

Miika Penttilä

MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN SOVELTAMINEN TERÄSRAKENTAMISEEN

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Apulaisprofessori Kristo Mela
Tarkastaja: Professori Mikko Malaska
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Miika Penttilä: Materiaalia lisäävän valmistuksen soveltaminen teräsrakentamiseen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
Toukokuu 2021

Materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien, eli 3D-tulostusmenetelmien käyttö yleistyy eri teollisuudenaloilla. Uudet valmistusmenetelmät ovat luonteeltaan hyvin erilaisia perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. 3D-tulostamalla voidaan valmistaa geometrialtaan entistä monimuotoisempia kappaleita, mikä luo edellytykset valmistaa optimoidumpia rakenteita. Metallien materiaalia lisäävään valmistukseen on kehitetty monia erilaisia menetelmiä, joita käytetään tällä hetkellä pääasiassa biolääketiede- ja lentokoneiteollisuuden korkean arvon lopputuotteissa, mutta myös rakennusalaan aiheesta on tehty tutkimuksia jo vuosien ajan.

Tässä työssä tutkittiin mitä mahdollisuuksia ja haasteita metallien materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien sekä topologian optimointimenetelmien käyttöön teräsrakentamisessa liittyy. Menetelminä käytettiin tutkimusjulkaisuihin kohdistunutta kirjallisuuskatsausta sekä tapaustutkimusta, jossa selvitettiin teräsliitososan topologian optimointi- ja valmistusprosessia.

Tutkimuksessa selvisi, että uusimmat rakennusalan tutkimus- ja kehityshankkeet keskittyvät hitsausrobotiikkaan perustuvan WAAM-menetelmän käyttöön. Menetelmä sopii kustannusherkälle rakennusalaan mm. sen alhaisten materiaalikustannusten ja valmistusnopeuden vuoksi. Lisäksi menetelmällä on mahdollista valmistaa suurempia kappaleita, kuin muilla metallien AM-menetelmillä. Lisäävillä valmistusmenetelmillä voidaan tuotantoketjun yksinkertaistumisen kautta saavuttaa säästöjä materiaalin käsittely-, kuljetus ja varastointikustannuksissa. Lopputuotteiden kustomointi on myös mahdollista suuremmissa määrin kuin ennen. Tulostusmenetelmät ovat itsessään jo materiaalinkäytöltään tehokkaampia, kuin perinteiset valmistusmenetelmät, joissa syntyy enemmän hukkamateriaalia. Tulostamalla voidaan valmistaa topologiaan pitkälle optimoituja rakenteita, joka lisää materiaalinkäytön tehokkuutta.

Metallien materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien käyttöönottoon teräsrakentamisessa liittyy vielä monta ratkaisematonta haastetta. Nykyisin käytettyjä geometrialtaan yksinkertaisia rakenneosia ei ole taloudellisesti järkevää valmistaa AM-menetelmillä. Geometrialtaan monimuotoisten topologiaan optimoitujen rakenneosien suunnitteluprosessi valmistettavaksi kappaleeksi on edelleen hyvin työläs. Tulostamalla valmistettujen kantavien rakenteiden yleistymiseen liittyviä haasteita ovat mm. suuret laadunvaihtelut ja standardisoinnin puute. Rakennesuunnittelijoilta vaaditaan myös uudenlaisten laskentamenetelmien ja valmistusprosessien sekä näihin liittyvien työkalujen hallintaa. Maailmalla on kuitenkin käynnissä tutkimus- ja kehityshankkeita ongelmakohtien ratkaisemiseksi teräsrakentamisen näkökulmasta ja tietoa syntyy koko ajan lisää.

Avainsanat: metallien materiaalia lisäävä valmistus, 3D-tulostus, topologian optimointi, WAAM, teräsrakentaminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Miika Penttilä: The Application of metal additive manufacturing to steel construction
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Department of Civil Engineering
May 2021

The popularity of additive manufacturing technologies, commonly known as 3D printing, is increasing in many different industries. These new methods of production are by nature very different from traditional production methods. It is now possible to manufacture components with very complex geometries. This enables the use of topology optimization during the design process like never before. For example, in aircraft and biomedicine industries there are already commercial applications for additive manufacturing. Also, in construction industry studies has been carried out about the subject. Most studied material is concrete, but the use of metal additive manufacturing has also gained attention.

The goal of this thesis was to investigate the possibilities and challenges of metal additive manufacturing in construction. Topology optimization associates closely with additive manufacturing and this was another subject of study. The methods used were literature review of research articles and a case study of topology optimization and manufacturing process of steel joint component.

During the research it was observed that now the most studied metal additive manufacturing method in construction sector is *Wire and arc additive manufacturing (WAAM)* method. WAAM suits well to the needs of construction industry because of its relatively low material costs, high print speed and the ability to manufacture large components. AM technologies have the potential to simplify chain of production which could mean lower costs of handling, transportation and storing of materials. Additive manufacturing also enables higher degree of customization of end products. AM technologies are more efficient in usage of materials compared to traditional production methods. Additionally, highly optimized components can be manufactured only with AM systems which can lead to more material savings.

However, there still exists many major challenges regarding metal AM in construction. It is not cost-efficient to print simple components like the ones used in the industry nowadays. Also, the design process of highly complex topology optimized component includes many design phases and requires much skilled labor. There exist specific difficulties in additive manufacturing of load-bearing steel structures as well. These includes for example, high variability of manufacturing process and a lack of standardization. Wider introduction of AM methods in steel construction requires a new kind of skill set from structural engineers. This includes mastering new calculation methods, manufacturing processes and design tools. However, there are still ongoing research projects around the world to solve these issues.

Keywords: metal additive manufacturing, 3D printing, topology optimization, WAAM, steel construction

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä työ syntyi halusta valmistua diplomi-insinööriksi ja aihe valikoitui kiinnostuksesta rakentamisen tulevaisuutta kohtaan.

Kiitokset ohjaajalleni apulaisprofessori Kristo Melalle avusta aiheen tarkentamisessa sekä vinkeistä työn parantamiseksi. Erityiskiitokset haluan esittää Tampereen yliopiston automaatio- ja konetekniikan yksikön tutkimuspäällikölle Jorma Vihiselle, jonka asiantuntemusta sain käyttää hyödyksi työn kokeellisessa osuudessa.

Erytisimmät kiitokset haluan esittää Sannalle, joka lupautui menemään kanssani naimisiin, jos valmistun diplomi-insinööriksi. Ilman hänen motivointiaan olisin tuskin ikinä valmistunut.

Tampereella, 6.5.2021

Miika Penttilä

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. METALLIEN MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS	3
2.1 Metallien materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät	4
2.1.1 Jauhepetisulatus	4
2.1.2 Suorakerrostus	5
2.1.3 Kerroslaminointi	7
2.1.4 Sideaineen suihkutus	9
2.1.5 Electrochemical additive manufacturing	9
2.2 Materiaalia lisäävän valmistuksen tuotantoprosessi	10
2.2.1 Kappaleen mallitiedoston luominen	10
2.2.2 Kappaleen valmistus ja jälkikäsittely	12
2.3 Materiaalit	12
2.4 Markkinoilta löytyvät AM-laitteet metalleille	14
3. METALLIEN MATERIAALIA LISÄÄVÄ RAKENTAMINEN	19
3.1 Katsaus toteutuneisiin hankkeisiin	19
3.1.1 Julkisivun liitososa Nematox	20
3.1.2 Arupin kehittämä valaisinrakenteen liitososa	21
3.1.3 MX3D-silta	23
3.2 Metallien materiaalia lisäävän rakentamisen mahdollisuudet	23
3.2.1 Rakenteiden optimointi	24
3.2.2 Kustomointi	27
3.2.3 Rakennusaika	27
3.2.4 Hybridiratkaisut, rakenteiden vahvistus ja korjaus	28
3.2.5 Ympäristötekijät	30
3.2.6 Inhimilliset tekijät	31
3.3 Haasteet liittyen metallien materiaalia lisäävän rakentamiseen	32
3.3.1 Kustannukset	32
3.3.2 Valmistusprosessin vaihtelevuus	33
3.3.3 Suunnittelumenetelmien muutokset	34
3.3.4 Rakenteiden luotettavuus	34
4. TOPOLOGIAN OPTIMOINTI FEM-OHJELMISTOA HYÖDYNTÄEN	36
4.1 Topologian optimointi	36
4.2 SIMP-menetelmä	37
4.2.1 SIMP-menetelmän haasteet	40
4.2.2 Optimoinnin kulku	40
5. RUUVILIITOSKAPPALEEN TOPOLOGIAN OPTIMOINTI JA VALMISTUS WAAM- MENETELMÄLLÄ	42
5.1 Ruuviliitoskappaleen topologian optimointi Ansyksella	42
5.2 Optimoidun ruuviliitoskappaleen valmistus WAAM-menetelmällä	46
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	51
LÄHTEET	55

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AM	additive manufacturing, materiaalia lisäävä valmistus
BIM	building information model, rakennuksen tietomalli
BJ	binder jetting
CAD	computer-aided design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CAM	computer-aided manufacturing, tietokoneavusteinen valmistus
DED	directed energy deposition
DFM	design for manufacturing
DfAM	design for additive manufacturing
DMLS	direct metal laser sintering
EBM	electron beam melting
ECAM	electrochemical additive manufacturing
FEM	finite element method, elementtimenetelmä
FGM	functionally graded material, kahden tai useamman materiaalin yhdistelmä, jossa materiaali vaihtuu toiseksi tasaisesti tai portaittain
PBF	powder bed fusion
SIMP	solid isotropic material with penalization
SLM	selective laser melting
SLS	selective laser sintering
WAAM	wire and arc additive manufacturing

1. JOHDANTO

Materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien (*AM, additive manufacturing*), eli puhekielessä 3D-tulostuksen, käyttö on yleistynyt viime vuosina monilla teollisuudenaloilla ja trendin odotetaan jatkuvan. Myös rakentamisen näkökulmasta aihetta on tutkittu, vaikka kaupalliset sovellukset ovat vielä vähäisiä. Tutkimuksen painopiste on ollut betonirakentamisessa, mutta mahdollisuuksia nähdään myös teräsrakentamisen puolella.

Metallien materiaalia lisäävään valmistukseen on kehitetty useita erilaisia menetelmiä, joilla kaikilla on omat ominaispiirteensä vahvuuksineen ja heikkouksineen. Valmistusprosessi eroaa kuitenkin kaikissa tapauksissa oleellisesti perinteisiin teräskappaleiden valmistusmenetelmiin verrattuna.

Tulostamalla valmistetut kappaleet voivat olla geometrialtaan merkittävästi monimuotoisempia, kuin perinteisin menetelmin valmistetut. Tämä mahdollistaa yksittäisten rakennosien topologian optimoinnin ennennäkemättömällä tavalla. Topologian optimoinnilla tarkoitetaan matemaattista menetelmää, jolla haetaan rakenteelle mahdollisimman tehokas materiaalijakauma tietyillä kuormilla ja muilla reunaehdoilla.

Tässä työssä tehdään katsaus metallien materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien mahdollisuuksiin ja haasteisiin teräsrakentamisen, ja erityisesti rakennesuunnittelun näkökulmasta. Tutkimuksessa pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin: Kuinka hyvin nykyiset AM-menetelmät ja -laitteistot vastaavat rakennusalan tämän hetken tarpeisiin? Mitkä ovat metallien tulostuksen tulevaisuudennäkymät rakennusosalalla? Mitä mahdollisuuksia kaupallisten FEM-ohjelmistojen topologian optimointi – ominaisuudet tarjoavat teräsrakennosien suunnitteluun?

Metallien materiaalia lisäävä valmistus ja topologian optimointi ovat paljon tutkittuja aiheita tällä hetkellä, mutta puhtaasti rakentamisen näkökulmasta tutkimus on ollut vähäisempää. Työn tarkoituksena on koota yhteen näiden muutamien aiheesta tehtyjen tieteellisten julkaisujen havainnot ja toimia suomenkielisenä johdantona aiheeseen.

Tutkimus koostuu lukujen 2–4 kirjallisuuskatsauksesta ja viidennessä luvussa esitellystä tapaustutkimuksesta. Toisessa luvussa esitellään materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien perusperiaatteet, ominaispiirteet sekä arvioidaan niiden soveltuvuutta rakennusalan tarpeisiin. Lisäksi tehdään katsaus tällä hetkellä markkinoilta löytyviin AM-järjestelmiin ja yleisimpiin materiaaleihin.

