennuksessa. NPO Centrotech on kehittänyt metallien jauhepetitulostuslaitteen, jossa voidaan käyttää samanaikaisesti kahta eri metalliraaka-ainetta (Wohlers Associates Inc. 2020, 219.)

Rosatomin lisäävän valmistuksen yksikkö, (RusAM) Rusatom Additive Technologies, avasi joulukuussa 2020 ensimmäisen lisäävän valmistuksen keskuksensa (ATC, Additive Technology Centre) Moskovan lähelle. Keskuksessa yhdistyvät lisäävän valmistuksen kehitys, suunnittelu ja valmistus. Kyseessä on maan ensimmäinen ja ainoa täysin venäläisillä laitteilla varustettu AM-keskus ja sen tarkoituksena on testata lisäävän valmistuksen teknologioita ja demonstroida niiden mahdollisuuksia teollisuudelle. Tällä hetkellä keskus on varustettu metallien jauhepetisulatustekniikkaan (SLM) perustuvilla laitteilla, mutta laitevalikoimaa aiotaan laajentaa polymeerimateriaaleja käyttäviin SLS- ja

SLA-laitteisiin. Rosatomin tarkoituksena on perustaa lisää vastaavia keskuksia ja seuraava keskus tullaan perustamaan Novouralskin kaupunkiin NPO Centrotechin yhteyteen. (Communications Department of TVEL JSC 2020.)

Metallien tulostuslaitteiden lisäksi Venäjällä on polymeerien, komposiittien ja biomateriaalien tulostuslaittevalmistusta. 3D Bioprinting Solutions -yrityksen biotulostin Organ.Aut (kuva 32) lähetettiin vuonna 2018 kansainväliselle avaruusasemalle (ISS), missä sillä tulostettiin ihmisen rustokudosta ja jyrsijän kilpirauhaskudosta (3D Bioprinting Solutions 2018). 3D Bioprinting Solutions on kehittänyt magneettiseen levitaatio teknologiaan perustuvaa biotulostusta ja -tulostinta. Menetelmä mahdollistaa biomateriaalien tulostuksen ilman biohajoavaa kasvualustaa mikropainovoima olosuhteissa (Wohlers Associates Inc. 2020, 219).



Kuva 32. Organ.Aut biotulostin, joka on suunniteltu biologisen materiaalin tulostamiseen painottomissa olosuhteissa (3D Bioprinting Solutions 2018).

Venäjällä on useita laite- ja materiaalivalmistajia ja erityisesti metallien 3D-tulostuslaitteissa korostuu kyky valmistaa myös hyvinkin suurikokoisia kappaleita. Rosatomin RusAM ja useat muut sen lisäävän valmistuksen konsortioon kuuluvat yhtiöt ovat maan AM-tekniikan kehittämisen kärkitoimijoita. Laitteiden ja menetelmien yhteydessä esitellään mahdollisia sovelluskohteita sekä tutkimus- ja tuotekehitystyötä, mutta kypsyydeltään valmiita teollisia kappale- tai sarjatuotanto sovelluksia ei julkaisuissa juurikaan ole esitelty.

#### 6.4.2 Israel

Tel Avivin yliopiston tutkijat ovat onnistuneet valmistamaan 3D-biotulostamalla ihmissydämen, jossa rakennusaineena on käytetty ihmissoluja sekä muuta potilasspesifistä biologista materiaalia, kuten kollageenia ja glykoproteiinia. Sydämen rakenne on pystytty valmistamaan aiemminkin, mutta niissä ei ole ollut soluja eikä verisuonia. Valmistettu sydän oli vain noin jäniksen sydämen kokoinen, eikä se toiminut niin kuin sydämen tulee toimia. Teknologia ei vielä ole valmis ihmiselle tehtävään elinsiirtoon, mutta tutkimustulos kuitenkin demonstroi tulevaisuuden mahdollisuuksia valmistaa personoitua kudosta ja elinkorvikkeita. (Terry 2019.) 3D-tulostettua sydäntä käytetään hyödyksi mm. lääkekehityksessä (ILH Staff 2020).

#### 6.4.3 USA

USA on johtava lisäävän valmistuksen teknologian kehittäjä ja hyödyntäjä. USA:ssa on yksi kolmannes (34,5 %) kaikista maailmalle ensiasennetuista 3D-tulostustuslaitteista. USA on globaali johtaja 3D-tulostuksessa tekniikan varhaisen kehityksen ja perinteisen valmistuksen historiallisen johtajuuden ansiosta. Noin 29 %:lla kaikista AM-teknologia yrityksistä on pääkonttori USA:ssa.

Vaikka ensisijaisesti USA:n 3D-tulostuksen kehitys on ollut yksityisten sijoitusten ansiota, myös muutamia hallinnon ajamia kehityshankkeita on ollut. Yksi näistä on vuonna 2012 perustettu kansallinen lisäävän valmistuksen innovaatio instituutti (NAMII, National Additive Manufacturing Innovation Institute), jonka nykyisin tunnetaan America Makes nimellä. America Makes on maan johtava yhteistyökumppani lisäävän valmistuksen ja 3D-tulostuksen teknologian tutkimuksessa, kehittämisessä ja innovoinnissa. Toiminta perustuu julkisen ja yksityisen sektorin kumppanuuteen, elinkaarimalliin (PPP, Public-private-partnership), jossa yksityinen yritys sitoutuu vastaamaan julkisen hankkeen toteutuksesta pitkällä aikavälillä palvelumaksuja vastaan. Nykyään America Makes yhteisöön kuuluu yli 225 jäsentä ja sillä on meneillään 75 AM-teknologiaan liittyvää tutkimus- ja kehityshanketta. Yhtenä suurimmista saavutuksista pidetään Amerikan kansallisen standardointijärjestön (ANSI, American National Standards Institute) kanssa tehtyä ensimmäistä lisäävän valmistuksen standardoinnin tiekarttaa. America Makes on merkittävä tekijä myös puolustussektorin lisäävän valmistuksen tutkimus- ja kehittämishankkeissa. (America Makes 2020; AMFG 2019.)

USA:lta puuttuu maanlaajuinen AM-strategia ja valtion hallinnon rahoitus on vähäisempää kuin keskimäärin muissa AM-tekniikan johtavissa maissa. Pääosa hallinnon rahoituksesta kohdistuu ilmailu- ja puolustusalan hankkeisiin. Yksityisistä yrityksistä yli puolet on ottanut 3D-tulostuksen käyttöön ja 22 % harkitsee käyttöönottoa tulevaisuudessa. Ilmailun ja teollisuustuotteiden ja lääketieteen sektoreilla lisäävä valmistus on yksi merkittävimmistä sijoitus- ja tutkimusalueista. Myös autoteollisuudessa nähdään AM-tekniikkaa potentiaalisena tuotantomenetelmänä. Esimerkiksi Ford on perustanut uuden tekniikan keskuksen, jossa lisäävän valmistuksen lisäksi käytetään lisättyä ja virtuaalimallisuutta ja robotiikkaa tuotekehityksessä. (AMFG 2019.) Lokakuuhun 2018 mennessä FDA on hyväksynyt yli 100 AM-lääkinnällistä laitetta, pääasiassa implantteja (Wohlers Associates Inc. 2020, 38).

Vuonna 2018 USA:n Teollisuus ja Turvallisuus virasto (Bureau of Industry and Security, BIS) ilmoitti pyrkivänsä laajentamaan vientirajoituksia kehittyvien tekniikoiden, kuten esimerkiksi lisäävän valmistuksen, tekoälyn, robotiikan ja koneoppimisen alueilla. Ennen rajoitusten täytäntöönpanoa BIS kuitenkin pyysi teollisuudelta kommentteja esitykseen. Monet yritykset näkivät, että mahdolliset lisärajoitukset vaikuttavat USA:n kauppasuhteiden lisäksi negatiivisesti näiden tekniikoiden kehitykseen ja T&K-investointeihin. BIS on laatinut sääntöehdotuksen, joka koskee energettisten materiaalien lisäävän valmistuksen laitteita. Rajoituksilla pyritään estämään tekniikan ja 3D-tulostimien käyttöä USA:n kansallista turvallisuutta uhkaaviin, kuten aseiden kehitykseen ja valmistukseen, tiedusteluun tai terroristisiin sovelluksiin. (Jackson 2018; Jackson 2019.)

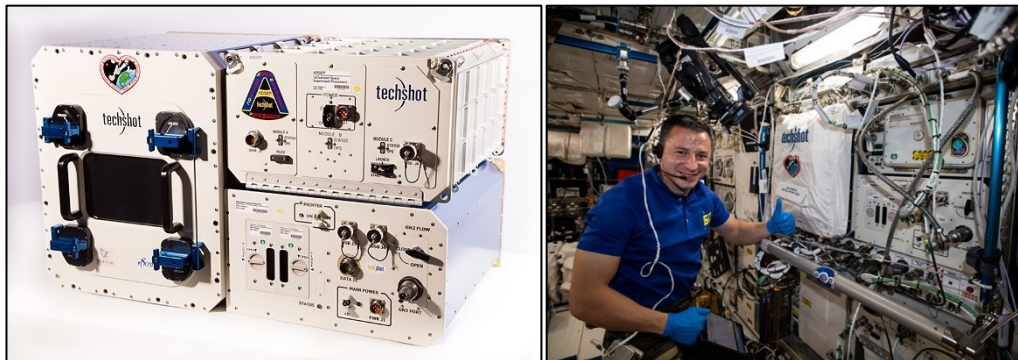
NASAn Rapid Analysis and Manufacturing Propulsion Technology -projektissa kehitetään lisäävän valmistuksen tekniikoita ja materiaaleja rakettimoottorin osien valmistamiseksi 3D-tulostamalla. AM-menetelmän uskotaan vähentävän kompleksisten moottorin osien, kuten suuttimien ja palokammioiden valmistusaikaa ja -kustannuksia. Tavoitteena on myös kehittää kevyempi ja tehokkaampi rakettimoottori tulevaisuuden Kuuhun ja Marsiin suuntautuville tutkimusmatkoille. Projektia toteutetaan julkinen-yksityinen yhteistyömallilla ja siinä on mukana NASAn eri yksiköitä, teollisuusyrityksiä ja yliopistotutkijoita. Suorakerrostustekniikalla, jossa käytetään raaka-aineena metallijauhetta ja energialähteenä laseria, voidaan valmistaa sekä suuria että kompleksisia kappaleita, kuten jäähdytyskanavistoja sisältäviä moottorin suuttimia. Kuvassa 33 vasemmalla näkyvät suuttimen ja kanavien seinämät ovat muutaman paperiarkin paksuisia, keskellä ja oikealla on nähtävissä suutin kokonaisuutena. Näiden kriittisten osien tulee vielä läpäistä useita

tarkastuksia ja testejä, ennen kuin ne voidaan hyväksyä käyttöönotettavaksi (NASA 2020.)



Kuva 33. Rakettimoottorin suutin (NASA).

USA vei hieman venäläisten jälkeen ISS-avaruusasemalle oman 3D-biotulostimen (Bio-Fabrication Facility, BFF). Avaruusasemalla sillä 3D-tulostettiin ihmisen polvikierukkakuusta. Biotulostin on kuvassa 34 vasemmalla ja oikealla kuvassa NASAn astronautti Andrew Morgan asentaa tulostinta käyttökuntoon (Boling 2019).



Kuva 34. 3D-biotulostusyksikkö kansainvälisellä avaruusasemalla (Boling 2019).

Ensimmäiset polymeerien 3D-tulostukset ISS-avaruusasemalla tehtiin vuonna 2014 ja vuodesta 2016 asti siellä on ollut Made in Space -yrityksen kaupallinen 3D-tulostin, jolla on tähän mennessä valmistettu yli 200 kappaletta erilaisia työkaluja ja osia. Keraamien tulostuslaitteisto asennettiin ja ensimmäiset 3D-tulostukset tehtiin vuoden 2020 loppupuolella. (Made in Space 2020).

Vaikka AM-tekniikan yhtenä etuna pidetään hajautettua, lähellä käyttökohdetta tapahtuvaa valmistusta on USA:han ja myös Eurooppaan syntynyt suuria 3D-tulostuskeskuksia, joissa useilla kymmenillä 3D-tulostimilla tuotetaan asiakkaille tarvikkeita ja



palveluita. 3D-tulostus mahdollistaa yksilöllisten tuotteiden tuotannon massatuotantona. Esimerkiksi SmileDirectClub valmistaa 50 000 yksilöllistä hampaiden oikaisulaitemuottia päivässä ja sen kilpailija Align Technology valmistaa vastaavia yksilöllisiä hampaiden oikaisulaitteita yli puoli miljoona kappaletta päivässä. Massatuotantoyksiköiden lisäksi on 3D-tulostuspalveluja tarjoavia yrityksiä, kuten esimerkiksi 3D Systems, Stratasys ja Protolabs, joilla on käytössään useita kymmeniä 3D-tulostimia asiakkaiden tilaamien tuotteiden valmistukseen. Lisäksi on yrityksiä, jotka ovat laajentaneet palvelujaan lisäävään valmistukseen, esimerkiksi metalliseosten tuottaja Carpenter Technology perustamassa lisäävän valmistuksen keskuksessa, Emerging Technology Center, on fasilitteetit jauheiden valmistukseen, 3D-tulostukseen sekä vaativiin lämpökäsittelyihin. (Vialva 2020.)

#### 6.4.4 Aasia/Tyynenmeren alue

Aasian/Tyynenmeren alueen lisäävän valmistuksen laitteistoista kaksi kolmasosa on Kiinassa ja Japanissa. Lukuun ottamatta Japania, lisäävän valmistuksen käyttöönotto alkoi Aasiassa huomattavasti myöhemmin kuin USA:ssa ja Euroopassa. Viime vuosina kuitenkin on lisäävän valmistuksen käyttö kasvanut voimakkaasti etenkin Kiinassa ja Singaporessa. (Wohlers Associates Inc. 2020, 199.)

Kiinan kansallinen lääkinnällisten tuotteiden virasto (NMPA, National Medical Product Administration) julkaisi tammikuussa 2020 asiakaskohtaisten lääkinnällisten laitteiden valvontaa ja hallinnointia koskevat määräykset. Samaan aikaan rekisteröitiin seitsemän räätälöityä ortopedistä implanttia, joista ainakin viisi oli valmistettu lisäävällä valmistusmenetelmällä sekä tehtiin ensimmäinen räätälöidyn implantin, titaaniseoksesta valmistetun rintanikaman, leikkaus. (Wohlers Associates Inc. 2020, 200.)

Kiinassa on ollut myös huomattavaa kasvua avaruusteollisuuden lisäävän valmistuksen sovellusten määrässä. Esimerkiksi joulukuussa 2019 laukaistussa satelliitissa oli yli 20 lisäävällä valmistuksella tuotettua osaa, joilla saatiin pudotettua satelliitin massaa merkittävästi. Yksityisellä avaruusyhtiöllä on testausvaiheessa nestemäistä happea ja kerosiinia polttoaineena käytävä rakettimoottori, jonka injektorin kotelo ja työntövoimakamion runko on valmistettu jauhepetisulatustekniikalla. (Wohlers Associates Inc. 2020, 200.)

Japanissa teollisia lisäävän valmistuksen laitteita käytetään laajasti prototyyppien ja työkalujen valmistuksessa sekä T&K-toiminnassa ja vaikka japanilaiset yritykset ovat haluttomia käyttämään lisäävää valmistusta lopputuotteiden tuotannossa, kiinnostus metalli 3D-tulostusta kohtaan on kasvamassa. Suurin osa Japanin teollisuusyrityksistä uskoo, että lisäävä valmistus on huipputeknologiaa, mutta sen mahdollisuuksiin massatuotantomenetelmänä ei ehkä vielä uskota. Japanilainen KeraCel Inc. kehittää puolijohdeakkuja, joiden valmistuksessa käytetään 3D-tulostusta. (Wohlers Associates Inc. 2020, 202; ITA 2020.) Metal Technology Co. Ltd käyttää perinteisten valmistusmenetelmien ohella lisäävä valmistusta mm. ilmailun, energian tuotannon ja lääketieteen sovelluksiin (Metal Technology Co. Ltd). Lääketieteen alalla Teijin Nakashima Medical Co. Ltd. valmistaa lääkinnällisiä laitteita, kuten tekoniveliä metallien jauhepetisulatusmenetelmällä. Edellä mainittujen esimerkkien lisäksi Japanissa käytetään lisäävää valmistusta mm. muottien valmistukseen, auto- ja ilmailuteollisuudessa sekä laivojen moottorin osien valmistuksessa. (Metal AM 2015.)

Japanin koulutus-, kulttuuri-, urheilu-, tiede- ja teknologiaministeriö on lisännyt 3D-tulostimet ohjeisiinsa yläkoulujen opetusvälineistä. Tavoitteena on vahvistaa uuden teknologian koulutusta nuoremmalle sukupolvelle. (Wohlers Associates Inc. 2020, 202.)

## 7 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN KEHITYSNÄKYMÄT SIVIILISEKTORILLA

Materiaalia lisäävän valmistuksen teknologista ja liiketaloudellista kehittymistä voidaan seurata ja arvioida esimerkiksi erilaisten kyselytutkimusten ja työkalujen, kuten hypekäyrän avulla. Seuraamalla innovaatioiden kehittymistä ja markkinoissa tapahtuvia muutoksia ajan funktiona, voidaan luoda ennusteita teknologian käyttöönoton yleistymisestä.

### 7.1 Gartnerin hypekäyrä

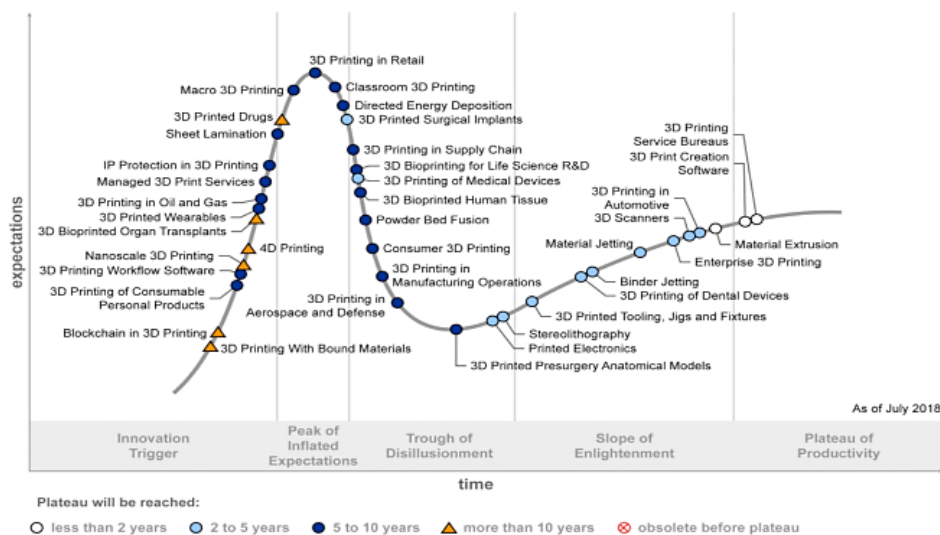
Hypekäyrät ja prioriteettimatriisit antavat tilannekuvaa teknologioiden suhteellisesta markkinakehityksestä ja arvion innovaatioiden merkityksestä. Ne nostavat esille liiallisen innostuksen alueet, arvioivat milloin innovaatiot ja trendit saavuttavat kypsyyden sekä tuottavat yrityksille tietoa teknologian käyttöönottoajankohtaan liittyvään päätöksentekoon. Markkinatutkimusyhtiö Gartnerin hypekäyrä antaa ennusteen, kuinka tekniikka tai sovellus kehittyy ajan myötä sekä vision, kuinka yritys voi hallita sen käyttöönottoa omien liiketoimintatavoitteiden mukaisesti. (Fenn & Blosch 2018.)

Gartnerin hypekäyrä muodostuu viidestä eri osasta;

- 1) *Innovation Trigger*. Innovaation käynnistysvaiheessa mahdolliset uudet teknologiat nousevat julkisuuteen, ensimmäisiä uutisia (esim. julkiset demonstraatiot) tekniikan toimivuudesta tulee julkisuuteen ja media alkaa kiinnostua aiheesta. Yleensä tässä vaiheessa ei ole vielä saatavilla käyttökelpoisia tuotteita, eikä tietoa tekniikan kaupallisista mahdollisuuksista.
- 2) *Peak of Inflated Expectations*. Paisuneiden odotusten huippu -vaiheessa teknologia on saavuttanut hypehuipun. Odotukset ovat nousseet suuremmaksi kuin teknologian sen hetkiset mahdollisuudet. Julkisuudessa on nähty useita menestystarinoita, mutta mukaan mahtuu on myös lukuisia epäonnistumisia. Jotkut yritykset ryhtyvät toimiin, mutta monet putoavat pois.
- 3) *Trough of Disillusionment*. Epäilyn aallonpohja -vaiheessa realismi iskee ja kiinnostus vähenee, kun teknologian kokeilut epäonnistuvat. Tässä vaiheessa investoinnit teknologiaan jatkuvat vain, jos tekniikkaa onnistutaan parantamaan.

- 4) *Slope of Enlightenment*. Valaistumisvaiheessa yhä useammalle yritykselle alkaa hahmottua teknologialla saavutettavat hyödyt ja ymmärrys teknologiasta kasvaa. Tuotteista alkaa tulla myyntiin parannettuja toisen ja kolmannen sukupolven versioita. Useat yritykset rahoittavat tutkimusta ja pilotointia, mutta konservatiiviset yritykset ovat edelleen varovaisia ja odottavalla kannalla.
- 5) *Plateau of Productivity*. Tuottavuuden tasanne -vaiheessa teknologian käyttöönotto alkaa yleistyä. Teknologiaa sovelletaan laajasti markkinoilla, tuottavuus kasvaa ja teknologian käyttö on yrityksille kannattavaa. (Fenn & Blosch 2018.)

Kuviossa 20 on esitetty tuorein vapaasti saatavilla oleva 3D-tulostuksen hypekäyrä (Valdivieso 2019c). Kaavion x-akselilla on aika ja y-akselilla tekniikoihin kohdistuvat odotukset. Kaavio esittää teknologia innovaatioiden aseman tietyllä ajanhetkellä, kuvion 20 hypekäyrä kaavio esittää tilannetta heinäkuussa vuonna 2018. Kaikki tekniikat eivät etene käyrällä samaa tahtia, jotkut tekniikat etenevät ja kypsyvät nopeammin kaupallisesti kannattaviksi kuin toiset ja jotkut häviävät kokonaan (obsolete before plateau) saavuttamatta koskaan tuottavuuden tasannetta ja laajaa käyttöönottoa. Kaaviossa on kuvattuna aikakategoriamerkein arvio siitä, kuinka kauan vie aikaa, että innovaatio on kehittynyt nykypisteestään laajasti käyttöönotetuksi tekniikaksi. Aikakategoriat ovat; alle 2 vuotta, 2–5 vuotta, 5–10 vuotta ja yli 10 vuotta. (Fenn & Blosch 2018.)



Kuvio 20. Gartnerin 3D-tulostuksen hypekäyrä ennuste vuodelle 2019 (Valdivieso 2019c).

Kuviosta nähdään esimerkiksi, kuinka viime vuosina julkisuuteen noussut 4D-tulostus on edennyt käyrällä innovaation käynnistysvaiheeseen. 4D-tulostus perustuu 3D-tulostukseen. 3D-tulostetulla materiaalilla on lisälouheisuus, jonka ansiosta kappaleen muoto tai toiminta muuttuu joko ajan kulun tai muuttuvien olosuhteiden (esim. paine, lämpötila, magneettikenttä) vaikutuksesta. 4D-tulostuksen tutkimusta ja kehitystyötä tehdään tällä hetkellä yliopistoissa sekä joidenkin yritysten, kuten esimerkiksi lentokonevalmistaja Airbusin, ohjelmistovalmistaja Autodeskin sekä laitevalmistajien HP ja Stratasys toimesta. Ja todennäköisesti joissakin tutkimuksissa yhtenä sopimusosapuolena on myös puolustusorganisaatioita. Yhdysvaltojen asevoimien tutkimusorganisaatio DARPA:n (Defense Advanced Research Project Agency) Engineered Living Materials (ELM) -projekti tutkii 4D-teknologiaa kehittääkseen eläviä biomateriaaleja, joissa yhdistyvät perinteisten rakennusmateriaalien rakenteelliset ominaisuudet yhdessä elävien järjestelmien ominaisuuksien kanssa. Ennustetaan että menee kuitenkin vielä yli 10 vuotta, ennen kuin 4D-tulostus saavuttaa täyden tuotantokypsyyden. Muita innovaatioita, joiden odotetaan kehittyvän seuraavan 10 vuoden kuluessa ovat mm. lohkoketjujen käyttö 3D-tulostusdatan siirrossa, nanomittakaavan 3D-tulostus ja lääkkeiden 3D-tulostus. (Basiliere 2019.)

