



**UNIVERSITY
OF TURKU**

Faculty of Technology

Suunnittelusta suorituskykyyn – Uusien materiaalien ja rakenteiden hyödyntäminen 3D-tulostuksessa

Erkka Lehtihuhta, Erik Haapa, Usama Nadeem, Jasmin Vainio,
Kristina Tarson, Anna Huusko, Heidi Piili, Antti Salminen

Reports from the Faculty of Technology No. 4

University of Turku, Finland, 2026



**UNIVERSITY
OF TURKU**
Faculty of Technology

Reports from the Faculty of Technology No. 4
University of Turku, Finland, 2026

Teknillisen tiedekunnan raportteja nro 4
Turun yliopisto, 2026

Copyright © the Authors

ISBN 978-952-02-0532-4 (PDF)
ISSN 2984-360X (Online)

Tekijät: Erkka Lehtihuhta¹, Erik Haapa¹, Usama Nadeem¹, Jasmin Vainio¹, Kristina Tarson¹, Anna Huusko¹, Heidi Piili^{1,*}, Antti Salminen¹

Otsikko: Suunnittelusta suorituskykyyn – Uusien materiaalien ja rakenteiden hyödyntäminen 3D-tulostuksessa

Julkaisun tiedot: Reports from the Faculty of Technology No. 4, University of Turku, Finland, 2026, 52 pages

Tämän katsauksen tavoitteena on lisätä teollisuuden ymmärrystä ja kiinnostusta teollista 3D-tulostusta kohtaan, erityisesti Turun seudulla, sekä tuoda esiin teknologian mahdollisuuksia ja haasteita käytännön sovellusten kautta. Teollinen 3D-tulostus on valmistusmenetelmä, jolla kappaleita valmistetaan kerros kerrokselta digitaalisesta mallista materiaalia lisäämällä, ei poistamalla, kuten perinteisillä valmistusmenetelmillä. Teollisen 3D-tulostuksen markkinoiden kasvu on ollut viime vuosina nopeaa ja kasvun odotetaan jatkuvan. Lisäävän valmistuksen teknologioiden käyttöönotto mahdollistaa uusien materiaalien sekä uudentyypisten rakenteellisten ratkaisujen hyödyntämistä teollisuustuotannossa.

Suomessa teollinen 3D-tulostus on vielä kehittyvä ala, mutta sen potentiaali teollisessa tuotannossa tunnistetaan yhä laajemmin. Vaikka menetelmä ei ole vielä laajasti käytössä, kiinnostus sen tarjoamiin mahdollisuuksiin kasvaa erityisesti uusien materiaalien ja rakenteiden osalta. Kotimainen kehitys painottuu tutkimus- ja pilotointihankkeisiin, joissa selvitetään teknologian soveltuvuutta eri teollisuudenaloille. Haasteina ovat muun muassa suunnitteluosaamisen puute ja standardoinnin hitaus, jotka hidastavat menetelmän laajempaa käyttöönottoa. Tulevaisuudessa tarvitaan lisää koulutusta, yhteistyötä ja investointeja, jotta Suomi voi hyödyntää teollisen 3D-tulostuksen mahdollisuudet täysimääräisesti.

Tämä katsaus toteutettiin osana Kestävästi lisäävää! -hanketta, joka toimii Turun lisäävän valmistuksen innovaatiokeskittymässä (TICAM). Hanke sai rahoitusta Euroopan aluekehitysrahastolta Helsingin ja Uudenmaan liiton kautta, ja sen projektikoodi on A80276. Vuosina 2023–2025 toteutettavan hankkeen tavoitteena oli vahvistaa Turun alueen pienten ja keskisuurten yritysten (pk-yritysten) osaamista lisäävässä valmistuksessa, erityisesti 3D-tulostuksessa. Turun yliopisto, Åbo Akademi ja Turun ammattikorkeakoulu yhdistivät asiantuntemuksensa tukeakseen pk-yrityksiä teknologian hyödyntämisessä eri sovellusalueilla, kuten koneenrakennuksessa, biolääketieteessä, hammastekniikassa sekä bio- ja kierrätyspohjaisissa materiaaleissa. Hankkeen keskeinen tavoite oli perustaa TICAM-keskittymä, joka toimii yhteistyön alustana, ja tuottaa mm. tietoa asian kehittämisestä sekä tiedonsiirtoa edistävää materiaalia lisäävästä valmistuksesta pk-yrityksille.

¹ Yksikkö: Turun yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Kone- ja materiaalitekniikan laitos

* Yhteyskirjoittaja: Heidi Piili, heidi.piili@utu.fi

Valmistusmenetelmänä 3D-tulostus on hyvinkin uusi, ensimmäiset merkittävät patentit tehty vasta 1980-luvulla. Joitakin perinteisessä 3D-suunnittelussa käytetyistä periaatteista voidaan kyllä hyödyntää 3D-tulostuksessa, mutta useimmiten suunnittelussa on opeteltava kokonaan uudenlainen ajattelutapa, kun on kyse lisäävästä valmistuksesta. Tässä katsauksessa on muutamien esimerkkien avulla kerrottu, mistä 3D-tulostuksessa on kyse. Näistä esimerkeistä voidaan nähdä, millaisia valmistusteknisiä mahdollisuuksia 3D-tulostus tarjoaa sekä millaisia haasteita teknologioiden soveltamisessa on ollut ja miten niistä on selvitty.

3D-tulostuksessa käytetyistä materiaaleista tunnetuin on muovi, mutta on myös mahdollista tulostaa muitakin materiaaleja, jopa keraameja tai biomateriaaleja. Taloudellisesti merkittävimpinä menetelminä pidetään nykyään kuitenkin metallien tulostamista. Tämän julkaisun ensimmäisessä "case" -tapauksessa on käytetty samaa menetelmää, millä muovista valmistettuja 3D-tulostettuja kappaleita yleisimmin valmistetaan, tosin muovin sijasta materiaalina on käytetty puukuitua. Kahdessa jälkimmäisessä puolestaan on tulostusmateriaalina ollut metalli. Yhteenvetona kaikista kolmesta tapauksesta voidaan todeta, että yksikään niistä ei tullut täysin valmiiksi hankkeen aikana, mutta että niistä jokaisessa tapahtui huomattavaa edistystä.

Eräs teollisen 3D-tulostuksen kasvua hidastavista tekijöistä on se, ettei 3D-tulostuksen standardointi ole pysynyt alan kehityksessä mukana. Standardisointia kyllä tehdään, mutta se ei ole vielä samalla tasolla muiden valmistusmenetelmien standardoinnin kanssa. Toinen kasvua hidastavista tekijöistä on suunnitteluosaamisen puute. Tämän ongelman ratkaisemiseksi tarvitaan sekä monipuolista tiedonsiirtoa mm. koulutuksen avulla että 3D-tulostuksen tietoisuuden lisäämistä yleisellä tasolla.

Tämän julkaisun jatkokehitysehdotuksista voidaan mainita 3D-tulostuksen kotimaisten standardien kehittäminen niin, ettei standardien osittainen puute muodostaisi estettä teknologioiden käyttöönotolle. Myös uudenlaisten materiaalien hyödyntämistä tuotannossa kannattaa edelleen tutkia. Materiaalihukkaa voidaan entisestään vähentää ja myös kierrätettävien materiaalien käyttöä lisätä. Myös liiketoimintamallien sekä logistiikan kannalta aiheen parista löytyy paljon mielenkiintoisia kehityskohteita.

ASIASANAT: Teollinen 3D-tulostus, Lisäävä valmistus, Varsinais-Suomi, Pk-yritykset, Standardointi, Benchmark, Suunnitteluosaaminen, Metallit, Muovi, Puukuitumateriaalit, Biomateriaalit.

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Taustaa	2
2.1	Alan kasvu	2
2.2	Teolliset käyttökohteet	5
2.3	Alan standardointi	8
2.4	Kehitys Suomessa	10
3	Teollinen 3D-tulostus	12
3.1	Menetelmät ja materiaalit	12
3.2	Työvaiheet	14
3.3	Mahdollisuudet ja haasteet	18
3.4	Benchmark-kappaleet	20
3.5	Esimerkkejä käyttökohteista	23
4	Esimerkkitapauksia teollisesta 3D-tulostuksesta	28
4.1	Kaiutinkotelon 3D-tulostus	28
4.2	Kiväärin saranamekanismin suunnittelu	36
4.3	Benchmark-kappaleiden käyttö 3D-tulostuksen laitevalinnassa	44
5	Yhteenveto	49
6	Jatkokehitysehdotukset	51
7	Lähteet	53

1 Johdanto

Uudet teknologiat muuttavat yhteiskuntaamme. Digitalisaatio näkyy arjessa monin tavoin, ja se vaikuttaa myös siihen, miten tuotteita suunnitellaan, valmistetaan ja hankitaan. Yksi neljännen teollisen vallankumouksen keskeisistä teknologioista on lisäävä valmistus (engl. additive manufacturing, AM) eli teollinen 3D-tulostus.

Teollinen 3D-tulostus tarkoittaa sitä, että kappaleita valmistetaan kerros kerrokselta digitaalisesta 3D-mallista. Tämä mahdollistaa esimerkiksi sisäisesti monimutkaisten rakenteiden valmistamisen yhdestä osasta. Teknologian laajempi käyttöönotto on aiemmin ollut rajoitettua patenttien ja materiaalien saatavuuden vuoksi, mutta viime vuosikymmenellä teollisen 3D-tulostuksen markkina on kasvanut nopeasti, erityisesti metallien tulostus on kehittynyt merkittävästi.

Teknologian kasvua tukee sen tarjoama muotoilun vapaus ja nopeus asiakastarpeisiin vastaamisessa. Auto-, lento- ja lääketieteellisyys käyttävät jo tätä tekniikkaa lopputuotteiden valmistuksessa, ja myös elektroniikkateollisuus hyödyntää sitä yhä enemmän.

Tämän katsauksen tavoitteena on lisätä suomalaisen teollisuuden ymmärrystä ja kiinnostusta tätä valmistusmenetelmää kohtaan sekä tuoda esiin sen tarjoamat mahdollisuudet ja haasteet käytännön sovellusten kautta. Teollinen 3D-tulostus perustuu kappaleiden valmistamiseen kerros kerrokselta digitaalisesta mallista materiaalia lisäämällä, mikä eroaa perinteisistä menetelmistä, joissa materiaalia poistetaan. Tämä lähestymistapa mahdollistaa uudenlaisia rakenteellisia ratkaisuja ja materiaalien hyödyntämistä, mikä avaa merkittäviä mahdollisuuksia tuotekehitykselle ja teolliselle tuotannolle.

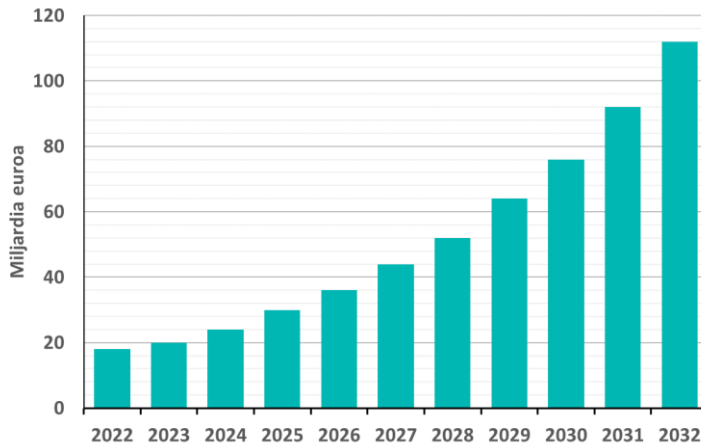
Kotimaisille yrityksille tämä tarkoittaa mahdollisuutta hyödyntää kevyempiä rakenteita, räätälöityjä ratkaisuja ja innovatiivisia materiaaleja, mikä voi parantaa kilpailukykyä sekä kotimaisilla että kansainvälisillä markkinoilla. Katsaus auttaa ymmärtämään, miten teknologiaa voidaan soveltaa eri toimialoilla ja millaisia investointeja, osaamista ja yhteistyötä sen käyttöönotto edellyttää. Lisäksi se nostaa esiin standardoinnin ja suunnitteluosaamisen merkityksen, jotka ovat keskeisiä tekijöitä laajamittaisessa käyttöönotossa.

2 Taustaa

Teollisen 3D-tulostuksen ala on kasvanut nopeasti viime vuosina, sillä se tarjoaa mahdollisuuden valmistaa monimutkaisia ja räätälöityjä komponentteja kustannustehokkaasti. Kehitystä vauhdittavat uudet materiaalit, monimateriaalitulostus ja integroidut prosessit, jotka laajentavat sovelluksia esimerkiksi energiatekniikassa ja lääketieteessä. Tulevaisuudessa alan näkymät liittyvät skaalautuviin tuotantoratkaisuihin, automatisointiin ja kestäväen valmistuksen edistämiseen.

2.1 Alan kasvu

Teollinen 3D-tulostus on verraten uusi valmistusmenetelmä, sillä ensimmäiset merkittävät siihen liittyvät keksinnöt tehtiin vasta 1980-luvulla (Wohlers ym., 2016). Teollisen 3D-tulostuksen kasvuvauhti on ollut nopeaa sen alkuvuosista lähtien. Wohlers Associaten vuoden 2025 raportin mukaan ala kasvoi 9,1 %, mikä nosti 3D-tulostusmarkkinan arvon 21,9 miljardiin dollariin vuoteen 2024 mennessä. Katsaus totesi myös markkinan kasvaneen 11,1 %, vuonna 2024 ja erityisesti metallin 3D-tulostus oli vahvassa nousussa. (Novaoneadvisor, 2023) Kuvassa 1 on esitetty globaalin teollisen 3D-tulostuksen kasvu vuosina 2022–2032.



Kuva 1. Teollisen 3D-tulostuksen globaali markkina ja sen kasvu vuosina 2022–2032. (Novaoneadvisor, 2023).

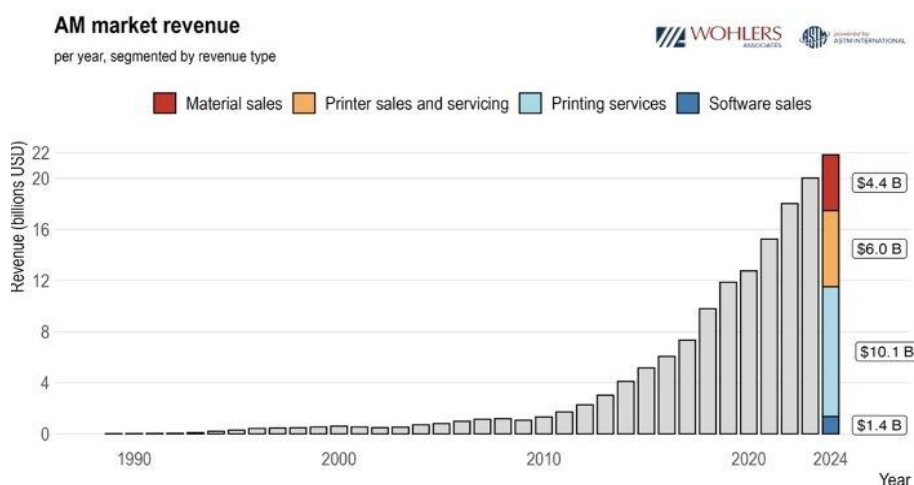
Teollisen 3D-tulostuksen globaalin markkinan koon (katso kuva 1) ennustetaan kasvavan noin 120 miljardiin dollariin vuoteen 2032 mennessä. Kasvua odotetaan tapahtuvan keskimäärin 21 % vuosivauhdilla ajanjaksolla 2023–2032.

Teollinen 3D-tulostus eroaa perinteisestä valmistuksesta siten, että esine rakennetaan kerros kerrokselta digitaalisen mallin pohjalta materiaalia lisäämällä. Teknologia mahdollistaa lyhyemmät tuotekehitysajat ja merkittävät tuotantokustannusten säästöt, mikä tekee siitä yhä houkuttelevamman teollisuudelle. Käytettävä valmistusmenetelmä valitaan sovelluksen mukaan, ja sen käyttöönottoon liittyy palveluita, kuten asennus, neuvonta ja immateriaalioikeuksien hallinta. Markkina kehittyy jatkuvasti uusien teknologioiden ja perinteisten valmistusmenetelmien yhdistyessä, mikä avaa uusia mahdollisuuksia teollisessa tuotannossa. (*Global Additive Manufacturing Market Size, Forecasts to 2033*, ei pvm.)

Teollinen 3D-tulostus tukee siirtymistä varastosta tilaustuotantoon. Tämä vähentää tarvetta varastoida suuria määriä tuotteita, pienentää vanhentumisriskiä ja mahdollistaa nopeamman reagoinnin kysynnän muutoksiin. Jakeluketjussa 3D-tulostus yksinkertaistaa tuotantoa yhdistämällä monta kokoonpanovaihetta yhdeksi prosessiksi, mikä vähentää kuljetustarvetta ja mahdollistaa paikallisen valmistuksen. (Lara, 2025)

Yksilöllisten tuotteiden kasvava kysyntä on yksi tärkeimmistä teollisen 3D-tulostuksen alan kasvua vauhdittavista tekijöistä. 3D-tulostuksen ansiosta valmistajat voivat tuottaa asiakaskohtaisesti räätälöityjä tuotteita, mikä on erityisen hyödyllistä ilmailu-, autoteollisuus- ja terveydenhuoltoaloilla. Lisäksi teollinen 3D-tulostus on materiaalitehokasta, sillä se käyttää vain tuotteen valmistukseen tarvittavan määrän

materiaalia. (Gao ym., 2015) Perinteiseen valmistukseen verrattuna teollinen 3D-tulostus on ympäristön kannalta edullisempaa – erityisesti jätteen ja energiankulutuksen vähentämisen ansiosta. Tämän seurauksena markkinan odotetaan kasvavan, samalla kun valmistajat alkavat yhä enemmän painottaa kestävästi kehityksen huomioimista tuotekehityksessään. (Jayawardane ym., 2023; Taddese ym., 2020) Kuvassa 2 esitetään teollisen 3D-tulostuksen liikevaihto ja sen kasvu vuoteen 2024 mennessä sekä jaoteltuna vuoden 2024 osalta. (3Dnatives, 2025)



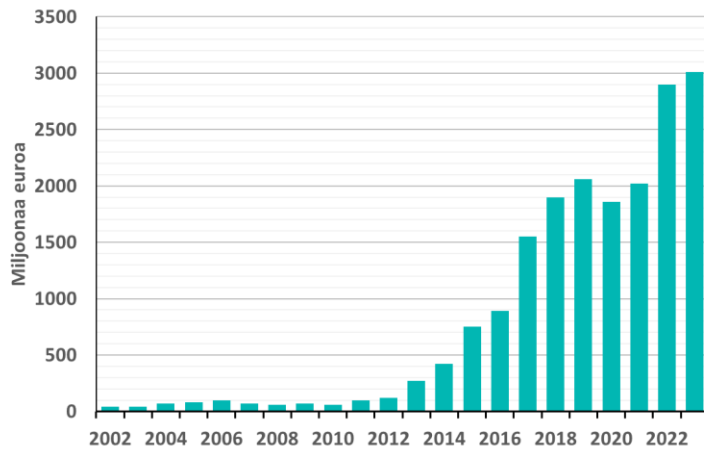
Kuva 2. Teollisen 3D-tulostuksen kokonaisliikevaihdon kehitys ja kasvu vuoteen 2024 saakka sekä vuoden 2024 liikevaihto jaoteltuna eri tulotyypeittäin. (3Dnatives, 2025)

Kuten kuvasta 2 voidaan todeta, suurin osa teollisen 3D-tulostuksen liikevaihdosta vuonna 2024 tuli tulostuspalveluista. Toiseksi suurimman osuuden muodostivat tulostimien myynti ja huoltopalvelut. Pienin liikevaihdon osuus oli ohjelmistomyynnillä. Tämä kertoo siitä, että yritykset hyödyntävät yhä enemmän ulkoistettuja tulostuspalveluita esimerkiksi prototyyppien ja pienerien valmistuksessa, sen sijaan että investoisivat omiin laitteisiin tai ohjelmistoihin. Palveluiden kasvu viittaa myös siihen, että markkinat ovat kypsyneet, ja yhä useammat toimijat keskittyvät ydinosaamiseensa hyödyntäen ulkopuolisia 3D-tulostusratkaisuja tuotannossaan. (3Dnatives, 2025)

Teollisella 3D-tulostuksella tapahtuva metallituotteiden valmistus on yleistynyt huomattavasti 2000-luvulla. Syy tähän on metallitulostuslaitteistojen kehittyminen mm. kuitulaserlaitteiden markkinoille tulon myötä. Kuvassa 3 on esitetty metallien lisäävään valmistukseen käytettävien järjestelmien myynnin kehitystä vuosina 2002–2023. (Welch, 2024).