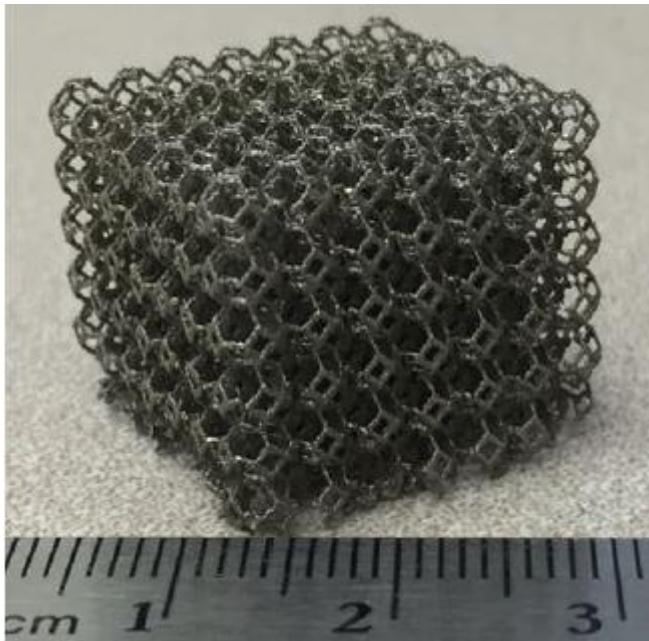
Kolmannessa luvussa käydään läpi tutkijoiden esiin nostamia mahdollisuuksia ja haasteita liittyen rakentamiseen materiaalia lisäävillä menetelmillä. Esittelyssä on myös muutama edelläkävijähanke rakentamisen alalta, joissa on tulostamalla valmistettu teräsraakenneosien lisäksi jopa kokonainen kevyen liikenteen silta.

Työn neljännen luvun aiheena on topologian optimoinnin perusteet, ja mitä mahdollisuuksia kaupalliset FEM-ohjelmistot tarjoavat tällä saralla. Topologian optimointimenetelmistä tarkastelun kohteena on SIMP-menetelmä sekä sen hyödyntäminen Ansys-ohjelmistolla.

Viidennessä luvussa esitellään esimerkkikappaleen topologian optimointi ja valmistus materiaalia lisäävällä menetelmällä. Ansyksen SIMP-algoritmia käyttämällä optimoitiin ruuviliitoskappale, jolla voitaisiin korvata nykyisin yleisesti käytetty teräspalkin päätylevyjatkos. Topologialtaan optimoitu liitoskappale on monimuotoisen geometriansa takia valmistettavissa käytännössä ainoastaan materiaalia lisäävillä menetelmillä. Optimoidun liitoskappaleen valmistusta testattiin kaarihitsaukseen perustuvalla WAAM-menetelmällä, joka on maailmalla herättänyt kiinnostusta teräsrakentamisen alalla. Käytössä oli Tampereen yliopiston automaatio- ja konetekniikan yksikön hitsausrobottilaitteisto.

2. METALLIEN MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS

Materiaalia lisäävällä valmistuksella tarkoitetaan joukkoa valmistusmenetelmiä, joissa kappale tuotetaan 3D-mallin pohjalta materiaalikerroksia lisäämällä, vastakohtana materiaalia poistaviin ja muovaaviin menetelmiin (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 2017, s. 6). Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät tarjoavat monia etuja verrattuna perinteisiin menetelmiin. Valmistettavia kappaleita voidaan kustomoida ja personoida suurissa määrin ilman suuria vaikutuksia tuotannon monimutkaisuuteen ja kustannuksiin. Uudet valmistusmenetelmät mahdollistavat geometrialtaan entistä monimutkaisempien ja rakenteeltaan heterogeenisempien kappaleiden valmistuksen. Kuvassa 1 on esimerkki jauhepetisulatusmenetelmällä valmistetusta kappaleesta, jonka valmistus perinteisin menetelmin ei olisi mahdollista (Yang et al. 2017, s. 5).



Kuva 1. Jauhepetisulatusmenetelmällä valmistettu 3D-ristikkorakenne. (Yang et al. 2017, s. 5)

Lisäävän valmistuksen menetelmillä voidaan nykyisin valmistaa kappaleita lukuisista eri materiaaleista, kuten esimerkiksi polymeereistä, metalleista, keraameista, komposiiteista sekä ruoka-aineista ja muista biopohjaisista materiaaleista (Yang et al. 2017, s. 3). ISO- ja ASTM-standardien mukaiset materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmäluokat ovat sideaineen suihkutusta, suorakerrostusta, pursotusta, materiaalin suihkutusta, jauhepetisulatus, kerroslaminointi ja valokovetus altaassa (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 2017,

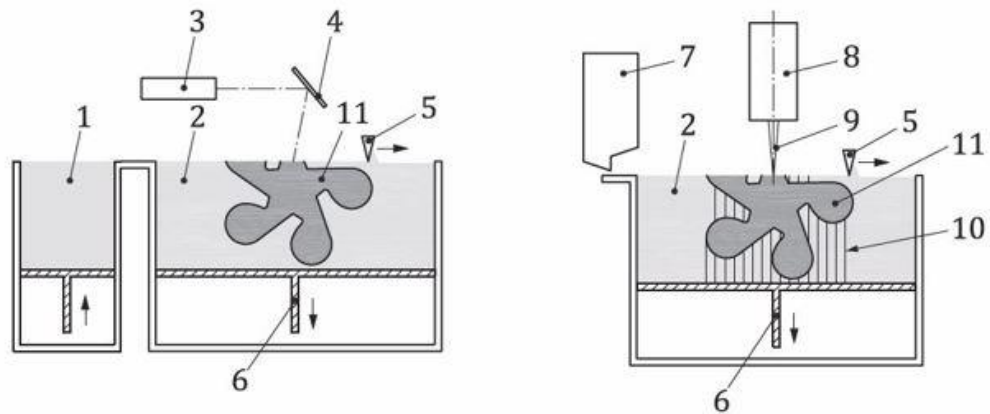
s. 7). Näistä metallikappaleiden valmistukseen tällä hetkellä parhaiten soveltuvat sideaineen suihkutusta, suorakerrostusta, jauhepetisulatus ja kerroslaminointi (Jarosinski & Zhang 2018, s. 42).

Metallien työstö lisäävän valmistuksen menetelmillä on usein monimutkaisempaa kuin muilla materiaaleilla. Metallien lisäävien valmistusmenetelmien käyttö on siirtymässä tutkimuksesta kaupallisiin sovelluksiin (Jarosinski & Zhang 2018, s. 42). Tällä hetkellä metallien materiaalia lisääviä valmistusmenetelmiä käytetään erityisesti biolääketiede- ja lentokoneteollisuuksien korkean arvon lopputuotteissa, jotka ovat pitkälle kustomoituja sekä tuotantoeriltään pieniä (Buchanan & Gardner 2019, s.2).

2.1 Metallien materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät

2.1.1 Jauhepetisulatus

Jauhepetisulatus, englanniksi *powder bed fusion* (PBF), on materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa lämpöenergia sulattaa jauhepedin kohdennettuja alueita (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 2017, s. 7). Kuvassa 2 on esitettyä jauhepetiteknologioiden toimintaperiaate. Menetelmässä valmistusalustalla oleva materiaalijauhe sulatetaan kerroksittain. Jokaisen valmiin kerroksen jälkeen valmistusalusta liikkuu alaspäin, jonka jälkeen uusi jauhe levitetään vanhan valmiin kerroksen päälle. Jauhepetisulatusmenetelmät voidaan jakaa energianlähteen perusteella vielä laser-menetelmiin ja elektronisuihkusulatukseen (*electron beam melting, EBM*) (Jarosinski & Zhang 2018, s. 42). Laserin käyttöön perustuvia menetelmiä ovat esimerkiksi *selective laser sintering* (SLS), *selective laser melting* (SLM) ja *direct metal laser sintering* (DMLS) (Lehtinen, 2014).



a) Jauhepetisulatus laserilla

- | | |
|---|-------------------------|
| 1 | jauheen syöttösystemi |
| 2 | jauhe levitetynä petiin |
| 3 | laser |
| 4 | laserin kohdistuspeili |
| 5 | jauheen levittäjä |
| 6 | valmistusalusta |

b) Jauhepetisulatus elektronisuihkulla

- | | |
|----|-----------------------------|
| 7 | jauhesäiliö |
| 8 | elektronitykki |
| 9 | kohdistettu elektronisuihku |
| 10 | tukirakenne |
| 11 | valmistettava kappale |

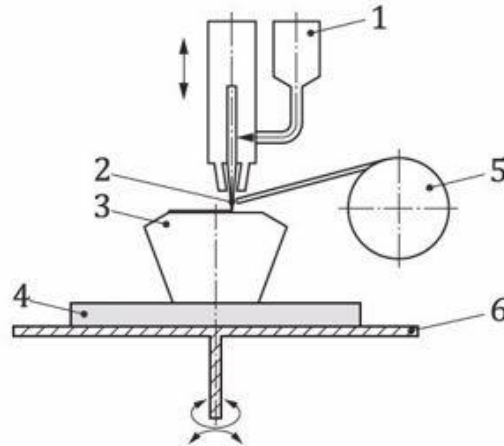
Kuva 2. Periaatekuva jauhepetisulatusmenetelmästä. (SFS-EN ISO 17296-2:2016 2016, s. 9)

Menetelmä on tarkoituksenmukainen geometrialtaan monimutkaisille pienille kappaleille. Nykylaitteistoilla kappaleen valmistusaika voi olla kymmeniä tunteja materiaalin sulatusajan ollessa noin 50 grammaa tunnissa. Yhden sulatuskerroksen paksuus on yleensä joitain kymmeniä mikrometrejä ja valmistetun kappaleen pinnan epätasaisuus on yleensä alle 20 μm . Metallijauheiden hapettumisen estämiseksi valmistuksen tulee tapahtua tyhjiössä tai tilan ilman tulee olla muuten neutraalia. Tämä vaatimus rajoittaa nykylaitteistojen valmistuskappaleen maksimikokoa ja se on usein kuutio, jonka sivumitta on noin 250 mm (Buchanan & Gardner 2019, s. 11). Jauhepetisulatus laserilla oli vuonna 2018 useimpien metallikappaleiden valmistukseen soveltuvien AM-laitteiden käyttämä valmistusmenetelmä (Jarosinski & Zhang 2018, s. 43).

2.1.2 Suorakerrostus

Suorakerrostus, englanniksi *directed energy deposition* (DED), on materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa kohdennettua lämpöenergiaa käyttämällä materiaali sulatetaan ja liitetään kohdennetusti (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 2017, s. 7). Lämpöenergian lähteenä käytetään laseria, elektronisuihkua tai valokaarta. Jauhepetisulatuk-

sesta poiketen suorakerrostuksessa käytetään materiaalin syöttämiseen jauhepedin sijaan joko jauhevirtaa tai lankaa (Buchanan & Gardner 2019, s. 11). Kuvassa 3 on esitettyä suorakerrostusmenetelmän toimintaperiaate.



1	jauheen syöttösuppilo	4	valmistusalusta
2	kohdistettu energiasäde	5	filamenttikela
3	valmistettava kappale	6	valmistustaso

Kuva 3. Periaatekuva suorakerrostusmenetelmästä. (SFS-EN ISO 17296-2:2016 2016, s. 11)

Suorakerrostus jauhetta syöttämällä sopii monimutkaisille kappaleille ja menetelmää voidaan käyttää esimerkiksi vaurioituneiden rakenneosien korjaamiseen. Jauhepetisulatuksen tavoin myös tässä menetelmässä vaaditaan valmistustilaan neutraali ilma hapettumisen estämiseksi, jonka seurauksena valmistettavien kappaleiden maksimikoko on rajoitettu. Valmistusnopeus on nykylaitteistolla noin 1 kg tunnissa ja valmistetun kappaleen pinnan epätasaisuus tyypillisesti 20 – 100 µm (Buchanan & Gardner 2019, s. 12).

Wire and arc additive manufacturing (WAAM) on lankasyöttöisen suorakerrostusmenetelmän sovellus, jossa käytetään kaarihitsauksen työkaluja ja lankaa kappaleen valmistukseen. Langan sijoittamista ohjataan joko robottikäsiarrella (kuva 4) tai tietokoneohjatulla siltanosturilla. WAAM sopii geometrialtaan melko yksinkertaisten, keski- ja suuri-kokoisten kappaleiden valmistamiseen. Menetelmällä päästään nykyisin noin 4 – 9 kg/h valmistusnopeuksiin pinnan epätasaisuuden ollessa noin 0,5 mm. Muihin edellä mainittuihin menetelmiin verrattuna WAAM on nopeudessa omassa luokassaan, mutta pinnan-tasaisuusvaatimuksista riippuen valmistettavia kappaleita voidaan joutua lisätyöstämään vielä suorakerrostuksen jälkeen.