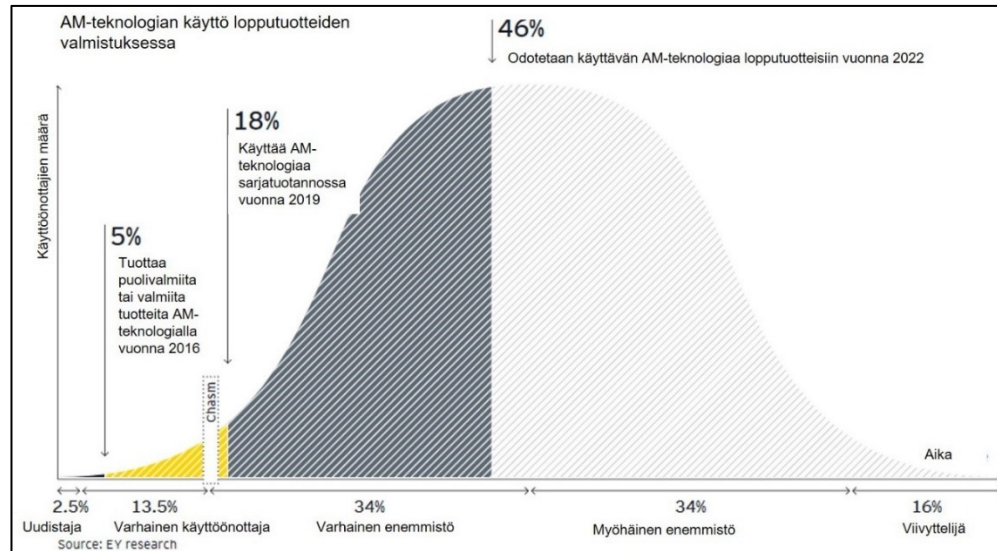
Gartner ennustaa, että vuoteen 2023 mennessä 25 % markkinoilla olevista lääkinällisistä laitteista on valmistettu käyttämällä 3D-tulostusta. 3D-tulostussovellukset ja -tekniikat tulevat lisääntymään terveydenhuollossa ja ne tulevat olemaan keskeisessä osassa yksilöllisten kliinisten toimenpiteiden suunnittelussa ja tarjonnassa seuraavalla vuosikymmenellä. 3D-tulostuksen käyttö suuntautuu kirurgisten toimenpiteiden suunnitteluun (esim. anatomiset mallit) sekä tekonivelten, implanttien ja proteesien valmistukseen. Edellytyksenä tälle kehitykselle on terveydenhuollon säädösten kyky pysyä muutoksen tasalla. Säädösten lisäksi hidasteeksi kehitykselle voi nousta myös eettiset kysymykset. (Basiliere 2019.)

Vuonna 2019 metallien 3D-tulostus oli nousussa ja Gartner ennusti, että vuoteen 2020 mennessä metallien ja metalliseosten 3D-tulostuksesta tulee kriittinen tekijä varaosien kaupallisille ja sotilaallisille toimitusketjuille ja jopa joillekin kuluttajamarkkinoiden toimitusketjuille. (Basiliere 2019.) Metallien 3D-tulostus ei kuitenkaan ole vielä teknologisesti niin kypsä (mm. nopeus, kappale koko, standardointi) eikä se ole levinnyt ja vakiintunut tuotantomuotona globaalisti niin laajasti, että se olisi muuttanut toimitusketjuja muutoin kuin yksittäisten tuotteiden osalta. Metallien 3D-tulostuksella tulee kuitenkin olemaan iso vaikutus toimitusketjuihin seuraavien vuosien aikana, kun suorakerrostustekniikka (Directed Energy Deposition), jauhepetitulistustekniikka (Powder Bed Fusion) ja 3D-

tulostuksen implementointi osaksi toimitusketjuja (3D printing in supply chain) kehittyvät eteenpäin tuottavuuden tasanne -vaiheeseen. Hypekäyrän ennusteen mukaan tähän menisi 5–10 vuotta. 3D-tulostustekniikoista valokovetus altaassa (stereolitography), si-deaineen suihkutetus (binder jetting) ja materiaalin suihkutetus (material jetting) ovat 2–5 vuoden sisällä ja materiaalin pursotus alle 2 vuoden kuluessa saavuttaneet vakiintuneen aseman tuotantokäytännönä. Elektroniikan 3D-tulostus on myös ohittanut aallonpohjan ja teknologiaan investoidaan ja sitä kehitetään eteenpäin.

## 7.2 Ernst & Young kyselytutkimus

Ernst & Young (EY) yritys arvioi lopputuotteiden lisäävän valmistuksen käyttöönoton kehittymistä sijoittamalla kyselytutkimuksensa (Global 3D Printing Report 2019) tulokset teknologian käyttöönoton elinkaarimalliin. Tämä malli arvio uusien teknologioiden markkinoiden valtauksen edistymistä erilaisten toimijoiden kautta, jotka on jaettu uudistajiin, varhaisiin käyttöönottajiin, varhaiseen enemmistöön, myöhäiseen enemmistöön ja viivytelijöihin. Siinä kun uudistajat ja varhaiset käyttöönottajat arvoistavat uranuurtajan asemaa, varhaiset käyttöönottajat toivovat saavansa tietyn varmuuden teknologian potentiaalista sekä todisteen sen luotettavuudesta ja hyödyistä ennen käyttöönottoa. Tämän ryhmän vakuuttaminen on kriittinen piste teknologian kestäväälle kasvulle ja siitä käytetään nimitystä kuolemanlaakson ylitys. Tämän teorian mukaan teknologia on hyväksytty, kun 16 % koko yritysjoukosta on ottanut sen käyttöön. Vuonna 2016 EY:n tekemän tutkimuksen mukaan 5 % vastanneista yrityksistä käytti lisäävää valmistusta lopputuottein tuotannossa ja vuoden 2019 tutkimuksessa vastaava luku oli 18 %. Tämä tarkoittaa sitä, että lisäävä valmistus on ylittänyt kriittisen käännepisteen kehittyen laajojen sovellusten teknologiaksi ja saavuttanut tason, joka todennäköisesti johtaa markkinoiden ja aktiivisuuden kasvuun edelleen. Kuviossa 21 on EY:n kyselytutkimusten tulokset esitettyinä teknologian käyttöönoton elinkaarimallissa. Kuviossa kuilu (chasm) kuvaa kuolemanlaaksoa ja ennusteen mukaan vuoteen 2022 mennessä 46 % yrityksistä käyttäisi lisäävää valmistusta lopputuotteiden tuotantoon. (Karevska ym. 2019, 17.)



Kuvio 21. AM-tekniikan käyttö lopputuotteiden valmistukseen (mukaiiltu Karevskaa ym. 2019).

### 7.3 Tulevaisuuden kehitystrendejä

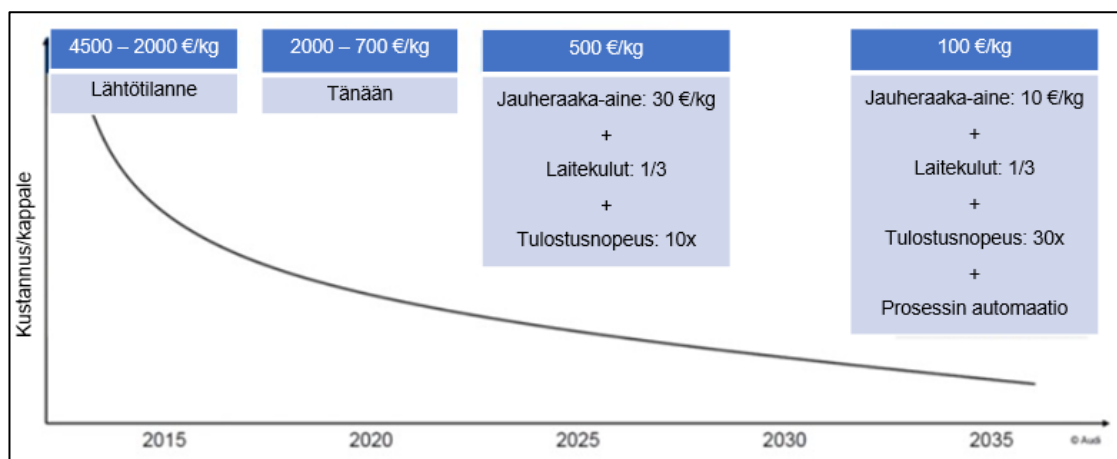
Lisäävän valmistuksen tulevaisuuden kehitystrendejä ovat tulostusnopeuden, suunnittelun vapauden sekä automaation lisääminen. Esimerkiksi nykyisin käytössä olevien keskikokoisten ja keskihintaisten metallin jauhepetisulatukseen perustuvien tulostuslaitteiden tulostusprosessi on melko hidas, koska se sisältää paljon manuaalisia työvaiheita sekä tulostuksen esivalmisteluissa että jälkikäsittelyssä. Nähtävissä on, että tulevaisuudessa automaatio yleistyy kaikissa prosessin vaiheissa ja laitteen operaattorin työnkuva tulee muuttumaan käyttäjästä valvojaksi. (Korpela, Riikonen, Piili, Salminen & Nyrihilä 2020, 59–61.)

Tulostusnopeus on tällä hetkellä suuri rajoite jauhepetisulatuslaitteiden laajalle käyttöönotolle tuotantomenetelmänä, ja laitevalmistajat tekevätkin jatkuvaa kehitystyötä nopeuden kasvattamiseksi. Markkinoilla on jo tarjolla isoja pitkälle automatisoituja, usealla laserilla varustettuja teollisuustason laitteita, joilla päästään jopa 20-kertaa nopeampaan tulostukseen kuin keskikokoisella yhden laserin laitteella, mutta myös keskikokoisten laitteiden tulostusnopeuksien uskotaan kasvavan tulevaisuudessa. (Korpela ym. 2020, 59–61; SLM Solutions 2020.)

Lisäävän valmistuksen alueella kehitetään myös uusia teknologioita, kuten esimerkiksi kylmäsuikutustekniikkaa, jonka väitetään olevan 100–1000 kertaa nopeampi kuin perinteinen metallien lisäävä valmistus. Uusien jälkikäsittelymenetelmien kehittäminen

tulee vaikuttamaan vähentävästi tukirakenteiden tarpeeseen ja sitä kautta tuo myös lisää suunnittelun vapautta metallien 3D-tulostusprosessiin. Tuottavuuden kasvattamisen lisäksi kehitetään tulostuksen aikaista monitorointia tulostettavan kappaleen laadun parantamiseksi. Tavoitteena on, että järjestelmä kykenee virheen havaitessaan muuttamaan prosessia ja korjaamaan sen muutaman seuraavan tulostuskerroksen aikana. (Korpela ym. 2020, 59–61.)

Tulostusnopeuden kasvaessa, automaation lisääntyessä sekä 3D-tulostukseen soveltuvien materiaalien valikoiman monipuolistuessa ja materiaalityöimittäjien määrän kasvaessa tuottavuus paranee valmistettavien kappaleiden tuotantokustannusten laskiessa. Kuviossa 22 on esitetty, kuinka raaka-aine- ja laitekustannusten arvioidaan laskevan merkittävästi seuraavan 10–15 vuoden aikana ja tulostusnopeuden kasvavan teknologian kehittyessä, ja kuinka nämä vaikuttavat valmistettavan kappaleen hintaan laskevasti. (Eilert 2020.)



Kuvio 22. Raaka-aine- ja laitekustannusten sekä tulostusnopeuden vaikutus tulostettavan kappaleen tuotantokustannuksiin tulevaisuudessa (mukailtu Eilert 2020).

#### 7.4 3D-tulostuksen tila vuonna 2030

3D Printing Industry, globaali 3D-tulostusalan media, kysyi sadalta lisäävän valmistuksen kärkitoimijalta, kuinka he näkevät 3D-tulostuksen tulevaisuuden kehityksen seuraavan 10 vuoden aikana – 3D-tulostuksen tila vuonna 2030. Kyselyyn vastanneet asiantuntijat näkevät lisäävän valmistuksen elintärkeänä teknologiana paremman terveydenhuollon, kuljetuksen ja elinympäristön kehittämisessä. Ympäristön näkökulmasta esimerkiksi polttoaineen kulutuksen väheneminen kevyempien rakenteiden vuoksi tai



energiatehokkuuden kasvaminen uusien rakenteiden ansiosta tulevat vahvistamaan 3D-tulostuksen asemaa tulevaisuuden tuotantomenetelmänä. Myös sana kiertotalous liitetään yhä useammin 3D-tulostukseen, sillä AM-teknologia nähdään mahdollisuutena vähentää raaka-aineiden kulutusta. Useiden asiantuntijoiden mukaan tulevaisuudessa tuotetaan yhä enemmän vasta tilauksesta, ja yksilöllisiä, räätälöityjä tuotteita joko yksittäiskappaleina tai massatuotantona. (Petch 2020a.)

Wohlers Associates Inc. on 25 vuoden ajan kerännyt tietoa lisäävän valmistuksen globaalista kehityksestä. Yrityksen vuosittain julkaisemassa Wohlers Report -kirjassa luodaan hyvin laaja katsaus ja analyysi lisäävään valmistukseen ja 3D-tulostuksen maailmanlaajuiseen tilaan ja vallitseviin kehitystrendeihin. AM-teknologia nähdään monitieteellisenä alana laitteiden, ohjelmistojen, liiketoiminnan ja ihmiskeskeisen suunnittelun verkostossa. Simulaatio- ja tuotanto-ohjelmistojen kehitys tulee lisäämään luotettavuutta, vähentämään arvailuja ja mahdollistamaan laajemmin lisäävän valmistuksen käyttöä elintärkeissä sovelluksissa. Laitevalmistajien panostus tulostusnopeuden lisäämiseen ja jälkikäsitteilyn automatisointiin tulee jatkumaan edelleen, sillä sitä kautta voidaan lisätä tuotanto- ja kustannustehokkuutta. Myös lisäävän valmistuksen suunnittelulla (DfAM) ja sen hyvien käytänteiden kehittämällä on suuri merkitys AM-menetelmien käyttöönoton edistämässä. Lisäävä valmistus on kehittynyt jo kapean sektorin sovelluksista valtavirran tuotantoteknologiaksi. Enenevässä määrin lisäävää valmistusta tullaan integroimaan tuotantojärjestelmiin linja-, yksikkö- ja laitetasolla, sillä hybridiprosesseilla voidaan poistaa lisäävän valmistuksen rajoitteita ja kehittää perinteisiä järjestelmiä. (Wohlers Associates Inc. 2020, 16, 296.)

Terry Wohlers, joka on 33 vuotta sitten perustamansa Wohlers Associates Inc:n pääkonsultti ja pääjohtaja, kertoi aiemmin mainitussa 3D Printing Industryn haastattelututkimuksessa näkemyksiään siitä, miltä lisäävä valmistus hänestä näyttää vuonna 2030. Wohlers näkee erilaisten lisäävän valmistuksen sovellusten olevan keskeisessä roolissa teollisuuden suurimman kasvun edistämässä. Sovellusten kehityksessä ja käyttöönotossa menestyneet yritykset rakentavat sen, mikä tulee olemaan käytössä useilla toimialoilla, kuten terveydenhuollossa, ilmailuteollisuudessa ja puolustuksessa. Energia-alan organisaatiot tulevat kehittämään lisäävää valmistusta tasolle, jota ei ole aiemmin nähty. Räätälöityjen tuotteiden valmistuksesta kuluttajille ja yrityksille tulee arkipäiväistä liiketoimintaa. Erityisesti varaosien tuotannossa on nähtävissä siirtyminen fyysisistä varaosavarastoista digitaalisiin varastoihin ja valmistukseen tilauksesta. Koko teollisuuden alan kattavien standardien saatavuus edistää lisäävän valmistuksen käytettävyyttä ja

taloudellista kannattavuutta. Tuotantomäärien kasvun myötä raaka-aineiden hinnat laskevat merkittävästi ja kun tämä yhdistetään huomattavasti nopeampiin lisäävän valmistuksen laitteisiin ja jälkikäsittelyn automatisointiin, 3D-tulostukseen soveltuvien tuotteiden valikoima ja tuotantomäärät kasvavat. (Petch 2020a.)

### 7.5 Suomen sata uutta mahdollisuutta

Suomen sata uutta mahdollisuutta 2018–2037–Yhteiskunnan toimintamallit uudistava radikaali teknologia -raportissa (2018) kuvataan sata vaikutuksiltaan radikaalia ja nopeasti kehittyvää teknologia-aluetta. Sadan radikaalisti maailmaa muuttavan teknologiakorin listalle otettujen lupaavimpien teknologioiden arvioidaan olevan markkinoilla 2020-luvun kuluessa ja niiden vaikutusten tulisi olla laajoja vuoteen 2037 mennessä. (Linturi & Kuusi 2018, 184–185.)

Näiden sadan yhteiskunnan toimintamalleja muuttavan teknologian listalle on päässyt neljä lisäävän valmistuksen teknologiakoria, jotka on kuvattu taulukossa 8. Raportissa radikaalit teknologiset ratkaisut on luokiteltu seitsemään eri kypsyytasoon, joista taso 7 on kypsyydeltään korkein. Kypsyytasolla 3 esitellään sovellusalueen läpimurtoon johtavan laboratorioprototyypin demonstraatio, tasolla 4 esitellään tieteellisesti tai kaupallisesti toiminnallisen prototyypin demonstraatio ja tasolla 7 teknologia on kypsä tuotantokäyttöön ja markkinoille tulee useita kilpailevia tuotteita ja asiakaskysyntä on kasvua. (Linturi & Kuusi 2018, 184–185.)

Taulukko 8. Maailmaa radikaalisti muuttuvat lisäävän valmistuksen teknologiakorit (Linturi & Kuusi 2018, 276–328).

| Teknologiakori  | Kypsyystaso | Resurssointi ja kehitysmotiivi  |
|---|-------------|---|
| <b>Tavaroiden 3D-tulostus</b><br>- erilaisten tavaroiden ja hyödykkeiden tuotanto 3D-mallin perusteella   | 7           | Teknologiaa kehittävät harrastajat, joukkorahoitetut tai sijoittajien rahoittamat startup-yritykset sekä suuret yhtiöt.<br>Alan odotetaan kasvavan nopeasti, asiakaskysyntä kasvaa ja nähtävissä on merkittäviä kehittämismahdollisuuksia.<br>Akateeminen tutkimus on merkityksellistä ainakin biomateriaalien, optiikan ja hienomekaniikan 3D-tulostuksessa sekä metallitekniikoiden kehityksessä. |
| <b>Rakennusten ja rakenteiden 3D-tulostus</b><br>- robotisoitu, yksilöllisen rakentamisen mahdollistava 3D-tulostustekniikka  | 4           | Rakentamisen robotisointiin liittyvä kehitys on melko harvojen ja pienimuotoisesti rahoitettujen yritysten tai tutkimusryhmien käsissä.<br>Menettelytavat uudistuvat hitaasti, sillä rakennusala on hyvin konservatiivista.<br>Kehityksen motiivina on uuden teknologian esteettiset ja taloudelliset mahdollisuudet ja odotus teknologian kypsymisestä rakennusteollisuuden käyttöön.              |
| <b>Materiaalin 3D-tulostus ja 4D-tulostus</b><br>- ainetta lisäävät tekniikat, joiden tavoitteena ei ole valmiin esineen vaan materiaallisen käyttöominaisuuden tuottaminen | 3           | Materiaalien 3D-tulostus on merkittävä akateemisen tutkimuksen työkalu, kun tutkitaan uusien nanomateriaalien ominaisuuksia.<br>Tuotannolliseen käyttöön materiaalien 3D-tulostus etenee ainakin lääketieteen ja elektroniikkateollisuuden parissa.<br>Tuotantoon tavallisesti pyritään löytämään nopeampia valmistustekniikoita.   |
| <b>Elinten ja biomateriaalien 3D-tulostus</b><br>- 3D-tulostetut keinoelimet<br>- elintarvikkeiden ja muiden biomateriaalien 3D-tulostus                                    | 3           | Pääosin akateeminen tutkimusmotiivi.<br>Lääketeollisuus ja elintarviketeollisuus ovat osoittaneet aikaista kiinnostusta.  |

## 8 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS PUOLUSTUSSEKTORILLA

Materiaalia lisäävän valmistuksen sotilassovellukset nähdään sotilaallisia toimitusketjuja mullistavina menetelminä. Lisäävällä valmistuksella voidaan valmistaa tarvittavia komponentteja tai työkaluja paikoissa, jotka ovat kaukana huoltoyhteyksistä tai taistelukentän eturintamassa. Suunnittelu ja mallit voidaan tehdä missä päin maailmaan tahansa ja lähettää digitaalisena strategisesti sijoitettuun AM-keskukseen taistelukentälle.

Puolustusvoimissa myös yleensä käytetään ja ylläpidetään vanhoja järjestelmiä alun perin suunniteltua elinikää pidempään. Käytössä olevien erilaisten järjestelmien suuri määrä ja vanhentuva kalusto aiheuttaa haastetta sekä varaosien varastointiin että hankintaan. Kaluston vanhetessa korjausten ja niissä tarvittavien varaosien tarve kasvaa ja saatavuus heikkenee. Lisäävällä valmistuksella voidaan tuottaa varaosia näihin vanhoihin järjestelmiin, johon ei ole enää saatavilla alkuperäisiä varaosia. Sen sijaan, että käydään pitkälinen hankintaprosessi varaosalle, jonka tuotanto on loppunut, voidaan osa valmistaa 3D-tulostamalla vasta tarvittaessa ja näin vähentää varastointitarvetta ja hankintakustannuksia.

Sen lisäksi, että lisäävä valmistus nähdään potentiaalisena valmistusmenetelmänä varaosatuotannossa, kun kyseessä on toiminta hankalien yhteyksien päässä, vanhentuneet järjestelmät tai poikkeusolot, lisäävällä valmistuksella on useita sovelluskohteita normaaliolojen toiminnassa sekä valmiuksien ja suorituskyvyn kehittämisessä. Seuraavassa taulukossa 9 lisäävän valmistuksen sotilaalliset sovellukset on jaoteltu kolmen pääryhmän mukaan; tuotteiden suunnittelu ja kehittäminen puolustussektorin tarpeisiin, teknologian käyttö kenttäoperaatioiden tuessa ja kolmantena sovellusten käyttö logistiikka- ja tukikeskuksissa ns. talon sisäisissä sovelluksissa (González & González Álvarez 2018).

Taulukko 9. Lisäävän valmistuksen sotilaalliset sovellukset (mukailtu González & González Álvarez 2018, 56–57).

| Ensimmäisen tason sovellukset                          |  | Toisen tason spesifiset sovellukset  |
|--|--|--|
| Suunnittelu ja kehittäminen puolustussektorille        | Uudet tuotteet/mallit                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tuotteet/suunnitelmat, jotka eivät ole toteutettavissa perinteisillä valmistusmenetelmillä</li> <li>- Ei-toiminnalliset prototyypit</li> <li>- Testikappaleet</li> <li>- Tuotannon suunnittelu</li> <li>- Rääätälöinti ja säästäminen</li> </ul>    |
|  | Prosessin/mallin optimointi                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Topologinen malli, rakenteellinen vahvistaminen, painon vähentäminen</li> </ul>   |
|  | Prototyypit/Piensarjavalmistus                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensimmäisen sarjan valmistus ja uusien tuotteiden testaus</li> <li>- Muutosten testaus</li> </ul>   |
|  | Sarjatuotantovalmistus                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Loppukäyttö osien ja tuotteiden valmistus</li> </ul>  |
| Kenttäoperaatioiden tuki                               | Strateginen ja taktinen suunnittelu                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiedonsaannin parantaminen kentällä/kenttätiedustelu (AM-robotit, -dronet)</li> </ul>   |
|  | Joukkojen kenttätuki                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Varusteiden rääätälöinti ja lisätarvikkeet</li> <li>- Sotilaan terveyden monitorointi (sensorit, älykkäät tekstiilit, tulostettu elektroniikka yms.)</li> <li>- Erityisruokavaliot (AM ruoka)</li> <li>- Kenttäapu (AM-robotit, -dronet)</li> </ul> |
|  | Humanitaarinen apu/Katastrofi tuki                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Maastotiedustelu (AM-robotit, -dronet): eloonjääneiden etsintä</li> <li>- Tarvikkeiden valmistus</li> <li>- Yksinkertaiset korjaukset</li> <li>- Suojanvalmistus</li> <li>- 3D-tulostuksen koulutus</li> </ul>                                      |
|  | Eristetyt operaatiot (sukellusveneet, laivat jne.) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Osien valmistus/varaosat</li> <li>- Tarvekohtaiset ratkaisut</li> </ul>   |
| Logistiikka- ja tukikeskus (talon sisäiset operaatiot) | Huollot/korjaukset                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ajoneuvojen/koneiden huolto ja korjaus</li> <li>- Ajoneuvojen/koneiden rääätälöinti ja varustaminen</li> <li>- Manuaaliset työkalut</li> </ul>  |
|  | Lääkintä   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Biotulostus (esim. iho)</li> <li>- Implantit</li> <li>- Proteesit/ortoosit</li> <li>- Leikkausten suunnittelu ja leikkausapuvälineet</li> </ul>   |
|  | Rakentaminen                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tarvittaessa tehtävät rakenteet</li> </ul>  |
|  | Harjoittelu  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mukautettu kojelauta koneen tai ajoneuvon käytön harjoitteluun</li> <li>- Harjoittelukappaleet (esim. improvisoidut räjähteet, miinat)</li> </ul>   |

Seuraavissa kappaleissa esitellään joitakin esimerkkejä eri maiden puolustusorganisaatioissa tehdyistä ja käynnissä olevista tutkimuksista, sovelluskohteista sekä lisäävän

valmistuksen asemasta ja merkityksestä maan puolustusorganisaatiossa ja käyttöön-  
oton asteesta.