Kuvasta 3 voidaan havaita myynnin kehityksen olleen jatkuvasti nousujohteista vuodesta 2013 alkaen, lukuun ottamatta pientä notkahdusta vuonna 2020. Tämä kehityskuva osoittaa, että metallien teollinen 3D-tulostus on saavuttanut kasvavaa

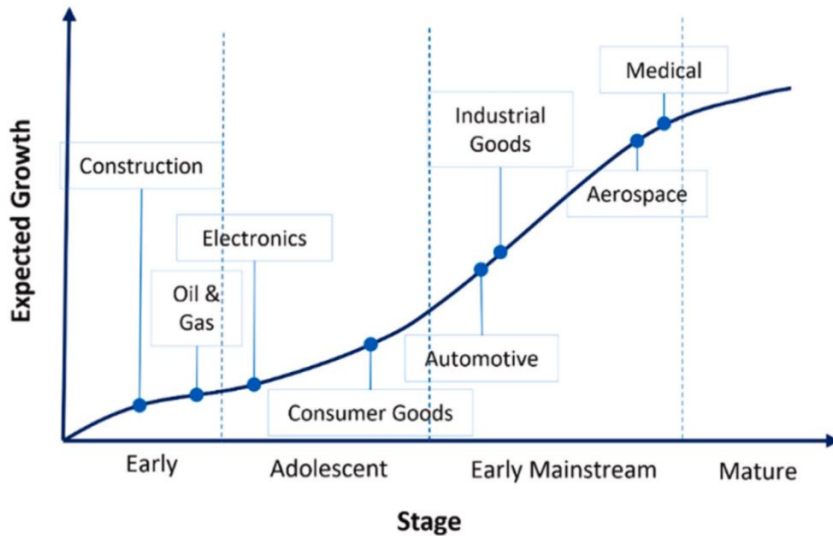
kiinnostusta ja laajentunut monille eri teollisuudenaloille. (Welch, 2024) Nousujohteisuus viittaa teknologian yleistyvään käyttöön ja sen tarjoamiin mahdollisuuksiin tehostaa tuotantoa, parantaa tuotesuunnittelua ja optimoida valmistusprosessit, mikä on osaltaan vaikuttanut alan markkinoiden kasvuun ja kehitykseen.



Kuva 3. Metallien 3D-tulostusjärjestelmien myynti vuosina 2002-2023. (Welch, 2024)

2.2 Teolliset käyttökohteet

Eri teollisuuden alojen valmiutta hyödyntää teollista 3D-tulostusta voidaan arvioida esimerkiksi käytettävän teknologian kypsyysasteikolla, jonka yritys nimeltä AMFG on määrittänyt. Kuvassa 4 on esitelty teollisuuden eri alojen kypsyystasot teollisen 3D-tulostuksen hyödyntämisessä.



Kuva 4. Teollisen 3D-tulostuksen markkinoiden kypsyyden teollisuuden aloittain. (Stavropoulos ym., 2023)

Kuvan 4 asteikko koostuu varhaisesta vaiheesta, nuoruusvaiheesta, varhaisesta valtavirrasta sekä kypsästä vaiheesta. Varhaisessa vaiheessa käyttäjät alkavat vasta tutkia teollisen 3D-tulostuksen mahdollisuuksia, ja teorian tasoa tutkimuksia on paljon. Nuoruusvaiheessa teknologian ominaisuudet kehittyvät ja teollista 3D-tulostusta otetaan käyttöön prototyypisovelluksissa. Lisäksi esimerkkitapauksia alkaa olla tässä vaiheessa enemmän. Varhaisessa valtavirrassa teollisen 3D-tulostuksen käyttö laajenee toiminnallisiin prototyyppeihin ja loppukäyttöön liittyviin projekteihin. Tässä vaiheessa myös teknologian parhaita käytäntöjä aletaan kehittää ja esimerkkitapausten määrä nousee. Kypsässä vaiheessa teollinen 3D-tulostaminen on todettu toimivaksi ja otettu käyttöön valmistusmenetelmänä. Kypsässä vaiheessa myös standardisointi on kehittynyt, mikä mahdollistaa laadun toistettavuuden suuremmissa mittakaavoissa. (AMFG, 2019a)

Kuvasta 4 voidaan nähdä, että terveys- ja ilmailuteollisuus ovat lähellä kypsään vaiheeseen siirtymistä ja varhaisimmassa vaiheessa teolliseen 3D-tulostukseen siirtymistä on rakennusteollisuus. Ilmailuteollisuudessa teollista 3D-tulostusta käytetään esimerkiksi suihku- tai rakettimeoottori osien valmistuksessa (Ghidini et al., 2023) ja terveysteollisuudessa vaikkapa tulostamalla yksilöllisesti valmistettuja lääkkeitä (Pramanik ym., 2024).

Teknologian kypsyydestä voidaan arvioida myös NASAn kehittämän technology readiness level (TRL) -menetelmän avulla, jossa uuden teknologian kehittäminen jaetaan tutkimus-, kehitystyö- ja käyttöönotto vaiheisiin (kuva 5). (Lezama-Nicolás ym., 2018)

TEKNOLOGIAN KYPSYYSTASO (TECHNOLOGY READINESS LEVEL; TRL)



Kuva 5. Teknologian kypsyytasot (TRL) (TWI Global, 2020)

Kuten kuvasta 5 voidaan havaita, jokainen näistä vaiheista jaetaan edelleen kolmeen tasoon. On hyvä kuitenkin huomioida, että TRL mittaukset ovat alakohtaisia, jotka poikkeavat hiukan kuvassa 5 esitetystä, mutta silti kaikki perustuvat tähän Nasan määritelmään. Näin ollen kypsyytasot voidaan arvioida asteikolla 1–9. Ensimmäisellä tasolla olevan teknologian perustoimintaperiaatteet on havaittu ja raportoitu, ja yhdeksännellä tasolla teknologia on todistetusti valmis kaupalliseen käyttöön. Kuvassa 3 on esitettyä TRL:n kaikki tasot. Kypsyytasot alhaalta ylös ovat tutkimus (TRL-tasot 1–3), tuotekehitys (TRL-tasot 4–6) sekä käyttöönotto (TRL-tasot 7–9). (Technology Readiness Levels — NASA, 2023)

Kun teknologia on TRL-tasolla 1 (katso kuva 5), tieteellinen tutkimus on vasta alkamassa, ja saatuja tuloksia hyödynnetään tulevassa tutkimus- ja kehitystyössä. TRL 2 -tasolla teknologian perusperiaatteet on tutkittu, ja niiden pohjalta voidaan alkaa hahmotella käytännön sovelluksia. Tässä vaiheessa usein kokeellista näyttöä ei juuri ole. TRL 3 saavutetaan, kun aktiivinen tutkimus ja suunnittelu alkavat. Tässä vaiheessa tehdään analyyttisiä ja laboratoriotutkimuksia teknologian toimivuuden arvioimiseksi. Kun tämä on valmis, siirrytään TRL 4 -tasolle, jossa testataan useita komponentteja yhdessä. TRL 5 jatkaa edellistä vaihetta, mutta tekniikkaa testataan entistä realistisemmissä ympäristöissä. TRL 6:ssa teknologialla on jo toimiva prototyyppi. TRL 7 edellyttää prototyypin testaamista käyttöympäristössä, esim. avaruudessa. TRL 8 on käyttövalmis ja luotettavaksi todennettu, ja TRL 9 tarkoittaa, että teknologia on

todistetusti toiminut onnistuneessa tehtävässä. (Lezama-Nicolás ym., 2018; Sastoque Pinilla ym., 2019)

Teollisen 3D-tulostuksen käyttöönotto yleistyy eri teollisuuden aloilla eri tahtia. Menetelmästä riippuen alkaa 3D-tulostusteknologia olla noin kypsyydellä 6–7 (Lezama-Nicolás ym., 2018). Jollain teollisuuden aloilla, kuten ilmailuteollisuudessa, menetelmien standardisointi alkaa olla ylimpien tasojen vaatimalla tasolla. Myös muut alat kehittyvät jatkuvasti ja sijoittuvat aina ylempään kypsyydellä.

2.3 Alan standardointi

3D-tulostuksen standardointi on keskeistä teollisen laadun, turvallisuuden ja yhteensopivuuden varmistamiseksi. Se yhtenäistää materiaaleja, prosesseja ja mittatarkkuuksia, helpottaen laajempaa käyttöönottoa eri aloilla. Standardit tukevat myös sertifiointia ja luotettavuutta eri teollisuuden aloilla.

Teollisen 3D-tulostuksen käyttö kasvaa ja kehittyy koko ajan, jolloin standardisointi ei välttämättä pysy kehityksessä mukana. Standardisointi on pitkä ja vaativa prosessi, jota ei juurikaan voi vauhdittaa. Nämä haasteet saattavat osaltaan hankaloittaa teollisen 3D-tulostuksen käyttöönottoa eri teollisuuden alojen vaatimusten ja sovellusten ollessa hyvin erilaisia.

Teollisen 3D-tulostuksen standardointi on keskeinen tekijä alan kehityksessä ja laajentumisessa. Standardit auttavat luomaan yhteiset kriteerit ja ohjeistukset, jotka varmistavat tuotteiden ja prosessien laatua ja turvallisuutta. Ne tukevat myös tämän teknologian hyväksyttävyyttä eri teollisuusaloilla, kuten ilmailussa, autoteollisuudessa ja biolääketieteessä. Standardointikomiteat työskentelevät tiiviisti kehittääkseen globaaleja sääntöjä, jotka varmistavat, että teollinen 3D-tulostus täyttää sekä asiakas-että säädökselliset vaatimukset, edistäen samalla uusien materiaalien ja tuotteiden sertifiointia. Taulukko 1 esittelee muutamia keskeisempiä alan standardeja. (Chen ym., 2022; Kawalkar ym., 2022).

Standardit ovat keskeisiä teollisen 3D-tulostuksen kehitykselle. Ne yhtenäistävät terminologiaa, ohjaavat materiaalien ja tuotteiden vaatimuksia sekä tukevat suunnitteluprosesseja. Kansainvälinen yhteistyö, kuten ISO:n ja ASTM:n yhteisstandardit, on vahvistanut globaalisti hyväksytyjen käytäntöjen käyttöönottoa ja alan luotettavuutta. (Kawalkar ym., 2022)

Taulukko 1. Viisi keskeisintä teollisen 3D-tulostuksen standardia. (Sprinkle, 2019.)

Standardi	Kuvaus	Julkaisu- vuosi	Tärkeimmät ominaisuudet
<i>Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (F2792)</i>	Ensimmäinen teollisen 3D-tulostuksen ASTM-standardi. Luonut teollisen 3D-tulostuksen määritelmän, joka on yhä käytössä.	2009	Yhteinen sanasto, joka on yhtenäistänyt teollisen 3D-tulostuksen terminologiaa ja helpottanut alan kehitystä.
<i>ISO/ASTM 52900 - Terminology for AM – General Principles – Terminology</i>	Tämä standardi on laajentanut F2792:ta ja on ollut ensimmäinen ISO:n ja ASTM:n yhteisesti kehittämä ja hyväksymä standardi.	2015 (päivitetty 2021)	On yhdistänyt maailman standardointi-organisaatiot ja koordinoit standardien kehitystä kansainvälisesti.
<i>Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion (F2924)</i>	Tämä standardi kattaa titaaniseoksen valmistamisen jauhepetisulatuksella (powder bed fusion).	2012	On antanut varhaisten teollisten soveltajien käyttöön tärkeitä ohjeita materiaaleista ja tuotantoketjuista.
<i>ISO/ASTM 52901 - Additive Manufacturing – General Principles – Requirements for Purchased AM Parts</i>	Tämä standardi määrittelee tarkat vaatimukset, joita asiakkaan tulisi etsiä ja kysyä ostaessaan teollisen 3D-tulostuksen osia.	2017	On auttanut valmistajia ymmärtämään asiakkaiden vaatimuksia ja varmistamaan osien laatustandardit.
<i>ISO/ASTM 52910 - Guidelines for Design for AM (ISO/ASTM 52910)</i>	Tämä standardi antaa vaatimuksia ja suosituksia teollisen 3D-tulostuksen käytölle tuotesuunnittelussa.	2017	On käsitellyt teollisen 3D-tulostuksen erityispiirteitä verrattuna perinteisiin valmistusprosesseihin ja auttanut suunnittelijoita välttämään yleisiä virheitä.

2.4 Kehitys Suomessa

Teollinen 3D-tulostus kehittyä myös Suomessa nopeasti ja tarjoaa paljon mahdollisuuksia. Kehityksen myötä teollinen 3D-tulostus voi olla hyvä vaihtoehto tietyissä sovelluksissa perinteisille valmistusmenetelmille, esimerkiksi pienentyneiden materiaalikustannusten sekä tuotteen mukailtavuuden myötä. (Vafadar ym., 2021) Tällä teknologialla voidaan valmistaa tuotteita lisäämällä materiaalia kerros kerrokselta, mikä mahdollistaa sellaisten monimutkaisten rakenteiden toteuttamisen, joita ei voida valmistaa perinteisillä menetelmillä. Tämä tekee 3D-tulostuksesta houkuttelevan ratkaisun esimerkiksi auto-, laiva-, ja prosessiteollisuudelle, missä tarvitaan kevyitä, kestäviä, monimutkaisia ja tehokkaita osia. Teknologia soveltuu erityisen hyvin korkean työkustannusten maihin, kuten Suomeen, sillä tuotanto perustuu pitkälti automaatioon ja vaatii vähemmän manuaalista työtä. 3D-tulostus vähentää myös kokoonpanotarvetta ja materiaalihukkaa, mikä puolestaan parantaa kustannustehokkuutta ja mahdollistaa kotimaisen kilpailukyvyyn säilyttämisen kansainvälisillä markkinoilla.

Teknologian suurimpia etuja ovat mahdollisuus valmistaa kannattavasti pieniä sarjoja, säästää materiaalia ja tuottaa osia lähellä loppukäyttäjää. Suomessa 3D-tulostusteknologiaa hyödynnetään erityisesti erikoisosien, varaosien, prototyyppien ja pienten tuotantosarjojen valmistuksessa, mikä sopii hyvin maan teolliseen rakenteeseen. Tämä johtuu siitä, että Suomessa toimii paljon erikoistuneita, korkean osaamistason yrityksiä, joille joustava ja kustannustehokas tuotanto pienissä sarjoissa on erityisen tärkeää. Haasteena on kuitenkin se, että teollinen 3D-tulostus on vielä melko hidasta, mikä voi nostaa kustannuksia. Suomessa tämä näkyy siten, että teollista 3D-tulostusta käytetään toistaiseksi lähinnä yksittäisten erikoisosien valmistukseen, kun taas laajamittainen sarjatuotanto on harvinaisempaa juuri hitauden ja kustannustason vuoksi. Tämän vuoksi alan kotimainen kehitys ja prosessien parantaminen ovat edelleen tarpeen.

Suomessa teollinen 3D-tulostus on kuitenkin hyvässä vauhdissa, ja yhä useammat yritykset investoivat teknologiaan kehittääkseen kevyempiä, energiatehokkaampia ja asiakaskohtaisesti räätälöityjä tuotteita. Myös yritykset, joiden tuotteita ei ole järkevää 3D-tulostaa, ovat käyttäneet teknologiaa tuotannon tehostamiseen, tulostamalla tarpeisiinsa optimoituja työkaluja ja tuotantovälineitä. Varaosien tulostus on myös noussut suosituksi käyttökohteeksi, etenkin tapauksissa, joissa vanhan tai harvinaisen tuotantolaitteen varaosien saaminen on hidasta tai vaikeaa. Metallin 3D-tulostusmenetelmiä kuten suorakerrostusta on käytetty jo pitkään myös osien korjaamiseen. Lisäksi Suomessa esimerkiksi kemianteollisuus voisi hyötyä teollisesta 3D-tulostuksesta vaikkapa virtausoptimoitujen komponenttien ja suodattimien suunnittelussa ja valmistuksessa.

Jotta kehitys jatkuisi, tarvitaan lisää osaamista ja tiedonsiirtoa sekä tukea tutkimukselle ja kehitystyölle. Suomessa tämä edellyttää, että korkeakoulut ja tutkimuslaitokset tarjoavat ajankohtaista tietoa ja opetusta 3D-tulostuksesta, ja että alan tutkimus- ja kehityshankkeita tuetaan yhteistyössä teollisuuden kanssa. Tähän

tarvitaan myös tiivistä yhteistyötä teollisuuden, tutkimuslaitosten ja koulutuksen välillä, jotta teollisen 3D-tulostuksen mahdollisuudet saadaan täysimääräisesti hyödynnettyä eri toimialoilla. Esimerkiksi kappaleiden suunnittelu 3D-tulostukselle tehdään täysin eri lähtökohdista kuin muille valmistusmenetelmille, jolloin vaikkapa koneistukselle suunniteltu tuote täytyy osata suunnitella 3D-tulostuksen etuja hyödyntäväksi, jotta valmistuskustannukset voidaan minimoida ja arvonlisä maksimoida. Huomioitavaa on, että osien uudelleensuunnittelu voi olla itsessään este 3D-tulostuksen käyttöönotolle, johtuen uuden designin tuotantoon viemisen inertiasta varsinkin suurissa yrityksissä.

Teknologian käyttöönotto yrityksissä taas vaatii sitä, että koko organisaatio ymmärtää sen mahdollisuudet. Suomalaiselle teollisuudelle tämä tarkoittaa, että 3D-tulostuksen hyödyt saadaan esiin vasta, kun teknologiaa ei nähdä vain teknisenä ratkaisuna, vaan strategisena kilpailuetuna. Organisaatioiden sisäinen ymmärrys ja sitoutuminen ovat keskeisiä edellytyksiä laajamittaiselle ja kannattavalle käyttöönotolle.

Vaikka 3D-tulostus on teknologiana yleensä teollisuudessa tiedossa, varsinkin metallin 3D-tulostuksen mahdollisuuksien tai rajoitteiden ymmärrys ei tyypillisesti ole täysin ajan tasalla, sillä etenkin tekniikan tuottavuus, kypsyys ja materiaalivalikoima on kehittynyt vuosien 2020–2025 välillä rajusti. Usein teollisuudelle helpoin tapa saada ajantasainen ja realistinen kuva 3D-tulostuksesta valmistusmenetelmänä on kokeilla sitä käytännössä omiin sovelluksiin. Tutkimuslaitosten, korkeakoulujen, ja yhteishankkeiden lisäksi tähän tarjoavat mahdollisuuksia mm. Suomen 3D-tulostusekosysteemi FAME, joka on perustanut AM Campus -nimisen TKI- ja kokeiluympäristön metallin 3D-tulostukselle. Suomessa toimii myös useita metallin 3D-tulostusta palveluna tarjoavia yrityksiä.

3D-tulostus voi tuoda merkittäviä hyötyjä suomalaiselle teollisuudelle, mutta sen yleistyminen edellyttää suunnitelmallista otetta ja nopeita toimia. Koulutus on keskeinen tekijä 3D-tulostuksen täysimääräisessä hyödyntämisessä suomalaisessa teollisuudessa. On tärkeää varmistaa, että työntekijöillä on tarvittavat taidot ja osaaminen, jotta teknologiaa voidaan hyödyntää tehokkaasti eri aloilla. Teollisen 3D-tulostuksen hyödyntämiseksi tarvitaan laaja-alaista koulutusta, joka kattaa teknologian eri osa-alueet, kuten suunnittelun, materiaalit, prosessit ja laitteistot, sekä kykyä soveltaa niitä teollisuuden tarpeisiin.

3 Teollinen 3D-tulostus

Teollisen 3D-tulostuksen eri menetelmät ja tekniikat tarjoavat monia mahdollisuuksia, mutta samalla ne tuovat mukanaan myös haasteita, kuten valmistusnopeuden rajoitukset ja materiaalien rajallisuuden. Näiden haasteiden ratkaiseminen edellyttää jatkuvaa teknologian kehitystä, prosessien optimointia ja uusien materiaalien tutkimusta ja kehittämistä, jotta teollinen 3D-tulostus voi saavuttaa täyden potentiaalinsa.

3.1 Menetelmät ja materiaalit

Teollinen 3D-tulostus kattaa monenlaisia sovelluksia eri teollisuudenaloilla, aina pienistä tarkkuusosista suurikokoisiin komponentteihin. Tekniikoita ja laitteita on saatavilla eri hintaluokissa, aina satojen eurojen edullisista tulostimista miljoonien eurojen teollisiin järjestelmiin, jotka mahdollistavat erikoismateriaalien ja -rakenteiden valmistuksen. Teollinen 3D-tulostus jakautuu seitsemään alakategoriaan, jotka eroavat toisistaan käytettävien materiaalien ja tulostustekniikoiden mukaan. Näitä alakategorioita ovat muun muassa jauhepeticulatus, suorakerrostus ja sideaineen suihkutusta, jotka tarjoavat erilaisia mahdollisuuksia monimutkaisten ja tarkkojen osien valmistukseen. Kuva 6 esittää teollisen 3D-tulostuksen pääkategoriat. (AMFG, 2019a)

Kuten kuvasta 6 nähdään, teollinen 3D-tulostus ei ole yksi yhtenäinen menetelmä, vaan sen alla on laaja kirjo erilaisia tekniikoita, joilla on omat erityispiirteensä, sovelluskohteensa ja materiaalivaatimuksensa. Nämä tekniikat eroavat muun muassa siinä, miten materiaali lisätään – olipa kyse sitten sulattamisesta, kovettamisesta tai pursottamisesta – sekä siinä, mitä materiaaleja voidaan käyttää, kuten metallit, muovit, keraamit tai komposiitit. Laitteistojen hinnat vaihtelevat merkittävästi: pienemmät laitteet voivat maksaa muutamia kymmeniä tuhansia euroja, kun taas suurteollisuuden järjestelmät voivat maksaa satojatuhansia tai jopa yli miljoonan euroa. Myös kapasiteetti vaihtelee: osa koneista soveltuu prototyyppien valmistukseen, toiset taas sarjatuotantoon tai suurikokoisten komponenttien valmistukseen. Tulostusnopeus, tarkkuus ja käytettävissä olevat materiaalit määrittävät, mihin käyttöön mikäkin tekniikka parhaiten soveltuu. (Lachmayer ym., 2017; Pal ym., 2021)



Kuva 6. Teollisessa 3D-tulostuksessa hyödynnettävät pääteknikat sekä niiden variaatioita.