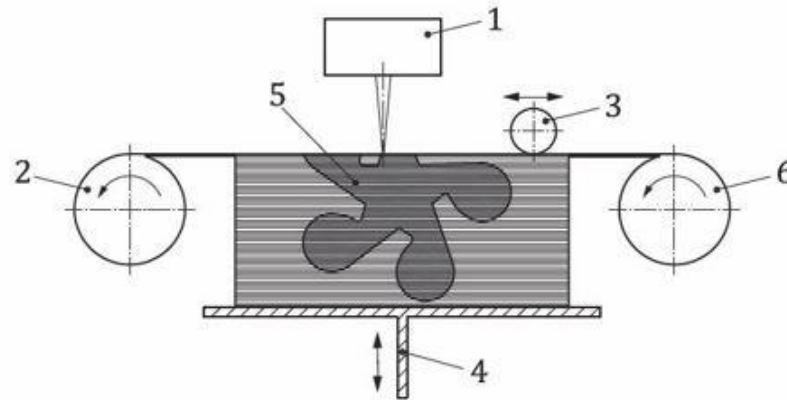
Kuva 4. Teräksisen poikkileikkauksen valmistusta robottikäsivarrella varustetulla WAAM-laitteistolla (Buchanan & Gardner 2019, s. 12).

Menetelmä on paljon halvempi muihin metallia lisääviin menetelmiin verrattuna johtuen hitsauslaitteiston ja -teknologian yleisyydestä sekä alhaisista materiaalikustannuksista, sillä materiaali on selvästi halvempaa lankana kuin jauheena. WAAM-menetelmä edullisuutensa vuoksi sopiikin kustannusherkälle rakennusosalalle paremmin kuin monet muut lisäävän valmistuksen menetelmät (Buchanan & Gardner 2019, s. 12).

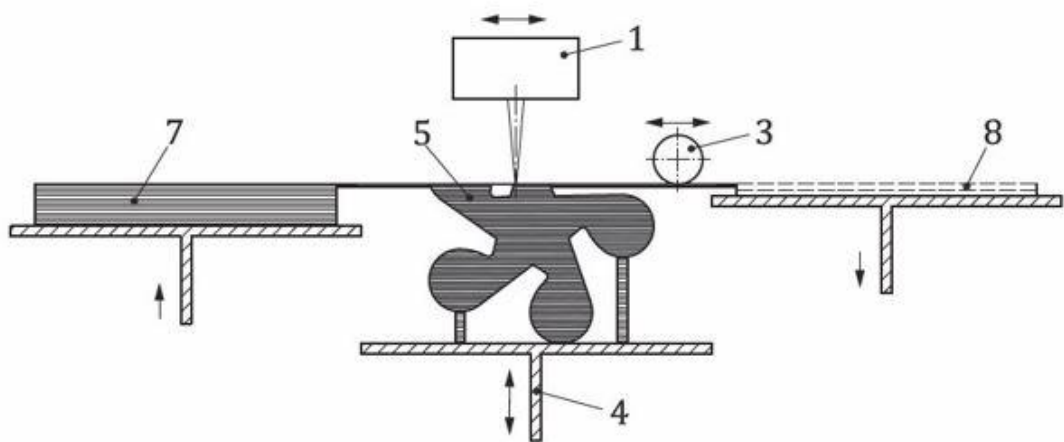
Merkittävä haaste menetelmään liittyen on kuitenkin helposti syntyvät suuret jäännösjännitykset sekä epämuodostumat. Jäännösjännityksiä voidaan vähentää lämpökäsittelyllä, jonka on todettu alentavan metallin lujuutta ja kasvattavan sitkeyttä. Ilman jälkikäsitteilyä WAAM-menetelmällä valmistetut rakenneosat ovat myös herkkiä väsymisestä aiheutuville vaurioille (Buchanan & Gardner 2019, s. 12-13, s. 17-18).

2.1.3 Kerroslaminointi

Kerroslaminointimenetelmässä (*sheet lamination*) kappale valmistetaan liittämällä muotoon leikattuja materiaalikalvoja yhteen. Metallikalvot kiinnitetään toisiinsa useimmiten ultraäänihitsaamalla tai laseria käyttäen (Jarosinski & Zhang 2018, s. 46). Kuvassa 5 on esitettyä kerroslaminointimenetelmän toimintaperiaate.



a) Rullatun materiaalin kerros laminointi



b) Valmiiden arkkien kerros laminointi

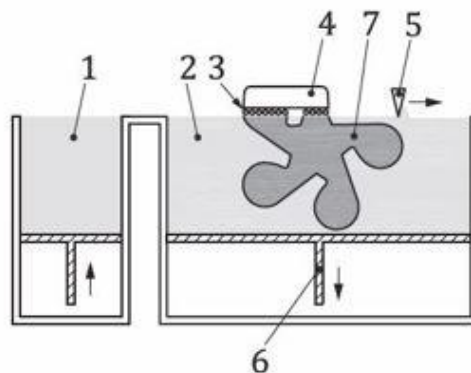
1	leikkauslaite	5	valmistettava kappale
2	ylijäämämateriaalirulla	6	materiaalirulla
3	laminointirulla	7	ylijäämämateriaalipino
4	valmistusalusta ja nostin	8	materiaalipino

Kuva 5. Periaatekuva kerros laminointimenetelmästä. (SFS-EN ISO 17296-2:2016 2016, s. 12)

Kerros laminoinnin etuihin kuuluvat mm. alhaiset materiaali- ja kalustokustannukset, valmistuskappaleen hyvät lujuusominaisuudet sekä hyvä pinnanlaatu. Kappaleen geometriaa kuitenkin rajoittavat kerrospaksuus ja leikkauslaitteen työstöominaisuudet. Tästä rajoitteesta johtuen kerros laminointia ei pidetä yhtä lupaavana menetelmänä rakentamisalan tarpeisiin nähden kuin jauhepetisulatus- ja suorakerrostusmenetelmiä (Buchanan & Gardner 2019, s. 13).

2.1.4 Sideaineen suihkutetus

Sideaineen suihkutetus, englanniksi *Binder Jetting* (BJ), on materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa kappale valmistetaan suihkuttamalla nestemäistä sideainetta kohdistetusti materiaalijauheeseen (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 2017, s. 7). Jauhepetisulatuksen tavoin myös sideaineen suihkutuksessa kappale valmistetaan kerroksittain jauhepetiin tulostusalustan liikkua alaspäin jokaisen kerroksen valmistumisen jälkeen (Jarosinski & Zhang 2018, s. 45). Kuvassa 6 on esitettyä sideaineen suihkutuksen toimintaperiaate.



1	jauheen syöttösystemi	5	jauheen levittäjä
2	jauhe levitettyä petiin	6	valmistusalusta ja nostin
3	nestemäinen sideaine	7	valmistettava kappale
4	sideaineen annostin		

Kuva 6. Periaatekuva sideaineen suihkutusmenetelmästä. (SFS-EN ISO 17296-2:2016 2016)

Sideainetta suihkuttamalla valmistettujen kappaleiden jälkikäsittely on usein monimutkaisempaa kuin muilla lisäävän valmistuksen menetelmillä tehtyjen kappaleiden. Tarvitavien lujuusominaisuuksien varmistamiseksi metallikappaleen täytyy antaa jäähmettyä ensiksi 6 – 12 h, jonka jälkeen kappaleelle tehdään vielä monivaiheinen lämpökäsittely yli 1000 °C:ssa, jonka kesto on 24 – 36 h:a (Jarosinski & Zhang 2018, s. 46).

2.1.5 Electrochemical additive manufacturing

ISO/ASTM -standardissa määriteltyjen menetelmäluokkien ulkopuolelle jää electrochemical additive manufacturing (ECAM), joka on vielä kehityksen alkuvaiheessa. Menetelmän suurena etuna muihin nähden on vähäiset jäännösjännitykset, sillä valmistus voi

tapahtua huoneenlämmössä, mutta mahdolliset kappalekoot ovat vielä varsin pieniä (Buchanan & Gardner 2019, s. 13).

Teknologiaa kehittävän yrityksen internetsivuilla (Fabric8Labs) kerrotaan, että heidän uusimman ECAM-tulostimensa tulostusalue on 300 x 450 mm ja valmistusnopeus parhaimmillaan 15 kg/h. Ilmoitettujen suorituskykytietojen perusteella menetelmä vaikuttaa jo varsin kilpailukykyisiltä, kun vertaa esimerkiksi taulukossa 2 esitettyihin markkinoilta löytyvien muiden AM-järjestelmien tietoihin.

2.2 Materiaalia lisäävän valmistuksen tuotantoprosessi

Materiaalia lisäävän valmistuksen tuotantoprosessi vaihtelee hieman AM-järjestelmästä riippuen, mutta yleisesti ottaen se voidaan jakaa kuuteen vaiheeseen (Yang et al. 2017, s. 33):

1. CAD-mallin luonti
2. CAD-mallin muuttaminen AM-laitteen kanssa yhteensopivaan tiedostomuotoon
3. CAD-mallin valmistelu valmistusta varten
4. AM-laitteen asetustyö
5. valmistetun kappaleen irrotus rakennusalustasta
6. jälkikäsittely

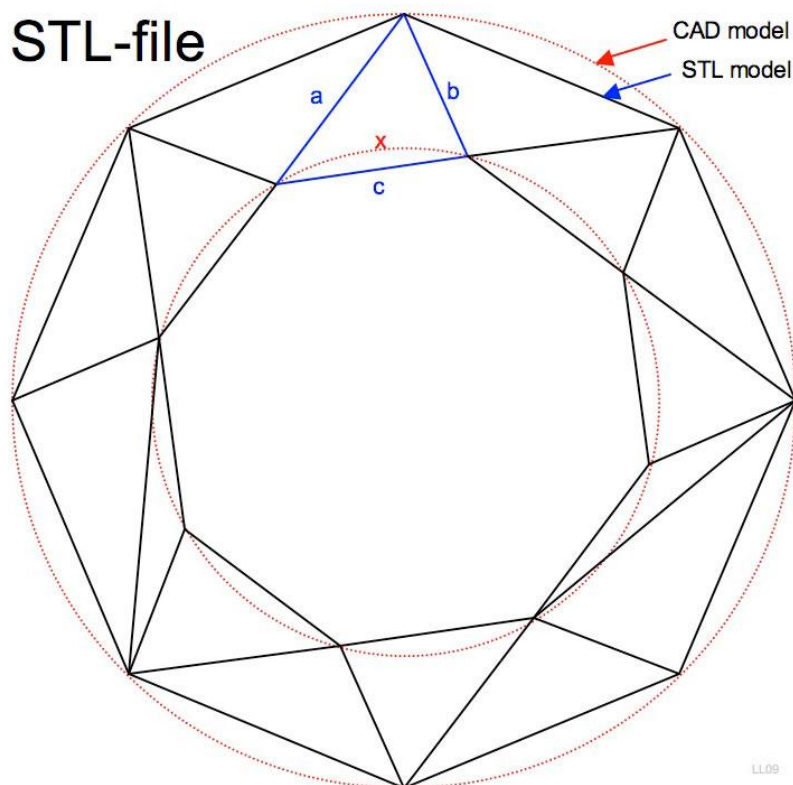
Tässä osiossa prosessia tarkastellaan ensisijaisesti PBF-menetelmien näkökulmasta. Alaluvussa 2.2.1 käsitellään vaiheita 1 – 3 ja alaluvussa 2.2.2 vaiheita 4 – 6.

2.2.1 Kappaleen mallitiedoston luominen

AM-valmistuksen edellytyksenä on tietokoneavusteisesti luotu (CAD) 3D-malli, joka voi sisältää muun muassa tiedon valmistettavan kappaleen geometriasta ja materiaalista. Markkinoilta löytyy lukuisia eri ominaisuuksilla varusteltuja suunnitteluohjelmistoja kolmiulotteisten CAD-mallien luomiseen (Yang et al. 2017, s. 34).

Mallin luomisen jälkeen voidaan siirtyä seuraavaan vaiheeseen eli tiedostomuodon muuttamiseen AM-laitteelle sopivaksi. Tällä hetkellä lähes kaikki AM-järjestelmät ovat yhteensopivia STL-tiedostomuodon kanssa. STL-tiedostomuodossa 3D-mallin pinnat esitetään erikokoisten kolmioiden avulla. Kolmioiden kärkien sijaintitiedon ja kolmioiden normaalivektoreiden avulla AM-laitteelle annetaan tieto kappaleen pintojen sijainneista sekä määritellään kappaleen sisäpuoli (Yang et al. 2017, s. 34). Kuvassa 7 on havainnollistettuna STL-formaatin toimintaperiaate.