## 8.1 Pohjoismaat ja Eurooppa

Eri maiden puolustusvoimat tutkivat ja ottavat lisäävää valmistusta käyttöön omien kansallisten tarpeidensa näkökulmasta. Puolustusvälineiteollisuuden tavoitteena on tehostaa tuotantoa ja kehittää entistä suorituskykyisempiä tuotteita. Yksittäisten valtioiden puolustusvoimien lisäksi lisäävän valmistuksen sovelluksia kehitetään yhteistyössä, jolloin tavoitteena on sekä kansallisten kykyjen että liittouman yhteistoimintakyvyn kasvattaminen.

### 8.1.1 Norja

Norjassa puolustushallinnon lisäävän valmistuksen tutkimusta ja kehittämistä tekee pääasiassa Norjan puolustustutkimuslaitos FFI (Forsvarets Forskninginstitut). FFI on tutkinut 3D-tulostusta ja sen käytettävyyttä erityisesti kenttäolosuhteissa. Norjalainen Fieldmade ja FFI ovat kehittäneet yhteistyössä liikuteltavan 3D-tulostusyksikön nimeltä NOMAD (Norwegian Mobile Additive Development). Tätä merikontin runkoon rakennettua 3D-tulostusyksiköä testattiin ensimmäisen kerran kenttäolosuhteissa monikansallisessa Cold Responce 2016 -sotaharjoituksessa. Myöhemmin Fieldmade on jatkokehittänyt NOMAD:ia niin, että sitä on saatavilla kooltaan ja varustukseltaan erilaisina yksiköinä. Norjassa järjestetyssä Naton Trident Juncture 2018-sotaharjoituksessa käytetyssä NOMAD 02 -yksikössä oli erillinen tila suunnittelulle ja varustuksena pursotukseen perustuvien (FDM) tulostimien lisäksi polymeerien jauhepetitulostuslaite (SLS). (González & González Álvarez 2018, 82; Flathagen, Duun Norberg, Nilssen, Nonsvik & Nordmoen 2016.) Kuvan 35 yläosassa on ulko- ja sisäkuva Cold Responce 2016 -harjoituksessa olleesta NOMAD 3D-tulostusyksiköstä (sininen kontti) ja alaosassa ulkokuva Trident Juncture 2018-harjoituksessa ollut NOMAD02 yksiköstä sekä havainnekuva yksikön sisätiloista.



Kuva 35. 3D-tulostusyksikkö NOMAD Cold Responce 2016-harjoituksessa (yläkuvat) ja NOMAD02 Trident Juncture 2018-harjoituksessa (alakovat) (Flathagen ym. 2016; FFI 2019; Fieldmade 2020).

FFI on testannut 3D-tulostusta myös merellisissä olosuhteissa tulostaessaan polymeeristä osia partioalus KV Barentshavilla vuonna 2016 (González & González Álvarez 2018, 81). FFI on tehnyt myös tutkimuksen, jossa selvitettiin kenttäolosuhteiden (lämpötila, kosteus, hiekka-, pölypartikkelit yms.) vaikutusta tulostettujen kappaleiden laatuun ja ominaisuuksiin. Tutkimuksessa tulostettiin polymeerikomposiitista testikappaleita kiinteissä tuotantotiloissa ja mobiilissa 3D-tulostusyksikössä kenttäolosuhteissa. Tutkimuksessa ei havaittu kenttäolosuhteista johtuvia heikentymisiä kappaleiden mekaanisissa ominaisuuksissa. (Thorvaldsen, Olsen & Johnsen 2018.)

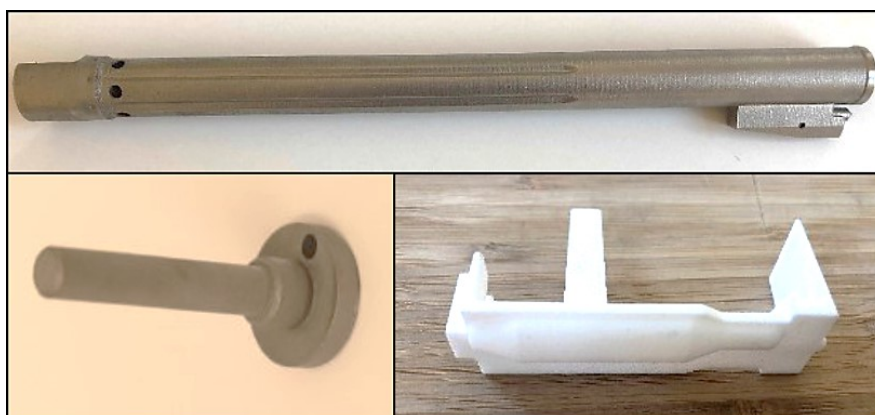
Norjan puolustusvoimien lisäävän valmistuksen tutkimusta ja kehitystyötä on edesauttanut Naton kautta tapahtuva yhteistoiminta USAn asevoimien kanssa, sillä USA on sekä siviili- että puolustussektorilla johtava lisäävän valmistuksen sovellusten kehittäjä.

### 8.1.2 Ruotsi

Ruotsin maanpuolustuksen tutkimuslaitos FOI:n (Totalförsvarets forskningsinstitut) tutkimusjohtaja Steven Savagen mukaan Ruotsissa ollaan lisäävän valmistuksen käytössä siviilipuolella paljon edellä sotilaallista puolta, sillä Ruotsissa on olemassa useita yrityksiä ja laitoksia, jotka sijoittavat lisäävän valmistuksen tutkimukseen ja kehitykseen. Savage näkee kuitenkin, että sotilaallisella puolella taidot ovat olemassa, mutta se milloin, missä ja miten teknologiaa pitäisi käyttää ei ole selvää. Savage on myös sitä mieltä, että teollisesti kehittyneissä maissa, kuten Ruotsissa, lisäävän valmistukseen liittyvät

tekniset ongelmat ovat täysin ratkaistu 10–15 vuoden kuluessa, mutta oikeudellisten kysymysten ratkaiseminen kestää todennäköisesti paljon kauemmin. (FOI 2019.)

Ruotsin puolustusvoimien materiaalilaitokselle (Försvarets materielverk, FMV) Upsalan yliopistossa tehdyssä opinnäytetyössä tutkittiin mahdollisuutta käyttää lisäävää valmistusta AK5C rynnäkkökiväärin korjaukseen ja huoltoon kentällä. Tutkimuksessa valmistettiin rynnäkkökiväärin vasaran akseli, männänohjain ja patruunanohjain Lasertech LSH AB:n tiloissa. Vasaran akseli ja männänohjain valmistettiin metallista ja patruunan ohjain polymeeristä (kuva 36). (Simic 2018.) Tutkimuksessa todennettiin, että aseosia on mahdollista valmistaa 3D-tulostamalla. Tulostus tehtiin kuitenkin kiinteissä tuotantotiloissa, joten valmistusmenetelmien toimivuutta kenttäolosuhteissa tehtävään korjaukseen ja huoltoon ei kuitenkaan varsinaisesti testattu.



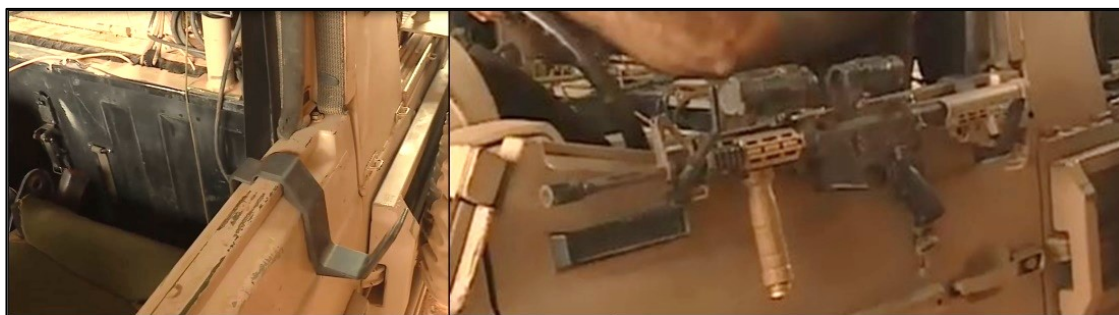
Kuva 36. 3D-tulostamalla valmistettu AK5C rynnäkkökiväärin männänohjain, vasaran akseli ja patruunan ohjain (Simic 2018).

BAE Systems konserniin kuuluvalla BAE Systems Hägglunds AB:lla on lisäävän valmistuksen laboratorio, jossa on mm. suorakerrostustekniikkaan perustuva WAAM-laitteisto, jolla voidaan valmistaa suuriakin kappaleita alumiinista ja teräksestä. (Karlsson & Magnusson 2020). BAE Systems Hägglunds AB:lle tehdyistä lisäävän valmistuksen opinnäytetöistä päätellen lisäävän valmistuksen laboratorio on perustettu vuoden 2019 alkupuolella ja tutkimus on ainakin WAAM-tekniikan osalta vielä alkuvaiheessa.



### 8.1.3 Hollanti

Hollannin puolustusvoimissa on tehty jo usean vuoden ajan lisäävän valmistuksen tutkimusta ja 3D-tulostusta. Vuonna 2017 Hollannin joukot testasivat ja käyttivät 3D-tulostinta Malin rauhanturvaoperaatiossa erilaisten ei-kriittisten osien ja apuvälineiden valmistukseen, kuten esimerkiksi ajoneuvon oveen laitettavan kiväärin kannakkeen (kuva 37) valmistukseen. (González & González Álvarez 2018, 66.)



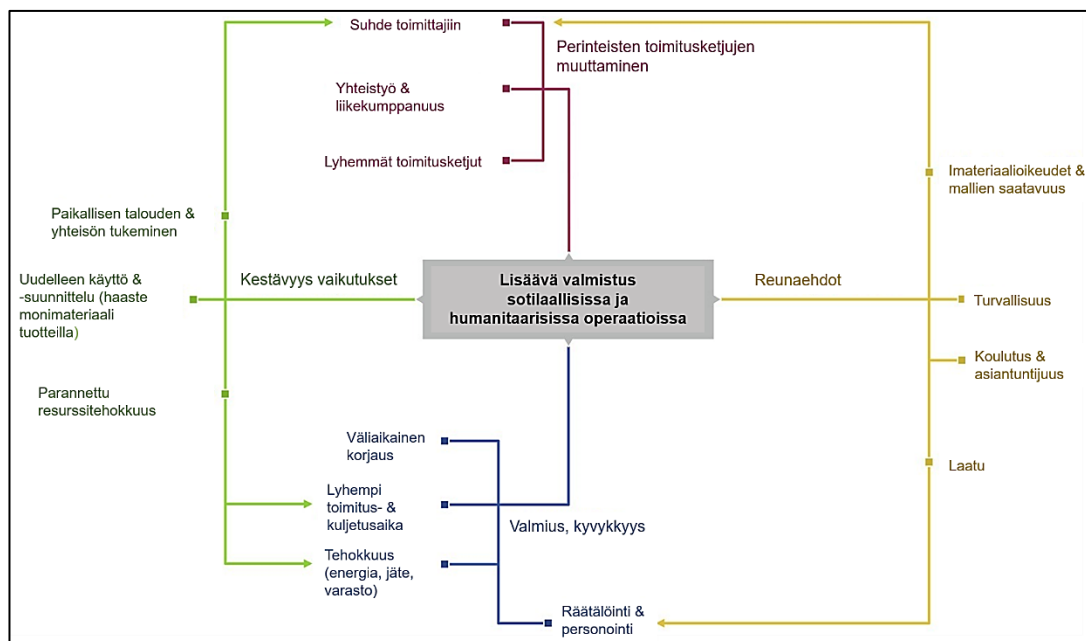
Kuva 37. Ajoneuvon oveen kiinnitettävä kiväärin kannake (Ministerie van Defensie 2017).

Hollannin puolustusvoimat on kehittänyt vuodesta 2018 alkaen digitaalista varaosavaraostoa yhteistyössä hollantilaisen DiManEx-yrityksen kanssa, joka tarjoaa digitalisoinnissa tarvittavan pilvipohjaisen alustan. 3D-tulostukseen soveltuvat varaosat tunnustetaan, digitalisoidaan ja varastoidaan puolustusvoimien digitaaliseen varastoon, josta ne voidaan toimittaa suoraan tulostettavaksi joko puolustusvoimien omilla 3D-tulostimilla tai alustapalveluyrityksen maailmanlaajuisen yhteistyöverkkoon kuuluvan toimijan 3D-tulostimella. (SCM 2018; 3D-print magazine 2020.)

Hollannin puolustusministeriössä 3D-tulostusta koordinoi lisäävän valmistuksen osaamiskeskus AMEC (The Additive Manufacturing Expertise Center). Keskuksen tehtävänä on koordinoida AM-tiekarttoja ja lisätä tietoisuutta 3D-tulostuksesta puolustussektorilla. Armeijalle on laadittu ohjelma, jonka tavoitteena on lisätä tietoisuutta 3D-tulostuksen mahdollisuuksista, kouluttaa henkilöstölle tärkeimmät 3D-tulostusteknologiat ja tunnistaa realistiset käyttökohteen käyttöönotettavuuden lisäämiseksi ja parantamiseksi. Ohjelma sisältää interaktiivisia työpajoja, joissa haastetaan insinöörit näkemään mahdollisuudet sekä tunnistamaan konseptit, jotka ovat tänä päivän mahdollisia. (Additive Center 2020.) Maavoimien AM-tiekartasta laatimassa infograafissa (liite 3) kuvataan

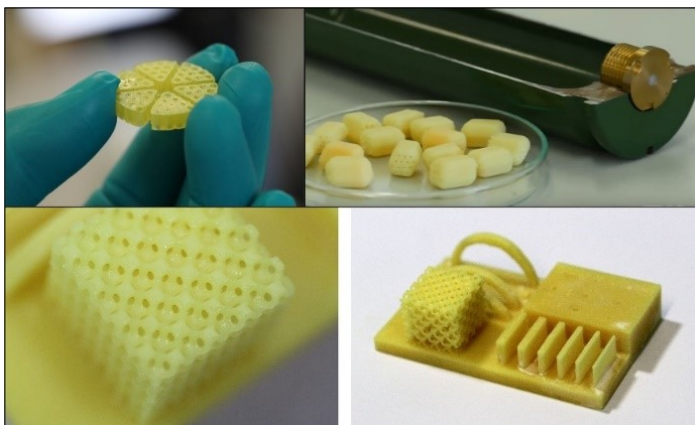
yksinkertaistetusti 3D-tulostukseen implementointi osaksi puolustusvoimia. Prosessi on jaettu kolmeen vaiheeseen, joista ensimmäisessä vaiheessa hankitaan tietoa ja osaamista, toisessa vaiheessa otetaan 3D-tulostus käyttöön ja viimeisen kolmannen vaiheen tavoitteena on, että jokainen puolustusministeriössä tuntee 3D-tulostuksen. (DiManEx 2018.)

Den Boer, Lambrechts ja Krikke (2020) ovat tutkineet lisäävän valmistuksen vaikutusta puolustusvoimien varaosien toimitusketjun valmiuteen, tehokkuuteen ja ekologiseen kestävyYTEEN sotilaallisissa ja humanitaarisissa operaatioissa. Tutkimuksessa todettiin, että lisäävän valmistuksen implementointi toimitusketjuun voi lyhentää toimitusaikaa, ja pienentää jätteen määrää, energiankulutusta ja varaosavarastoja sekä parantaa puolustusvoimien järjestelmän valmiutta ja kestävyYTEÄ erityisesti ulkomaisissa sotilas- ja humanitaarisissa operaatioissa. Haasteita on kuitenkin energiankäyttöön, paikalliseen yhteistyöhön, ulkoistamiseen, turvallisuuteen ja immateriaalioikeuksiin liittyvissä asioissa. Kuviossa 23 on yhteenveto tutkimuksen tuloksista; millaisia reunaehtoja ja vaikutuksia lisäävällä valmistuksella on toimitusketjuun, (ekologiseen) kestävyYTEEN sekä valmiuteen ja kuinka ne kytkeytyvät toisiinsa. Tutkimuksessa nähtiin, että Hollannin armeijan käytössä olevien järjestelmien suuri määrä, kompleksisuus ja ikä tarjoavat lisäävälle valmistukselle mahdollisuuden vähentää toimitusaikaa, pienentää varastoja ja parantaa operatiivista valmiutta. (den Boer ym. 2020.)



Kuvio 23. Lisävä valmistus sotilaallisissa ja humanitaarisissa operaatioissa (mukailtu den Boer ym. 2020).

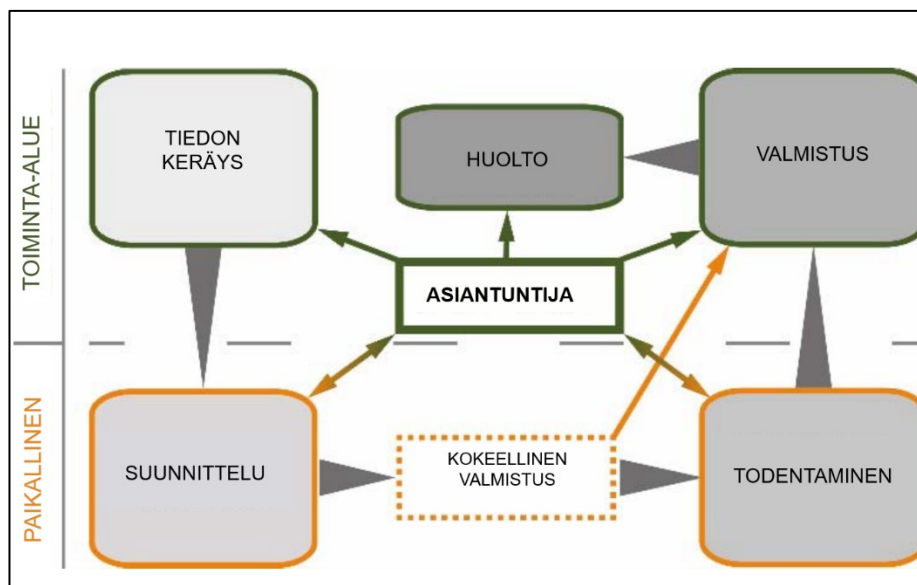
Energeettisten materiaalien lisävä valmistus on joka puolella maailmaa vielä tutkimus- ja tuotekehitysvaiheessa. 3D-tulostus mahdollistaa kompleksisten geometrioiden, monimateriaalien ja toiminnallisten gradienttien käytön energettisten tuotteiden tuotannossa. Hollantilainen tutkimuslaitos TNO aloitti energettisten materiaalien 3D-tulostusmenetelmien tutkimuksen ja kehittämisen jo vuonna 2013 Hollannin puolustusministeriön ja USA:n puolustusministeriön tuella ja TNO pitääkin itseään edelläkävijänä ja innovaatiopioneerina tällä alalla. TNO on kehittänyt ja patentoinut 3D-tulostusmateriaaleja ja -menetelmiä sekä laatinut useita alan julkaisuja. TNO on kehittänyt menetelmiä mm. aseiden ja ohjusten ajoaineiden ja räjähteiden 3D-tulostukseen. Tämänhetkissä tutkimuksissa TNO keskittyy toiminnallisten gradienttien tulostamiseen energettiseen materiaaliin ja tutkimus sisältää varsinaisen 3D-tulostuksen lisäksi materiaalin, laitteiston ja ohjelmiston kehitystyötä. Kuvassa 38 on TNO:n vuonna 2016 tulostama ajoaineen jyvä ja vuonna 2018 valokovetus altaassa-menetelmällä valmistettuja kappaleita. (van Lingen 2017; van Lingen 2020.)



Kuva 38. TNO:n 3D-tulostamalla valmistettuja energettisiä materiaaleja (van Lingen 2017; van Lingen 2020).

#### 8.1.4 Saksa

Montero ja muut (2019) ovat tutkineet varaosien lisäävän valmistuksen prosessia ja sen osatekijöitä toimittaessa hajautetusti ja kehittäneet konseptimallin paikallisen kotirintamalla olevan T&K-yksikön ja toiminta-alueella olevan AM-henkilöstön yhteistyölle. Hajautetussa mallissa vain välttämättömät prosessin vaiheet suoritetaan toiminta-alueella ja kaikki muu tehdään kiinteässä, yleensä paremmin varustellussa infrastruktuurissa neutraalilla alueella. Montero ja muut (2019) kehittivät ensin viisivaiheisen mallin, mutta kokeillessaan sen toimivuutta tapaustutkimuksen avulla, he havaitsivat, että malliin tarvitaan vielä kuudenneksi tekijäksi T&K-yksikön ja toiminta-alueen henkilöstön välillä toimiva asiantuntija. Kuviossa 24 on esitetty Monteron ja muiden (2019) luoma kaavio operoivien yksikköjen suhteista ja linkistä asiantuntijaan. Toiminta-alueella syntyy tarve varaosalle, suunnitteluyksikkö arvioi varaosan 3D-tulostettavuuden, suunnittelee, testaa ja määrittää tulostusparametrit, todennus vahvistaa ja varmistaa, että näillä parametreillä saadaan vaatimukset täyttävä varaosa ja antaa toiminta-alueelle luvan tulostaa varaosan. Huolto suorittaa varaosan asennuksen käyttökohteeseen. Selkeästi jaetut vastuut auttaa prosessin organisoinnissa, mutta tiedonpuute yhdessä yksikössä vaikuttaa suoraan kaikkiin. Lisäämällä toiminta-alueelle asiantuntijan, jolla on tietämystä yleisesti koko prosessista ja joka toimii linkkinä kaikkien toimivien yksiköiden ja erityisesti suunnittelun ja tuotannon yksiköiden välillä, saadaan paremmin täydennettyä puuttuvaa tietoa ja tehostettua prosessin toimintaa.



Kuvio 24. Toiminnalliset yksiköt ja niiden linkit asiantuntijaan (mukailtu Montero ym. 2019).

Montero ja muut (2019) määrittivät myös minkä tasoista tietoa ja osaamista tarvitaan eri yksiköissä. Taulukossa 10 on esitetty heidän arvionsa tietotasovaatimuksista. Mustapisteet kuvaavat tiedon välttämättömyyttä ja valkoiset pisteet kuvaavat tietoa, mikä voisi olla toimijalle hyödyllistä, mutta ei välttämätöntä.

Taulukko 10. Varaosan valmistusprosessin osaamisvaatimukset (mukailtu Montero ym. 2019).

| Toimintayksikkö<br>(toimija) | Osaaminen    |                |              |            |
|------------------------------|--------------|----------------|--------------|------------|
|                              | Tiedonkeräys | AM-suunnittelu | AM-valmistus | AM-testaus |
| Tiedonkeräys                 | ●●○          | ○              | ○            | –          |
| Suunnittelu                  | ●○○          | ●●●            | ●●●          | ●○         |
| Todentaminen                 | –            | ○              | ○            | ●●●        |
| Valmistus                    | –            | ○              | ●●           | ○          |
| Huolto                       | –            | –              | –            | ●●○        |
| Asiantuntija                 | ●●●          | ●○             | ●●○          | ●●○        |

### 8.1.5 Iso-Britannia (UK)

Myös UK:ssa on aloitettu energeettisten materiaalien lisäävän valmistuksen menetelmien tutkimus- ja kehitystyö. UK:n puolustusministeriön rahoittama Puolustusalan tieteidien ja teknologian laboratorio DSTL (The Defence Science and Technology Laboratory) on aloittanut 3D-tulostettujen räjähteiden kehittämisen. Projektin tavoitteena on luoda uusia mahdollisuuksia erilaisille räjähdysvaikutuksille käyttämällä 3D-tulostuksen mahdollistamia monimutkaisia geometrioita ja vähentää kuljetus- ja varastointikustannuksia. Lisäävän valmistuksen kytkeminen uusien energeettisten rakenteiden tuotantoon on osa puolustusministeriön Tulevaisuuden Energeettiset -projektia (Future Energetics Project), jossa tavoitteena on kouluttaa asiantuntijoita ja kehittää uusia teknologioita ja välineitä. (Petch 2020b.)