Yksi teollisen 3D-tulostuksen suurimmista vahvuuksista on sen laaja ja monipuolinen materiaalivalikoima, joka kattaa muovit, metallit, keraamit, biomateriaalit ja monimateriaaliratkaisut. Yleisimmät muovit ovat polylaktidi (PLA), akryylnitriilibutadieenistyreeni (ABS) ja polyetylenitereftalaattiglykoli (PETG), jotka soveltuvat erityisesti prototyypin ja kevyiden rakenteiden valmistukseen. Teknisten muovien, kuten polyeetterieetteriketonin (PEEK) ja polykarbonaatin (PC), avulla saavutetaan parempia mekaanisia ja lämpöteknisiä ominaisuuksia. Metallit, kuten titaani, alumiini, kupari ja ruostumaton teräs, mahdollistavat kestävien ja mittatarkkojen osien valmistuksen esimerkiksi ilmailu- ja lääketieteellisuuteen. (Algarni & Ghazali, 2021; Park & Fu, 2021) (Algarni & Ghazali, 2021; Park & Fu, 2021)

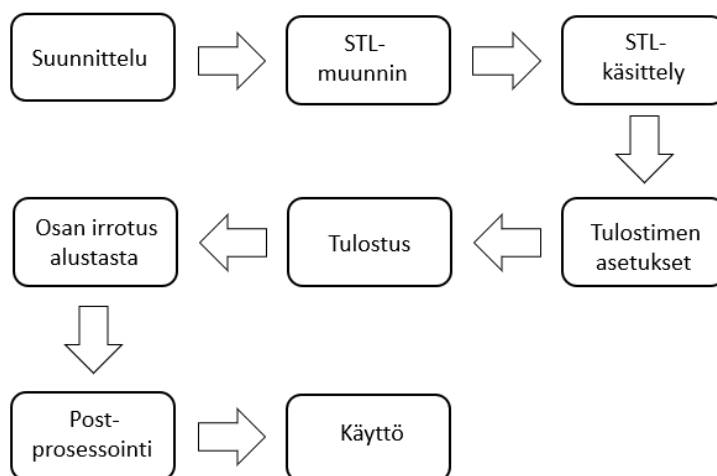
Myös keraamit ovat tärkeä osa materiaalivalikoimaa, sillä ne tarjoavat erinomaisen lämmön- ja kulutuskestävyyden esimerkiksi teknisissä komponenteissa (Dadkhah ym., 2023). Biomateriaalit, kuten biohajoavat polymeerit ja solujen kanssa yhteensopivat materiaalit, mahdollistavat sovelluksia muun muassa kudosteknologiassa ja bioimplanttien valmistuksessa (Mirzaali ym., 2022). Lisäksi käytetään hartsipohjaisia fotopolymeerejä, hiekkapohjaisia aineita sekä kasvi- ja puupohjaisia komposiitteja (Srivastava ym., 2022).

Monimateriaalitulostus on kasvava ala, jossa yhdistetään useita eri materiaaleja samaan kappaleeseen. Tämä mahdollistaa tuotteita, joissa on sekä joustavia että jäykkiä osia, tai sähköä johtavia ja eristäviä alueita. Esimerkiksi elektroniikassa voidaan tulostaa rakenteita, joihin on integroitu johdotuksia ja antureita. Materiaalien valinta riippuu aina tulostustekniikasta, laitteiston ominaisuuksista ja lopputuotteen vaatimuksista. Jatkuva materiaalitutkimus ja -kehitys sekä uudet yhdistelmät laajentavat 3D-tulostuksen sovellusmahdollisuuksia jatkuvasti. (Hasanov ym., 2022)

3.2 Työvaiheet

Teollisen 3D-tulostuksen vahvuuksiin kuuluu monimutkaisten geometrinen muotojen valmistus sekä se, että tuotteita valmistaessa sarjan koolla ei ole juurikaan vaikutusta tuotantokustannuksiin. 3D-tulostuksessa on usein tarpeen ajatella eri tavalla kuin perinteisiä työstömenetelmiä käytettäessä, sillä teollisessa 3D-tulostuksessa käytettävillä tekniikoilla on omat rajoituksensa. Samalla 3D-tulostuksessa on myös selkeitä etuja, joita kannattaa pyrkiä hyödyntämään myös tuotteen suunnittelussa. Saattaa käydä jopa niin, että pitkä suunnittelukokemus perinteisistä valmistustekniikoista voi hankaloittaa suunnitteluprosessia, kun koko valmistusprosessi täytyy ajatella uudella tavalla.

Teollisen 3D-tulostustyöketjun aloitusvaihe on ideointi, jossa määritellään tuotteen tarve, käyttötarkoitus ja keskeiset toiminnalliset vaatimukset. Tässä vaiheessa syntyy konsepti, jonka ympärille suunnittelu rakentuu. Ideoinnissa huomioidaan materiaalivalinnat, mahdolliset valmistusrajoitteet sekä tuotteen lopullinen käyttökonteksti. Luovuus ja tekninen ymmärrys yhdistyvät, ja tavoitteena on kehittää ratkaisu, joka hyödyntää 3D-tulostuksen vahvuuksia, kuten rakenteellista vapautta. Kuvassa 7 on esitetty tyypillinen teollisen 3D-tulostuksen työnkulku.



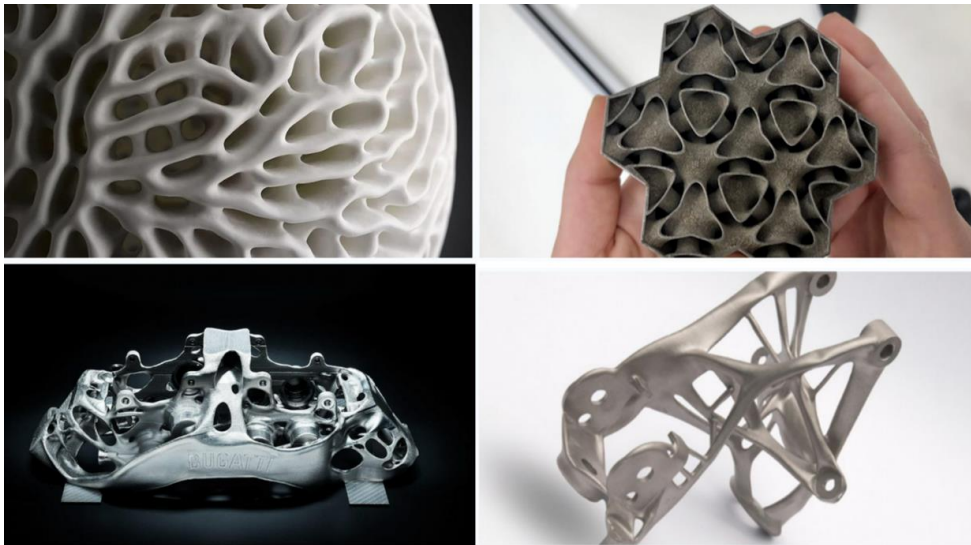
Kuva 7. Teollisen 3D-tulostuksen vaiheet. (Haghsefat & Ting, 2020)

Suunnittelu on teollisen 3D-tulostuksen keskeinen vaihe, jossa ideasta muotoutuu tulostusvalmis malli. Prosessi alkaa 3D-mallinnuksella CAD-ohjelmistossa, jossa luodaan digitaalinen malli tuotteesta. Mallinnuksen jälkeen suoritetaan optimointi: rakenteita kevennetään, lujuutta parannetaan ja valmistettavuutta parannetaan ottaen huomioon 3D-tulostuksen mahdollisuudet ja rajoitteet. Yksi erityinen suunnittelutyökalu on käyttää verkkomaisia rakenteita, jotka mahdollistavat kevyen mutta vahvan tukirangan luomisen tuotteen sisäpuolelle. Tällaiset rakenteet hyödyntävät 3D-

tulostuksen kykyä valmistaa monimutkaisia geometrioita, joita ei voisi toteuttaa perinteisin menetelmin. Suunnitteluvaiheessa tehdään myös simuloitteja ja testauksia digitaalisesti, jotta varmistetaan tuotteen toimivuus ennen valmistusta. Hyvin suunniteltu malli säästää materiaalia, lyhentää tulostusaikaa ja parantaa tuotteen suorituskykyä. (Gibson ym., 2021; Hällgren ym., 2016)

Valmiille 3D-tulostetuille tuotteille tunnusomaista ovat monimutkaiset geometriset muodot. Syy näiden käyttöön ei ole kuitenkaan ole esteettinen vaan käytännöllinen: sekä materiaalin kulutus että valmistusaika pienenevät, kun käytetään huokoisia rakenteita. Toisin kuin perinteisillä materiaalia poistavilla valmistusmenetelmillä, monimutkaiset geometriset muodot eivät lisää kustannuksia teollisessa 3D-tulostuksessa, vaan vähentävät niitä. Tällöin tärkeä huomion kohde on huolehtia siitä, että tuote täyttää riittävät lujuusvaatimukset. Lujuuslaskentaa varten on olemassa omat ohjelmistonsa, jolle tässä vaiheessa tuotesuunnittelua ei vielä ole tarvetta. Vaikka huokoisten rakenteiden valmistaminen ei lisää kustannuksia, on hyvä pitää mielessä myös suunnittelukustannukset. Optimoidun rakenteen tuottaminen voi olla vaativa prosessi, joka kuitenkin huolellisesti toteutettuna kannattaa. (Eryıldız, 2021; Panesar ym., 2018; Ribeiro ym., 2021)

Näiden kevennettyjen rakenteiden käytölle on olemassa myös toinen syy. Käytettäessä metallien lasersäteeseen perustuvaa teollista 3D-tulostusta on otettava huomioon lasersäteen tuottama, huomattavan korkea lämpötila, joka metallin sulattamiseen vaaditaan. Kohonnut lämpötila ei yleensä aiheuta ongelmia työstettäessä metallikappaletta perinteisin menetelmin, mutta metallien teollista 3D-tulostusta käytettäessä tuote on suunniteltava siten, että lasersäteen tuottama lämpö pääsee poistumaan kappaleesta aiheuttamatta mittavirheitä valmistettavaan kappaleeseen. (Ladani & Sadeghilaridjani, 2021; Takezawa ym., 2021) Kuvassa 8 on esitetty joitain esimerkkejä siitä, millaisia muotoja teollisella 3D-tulostuksella voidaan saada aikaan. (AMFG, 2019b)

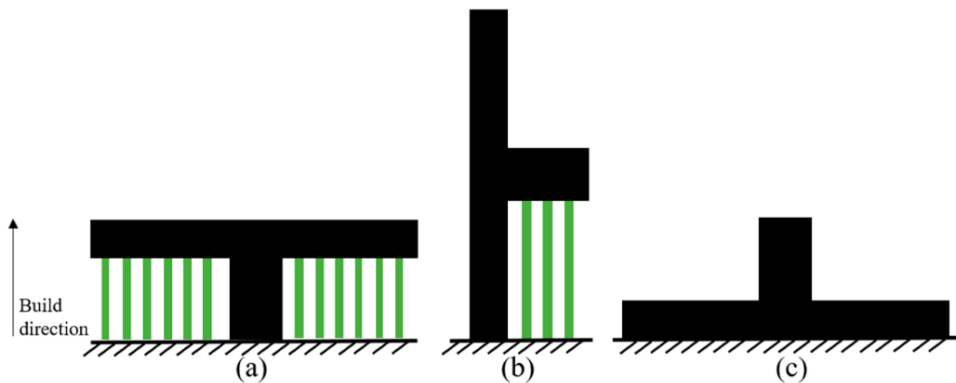


Kuva 8. Esimerkkejä lisäävässä valmistuksessa käytetyistä rakenteista. (AMFG, 2019b)

Kuten kuvasta 8 havaitaan, yksi teollisen 3D-tulostuksen merkittävimmistä eduista on kyky valmistaa monimutkaisia sisäisiä rakenteita, joita ei voida toteuttaa perinteisin valmistusmenetelmin. Näihin kuuluvat muun muassa virtausteknisesti optimoidut kanavat, monimutkaiset sisäiset jäähdytysrakenteet sekä kevennetyt rakenteet. Esimerkiksi ilmailuteollisuudessa voidaan valmistaa kevyitä moottorikomponentteja, joissa on sisäänrakennetut jäähdytyskanavat. (Biedermann ym., 2021; Careri ym., 2023) Autonvalmistuksessa teollisella 3D-tulostuksella valmistetaan turboahdinkomponentteja, joissa ilmavirran ohjaus on optimoitu suorituskyvyn parantamiseksi. (Sarzyński ym., 2024; Schuhmann ym., 2022) Energia-alalla puolestaan tulostetaan polttokennojen ja lämmönvaihtimien osia, joissa lämmönsiirto ja virtausvastus on optimoitu sisäisten geometrioiden avulla. (Kaur & Singh, 2021) Tällaiset sisäiset rakenteet mahdollistavat tehokkaamman toiminnan, kevyemmän painon ja paremman suorituskyvyn. Teollisen 3D-tulostuksen ansiosta nämä monimutkaiset muodot voidaan myös valmistaa yhtenä kappaleena ilman kokoonpanoa, mikä nopeuttaa tuotantoa ja vähentää mekaanista epäluotettavuutta.

3D-tulostamisen ensimmäisessä vaiheessa valmiiksi mallinnettu tuote täytyy viipaloida. Viipaloinnissa kappale jaetaan ohuisiin kerroksiin siihen tarkoitetulla ohjelmalla. Myös tulostusparametrit täytyy valita ennen tulostamista. Tulostusparametrien valinnassa voidaan yleensä hyödyntää filamentin valmistajan suosituksia, mutta toisinaan optimaalisten parametrien löytäminen vaatii eri parametrien testaamista tulostaen. Tärkeimpiä parametreja ovat tulostuskerroksen paksuus, tulostusnopeus, suuttimen lämpötila sekä tulostusalustan lämpötila.

Teollisessa 3D-tulostuksessa tukirakenteiden suunnittelu on olennainen osa valmistusprosessia, erityisesti metalli- ja hartsitulostuksessa. Tukirakenteet estävät kappaleen vääntymisen, tukevat ylityksiä ja varmistavat tulostuksen onnistumisen. Ne lisätään digitaalisesti ennen tulostusta ja optimoidaan siten, että ne tukevat kriittisiä kohtia, mutta ovat helposti poistettavissa jälkikäsittelyssä. Hyvin suunnitellut tukirakenteet vähentävät materiaalihukkaa, lyhentävät valmistusaikaa ja parantavat pinnanlaatua. Kuvassa 9 on esitetty teollisessa 3D-tulostuksessa tarvittavien tukirakenteiden periaate. (Jiang ym., 2018)

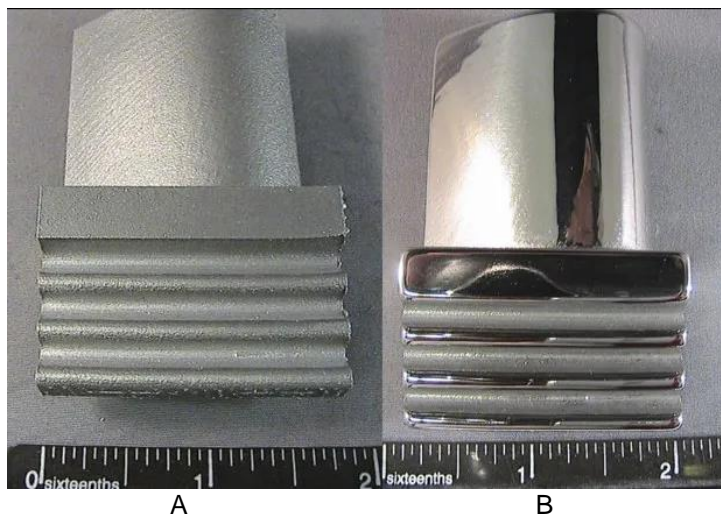


Kuva 9. 3D-tulostuksen avulla valmistettävän kappaleen vaihtoehtoisia asentoja. Tukirakenteita vaaditaan paljon (a), jonkin verran (b) tai ei lainkaan. (Jiang ym., 2018)

Kuten kuvasta 9 nähdään, jotta vaakasuorien pintojen tulostaminen olisi mahdollista, on käytettävä tukirakennetta, joka irrotetaan kappaleesta tulostuksen päätyttyä ((a) ja (b)). Tavoitteena on kuitenkin tulostaa kappale sellaisessa asennossa, jossa tukirakenteita ei tarvita (c). Tämän jälkeen tulostusolosuhteet, kuten lämpötila, kerrospaksuus ja tulostusnopeus, säädetään optimaaliseksi. Prosessi voi kestää tunteista päiviin. Tulostuksen jälkeen osa jäähdytetään, irrotetaan alustasta ja valmistellaan jälkikäsittelyä varten.

Jälkikäsittely on tärkeä vaihe teollisessa 3D-tulostuksessa, ja se vaikuttaa merkittävästi valmiin kappaleen toiminnallisuuteen ja ulkonäköön. Ensimmäinen vaihe on mahdollisten tukirakenteiden poistaminen, mikä tehdään mekaanisesti, kemiallisesti tai vastaavalla menetelmällä. Erityisesti metalliosille suoritetaan usein lämpökäsittelyjä, kuten jännitystenpoisto, jotta sisäiset jännitykset saadaan purettua ja materiaalin ominaisuudet vakautettua. Pinnanviimeistelyvaiheessa kappale voidaan hioa, kiillottaa, koneistaa tai pinnoittaa halutun pinnanlaadun saavuttamiseksi. Jälkikäsittely vaikuttaa esimerkiksi komponentin mittatarkkuuteen, mekaanisiin ominaisuuksiin ja esteettisyyteen, ja se voi viedä jopa enemmän aikaa kuin itse tulostusprosessi. Oikein suunniteltu jälkikäsittely takaa, että tulostettu kappale täyttää teolliset laatustandardit ja käyttövaatimukset. (Diniță ym., 2023; Mahmood ym., 2022; Peng ym., 2021) Kuvassa

10 on esitelty 3D-tulostettu kappale ennen jälkikäsittelyä ja sama kappale jälkikäsittelyn jälkeen (Bel Air Finishing, 2023).



Kuva 10. 3D-tulostettu osa ennen jälkikäsittelyä (A) ja sen jälkeen (B). (Bel Air Finishing, 2023)

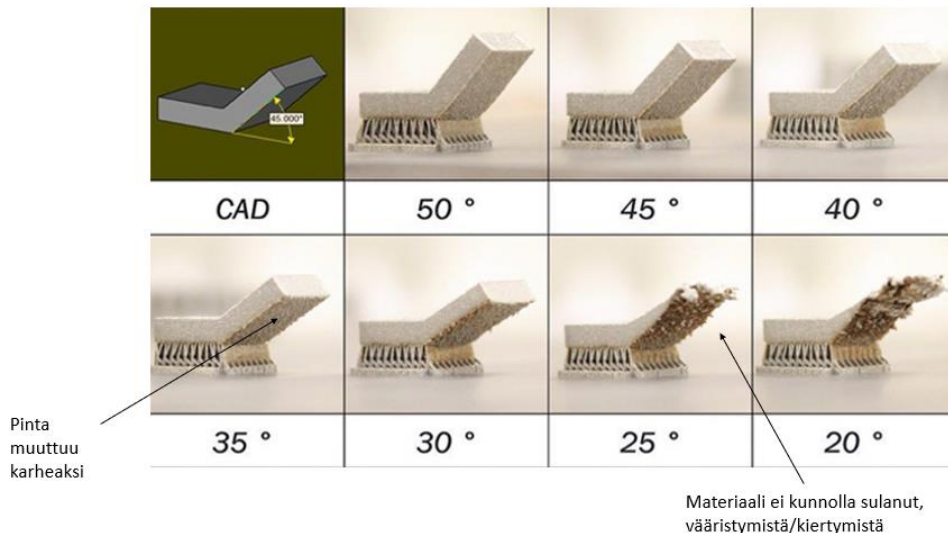
Kuvasta 10 voidaan havaita jälkikäsittelyn vaikutus kappaleen pinnanlaatuun silmämääräisesti arvioituna. Sama voidaan todeta myös pinnankarheuden aritmeettisen keskipoikkeaman (R_a -arvo) mukaan mitattuna. Mikäli 3D-tulostettu kappale ei täytä laatuvaatimuksia esim. pinnankarheus- tai mittatarkkuusvaatimusten suhteen, voidaan useimmissa tapauksissa haluttuun lopputulokseen päästä jälkikäsittelyjen avulla.