STL-tiedostomuoto sisältää ainoastaan CAD-mallin geometriatiedon, joten esimerkiksi kaikki mallin sisältämä materiaalitieto katoaa formaatin muunnosprosessissa. Ongelman ratkaisemiseksi on kehitetty AMF-tiedostomuoto, joka on nykyisin ISO/ASTM-standardiformaatti. AMF-tiedostot voivat sisältää geometriatiedon lisäksi muun muassa tietoa kappaleen väristä ja materiaalista. STL on edelleen hallitseva tiedostoformaatti, mutta AMF-formaattia tukevien CAD-ohjelmistojen määrä kasvaa koko ajan. AMF-tiedostoon tallennetun tiedon varsinaista käyttöä kappaleen valmistuksessa rajoittaa tällä hetkellä AM-järjestelmien suorituskyky (Yang et al. 2017, s. 34 - 35).



Kuva 7. Havainnekuva STL-tiedostomuodon periaatteesta. Punaisella viivalla on piirrettyä "donitsin" muotoinen alkuperäinen CAD-malli ja mustalla se muutettuna STL-formaattiin. Kolmioita pienentämällä saadaan STL-mallia tarkemmaksi. Kuvälähde: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:STL-file.jpg>

Mallin tiedostoformaatin muunnoksen jälkeen täytyy mallitiedostoa usein vielä korjailla ja muokata valmistusta varten esikäsittelyohjelmistolla. STL-tiedostossa yleisiä korjattavia virheitä ovat esimerkiksi pintakolmioiden väliin jääneet raot ja päinvastaiseen suuntaan olevat normaalivektorit, jotka näyttävät pinnan väärän puolen kappaleen sisäpinnaksi. Virheiden korjaamisen jälkeen 3D-malli suunnataan valmistuskammion tai -alustan suhteen ja määritellään kappaleen geometria, tiheys sekä mahdolliset valmistuksen aikaiset

tukirakenteet. Tämän jälkeen 3D-malli viipaloidaan määrätyn paksuisiin valmistuskerrokseen ja määritetään valmistusparametrit, kuten esimerkiksi energiasäteen teho ja reitti sekä valmistusnopeus (Yang et al. 2017, s. 35 - 39).

2.2.2 Kappaleen valmistus ja jälkikäsittely

Ennen valmistuksen aloittamista tulee AM-laitteelle tehdä vielä valmistelevia toimenpiteitä. Näitä voivat olla esimerkiksi tulostuskammion puhdistus edellisen työn jäljiltä, jauhepedin täyttö ja tärkeiden valmistusasetusten tarkistus. Tässä vaiheessa tehdään myös prosessinohjaukseen liittyviä toimenpiteitä, joilla varmistetaan esimerkiksi tulostuskammion neutraalit olosuhteet koko valmistuksen ajaksi (Yang et al. 2017, s. 39).

Valmistuksen jälkeen kappale irrotetaan valmistusalustasta. Tähän työvaiheeseen kuuluu ylimääräisen materiaali jauheen poisto valmistusalustasta. Jauhe voidaan käyttää uudelleen, kun se on puhdistettu ei-halutuista pienhiukkasista. Kappale on tässä vaiheessa hitsattu valmistusalustaan tukirakenteiden kautta ja sen irrottamiseen tarvitaan leikkutyökalua. Vaadittavat jälkikäsittelyt vaihtelevat paljolti eri AM-järjestelmien välillä ja jauhepetisulatuksessa tukirakenteiden irrottamisen jälkeen kappale voi olla jo valmis. Myös erilaiset lämpökäsittelyt ovat yleisiä. (Yang et al. 2017, s. 41 - 43).

2.3 Materiaalit

Materiaalivalikoima metallien lisäävän valmistuksen alalla kasvaa koko ajan ja useat laitevalmistajat tarjoavat omia materiaalejaan. WAAM-menetelmässä käytetään hitsaustehokkuudesta löytyviä materiaalilankakeloja, joten saatavilla on jo valmiiksi laajajoukko erilaisia metalliseoksia. Taulukossa 1 on esitettyä yleisimpiä lisäävässä valmistuksessa käytettyjä metallijauheita sekä niiden DIN-standardin mukaiset nimikkeet (Metal AM; Wu, B. et al. 2018, s. 128). Lisäävää valmistusta on erityisesti käytetty ja tutkittu materiaalien parissa, joita on kallista työstää perinteisin menetelmin. Tästä syystä esimerkiksi erilaiset titaaniseokset ovat tutkituimpia metalleja (Paolini et al. 2019, s. 4).

Rakentamisessa käytetyt metallit ovat yleensä rautaseospohjaisia johtuen niiden lujuudesta ja jäykkyydestä yhdistettynä suhteellisen alhaisiin kustannuksiin. Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa tehokkaamman materiaalin käytön, mikä voi johtaa uusien, kalliimpien materiaalien käyttöönottoon myös rakennusalalla (Buchanan & Gardner 2019, s. 14, s. 25).

Taulukko 1. Yleisimpiä jauhepetisulatuksessa käytettyjä metallijauheita (Metal AM)

	Materiaali	DIN		Materiaali	DIN
Alumiini-seokset	AlSi10Mg	3.2381	Ruostumattomat teräkset	SS 304	1.4301
	AlSi7Mg	3.2371		SS 316 L	1.4404
	AlSi12	3.3581		SS 410	1.4006
Koboltti-seokset	ASTM F75	2.4723		SS 440	1.4110
	CoCrWC	-		15-5 PH	1.4540
Työkaluteräkset	AISI 420	1.2083		17-4 PH	1.4542
	Marage 300	1.2709	Titaani-seokset	Titanium Grade 2	3.7035
	H13	1.2344		Ti6Al4V	3.7165
	AISI D2	1.2379		Ti6Al4V ELI	3.7165 ELI
	AISI A2	1.2363		TiAl6Nb7	-
	AISI S7	1.2357	Jalometal-liseokset	kulta	18 Carat
Nikkeli-seokset	Inconel 718	2.4668		hopea	930 Sterling
	Inconel 625	2.4856	Kupari-seokset	CC 480 K	2.1050
	Inconel 713	2.4670			
	Inconel 738	-			
	Hastelloy X	2.4665			

Taulukon 1 materiaaleista rakentamisessa käytetään tällä hetkellä ylivoimaisesti eniten ruostumattomia teräksiä 304 ja 316L, jotka ovat molemmat austeniittisia. Austeniittiset ruostumattomat teräkset sisältävät noin 17 – 18 % kromia ja 8 – 11 % nikkeliä. Korroosionkestävyyden lisäksi ne ovat hyvin sitkeitä sekä helposti kylmämuokattavia ja hitsattavia (Baddoo 2017, s. 2).

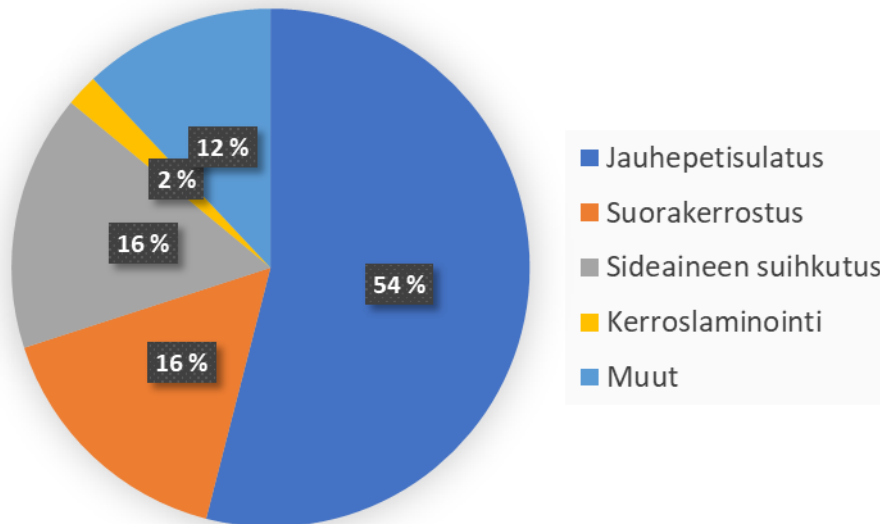
ASTM-standardin mukainen ruostumaton teräslaji 304 vastaa eurooppalaisen standardin EN 10088 mukaista teräslajia 1.4301, joka soveltuu parhaiten haja-asutusalueille, kaupunkeihin sekä teollisuusympäristöihin, joissa on vähäinen korroosiorasitus. Teräslaji 316L vastaa eurooppalaisen standardin EN 10088 mukaisia teräslajeja 1.4404, 1.4432 ja 1.4435. Näistä yleisimmin käytetty 1.4404 soveltuu hyvin meri- ja teollisuusympäristöihin (Baddoo 2017, s. 4, s. 131).

PBF-valmistuksessa haponkestävä teräs 316L on hyvin yleisesti käytetty ja suurin osa teräksiin liittyvästä tutkimuksesta on kohdistunut siihen (Jokinen & Riipinen 2016, s. 15). Monissa tutkimuksissa on todettu PBF-valmisteisella 316L-teräksellä olevan perinteisesti valmistettuun verrattuna hieman alhaisempi kimmomoduuli (noin 180 000 MPa), selvästi suurempi myötölujuus ja vaihtelevampi murtovenymä. Alhaisempi kimmomoduuli on yhdistetty teräksen suurempaan huokoisuuteen. Korkeamman lujuuden syyksi on arvioitu valmistusprosessissa tapahtuva nopea jäähtyminen, mikä aiheuttaa teräkselle hienokiteisen rakenteen. Lisäävästi valmistetuilla teräksillä on myös todettu perinteisesti valmistettuja enemmän anisotrooppisuutta ja jäännösjännityksiä (Buchanan & Gardner 2019, s. 14 - 15). Useimmissa tapauksissa materiaalin lujuusominaisuudet ovat heikoimpia materiaalin syöttötasoa kohtisuorassa suunnassa (Paolini et al. 2019, s. 4).

Jauhepetisulatuksella on tutkimusten mukaan mahdollista valmistaa hyvälaatuisia teräsosia, mutta prosessi on hallittava hyvin. Lopputuloksen laatuun vaikuttavat mm. materiaali jauhe, sen juoksevuus ja partikkelikoko sekä -jakauma. Jauheen sulatuksen parametrit ja tulostusstrategia vaikuttavat merkittävästi materiaalin tiiveyteen. Jälkikäsitteilyillä voidaan vaikuttaa mm. materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin, jäännösjännityksiin ja pinnanlaatuun. Valmistuksessa on huomioitava myös valmistajakohtaiset erot tulostuslaitteissa (Jokinen & Riipinen 2016, s. 29).

2.4 Markkinoilta löytyvät AM-laitteet metalleille

Viime vuosina sekä kysyntä, että tarjonta metallivalmistukseen soveltuvien AM-laitteiden kohdalla on lisääntynyt ja laitteiden suorituskyky parantuu koko ajan. Vaikka laitteiden hinnat ovat tulleet pikkuhiljaa alaspäin, ovat ne edelleen suhteellisen kalliita. Hinnat liikkuvat yleensä 80 000 ja miljoonan dollarin välillä, mutta suurien kappaleiden valmistukseen kehitettyjen hybridijärjestelmien hinnat voivat nousta muutamiin miljooniin (Mrazovic & Mocibob 2015, s. 47; Aniwaa.com). Kuten kuvasta 8 voi huomata, suurin osa markkinoilla saatavilla olevista metallien AM-laitemalleista oli jauhepetisulatusteknologiaa hyödyntäviä vuonna 2019. Sideaineen suihkutusta ja suorakerrostusta olivat seuraavaksi yleisimpiä.



Kuva 8. Eri valmistusteknologioiden osuus metallien AM-järjestelmämarkkinoista vuonna 2019 saatavilla olevien mallien mukaan esitettynä (Aniwa.com).