Cranfieldin yliopiston tutkijat ovat yhdessä kanadalaisen Royal Military College of Canada -yliopiston tutkijan kanssa tutkineet ja verranneet perinteisesti sintratun ja lisäävällä valmistustekniikalla valmistetun alumiinioksidikeraamin ballistisia ominaisuuksia. Tutkimuksen tulokset olivat lupaavia, sillä AM-tekniikalla valmistetun keraamin ominaisuudet olivat vastaavat perinteisesti valmistetun kanssa. Tulos osoitti 3D-tulostuksen potentiaalisuuden keraamisten henkilösuojaimien valmistusmenetelmäksi. (Appleby-Thomas, Jaansalu, Hameed, Painter, Shackel & Rowley 2019.)

Ase-, turvallisuus- ja ilmailualan yhtiö, BAE Systems aloitti lisäävän valmistuksen tutkimuksen jo 20 vuotta sitten ja tänä päivänä yritys käyttää teknologiaa mm. Typhoon hävittäjälentokoneen vakio komponenttien valmistuksessa. AM-teknologiaa käytetään myös mm. prototyyppien valmistukseen uuden sukupolven Tempest -hävittäjälentokoneen kehittämishankkeessa. BAE Systems solmi 3D-tulostuslaitevalmistaja Renishawin kanssa tammikuussa 2020 yhteistyösopimuksen lisäävän valmistuksen kyvyn kehittämiseksi puolustus- ja ilmailusektorilla, tavoitteena tulevaisuuden taistelulentokoneiden lento-ominaisuuksien parantaminen, kustannuksien vähentäminen ja tuotantoprosessin nopeuttaminen. (BAE Systems 2020a.)

BAE Systems on perustanut Tulevaisuuden tehtaan (Factory of the Future) demonstroimaan kuinka sotilaslentokoneita voidaan rakentaa tulevaisuudessa. Tehdas toimii yritysten ja akateemisen yhteisöjen kokeellisena keskuksena, joka on varustettu huipputeknologialla ja jossa tutkijat voivat tutkia ja testata uusia teknologioita, rakentaa uusia kyvykkyyksiä ja ottaa käyttöön uudenlaisia työtapoja. Tehtaassa hyödynnetään esineiden

internettiin pohjautuvia teknologioita, tekoälyä, lisättyä todellisuutta, edistyksestä analytiikkaa ja automaatiota. 3D-tulostuksen lisäksi tehtaassa on keskiössä robotiikka sekä älykkäät logistiikkajärjestelmät, työasemat ja toimistot. Liitteenä 4 on havainnekuva tulevaisuuden älykkäästä tehtaasta sotilaslentokoneen valmistusteknologioille. (BAE Systems 2020b.)

#### 8.1.6 Euroopan puolustusvirasto, EDA

Euroopan puolustusvirasto (EDA, European Defence Agency) toimii Euroopan unionin neuvoston alaisuudessa ja se on perustettu tukemaan jäsenmaiden yritystä parantaa eurooppalaisia kriisinhallintavalmiuksia ja ylläpitämään eurooppalaista turvallisuus- ja puolustuspolitiikkaa. EDAn tehtäviä ovat puolustusvoimavarojen kehittämisen ohjaaminen, puolustusmateriaaliyhteistyön syventäminen, eurooppalaisen puolustusalan teollisen ja teknologisen perustan vahvistaminen ja tutkimustoiminta. (Puolustusministeriö.)

EDA käynnisti ensimmäisen lisäävän valmistuksen projektinsa vuonna 2016. Projektin tavoitteena oli puolustusosalalla toimivien tietoisuuden lisääminen 3D-tulostuksen mahdollisuuksista ja sovelluksista. ”Additive manufacturing feasibility study & technology demonstration” -projektissa demonstroitiiin siirrettävän 3D-tulostuskontin lentokuljetus ja toimintakunto kuljetusten jälkeen. 3D-tulostuskontti täytti sekä sotilas- että siviili-ilmakuljetusvaatimukset ja onnistuneen testilennon jälkeen kontti toimi erilaisten osien ja testikappaleiden valmistuspaikkana. Projektissa laadittiin myös raportti: ”EDA AM State of the Art & Strategic Report”, jossa käsiteltiin lisäävän valmistuksen nykytilaa ja keskeisiä lisäävään valmistukseen liittyviä tekijöitä. (González & González Álvarez 2018; Lopez Vicente 2017.) Kuvassa 39 vasemmalla on meneillään 3D-tulostuskontin lastaus kuljetuslentokoneeseen Espanjan Zaragozan kentällä ja oikealla sisäkuva kontista.



Kuva 39. EDAn 3D-tulostuskontin lastaus kuljetuslentokoneeseen ja sisäkuva kontista (Thorvaldsen, Olsen & Johnsen 2018).

Vuonna 2019 käynnistyi 4-vuotinen ”The Additive Manufacturing Techniques for Energetic Materials (AMTEM)” EDA-projekti, jossa etsitään ja arvioidaan sopivia materiaaleja ja lisäävän valmistuksen tekniikoita energettisten materiaalien ja räjähdetarvikkeiden valmistukseen. Tavoitteena on löytää uudenlaisten ja suorituskyvyltään parempien taitelukärkien ja ajoaineiden tuotantomenetelmiä, jotta voitaisiin tuottaa nopeammin ja edullisemmin pieniä sarjoja sekä pikavalmistaa prototyyppejä. Ranskan johtamassa projektissa on mukana Ranskan lisäksi Suomi, Saksa, Hollanti, Puola ja Ruotsi sekä EDAn ulkopuolisista valtioista Norja. Näistä maista projektissa on mukana yhteensä 15 energettisten materiaalien parissa toimivaa organisaatiota. (EDA 2019.)

### 8.1.7 NATO

Natoon on perustettu lisäävän valmistuksen yhteisö, jonka tavoitteena koordinoida AM-hankkeita ja jakaa tuloksia koko liittoumalle. Erityisinä aiheina ovat mm. AM-standardit, tietoturvan tutkiminen ja yhteentoimivuus sekä AM-tapaustutkimusten kehittäminen. Nato on ottanut osaa AM-liiketoimintaprosessin sotapeli -projektiin, jossa selvitettiin AM:n sotilaalliseen käyttöön liittyviä liiketoimintakäytäntöjä. Projektin rahoitti USA:n puolustusministeriö sekä America Makes ja USA:n kansallinen valmistustieteiden keskus (National Center for Manufacturing Sciences). (Wohlers Associates Inc. 2020, 302.)

Muita Naton aktiviteetteja on ollut kansainvälisiä standardeja käsittelevän raportin julkaisu sekä USAn ja Norjan liikkuvien 3D-tulostusyksiköiden evaluointi. Naton jäsenmaille on tehty myös lisäävään valmistukseen liittyvä kyselytutkimus. Lisäksi on tutkittu lohko-  
ketjujen (blockchain) käytön mahdollisuutta AM-datan salaukseen ja siirtoon. (Wohlers Associates Inc. 2020, 302.)

### 8.2 Venäjä

Venäjällä lisäävän valmistuksen laitteiden ja materiaalien kehitys on nousussa ja koska kehityksen kärjessä on valtiojohtoisia yrityksiä, kuten esimerkiksi Rosatom, voidaan arvioida, että myös puolustusteollisuudessa tutkitaan mahdollisia sovelluskohteita, vaikka niistä ei ole juurikaan julkaistu. Esimerkiksi vuoden 2020 kansainvälisellä sotilastekniikan Army-2020-foorumilla yhtenä keskustelun aiheena oli 3D-tekniologioiden mahdollisuudet



aseiden sekä sotilaallisten- ja erikoisvälineiden valmistuksessa ja käytössä (Ministry of Defence of the Russian Federation 2020). Tilaisuudessa tarkasteltiin näiden teknologioiden implementoinnista saatuja kokemuksia erityisesti Venäjän puolustusministeriötä kiinnostavilta aloilta, kuten lääketiede, robotiikka ja ilma-alusten suunnittelu (Ministry of Defence of the Russian Federation 2020).

Vuonna 2016 Venäjä ilmoitti käyttävänsä 3D-tulostusta uuden T-14 Armata taistelupanssarivaunun prototyypin suunnittelussa ja valmistuksessa. Silloin kerrottiin käytettävän 3D-tulostusteknologiaa T-14 vaunun sekä muiden Armata-alustaisten panssarivaunujen prototyyppi osien valmistukseen. Puolustusteollisuudessa toivotaan, että jatkossa voitaisiin tuottaa myös tuotantonormin mukaisia komponentteja. (Majumdar 2016.)

Siviili- ja sotilashelikoptereita valmistava Russian Helicopters, joka on Venäjän valtionkorpraatio Rostecin osa, ilmoitti vuonna 2019, että se aikoo uudelleen suunnitella noin 30 helikopterin osaa AM-teknologialla valmistettavaksi ja ottavansa menetelmän sarjatuotanto käyttöön vuonna 2020. 3D-tulostamalla valmistettuja osia on jo asennettu Venäjällä valmistettuihin helikoptereihin. (Sher 2019a.)

Kesällä 2020 Venäjällä tehtiin 3D-tulostetulla MDGT-20 kaasuturbiini moottorilla varustetun miehittämättömän ilma-aluksen (UAV) onnistunut koelento. Moottorin ovat kehittäneet Venäjän valtion johtoiset uusien teknologioiden tutkimuslaitos FPI (Russian Foundation for Advanced Research Projects, Фонд перспективных исследований) ja ilmailumateriaalien tutkimuskeskus VIAM (All-Russian Institute Of Aviation Materials, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов) osana laajempaa projektia, jossa tavoitteena on kehittää uusia materiaaleja ilma-alusten ja rakettimoottorien 3D-tulostukseen. Onnistuneen testilennon jälkeen FPI ja VIAM ovat kehittäneen pienikokoisempia kaasuturbiini moottoreita teollisiin sovelluksiin ja jollekin moottoreille on jo tehty käyttökestävyyskokeet, ja tavoitteena on aloittaa sarjatuotanto vuoteen 2022 mennessä. (Hanaphy 2020.)

### 8.3 USA

USA:n armeijalla on jo pitkät perinteet lisäävän valmistuksen sovellusten kehittämisessä ja testaamisessa. USA:ssa puolustushaarat tekevät keskenään yhteistyötä lisäävään valmistuksen kehittämisessä, mutta pääosin näyttää siltä, että kukin puolustushaara toimii itsenäisesti oman näkemyksensä ja tarpeidensa mukaisesti. Maavoimaministeri on

antanut maavoimille uutta, edistyksellistä valmistusta koskevan direktiivin, Army Directive 2019–29 (Enabling Readiness and Modernization Through Advanced Manufacturing). Direktiivin tarkoituksena on vahvistaa toimintaperiaatteet ja määrittää vastuut uusien valmistusmenetelmien ja -materiaalien käyttöönotosta maavoimien kyvykkyys alueilla. Edistyksellinen valmistus käsittää lisäävän valmistuksen lisäksi tekoälyn, robotiikan ja edistyneet komposiittimateriaalit. (McCarthy 2019.) Merijalkaväki sai vuonna 2020 toimintaohjeet lisäävän valmistuksen integroinnista merijalkaväen toimintaan niin, että lisäävän valmistuksen koko potentiaali tulee maksimaalisesti käyttöön. Ohje sisältää mm. sotilaiden lisäävän valmistuksen osaamistaso tavoitteet, valmistusmenetelmän (perinteinen/AM) valintakaavion sekä AM-osien hyväksyntäprosessin kaavio (Chiarotti 2020).

Puolustusministeriön (DOD) vuonna 2012 perustama America Makes solmi vuonna 2019 kolmannen yhteistyösopimuksen ilmavoimien tutkimuslaboratorion (Air Force Research Laboratory, AFRL) kanssa. Sopimuksen kesto on seitsemän vuotta ja sen tavoitteena on edistää lisäävän valmistuksen sotilassovelluksia, materiaaleja, suunnittelua ja koulutusta. America Makes on ensimmäinen kahdeksasta puolustusministeriön perustamasta innovaatioinstituutista, jotka toimivat elinkaarimallin (PPP, public-private-partnership) periaatteella. America Makes pyrkii luomaan julkiselle ja yksityiselle puolustusteollisuudelle lisäävän valmistuksen innovaatiokeskuksen, jota hallinnoi National Center for Defense Manufacturing and Machining (NCDMM) -organisaatio. (Essop 2019.)

Vuonna 2019 tehdyssä auditoinnissa, jossa tarkastettiin puolustusministeriön lisäävän valmistuksen käyttöä varaosien valmistukseen, todettiin että ainakin 81 eri sotilaskohteessa on käytetty lisäävää valmistusta tuhansien osien ja työkalujen valmistukseen. AM-tekniikan käytöllä on lyhennetty huoltoaikaa ja valmistettu osia, joita ei ole muutoin saatavilla sekä parannettu olemassa olevia osia. (Report No. DODIG-2020-003 2019.)

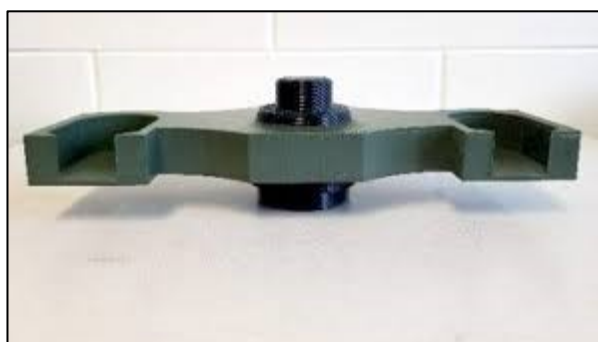
Maavoimissa käytettiin lisäävää valmistusta vuonna 2019 täydentämään olemassa olevaa toimitusketjua ja lisäämään sotilaiden valmiutta ainakin 19 kohteessa; huoltovariakoilla, teknisillä osastoilla ja ulkomailla toimivissa joukoissa. Maavoimat ovat kehittäneet liikutettavan 3D-tulostusyksikön, nimellä R-FAB (Rapid Fabrication via AM on the Battlefield), joka on varustettu teollisen tason AM-laitteilla ja on toimintakykyinen myös taistelukentällä (kuva 40). Maavoimat on käyttänyt R-FAB:a Saksassa, Thaimaassa, Japanissa ja Etelä-Koreassa. Maavoimien toimintalinjan mukaan maavoimien komentaja voi riskiarviota käyttäen päättää, mitkä osat voidaan tuottaa lisäävällä valmistusmenetelmällä. Tällä hetkellä maavoimat käyttää AM-osia väliaikaisosina, kunnes perinteisesti valmistettu osa on käytettävissä. AM-osan tulee täyttää käyttötarkoituksen

suoritusvaatimukset ja se tulee tutkia käytön jälkeen. AM-menetelmällä valmistettavaksi hyväksytyt työkalut ja asejärjestelmien osat tallennetaan arkistoon, missä ne on kaikkien maavoimien yksiköiden ladattavissa. (Report No. DODIG-2020-003 2019.) Maavoimilla on oma AM-osaamiskeskus (AM Center of Excellence), joka on varustettu sekä polymeerien että metallien teollisen tason 3D-tulostuslaitteilla (Wohlers Associates Inc. 2020, 249).



Kuva 40. USA:n maavoimien liikutettava 3D-tulostusyksikkö, R-FAB (Report No. DODIG-2020-003 2019).

Maavoimat on käyttänyt R-FAB-yksikköä esimerkiksi AH-64D Apache helikopterin huollossa roottorin lapojen irrotukseen ja kiinnitykseen käytettävän työkalun suunnitteluun ja valmistukseen 3D-tulostamalla. Aiemmin, ilman tätä työkalua huoltomiehet vaurioittivat helposti muita osia lapojen irrotuksessa. Työkalun valmistus kesti vain 9 tuntia ja sen hinnaksi tuli 3,21 dollaria. Työkalun (kuva 41) avulla säästyy 12,4 työtuntia ja 20 000 dollaria, kun muut osat eivät rikkoudu lapojen irrotuksessa ja kiinnityksessä. (Report No. DODIG-2020-003 2019.)



Kuva 41. AH-64D Apache helikopterin roottorin lapojen irrotuksessa ja asennuksessa käytettävä 3D-tulostamalla valmistettu apuväline (Report No. DODIG-2020-003 2019).

Vuonna 2019 USA:n laivasto käytti 23 kohteessa (huoltovarikoilla ja sodankäyntikeskuksissa) lisäävää valmistusta. Näiden lisäksi 3D-tulostusta käytettiin myös laivoissa. 3D-tuotusta käytetään tutkimus- ja kehitystyöhön sekä työkalujen ja kalliiden, säännöllisesti rikkoutuvien, vaikeasti hankittavien ja vanhentuneiden osien valmistukseen. Laivaston ilmajärjestelmäosasto (NAVAIR) määrittää, mitkä lentokaluston osat voidaan valmistaa AM-tekniikalla ja laivaston merijärjestelmäosasto (NAVSEA) määrittää laivoihin ja sukellusveneisiin valmistettavat osat. Yleisesti ottaen työkalujen valmistaminen ei vaadi etukäteislupaa, mutta NAVSEA vaatii hyväksynnän AM-menetelmällä valmistetuille työkaluille, muoteille ja kiinnikkeille, jos niitä käytetään aluksessa tai ydinkäyttöisissä laitteissa. Myös laivastolla on järjestelmät (Excel-tilukkolaskenta, Access-tietokanta ja Joint Technical Data Integration (JTDI)-systeemi), mistä laivaston lisäävän valmistuksen yhteisö voi ladata hyväksytyt osat tulostettavaksi. Esimerkkeinä laivaston 3D-tulostuksen käytöstä voidaan esittää MH-60R helikopterin sonar-järjestelmän kannen valmistaminen. 3D-tulostus lyhensi toimitusajan 2 vuodesta 1 viikkoon. Kuvassa 42 on perinteisesti valmistettu ja 3D-tulostamalla valmistettu MH-60R helikopterin sonar-järjestelmän kansi. (Report No. DODIG-2020-003 2019.)



Kuva 42. Perinteisesti valmistettu ja 3D-tulostamalla valmistettu MH-60R helikopterin sonar-järjestelmän kansi (Report No. DODIG-2020-003 2019).

Ilmavoimat käytti vuonna 2019 vähintään 35 ilmavoimien kohteessa lisäävää valmistusta pienentääkseen kustannuksia ja tuottaakseen osia, joita ei ole enää muutoin saatavilla. Ilmavoimat on keskittynyt matalan riskin tuotteisiin, kuten tukivälineiden, työkalujen ja ei-kriittisten asejärjestelmäkomponenttien valmistukseen, luodakseen pohjan laajentamiselle kriittisempiin osiin. Ilmavoimien useissa eri yksiköissä tehdään tutkimusta ja kehitetään AM-kykyä. Valmistettuja osia seurataan Access-tietokannan ja Excel-tilukkolaskennan avulla ja osat vaativat insinöörien ja muiden asiantuntijoiden tarkastuksen ja

hyväksynnän ennen käyttöönottoa. Ilmavoimat on saavuttanut ja laskee saavuttavansa merkittäviä säästöjä 3D-tulostuksen ansiosta. Ilmavoimat valmisti 3D-tulostamalla C-17 Globemaster III sotilaskuljetuskoneeseen kolme jäähdytyskanavaa (kuva 43), joiden toimitusaika lyheni 3D-tulostuksen ansiosta 9 kuukaudella. Lisäksi ilmavoimat on laskenut, että koneen yli 20 vuoden elinkaaren aikana ilmavoimat voisi saavuttaa 12 miljoonan dollarin säästön 3D-tulostuksella. (Report No. DODIG-2020-003 2019.)



Kuva 43. C-17 Globemaster III sotilaskuljetuskoneen 3D-tulostettu jäähdytyskanava (Report No. DODIG-2020-003 2019).

Merijalkaväki käyttää AM-järjestelmää huoltovarikolla ja maihinnousu yksiköissä lyhentääkseen osien toimitusaikaa ja ratkoakseen taistelukenttien haasteita. Myös merijalkaväellä on käytössä siirrettävä 3D-tulostusyksikkö, Expeditionary Fabrication Facility (EFF), jossa on kolme 3D-tulostinta. Merijalkaväen 3D-tulostusyksikkö on rakennettu levitettävälle konttipohjalle samalla tavoin kuin USAn maavoimien ja muiden maiden vastaavat yksiköt. Merijalkaväki käyttää samaa JTDI-järjestelmää kuin laivastokin sekä Marine Maker-sivustoa 3D-tulostamalla valmistettujen osien seurantaan. JTDI-järjestelmää käytetään ilmailun AM-osien osatietojen ja -mallien tallentamiseen, kun taas Marine Maker-verkkosivustolla säilytetään maayksiköiden osien ja työkalujen tekniset tiedot. Merijalkaväki on valmistanut 3D-tulostamalla esimerkiksi helikopterikypärän visiirin kiinnikkeen (kuva 44). Myös tämän osan toimitusaika lyheni ja hinta laski huomattavasti 3D-tulostuksen ansiosta. (Report No. DODIG-2020-003 2019.) Merijalkaväellä on myös 24/7 tukikeskus, joka auttaa merijalkaväen sotilaita 3D-tulostettavien osien suunnittelussa ja testauksessa (Wohlers Associates Inc. 2020, 249).



Kuva 44. Helikopterikypärän visiirin 3D-tulostettu kiinnike (Report No. DODIG-2020-003 2019).

Logistiikkavirasto tukee lisäävän valmistuksen käyttöä suunnittelemalla ohjelmistoja tunnistamaan potentiaaliset osat AM-tekniikalle, rakentamalla yhteistä 3D-mallien vaihtojärjestelmää, standardoimalla AM-osien numerointia sekä hankkimalla 3D-tulostuslaitteita ja materiaaleja joukkojen käyttöön. Kehitteillä on prototyyppi ohjelma, jolla voidaan määrittää, onko jokin osa valmistettavissa 3D-tulostamalla. Ohjelma kerää määrittämiseen arvioitavasta osasta eri lähteistä dataa, kuten sen materiaalista, dimensioista, toimitusajoista ja kustannuksista. (Report No. DODIG-2020-003 2019).

USA:n armeija tutkii ja kehittää 3D-tulostuksen käytettävyyttä myös kenttälääkinnässä. Tutkimuskohteena on lääkinällisten laitteiden osien valmistus sekä 3D-biotulostus. Esimerkkeinä 3D-tulostamalla valmistetuista korjausosista on mainittu mm. pesualtaan impelleri ja anestesia-laitteen höyrystimen lukitustappi (Lovelace 2020). Biotulostus projektin tavoitteena on kehittää kenttäolosuhteisiin tekniikka, jolla sotilaat voivat valmistaa hoitopaikassa tarvittavia lääkinällisiä tarvikkeita (Boissonneault 2020). ISS-avaruusasemalle lähetettyä 3D-biotulostinta kehittämässä ollut nScrypt Inc. kehittää armeijalle kenttäkelpoista biotulostinta sotilassovelluksiin. Ensimmäisessä 10 viikkoa kestäneessä Afrikan autiomaassa tehdyssä pilottitutkimuksessa testattiin laitetta ja materiaaleja. Tutkimuksen aikana tulostettiin kirurgisia instrumentteja, bioaktiivisia haavasiteitä, anatomisia malleja sekä ihmisen nivelkierukkakudosta. Tulevaisuudessa projektin tavoitteena on tehdä vastaavia kokeita viidakossa sekä vedellisillä, arktisissa ja korkean ilmanalan olosuhteissa. 3D-tulostus ja 3D-biotulostus voi tarjota ennennäkemättömiä hyötyjä sotilaiden terveydenhuoltoon syrjäisissä paikoissa toimittaessa. (Connelly 2020.) Kuvassa 45 on 3D-biotulostettu haavaside, joka on valmistettu antibioottia sisältävästä hydrogeelistä ja joustavasta polymeeristä (Boissonneault 2020; Wohlers Associates Inc. 2020, 250).



Kuva 45. 3D-biotulostettu haavaside (Boissonneault 2020).