3.3 Mahdollisuudet ja haasteet

Edellä on jo kerrottu teollisen 3D-tulostuksen tunnusomaisin etu perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna: monimutkaiset rakenteet, joita on erittäin vaikea tuottaa muilla valmistusmenetelmillä. Taidokas muotoilu ei kuitenkaan yleensä ole tarkoituksellista, vaan sillä on myös selkeä funktio. 3D-tulostuksen avulla tuotteessa voidaan hyödyntää verkkomaisia sekä kennomaisia rakenteita. Tällaisten ratkaisujen käyttö vähentää paitsi tuotteen painoa, myös sen valmistuskustannuksia — sekä tuotantoon kuluva aikaa. Hyvällä suunnittelulla voidaan päästä huomattaviin säästöihin tuotantokustannuksissa. Toisaalta ilman osaavaa suunnittelua voidaan tämä etu hukata helpostikin. Toinen merkittävä etu 3D-tulostusta hyödynnettäessä on suunnitella tuote siten, että osien määrää voidaan merkittävästi vähentää. Tämä puolestaan paitsi vähentää tuotantokustannuksia, myös lisää lopullisin tuotteen toimintavarmuutta. Jos perinteisillä valmistusmenetelmillä lopullinen tuote on koostunut useasta kymmenestä kokoamista vaativasta osasta, on helppo nähdä 3D-tulostuksen

edut, jos osien määrää saadaan vähennetyksi muutamaan kappaleeseen tai jopa yhteen ainoaan. (Scott, 2023)

3D-tulostamisessa on joitain rajoituksia muihin valmistusmenetelmiin verrattuna. Yksi näistä on se, ettei vaakasuoraa pintaa pysty valmistamaan ilman tukea alapuolelta. Loivia kulmia pystytään tulostamaan, kunhan seuraava kerros saa riittävästi tukea alemmasta. Myös reikien tulostus pystysuunnassa onnistuu, jos reiät ovat pieniä. Varsinkin metallien teollisen 3D-tulostuksen merkittävimmät rajoitteet liittyvät käytettäviin tulostuskulmiin. Yleisesti ottaen tulostuksen onnistumiseen vaaditaan vähintään 45° tulostuskulma suhteessa vaakatasoon. Kun seuraava kerros on vähintään 45° kulmassa edelliseen nähden, on tällä kerroksella riittävästi tukea alapuolella. Tätä pienempiä kulmia, roikkuvia rakenteita, kutsutaan englanninkielisellä nimellä overhang. On tosin mahdollista, että tulostaminen onnistuu myös pienemmillä kulmilla, ja joillain materiaaleilla on päästy hyvinkin pieniin tulostuskulmiin laadun juurikaan siitä kärsimättä. Yleisesti ottaen suunnittelussa kannattaa kuitenkin pitää kiinni edellä esitetystä säännöstä. Pienemmillä kulmilla kappaleen pinnanlaatu on usein huonompaa. Materiaalin sulamisesta tulee epätasaista ja lämpöjännitys kasvaa, koska kappaleeseen tuotu lämpö ei pääse kunnolla poistumaan. Seurauksena on muodon vääristymiä siten, että osittain sulanut kerros taipuu ylöspäin. (Garaigordobil ym., 2021; Mantovani ym., 2021; Yuan ym., 2025) Tätä ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 11.



Kuva 11. Overhang-rakenteita ja niistä seuraavaa pinnankarheutta, epätäydellistä sulamista sekä vääristymiä metallien lisäävässä valmistuksessa (Carlota, 2020).

Kuten kuvasta 11 voidaan havaita, pinnan laatu sekä kappaleen geometria alkaa suuresti kärsimään overhang-rakenteiden myötä. Pinnan karheus alkaa silmännähtävästi kasvamaan, kun kulma on alle 45°, ja kulmilla 20–25° kappaleen

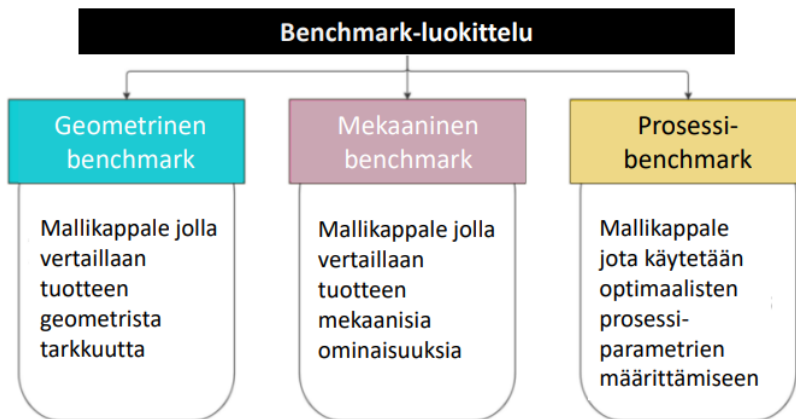
muoto on jo selvästi vääristynyt. Tämä johtuu em. epätasaisesta sulamisesta ja lämmöntuonnin aiheuttamasta vääntymisestä.

Lisäksi kuvasta 11 voidaan havaita, ettei pinnanlaatu ole yhtä hyvä kuin mitä koneistamalla valmistetulla kappaleella olisi. Toisaalta lisäävässä valmistuksessa pinnanlaatu on tunnetusti melko karhea, joten hyvän pinnanlaadun saavuttaminen vaatii yleensä jälkikäsittelyä. Pinnanlaatuun liittyvät vaatimukset riippuvat tietenkin käyttötarkoituksesta. Aina pinnan sileys ei ole kovin tärkeää, eikä jälkikäsittely vain näön vuoksi ole myöskään yleensä perusteltua.

3.4 Benchmark-kappaleet

Teollisessa 3D-tulostuksessa käytettävät benchmark-kappaleet ovat standardoituja malleja, joita käytetään vertailemaan eri tulostusmenetelmien, materiaalien ja laitteiden suorituskykyä. Ne voivat sisältää yksinkertaisia geometrioita, kuten kiinteitä laatikoita, kulmia, reikiä tai tarkkoja mittauspintoja. Näiden kappaleiden avulla testataan tulostustarkkuutta, pinnanlaatua, lujuutta ja muita mekaanisia ominaisuuksia. Benchmark-kappaleet auttavat arvioimaan ja optimoimaan tulostusprosessia sekä vertailemaan eri laitteiden ja materiaalien toimivuutta käytännön sovelluksissa.

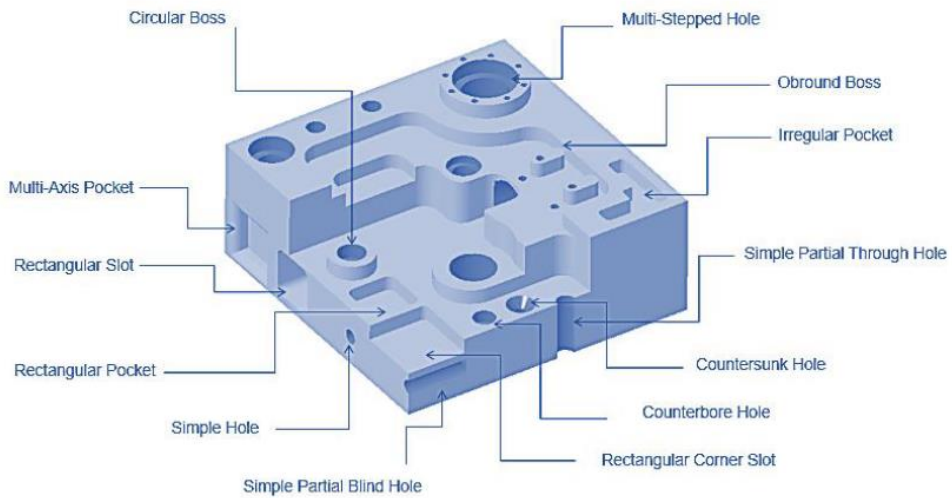
Teollisen 3D-tulostuksen benchmark-kappaleet voidaan jaotella kolmeen eri luokkaan (Mahesh, 2005). Nämä luokat ovat: geometriset, mekaaniset sekä prosessi-benchmark-kappaleet (katso kuva 12).



Kuva 12. Teollisen 3D-tulostuksen benchmarkien luokittelu (Nadeem, 2024).

Mekaanisia benchmarkteja käytetään kuvattaessa tuotteen mekaanisia ominaisuuksia ja prosessi-benchmarkteja haettaessa optimaalisia valmistusparametreja. Tässä kehitystyössä keskityttiin ainoastaan ensimmäiseen eli geometrisiin benchmarkteihin aihepiirin laajuuden vuoksi. Tulostettujen kappaleiden

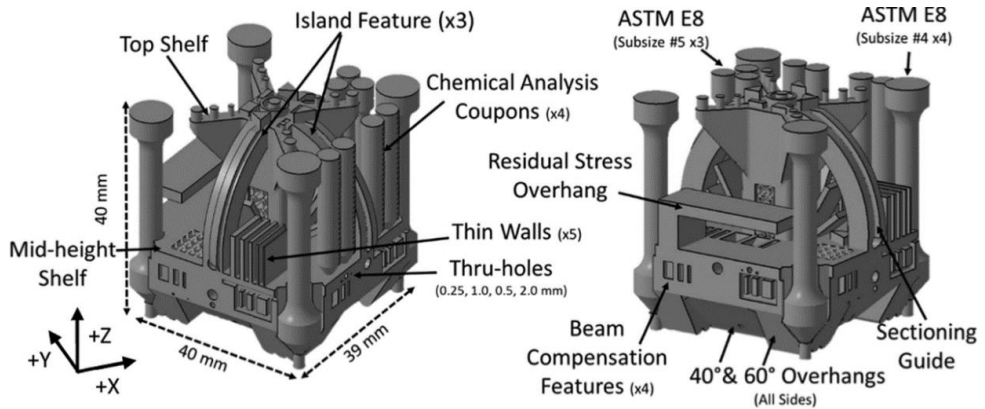
laadun arvioimista varten on olemassa kymmeniä erilaisia benchmark-kappaleita, joiden avulla voidaan mitata geometrinen tarkkuus, toistettavuus sekä yksittäisen piirteen pienintä mahdollista kokoa. Kuvassa 13 on esitetty tyypillinen, joskin yksinkertainen esimerkki tällaisesta benchmark-kappaleesta (Dama ym., 2024).



Kuva 13. Esimerkki yksinkertaisesta teollista 3D-tulostusta varten suunnitellusta benchmark-kappaleesta, johon on kerätty tärkeimpiä toiminnallisia piirteitä (Dama ym., 2024).

Benchmark-kappaleen on syytä sisältää mahdollisimman paljon piirteitä, joita esiintyy tulostettavassa metalliosassa. Toisaalta kappaleen olisi myös oltava mahdollisimman yksinkertainen, jotta sen antamaan mittausdataan voitaisiin luottaa. Kuvassa 13 esitetyssä kappaleessa on sekä pysty- että vaakasuorassa olevia vaihtelevan kokoisia reikiä ja ulkonevia osia. Myös vinoja rakenteita on mahdollista sisällyttää benchmark-kappaleeseen. Geometristä benchmark-kappaletta käytetään, kun halutaan tietää miten tarkasti tulostettu kappale vastaa oikeata mallia. Mikäli yksittäisen piirteen tarkkuus tai toistettavuus benchmark-kappaleessa poikkeaa oikeasta mallista enemmän kuin on mahdollista hyväksyä, todennäköisesti näin käy myös sen kappaleen kohdalla, joka on tarkoitus tulostaa. Näin tulostuksen onnistumisen mahdollisuuksia voidaan arvioida jo etukäteen ennen varsinaisen kappaleen tulostukseen siirtymistä.

Kuvassa 14 on esitetty toinen esimerkki metallien teollista 3D-tulostamista varten suunnitellusta benchmark-kappaleesta. (Taylor ym., 2021)



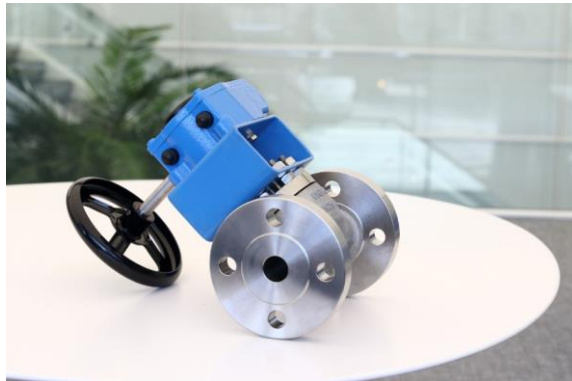
Kuva 14. Esimerkki monimutkaisesta teollista 3D-tulostusta varten suunnitellusta benchmark-kappaleesta. (Taylor ym., 2021)

Kuvan 14 kappale on esimerkki erittäin monimutkaisesta benchmark-kappaleesta, jota käyttämällä saa huomattavasti enemmän tietoa tulostuksen laadusta kuin edellisessä kuvassa esitetyllä benchmark-kappaleella — ainakin teoriassa. Monimutkaisten kappaleiden kanssa täytyy pitää mielessä niissä olevien piirteiden toistettavuus sekä mittaustarkkuus. Eräs erityinen huolenaihe benchmark-kappaleen mittatarkkuuteen liittyen nousee esille: Miten voidaan sulkea pois alempien kerrosten vaikutus näiden päälle tulostettaviin kerroksiin? Kuinka luotettava tällainen benchmark-kappale lopulta on? Tässä onkin suunnittelun haaste: miten luoda kappale, josta saa toisaalta paljon informaatiota, mutta jonka antama informaatio on myös luotettavaa?

Teollisessa 3D-tulostuksessa benchmark-kappaleiden rooli tulee kasvamaan, erityisesti monimateriaalitulostuksen ja biotulostuksen kehittyessä. Monimateriaalitulostus mahdollistaa useiden eri materiaalien yhdistämisen samaan kappaleeseen, mikä tuo uusia mahdollisuuksia tuotesuunnitteluun sekä komponenttien optimointiin. Benchmark-kappaleet, jotka on suunniteltu testaamaan eri materiaalien yhdistämistä, auttavat arvioimaan tulostustarkkuutta ja materiaalien yhteensopivuutta. Tämä kehitys parantaa tuottavuutta ja suorituskykyä teollisessa tuotannossa, erityisesti elektroniikassa, ilmailussa ja autoteollisuudessa. Biotulostus puolestaan avaa uusia mahdollisuuksia lääketieteessä, kuten bioimplanttien valmistuksessa. Tulevaisuudessa benchmark-kappaleet voivat sisältää biomateriaaleja, jolloin ne toimivat myös testausvälineinä biotulostuksen tarkkuuden ja toimivuuden arvioimisessa. Nämä kehityssuunnat tekevät teollisesta 3D-tulostuksesta entistä monipuolisemman ja tehokkaamman valmistusmenetelmän.

3.5 Esimerkkejä käyttökohteista

Esimerkkinä teollisen 3D-tulostuksen käytöstä suomalaisessa teollisuudessa voi mainita entisen Neles Oyj:n (nykyisin Valmet Flow Control Oyn) tuottamat venttiiliosat (kuva 15). Vertailtaessa perinteisin menetelmin valmistettuja venttiilejä, 3D-tulostettujen komponenttien on huomattu tarjoavan paremmat virtausominaisuudet, vähäisemmän melun sekä lyhyemmän läpimenoajan, mikä mahdollistaa tuotteiden nopeamman räätälöinnin asiakaskohtaisiin tarpeisiin ja tuo näin osille merkittävää lisäarvoa. (Valmet Oyj, 2020 ja 2021)



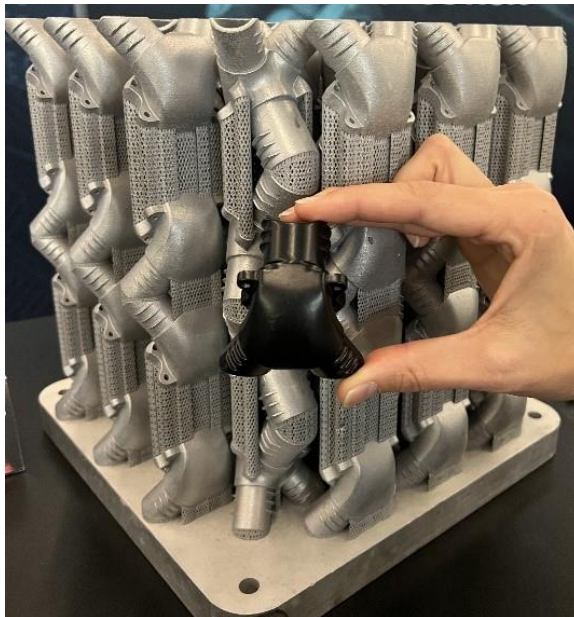
Kuva 15. Venttiili, joka on valmistettu Valmetin lisäävällä valmistusmenetelmällä. Kuvan oikeudet (lähde (Valmet Oyj, 2021)) omistaa Valmet ja kuvan julkaisuun saatu lupa Valmetilta.

Lisäävä valmistus voi olla kannattavaa myös ei-räätälöityjen tuotteiden valmistuksessa, etenkin kun tuotantosarjat ovat suhteellisen pieniä; tällöin vältetään työkalujen, kiinnitystelineiden ja muun tuotantolinjan rakentamiselta, ja lisäävän valmistuksen mahdollistamalla suunnittelunvapaudella voidaan samalla parantaa tuotteen suorituskykyä. Esimerkiksi John Deer Forestry Oy suunnitteli yhteistyössä Etteplan Oyj:n kanssa metsätyökoneen hydraulikkalohkon (kuva 16), joka minimoi painehäviöt, on helpompi asentaa sekä huoltaa ja käyttää 60 % vähemmän materiaalia perinteisesti valmistettuun lohkoon verrattuna. (Etteplan Oyj, ei pvm.-a)



Kuva 16. John Deer Forestrylle uudelleensuunniteltu, lisäävällä valmistuksella tuotettu hydraulikkalohko. Kuvan käyttöön lähteen (Etteplan Oyj, ei pvm.-a) mukaan saatu lupa Etteplanilta.

Toinen Etteplanin referenssi kertoo, että joissain tapauksissa suuremmatkin tuotantosarjat voi olla kannattavaa tuottaa lisäävällä valmistuksella; robottihiomakoneen pölynpoistokanavan (kuva 17) tuotantokustannusten kerrotaan pudonneen jopa 40 % kun se suunniteltiin uudelleen ja tuotettiin lisäävällä valmistuksella, lyhentäen osan tuotantoketjua ja materiaalihävikkiä — samalla virtausominaisuuksia parantaen. (Etteplan Oyj, ei pvm.-b)



Kuva 17. Lisäävällä valmistuksella tuotettuja pölynpoistokanavia. Taustalla osat vastavalmistetussa muodossaan, yhä kiinni rakennusalustassa, josta osat irrotetaan sahaamalla ja jälkikäsitellään. Lopullinen osa mustaksi maalattuna etualalla. Kuvan käyttöön lähteen (Etteplan Oyj, ei pvm.-b) mukaan saatu lupa Etteplanilta.

Lopputuotteiden lisäksi 3D-tulostuksella on merkittäviä etuja erilaisten tuotantovälineiden valmistuksessa. Nämä voivat olla muotteja, räätälöityjä työkaluja, telineitä, tai virtauskomponentteja. Seuraavat kuvat 18–20 ovat yritysten referenssitapauksia 3D-tulostusteollisuuden suurimmalta messulta (Formnext Saksa 2024). Kuvassa 18 on SSAB:n terästehtaalte Delva Oy:n 3D-tulostama polttin, joka on tehty korvaamaan perinteiset polttimet johtuen niiden epätasaisesta lämpöjakaumasta ja lyhyestä eliniästä.



Kuva 18. 3D-tulostettu terästehtaan polttimen prototyyppi. (Kuva: Erik Haapa)

3D-tulostaminen mahdollisti polttimen kaasuvirtauksen ja lämpöjakauman optimoinnin simulointityökalujen avulla. Kuvan 18 polttin on jauhepetisulatuksen monimateriaalitulostuksen mahdollisuutta demonstroiva prototyyppi, joka on tulostettu osittain ruostumattomasta teräksestä ja osittain kuparista. Käyttötesteissä polttimen elinikä pitenikin moninkertaisesti perinteisiin verrattuna, vähentäen huoltoseisokkien määrää.

Myös muoveilla on paikkansa teollisessa 3D-tulostamisessa. Kuvassa 19 nähdään muovista tulostettu muotti, jota käytetään ruokapakkauksien taiteluun.