Seuraavilta sivuilta löytyvissä taulukoissa 2 ja 3 on koottuna markkinoilta löytyviä metallikappaleiden valmistukseen soveltuvia AM-järjestelmiä. Taulukossa 2 on lueteltuna järjestelmiä, joilla voidaan valmistaa kappaleita, joiden sivumitat ovat suuruusluokkaa 250 – 500 mm. Samaa suuruusluokkaa olevia kappaleita voidaan valmistaa isoimmilla jauhepetisulatuksen perustuvilla AM-järjestelmillä. Taulukossa 3 on listattuna suuremmille valmistuskappaleille tarkoitettuja järjestelmiä. Taulukoissa on koottuna saatavilla olevat tiedot AM-järjestelmien käyttämästä menetelmästä, tulostusalueen koosta, kerrospaksuudesta, valmistusnopeudesta sekä hinnasta. Tekniset tiedot ovat pääasiassa peräisin valmistajien antamista tuotetiedoista. Joissain tapauksissa puuttuvia tietoja on täydennetty AM-tekniikoihin perehtyneen yrityksen Aniwaan internetsivuilta löytyvillä tiedoilla. Hinta-arviot ovat peräisin Aniwaalta ja Savonia-ammattikorkeakoulun (2018) julkaisemasta Formnext 2018 -messujen laitelistauksesta.

Taulukot eivät sisällä läheskään kaikkia saatavilla olevia AM-järjestelmiä eivätkä kaikki valmistajat ole edustettuina. Varsinkin pienempien kappaleiden valmistukseen soveltuvia laitteita on runsaasti saatavilla. Taulukoihin on sisällytetty ensisijaisesti tuotteita, joita koskeva tieto on ollut helposti saatavilla.

Taulukko 2. Markkinoilta löytyviä keskikokoisten metallikappaleiden valmistukseen soveltuvia AM-järjestelmiä (Savonia 2018; Aniwaa.com).

Valmistaja	Järjestelmä	Menetelmä	Tulostusalue (mm ³)	Kerrospakkuus yleensä, suluissa min. (µm)	Valmistusnopeus (cm ³ /h)	Hintarvio (USD)
3D Systems	DMP Factory 350	PBF	275 x 275 x 420	30 - 90 (5)	-	750 k
Aconity 3D	3DMETAL-WIRE	DED	∅ 400 x 400	400 - 800	-	250 k
Additive Industries	MetalFAB1	PBF	420 x 420 x 400	20 - 100	< 1 m ³ /a	> 2 M
AddUp/BeAM	Modulo 250	DED	400 x 250 x 300	800 - 1200	15 - 20	450 k
Concept Laser	M2 Series 5	PBF	245 x 245 x 350	20 - 80	2 - 35	-
Desktop Metal	Studio	Pur-sotus	300 x 200 x 200	100 - 220 (50)	< 16	120 k
	Shop 16L	BJ	350 x 222 x 200	40 - 100	-	> 225 k
	Production	BJ	490 x 380 x 260	(50)	< 12 000	420 k
EOS	M 290	PBF	250 x 250 x 325	(100)	-	> 500 k
	M 400-4	PBF	400 x 400 x 400	(100)	< 100	> 1 M
ExOne	X1 25PRO	BJ	400 x 250 x 250	30 - 100	< 3600	650 k
Renishaw	RenAM 500Q	PBF	250 x 250 x 350	20 - 100	< 150	> 600 k
Sisma	MY-SINT300	PBF	∅ 300 x 400	60 (30)	< 25	-
SLM Solutions	SLM 280	PBF	280 x 280 x 365	20 - 90	< 113	> 750 k
	SLM 500	PBF	500 x 280 x 365	20 - 90	< 171	1 - 2 M
Sodick	OPM350L	Hybridi	350 x 350 x 350	(10)	-	1 M
Triditive	AMCell	Pur-sotus	∅ 220 x 300	(50)	< 400	320 k
Trumpf	TruPrint 3000	PBF	∅ 300 x 400	20 - 150	5 - 60	> 450 k
	TruPrint 5000	PBF	∅ 300 x 400	30 - 150	5 - 180	> 1 M
Velo3D	Sapphire	PBF	∅ 315 x 400	(250)	< 60	-
Weirather	WLS 3232	PBF	320 x 320 x 380	50 - 200	-	220 k
Wiiibox	SLM250	PBF	250 x 250 x 300	20 - 100	-	> 320 k
Xi'an BLT	BLT-S400	PBF	400 x 250 x 400	20 - 100	-	> 700 k

Taulukko 3. Markkinoilta löytyviä suurien metallikappaleiden valmistukseen soveltuvia AM-järjestelmiä (Savonia 2018; Aniwaa.com).

Valmistaja	Järjestelmä	Menetelmä	Tulostusalue (m ³)	Kerrospaksuus yleensä, suluissa min. (µm)	Valmistusnopeus (kg/h)	Hinta-arvio (USD)
3D Systems	DMP Factory 500	PBF	0,5 x 0,5 x 0,5	30 - 90 (2)	-	-
MWES	ADDere I	DED (LWAM)	1 x 1 x 0,5	-	< 4,5	-
	ADDere II	DED (LWAM)	0,5 x 0,5 x 1,25	-	< 13,6	-
	ADDere III	DED (LWAM)	40 x 8 x 2	-	13,6	-
Addilan	Addilan V0.1	DED (WAAM)	1,3 x 1 x 0,5	-	6	1,1 M
Adira	AC ADD Creator	PBF	1 x 1 x 0,5	-	-	> 4 M
ADC Aeroswift	Aeroswift	PBF	2 x 0,6 x 0,6	(50)	-	-
DMG Mori	Lasertec 65 3D	DED	0,735 x 0,65 x 0,56	(300)	-	< 1 M
ExOne	X1 160PRO	BJ	0,8 x 0,5 x 0,4	30 - 200	> 10 000 cm ³ /h	-
InssTek	MX-1000	DED	0,8 x 1 x 0,65	(450)	14 cm ³ /h	-
	MX-Grande	DED	4 x 1 x 1	(750)	42 cm ³ /h	-
Matsuura	Lumex Avance 60	Hybridi	0,6 x 0,6 x 0,5	-	-	1,3 M
Optomec	Lens 860	Hybridi	0,86 x 0,6 x 0,61	-	-	250 - 1000 k
Sciaky	EBAM 110	DED	1,8 x 1,2 x 1,6	-	3 - 9	-
	EBAM 300	DED	5,8 x 1,2 x 1,2	-	3 - 9	-
SLM Solutions	SLM 800	PBF	0,5 x 0,28 x 0,88	20 - 90	< 171 cm ³ /h	-
Titomic	TKF9000	Materiaalin suihkutetus	9 x 3 x 1,5	-	< 45	-

Taulukoista näkee, että metallivalmistukseen soveltuvia AM-järjestelmiä on hyvin monenlaisia ja erilaisiin käyttötarkoituksiin. Taulukkoon 2 listatuista järjestelmistä suurin osa perustuu jauhepetisulatukseen (PBF) ja niiden hinta-arviot vaihtelevat suuresti (120 000 – 2 000 000 \$) keskiarvon ollessa reilu puoli miljoonaa Yhdysvaltain dollaria. Sideaineen suihkutukseen (BJ) ja PBF-menetelmiin perustuvilla järjestelmillä minimikerrospaksuus tulostuksessa on yleensä 20 – 100 µm riippuen esimerkiksi käytettävästä materiaalista ja valmistusnopeudesta. Ilmoitettu valmistusnopeus vaihtelee myös suuresti (2 – 12 000 cm³/h) teknologiasta riippuen.

Suurin osa taulukossa 3 esitetyistä suurista AM-järjestelmistä perustuvat suorakerrostukseen ja järjestelmien hinnat liikkuvat miljoonissa dollareissa. Mukana on myös muutama jauhepetisulatusteknologia, joista suurimman ilmoitettu tulostuskappaleen koko on $2 \times 0,6 \times 0,6 \text{ m}^3$. Näistä suurista PBF-järjestelmistä ainakin Adiran tarjoamassa laitteistossa on pienempi tulostuskammio (250 x 250), joka liikkuu prosessin aikana eri kohtiin jauhepetiä (Savonia 2018). Taulukosta 3 pistää silmään ADDere III -järjestelmä, jolla voi valmistajan ilmoituksen mukaan tulostaa jopa $40 \times 8 \times 2 \text{ m}^3$:n kappaleita. Järjestelmä perustuu LWAM-menetelmään (*laser wire additive manufacturing*), jossa laseria käytetään sulatetaan materiaalilankaa (MWES 2018, s. 8). Useimpien järjestelmien valmistusnopeudet ovat alle 10 kg/h, mutta Titomic ilmoittaa omissa tuotetiedoissaan, että jopa 45 kg/h on mahdollinen.

3. METALLIEN MATERIAALIA LISÄÄVÄ RAKENTAMINEN

Materiaalia lisäävää valmistusta on käytetty arkkitehtuurimallien luomiseen jo yli vuosikymmenen ajan. Viime vuosina tutkimustyö rakennneosien tulostamisen parissa on lisääntynyt merkittävästi ja ensimmäisiä rakennushankkeita on jo toteutettu lisäävää valmistusta hyödyntäen (Paolini et al. 2019, s. 1). Eniten tutkimusta vuonna 2017 oli tehty betonin pursotusmenetelmien käytöstä suuren mittaluokan sovellutuksissa sekä polymeerien saralla. Metallien saralla tutkimus oli vähäisempää suurten kustannusten takia (Camacho et al. 2017, s. 7).

Lisäävän valmistuksen hyödyntämistä rakentamisessa käsittelevässä artikkelissaan Labonnote et al. (2016, s. 348) käyttävät termiä *additive construction*, jonka he määrittelevät seuraavasti:

- *Additive manufacturing*: menetelmä tuottaa kappaleita 3D-mallitiedon pohjalta materiaaleja yhteen liittämällä, tyypillisesti kerros kerrokselta -periaatteella, vastakohtana materiaalia poistaviin ja materiaalia muovaaviin menetelmiin (suomenos SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 2017, s. 6)
- *Construction*: yleisnimitys toiminnalle, jolla tuotetaan rakennustekniikkaan liittyviä suuren mittaluokan rakennelmia, kuten esimerkiksi taloja, siltoja, paviljonkeja tai muunlaisia rakennuksia (kirjoittajan suomenos)
- *Additive construction*: Menetelmä tuottaa rakennusteknisiä rakennelmia 3D-mallitiedon pohjalta materiaaleja yhteen liittämällä. Tämä tarkoittaa, että suunnittelu-, tuotanto- ja/tai asennusmenetelmät ovat ainakin jossain määrin digitaalisesti ohjattuja (kirjoittajan suomenos).

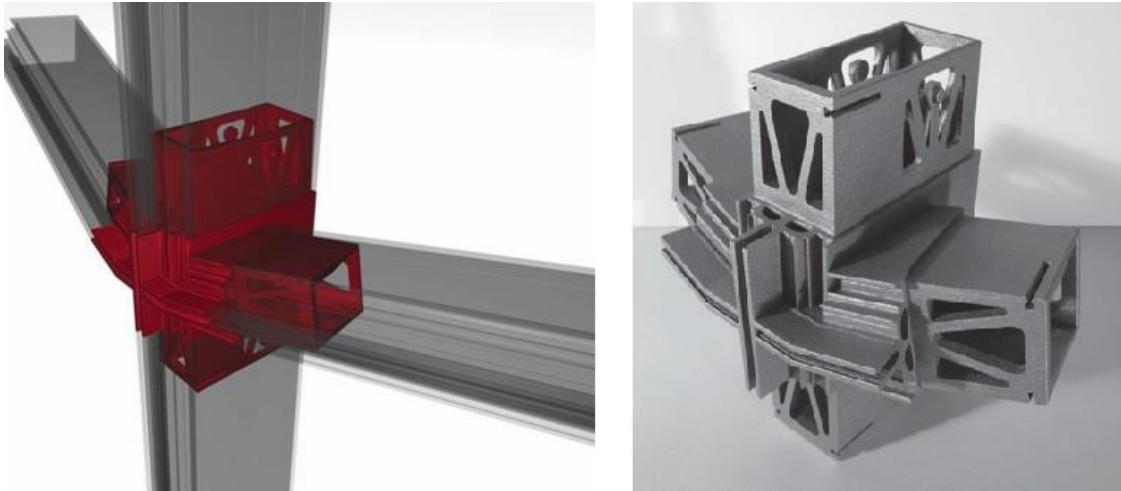
Tässä työssä käytetään termiä *additive construction* suomennettuna materiaalia lisäävä rakentaminen tai lisäävä rakentaminen.

3.1 Katsaus toteutuneisiin hankkeisiin

Maailmalta löytyy muutamia toteutuneita tutkimushankkeita rakennusosalta, joissa ollaan metallisia rakenneosia, tai jopa kokonaisia rakenteita, valmistettu materiaalia lisäävillä menetelmillä. Tässä alaluvussa käydään läpi kolme alan edelläkävijätapausta.