3-vuotisessa Automated Construction of Expeditionary Structures, ACES - tutkimusprojektissa on tutkittu puolivakinaisten rakenteiden valmistusta 3D-tulostamalla betonista, joka on tehty paikallisesti saatavista materiaaleista. 3D-tulostamalla rakentamisen tavoitteena on vähentää kohteeseen kuljetettavan rakennusmateriaalin määrä puoleen ja työvoimantarvetta 62 %, kun verrataan perinteiseen rakentamistapaan. Tutkimuksessa maavoimien ja merijalkaväen joukot ovat olleet rakentamassa betonista mm. parakkeja, siltoja ja bunkkereita. Tutkimusryhmän mukaan 3D-tulostamalla rakentaminen vähentää kustannuksia 40 %, rakennusaikaa 50 % ja betonimateriaalin tarvetta 44 % perinteiseen rakentamiseen verrattuna. Lisäksi seinien lujuus kasvoi yli kaksinkertaiseksi, lämpöenergian hyötysuhde parani 10-kertaiseksi ja ihmistyövoiman tarve väheni 50 % ja yleisestikin raskaan työn määrä väheni. Tutkimuksessa on myös tarkoitus rakentaa 3D-tulostettua bunkkeria vastaava bunkkeri perinteisellä valmistustavalla ja verrata niiden kestävyttä paineaaltoa ja räjäytystä vastaan. (Saunders 2018; Sher 2019b.) Kuvassa 46 vasemmalla bunkkerin valmistusta betonia pursottamalla ja oikealla valmis bunkkeri rakentajineen.



Kuva 46. Bunkkerin rakentaminen betonista 3D-tulostamalla (Sher 2019b).

Maavoimien tutkimuslaboratoriossa kehitetään lujempaa ja kevyempää keraamimateriaalia ja rakennetta sotilaan suojaliiviin. 3D-tulostus antaa mahdollisuuden luoda erilaisia kevyempiä, mutta kestäviä rakenteita suojan aikaansaamiseksi. Monien uusien rakenteiden suunnittelussa haetaan mallia luonnon lujista rakenteista ja imitoidaan niitä. Suojaliivin rakenteen suunnittelussa on käytetty mallina abalonin eli merikorvan kuoren rakennetta. 3D-tulostamalla voitaisiin tuottaa yksilöllisiä sotilaan mittojen mukaisia suojavausteita, jolloin sekä sotilaan suojaus, liikkuvuus että toimintakyky paranee. (Burton 2019; Cameron 2019.)

Puolustusministeriö tukee lisäävän valmistuksen T&K-toimintaa useiden ohjelmien kautta. Kansallinen tutkimuslaitos, Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), on kansalliseen turvallisuuteen keskittynyt tieteen ja teknologian tutkimus- ja kehittämislaitos, jossa lisäävän valmistuksen tutkimusta tehdään sille perustetussa Advanced Manufacturing Laboratory -yksikössä. (Wohlers Associates Inc. 2020, 255.)

#### 8.4 Kiina

3D-tulostuksella on tärkeä rooli Kiinan strategisessa tavoitteessa tulla tieteen ja teknologian supervallaksi, ja sillä on merkittäviä vaikutuksia sekä siviiliteollisuuteen että Kiinan kansan vapautusarmeijan PLA:n (People's Liberation Army) valmiuksiin. Vaikka Kiinan analyytikot ovat jakautuneet niihin, jotka kokevat 3D-tulostuksen olevan uhka perinteiselle valmistusteollisuudelle ja niihin, jotka pitävät sitä välttämättömänä osana Kiinan sotilaallisia kykyjä, on yhteistyö Kiinan keskushallinnon ja PLA:n tiede- ja teknologiakomiteoiden välillä lisännyt 3D-tulostusteknologian sisällyttämistä sotilaalliseen



valmistukseen. Jos Kiina pysyy tämän AM-tekniikan siviilisovellusten kärjessä, on todennäköistä, että myös PLA on sotilaallisten sovellustensa kärjessä. (VornDick 2018.)

Kiinan kansan vapautusarmeijan (PLA, People's Liberation Army) laivaston kerrotaan käyttäneen 3D-tulostusta jo vuonna 2015 meriolosuhteissa tulostamalla Harbin hävittäjä-laivaan sijoitetulla 3D-tulostimella hammaspyörän rikkoutuneen tilalle (Anderson Goehrke 2015). Kiinan kerrotaan käyttäneen 3D-tulostettuja osia COMAC C919-matkustajakoneessa sekä useissa sotilaskoneissa, kuten Y-20-kuljetuskoneessa sekä J-15-, J-16-, J-20- ja J-31-suihkuhävittäjissä (Andersson 2013).

## 8.5 Australia

Australian maavoimat ja laivasto ovat hankkineet australialaiselta SPEE3D-tulostinlaittevalmistajalta patentoituun kylmäsuihkutustekniikkaan perustuvat metallien 3D-tulostimet. Maavoimien WarpSPEE3D-laitetta voidaan käyttää maasto-olosuhteissa ja sillä voidaan valmistaa aina 40 kiloa painavia kappaleita tulostusnopeuden ollessa 100 grammaa/minuutti. Laivaston vastaava WarpSPEE3D asennettiin laivaston satamaan. Maavoimat testasi WarpSPEE3D-laitettaan kahden viikon ajan kenttäolosuhteissa tulostamalla ja jälkikäsittelemällä sarjan erilaisia testikappaleita, kuten esimerkiksi konekivääriampujan räikkätyökalun sekä polttoainepumppuun liittyvän kannakkeen. Kuvassa 47 vasemmalla on WarpSPEE3D-tulostin maastoutettuna ja oikealla 3D-tulostamalla valmistetut ja koneistamalla viimeistellyt räikkä ja kannake. (SPEE3D 2020.)



Kuva 47. Australian maavoimien WarpSPEE3D-tulostin sekä 3D-tulostetut ja koneistamalla viimeistellyt räikkä ja kannake (SPEE3D 2020).

## 9 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN KEHITYSNÄKYMÄT PUOLUSTUSSEKTORILLA

3D-tulostuksen sovellukset ovat alkaneet realisoitua kaupalliseksi tuotannoksi nyt jo monilla eri teollisuuden toimialoilla ja sen mahdollisuuksia ilmailu- ja puolustusteollisuudessa pidetään merkittävänä. Useimmat suuret sotilasorganisaatiot ja puolustusalan yritykset tutkivat AM-tekniikalle potentiaalisia sovelluskohteita. Jotkut ovat vielä testausvaiheessa, kun taas jotkut ottavat jo teknologiaa lopputuotantokäyttöön. Näin on esimerkiksi ilmailuteollisuudessa, missä jo käytetään 3D-tulostettuja komponentteja moottoreissa, lentokoneissa ja satelliiteissa. (Army Technology 2020.)

Markkinatutkimusyhtiö GlobalData listasi vuonna 2019 sotilasorganisaatiot, jotka ovat olleet ensimmäisinä ottamassa lisäävää valmistusta käyttöön. GlobalDatan mukaan USAn merijalkaväki on käyttöönotossa pisimmällä ja seuraavana tulevat USAn ilmavoimat, laivasto ja maavoimat. USAn armeijan joukkojen jälkeen tulevat Kiinan ilmavoimat, Venäjän maavoimat ja Etelä-Korean ilmavoimat. (Army Technology 2020.) Lista perustuu eri maiden puolustusvoimien tekemiin julkaisuihin, joten varmoja johtopäätöksiä lisäävän valmistuksen kypsyydestä ja käyttöönoton määrästä listalla mainituissa maissa ei voida tehdä. USAn armeijan joukot ovat kuitenkin selkeästi kehityksen kärjessä.

Markkinatutkimusyhtiö Mordor Intelligencen vuosille 2019–2024 tehdyssä markkinaraportissa todetaan myös, että 3D-tulostuksen liikkeelle panevia aloja ovat ilmailu ja puolustus. Näille ennustetaan 20 % kasvua seuraavien viiden vuoden aikana. Teknologian kehittyminen materiaaleissa ja 3D-tulostimissa tulee vahvistamaan lentokoneiden ja miehittämättömien ilma-alusten markkinoita erityisesti uusien kevyiden materiaalien ansiosta. Metallimateriaalien kehittäminen tukee sitä, että myös avaruus-alusten valmistus muodostaa jatkossakin suuren osan markkinoista. Raportin mukaan markkinat kasvavat voimakkaimmin Pohjois-Amerikassa, osittain siksi, että Yhdysvaltain ilmailuhallinto FAA (Federal Aviation Administration) on hyväksynyt kaupallisissa suihkumoottoreissa 3D-tulostettujen osien käytön lisäämisen. Myös Euroopan lentoturvallisuusvirasto on hyväksynyt 3D-tulostettujen osien käyttöä lentokoneissa. Erilaisten innovaatioiden, kuten esimerkiksi 3D-tulostetun lentokoneen moottorin tuuletintunnelin oven kiinnikkeen (Power Door Opening System, PDOS) lentokelpoisuushyväksyntä ja massatuotanto, vahvistavat myös Pohjois-Amerikan teollisuutta ja lisäävän valmistuksen käyttöä. (Defence Contracts Online 2019.)

Naton Tiede ja Teknologia Trendit 2020–2040-raportti (Science & Technology Trends: 2020–2040) antaa arvion kehittyvistä ja disruptiivisista tieteistä ja teknologioista sekä niiden mahdollisista vaikutuksista Naton sotilaallisiin operaatioihin, puolustusvalmiuksiin ja poliittiseen päätöksentekotilaan. Materiaalien ja valmistusmenetelmien kehittymisen nähdään vaikuttavan vahvasti puolustukseen ja kansalliseen turvallisuuteen tulevina vuosikymmeninä. Uudenlaisten materiaalien käyttö yhdessä lisäävän tai hybridivalmistuksen kanssa mahdollistaa tehokkaamman, vähemmän jätteitä tuottavan tuotannon, tuotteiden räätälöinnin, elektroniikan ja sensoreiden upottamisen sekä nopean suunnittelun ja varaosien valmistuksen aseisiin, taisteluajoneuvoihin sekä muihin laitteisiin. (Reding & Eaton 2020, 104.) Naton raportissa kuvatut trendit ja esiin nostetut lisäävän valmistuksen tulevaisuuden mahdollisuudet ja sovellusalueet on koottu liittouman näkökulmasta, mutta pääpiirteet voidaan hyvin suhteuttaa myös yksittäisten valtioiden puolustusvoimiin.

Teollisuusvallankumouksen onnistumisen taustalla on suurelta osin uusien materiaalien ja valmistusmenetelmien tutkimus, jonka odotetaan edelleen jatkuvan. Seuraavien 20 vuoden aikana nähdään disruptiivisena kolme T&K-toiminnan pääaluetta: 1) Uudet materiaalit, 2) lisäävä valmistus ja 3) energia. Potentiaalisina 3D-tulostussovelluksina Natossa nähdään; mallinnus ja prototyypit, pienerät ja kompleksiset osat, kuten rakettimootorin osat, korvaavat (teknologisesti vanhentuneille) osat, kevyitä ja korkean lujuuden omaavia materiaaleja vaativat rakenteet, yhdistelmäateriaalit ja 3D-tulostamalla valmistetun elektroniikan upotus suoraan osan sisälle tai pinnalle, korjausosan valmistus taistelukentällä, laivassa tai avaruudessa, suuret rakenteet suoraan sijaintipaikalle (vältetään kuljetusongelmat), uusien muotojen tuottaminen tai ainutlaatuisten materiaalien käyttö, suuret rakenteet, kuten rakennukset paikallisista materiaaleista tai asejärjestelmät sekä biomateriaalit, kuten kudokset, elimet ja ruumiin osat. 3D-tulostuksen lisäksi 4D-tulostus nähdään potentiaalisena tulevaisuuden sovelluksissa. (Reding & Eaton 2020, 104.)

Nykyisillä 3D-, 4D- ja nanoteknologioilla on suoria vaikutuksia puolustukseen ja turvallisuuteen. Nämä teknologiat ovat sekä laajasti saatavilla että kaksoiskäyttöisiä tarjoten näin samanlaiset edut lähes kaikille, valtiosta riippumatta. Vihollisjoukot voivat kasvattaa kykyjään hyödyntämällä laittomin keinoin saatuja järjestelmämalleja tai toimittamalla saarron alaisia osia, kuten kehittyneitä lentokoneissa tai ohjuksissa tarvittavia osia. (Reding & Eaton 2020, 107.)

Kehittyneiden materiaalien, nanoteknologian ja 3D/4D-valmistuksen puolustussovelluksia on monia. Voidaan olettaa, että tulevaisuuden järjestelmät ovat kevyempiä, vahvempia ja energiatehokkaampia uusien materiaalien ja valmistusmenetelmien vaikutuksesta. Sotilaallisia operaatioita tai valmiuksien kehittämistä tukevia AM-tekniikan erityissovellusalueita ovat:

- Tuotekehitys; Tuotekehityksen nopeutuminen lyhentäen suunnittelusykliä, parantaen kustannustehokkuutta, lisäten suunnittelun vapautta ja optimointia ilman perinteisten valmistusmenetelmien rajoitteita.
- Huolto ja logistiikka; Huollon ja logistiikan kehittyminen vähentäen varaosien varastointia, lisäten osien saatavuutta ja vähentäen kuljetuskustannuksia. Varaosien valmistus tarvittaessa ja paikallisesti, korvaamalla tavaravarastot digitaalisilla varastoilla. Osien valmistus paikan päällä 3D-skannaamalla luodun tai digitaalisesta varastosta otetun mallin pohjalta, lisää merkittävästi toiminta-aikaa, vähentää logistista viivettä ja minimoi elinkaarikustannuksia.
- Yksittäiskappaleet ja piensarjat; Uusien mallien ja korkea hintaisten tuotteiden kustannusten vähentäminen ja tehokkuuden lisääminen erityisesti ilmailussa ja meriympäristössä. Esimerkiksi lämpösulkupäällysteellä pinnoitettu yksikiteinen turbiinin lapa tai erittäin hiljainen sukellusveneen potkuri sisältää monimutkaisia muotoja ja materiaalin käsittelyjä, jonka vuoksi ne ovat kalliita. Tällaisten komponenttien tehokas korjaus AM-tekniikan avulla vähentää merkittävästi käyttökustannuksia ja lisää käyttövarmuutta.
- Tehtäviin räätälöityjen autonomisten asejärjestelmien valmistus tarvittaessa (tilatessa) ja paikan päällä (Reding & Eaton 2020, 108–9.)

AM-tekniikan avulla voidaan tukea ja vahvistaa omien joukkojen toimintakykyä, mutta on huomioitava, että sitä käyttää myös vastapuoli, joka voi hyödyntää AM-tekniikkaa samoilla edellä mainituilla sovellusalueilla. Lisäksi on huomioitavaa, että:

- Koska AM-tekniikan edistyminen perustuu pääasiassa siviili- ja kaupallisiin intresseihin, on todennäköistä, että nämä tekniikat ovat monien maiden, ei-valtiollisten toimijoiden, kuten terroristijärjestöjen ja sotilaallisten voimien käytettävissä. Sen vuoksi epäsymmetristen uhkien (ampuma-aseet, improvisoidut räjähteet, tehtäväräätelöidyt aseet jne.) uudenlainen käyttö on ennakoitava, sillä ne voivat aiheuttaa merkittävän uhan.

- Sotilaallisiin sovelluksiin tarkoitettujen AM-tekniikoiden hallinnointiin liittyy myös huolenaiheita. 3D-tulostuksessa tarvittavia digitaalisia malleja voidaan helposti tuottaa takaisinmallintamalla (esim. 3D-skannaus) ja niitä voidaan jakaa, hakkeroida, muokata, väärentää ja varastaa.
- AM-tekniikan ja siihen liittyvien uusien mallien laaja saatavuus lisää puolustustekniikan leviämistä ei-valtiollisille toimijoille, epäystävällisille valtioille ja komponenttien väärentäjille. Myös kauppasaarossa olevia osia voidaan valmistaa helposti, mikä rajoittaa pakotteiden tehokkuutta. (Reding & Eaton 2020, 109.)

AM-tekniikan kehittäminen osana niin Naton kuin yksittäisen valtionkin kyvykkyyttä edellyttää suunnittelua, ohjelmistojä, immateriaalioikeuksien (IPR) ja kyberturvallisuuden hallintaa sekä sertifiointi- ja valmistusstandardeja, jos 3D/4D-tulostettuja osia aiotaan käyttää uudenaikaisissa asejärjestelmissä. Pelkästään turvallisuusvaatimukset edellyttävät, että jos aiotaan käyttää AM-osia rutiinimaisesti korkean rasituksen alueilla, kuten ilmailualalla, ne on sertifioitava ja kvalifioitava, kuten alkuperäiset varaosat. Tämä vaatimus edellyttää kattavaa ymmärrystä kaikista niistä tekijöistä, jotka aiheuttavat ominaisuuksien vaihtelua, sekä menetelmiä komponenttien tarkastamiseksi, karakterisointiseksi ja sertifioimiseksi. Tarvitaan myös sopimuksia, sillä digitaalisten mallien käyttö, osien skannaus ja 3D-tulostus voivat rikkoa alkuperäisvalmistajan IPR-oikeuksia. (Reding & Eaton 2020, 109.)

AM-tekniikkaa käytetään nykyään jo eri toimialoilla moniin erilaisiin tarkoituksiin, samalla kun tekniikka kuitenkin edelleen kehittyä ja laajenee nopeasti. Täsmälliset TRL-luokat ja kehitysvaiheen mukaiset sijainnit Gartnerin hypekäyrällä ovat hyvin materiaali-, sovellus- ja prosessikohtaisia. Sotilaallisten sovellusten TRL voidaan luokitella välille 4–6. Kehittyvien ja disruptiivisten tekniikoiden sotilaallisten vaikutusten arviointi on monimutkainen prosessi, jossa on huomioitava mm. uhkaympäristö ja sen muutokset, oikeudelliset ja poliittiset tekijät, investointipäätökset ja organisaatioiden riskinsietokyky. Natossa arvioidaan lisäävän valmistuksen vaikutuksen sotilaallisiin kyvykkyyksiin maltillisiksi ja että lisäävä valmistus olisi tällä hetkellä Gartnerin hypekäyrällä valaistusvaiheessa, joka tarkoittaa sitä, että yhä useammalle yritykselle alkaa hahmottua tekniikalla saavutettavat hyödyt, tekniikan ymmärrys lisääntyy, tuotteista alkaa tulla myyntiin parannettuja versioita ja investoinnit tekniikkaan kasvavat. Lisäksi Natossa arvioidaan lisäävän valmistuksen olevan valmiudeltaan TRL 7 ja saavuttavan täyden kypsyyden vuoteen 2025 mennessä. (Reding & Eaton 2020, 110.)

## 10 YHTEENVETO

EU:ssa materiaalia lisäävä valmistus on kirjattu ensisijaisten teknologia-alojen joukkoon ja globalisaation hallinnasta antamassaan asiakirjassa Euroopan komissio katsoi, että lisäävä valmistus on yksi merkittävimmistä teollisuutta muuttavista tekijöistä. Materiaalia lisäävää valmistusta käytetään tänä päivänä niin ideoiden mallintamiseen, prototyyppien ja työkalujen valmistukseen kuin lopputuotteiden tuottamiseen. Yhä useampi kolmiulotteisten kappaleiden valmistukseen liittyvä ongelma voidaan ratkaista nopeammin, paremmin ja usein myös edullisemmin käyttämällä lisäävää valmistusteknologiaa. Eri teollisuuden aloilla, kuten esimerkiksi ilmailu- ja autoteollisuudessa sekä monilla muilla yhteiskunnan eri aloilla, kuten lääketieteessä, koulutuksessa ja arkkitehtuurissa käytetään lisäävää valmistusta sekä yksittäisten kappaleiden tuottamiseen että sarjatuotantomenetelmänä. Lisäävän valmistuksen menetelmät kehittyvät edelleen jatkuvasti, ja uusia sovelluksia ja käyttökohteita syntyy lähes päivittäin.

Lääketieteen ja hammaslääketieteen alat hyödyntävät lisäävää valmistusteknologiaa mm. kirurgisten toimenpiteiden suunnittelussa, esittelemisessä, koulutuksessa ja toteutuksessa erilaisten 3D-tulostettujen havainnollisten mallien, kirurgisten apuvälineiden, tukivälineiden, implanttien ja proteesien muodossa. Korvan sisäisistä kuulolaitteista suurin osa valmistetaan tänä päivänä 3D-tulostusta hyödyntäen. Hampaiden oikomiseen käytettäviä yksilöllisiä ja entistä esteettisempiä oikomislaitteita valmistetaan 3D-tulostamalla massatuotantona. Tällä hetkellä erilaisten kudosten ja elimien tuottaminen 3D-tulostuksella on vielä tutkimusvaiheessa, mutta ehkä noin 5 vuoden päästä saadaan käyttöön 3D-tulostettua ihoa ja reilun 10 vuoden päästä 3D-tulostettuja sarveiskalvoja ja muita monimutkaisempia elimiä.

Arkkitehdit voivat käyttää luovuuttaan vapaammin suunnitellessaan rakennuksia ja muita rakenteita, kuten melu- tai tulvavalleja. Teollisuudessa ja erityisesti ilmailu- ja avaruusteollisuudessa käytetään lisäävä valmistusta kriittistenkin komponenttien valmistukseen, sillä keventämällä ja optimoimalla rakenteita saadaan parannettua tehokkuutta sekä laskettua käyttökustannuksia ja ympäristöpäästöjä. On sanottu, että jokainen kevennetty kilo tuo 25 tonnin vähennyksen hiilidioksidipäästöihin lentokoneen elinkaaren aikana. AM-teknologialla voidaan vähentää jopa 55 % komponentin painosta ja 90 % raaka-ainekulutusta. Lopputuotteiden valmistuksen lisäksi AM-tekniikoiden avulla voidaan tehostaa tuotekehitystä sekä valmistaa tuotannossa tarvittavia työkaluja ja apuvälineitä.

Elektroniikan tulostaminen ja elektroniikan liittäminen valmistettavaan kappaleeseen upottamalla tuo monia mahdollisuuksia esimerkiksi olosuhteiden tai komponentin kunnon seurantaan. 4D-tulostus, jossa 3D-kappale neljännen lisäulottuvuuden ansioista muuttaa muotoa tai toimintaa joko ajan tai muuttuvien olosuhteiden vaikutuksesta, on vielä tutkimusvaiheessa ja sen arvioidaan olevan tuotantokäytössä vasta yli 10 vuoden päästä.

Tarvitaan erilaisia menetelmiä ja välineitä 3D-tulostukseen soveltuvien kappaleiden seurlontaan varaosakirjastoista, koska kaikenlaisia kappaleita ei ole teknologisesti eikä taloudellisesti järkevää valmistaa 3D-tulostamalla. Tarjolla on jo joitakin kaupallisia ohjelmia, joita käytetään sekä siviili- että puolustussektorilla 3D-tulostettavien kappaleiden valintatyökaluna, mutta esimerkiksi USA:n asevoimat kehittää omaa ohjelmistoa 3D-tulostettavuuden arviointiin ja tässä arvioinnissa tarvittavan datan poimimiseksi eri järjestelmistä.

Sekä siviili- että puolustussektorin lisäävän valmistuksen sovelluksissa, tutkimuksen alaisissa ja käytössä olevissa, korostuvat samat AM-tekniikan tarjoamat erityiset edut. 3D-tulostus lisää suunnittelun vapautta, ja antaa mahdollisuuden personoida, keventää ja optimoida rakenteita sekä tuottaa kompleksisia muotoja, joita on perinteisillä valmistusmenetelmillä joko hankala tai mahdoton tehdä. Lisäksi erittäin tärkeänä pidetään kykyä valmistaa tuotteita paikallisesti, lähellä käyttökohdetta ja tarvittaessa/tilattaessa, sekä mahdollisuuksia varastoida tuotteita digitaalisessa muodossa fyysisen kappaleen sijaan, lyhentää logistiikkaketjuja ja vähentää tavaravarastojen tarvetta.

Näyttää siltä, että erityisesti puolustusvoimien organisaatioissa pidetään tärkeänä mahdollisuutta valmistaa varaosia vanhoihin järjestelmiin, joihin varaosia ei joko ole enää saatavilla tai niiden hankinta on hyvin hidasta ja kallista. 3D-tulostaminen on erittäin potentiaalinen vaihtoehto esimerkiksi silloin, kun varaosan valmistuksessa tarvittavia muotteja tai työkaluja ei enää ole olemassa ja tarve on yksittäisille tai pienelle määrälle osia. Toinen tärkeä lisäävän valmistuksen tarjoama etu on mahdollisuus tuottaa varaosia tai tehdä korjauksia lähellä niiden käyttökohdetta, kuten taistelulentäällä tai vaikkapa laivassa. Näin voidaan vähentää varaosien varastointia ja kuljetusta logistisesti hankaliin kohteisiin, ja nopeuttaa vioittuneen kohteen toimintakyvyn palautumista.

Varaosien valmistus 3D-tulostamalla normaali- ja poikkeusolojen tarpeisiin näyttää olevan tärkein ja eniten kehitetty sovellusalue puolustusorganisaatioilla. 3D-tulostamalla voidaan valmistaa sekä varaosia, jotka täyttävät tai jopa ylittävät perinteisesti

valmistetulle varaosalle asetetut tekniset vaatimukset, että ns. väliaikaisvaraosia, joiden tarkoituksena on toimia ja kestää kunnes saadaan joko alkuperäinen varaosa tai kaikki tekniset vaatimukset täyttävä 3D-tulostettu varaosa.