Kuva 19. PA12-muovista (Nylon) 3D-tulostettu pahvipakkauksen muotti. (Kuva: Erik Haapa)

Kuvan 19 muotin on tulostanut Wehl Green -niminen yritys muovin jauhepetisulatusmenetelmällä. Tällä menetelmällä suunnittelua rajoittavia muotoja on vain hyvin vähän, ja toisaalta menetelmä voi olla melko tuottelias. 3D-tulostettu muotti on monissa tapauksissa jopa edullisempi kuin perinteisesti valmistettu, johtuen pienistä tuotantomääristä ja uniikkien versioiden läpimenoajan lyhydestä. 3D-tulostamalla muotin design voi olla joustava, ja siihen voidaan helposti integroida erilaisia kappaleen asettelua ja irrotusta helpottavia ominaisuuksia.

Valumuoteissa 3D-tulostuksen edut pääsevät vielä vahvemmin esiin, sillä monilla tulostusmenetelmillä voidaan muottiin integroida hyvinkin monimutkaisia, kappaleen muotoa mukailevia jäähdytyskanavia, joilla kappale jäähtyy tasaisemmin ja nopeammin, parantaen tuottavuutta. Joillakin menetelmillä voidaan nykyään myös tulostaa varsin laadukkaasti keraameja, mikä mahdollistaa 3D-tulostuksen käytön yhä useammassa valumenetelmässä. 3D-tulostuksella on myös käyttökohteita hiekkavalussa, kuten nähdään kuvassa 20.



Kuva 20. Vasemmalta oikealle: muovista tulostettu hiekkavalumuotin malli, itse hiekkavalumuotti, ja muotilla valettu metallikappale. (Kuva: Erik Haapa)

Kuvan 20 hiekkavalumuotti on 3D-Systems-laittevalmistajan referenssitapaus, jossa on saatu aikaan varsin monimutkainen geometria useine kanavineen tulostamalla malli valokovetusmenetelmällä. Tulostetun mallin etu on suunnitteluvapaus ja nopeus, jolla erilaisia malliversioita voidaan tehdä.

4 Esimerkkitapauksia teollisesta 3D-tulostuksesta

Esimerkkitapaukset ovat keskeisessä roolissa teollisen 3D-tulostuksen käyttöönotossa, sillä ne tarjoavat konkreettista näyttöä teknologian hyödyistä ja soveltuvuudesta. Käytännön tutkimukset osoittavat, miten 3D-tulostus voi vähentää valmistuskustannuksia, nopeuttaa tuotantoa ja pienentää materiaalihävikkiä verrattuna perinteisiin menetelmiin. Ne auttavat yrityksiä ymmärtämään, missä sovelluksissa ja toimialoilla teknologia tuo todellista lisäarvoa, ja tukevat investointipäätösten tekemistä. Esimerkkitapaukset paljastavat myös teknologian rajoitukset ja riskit, kuten toleranssien hallinnan ja jälkikäsitteilyn tarpeet, jolloin odotukset pysyvät realistisina. Lisäksi ne avaavat uusia liiketoimintamahdollisuuksia, kuten massakustomoinnin, hajautetun varaosatutuotannon ja kestäväen kehityksen mukaiset ratkaisut.

4.1 Kaiutinkotelon 3D-tulostus

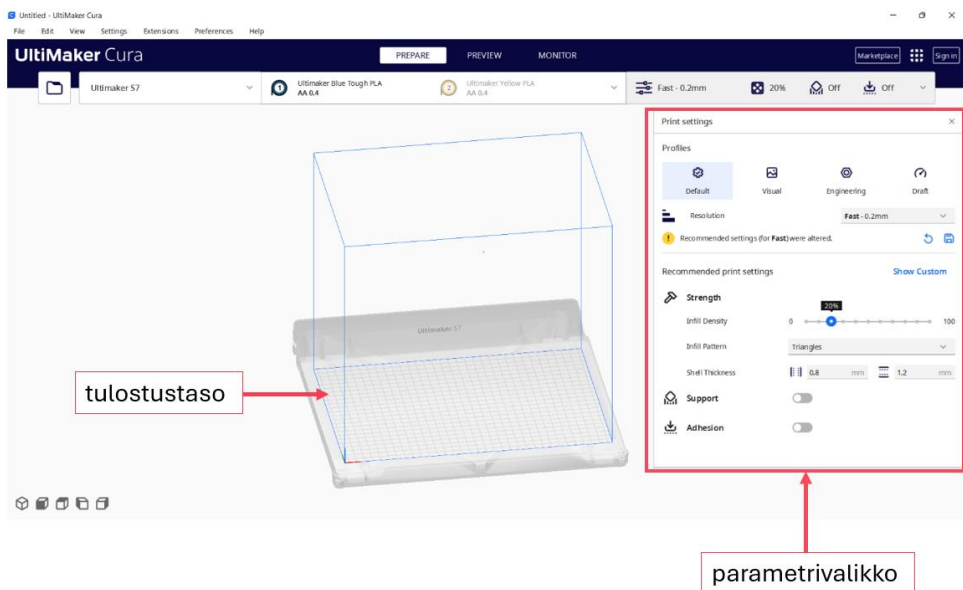
Lisääntynyt huoli materiaalien ja tuotteiden ympäristövaikutuksista on lisännyt kiinnostusta erityisesti uusiutuviin materiaaleihin sekä uusiin valmistustekniikoihin, kuten ainetta lisäävään valmistukseen. 3D-tulostus luokitellaan kestäväksi ja materiaalia säästäväksi teknologiaksi, sillä valmistuksessa syntyy jätettä huomattavasti vähemmän kuin monissa muissa valmistustavoissa.

Puuta käytetään yleisesti kaiutinkoteloiden rakennusmateriaalina, mutta materiaalia säästäväksi teknologiaksi puuvalmisteista kaiutinkoteloä tuskin voi kutsua. Yhdessä ReNeSound-nimisen yrityksen kanssa toteutettiin kehitystyötä jonka tarkoituksena oli selvittää, voisiko kaiutinkotelon valmistaa jostakin uusiutuvasta materiaalista 3D-tulostinta käyttäen. Kehitystyön tavoitteena oli ennen kaikkea selvittää, soveltuuko biopohjainen puufilamentti vesitiiviin kaiutinkotelon 3D-tulostamiseen. Kaiutinkotelo suunniteltiin niin, että vahvistinyksikkö sijoitettaisiin tulostamisen jälkeen kotelon sisälle sulkemalla kotelo vesitiiviillä kannella.

Biopohjaiseksi tulostusmateriaaliksi valittiin FormFuturan ”EasyWood Pine” 2.85 mm paksuinen filamentti. Tämä filamentti on PLA-pohjainen ja sisältää 40 painoprosenttia puupartikkeleita. PLA-muovi eli polylaktidi on yleinen 3D-tulostuksessa käytettävä materiaali, jonka etuina ovat halpuus, helppokäyttöisyys sekä biohajoavuus.

Kehitystyöhön liittyvät tulostukset toteutettiin yhteensä kahdeksan päivän aikana. Eri tulostuskertojen välissä mallia paranneltiin useamman kerran tuotekehitystyölle tyypilliseen tapaan. Ensimmäiset versiot tuotteesta tulostettiin käyttäen halvempaa ja ominaisuuksiltaan tutumpaa materiaalia, eli PLA-filamenttia. Kun tuotteen malli oli saatu toimivaksi, siirryttiin käyttämään puufilamenttia. Tulostamiseen käytettiin UltiMaker 3 -tulostinta. Tuotesuunnittelu ja tuotteeseen liittyvät muutokset toteutettiin ReNeSoundin toimesta.

Tuotesuunnittelun tuloksena saadut digitaaliset 3D-mallit tuotiin .stl-formaatissa UltiMaker Cura -ohjelmaan. Cura on niin kutsuttu viipalointiohjelma (eng. "slicer") jolla malli "viipaloidaan" kerroksiin, säädetään tulostusparametrit, ja luodaan joka kerrokselle tulostimen tarvitsemat G-koodi-työkaluradat. Tyypillisiä säätöjä ovat esimerkiksi kappaleen tulostusasennon muuttaminen sekä kerrospaksuuden, tulostusnopeuden tai suuttimen lämpötilan säätäminen. Viipalointi ja työkaluratojen luonti on pitkälle automatisoitua, eikä parametrien säätö ole aina edes tarpeen. Parametrien säädöllä voidaan kuitenkin optimoida tulostusaikaa, materiaalikäyttöä, sekä osan ominaisuuksia kuten pinnanlaatua ja lujuutta. Curan kaltaiset viipalointiohjelmat kykenevät myös ajoittain tarvittavien tukirakenteiden luomiseen automaattisesti. Tukirakenteita ei siis tyypillisesti suunnitella itse. Kuvassa 21 on esimerkinomaisesti esitelty UltiMaker Cura -ohjelman käyttönäkymää.



Kuva 21. UltiMaker Cura -ohjelman käyttönäkymä.

Kuvassa 21 esitetyssä UltiMaker Cura -ohjelmiston käyttönäkymässä vasemmalle puoliskolle avautuu tulostustaso, jolle tulostettava valmiiksi mallinnettu kappale

asetellaan ennen sen viipalointia. Kuvan oikeassa reunassa on parametrivalikko, jonka avulla tulostusparametreja voidaan säätää sopiviksi.

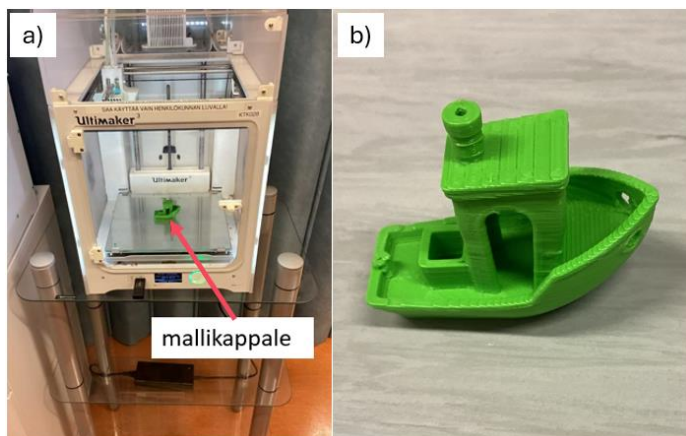
Kehitystyössä ensimmäisenä tulostettiin mahdollisimman yksinkertainen kappale, jotta voitiin varmistua 3D-tulostimen toimivuudesta. Tämä on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22. UltiMaker 3 -tulostin sekä ensimmäinen PLA-filamentista tulostettu yksinkertainen kappale.

Kuvassa 22 näkyvän yksinkertaisen kappaleen tulostamisella testattiin prosessin toimivuutta. Jos tässä vaiheessa ilmenisi ongelmia, ei olisi mitään syytä yrittää kalliimmalla ja haastavammalla materiaalilla ennen kuin ongelma olisi ratkaistu.

Tulostamisen onnistumisen arvioimista varten on kehitetty monenlaisia mallikappaleita, mutta yhteistä niille on se, että niihin on mahdutettu mahdollisimman paljon vaikeasti tulostettavia muotoja. Vaikeasti tulostettavia muotoja ovat esimerkiksi vinot ja kaarevat pinnat, loivat tulostuskulmat sekä reiät ja muut pienet yksityiskohdat. Tässä tapauksessa mallikappaleena käytettiin pientä laivan muotoista kappaletta nimeltä 3DBenchy (CreativeTools, ei pvm.). Kuvassa 23a on esitetty 3DBenchy UltiMaker 3 -tulostimessa ja kuvassa 23b on esitelty 3DBenchy lähempää.



Kuva 23. a) Tulostettu 3DBenchy -mallikappale UltiMaker 3 -tulostimessa. b) Tulostettu 3DBenchy -mallikappale lähikuvassa.

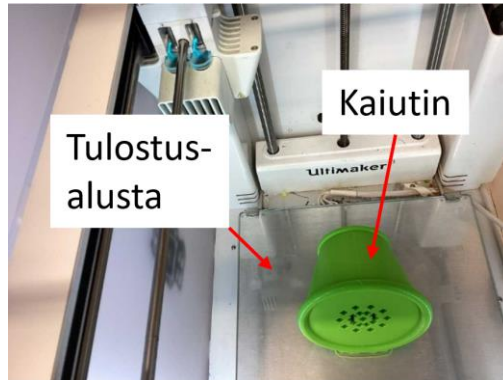
Kuten kuvasta 23b näkyy, 3DBenchy sisältää paljon kaarevia ja vinoja osia sekä pieniä yksityiskohtia. Mikäli näiden tulostaminen onnistuu riittävän hyvin, on todennäköistä, että myös varsinaisen kappaleen tulostaminen onnistuu. Yksinkertaisen kappaleen ja 3DBenchyn onnistuneen tulostamisen jälkeen siirryttiin testaamaan varsinaisen tuotteen eli kaiutinkotelon tulostamista. Kaiutinkotelon 3D-malli on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Kaiutinkotelon 3D-malli (Jokinen, 2024).

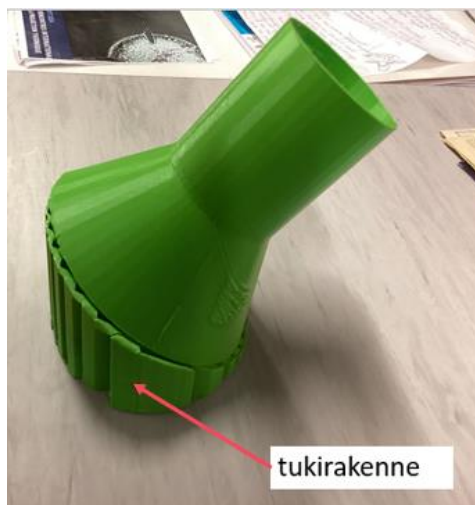
Kuvassa 24 esitetyn kaiutinkotelon (useampia versioita) tulostusaika oli tyypillisesti 5–8 tuntia, joten tulostuksen onnistumisen toteamiseen meni pitkä aika. Alkuun kuitenkin tulostusta seurattiin siihen asti, että jokin vaikeampi muoto kappaleessa oli tulostettu eli noin 1–1½ tuntia. Mikäli tässä vaiheessa osoittautuisi, että jotain

parametria olisi syytä muuttaa, tulostamisen keskeyttämällä pystyttäisiin säästämään aikaa ja materiaalia. Kuvassa 25 on esitetty PLA-filamentista valmistettu kaiutinkotelon ensimmäinen versio. Kotelon tulostettu vaakasuorassa asennossa.



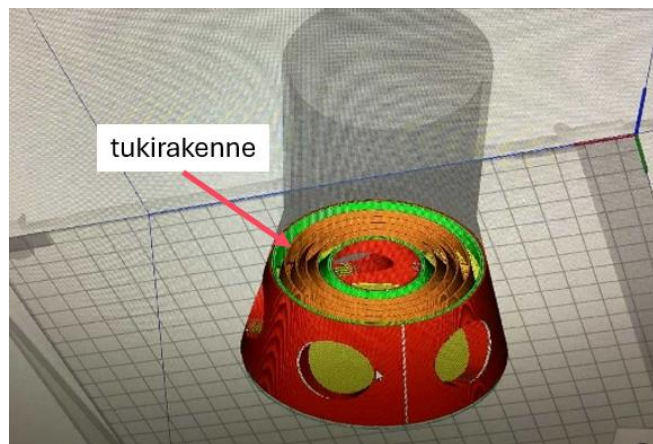
Kuva 25. PLA-filamentista tulostettu kaiutinkotelon ensimmäinen versio. Kotelon tulostettu vaakasuorassa asennossa.

Kuvassa 25 esitettyä katkaistua kartiota oli tarkoitus jatkaa liittämällä siihen putkimainen rakenne, johon vahvistinyksikkö sijoitetaan. Tällöin kuitenkin ongelmaksi muodostuisi vaakasuoran pinnan tulostaminen, joka ei onnistuisi ilman tulostuskulman muuttamista tai sisäisiä tukirakenteita. Muuttaessa tulostuskulmaa ulkoiset tukirakenteet tulevat tarpeeseen. Tukirakenteita voidaan suunnitella siten, että ne ovat helppo poistaa valmiista kappaleesta. Toisaalta tukirakenteen käyttö myös lisää materiaalikustannuksia sekä tulostusaikaa. Kuvassa 26 on esitetty versio kaiutinkotelosta, joka on tulostettu myöhemmin poistettavaa ulkoista tukirakennetta käyttäen.

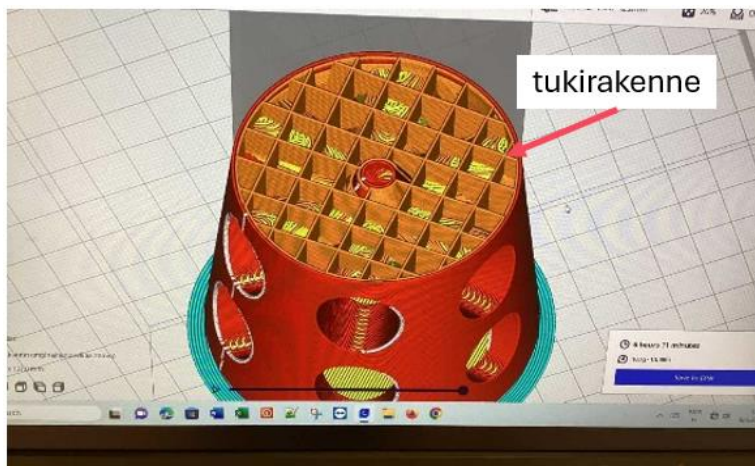


Kuva 26. Ulkoisen tukirakenteen avulla 3D-tulostettu kaiutinkotelo.

Kuvassa 26 esitettyyn kaiutinkotelon versioon on lisätty lieriö vahvistinyksikköä varten. Pystyasennossa tulostettaessa katkaistun kartion ja lieriön yhtymäkohtaan jää sisäpuolelle vaakasuora pinta, jonka tulostaminen ei onnistuisi ilman jonkinlaista tukirakennetta. Vaakasuoran pinnan tulostaminen vaatii aina sen, että tulostettavan materiaalin alla on riittävä tuki. Kuvan 26 ratkaisulla, eli tulostuskulmaa muuttamalla, lieriön ja kartion välinen pinta on kulmassa, joka voidaan tulostaa. Tässä versiossa kuitenkin tukirakenteen tulostaminen lisää materiaalikustannuksia sekä tulostamiseen käytettyä aikaa. Lisäksi aikaa tarvittaisiin myös tukirakenteen poistamiseen, joten tämä ratkaisu ei vaikuta erityisen toimivalta. Kuvissa 27 ja 28 on kaksi ehdotusta sille, miten kaiutinkotelo voidaan tulostaa pystysuorassa hyödyntäen sisäisiä tukirakenteita. Tällöin ulkoisia, enemmän materiaalia kuluttavia tukirakenteita ei tarvita.

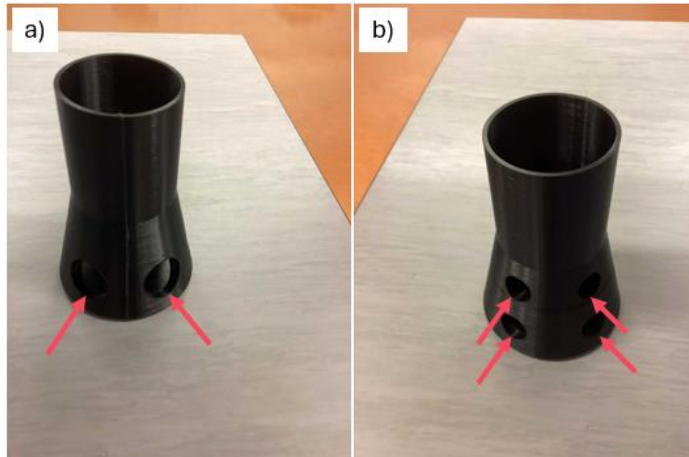


Kuva 27. UltiMaker Cura -ohjelmalla tehty poikkileikkaus ensimmäisestä sisäisestä tukirakenneversiosta, jossa on rengasmaisen tukirakenne.



Kuva 28. UltiMaker Cura -ohjelmalla tehty poikkileikkaus toisesta sisäisestä tukirakenneversiosta, jossa on ristikkomainen tukirakenne.

Kuvien 27 ja 28 versioissa vaakasuoran pinnan tulostamisessa vaadittavan tuen puuttuminen on ratkaistu sisäisellä tukirakenteella, jota ei myöhemmin poisteta. Näin pienten etäisyyksien tulostuksen pitäisi onnistua myös vaakasuoraan. Kuvan 27 versiossa on hyödynnetty rengasmaista sisäistä tukirakennetta, jonka lisäksi malliin on lisätty viisi isoa reikää helpottamaan äänen kulkeutumista ulos kaiutinkotelosta. Kuvassa 28 esitetyssä versiossa on hyödynnetty ristikkomaista sisäistä tukirakennetta ja lisätty toiset viisi reikää äänen kulkeutumista varten. Kuvassa 29a näkyy kuvan 27 kaiutinkotelo tulostettuna ja kuvassa 29b näkyy kuvan 28 kaiutinkotelo tulostettuna.