3.1.1 Julkisivun liitososa Nematox

Vuosina 2008 – 2010 toteutetussa tutkimushankkeessa tutkittiin alumiinijulkisivujen liitososien optimointia ja optimoitujen osien valmistusta jauhepetisulatuksella. Projekti oli julkisivuvalmistajan ja yliopistotutkijoiden yhteistyöhanke. Kuvassa 9 on esitetty alumiininen Nematox-liitoskappale, joka syntyi hankkeen lopputuloksena (Strauß et al. 2015, s. 229).



Kuva 9. Nematox - liitososan luonnos vasemmalla ja oikealla jauhepetisulatusmenetelmällä valmistettu alumiininen kappale (Strauß et al. 2015, s. 230).

Lisäävästi valmistettu liitososa kehitettiin alumiinista pilaripalkki-julkisivujärjestelmää varten, jossa lasipaneelit liittyvät toisiinsa vaihtelevissa kulmissa. Yksittäisen liitososan suunnitteluprosessia pyrittiin automatisoimaan käyttämällä hyödyksi parametrista suunnittelua ja esimerkiksi yksittäisten rakenneosien liittymiskulmat voitiin syöttää suunnitteluohjelmistoon lähtötietoparametreina.

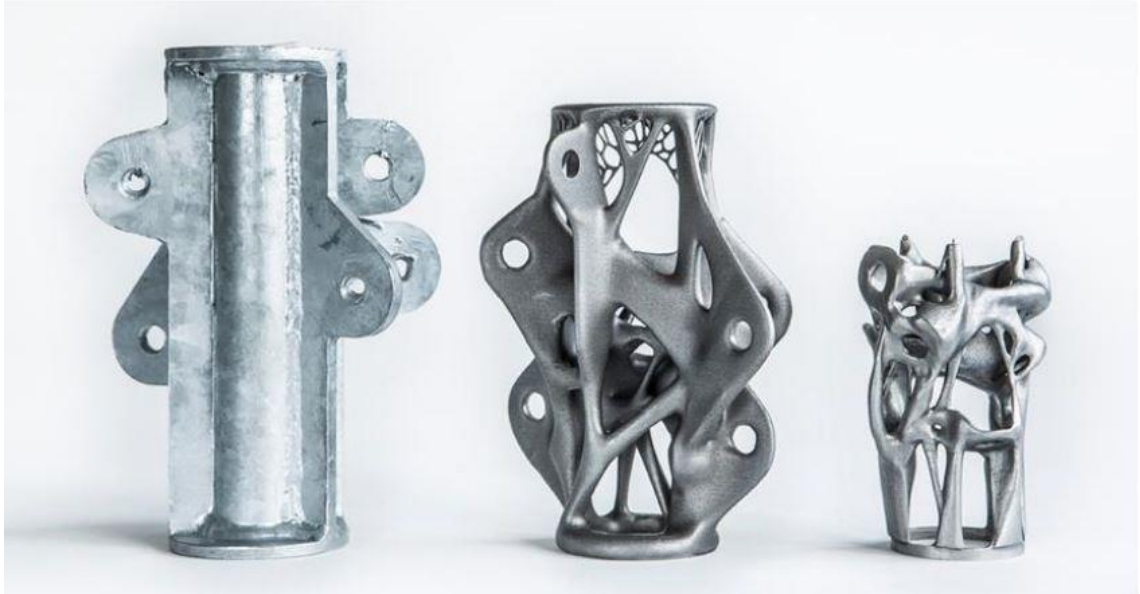
Kappaleen suunnittelu ja valmistus oli kuitenkin työlästä ja hidasta. Tulostuskelpoisen Nematoxin mallintamiseen meni insinööreiltä aikaa noin 120 tuntia, alumiinisen kappaleen valmistamiseen 76,5 tuntia ja viimeistelyyn sekä jälkikäsittelyyn vielä 4 tuntia (Strauß 2013, s. 114-119). On kuitenkin syytä huomata, että tutkimushanke toteutettiin vuosina 2008 – 2010 ja materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät ovat kehittyneet sen jälkeen. Myös Nematoxin kehittäneet tutkijat pitivät lisäävää valmistusta tulevaisuuden trendinä, joka muuttaa myös julkisivujen suunnittelua ja valmistusta (Strauß et al. 2015, s. 234).

3.1.2 Arupin kehittämä valaisinrakenteen liitososa

Vuosina 2008 – 2013 kansainvälinen insinööritoimisto Arup oli mukana suunnittelemassa monimutkaisia *tensegrity*-rakenteita Haagiin, joita oli tarkoitus käyttää osana katuvalaistusta. Rakenteet koostuivat puristetuista teräsputkista, joiden päihin liittyi useita vedettyjä vaijereita vaihtelevista suunnista. Jokainen liitososa koostui 6 – 7 uniikista teräslevystä, jotka hitsattiin teräsputken ympärille vaihteleviin suuntiin. Vaijereiden liittymiskohtien ja -kulmien variaatioita oli yhteensä 1200, joten perinteisillä menetelmillä liitoksien valmistus oli hyvin työlästä. Projektin jälkeen Arupissa aloitettiin tutkimus, jonka tarkoituksena oli selvittää, voidaanko topologian optimoinnin ja lisäävän valmistuksen menetelmillä tehdä liitososat nopeammin ja fiksummin (Galjaard, Hofman & Ren 2015, s. 79).

Topologian optimoinnin tavoitteena oli minimoida liitososan materiaalimenekki. Optimoitongelman reunaehtoja olivat mm. vaijereiden kiinnityskohtien kuormat (maksimissaan 106 kN vetoa vaijeria kohden), vaijerikiinnityksien vaatima asennustila sekä liitososan päiden sopivuus liittyvien teräsputken ja valaisimen kanssa (Galjaard, Hofman & Ren 2015, s. 83). Topologiaaltaan optimoitua rakennemallia jouduttiin jalostamaan vielä vastaamaan valmistusmenetelmän vaatimuksia. Valmistusmenetelmänä käytettiin jauhepetisulatusta laserilla. Valmistettavuuden parantamiseksi kappaletta mm. madallettiin ja päiden liitoksia muutettiin. Tukirakenteiden välttämiseksi rakenteeseen lisättiin mm. pyöristyksiä ja haaraosia sekä muutettiin vaakasuuntaisia osia kalteviksi (Galjaard, Hofman & Ren 2015, s. 88).

Ensimmäinen lisäävästi valmistettu liitososa tehtiin erikoiskovasta työkaluteräksestä 1.2709, jonka myötölujuus on 1000 MPa. Seuraavan version suunnittelussa hyödynnettiin ensimmäisestä saatuja oppeja ja rakennetta saatiin optimoitua entisestään. Toinen versio valmistettiin haponkestävästä teräksestä 1.4404. Kuvassa 10 on esitettyä alkuperäinen liitososa ja kaksi topologiaaltaan optimoitua, lisäävästi valmistettua versiota (Galjaard, Hofman, Perry et al. 2015, s. 10).



Kuva 10. Alkuperäinen, perinteisin menetelmin valmistettu liitoskappale vasemmalla. Keskellä optimoitu ja jauhepetisulatuksella erikoiskovasta teräksestä (maraging steel 1.2709) valmistettu kappale. Oikealla pidemmälle optimoitu ja jauhepetisulatuksella haponkestävästä teräksestä 1.4404 valmistettu kappale (Galjaard, Hofman, Perry et al. 2015, s. 10).

Viimeisin versio oli 75 % kevyempi ja puolet matalampi kuin alkuperäinen liitososa. Tutkijoiden mukaan kyseisen tensegrity-rakenteen tapauksessa koko rakennetta voidaan keventää tämän seurauksena yli 40 %. Viimeisimmälle versiolle tehdyissä kokeissa materiaalin todettiin täyttävän standardin EN 10088 vaatimukset. Tutkijoiden mukaan materiaalikokeiden tulokset osoittavat, että nykyisillä jauhepetisulatusteknologioilla on mahdollista valmistaa laatu- ja luotettavuusvaatimukset täyttäviä rakenneosia (Galjaard, Hofman, Perry et al. 2015, s. 9 - 10).

Lisäävästi valmistettu liitososa ei ollut kuitenkaan kustannuksiltaan kilpailukykyinen perinteisesti valmistettuun nähden. Liitososa oli jauhepetisulatuksella valmistettavaksi suhteellisen suuri ja tutkimuksen aikaisilla (v. 2014) tulostimilla valmistukseen saattoi kuluua jopa 15 vuorokautta. Tutkijat olivat kuitenkin toiveikkaita lähitulevaisuuden suhteen, kun odotettavissa on laitteiden kehittymistä mm. tulostuskammioiden suurenemisella ja tulostuksen nopeutumisella (Galjaard, Hofman & Ren 2015, s. 91).

Optimoidun rakenteen mallintamiseen tarvittiin paljon laskennallista osaamista ja eri ohjelmistojen hallintaa. Tutkijoiden mukaan rakenteessa tarvittavien lukuisten erilaisten liitososien mallintaminen ja optimointi automaattisesti ei ollut vielä mahdollista sen aikaisilla työkaluilla. Erityisesti jälkioptimointi valmistusta varten oli hyvin aikaa vievää (Galjaard, Hofman, Perry et al. 2015, s. 10, s. 12).

3.1.3 MX3D-silta

MX3D-silta on WAAM-menetelmällä valmistettu teräksinen kevyen liikenteen silta, joka on tulossa Amsterdamin keskustaan. Silta on saanut nimensä hollantilaisen yrityksen mukaan, joka vastaa sillan valmistuksesta. Monen yrityksen ja yliopiston yhteistyönä toteutettu siltahanke on loppusuoralla ja sillalle on tehty vuonna 2019 vaaditut kuormituskokeet (MX3D.com).

2,5 m leveän sillan jänneväli on 10 m ja sitä pidetään osoituksena, että metallien materiaalia lisäävä valmistus on mahdollista myös rakentamiseen soveltuvassa mittakaavassa. Kuvassa 11 on kuva sillasta vuoden 2018 Dutch Design Week -tapahtumassa (Buchanan & Gardner 2019, s. 9 - 10).



Kuva 11. MX3D-silta esillä Dutch Design Week -tapahtumassa vuonna 2018 (Buchanan & Gardner 2019, s. 10)

3.2 Metallien materiaalia lisäävän rakentamisen mahdollisuudet

Digitalisaatio on yksi tämän hetken megatrendeistä ja myös rakennusalaalla yleisesti todettu kehityssuunta. Suureen automaatioasteeseen perustuva materiaalia lisäävä rakentaminen on helppo nähdä luonnollisena osana rakennusalan digitalisaatiota. Vaikka tutkimukset ovat vielä harvassa, monet tutkijat (Davtalab et al. 2018, s. 14; Paolini et al.

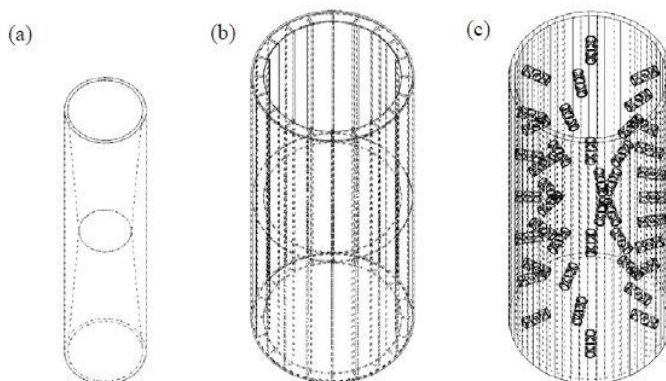
2019, s. 8) pitävät lisäävän rakentamisen menetelmien ja rakennuksen tietomallin (BIM) integroinnilla saavutettavia etuja merkittävinä.

Lisäävän rakentamisen mahdollistama ennennäkemätön rakenteiden geometrian vapaus herättää varmasti innostusta arkkitehdeissa. Esteettisten mahdollisuuksien lisäksi on myös paljon useiden tutkijoiden esiintuomia teknistaloudellisia, ympäristönsuojelullisia ja inhimillisiä mahdollisuuksia, joita käsitellään seuraavissa alaluvuissa.