Joillakin puolustusorganisaatioilla on käytössä konttipohjaisia, liikuteltavia 3D-tulostusyksiköitä. Polymeerien ja komposiittien 3D-tulostuslaitteilla varusteltuja 3D-tulostusyksiköitä on mm. Norjan ja USA:n asevoimilla sekä Euroopan puolustusvirasto EDA:lla. Lisäksi mm. Saksassa on liikuteltavia 3D-tulostusyksiköitä, joissa on varustuksena metallien suorakerrostuslaitteisto. Australian maa- ja merivoimilla on käytössään liikuteltavat, erittäin nopeaan metallin tulostustekniikkaan perustuvat yksiköt. Norjalaisen 3D-tulostusyksiköitä kehittävä ja valmistava Fieldmade AS:n edustajan mukaan heillä on tulossa markkinoille metallien tulostuslaitteiston sisältävä 3D-tulostusyksikkö, mutta vielä ei ole julkaistu, mihin tekniikkaan tämän tulostimen toiminta tulee perustumaan. Erilaisia konttipohjaisia liikuteltavia 3D-tulostusyksiköitä markkinoidaan ja hankitaan puolustusvoimien lisäksi mm. satamiin, öljynporauslautoille ja rahtilaivoihin. Yleensä 3D-tulostusyksikön tueksi tarvitaan toinen erillinen yksikkö, missä voidaan tehdä tarvittavat jälkityöstöt tulostetulle kappaleelle. Tällaisena yksikkönä voisi toimia kenttähuollossa käytettävä korjaamokontti. Lisäksi kenttähuollossa toimivalla 3D-tulostusyksiköllä on hyvä olla neutraalilla alueella ns. Reachback-tuki, jossa on suunnittelu-, mallinnus- ja tulostusosaaminen, ja jossa testataan ja kehitetään tulostusparametrejä kentällä tehtävään tulostukseen. Näin kaikkea välineistöä ja karkiosaamista ei tarvita riskialueella.

Laivoissa meriolosuhteissa yksittäisiä polymeerien 3D-tulostimia ovat käyttäneet esimerkiksi Norja, Kiina ja USA. Yksittäiset tulostuslaitteet ovat konttipohjaisia 3D-tulostusyksiköitä helpommin siirrettävissä eri kohteisiin. Erilaisia vaativia olosuhteita ja kuljetusta kestäviä 3D-tulostimia kehitetään mm. USA:n asevoimissa.

USA:n asevoimat on testannut erilaisten suojarakenteiden valmistusta betonin 3D-tulostuksella, jonka he arvioivat mahdollistavan nopean rakentamisen vähemmällä työvoimalla ja vähentävän rakenne-elementtien ja rakennustarvikkeiden hankalia kuljetuksia sekä betoniraaka-aineen tarvetta. 3D-tulostettujen suojarakenteiden suojausominaisuudet vaativat vielä tutkimusta. Sotilaan henkilösuojaimien, kuten suojaliivien 3D-tulostus tutkimusten tavoitteena on kehittää kevyempiä ja yksilöllisempiä suojaimia parantamaan sotilaan liikkuvuutta ja toimintakykyä.

Näyttää siltä, että vaikka siviilisektorilla on runsaasti lisäävän valmistuksen lääketieteellisiä sovelluksia niin sotilaslääketieteessä niitä on kehitetty vähemmän. Humanitaariseen



apuun kehitettyä menetelmiä ja välineitä voitaisiin käyttää joltain osin myös haavoittuneiden sotilaiden hoidossa. Sotilaslääketieteen ja kenttälääkinnän sovellukset koskevat pääasiassa lääkintähuollossa käytettävien tarvikkeiden ja välineiden valmistusta, mutta myös esimerkiksi bioaktiivisten haavasidosten ja kudoksen valmistusta 3D-biotulostamalla on testattu kenttäolosuhteissa. 3D-tulostuksesta arvioidaan olevan hyötyä toimitaessa logistisesti hankalassa kohteessa ja sotilaiden ensihoidon tarpeissa.

USA:n asevoimien joukot vaikuttavat olevan pisimmällä lisäävän valmistuksen käyttöön otossa ja on arvioitu, että seuraavana olisivat Kiinan ilmavoimat ja Venäjän maavoimat. USA:n asevoimat julkaisevat selkeästi eniten lisäävän valmistuksen tutkimuskohteitaan. Kiina kertoo käyttäneensä 3D-tulostusta laivassa jo vuonna 2015 ja valmistavansa osia sekä siviili- että sotilaslentokoneisiin. Venäjä käyttää 3D-tulostusta mm. uuden taistelupanssarivaunun prototyypin suunnittelussa ja valmistuksessa sekä helikopterin osien ja UAV:ien kaasuturbiinimoottorien valmistuksessa. Näyttää lisäksi siltä, että Venäjällä olisi erityisesti kykyä valmistaa myös suurikoisia kappaleita. Euroopassa ainakin Hollannin puolustusvoimat on jo aloittanut varaosien digitaalisen varastoinnin kehittämistä yhteistyössä kaupallisen toimijan kanssa.

Suomessa on tällä hetkellä kuusi metallien 3D-tulostusta tarjoavaa yritystä, joista kaikilla on jauhepetisulatustekniikkaan perustuvia laitteita 1–2. Tarkkaa tietoa Suomen polymeerien, komposiittien ja metallien tulostuslaitteiden kokonaismäärästä ei ollut saatavilla, mutta jos lasketaan tiedossa olevat metallien jauhepetisulatuslaitteet, niin niitä on vähintään 19, joista 15 on tulostusaltaan keskikokoa. Lisäksi Suomessa on metallien suora-kerrostuslaitteita sekä metallien pursotukseen ja sintraukseen perustuvia laitteita. Suomen laitekannalla voidaan päästä sarjatuotannon määriin, tosin riippuen valmistettävien kappaleiden koosta ja geometriasta. Suomessa on tehty lisäävän valmistuksen tutkimusta jo pitkään, mutta yritystoiminnassa 3D-tulostuksen käyttö ja erityisesti metallien 3D-tulostus on vielä melko uutta. Sanotaan, että Suomessa ei vielä ole kykyä valmistaa metallista kriittisiä komponentteja 3D-tulostamalla, koska 3D-tulostuspalveluyritykset ovat melko nuoria ja kyvykkyyden rakentaminen vaatii sekä aikaa että suuria taloudellisia investointeja. Suomessa ollaan jäljessä maailman kärjestä, mutta ala on selkeästi nousussa. Näyttää siltä, että lisäävän valmistuksen koulutusta kehitetään ja lisätään, ja 3D-tulostusalan toimijoiden yhteistyötä vahvistetaan aktiivisesti. Puolustusvoimien uusien hävittäjien hankintaan (HX-hanke) liittyvä teollinen yhteistyö ja sen kautta mahdollisesti tuleva tilaisuus kehittää suomalaista lisäävän valmistuksen osaamista ja kilpailukykyä,

on aktivoinut suomalaiset 3D-tulostusalan toimijat mm. suunnittelemaan lisäävän valmistuksen osaamiskeskusta, Additive Manufacturing Center of Excellence (AMCE).

Energeettisten materiaalien lisäävän valmistuksen tutkimuksessa Hollanti on edelläkävijänä, ja muut maat ovat keskenään melko samassa kehitysvaiheessa, tutkimusten alussa. Suomen osallistuminen EDA:n AMTEM-projektin yhdessä Ranskan, Saksan, Hollannin, Puolan ja Ruotsin kanssa luo energeettisten materiaalien tulostusosaamista Suomeen ja synnyttää mahdollisesti uusia innovaatioita suomalaiselle räjähdualan teollisuudelle.

Edellytyksenä lisäävän valmistuksen teknologian jatkuvalla kehitykselle sekä käyttöönotolle on, että teknologia pystytään siirtämään tutkimusyhteisöiltä kaupalliseen tuotantokäyttöön. Resursseja, osaamista ja taloudellista, lisäävän valmistuksen kehittämiseen ja käyttöönoton vahvistamiseen hankitaan yleisesti luomalla yhteistyöverkostoja, kuten erilaisia ekosysteemejä ja osaamiskeskuksia sekä elinkaarimallin mukaisilla julkisen-yksityinen kumppanuushankkeilla. Esimerkiksi USA:n asevoimat käyttää paljon elinkaarimallia yhdistäen näin puolustusalan asiantuntijat, yliopistotutkimuksen sekä yritysmaailman. Vaikuttaa siltä, että lisäävää valmistusta on lähdetty sekä yritysmaailmassa että puolustusorganisaatioissa ottamaan käyttöön entistä suunnitelmallisemmin ja organisoidummin laatimalla konsepteja ja tiekarttoja suuntaviivoiksi. Teknologian käyttöönotto ja täysimääräinen hyödyntäminen edellyttää laaja-alaista osaamista ja uudenlaisia osaajia niin suunnittelun, mallinnuksen kuin valmistuksen alalle.

Näyttää siltä, että lisäävän valmistuksen tekniikat ovat monilla alueilla maailmassa teknologisesti kypsiä ja jo teollisesti tuotantokäytössä, vaikka teknologia on yhä edelleen nopean kehityksen ja muutoksen vaiheessa. Haasteita on vielä mm. standardoinnissa sekä sarjatuotannon tehokkuudessa ja taloudellisuudessa. Näiden haasteiden uskotaan olevan pääosin ratkaistavissa teknologian käytön laajentumisen ja vakiintumisen myötä, kun osaaminen ja työmenetelmät kehittyvät. Ratkaistavana on myös mm. IPR:ään, digitaalisen mallitiedon turvalliseen säilytykseen ja siirtoon liittyviä kysymyksiä. Lisäksi vaikuttaa siltä, että puolustuksen ja turvallisuuden aloilla on kiinnitettävä huomiota myös siihen, mitä mahdollisuuksia lisäävään valmistuksen käyttö antaa esimerkiksi eivaltioisille toimijoille tai kauppasaarron alaisille valtioille, ja varauduttava niistä mahdollisesti syntyviin uhkiin.

## 11 LOPUKSI

Tässä tutkimuksessa esitetyt esimerkit on otettu pääosin yritysten verkkosivuilta, lehdistötiedotteista ja alaa seuraavien toimijoiden sivuilta, joten artikkelit sisälsivät varmastikin hieman hypetystä ja saattoivat antaa liian positiivisen kuvan edistymisestä. Esimerkit kertovat kuitenkin siitä mitä ja millaisia asioita tutkitaan ja mitkä ovat siviili- ja puolustussektoria kiinnostavia lisäävän valmistuksen sovelluskohteita. Esimerkit myös kertovat kuinka yksinkertaiset ja melko nopeastikin valmistettavat kappaleet voivat helpottaa so-tilaan toimintaa ja lisätä käyttömukavuutta, ja kuinka voidaan parantaa järjestelmän suorituskykyä, palautumista sekä toiminnan ekologisuutta.

Materiaalia lisäävä valmistus on ala, joka muuttuu ja jossa tapahtuu joka päivä jotain uutta. Lisäävästä valmistuksesta on tullut yksi tuotantomenetelmä muiden menetelmien rinnalle. AM-menetelmiin liittyy haasteita ja rajoitteita, niin kuin muihinkin valmistusmenetelmiin. Jotta lisäävän valmistuksen teknologiasta saadaan optimaalisesti käyttöön sen tarjoamat hyödyt, tulee tietoisuutta ja osaamista organisaatioiden eri tasoilla kasvattaa, jotta voidaan tunnistaa kohteet ja tilanteet missä 3D-tulostus on potentiaalinen valmistusmenetelmä.

## LÄHTEET

- 3D Bioprinting Solutions. 2018. Viitattu 28.12.2020 <https://bioprinting.ru/en/about-lab/>
- 3DFormtech Oy. 2020 Viitattu 25.9.2020 <https://3dformtech.fi/yritys/>
- 3D Printing Industry. The free beginner's guide to 3D printing. Viitattu 24.7.2020 <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide>
- 3D-print magazine. 2020. Change management the biggest challenge in transition to digital warehousing. 3D-print magazine. Viitattu 29.11.2020 <https://3dprintmagazine.eu/change-management-the-biggest-challenge-in-transition-to-digital-warehousing/>
- 3DStep Oy. 2020 Viitattu 25.9.2020 <https://www.3dstep.fi/>
- 3DTech Oy. 2020 Viitattu 25.9.2020 <https://www.3dtech.fi/>
- 4WEB Medical 2020. 4WEB products viitattu 24.10.2020 <https://4webmedical.com/products/#spine>
- Appleby-Thomas, G. J., Jaansalu, K., Hameed, A., Painter, J., Shackel, J. & Rowley, J. 2019. A comparison of the ballistic behaviour of conventionally sintered and additively manufactured alumina. Defence Technology Volume 16, Issue 2 s. 275–282. Viitattu 2.1.2021 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914719304842>
- Additive Center. 2020. Royal Dutch Army: Increasing adaptability on the battlefield with 3D printing Viitattu 29.11.2020 <https://additivecenter.com/2020/01/23/royal-dutch-army-increasing-adaptability-on-the-battlefield-with-3d-printing/>
- Airbus. 2018. Bridging the gap with 3D printing. Viitattu 1.11.2020 <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2018/04/bridging-the-gap-with-3d-printing.html>
- Airbus Helicopter. 2018. Airbus Helicopters to start large-scale printing of A350 XWB components. Viitattu 1.11.2020 <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2018/09/airbus-helicopters-to-start-large-scale-printing-of-a350-compone.html>
- Ajatec Prototyping Oy. Viitattu 25.9.2020 <https://ajatec.fi/>
- Alfred Nobel Science Park. Här får du veta mer om AM och CT. Viitattu 6.1.2021 <http://alfrednobelsp.se/mer-om-och-ct/>
- Alonen, A., Alonen, L. & Hietikko, E. 2016. Lisäävän valmistuksen perusteet. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu. Viitattu 24.7.2020 [https://portal.savonia.fi/amk/sites/default/files/pdf/tki\\_ja\\_palvelut/julkaisut/lisaavan\\_valmistuksen\\_perusteet.pdf](https://portal.savonia.fi/amk/sites/default/files/pdf/tki_ja_palvelut/julkaisut/lisaavan_valmistuksen_perusteet.pdf)
- Alonen, A., Suhonen, M., Hietikko, E., Vihelä, S., Goldsteine, Z. & Heinonen, T. 2016. Lisäävän valmistuksen käyttö terveydenhuollon ja lääketieteen sovelluksissa. Tilannekatsaus 2016. Kuopio: Savonia ammattikorkeakoulu. ALVO-hanke. Viitattu 7.11.2020 [https://portal.savonia.fi/amk/sites/default/files/pdf/tki\\_ja\\_palvelut/julkaisut/alvoterveys.pdf](https://portal.savonia.fi/amk/sites/default/files/pdf/tki_ja_palvelut/julkaisut/alvoterveys.pdf)
- AMEXCI. Additive Manufacturing Excellence for Industry. Viitattu 8.1.2021 <https://amexci.com/>
- AMFG. 2018. How is 3D Printing Transforming the Defence Industry? Viitattu 13.9.2020 <https://amfg.ai/2018/06/19/how-3d-printing-is-transforming-the-defence-industry/>
- AMFG. 2019. Additive Manufacturing Around the World: What is the State of 3D Printing Adoption in North America and Europe? Viitattu 15.11.2020 <https://amfg.ai/2019/11/07/additive->

[manufacturing-around-the-world-what-is-the-state-of-3d-printing-adoption-in-north-america-and-europe/?cn-reloaded=1](#)

Anderson Goehrke, S. 2015. China's PLA Navy Deploys 3D Printers Onboard Warships to Replace Small Parts. Viitattu 28.12.2020 <https://3dprint.com/35981/china-pla-navy-3d-printing/>

Andersson, E. 2013. Additive Manufacturing in China: Aviation and Aerospace Applications (Part 2). SITC Bulletin Analysis. Viitattu 28.12.2020 [https://escholarship.org/content/qt7h12120m/qt7h12120m\\_noSplash\\_60896472d02af285dfccb90e89e26178.pdf](https://escholarship.org/content/qt7h12120m/qt7h12120m_noSplash_60896472d02af285dfccb90e89e26178.pdf)

Army Technology. 2020. 3D printing and defence: Leading militaries named. Viitattu 3.1.2021 <https://www.army-technology.com/comment/3d-printing-and-defence-leading-militaries-named/>

BAE Systems. 2020a. Developing 3D printing capability for the defence and aerospace sector. Viitattu 4.12.2020 <https://www.baesystems.com/en/article/developing-3d-printing-capability-for-the-defence-and-aerospace-sector>

BAE Systems. 2020b. Factory of the Future, Manufacturing in a digital age. Viitattu 4.12.2020 <https://www.baesystems.com/en/factory-of-the-future>

Basiliere, B. 2019. 3D Printing Accelerates, 4D Printing Gets Started. Viitattu 13.12.2020 <https://outlookseries.com/A0789/Services/3344.htm>

Boissonneault, T. 2019. U.S. military looks to boost use of additive manufacturing. Viitattu 13.10.2020 <https://www.3dprintingmedia.network/u-s-military-boost-adoption-additive-manufacturing/>

Boissonneault, T. 2020. nScript and taking bioprinting to the field. Viitattu 2.1.2021 <https://www.3dprintingmedia.network/bioprinting-today-series-nscript/>

Boling, R. 2019. 3D Printer for Human Tissue Now Available for Research Onboard the ISS National Laboratory. Viitattu 28.12.2020 <https://www.issnationallab.org/blog/3d-printer-for-human-tissue-now-available-for-research-onboard-the-iss-national-laboratory/>

Bournias-Varotsis, A. 2020a. Introduction to binder jetting 3D printing. 3D HUBS. Viitattu 22.8.2020 <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/>

Bournias-Varotsis, A. 2020b. Introduction to FDM 3D printing. Viitattu 28.8.2020 <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/#characteristics>

Bournias-Varotsis, A. 2020c. Introduction to material jetting 3D printing. 3D HUBS. Viitattu 27.8.2020 <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>

Breuer, H. 2018. Additive manufacturing: Better turbines thanks to 3D-printing. Viitattu 23.11.2020 <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2019/better-turbines-thanks-to-3d-printing.html>

Burton, S. 2019. 3D Printed Body Armor: An Upcoming Invention Of The U.S Army Research Laboratory. Viitattu 30.12.2019 <https://www.bodyarmornews.com/3d-printed-body-armor-an-upcoming-invention-of-the-u-s-army-research-laboratory/>

Cameron. 2019. US Army researching 3D printed ceramic body armor. Viitattu 30.12.2020 <https://www.3ders.org/articles/20190121-us-army-researching-3d-printed-ceramic-body-armor.html>

Chiarotti, C. G. 2020. Additive manufacturing policy. USA Department of Defence. Department of the navy. Washington. Viitattu 29.12.2020 <https://www.marines.mil/Portals/1/Publications/MCO%204700.4.pdf?ver=2020-04-13-100224-637>

Communications Department of TVEL JSC. 2020. ROSATOM launches its first Additive Technologies Center in Moscow. Viitattu 27.12.2020 <https://rosatom.ru/en/press-centre/news/rosatom-launches-its-first-additive-technologies-center-in-moscow/>

Connelly, A. 2020. 4D Bio3 Program Completes First 3D Bioprinting Test Experiment in Space. Viitattu 28.12.2020 [https://www.prweb.com/releases/4d\\_bio3\\_program\\_completes\\_first\\_3d\\_bioprinting\\_test\\_experiment\\_in\\_space/prweb17081424.htm](https://www.prweb.com/releases/4d_bio3_program_completes_first_3d_bioprinting_test_experiment_in_space/prweb17081424.htm)

CRP Meccanica. S.r.l. 2018. Development and construction of the Energica Ego motor housing. Viitattu 17.10.2020 <https://www.crpmeccanica.com/development-construction-energica-ego-motor-housing/>

CustomPartNet. 2020. Viitattu 28.8.2020 <http://www.custompartnet.com/>

Defence Contracts Online. 2019. How 3D printing is becoming a part of defence. Across many sectors, 3D printing is becoming a more integral way of manufacturing, and its influence is growing in the defence industry. Viitattu 3.1.2021 <https://www.contracts.mod.uk/do-features-and-articles/how-3d-printing-is-becoming-a-part-of-defence/>

Delray Systems. 2019. How 3D printing is revolutionizing the footwear industry. Viitattu 8.11.2020 <https://www.3d-printer.com/blog/how-3d-printing-is-revolutionizing-the-footwear-industry>

Delva Oy. 2020 Viitattu 25.9.2020 <https://www.delva.fi/fi/>

Den Boer, J., Lambrechts, W. ja Krikke, H. 2020. Additive manufacturing in military and humanitarian missions: Advantages and challenges in spare parts supply chain. Journal of Cleaner Production. 257. Viitattu 28.11.2020 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120301>

Digital Metal. 2019. DIGITAL METAL® DM P2500 Your fast track to high-quality 3D metal parts - esite. Höganäs AB. Viitattu 22.8.2020 <https://digitalmetal.tech/wp-content/uploads/2019/09/Additive-manufacturing.pdf>

DiManEx 2018. 3D Printing and Supply Chain Disruption: learnings from the Dutch Army and Dutch Railways. Viitattu 29.11.2020 <https://medium.com/dimanex-blog/3d-printing-and-supply-chain-disruption-learnings-from-the-dutch-army-and-dutch-railways-2d7537c6046a>

DIMECC. 2020. Uusi FAME-ekosysteemi kirii Suomen maailman kärkeen 3D-tulostuksessa. Viitattu 20.11.2020 <https://www.dimecc.com/uusi-fame-ekosysteemi-kirii-suomen-maailman-karkeen-3d-tulostuksessa/>

Dyson, M., Ghaffarzadeh, K. & and Collins, R. 2019. 3D Electronics 2020-2030: Technologies, Forecasts, Players. Viitattu 26.12.2020 <https://www.idtechex.com/en/research-report/3d-electronics-2020-2030-technologies-forecasts-players/769>

EnvisionTEC Inc. 3D Printing Materials, Advanced 3D Printing Materials For Medical, Professional And Industrial Needs. Viitattu 7.11.2020 <https://envisiontec.com/3d-printing-materials/hearing/>

EDA. 2019. Latest News: EDA's 3D-Printing project for Energetic Materials launched. Viitattu 4.12.2020 <https://www.eda.europa.eu/info-hub/press-centre/latest-news/2019/03/05/eda-s-3d-printing-project-for-energetic-materials-launched>

Eilert, L. Discover3Dprinting @ Formnext Connect 2020. Formnext seminaariesitys 12.11.2020.

EOS. Innovation stories. 3D printing applications 3D printed parts & examples produced with EOS additive manufacturing. Viitattu 25.10.2020 <https://www.eos.info/en/3d-printing-examples-applications/all-3d-printing-applications>

Equinor ASA. 2020. Viitattu 21.11.2020 <https://www.equinor.com/en/media-centre.html>

Essop, A. 2019. America Makes inks seven-year \$322M agreement with U.S. Air Force to advance additive manufacturing. Viitattu 29.12.2020 <https://3dprintingindustry.com/news/america-makes-inks-seven-year-322m-agreement-with-u-s-air-force-to-advance-additive-manufacturing-165871/>

Etteplan Oy. 2019. Etteplan onnistui upottamaan elektroniikkaa 3D-tulostettuun metallikappaleeseen. Lehdistöiedote 6.11.2019. Viitattu 12.10.2020 <https://www.etteplan.com/fi/tiedotteet/lapi-murto-etteplan-onnistui-upottamaan-elektroniikkaa-3d-tulostettuun-metallikappaleeseen>

Euroopan Komissio. Medical Devices – sector. Viitattu 25.10.2020 [https://ec.europa.eu/health/md\\_sector/overview\\_en](https://ec.europa.eu/health/md_sector/overview_en)

European Union. 2018. Additive Manufacturing. Viitattu 11.9.2020 [https://ec.europa.eu/research/industrial\\_technologies/pdf/additive\\_manufacturing\\_factsheet\\_2018.pdf](https://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/additive_manufacturing_factsheet_2018.pdf)

ExOne. What is binder jetting. Viitattu 22.8.2020 <https://www.exone.com/en-US/case-studies/what-is-binder-jetting>

Fabrisonic. Viitattu 28.8.2020 <https://fabrisonic.com/>

FDA. 2017. Technical Considerations for Additive Manufactured Medical Devices Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff. Viitattu 25.10.2020 <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/technical-considerations-additive-manufactured-medical-devices>

Fenn, J., Blosch, M. 2018. Understanding Gartner's Hype Cycles. Gartner Research. Viitattu 13.12.2020 <https://www.gartner.com/en/documents/3887767>

Ferrier, S. 2015. Titanium, 3D-printed prosthetic jaw implanted in Melbourne man in Australian first surgery. ABC News. Viitattu 25.10.2020 <https://www.abc.net.au/news/2015-06-20/melbourne-man-receives-titanium-3d-printed-prosthetic-jaw/6536788?nw=0>

FFI. 2019. Snart kan Forsvaret printe deler laget sitt. Viitattu 30.11.2020 <https://www.ffi.no/aktuelt/nyheter/snart-kan-forsvaret-printe-deler-laget-sitt>

Fieldmade. 2020. Future supply chains will be supported by digital warehouses and on-demand production on site, in- or near real time. Viitattu 21.11.2020 <https://fieldmade.no/>

Firpa ry. 2018. Suomen AM-laitteet. Viitattu 10.10.2020 [http://www.firpa.fi/AM\\_lista\\_viimeisin.pdf](http://www.firpa.fi/AM_lista_viimeisin.pdf)

Flathagen, J., Duun Norberg, C., Nilssen, J. R., Nonsvik, G. & Nordmoen, J. H. 2016. Additiv produksjon av prototyper og reservedeler i felt forsøk under Cold Response 2016. Forsvarets forskningsinstitutt (FFI). FFI-Raport 16/01008. Viitattu 30.11.2020 <https://publications.ffi.no/nb/item/asset/dspace:2607/16-01008.pdf>

FOI. 2019. 3D-teknik för tillverkning av detaljer i fält. Viitattu 3.1.2021 <https://www.foi.se/nyheter-och-press/nyheter/2019-09-03-3d-teknik-for-tillverkning-av-detaljer-i-falt.html?openExpander-With=Additive%2Cmanufacturing>

Fraunhofer-Gesellschaft. 2020. Viitattu 15.11.2020 <https://www.fraunhofer.de/en.html>

Fraunhofer IAPT. 2019. Additive mobile factory – one-stop solution. Esite.