Kuva 29. a) Ensimmäinen versio sisäisillä tukirakenteilla ja isoilla rei'illä PLA-muovista valmistetusta kaiutinkotelosta. b) Toinen versio sisäisillä tukirakenteilla ja pienillä rei'illä kahdessa kerroksessa PLA-muovista valmistetusta kaiutinkotelosta. Reiät osoitettu nuolilla.

Silmämääräisesti arvioituna pinnanlaatu sekä tuotteen malli PLA-filamentista valmistetuissa versioissa vaikuttivat hyvältä, joten voitiin siirtyä tulostamaan kappaletta puufilamentista. Tätä varten piti vaihtaa tulostusmateriaali sekä määrittää uudet tulostusasetukset UltiMaker Cura-ohjelmaan. Kuvassa 30 on esitettyä puufilamentista valmistettu kaiutinkotelo.



Kuva 30. Puufilamentista valmistettu kaiutinkotelo.

PLA-filamentilla tulostettaessa havaittiin, että pinnanlaatu ei ole yhtä hyvä kuin esimerkiksi ruiskuvalumuotilla valmistettuna. Tämä on edelleen eräs 3D-tulostuksen heikkouksista verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Puu on kuitenkin materiaalina erilainen kuin muovi. Puun pinta on aina jossain määrin rosainen, joten FormFuturan EasyWood Pine -filamentin tulostusjälkeä voidaan pitää vähintäänkin tyydyttävänä ja luonnonpintaa muistuttavana. Kuvassa 31 on koottu yhteen eri versioita tulostetuista kaiutinkoteloista.



Kuva 31. Kaksi versiota mustasta PLA-filamentista valmistettua kaiutinkoteloita, kaksi versiota puufilamentista valmistettua kaiutinkoteloita sekä kaiuttimen vahvistinyksikkö.

Kuvassa 31 on esitetty kaksi versiota muovifilamentista ja kaksi versiota puufilamentista. Keskellä vahvistin, joka sijoitetaan ja suljetaan kaiutinkotelon sisään erikseen tulostettavalla kannella, joka kiinnitetään putken päähän liimaamalla. Tämän tapauksen tuloksena voitiin todeta, että 3D-tulostus on kaiutinkoteloitten valmistukseen sopiva menetelmä.

4.2 Kiväärituen saranamekanismin suunnittelu

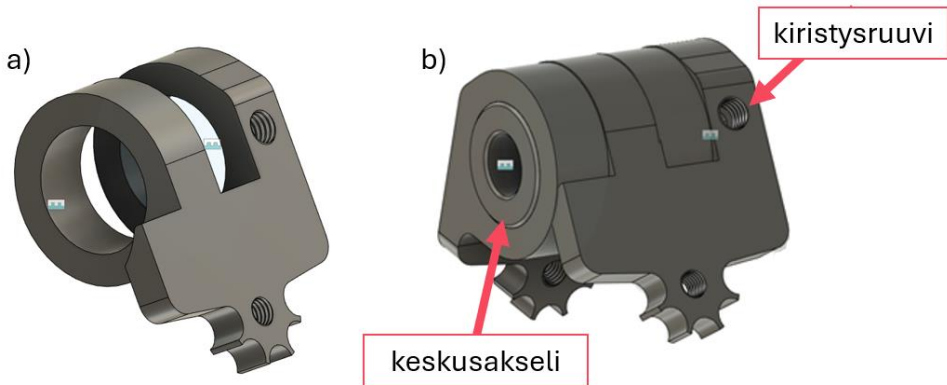
Tässä case-tapauksessa tarkoituksena oli suunnitella aikaisemmin perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettu osa uudelleen 3D-tulostukseen soveltuvaksi. Kyseessä oli kiväärituen saranamekanismi yritykselle nimeltä Harmation, ja osa kuuluu ampumaurheilussa käytettävään kivääriin. Tavoitteena oli suunnitella uudelleen saranamekanismi, joka olisi mahdollista valmistaa teollista 3D-tulostusta hyödyntäen kustannustehokkaammin kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä. Markkinoilla on tarjolla vain vähän bipod-mallisia kivääritukia, joissa kiväärituen jalkojen asentoa ja pituutta voidaan erikseen säätää. Eräs tällaisista malleista on kuvassa 32 esitetty malli.



Kuva 32. MDT CKYE POD -kiväärituki. (MDT CKYE-POD Gen2 Single Pull Short/PRS - Bipod, ei pvm.)

Kiväärituen teleskooppijalkojen valmistuskustannukset ovat melko alhaiset, mutta saranamekanismin valmistuksessa on omat haasteensa, sillä sen koneistus tulee kalliiksi useampiakselisen työstömenetelmän vuoksi. Kuvissa 33a ja 33b on esitetty

toimeksiantajan suunnittelema saranamekanismi, jossa kiväärituen molempia jalkoja voidaan säätää erikseen.

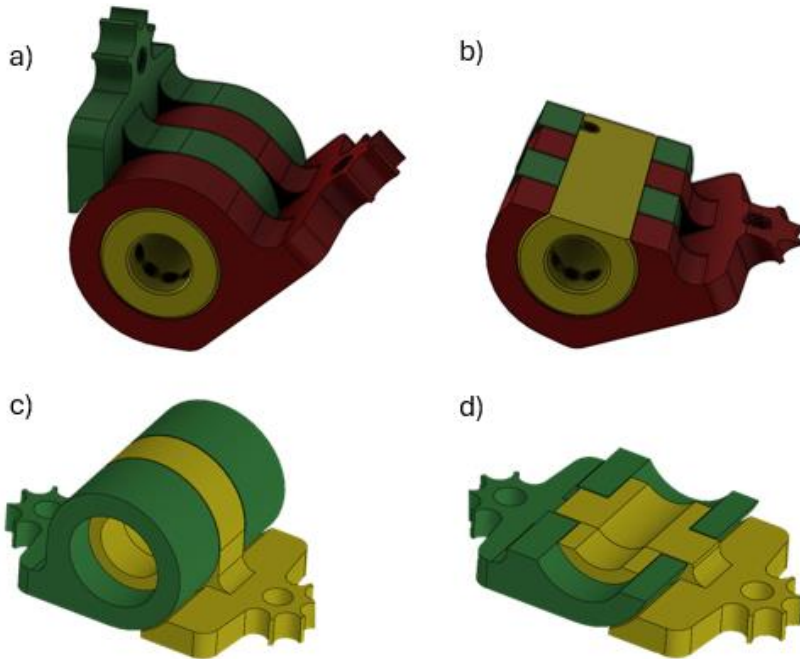


Kuva 33. a) Kiväärituen uudelleensuunnitellun saranamekanismin osa. b) Kiväärituen uudelleensuunniteltu saranamekanismi kokonaisuudessaan.

Kuvan 33b sarana koostuu kahdesta samanlaisesta osasta (kuva 33a) sekä keskusakselista. Keskusakseliin kiinnittyvä ruuvi toimii asennustukena, mahdollistaen säädön tiukkuuden. Osan muotoilu voi olla myös toisenlainen, mutta tuotteen toiminnallisuuden on työn toimeksiantajan toiveesta oltava samanlainen kuin kuvassa 32 esitetystä mallissa MDT CKYE POD.

Kokonaisuudessaan suunnitteluprosessi osoittautui työlääksi, sillä usein yhden ongelman ratkaiseminen toi ainakin yhden uuden lisää. Niinpä lopulliseen malliin – ainakin toistaiseksi – päädyttiin monien välivaiheiden kautta. Lopullinen saranamekanismi on tarkoitettu valmistettavaksi metallista, mutta 3D-tulostuksessa on usein tapana testata mallin toimivuutta ensin termoplastisen muovin, kuten PLA:n, avulla. Vasta kun malli on toimiva, on syytä edetä huomattavasti vaativampaan ja kalliimpaan metallin teolliseen 3D-tulostamiseen.

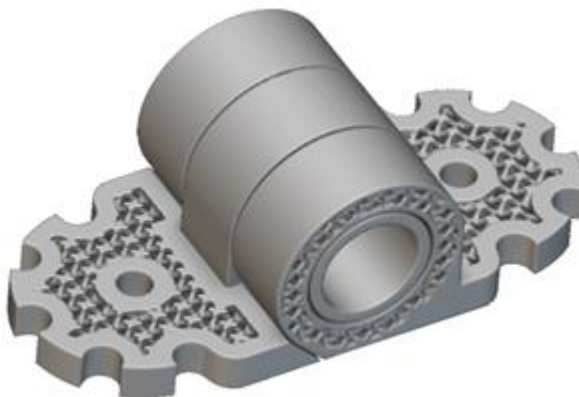
Uudelleensuunnittelun ensimmäisessä vaiheessa päätettiin vähentää osien määrää, ja samalla myös saranan painoa ja materiaalia. Alkuperäinen kahdesta identtisestä osasta sekä keskusakselista koostuva kokonaisuus muutettiin kaksiosaiseksi. Tämä muutos vähentää paitsi saranan massaa, myös valmistuskustannuksia ilman, että se vaikuttaisi tulostettavan kokonaisuuden toiminnallisuuteen. Kuvissa 34a ja 34b on esitetty alkuperäinen suunnitelma saranamekanismista. Vihreä ja punainen kuvastavat kahta identtistä osaa ja keltainen keskusakselia. Kuvat 34c ja 34d esittävät ensimmäistä uudelleensuunniteltua saranamekanismia, jossa keskusakseli on poistettu ja osat eivät enää ole identtiset.



Kuva 34. a) Alkuperäinen suunnitelma saranamekanismista. b) Poikkileikkaus alkuperäisestä saranamekanismista. c) Ensimmäinen versio uudelleensuunnitellusta saranamekanismista. d) Poikkileikkaus saranamekanismin ensimmäisestä uudelleensuunnitellusta versiosta.

Kuten kuvista 34 c ja d nähdään (keltainen osa), saranan painoa on kyetty pienentämään poistamalla materiaalia mekanismin toisesta osasta (kuvat 34 a ja b) ilman että sillä olisi vaikutusta mekanismin toimivuuteen. Kuvassa 34c esitetyn kiviärituen saranamekanismin materiaalia haluttiin edelleen vähentää, sillä se vähentäisi materiaalikustannuksia sekä valmistusaikaa. Tähän päästäisiin käyttämällä verkkomaisia rakenteita.

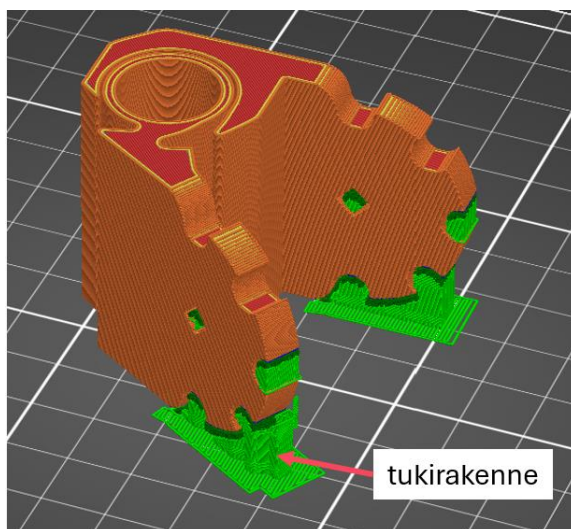
Kuvassa 35 on esitetty paranneltu toinen versio saranarakenteesta, jossa on käytetty 3D-tulostukselle tunnusomaista verkkorakennetta vähentämään materiaalia.



Kuva 35. Toinen versio uudelleensuunnitellusta kiväärituen saranamekanismista.

Kun tuotteen muoto on saatu suunnitelluksi, täytyy miettiä myös sen tulostamista. Saranamekanismia tulostaessa tulostuskulmasta huolimatta syntyy overhang-rakenteita, joten tukirakenteiden lisääminen on tässä vaiheessa suunnittelua välttämätöntä.

Kuvassa 35 esitetyssä kolmannessa versiossa kappaleeseen on lisätty ulkoisia tukirakenteita. Kuvassa näkyvät vihreät osat ovat myöhemmin poistettavia tukirakenteita.

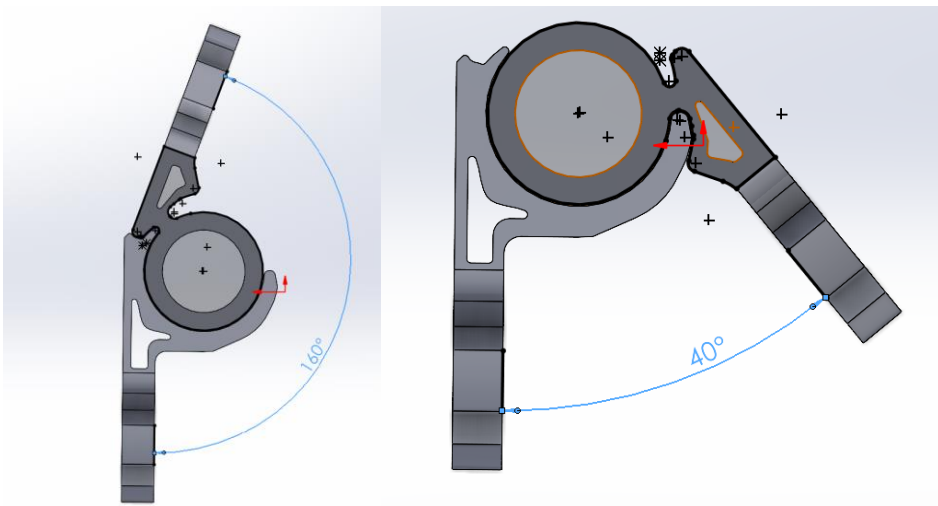


Kuva 36. Kolmas versio kiväärituen uudelleensuunnitellusta saranamekanismista.

Koska tukirakenteet (kuva 36) lisäävät tulostettavaa materiaalia sekä varsinkin jälkikäsittelyyn tarvittavaa aikaa, niiden käyttämistä pyritään välttämään. Tässäkin

tapauksessa tukirakenteita olisi jouduttu poistamaan useilta pinnoilta työkaluja hyödyntäen, mikä ei palvele tavoitetta. Mikäli lopullinen tuote olisi tarkoitus valmistaa muovista, tämä ratkaisu olisi ollut mahdollisuuksien rajoissa. Metallista valmistettuna tällaisen tuotteen jälkikäsitteily olisi kuitenkin niin työlästä ja lisäkustannuksia tuovaa, ettei saranan valmistaminen metallien teollista 3D-tulostusta hyödyntäen tulisi perinteisiä koneistusmenetelmiä halvemmaksi. Olisi siis kehiteltävä muu ratkaisu, jossa ulkoisia tukirakenteita ei tarvittaisi.

Ennen seuraavia versioita tuotteesta, muutama sana saranamekanismista: saranan ei ole tarkoituksenmukaista avautua 180° , kuten kuvissa 34a-d näkyvissä versioissa, vaan on parempi, että avautumiskulmaa on rajoitettu esimerkiksi kuvassa 37 esitetyllä tavalla. Tämä ominaisuus on huomioitu seuraavissa versioissa.



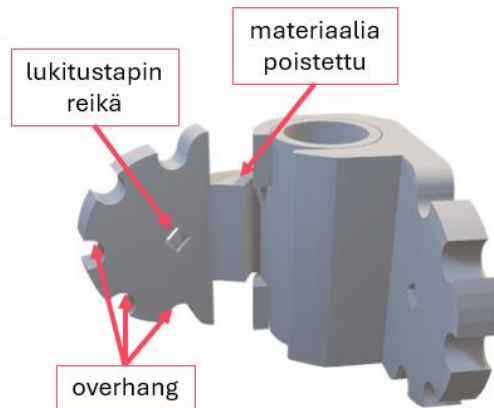
Kuva 37. Kiväärituen viides versio uudelleensuunnitellusta saranamekanismista ylhäältä kuvattuna.

Kuvasta 37 voidaan todeta, että tässä versiossa saranan avautumiskulma on rajoitettu välille 40° - 160° . Syy muutokseen on se, että kiväärituesta ei ole käytännön hyötyä hyvin pienillä tai hyvin suurilla kulmilla. Hyvin pienillä kulmilla tuki ei ole vakaa, hyvin suurilla kulmilla taas mekanismi ottaa kiinni maahan.

Kuvan 38 versio saranamekanismista on esitetty kolmiulotteisesti. Tässä neljännessä versiossa alun perin pyöreä lukitustapin reikä on muutettu nelikulmaiseksi, syynä aiemmin mainittu 45° sääntö. Mekanismista on pyritty tekemään entistä kevyempi poistamalla saranan toisesta osasta materiaalia, mutta tukirakenteiden käytöltä ei voida tässä versiossa välttyä. Muodoltaan pyöristetyn kolon muodostavat overhang-rakenteen kolmessa tapauksessa viidestä.

Overhang-rakenne tarkoittaa 3D-tulostettavaa osan osaa, joka ulottuu vaakasuunnassa ilman suoraa tukea alapuolelta. Kuvittele esimerkiksi hyllyn reuna tai ulkoneva osa, joka "roikkuu" ilmassa – tällainen rakenne on overhang. Teollisessa 3D-

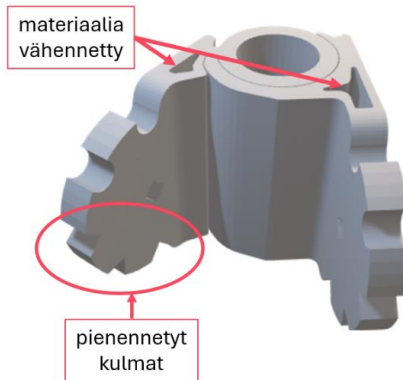
tulostuksessa, erityisesti metallien jauhepetisulatusmenetelmässä, overhangit voivat olla haastavia, koska ne eivät saa riittävästi tukea aiemmin tulostetuista kerroksista. Tämä voi johtaa huonoon pintalaatuun, vääntymiseen tai jopa tulostusvirheisiin. Siksi overhang-rakenteet vaativat erityistä suunnittelua ja usein tukirakenteita, jotta ne voidaan tulostaa onnistuneesti.



Kuva 38. Neljäs versio uudelleensuunnitellusta kiväätetyn saranamekanismista.

Kuvasta 38 voidaan havaita, että saranamekanismia on saatu kevennetyksi, mikä vähentää tuotantokustannuksia. Tukirakenteista luopuminen palauttaa kuitenkin edellä mainitun overhang-ongelman, mikäli mekanismi aiotaan tulostaa tässä asennossa. Ylempien kolojen tulostaminen kyllä onnistuisi, mutta alempien kolojen suhteen olisi tässä versiossa odotettavissa ongelmia.

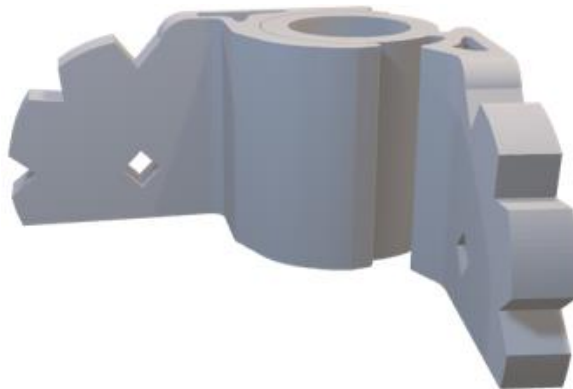
Kuvassa 39 on esitetty viides versio saranamekanismista. Tässä versiossa overhang-ongelmaa on vähennetty pienentämällä alimpien kolojen kulmia, jonka lisäksi materiaalia on vähennetty lisäämällä saranaosiin onttoja rakenteita. Koloissa olevan kulman pienentäminen johtaa tässä tapauksessa tilanteeseen, jossa overhang-rakenteissa ilmenevät ongelmat pienenevät.



Kuva 39. Viides versio kivaärituen uudelleensuunnittelusta saranamekanismista.

Kuten kuvasta 39 voidaan havaita, ei overhang-ongelmaan ole löytynyt toimivaa ratkaisua. Jos sarana olisi nelikulmainen, se voitaisiin tulostaa ilman tukirakenteita. Kuitenkin jo kuvassa 32 olevasta kaupallisesta mallista nähdään, että teleskooppijalan kiinnitysmekanismiin levyräkenteen on oltava pyöreä toiminnallisuutensa kannalta. Kiinnitysmekanismiin kolojen on oltava samalla etäisyydellä reiästä ja nelikulmainen levyrakenne tekisi teleskooppijalan kiinnitysmekanismista erittäin hankalan käyttää.

Kuvassa 40 on esitetty saranamekanismin kuudes versio, jossa overhang-ongelmaan löydettiin erilainen ratkaisu. Tässä versiossa saranamekanismia lyhennetään siten, että tulostetaan siitä vain n. 60 %. Näin tulostukseen tulee mukaan lukitustapin reikä sekä kolme lukituskoloa viidestä.