3.2.1 Rakenteiden optimointi

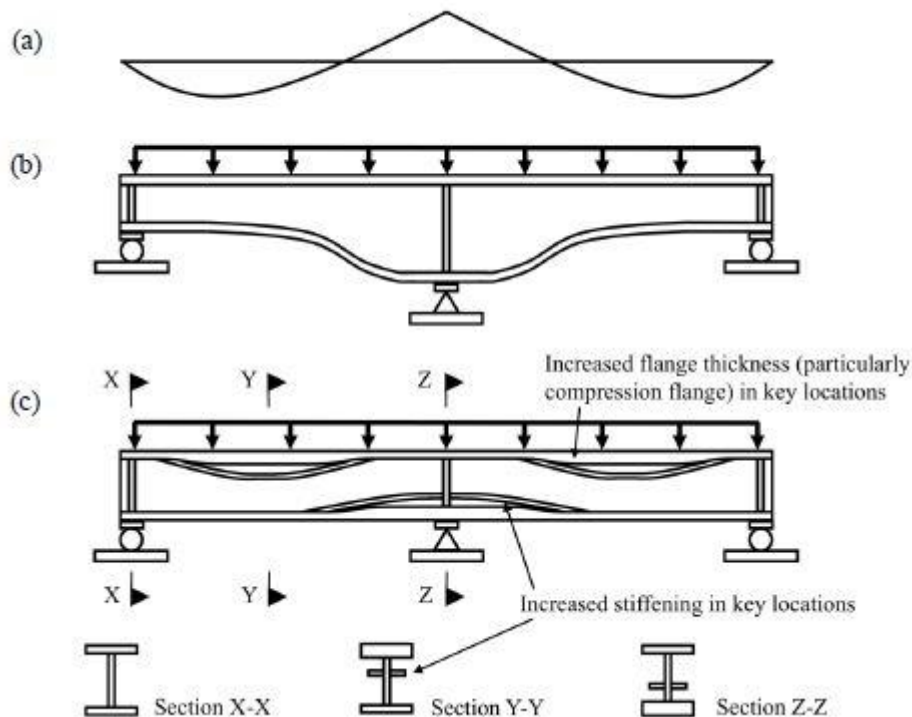
Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa rakenteiden optimoinnin tavalla, joihin ei perinteisillä valmistusmenetelmillä pystytä. Optimointi on mahdollista makrotason rakenteiden geometrian optimoinnin lisäksi myös mikrotasolla, jolloin vaikutetaan materiaaliominaisuuksiin (Buchanan & Gardner 2019, s. 22). Kysyntää teräsrakenteiden optimoinnille on, sillä arviolta yli neljäsosa kaikesta maailmalla tuotetusta teräksestä käytetään rakentamisessa ja tämän teräksen arvioitu keskimääräinen käyttöaste on alle 50 % (Moynihan & Allwood 2014, s. 1).

Lisäävän valmistuksen menetelmillä on mahdollista valmistaa esimerkiksi seinämävahvuudeltaan vaihtelevia poikkileikkauksia ja rakenneosia, jotka eivät olleet ennen teknisesti tai taloudellisesti toteuttamiskelpoisia. Poikkileikkauksiin voidaan suunnitella myös sisäisiä vahvistusominaisuuksia tai esimerkiksi tartuntauria, joilla parannetaan teräsprofiilin toimintaa osana liittorakennetta. Kuvassa 12 on havainnollistettu joitain mahdollisuuksia uudentlaisille poikkileikkauksille. Perinteisiä valmistusmenetelmiä käytettäessä valmistettavan kappaleen geometrian monimutkaistaminen lisää aina tuotantokustannuksia, mutta lisäävässä valmistuksessa vaikutus on hyvin pieni, joskus jopa olematon.



Kuva 12. Esimerkkejä mahdollisista AM-laitteella valmistetuista rakenneosista, joissa a) seinämävahvuutta vaihtelemalla parannetaan rakenneosan nurjahduskestävyyttä, b) seinämän sisäisillä jäykisteillä parannetaan nurjahduskestävyyttä, c) tartuntaurilla parannetaan rakenneosan toimintaa osana liittorakennetta (Buchanan & Gardner 2019, s. 22)

Lisäävän valmistuksen oleellinen ominaisuus on mahdollisuus materiaalin sijoittamiselle vain rakenteellisesti optimaalisiin paikkoihin. Kuvassa 13 on havainnollistettu kuinka tätä voisi hyödyntää esimerkiksi 2-aukkoisen jatkuvan palkin tapauksessa. Esimerkissä palkin momenttikuvio määrää poikkileikkauksen palkin eri kohdissa ja erityisesti puristusjännityksen esiintymisalueilla poikkileikkausta on vahvistettu. Palkin ulkomitat pysyvät kuitenkin vakioina, jolloin materiaalinkäytöltään tavallista tehokkaampi rakenne on edelleen helposti yhteensovitettavissa nykyisiin suunnittelukäytäntöihin (Buchanan & Gardner 2019, s. 22).

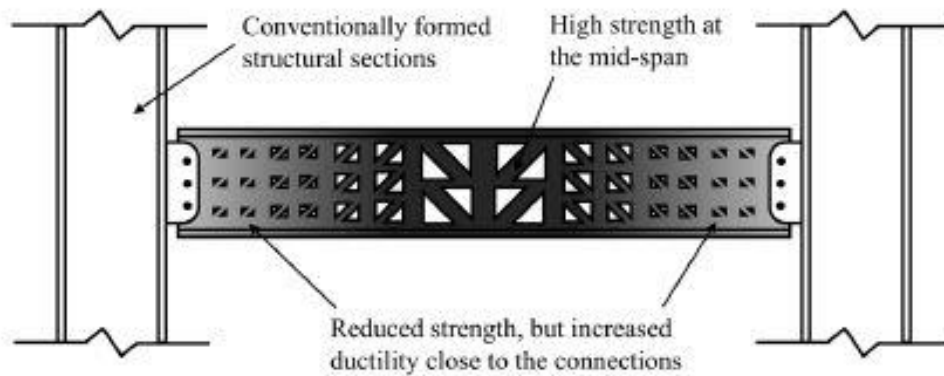


Kuva 13 a) 2-aukkoisen jatkuvan palkin momenttikuvio, b) perinteisin menetelmän valmistettu korkeudeltaan muuttuva palkki, c) tasakorkuinen, lisäävän valmistuksen menetelmän tehty palkki, jossa laipan paksuus muuttuu ja jäykisteitä on lisätty tarpeellisiin paikkoihin (Buchanan & Gardner 2019, s. 23)

Rakenteita voidaan optimoida myös muuttamalla materiaaliominaisuuksia rakenneosan sisällä. Komposiittimateriaalia, jossa aine muuttuu toiseksi joko tasaisesti tai portaittain välikerrosten kautta, kutsutaan FG-materiaaliksi (*functionally graded material*, FGM). Mikrotason optimointia on tehty jo esimerkiksi biolääketieteen alalla, jossa on kehitetty implantteja, joiden materiaalin huokoisuutta on kasvatettu paikallisesti. Tällä on saatu paikallisesti vähennettyä implantin jäykkyyttä ja parannettu yhteensopivuutta liittyvän

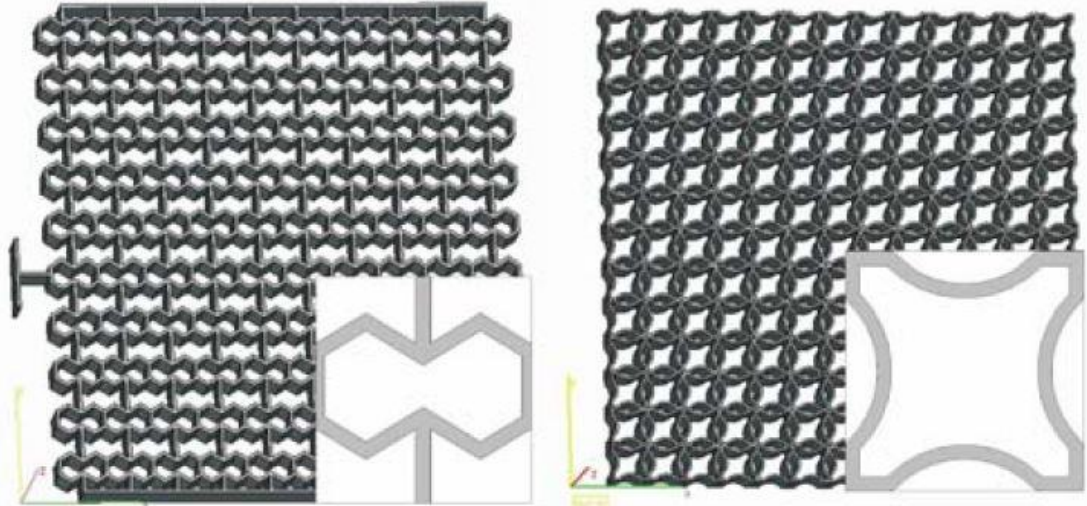
luun kanssa. Rakentamisessa voitaisiin vastaavasti vaikuttaa voimien ja momenttien jakautumiseen rakenteen sisällä vaihtelemalla materiaalin jäykkyyttä paikallisesti (Salmi et al. 1996, s. 7-8; Buchanan & Gardner 2019, s. 23).

Materiaalin lujuus- ja sitkeysominaisuuksia pystytään optimoimaan rakenneosan eri osissa myös hallitun jäähdyttämisen avulla. Korkealujuuksista materiaalia voidaan käyttää suurimpien rasitusten alueella, esimerkiksi palkin jännevälän keskellä, ja sitkeämpää materiaalia liitoskohdissa, joissa sitkeysvaatimukset ovat usein suuremmat. Kuvassa 14 on hahmotelma FGM-palkista, joka on kahden perinteisesti valmistetun pilarin välissä (Buchanan & Gardner 2019, s. 23).



Kuva 14. Mahdollinen hybridirakenne, jossa lisäävän valmistuksen menetelmällä tehty FGM-palkki on kahden perinteisesti valmistetun pilarin välissä. Palkin jännevälän keskellä materiaali on lujempaa ja liitosalueilla sitkeämpää (Buchanan & Gardner 2019, s. 24).

Lisäävän valmistuksen menetelmällä voidaan optimoida myös muita rakenteiden ominaisuuksia kuin painoa, kuten esimerkiksi lämpö- ja akustiikkaominaisuuksia (Labonnote et al. 2016, s. 358). Maanjäristysalueilla voitaisiin mahdollisesti käyttää energiaa absorboivia materiaaleja, kuten kuvan 15 mukaisia negatiivisen Poissonin luvun omaavia kenorakenteita, joita on PBF-menetelmällä jo kokeellisesti valmistettu (Rehme & Emmelmann 2009, s. 128, s. 131; Buchanan & Gardner 2019, s. 23).



Kuva 15. Negatiivisen Poissonin luvun omaavia kennorakenteita, joita voidaan käyttää energian absorboimiseen (Rehme & Emmelmann 2009, s. 131).

Jäännösjännitykset ovat yleensä ei-toivottuja ja voivat alentaa rakenneosan kuormituskestävyyttä. Materiaalia tulostettaessa voidaan kuitenkin hallita jäännösjännitysten jakautumista suuressa määrin säätämällä tulostusjärjestystä. Pakolliset jäännösjännitykset on mahdollista muuttaa hallituiksi esijännityksiksi, jotka parantavat valmiin kappaleen kuormituskestävyyttä (Buchanan & Gardner 2019, s. 24).

3.2.2 Kustomointi

Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa kustomoinnin ennennäkemättömissä määrin matalan katteen teollisuudenaloilla, kuten rakentamisessa. Pienet valmistussarjat ovat mahdollisia, jolloin pystytään toteuttamaan myös erikoistilauksia kapeammille markkinasegmenteille (Buchanan & Gardner 2019, s. 25).

Rakennesuunnittelijat voivat tehdä jokaisesta rakenneosasta erilaisen ilman merkittävää vaikutusta valmistuskustannuksiin. Suunnitelmien muutokset ovat myös nopeasti toteutettavissa (Buchanan & Gardner 2019, s. 25).

3.2.3 Rakennusaika

Yleensä rakennusprojektin kustannukset nousevat rakennusajan pidentyessä. Materiaalia lisäävällä rakentamisella on potentiaalia lyhentää rakennusaikaa monilla eri tavoilla. Tuotannon valmistelu-aika on usein lyhyempi lisäävässä valmistuksessa (Buchanan & Gardner 2019, s. 25). Tämä ominaisuus mahdollistaa myös nopean reagoinnin rakentamisen aikaisiin yllätyksiin, kuten esimerkiksi rakenneosan vaurioitumiseen. Korvaava

osa voidaan valmistaa nopeasti jopa työmaalla ja kustannussäästöjä tulee rakennustyön sujuvan etenemisen kautta (Camacho et al. 2017, s. 6).

Itse valmistusaikaa on myös mahdollista säästää lisäävän rakentamisen keinoilla ja asiaa on tutkittu betonin tulostamisen yhteydessä. Tutkimuksissa on myös todettu valmistettavan rakenteen geometrialla olevan suuri vaikutus siihen mikä on tehokkain valmistusmenetelmä ja perinteiset rakentamistavat ovat tehokkaampia yksinkertaisten rakenteiden valmistuksessa. Yleisesti ottaen lisäävässä valmistuksessa materiaalin syöttönopeuden kasvaessa valmistettavan kappaleen pinnanlaatu kärsii (Buchanan & Gardner 2019, s. 25).