GE Additive. 2018. New manufacturing milestone: 30000 additive fuel nozzles. Viitattu 31.10.2020 <https://www.ge.com/additive/stories/new-manufacturing-milestone-30000-additive-fuel-nozzles>

Global Railway Review. 2019. Trial of UK's first-ever in-service 3D printed train parts deployed. Global Railway Review. Viitattu 17.10.2020 <https://www.globalrailwayreview.com/news/89635/uk-3d-train-parts-chiltern-railways/>

González, D. S. & González Álvarez A. 2018. Additive manufacturing feasibility study & technology demonstration. EDA AM State of the Art & Strategic Report. Viitattu 28.11.2020 [https://eda.europa.eu/docs/default-source/projects/eda-am-study-and-strategic-report\\_v6.pdf](https://eda.europa.eu/docs/default-source/projects/eda-am-study-and-strategic-report_v6.pdf)

Gregurić, L. 2019. What is material jetting – 3D printing simply explained. Viitattu 24.7.2020 <https://all3dp.com/2/what-is-material-jetting-3d-printing-simply-explained/>

Hanaphy, P. 2020. Russian state successfully flight tests 3D printed gas turbine engine. Viitattu 1.1.2021 <https://3dprintingindustry.com/news/russian-state-successfully-flight-tests-3d-printed-gas-turbine-engine-174150/>

Hahn, J. 2020. 3D printers fabricate emergency valves for ventilators to keep coronavirus patients breathing. Viitattu 8.11.2020 <https://www.dezeen.com/2020/03/19/3d-printers-valve-ventilators-hospital-coronavirus/>

Harju, K. 2018. Työkaluja tarkkuustöinä 3D-metallitulostamalla. Konekuriiri 9/2018. Viitattu 12.10.2020 <https://www.vossi.fi/asiakas/v-a-v-group-oy/>

Hetitec Oy. 2020. Viitattu 25.9.2020 <https://hetitec.com/>

Hook-Barnard, I., Posey Norris, S. & Alper, J. editors. 2013. Technology Readiness Levels in the Department of Defense. Technologies to Enable Autonomous Detection for BioWatch: Ensuring Timely and Accurate Information for Public Health Officials: Workshop Summary. Viitattu 13.9.2020 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK201356/>

Horizon 2020. 2014. Horizon 2020 – work programme 2014–2015 General Annexes. G. Technology readiness levels (TRL). Commission Decision C(2014)4995. Viitattu 6.9.2020 [https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014\\_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf)

HT-Laser Oy. 2020. Viitattu 25.9.2020 <https://htlaser.fi/palvelut/>

Hybrid Manufacturing Technologies. Industrial 3D printing for CNCs by Hybrid Manufacturing Technologies. YouTube video. Viitattu 22.8.2020 <http://www.hybridmanutech.com/#>

Hyperion Robotics. 2020. Concrete 3D printing Viitattu 22.10.2020 <https://www.hyperionrobotics.com/>

Hämeenaho, T., Tölander, H., Nordenberg, E., Komi, E., Rytönen, I & Karjalainen, J. 2019 Additive manufacturing center of excellence (AMCE) – Feasibility study. Business Finland. Viitattu 14.9.2020 <https://www.businessfinland.fi/4ada70/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/digitalization/hx-fighter-program/am-center-feasibility-study-2019-nov.pdf>

ILH Staff. 2020. Bayer, Tel Aviv University partner to test drugs on 3D-printed human heart tissues. Israel Hayom. Viitattu 17.10.2020 <https://www.israelhayom.com/2020/07/09/bayer-tel-aviv-university-test-drugs-on-3d-printed-hearts/>

Isinnova s.r.l. 2020. EASY COVID19 Emergency mask for hospital ventilators. Viitattu 20.11.2020 <https://www.isinnova.it/easy-covid19-eng/>

ISO 16290:2013. Space systems — Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment. Viitattu 6.9.2020 <https://www.iso.org/standard/56064.html>

ITA. International Trade Administration. 2020. Japan Additive Manufacturing and 3D Printing. Viitattu 22.11.2020 <https://www.trade.gov/market-intelligence/japan-additive-manufacturing-and-3d-printing>

Itä-Suomen yliopisto. Lääkevalmisteiden 3D-tulostaminen. Itä-Suomen yliopisto: Farmasian teknologia. Viitattu 11.10.2020 <https://www3.uef.fi/fi/web/farmasia-laakevalmistusprosessi/laakevalmisteiden-3d-tulostaminen>



Jackson, B. 2018. Deadline for consultation on U.S. export control approaches with potential ramifications for 3D printing. 3D Printing Industry. Viitattu 6.12.2020 <https://3dprintingindustry.com/news/deadline-for-consultation-on-u-s-export-control-approaches-with-potential-ramifications-for-3d-printing-144450/>

Jackson, B. 2019. 3D printing industry responds to proposed extension of BIS U.S. export controls. 3D Printing Industry. Viitattu 6.12.2020 <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-industry-responds-u-s-export-controls-150881/>

Jackson, T. 2017. Navy Partnership Goes to New Depths with First 3D-Printed Submersible. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Viitattu 25.8.2020 <https://www.energy.gov/eere/articles/navy-partnership-goes-new-depths-first-3d-printed-submersible>

J'son & Partners Consulting. 2019. The 3D printing market in Russia and in the world in 2018. Viitattu 14.8.2020 [https://json.tv/en/ict\\_telecom\\_analytics\\_view/the-3d-printing-market-in-russia-and-in-the-world-in-2018-additive-manufacturing-am](https://json.tv/en/ict_telecom_analytics_view/the-3d-printing-market-in-russia-and-in-the-world-in-2018-additive-manufacturing-am)

Karevska, S., Steinberg, G., Müller, A., Winken, R., Kilger, C., Krauss, D. 2019. 3D printing: hype or game changer? A Global EY Report 2019. Viitattu 12.9.2020 [https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/en\\_gl/topics/advisory/ey-3d-printing-game-changer.pdf](https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/en_gl/topics/advisory/ey-3d-printing-game-changer.pdf)

Karlskoga kommun. 2020. Karlskogas expansiva näringsliv. Viitattu 6.1.2021 <https://www.karlskoga.se/Naringsliv--arbete/Karlskogas-expansiva-naringsliv.html>

Karlsson, M. & Magnusson, A. 2020. Wire and Arc Additive Manufacturing Pre printing strategy for torque arm. Degree project. Mechanical Engineering, master's level. Department of Engineering Sciences and Mathematics. Luulaja: Luleå University of Technology Viitattu 6.1.2021 <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1435037/FULLTEXT01.pdf>

Keränen, T. 2020. Vain tieteiselokuvissa biotulostetaan toimivia elimiä. Lääkärilehti 12/2020. Viitattu 11.10.2020 <https://www.laakarilehti.fi/ajassa/ajankohtaista/vain-tieteiselokuvissa-biotulostetaan-toimivia-elimia/>

Koivisto, H. 2019. 3D-tulostaminen käytännön kokemuksia. Lillbacka Powerco Oy. Viitattu 11.10.2020 [https://www.merinova.fi/wp-content/uploads/2019/11/3D-TULOSTUS-Vaasa-26\\_11\\_2019-Lillbacka-Power-Heikki-Koivisto.pdf](https://www.merinova.fi/wp-content/uploads/2019/11/3D-TULOSTUS-Vaasa-26_11_2019-Lillbacka-Power-Heikki-Koivisto.pdf)

Korpela, M., Riikonen, N., Piili, H., Salminen, A. & Nyrhilä, O. 2020. Additive Manufacturing—Past, Present, and the Future. In: Collan M., Michelsen KE. (eds) Technical, Economic and Societal Effects of Manufacturing 4.0. Palgrave Macmillan, Cham. Viitattu 15.12.2020 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-46103-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-46103-4_2)

Lahti, A. 2017. 3D –hanke Pirkanmaalta valittiin viiden parhaan joukkoon Euroopan komission kilpailussa. Viitattu 14.9.2020 <https://www.pirkanmaa.fi/blog/2017/10/12/3d-hanke-pirkanmaalta-valittiin-viiden-parhaan-joukkoon-euroopan-komission-kilpailussa/>

Leino, R. 2020. Osaaminen houkutteli GE:n Saksaan. Metallitekniikka 2/2020. Viitattu 23.11.2020

Lentoposti.fi. 2018. Patrian 3D-tulostettu osa lensi ensimmäisen kerran Ilmavoimien Hornetiin asennettuna. Viitattu 27.12.2020 [http://www.lentoposti.fi/uutiset/patrian\\_3d\\_tulostettu\\_osa\\_lensi\\_ensimm\\_isen\\_kerran\\_ilmavoimien\\_hornetiin\\_asennettuna](http://www.lentoposti.fi/uutiset/patrian_3d_tulostettu_osa_lensi_ensimm_isen_kerran_ilmavoimien_hornetiin_asennettuna)

Linturi, R. & Kuusi, O. 2018. Suomen sata uutta mahdollisuutta 2018–2037 Yhteiskunnan toimintamallit uudistava radikaali teknologia. Eduskunnan tulevaisuusvaliokunnan julkaisu 1/2018 Helsinki: Tulevaisuusvaliokunta. Viitattu 5.1.2021 [https://www.eduskunta.fi/FI/naineduskuntatoumii/julkaisut/Documents/tuvj\\_1+2018.pdf](https://www.eduskunta.fi/FI/naineduskuntatoumii/julkaisut/Documents/tuvj_1+2018.pdf)

Listek, V. 2019. Boeing Creates the First 3D Printed Metal Satellite Antenna, Saves on Mass, Time, and Costs. 3DPrint.com. Viitattu 1.11.2020 <https://3dprint.com/239651/boeing-creates-the-first-3d-printed-metal-satellite-antenna-saves-on-mass-time-and-costs/>

Lopez Vicente, P. 2017. Additive manufacturing in defence. European Defence Matters. A Magazine of European Defence Agency. 2017 issue 14. Viitattu 19.9.2020 [https://eda.europa.eu/docs/default-source/eda-magazine/edm-issue-14\\_web.pdf](https://eda.europa.eu/docs/default-source/eda-magazine/edm-issue-14_web.pdf)

Loughborough University. About Additive Manufacturing. VAT Photopolymerization. Viitattu 24.7.2020 <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>

Lovelace Jr., C. 2020. Army, FDA discuss 3D printing at workshop. Viitattu 29.12.2020 <https://health.mil/News/Articles/2020/01/21/Army-FDA-discuss-3D-printing-at-workshop>

Majumdar, D. 2016. Russia's Radical Battlefield Plan: 3D Printing for tanks. Viitattu 1.1.2021 <https://nationalinterest.org/blog/the-buzz/russias-radical-battlefield-plan-3d-printing-tanks-15158>

Maker3D Oy. 2020. Viitattu 25.9.2020 <http://www.maker3d.fi/>

Mark, T. 2019. Tel Aviv University Researchers 3D-print a human heart. BioSpace. Viitattu 17.10.2020 <https://www.biospace.com/article/tel-aviv-university-researchers-3d-print-a-human-heart/>

Markforged. How Wärtsilä Created the First CE-Certified Lifting Tool. Viitattu 12.10.2020 <http://static.markforged.com/downloads/WartsilaCaseStudy.pdf>

Materflow Oy. 2020. Viitattu 25.9.2020 <https://www.materflow.com>

McCarthy, R. D. 2019. Army Directive 2019–29 (Enabling Readiness and Modernization Through Advanced Manufacturing). USA Department of Defense. Secretary of the Army. Washington. Viitattu 29.12.2020 [https://armypubs.army.mil/epubs/DR\\_pubs/DR\\_a/pdf/web/ARN19451\\_AD2019-29\\_Web\\_Final.pdf](https://armypubs.army.mil/epubs/DR_pubs/DR_a/pdf/web/ARN19451_AD2019-29_Web_Final.pdf)

Metal AM. 2015. The current status and outlook for metal Additive Manufacturing in Japan. Viitattu 22.11.2020 <https://www.metal-am.com/articles/the-current-status-and-outlook-for-metal-additive-manufacturing-in-japan/>

Metal Technology Co. Ltd. Additive Manufacturing. Viitattu 22.11.2020 [https://www.kinzoku.co.jp/en/core\\_technology/additive\\_manufacturing.html](https://www.kinzoku.co.jp/en/core_technology/additive_manufacturing.html)

Metsä-Kortelainen, S., Reijonen, J., Riipinen, T., Vaajoki, A., Puukko, P., Salmi, M., Chekurov, S., Kretzchmar, N., Akmal, J., Puttonen, T. & Partanen, J. (authors). 2020. New business from digital spare parts (DIVALIITO). Teknologian tutkimuskeskus VTT ja Aalto-Yliopisto yhteisjulkaisu. Viitattu 21.12.2020 [https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2020/New\\_business\\_from\\_digital\\_spare\\_parts.pdf](https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2020/New_business_from_digital_spare_parts.pdf)

Ministerie van Defensie. 2017. Zien is geloven. Pysätyskuva videosta. Viitattu 29.11.2020 <https://magazines.defensie.nl/materieelgezien/2017/03/mg2017033d-printer>

Ministry of Defence of the Russian Federation. 2020. Experts of the Russian Defence Ministry will discuss the experience of implementing 3D technologies for creating new weapons at the "ARMY-2020" forum. Viitattu 1.1.2021 [https://eng.mil.ru/en/news\\_page/country/more.htm?id=12298943@egNews](https://eng.mil.ru/en/news_page/country/more.htm?id=12298943@egNews)

MMAM. Multicomponent Materials Centre of Expertise for Additive Manufacturing (MMAM). Viitattu 4.2.2021 <https://mmam.turkuamk.fi/>

Montero, J., Weber, S., Bleckmann, M., Atzberger, A., Wirths, L. & Paetzold, K. 2019. Spare part production in remote locations through Additive Manufacturing enhanced by agile development principles. IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC). Valbonne Sophia-Antipolis, France. Viitattu 25.9.2020

[https://www.researchgate.net/publication/333943725\\_Spare\\_part\\_production\\_in\\_remote\\_locations\\_through\\_Additive\\_Manufacturing\\_enhanced\\_by\\_agile\\_development\\_principles/link/5d0df67e299bf1547c741678/download](https://www.researchgate.net/publication/333943725_Spare_part_production_in_remote_locations_through_Additive_Manufacturing_enhanced_by_agile_development_principles/link/5d0df67e299bf1547c741678/download)

Nanoscribe. A wide range of applications in research, prototyping and production processes. Viitattu 28.8.2020 <https://www.nanoscribe.com/en/applications>

Neles Oyj. Viitattu 20.11.2020 <https://www.neles.com/fi/yritys/>

O'Neal, B. 2020. 3D Printed Car Manufacturer XEV Boasts 30,000 Orders. 3DPrint.com. Viitattu 7.11.2020 <https://3dprint.com/268440/china-italys-3d-printed-car-manufacturer-xev-continues-strengthen-ties/>

OssDsign AB. Bringing life to cranioplasty. Viitattu 15.11.2020 <https://www.ossdsign.com/home>

Ossis Ltd. Products. Viitattu 24.10.2020 <https://www.ossis.com/products>

Petch, M. 2020a. 100 3D printing experts predict the future of 3D printing in 2030. Viitattu 21.12.2020 <https://3dprintingindustry.com/news/100-3d-printing-experts-predict-the-future-of-3d-printing-in-2030-167623/>

Petch, M. 2020b. UK defence agency plans to 3D print high explosives. 3D Printing Industry. Viitattu 4.12.2020 <https://3dprintingindustry.com/news/uk-defence-agency-plans-to-3d-print-high-explosives-169082/>

Piili, H., Salminen, A., Korpela, M., Kurvinen, A., Pikkarainen, A., Riikonen, N., Heiskanen, A. & Westman, S. 2019. Lähtökohdat 3D-tulostuksen opetukseen ja koulutukseen. Raportit ja selvitykset. Lappeenranta: Lappeenrannan-Lahden teknillinen Yliopisto. Viitattu 27.9.2020 <https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159972/L%3c3%a4ht%3c3%b6kohdat%203D-tulostuksen%20opetukseen%20ja%20koulutukseen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Planmeca Oy. Planmeca Creo® C5 Huippuluokan 3D-tulostin hammashoidon ammattilaisille. Viitattu 20.11.2020 <https://www.planmeca.com/fi/cadcam/3d-tulostus1/3d-tulostin/>

Plastmode Oy. 2020. Viitattu 25.9.2020 <https://plastmode.fi/>

Prenta Oy. Prenta Duo XL SE 3D-tulostin. Viitattu 25.8.2020 <https://www.prenta.fi/palvelut/3d-tulostin/prenta-duo-xl-se/>

Protohouse Finland Oy. 2020 Viitattu 25.9.2020 <https://protohouse.fi/>

Puolustusministeriö. Euroopan unionin virastot turvallisuus- ja puolustuspolitiikan alalla. Viitattu 30.11.2020 [https://www.defmin.fi/vastualueet/kansainvalinen\\_puolustusyhteistyö/eu-yhteistyö/euroopan\\_unionin\\_virastot\\_turvallisuus- ja\\_puolustuspolitiikan\\_alalla#1862ff53](https://www.defmin.fi/vastualueet/kansainvalinen_puolustusyhteistyö/eu-yhteistyö/euroopan_unionin_virastot_turvallisuus- ja_puolustuspolitiikan_alalla#1862ff53)

Pääesikunta, materiaaliosasto. 2012. Puolustusvoimien teknologiastrategia 2012. Viitattu 9.10.2020 <https://puolustusvoimat.fi/documents/1948673/2267766/PEVIESTOS-Puolustusvoimien-teknologiastrategia-2012.pdf/4a4eea82-fc77-4ae3-aed7-f81ee532a2e1/PEVIESTOS-Puolustusvoimien-teknologiastrategia-2012.pdf>

Quintus Technologies AB. 2020. Quintus Technologies, World leader in high pressure technology. Viitattu 15.11.2020 <https://quintustechnologies.com/>

Rady Children's Hospital. Rady children's provides innovative health solutions with hp multi jet fusion. Viitattu 28.8.2020 <https://enable.hp.com/us-en-3dprint-cs-rady-children>

Rayo 3D-Toothfill Oy. Viitattu 12.10.2020 <https://rayo3d.fi/fi/>

Reding, D. F. & Eaton, J. 2020. Science & Technology Trends 2020-2040. Exploring the S&T Edge. Bryssel: NATO Science & Technology Organization. Viitattu 3.1.2021

[https://www.nato.int/nato\\_static\\_fl2014/assets/pdf/2020/4/pdf/190422-ST\\_Tech\\_Trends\\_Report\\_2020-2040.pdf](https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2020/4/pdf/190422-ST_Tech_Trends_Report_2020-2040.pdf)

Redwood, B. Additive manufacturing technologies: An overview. Viitattu 2.8.2020 <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/>

Renishaw plc. Viitattu 18.10.2020 <https://resources.renishaw.com/en/details/conformal-cooling--77990>

Renishaw plc. 2001–2020. Viitattu 15.11.2020 [https://www.renishaw.com/en/renishaw-enhancing-efficiency-in-manufacturing-and-healthcare--45346?utm\\_expid=.1bs9dms-BTVCDshRo2EAK8A.1&utm\\_refer=https%3A%2F%2Fwww.renishaw.com%2Fen%2Frenishaw-dental-studio--24222](https://www.renishaw.com/en/renishaw-enhancing-efficiency-in-manufacturing-and-healthcare--45346?utm_expid=.1bs9dms-BTVCDshRo2EAK8A.1&utm_refer=https%3A%2F%2Fwww.renishaw.com%2Fen%2Frenishaw-dental-studio--24222)

Report No. DODIG-2020-003. 2019. Audit of the DoD's Use of Additive Manufacturing for Sustainment Parts. Viitattu 29.12.2020 <https://media.defense.gov/2019/Oct/21/2002197659/-1/-1/1/DODIG-2020-003.PDF>

Ristinen, T. 2010. Expert Elicitation in Technology Readiness Assessment. Diplomityö. Elektrooniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta. Espoo: Aalto-yliopisto, Teknillinen korkeakoulu. Viitattu 6.9.2020 <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/3329/urn100340.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ritter, S. 2019a. AM field guide Compact. Formnext 2019. Viitattu 24.7.2020 <https://formnext.mesago.com/frankfurt/de/themen-events/am-field-guide/downloads.html>

Ritter, S. 2019b. Formnext AM field guide 2019. Frankfurt am Main: Messago Messe Frankfurt GmbH

Rosatom Additive Technologies. 2020. State Integrated Industry Integrator Rosatom in the direction of Additive Technologies Viitattu 27.12.2020 <http://rusatom-additive.ru/en/rusatom/>

Salmi, M., Partanen, J., Tuomi, J., Chekurov, S., Björkstrand, R., Huotilainen, E., Kukko, K., Kretschmar, N., Akmal, J., Jalava, K., Koivisto, S., Vartiainen, M., Metsä-Kortelainen, S., Puukko, P., Jussila, A., Riipinen, T., Reijonen, J., Tanner, H. & Mikkola, M. 2018. Digitaaliset varaosat. Aalto-yliopiston ja Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n yhteisjulkaisu. Viitattu 12.10.2020 [https://www.researchgate.net/publication/323556708\\_Digitaaliset\\_varaosat/link/5a9d44dd0f7e9be37968af44/download](https://www.researchgate.net/publication/323556708_Digitaaliset_varaosat/link/5a9d44dd0f7e9be37968af44/download)

Salon Metalelektro Oy. 2020. Viitattu 27.9.2020 <https://www.smegroup.fi/>

Sandvik. 2020. Additive by Sandvik. Viitattu 14.11.2020 <https://www.additive.sandvik/en/>

Saunders, S. 2018. Live Demonstration of ACES Concrete 3D Printing Technology at CERL to 3D Print Barracks: Part 3. Viitattu 28.12.2020 <https://3dprint.com/221508/aces-concrete-3d-print-barracks/>

Savonia. 3D-tulostusympäristön investointi- ja kehityshanke 1.10.2018-31.3.2021. Savonia ammattikorkeakoulu. Viitattu 10.10.2020 <https://3dtulostus.savonia.fi/fi/>

SCM. Supply Chain Movement. 2018. Dutch Army starts cooperation with Dimanex to solve spare part supply challenges. Digital Magazine. Viitattu 29.11.2020 <https://www.supplychainmovement.com/dutch-army-starts-cooperation-with-dimanex-to-solve-spare-part-supply-challenges/>

SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. Julk. 24.2.2017. Viitattu 24.7.2020 <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/5/480362.html.stx> SFS Online.