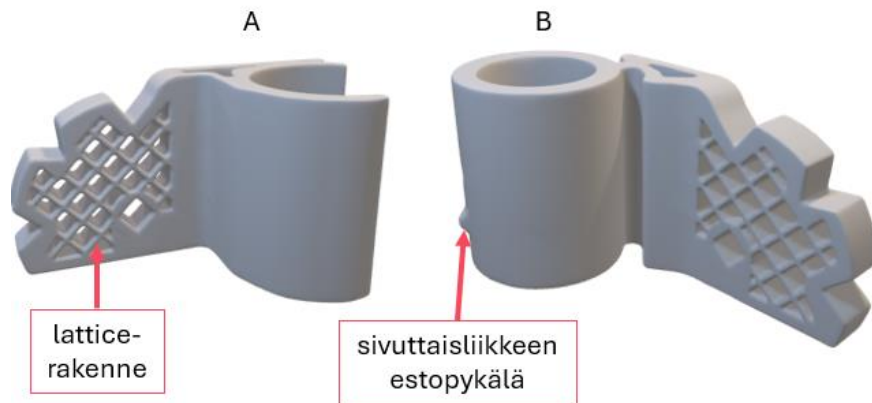


Kuva 40. Kuudes versio uudelleensuunnittelusta kivaärituen saranamekanismista.

Kuudennessa versiossa (kuva 40) pois jätettyjä koloja ei oikeastaan lopulta edes tarvita, sillä ylin ja toiseksi ylin kolo ovat toiminnallisesti samanlaisia poistettujen kanssa. Kaksi puuttuvaa asentoa saadaan mukaan yksinkertaisesti kääntämällä

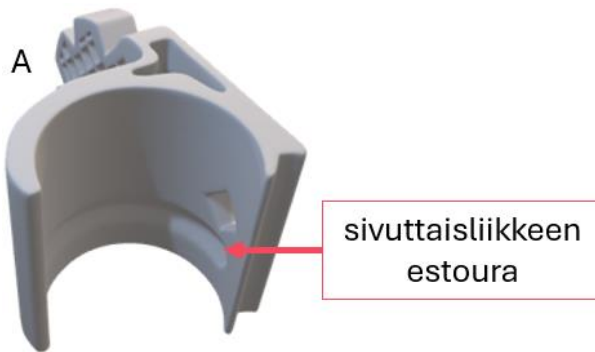
kiväärituki toisinpäin. Tämän suunnitteluratkaisun myötä koko mekanismin tulostaminen onnistuu ilman minkäänlaisia tukirakenteita.

Kuvassa 41 on esitetty saranamekanismin viimeisin eli seitsemäs versio. Tässä versiossa saranaan on jälleen lisätty tulostettavaa materiaalia vähentävä verkko- eli ns. lattice-rakenne. Lattice-rakenne tarkoittaa 3D-tulostettavassa kappaleessa käytettävää sisäistä rakennetta, joka muistuttaa kevyttä ja toistuvaa verkkomaista muotoa. Se koostuu geometrisesti järjestetyistä elementeistä, kuten pylväistä, risteyksistä tai solmuista, jotka muodostavat kevyen mutta vahvan rakenteen kappaleen sisälle. Verkkomainen rakenne mahdollistaa materiaalin säästämisen ja kevyemmän lopputuotteen ilman, että kappaleen lujuus tai toiminnallisuus kärsii. Lattice-rakenteita käytetään erityisesti teollisessa 3D-tulostuksessa esimerkiksi ilmailu-, lääketiede- ja koneenrakennusalalla, kun halutaan yhdistää keveys, kestävyys ja monimutkainen muotoilu. Suunnittelussa voidaan säätää verkon tiheyttä, muotoa ja suuntaa sen mukaan, mihin kappaleen osaan tarvitaan enemmän tukea tai joustavuutta. Tämä tekee lattice-rakenteesta erittäin monipuolisen työkalun, joka hyödyntää 3D-tulostuksen ainutlaatuisia mahdollisuuksia.



Kuva 41. Seitsemäs versio uudelleensuunnitellusta saranamekanismista jaettuna A- ja B-osiin.

Kuvassa 41 saranan kaksi osaa on otettu erilleen A- ja B-osiiksi, jotta viimeisimmän version sivuttaisliikkeen estomekanismi on helpommin havainnoitavissa. Kuvan 41 B-osassa on lisätty pieni pykälä, joka pääsee liukumaan A-osassa olevassa urassa. Kuvassa 42 on esitetty A-osan sisäpuoli ja siinä oleva ura.



Kuva 42. Seitsemannen version A-osan sisäosa.

Kuten kuvasta 42 nähdään, saranan toiseen osaan (A-osa) on lisätty ura, johon saranan toisen osan (B-osa) sivuttaisliikkeen estopykälä sopii. Ratkaisun tarkoituksena on siis estää saranan osien mahdollinen sivuttaisliike niin, ettei sillä olisi vaikutusta itse mekanismin toimintaan.

Kaikissa saranamekanismeissa on estettävä saranan osien sivuttaissuuntainen liike. Tuotekehityshankkeen edetessä edellä esitetyn lukitusmekanismin toimivuudesta on vielä erikseen varmistuttava. Vaikka ratkaisu toimisi muovista tulostettuna, se ei välttämättä toimi yhtä hyvin metallista valmistettuna. Muovit ovat pääsääntöisesti taipuisampia kuin metallit. Vaikka muovista valmistetun saranan osat toisiinsa lukitsevan ura/pykälä -mekanismin saisi paikoilleen kohtuullisella voimankäytöllä, saattaa metallisella saranalla kyseinen ratkaisu osoittautua toimimattomaksi.

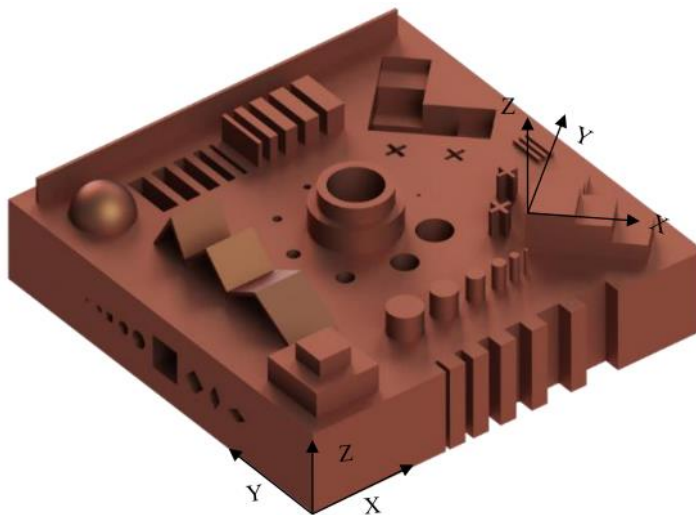
Kehitystyön aikana tuotekehitysprosessissa on kehitetty pitkälle 3D-tulostettavan saranamekanismin ensimmäisestä versiosta sellaiseen versioon, jossa materiaalin käyttöä on saatu vähennettyä reilusti. Myös uusia toiminnallisia ominaisuuksia on saatu saranamekanismiin ilman että tuotteen valmistaminen olisi tullut haastavammaksi. Tuotekehitysprosessin aikana voidaan myös havaita, miten mekanismin suunnittelu muuttuu vähitellen perinteisen 3D-suunnittelun periaatteiden soveltamisesta yhä enemmän 3D-tulostuksen periaatteita hyödyntäväksi. Itse rakenteen toimivuudesta tai ennakoituista tuotantokustannuksista ei tätä kirjoitettaessa ole vielä tarkempaa tietoa. Vaikuttaisi kuitenkin siltä, että lisäävän valmistuksen hyödyntäminen perinteisten valmistusmenetelmien sijaan saattaisi olla toimiva ratkaisu.

4.3 Benchmark-kappaleiden käyttö 3D-tulostuksen laitevalinnassa

Tässä kehitystyössä kehitettiin ohjelma helpottamaan metallien teollisen 3D-tulostuksen laitevalintaa. Järjestelmää varten on kehitetty yksinkertainen geometrinen benchmark-kappale, josta saatuja mittoja hyödynnetään tässä valinnassa. Geometrinen benchmark-kappale teollisessa 3D-tulostuksessa on erityisesti

suunniteltu testikappale, jota käytetään tulostusprosessin laadun ja tarkkuuden arviointiin. Se sisältää erilaisia muotoja ja yksityiskohtia, kuten reikiä, uria, kaaria, seinämiä ja kulmia, jotka edustavat yleisiä haasteita tulostuksessa. Kun benchmark-kappale tulostetaan, sen mittoja ja pintalaatua mitataan tarkasti, jotta voidaan arvioida, kuinka hyvin tulostuslaite suoriutuu eri geometrinen rakenteiden tuottamisesta. Tällainen kappale auttaa vertailemaan eri tulostuslaitteiden suorituskykyä ja säätämään prosessiparametreja, kuten laserin tehoa, nopeutta ja kerrospaksuutta. Benchmark-kappale toimii siis ikään kuin "koekappaleena", jonka avulla voidaan varmistaa, että tulostusprosessi tuottaa halutunlaista laatua ennen varsinaista tuotantoa. Se on tärkeä työkalu erityisesti silloin, kun otetaan käyttöön uusia materiaaleja tai laitteita, tai kun halutaan optimoida tuotanto tehokkuuden ja tarkkuuden näkökulmasta.

Metallien teollisessa 3D-tulostuksessa on paljon parametreja, joita pitää ottaa huomioon tulostaessa (lasersäteiden teho, skannausnopeus, kerroksen paksuus, lasersäteellä sulatettujen alueiden välinen etäisyys ym.), jonka vuoksi on syytä pitää huolta benchmark-kappaleen yksinkertaisuudesta ja mitattavuudesta. Tulostusparametrien hallinta on vaativa tehtäväkenttä, jota ei tässä yhteydessä ole syytä tarkemmin selostaa. Kehitystyössä tämä on otettu huomioon suunnittelemalla yksinkertainen 50 mm x 50 mm x 10 mm kokoinen kappale, jossa kaikki piirteet, sekä ulokkeet että kolot ja reiät, voidaan mitata suhteessa suorakulmaisen kappaleen ulkomittoihin. Suunnitellun benchmark-kappaleen 3D-malli on esitetty kuvassa 43.

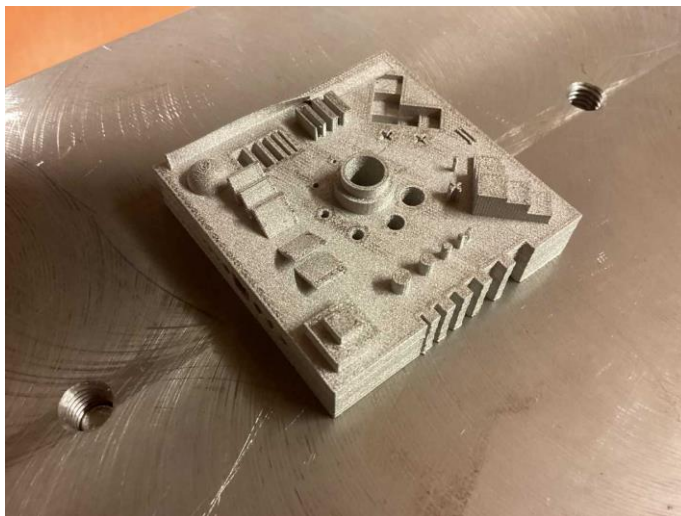


Kuva 43. Metallien teollista 3D-tulostusta varten suunniteltu benchmark-kappale. (Nadeem, 2024)

Kuten kuvasta 43 huomataan, suunniteltu sisältää benchmark-kappale sisältää kattavan valikoiman piirteitä, joita saattaa esiintyä varsinaisessa tulostettavassa tuotteessa. Vaikka kehitystyön tuloksena kehitetty benchmark-kappale

on suhteellisen yksinkertainen verrattuna esimerkiksi kuvassa 13 esitettyyn, sisältää se kuitenkin huomattavan paljon sekä pyöreitä että kulmikkaita piirteitä, niin ulkonevina muotoina kuin myös reikinä. Piirteiden koko vaihtelee, jotta saadaan tietoa siitä, mikä on pienin mahdollinen piirre, joka voidaan tulostaa. Myös sillä on merkitystä, minkä akselin suhteen tulostus tapahtuu (x, y, z), jotta pinnanlaatua ja mittatarkkuutta on mahdollista tarkastella kaikissa kolmessa suunnassa. Lisäksi benchmark-kappaleeseen otettiin mukaan kolme kaltevuudeltaan erilaista harjakattomaista rakennetta sekä sisäisen jännityksen selvittämiseksi hyvin ohut, lähes kappaleen laidasta laitaa ulottuva pystysuora seinämä. Myös kappaleen valmistusaikaa voidaan pitää yhtenä parametrina.

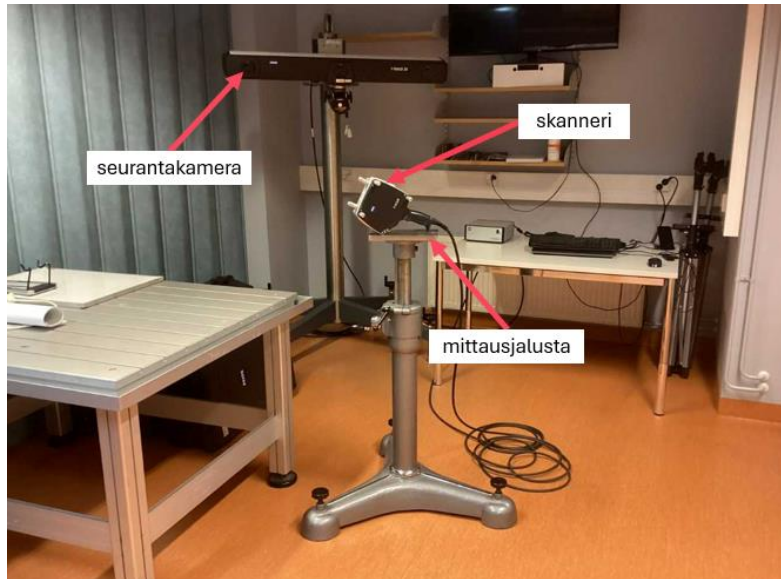
Kehitetty benchmark-kappale tulostettiin ruostumattomasta teräksestä 316L sekä EOS M 290 -tulostimella että Aconity3D MIDI+ -tulostimella. Oletuksena oli että, tulostimen valinnalla olisi vaikutusta siihen, kuinka hyvin yksittäinen piirre tulostuisi. Eri tulostimilla tulostettujen kappaleiden mittoja verrataan mallikappaleen mittoihin. Tällä tavalla voidaan päätellä, kuinka hyvin mikään piirre kappaleessa on mahdollista valmistaa. Mikäli tulostettavan kappaleen yksittäisen piirteen mittatarkkuutta tai toistettavuutta pidettäisiin erityisen tärkeänä, voitaisiin tulostin valita tätä ominaisuutta silmällä pitäen. Jos taas keskiössä olisi pinnanlaatu tai tulostusnopeus voitaisiin tulostimen valinnassa antaa näille suurempi painoarvo ohjelmassa. Kuvassa 44 on esitetty yksi tulostetuista benchmark-kappaleista.



Kuva 44. Metallien teollisella 3D-tulostuksella valmistettu benchmark-kappale mittaajalustan päällä.

Kuvan 44 benchmark-kappale on yksi versio kuvassa 43 esitetystä alkuperäisestä mallista. Tuossa mallissa näkyvät harjakattomaiset rakenteet on korvattu kahteen eri suuntaan kallistuvilla seinämillä. Syy tähän on se, ettei ensin mainittuja rakenteita pystytty onnistuneesti tulostamaan. Verrattuna kuvaan 43 nähdään myös se, että ohut

seinämä kappaleen yläreunassa oli liian ohut tulostaa onnistuneesti. Myös alareunan kuudesta lieriömäisestä rakenteesta pienin on ollut liian ohut tulostettavaksi. Tulostetut benchmark-kappaleet mitattiin skannaamalla kappale laserin avulla kolmiulotteisesti. Mittauksessa hyödynnettiin Zeiss T-Scan 20 -skanneria, joka on esitetty kuvassa 45.



Kuva 45. Zeiss T-Track 20 -skannerin asetelma.

Kuvassa 45 näkyy skannerin asetelma, jossa kuvattava kappale asetetaan mittausjalustalle. Skanneri on kädessä pidettävä ja sillä kuvataan kappaletta yhdessä telineessä olevan seurantakameran kanssa. Zeiss T-Track 20 -skanneri pystyy keräämään 210 000 pistettä sekunnissa, muodostaen tarkan 3D-mallin kappaleesta skannerin mukana tulevaan Colin3D ohjelmaan. Tätä 3D-mallin hyödynnetään kappaleen ja alkuperäisen 3D-mallin mittojen vertailussa sekä tulostustarkkuuksien määrityksessä.

Kun benchmark-kappaleen yksityiskohdista on kerätty mittatulokset, useampien benchmark-kappaleiden mittatulokset analysoidaan valmiiksi ohjelmoituja algoritmeja hyödyntämällä. Ohjelma lopulta suosittelee, mitä tulostimista käytetään perustuen siihen, kuinka tärkeäksi käyttäjä painottaa kutakin ominaisuutta kappaleessa. Painottaa voi mittatarkkuutta eri akselien suhteen sekä erilaisia muotoja, kuten esimerkiksi reikiä, asteikolla matala, keskitaso ja korkea. Lisäksi käyttäjä voi valita, huomioidaanko erilaisia ohuita yksityiskohtia, valmistusaikaa, pinnankarheutta tai jäännösjännitystä. Esimerkiksi kuvassa 46 on esitetty päätöksentekojärjestelmän käyttönäkymä.

PBF-LB/M Compass

Inputs

Dimensional Accuracy

Preference Off On

X-Axis

Y-Axis

Z-Axis

Thin Features

Preference Off On

Walls/Slots < 0.5 mm thickness

Cylinders < 0.5 mm diameter

Holes < 0.5 mm diameter

Geometric shapes

Preference Off On

Holes

Notches

Cylinders

Squares

Crosses

Inclinations

Slots

Hemisphere

BuildTime

Consideration No Yes

Surface Roughness

Consideration No Yes

Residual Stresses

Consideration No Yes

(3) Click for Results

Kuva 46. 3D-tulostimen valintaa helpottavan päätöksenteko-ohjelman käyttöliittymä. Ohjelmalle syötetään halutun kappaleen geometrian ominaisuuksia ja valmiilta kappaleelta vaadittuja ominaisuuksia, joiden pohjalta se suosittelee sopivaa laitetta.

Lupaavien ensimmäisten tulosten perusteella ohjelmaa voidaan edelleen kehittää. Ohjelmassa hyödynnettävää dataa täytyy laajentaa, ja tulevaisuudessa jopa koneoppimista voitaisiin hyödyntää. Tällä hetkellä ohjelman voidaan arvioida olevan teknologian kypsyystasolla kolme, eli sen konsepti on kokeellisesti todennettu. Ohjelma kuitenkin vaatii lisää kehitystä ja kokeilua käytännössä ja tosielämän tapauksissa ennen kuin se voisi nousta seuraavalle tasolle. Tällä ohjelmalla on kuitenkin tulevaisuudessa suuri potentiaali optimoida 3D-tulostukseen käytettävän laitteen valintaa.

5 Yhteenveto

Tämän katsauksen tarkoituksena on antaa selkeä ja ymmärrettävä yleiskuva teollisesta 3D-tulostuksesta – sen mahdollisuuksista, haasteista ja soveltuvuudesta eri teollisuudenaloille. Katsaus on laadittu osana Kestävästi lisäävää! -hanketta, joka toteutetaan Turun alueella kolmen korkeakoulun – Turun yliopiston, Åbo Akademin ja Turun ammattikorkeakoulun – yhteistyönä. Hankkeen tavoitteena on vahvistaa alueellista osaamista lisäävässä valmistuksessa ja tukea erityisesti pk-yrityksiä uuden teknologian hyödyntämisessä.

Teollinen 3D-tulostus, eli lisäävä valmistus, tarkoittaa valmistusmenetelmiä, joissa kappaleet tehdään kerros kerrokselta digitaalisesta mallista lisäämällä materiaalia. Tämä eroaa perinteisistä menetelmistä, joissa materiaalia poistetaan esimerkiksi leikkaamalla tai jyrsimällä. Vaikka teknologia on ollut olemassa jo 1980-luvulta lähtien, sen käyttö teollisuudessa on kasvanut nopeasti vasta viime vuosikymmeninä. Kasvu ovat vauhdittaneet muun muassa patenttien vapautuminen, uusien materiaalien kehitys ja digitaalisten suunnittelutyökalujen yleistyminen.

Teollinen 3D-tulostus tarjoaa Suomessa merkittäviä mahdollisuuksia erityisesti pk-yrityksille, jotka voivat hyödyntää teknologiaa joustavassa tuotannossa ja nopeassa tuotekehityksessä. Haasteena on kuitenkin alan rajallinen tunnettuus ja osaamisen puute, mikä hidastaa menetelmän laajempaa käyttöönottoa. Lisäksi standardoinnin ja materiaalitutkimuksen kehittäminen on tärkeää, jotta teknologiaa voidaan soveltaa turvallisesti ja tehokkaasti eri teollisuudenaloilla.