Scott, C. 2018. Metso Delivers Valves with Metal 3D Printed Parts. Viitattu 20.11.2020 <https://3dprint.com/232211/metso-delivers-valves-with-3d-printed-parts/>

- Sher, D. 2019a. Russian Helicopters to start additive manufacturing of parts in 2020. Viitattu 1.1.2021 <https://www.3dprintingmedia.network/russian-helicopters-to-start-additive-manufacturing-of-parts-in-2020/>
- Sher, D. 2019b. US Marines 3D print concrete structure using a three-inch nozzle. 3D Printing Media Network. Additive Manufacturing. Viitattu 28.12.2020 <https://www.3dprintingmedia.network/us-marines-3d-print/>
- Sher, D. 2020a. How major automakers use AM for production today, part 1–8: Jaguar Land Rover additive manufacturing. 3D Printing Media Network. Additive Manufacturing. Viitattu 7.11.2020 <https://www.3dprintingmedia.network/jaguar-land-rover-additive-manufacturing/>
- Sher, D. 2020b. Wärtsilä WHAM prepares to 3D print critical engine parts. 3D Printing Media Network. Additive Manufacturing. Viitattu 27.12.2020 <https://www.3dprintingmedia.network/wartsila-wham-prepares-to-3d-print-critical-engine-parts/>
- Siemens Energy. 2018. Milestone Alert. Siemens Energy Twitter. Viitattu 23.11.2020 [https://twitter.com/siemens\\_energy/status/1044528224838045696](https://twitter.com/siemens_energy/status/1044528224838045696)
- Simic, E. 2018. Additive manufacturing for field repair and maintenance of the assault rifle AK5C – a feasibility study. Tutkielma. Teknisk fysik med materialvetenskap. Uppsala: Uppsala Universitet. Viitattu 3.1.2021 <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1283627/FULLTEXT01.pdf>
- SLM Solutions. 2020. The NXG XII 600. Viitattu 5.2.2021 <https://www.slm-pushing-the-limits.com/specs>
- Sonova. 2020. 3D printing technology for improved hearing. Viitattu 7.11.2020 <https://www.sonova.com/en/story/innovation/3d-printing-technology-improved-hearing>
- SPEE3D. 2020. Australian Army Proves Metal 3D Printing can Strengthen Sovereign Capability. Viitattu 2.1.2021 <https://spee3d.com/australian-army-proves-metal-3d-printing-can-strengthen-sovereign-capability/>
- Swerim AB. Swedish Arena for Additive Manufacturing of Metals. Viitattu 14.11.2020 <https://www.swerim.se/en/collaboration/networks/swedish-arena-for-additive-manufacturing-of-metals>
- Talliniemi, C. 2016. Puolustusvoimien puolustus- ja turvallisuushankinnat – soveltamisohje. Luku 6. Tutkimusta ja kehittämistä koskevat hankinnat.
- Terry, M. 2019. Tel Aviv University Researchers 3D-Print a Human Heart. Viitattu 4.2.2021 <https://www.biospace.com/article/tel-aviv-university-researchers-3d-print-a-human-heart/>
- Tervola, J. 2020. Työvälineitä ilman jonotusta. Metallitekniikka 2/2020. Viitattu 23.11.2020
- The Additive Report. 2018. Fabrication, additive manufacturing companies produce part for 787 airliner. Viitattu 22.8.2020 <https://www.thefabricator.com/additivereport/news/additive/fabrication-additive-manufacturing-companies-produce-part-for-787-airliner>
- Thorvaldsen, T., Olsen, T. & Johnsen, B. B. 2018. Characterization of in-field additively manufactured polymer composites – hot and dusty environment. FFI-raport 18/00586. Viitattu 30.11.2020 <https://www.ffi.no/en/publications-archive/characterization-of-in-field-additively-manufactured-polymer-composites-hot-and-dusty-environment>
- TWI Ltd. What are technology readiness levels (TRL)? Viitattu 6.9.2020 <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/technology-readiness-levels>
- UPM Formi. Large scale additive manufacturing. UPM biocomposites. Viitattu 21.10.2020 <https://www.upmformi.com/biocomposite-products/3d-printing/large-scale-additive-manufacturing/>

- Uppsala Universitet. 2020. Master's Programme in Additive Manufacturing 2021/2022. Viitattu 14.11.2020 <https://www.uu.se/en/admissions/master/selma/program/?pKod=TAT2M>
- Uusipaavalniemi, S. 2016. Toimitusketjun hallinnan trendeistä. Puolustusvoimien tutkimuslaitos. Tutkimuskatsaus 01–2016. Viitattu 22.11.2020 [https://puolustusvoimat.fi/documents/1948673/2015525/PVTUTKL+Tutkimuskatsaus+toimitusketjun+hallinnan+trendeista\\_internet.pdf/60fe6d3e-6c87-4fa9-82ef-b0f8b3b36741](https://puolustusvoimat.fi/documents/1948673/2015525/PVTUTKL+Tutkimuskatsaus+toimitusketjun+hallinnan+trendeista_internet.pdf/60fe6d3e-6c87-4fa9-82ef-b0f8b3b36741)
- Uusiteknologia.fi. 2020. 3D-tulostuksella parempia sähkömoottoreita. Viitattu 6.12.2020 <https://www.uusiteknologia.fi/2020/12/01/3d-tulostuksella-parempia-sahkomoottoreita/>
- Vaajoki, A. & Metsä-Kortelainen, S. 2016. AM-prosessin integrointi tuotantoon – metalliosien valmistuksen työvaiheet. Raportti VTT-R-03327-16. Viitattu 24.7.2020 <https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2016/VTT-R-03327-16.pdf>
- Valdivieso, C. 2019a. How are different industries adopting additive manufacturing? Viitattu 19.9.2020 <https://www.3dnatives.com/en/industries-additive-manufacturing-120820195/>
- Valdivieso, C. 2019b. AM serial production is taking off according to new study by EY. Viitattu 4.10.2020 <https://www.3dnatives.com/en/am-serial-production-study-ey-161020194/>
- Valdivieso, C. 2019c. Gartner Hype Cycle 2019: 3D Printing Predictions. Viitattu 13.12.2020 <https://www.3dnatives.com/en/gartner-hype-cycle-3dprintingpredictions-150120194/#!>
- Valdivieso, C. 2020. Equinor brings critical 3D printed part to offshore location with a drone. Viitattu 21.11.2020 <https://www.3dnatives.com/en/equinor-brings-critical-3d-printed-part-to-offshore-location-with-a-drone-080920204/#!>
- Valluri, A. 2019. Surgical guides. Viitattu 18.10.2020 <https://www.think3d.in/3d-printed-surgical-guides/>
- Valmet. 2016. Valmet to adopt 3D printing technology in it's manufacturing processes. Lehdistötiedote 30.10.2016. Viitattu 11.10.2020 <https://www.valmet.com/media/news/press-releases/2016/valmet-to-adopt-3d-printing-technology-in-its-manufacturing-processes/>
- Van Lingen, J. 2017. Processing of Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Viitattu 30.11.2020 <https://www.tno.nl/en/focus-areas/defence-safety-security/roadmaps/protection-munitions-weapons/processing-of-propellants-explosives-and-pyrotechnics/>
- Van Lingen, J. 2020. Innovation of TNO on Additive manufacturing of energetic materials copied by Chinese researchers. Viitattu 30.11.2020 <https://www.linkedin.com/pulse/innovation-tno-additive-manufacturing-energetic-joost-van-lingen/?trackingId=ZTAul52JmOGI9PhIayIE0g%3D%3D>
- Vialva, T. 2019. UCLA granted \$1.5 million to develop eco-friendly 3D printable concrete. 3D Printing Industry. Viitattu 21.10.2020 <https://3dprintingindustry.com/news/ucla-granted-1-5-million-to-develop-eco-friendly-3d-printable-concrete-160409/>
- Vialva, T. 2020. Additive manufacturing at scale with the largest U.S. 3D printing facilities. Viitattu 28.12.2020 <https://3dprintingindustry.com/news/additive-manufacturing-at-scale-with-the-largest-u-s-3d-printing-facilities-167588/>
- VornDick, W. 2018. An Instant PLA: Just Add 3D Printing. China Brief Volume: 18 Issue: 17. Viitattu 28.12.2020 <https://jamestown.org/program/an-instant-pla-just-add-3d-printing/>
- Vossi, M. 2020. Asiakkaidemme menestystarinoita. Viitattu 11.10.2020 <https://www.vossi.fi/asiakkaat/>
- Välimaa, M. 2020. Prototyyppien pikavalmistus tuotekehityksessä. Diplomityö. Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta. Tampere: Tampereen yliopisto. Viitattu 18.10.2020

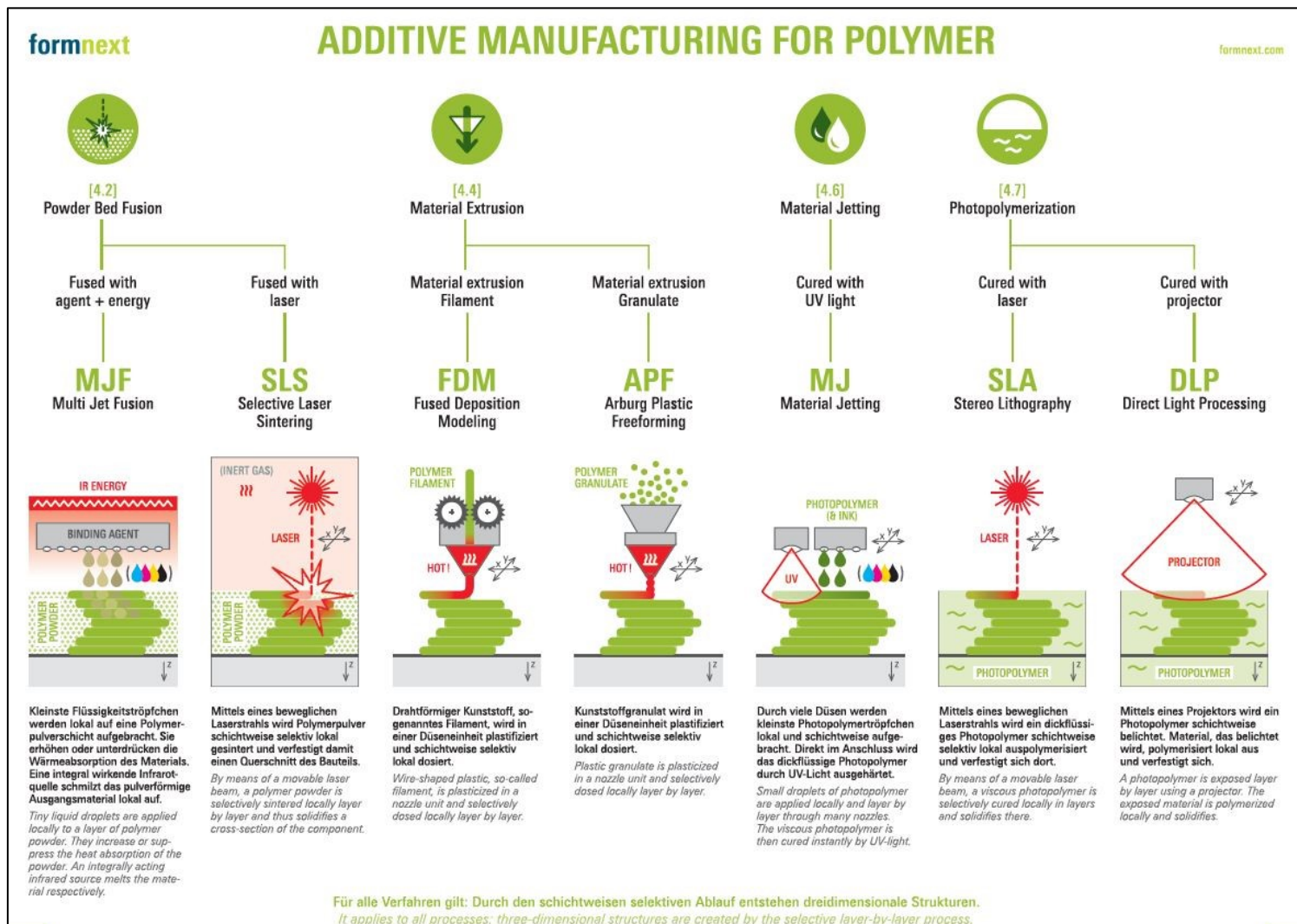
<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/120465/V%C3%A4limaaMatti.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Winsun. 2020. Yingchuang Building Technique. (Shanghai) Co. Ltd. (WinSun). Viitattu 21.10.2020 <http://www.winsun3d.com/En/>

Wohlers Associates, Inc. 2019. Wohlers report 2019 3D printing and additive manufacturing global state of the industry. ISBN 978-0-9913332-5-7. Colorado. USA.

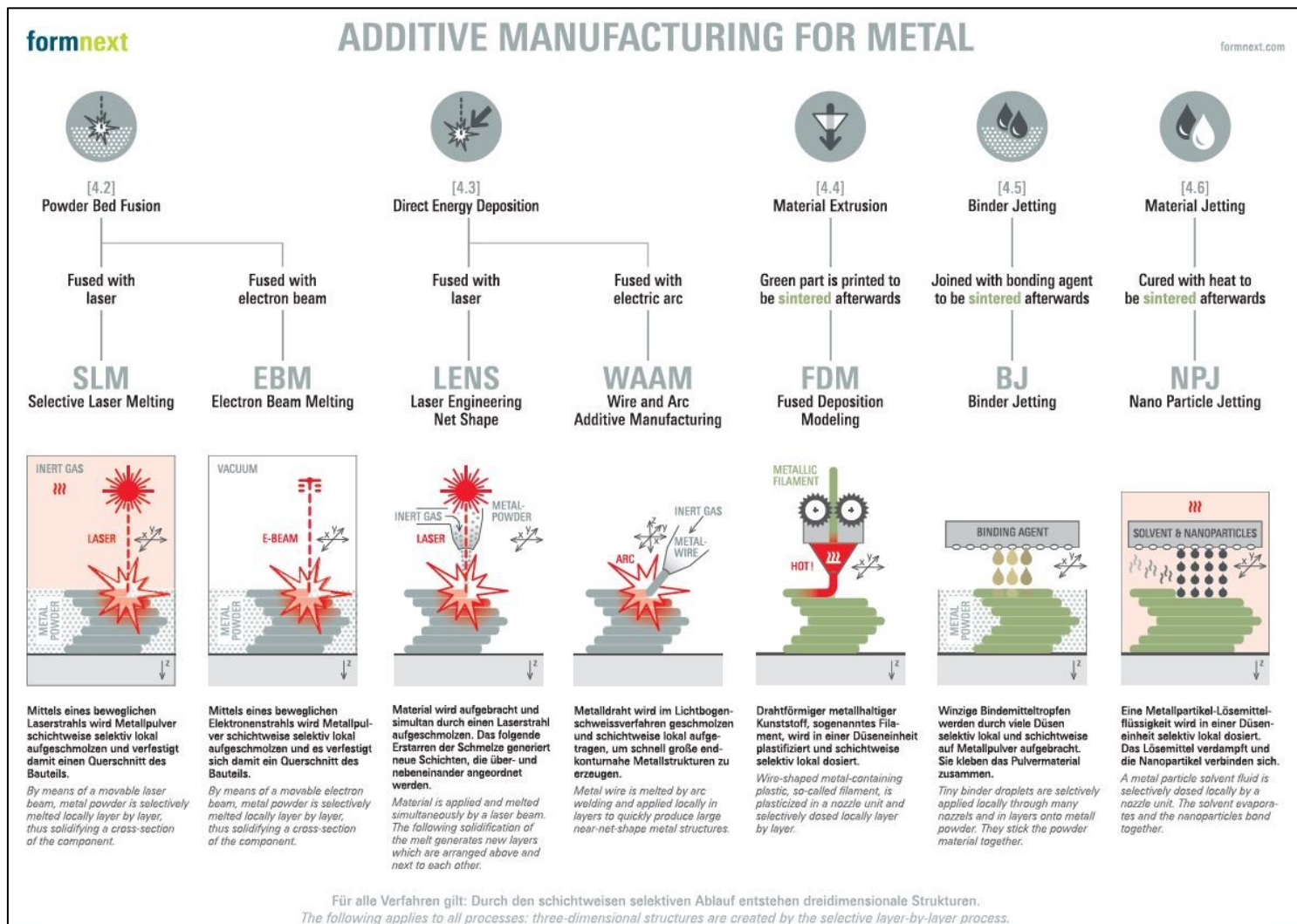
Wohlers Associates, Inc. 2020. Wohlers report 2020 3D printing and additive manufacturing global state of the industry. ISBN 978-0-9913332-6-4. Colorado. USA.

# Polymeerien materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät (Ritter 2019b)

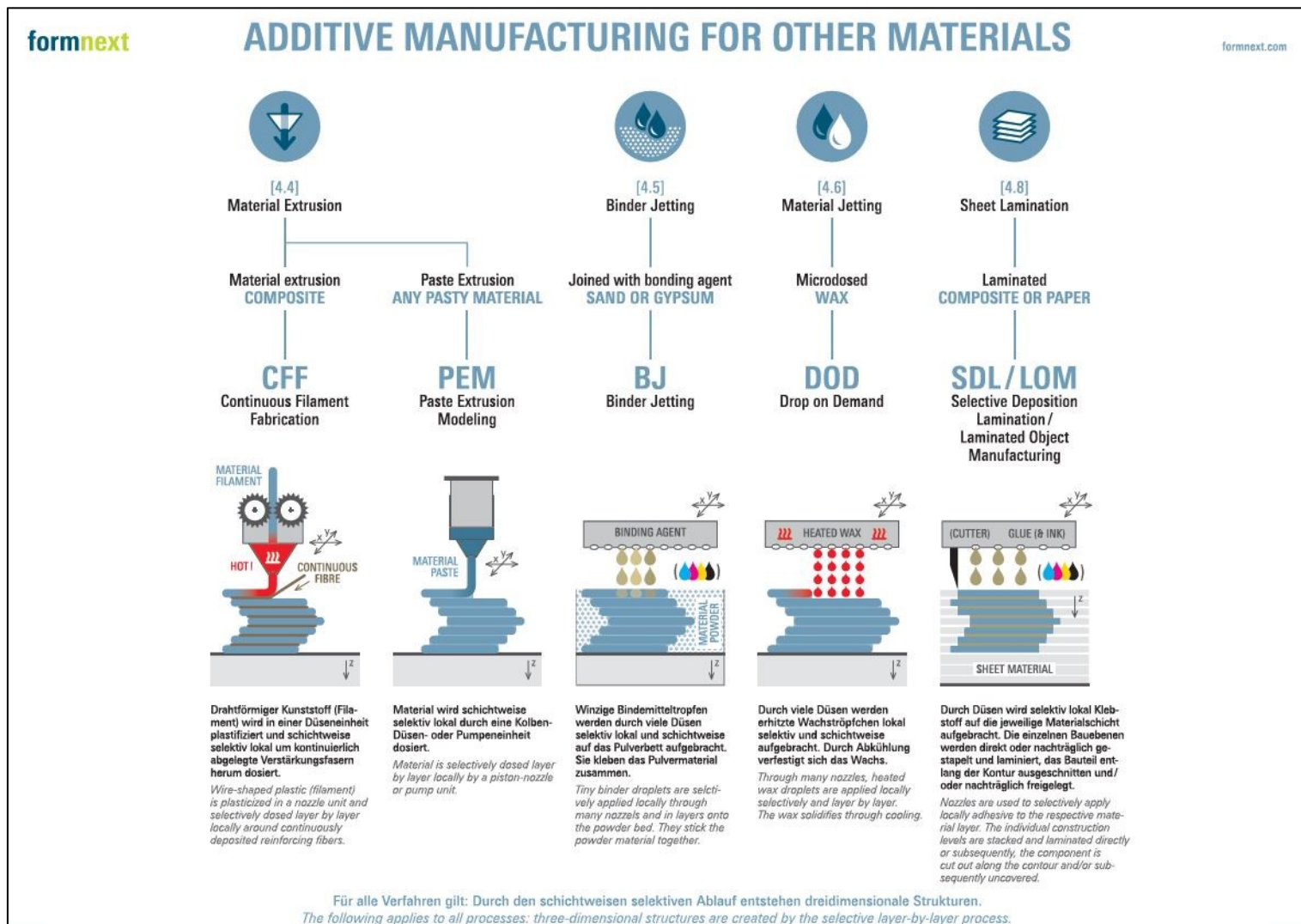




# Metallien materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät (Ritter 2019b)



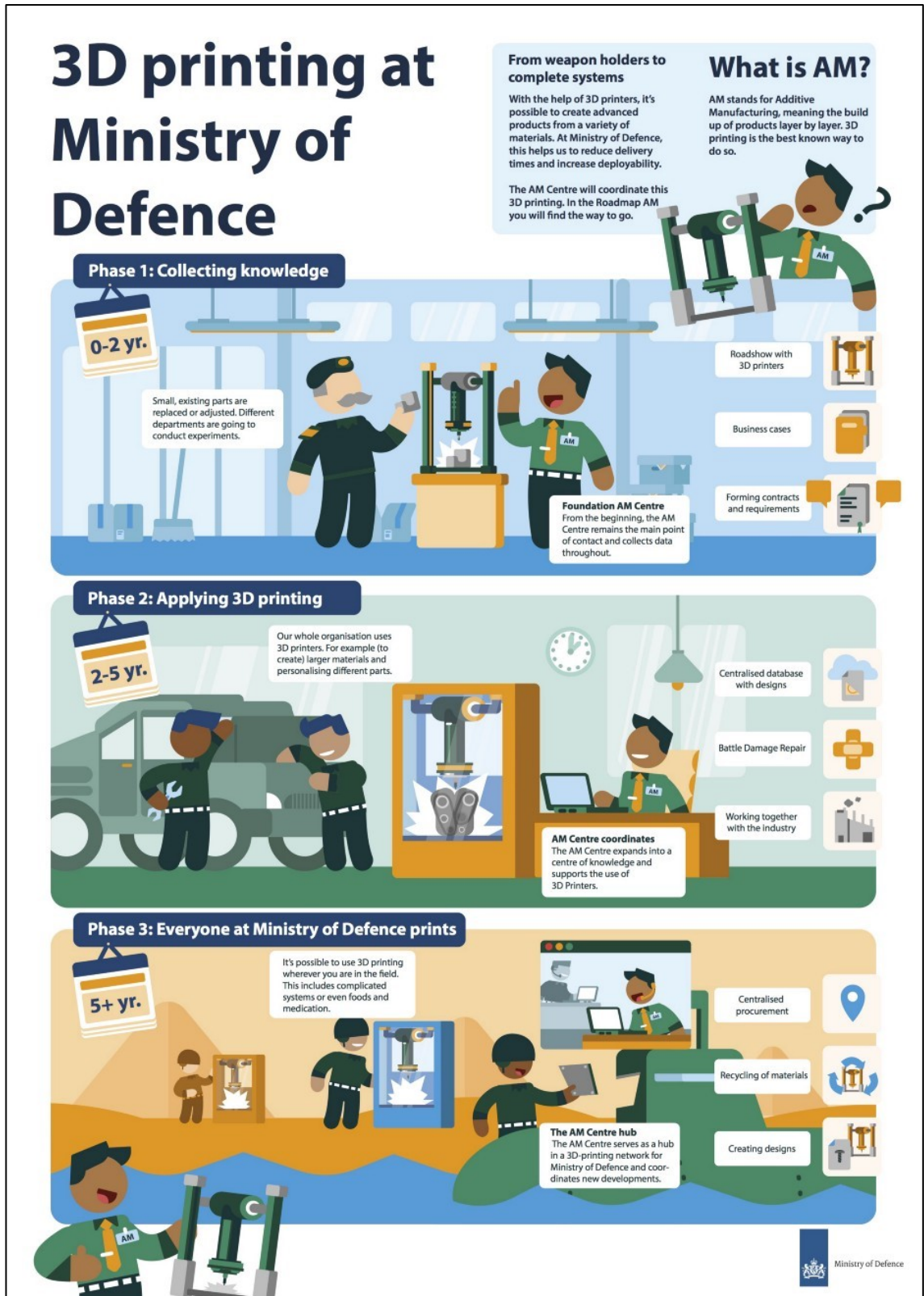
# Muiden materiaalien materiaalia lisäivät valmistusmenetelmät (Ritter 2019b)



## NASAn ja DOD:n sekä EU:n määritelmät teknologian kypsyystasoille (TRL) (Hook-Barnard ym. 2013; Horizon 2020)

|              | TRL | NASAn ja DOD:n määritelmä  | EU:n määritelmä  |
|--------------|-----|--|--|
| Tutkimus     | 1   | Basic principles observed and reported   | Basic principles observed  |
|              | 2   | Technology concept and/or application formulated                                     | Technology concept formulated  |
|              | 3   | Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept | experimental proof of concept  |
| Tuotekehitys | 4   | Component and/or breadboard validation in laboratory environment                     | Technology validated in lab  |
|              | 5   | Component and/or breadboard validation in relevant environment                       | Technology validated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)        |
|              | 6   | System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment          | Technology demonstrated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)     |
| Käyttöönotto | 7   | System prototype demonstration in an operational environment                         | System prototype demonstration in operational environment  |
|              | 8   | Actual system completed and qualified through test and demonstration                 | System complete and qualified  |
|              | 9   | Actual system proven through successful mission operations                           | Actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of key enabling technologies or in space) |

# Hollannin armeijan infograafi 3D-tulostuksen tiekartasta (DiManEx 2018).



# BAE Systemsin infograafi tulevaisuuden sotilaslentokonetehtaasta (BAE Systems 2020b).