Kirjallisuudessa korostetaan 3D-tulostuksen etuja: se mahdollistaa monimutkaisten rakenteiden valmistuksen, nopeuttaa tuotekehitystä ja vähentää materiaalihukkaa. Teknologiaa hyödynnetään jo laajasti esimerkiksi auto-, ilmailu- ja terveydenhuoltoaloilla. Markkinan ennustetaan kasvavan voimakkaasti tulevina vuosina, ja erityisesti metallien 3D-tulostus on noussut taloudellisesti merkittäväksi. Yritykset siirtyvät yhä enemmän tilaustuotantoon ja ulkoistavat tulostuspalveluita sen sijaan, että investoisivat omiin laitteisiin.

Kokeelliset havainnot osoittavat, että teollinen 3D-tulostus kattaa laajan kirjon menetelmiä ja materiaaleja. Tulostustekniikoita ovat esimerkiksi jauhepetisulatus, suorakerrostus ja sideaineen ruiskutus, joilla voidaan valmistaa osia muoveista, metalleista, keraameista ja biomateriaaleista. Laitteiden hinnat ja suorituskyky vaihtelevat, mikä vaikuttaa niiden soveltuvuuteen eri käyttötarkoituksiin – prototyypeistä sarjatuuotantoon ja suuriin komponentteihin. Suunnittelu on keskeinen

vaihe, jossa hyödynnetään 3D-tulostuksen tarjoamia vapauksia, kuten kevennettyjä rakenteita ja sisäisiä kanavia, joita ei voida valmistaa perinteisin menetelmin.

Tulostusprosessiin kuuluu myös viipalointi eli digitaalisen mallin jakaminen kerroksiksi, tukirakenteiden suunnittelu sekä jälkikäsittelyvaiheet, kuten hionta ja lämpökäsittely. Haasteita ovat muun muassa materiaalivalikoiman rajoitukset, tulostusnopeus ja geometriset rajoitteet, kuten ylitysrakenteet (overhang), jotka vaativat erityistä huomiota suunnittelussa. Teknologian kehitys ja materiaalitutkimus ovat keskeisiä tekijöitä näiden haasteiden ratkaisemisessa.

Lisäksi katsauksessa tuodaan esiin, että eri toimialojen valmius hyödyntää 3D-tulostusta vaihtelee. Ilmailu- ja terveysalat ovat jo lähellä kypsää vaihetta, kun taas esimerkiksi rakennusala on vasta kehityksen alkuvaiheessa. Teknologian laajempaa käyttöönottoa tukee standardointi, joka parantaa laatua, turvallisuutta ja yhteensopivuutta. Kansainväliset standardit auttavat yhtenäistämään käytäntöjä ja tukevat teknologian hyväksyntää eri teollisuudenaloilla.

6 Jatkokehitysehdotukset

Teollinen 3D-tulostus tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia Turun seudulle ja laajemmin koko Suomen teollisuudelle. Tämä teknologia voi tuoda joustavuutta, nopeutta ja kustannustehokkuutta tuotantoon, mutta sen hyödyntäminen vaatii lisää käytännön sovellusten kehittämistä. Jatkokehityksessä olisi tärkeää keskittyä konkreettisiin käyttötapauksiin ja liiketoimintamalleihin, jotka osoittavat, miten 3D-tulostusta voidaan hyödyntää eri toimialoilla. Esimerkiksi Turun alueella olisi syytä tutkia sen soveltuvuutta meriteollisuuden varaosatuotantoon, lääketeollisuuden yksilöllisiin tuotteisiin tai elintarviketeollisuuden muottien valmistukseen.

Erityisesti pk-yrityksille 3D-tulostus voi olla houkutteleva vaihtoehto, jos teknologiaa voidaan tarjota palveluna ilman suuria laiteinvestointeja. Palvelupohjaiset tulostusratkaisut madaltavat kynnystä kokeilla ja ottaa käyttöön uusia valmistusmenetelmiä. Tällaiset ratkaisut voisivat sisältää esimerkiksi paikallisia tulostuspalveluita, joissa yritys voi tilata osia tarpeen mukaan, ilman että sen tarvitsee itse omistaa tai ylläpitää tulostuslaitteita.

Materiaalikehitys on toinen keskeinen tutkimusalue. On tärkeää selvittää, millaisia uusia materiaaleja – kuten biohajoavia, kierrätettäviä tai paikallisesti tuotettuja – voitaisiin hyödyntää erityisesti Turun seudun teollisuuden tarpeisiin. Lisäksi kannattaa tutkia, miten muiden teollisuudenalojen jäte- ja sivuvirtoja voitaisiin käyttää raaka-aineina 3D-tulostuksessa. Tämä tukisi kiertotaloutta ja lisäisi materiaalitehokkuutta, mikä on tärkeää sekä ympäristön että talouden kannalta.

Standardointi on myös olennainen osa teknologian laajempaa käyttöönottoa. Kansainväliset standardit, kuten ISO- ja ASTM-standardit, määrittelevät vaatimuksia ja laatuksiteerejä, mutta niiden soveltaminen suomalaisessa teollisuudessa vaatii lisäselvityksiä. On tärkeää ymmärtää, miten nämä standardit vaikuttavat kotimaisiin yrityksiin ja millaisia esteitä niiden käyttöönotossa voi esiintyä. Ratkaisuna voisi olla alueellisten tukiverkostojen ja tiedonsiirron kehittäminen, jotka auttavat yrityksiä soveltamaan standardeja käytännössä.

Kestävä kehitys on yksi 3D-tulostuksen suurista vahvuuksista. Teknologia voi vähentää logistiikan ja varastoinnin tarvetta, koska osia voidaan valmistaa tarpeen mukaan lähellä käyttöpaikkaa. Lisäksi materiaalihukka vähenee, kun osat valmistetaan tarkasti suunnitellun mallin mukaan. Jatkokehityksessä olisi hyödyllistä tarkastella, miten nämä hyödyt voidaan konkretisoida eri toimialoilla Suomessa. Pilotointihankkeet esimerkiksi meriteollisuudessa, terveydenhuollossa ja rakennusalalla voisivat tarjota

arvokasta tietoa siitä, miten 3D-tulostus toimii käytännössä ja millaisia liiketoimintahyötyjä se tuo.

Lopuksi olisi tärkeää kehittää malleja, joiden avulla 3D-tulostus voidaan integroida osaksi digitaalista valmistusketjua. Tämä tarkoittaa sitä, että suunnittelu, tuotanto ja toimitus toimivat saumattomasti digitaalisessa ympäristössä. Tällainen kokonaisvaltainen lähestymistapa tukisi koko Suomen teollisuuden digitaalista siirtymää ja vahvistaisi kilpailukykyä kansainvälisesti. Teollinen 3D-tulostus ei ole vain uusi valmistusmenetelmä – se on osa laajempaa muutosta kohti joustavampaa, tehokkaampaa ja kestävämpää tuotantoa.

7 Lähteet

- 3Dnatives. (2025). *Wohlers Report 2025: 9.1% Growth for the Global Additive Manufacturing Market*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/en/wohlers-report-2025-growth-global-additive-manufacturing-140420256/> (2025-04-14)
- Algarni, M., & Ghazali, S. (2021). Comparative Study of the Sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's Mechanical Properties to FDM Printing Process Parameters. *Crystals*, 11(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/cryst11080995>
- AMFG. (2019a). *How Mature Is Your Industry In Its Adoption Of 3D Printing? [Infographic] - AMFG*. <https://amfg.ai/2019/07/09/how-mature-is-your-industry-in-its-adoption-of-3d-printing/> (2025-09-22)
- AMFG. (2019b). *7 Complex Designs Achieved With 3D Printing—AMFG*. <https://amfg.ai/2019/07/24/7-complex-designs-achieved-with-3d-printing/> (2025-09-22)
- Bel Air Finishing. (2023). *Dos and Dents for finishing of 3D printed parts • Bel Air Finishing*. Bel Air Finishing. <https://belairfinishing.com/technical-articles/dos-and-dents-for-finishing-of-3d-printed-parts/> (2025-09-22)
- Biedermann, M., Beutler, P., & Meboldt, M. (2021). Automated design of additive manufactured flow components with consideration of overhang constraint. *Additive Manufacturing*, 46, 102119. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102119>
- Careri, F., Khan, R. H. U., Todd, C., & Attallah, M. M. (2023). Additive manufacturing of heat exchangers in aerospace applications: A review. *Applied Thermal Engineering*, 235, 121387. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121387>
- Carlota, V. (2020). *What are the business benefits of support-less metal additive manufacturing?* 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/en/support-less-metal-additive-manufacturing-260220204/> (2026-01-13)
- Chen, Z., Han, C., Gao, M., Kandukuri, S. Y., & Zhou, K. (2022). A review on qualification and certification for metal additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 17(2), 382–405. <https://doi.org/10.1080/17452759.2021.2018938>
- CreativeTools. (2015). *3DBenchy [Graphic]*. <https://www.thingiverse.com/thing:763622> Viitattu (2026-01-13)
- Dadkhah, M., Tulliani, J.-M., Saboori, A., & Iuliano, L. (2023). Additive manufacturing of ceramics: Advances, challenges, and outlook. *Journal of the European Ceramic Society*, 43(15), 6635–6664. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.07.033>
- Dama, Y. B., Bhagwan F. Jogi, & R. S. Pawade. (2024). Application of Nonlinear Analysis in Evaluating Additive Manufacturing Process for Engineering Design Features: A Study and Recommendations. *Communications on Applied Nonlinear Analysis*, 31(1s), Article 1s. <https://doi.org/10.52783/cana.v31.559>

- Diniță, A., Neacșa, A., Portoacă, A. I., Tănase, M., Ilinca, C. N., & Ramadan, I. N. (2023). Additive Manufacturing Post-Processing Treatments, a Review with Emphasis on Mechanical Characteristics. *Materials*, 16(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/ma16134610>
- Eryıldız, M. (2021). Estimating Mechanical Behavior of Scaffolds with Graded Porosity by Finite Element Analysis. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 28, Article 28. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1008251>
- Etteplan Oyj. (ei pvm.-a). 3D-tulostettava hydraulikkalohko John Deere Forestrylle. Etteplan. <https://www.etteplan.com/fi/referenssit/3d-tulostettava-hydraulikkalohko-john-deere-forestrylle/> (2025-09-12)
- Etteplan Oyj. (ei pvm.-b). 3D-tulostuksen suunnittelu tuotannon optimointiin. Etteplan. <https://www.etteplan.com/fi/referenssit/3d-tulostuksen-suunnittelu-tuotannon-optimointiin/> (2025-09-12)
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- Garaigordobil, A., Ansola, R., & Fernandez de Bustos, I. (2021). On preventing the dripping effect of overhang constraints in topology optimization for additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 64(6), 4065–4078. <https://doi.org/10.1007/s00158-021-03077-w>
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). Design for Additive Manufacturing. Teoksessa I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, & M. Khorasani (Toim.), *Additive Manufacturing Technologies* (s. 555–607). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7_19
- Global Additive Manufacturing Market Size, Forecasts to 2033*. (2023). Spherical Insights. <https://www.sphericalinsights.com/reports/additive-manufacturing-market> Viitattu 2025-05-06
- Haghsefat, K., & Ting, L. (2020). Research Status and Development Trend of 3D Printing and Additive Manufacturing Technology. *4th International Conference on Mechanical , Electrical and Computer Engineering* <https://www.researchgate.net/publication/344769206> *Research Status and Development Trend of 3D Printing and Additive Manufacturing Technology* Viitattu 2026-01-13
- Hasanov, S., Alkunte, S., Rajeshirke, M., Gupta, A., Huseynov, O., Fidan, I., Alifui-Segbaya, F., & Rennie, A. (2022). Review on Additive Manufacturing of Multi-Material Parts: Progress and Challenges. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/jmmp6010004>
- Hällgren, S., Pejryd, L., & Ekengren, J. (2016). (Re)Design for Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 50, 246–251. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.150>
- Jayawardane, H., Davies, I. J., Gamage, J. R., John, M., & Biswas, W. K. (2023). Sustainability perspectives – a review of additive and subtractive manufacturing. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, 2, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100015>
- Jiang, J., Xu, X., & Stringer, J. (2018). Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/jmmp2040064>
- Jokinen, R. (2024). *Kaiutinkopan suunnittelu ja 3D-tulostus*. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2024121335728>

- Kaur, I., & Singh, P. (2021). State-of-the-art in heat exchanger additive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 178, 121600. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121600>
- Kawalkar, R., Dubey, H. K., & Lokhande, S. P. (2022). A review for advancements in standardization for additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1983–1990. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.333>
- Lachmayer, R., Gembariski, P. C., Gottwald, P., & Lippert, R. B. (2017). The Potential of Product Customization Using Technologies of Additive Manufacturing. Teoksessa J. Bellemare, S. Carrier, K. Nielsen, & F. T. Piller (Toim.), *Managing Complexity* (s. 71–81). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29058-4_6
- Ladani, L., & Sadeghilaridjani, M. (2021). Review of Powder Bed Fusion Additive Manufacturing for Metals. *Metals*, 11(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/met11091391>
- Lara, A. T. (2025). 3D Printing and the Future of Supply Chain Management. *3D Printing Industry*. <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-and-the-future-of-supply-chain-management-238119/> (2026-01-13)
- Lezama-Nicolás, R., Rodríguez-Salvador, M., Río-Belver, R., & Bidosola, I. (2018). A bibliometric method for assessing technological maturity: The case of additive manufacturing. *Scientometrics*, 117(3), 1425–1452. <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2941-1>
- Mahesh, M. (2005). *Rapid prototyping and manufacturing benchmarking*. <https://scholarbank.nus.edu.sg/entities/publication/457fee69-a6f6-4e15-8ab6-ca5e5d7e91db> (2026-01-13)
- Mahmood, M. A., Chioibas, D., Ur Rehman, A., Mihai, S., & Popescu, A. C. (2022). Post-Processing Techniques to Enhance the Quality of Metallic Parts Produced by Additive Manufacturing. *Metals*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/met12010077>
- Mantovani, S., Campo, G. A., & Ferrari, A. (2021). Additive manufacturing and topology optimization: A design strategy for a steering column mounting bracket considering overhang constraints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(10), 1703–1723. <https://doi.org/10.1177/0954406220917717>
- MDT CKYE-POD Gen2 Single Pull Short/PRS - Bipod. (ei pvm.). <https://mdttac.com/ca/mdt-ckye-pod-single-pull-short-prs> (2025-04-16)
- Mirzaali, M. J., Moosabeiki, V., Rajaai, S. M., Zhou, J., & Zadpoor, A. A. (2022). Additive Manufacturing of Biomaterials—Design Principles and Their Implementation. *Materials*, 15(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/ma15155457>
- Nadeem, U. (2024). *Data-driven decision-making and benchmarking in PBF-LB/M*. <https://www.utupub.fi/handle/10024/178225>
- Novaoneadvisor. (2023). *Additive Manufacturing Market Size Report, 2023-2032*. <https://www.novaoneadvisor.com/report/additive-manufacturing-market> (2025-05-06)
- Pal, A. K., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2021). Additive manufacturing technology of polymeric materials for customized products: Recent developments and future prospective. *RSC Advances*, 11(58), 36398–36438. <https://doi.org/10.1039/D1RA04060J>
- Panesar, A., Abdi, M., Hickman, D., & Ashcroft, I. (2018). Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 19, 81–94. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.008>
- Park, S., & Fu, K. (Kelvin). (2021). Polymer-based filament feedstock for additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 213, 108876. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108876>

- Peng, X., Kong, L., Fuh, J. Y. H., & Wang, H. (2021). A Review of Post-Processing Technologies in Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/jmmp5020038>
- Pramanik, J., Brahma, B., Pradhan, S., Ranjan Senapati, M., Kumar Samal, A., & Kumar Pani, S. (2024). 3D printing application in biomedical—A review. *Materials Today: Proceedings*, 115, 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.046>
- Ribeiro, T. P., Bernardo, L. F. A., & Andrade, J. M. A. (2021). Topology Optimisation in Structural Steel Design for Additive Manufacturing. *Applied Sciences*, 11(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/app11052112>
- Sarzyński, B., Śnieżek, L., & Grzelak, K. (2024). Metal Additive Manufacturing (MAM) Applications in Production of Vehicle Parts and Components—A Review. *Metals*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/met14020195>
- Sastoque Pinilla, L., Llorente Rodríguez, R., Toledo Gandarias, N., López de Lacalle, L. N., & Ramezani Farokhad, M. (2019). TRLs 5–7 Advanced Manufacturing Centres, Practical Model to Boost Technology Transfer in Manufacturing. *Sustainability*, 11(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/su11184890>
- Schuhmann, D., Rockinger, C., Merkel, M., & Harrison, D. K. (2022). A Study on Additive Manufacturing for Electromobility. *World Electric Vehicle Journal*, 13(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/wevj13080154>
- Scott, C. (2023). The Value of Design for Additive Manufacturing. *Wohlers Associates*. <https://wohlersassociates.com/uncategorized/the-value-of-design-for-additive-manufacturing/> (2025-09-22)
- Srivastava, M., Rathee, S., Patel, V., Kumar, A., & Koppad, P. G. (2022). A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 2612–2641. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.015>
- Stavropoulos, P., Foteinopoulos, P., Stavridis, J., & Bikas, H. (2023). Increasing the industrial uptake of additive manufacturing processes: A training framework. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 6, 100110. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100110>
- Taddese, G., Durieux, S., & Duc, E. (2020). Sustainability performance indicators for additive manufacturing: A literature review based on product life cycle studies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(7), 3109–3134. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05249-2>
- Takezawa, A., Chen, Q., & To, A. C. (2021). Optimally variable density lattice to reduce warping thermal distortion of laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 48, 102422. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102422>
- Taylor, H. C., Garibay, E. A., & Wicker, R. B. (2021). Toward a common laser powder bed fusion qualification test artifact. *Additive Manufacturing*, 39, 101803. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101803>
- Sprinkle, T. (2019). The 5 Most Important Standards in Additive Manufacturing | ASTM. <https://www.astm.org/news/5-most-important-standards-additive-manufacturing> Viitattu 2025-05-06
- Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A., & Hayward, K. (2021). Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges. *Applied Sciences*, 11(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/app11031213>
- Valmet Oyj. (2020) *3D-tulostus tuottaa aitoa lisäarvoa* | Neles. <https://www.valmet.com/fi/insights/artikkelit/virtauksensaato/3d-tulostus-tuottaa-aitoa-lisaarvoa/> (2025-09-12)

- Valmet Oyj. (2021). *Neles on toimittanut ensimmäisen 3D-tulostetulla venttiilipesällä varustetun venttiilin kenttätestaukseen.* <https://www.valmet.com/fi/media/uutiset/neles-news-archive/neles-on-toimittanut-ensimmaisen-3d-tulostetulla-venttiilipesalla-varustetun-venttiilin-kenttatestaukseen/> (2025-09-12)
- Welch, A. (2024). Wohlers Report 2024—Just Released! Latest 3D Printing Trends. *Wohlers Associates.* <https://wohlersassociates.com/news/wohlers-report-2024-shows-metal-am-growth-in-new-report/> (2026-01-13)
- TWI Global (2020). *What are technology readiness levels (TRL)?* <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/technology-readiness-levels.aspx> (2026-01-13)
- Wohlers, T., Gornet, T., Mostow, N., Campbell, I., Diegel, O., Kowen, J., Huff, R., Stucker, B., Fidan, I., Doukas, A., Drab, B., Drstvenšek, I., Eitsert, N., Espalin, D., Feldhausen, T., Ghany, K., Gillett-Crooks, M., Guo, D., Held, A., ... Peels, J. (2016). *History of Additive Manufacturing* (SSRN Scholarly Paper No. 4474824). Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4474824>
- Yuan, M., Liu, Q., Liu, X., Kou, T., & Cui, Y. (2025). Study of the Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on Overhang Structures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34(4), 3123–3139. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09325-6>

University of Turku Reports from the Faculty of Technology

1. **Anne-Maarit Majanoja, Antti Hakkala, Jari Lehto & Seppo Virtanen.** Suomen kyberturvallisuuskoulutusta tarjoavien yliopistojen koulutuksen osaajaprofiilit ja kurssien painotusalat. 2024.
2. **Anne-Maarit Majanoja, Jani Ekqvist, Antti Hakkala & Seppo Virtanen.** Kyberturvallisuuskoulutuksen kehittäminen Suomessa: yritysten osaamistarvekartoitus. 2024.
3. **Anne-Maarit Majanoja, Antti Hakkala, Ville Leppänen & Seppo Virtanen.** Tietoturva ohjelmoinnin ja ohjelmistotuotannon kursseilla Suomen yliopistoissa – Nykytila ja opettajien näkemykset. 2024.
4. **Erkka Lehtihuhta, Erik Haapa, Usama Nadeem, Jasmin Vainio, Kristina Tarson, Anna Huusko, Heidi Piili & Antti Salminen.** Suunnittelusta suorituskykyyn – Uusien materiaalien ja rakenteiden hyödyntäminen 3D-tulostuksessa. 2026.