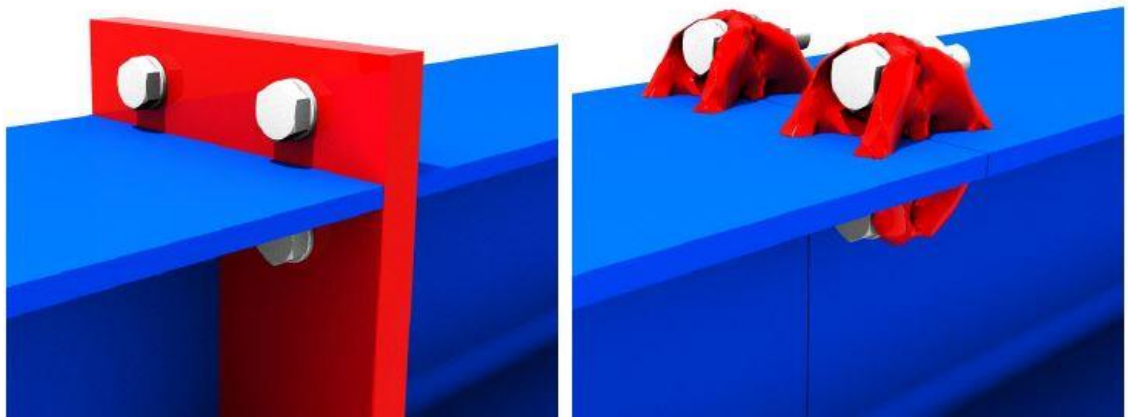
3.2.4 Hybridiratkaisut, rakenteiden vahvistus ja korjaus

Materiaalia lisäävän rakentamisen odotetaan todennäköisemmin vain täydentävän perinteisiä rakentamistekniikoita niiden syrjäyttämisen sijaan. Tulevaisuuden rakentamisessa voi yleistyä hybridiratkaisut, joissa perinteisiä rakennustuotteita yhdistellään lisääväällä valmistuksella tehtyihin monimutkaisempiin osiin (Buchanan & Gardner 2019, s. 25). Esimerkkinä hybridiratkaisusta on alaluvun 3.1.1 aiheena ollut lisäävästi valmistettu Nematox-liitoskappale, joka kehitettiin yhteensopivaksi olemassa olevaan alumiinijulkisivujärjestelmään.

Toisena esimerkkinä hybridirakentamisesta on perinteisten teräspoikkileikkausten yhdistäminen topologiaaltaan optimoituihin, lisäävän valmistuksen menetelmin tehtyihin liitososiin. Darmstadtin yliopistossa on tutkittu teräslitostekappaleiden valmistusta WAAM-menetelmällä ja kuvissa 16 ja 17 on esimerkkejä siellä kehitellyistä sovellutuksista. Tutkijat näkevät (Feucht et al. 2019, s. 6) teräslitosten lisäävän valmistuksen etuna tuotannon logistiikan parantumisen. Kun liitososat tulostetaan suoraan rakenneosaan, tuotantoketju yksinkertaistuu ja sitä kautta vähenee tarve materiaalin käsittelylle, kuljetukselle ja varastoinnille. Kuvan 17 optimoitua päätylevyliitosta on tutkittu tarkemmin luvussa 5.



Kuva 16. Vasemmalla pilarin ja palkin liittämiseen kehitetty koukkuliitos animoitu ja oikealla I-profiilin laippaan WAAM-menetelmällä valmistettu koukkuosa (Feucht et al. 2019).



Kuva 17. Perinteinen päätylevy vasemmalla ja oikealla liitoskappale topologiaan optimoitu (Feucht et al. 2019).

Terässillastaan tunnettu hollantilainen MX3D on kehittänyt myös WAAM-valmisteisen teräслиitoksen yhdessä japanilaisen rakennusalan toimijan Takenakan kanssa. Duplex-teräksestä valmistettu liitoskappale on onttorakenteinen ja betonilla täytettynä se painaa 45 kg. Havainnekuvassa (kuva 18) liitoskappaletta käytetään puupilarin ja siitä kaltevasti eri suuntiin haarautuvien puusauvojen väliseen kiinnitykseen. Kehityshankkeen tavoitteeksi kerrotaan suurten rakenteiden monimutkaisten liitosten suunnittelun ja tuotannon automatisointi (MX3D).

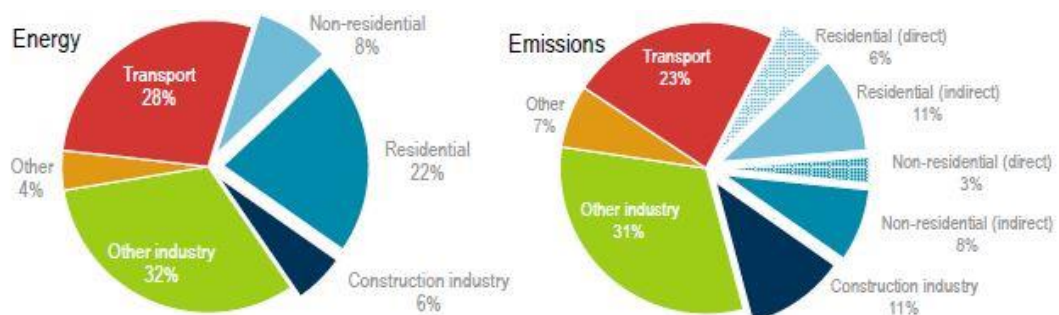


Kuva 18. MX3D:n ja Takenakan yhteistyöprojektissa kehitetty puusauvojen teräслиitos (MX3D)

Lisäävän valmistuksen teknologioissa nähdään potentiaalia myös rakenteiden korjauksen ja vahvistuksen saralla. Aihetta ei olla kuitenkaan vielä tutkittu ja suurin osa nykyisistä AM-laitteista ei sovellu muuttuviin työskentelyolosuhteisiin, joissa korjaus tapahtuisi (Camacho et al. 2017, s. 6).

3.2.5 Ympäristötekijät

Rakennusala kuluttaa merkittävät määrät resursseja ja aiheuttaa suurta kuormitusta ympäristölle. Kuvassa 19 on esitettyä rakennusten ja rakentamisen osuudet maailman kokonaisenergiakulutuksesta ja hiilidioksidipäästöistä vuonna 2018.



IEA (2019). All rights reserved.

Kuva 19. Rakennusten ja rakentamisen osuudet maailman kokonaisenergiakulutuksesta ja hiilidioksidipäästöistä vuonna 2018 (IEA 2019, s. 12).

Kansainvälisen energiajärjestön raportin (IEA 2019) mukaan vuonna 2018 rakennusten käytön osuus maailman kokonaisenergiankulutuksesta oli 30 % ja rakentamisen osuus 6 %. Maailman hiilidioksidipäästöistä rakennusten käytön osuus oli 28 % ja rakentamisen 11 %. Raportin mukaan hiilidioksidipäästöjen vähennyksessä päätoimet pitäisi kohdistaa rakennuksiin ja rakentamiseen, sillä viime vuosina molempien päästöt ovat jatkaneet kasvuaan (IEA 2019, s. 9, s. 12).

Materiaalia lisäävää rakentamista pidetään yhtenä ratkaisuna rakentamisen ympäristö-ongelmiin ja Mrazovic et al. (2018, s. 1) nimeävät sen jopa läpimurtoteknologiaksi tällä saralla. Perinteisessä rakentamisessa käytetään vakioituja rakenneosia, kuten esimerkiksi teräs-poikkileikkauksia ja harjaterästankoja rakenteisiin, joilla on omat uniikit mitansa. Rakenneosia täytyy siten leikata oikeaan mittaan, josta syntyy jätettä. Lisäävä rakentaminen mahdollistaa optimoitujen rakenneosien valmistamisen, jonka seurauksena materiaalihukkaa, ja sitä kautta ympäristön kuormitusta saadaan oleellisesti pienennettyä. On arvioitu, että materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät voivat vähentää jätettä 40 % verrattuna materiaalia poistaviin menetelmiin. Metallien jauhepetisulatusmenetelmissä arviolta 98 % ylijäämäjauheesta voidaan käyttää uudestaan (Buchanan & Gardner 2019, s. 26).

Mrazovic et al. vertailivat tutkimuksessaan (2017, s. 4) ei-kantavan ulkoseinän kiinnikeosan valmistusta materiaalia lisäävästi ja perinteisillä menetelmillä. Yhtenä vertailtavana ominaisuutena oli standardin EN 14040 mukainen elinkaariarviointi (LCA). Tutkimuksen mukaan materiaalia lisäävästi valmistetulla komponentilla ympäristövaikutukset olivat vähintään 40 % pienemmät perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. Ympäristövaikutukset vaihtelivat riippuen käytetystä materiaalista ja lisäävän valmistuksen menetelmästä.

Materiaalia lisäävä rakentaminen mahdollistaa juuri oikeaan tarpeeseen – tuotannon, mikä vähentää varastointia ja sitä kautta resurssien kulutusta sekä kustannuksia. Jos rakenneosien valmistus tapahtuu työmaalla tai edes lähempänä sitä, voidaan myös vähentää ympäristöä kuormittavia kuljetuksia (Buchanan & Gardner 2019, s. 26).

3.2.6 Inhimilliset tekijät

Toisin kuin muilla teollisuudenaloilla, rakentamisessa työn tuottavuus on pysynyt suurin piirtein samana viimeiset 50 vuotta. Eräiden arvioiden mukaan monet työmaatehtävät voidaan tehdä lisäävällä rakentamisella turvallisemmin, tarkemmin ja nopeammin verrattuna perinteiseen rakentamiseen (Buchanan & Gardner 2019, s. 26).

Materiaalia lisäävä rakentaminen tarkoittaa automaation lisääntymistä rakennusprosessissa, mikä voi johtaa työpaikkojen vähentymiseen. Ghaffar et al. (2018, s. 6) esittävät myös optimistisemmän näkemyksen, jonka mukaan menetettyjen työpaikkojen tilalle syntyy uudenlaisia työpaikkoja, jotka vaativat enemmän koulutusta, mutta sisältävät myös enemmän luovaa työtä. Arvioiden mukaan nämä uudenlaiset työt parantaisivat työturvallisuuden ja työntekijöiden terveyden lisäksi myös sukupuolten välistä tasa-arvoa rakennusalalla.

Rakentamisen automatisointi avaa uusia mahdollisuuksia myös rakentamiseen ihmisille vaikeissa tai vaarallisissa ympäristöissä, kuten sota- ja katastrofialueilla tai jopa maapallon ulkopuolisissa olosuhteissa. Tästä syystä esimerkiksi NASA ja ESA ovat olleet toteuttamassa ja tukemassa tutkimusta liittyen materiaalia lisääviin rakentamistekniikoihin (Paolini et al. 2019, s. 6).

3.3 Haasteet liittyen metallien materiaalia lisäävän rakentamiseen

Materiaalia lisäävän rakentamisen yleistymisen tiellä on vielä monia teknistaloudellisia haasteita, joita käydään läpi tässä aluvuossa. Asiaan liittyy myös yhteiskunnallisia ongelmia, sillä automaation lisääntymisen pelätään vievän työpaikkoja. Erityisesti tämä koskettaa rakentamisen kaltaista teollisuutta, jossa on paljon vähän koulutettua työvoimaa (Richardson 2017, s. 17).

3.3.1 Kustannukset

Kuten aiemmin tässä työssä on todettu, materiaalia lisäävällä rakentamisella on mahdollista saavuttaa rakennusprojektissa kustannussäästöjä esimerkiksi materiaalimenekin, varastoinnin ja työvoiman tarpeen vähenemisen kautta sekä rakennusajan lyhentymisellä. Näiden etujen saavuttaminen on kuitenkin projektikohtaista ja tuskin toteutuu yksinkertaisten rakennelmien tapauksessa. Nykyisillä teknologioilla lisäävän valmistuksen kustannustehokkuus suhteessa perinteisiin valmistusmenetelmiin tulee esiin vasta, kun halutut lopputuotteet ovat pitkälle optimoituja ja kustomoituja (Labonnote et al. 2016, s. 362). Iso kysymys lisäävän rakentamisen yleistymisen kannalta onkin, että löytyykö rakennusmarkkinoilta kysyntää massaräätälöinnille, jonka uudet valmistusteknologiat mahdollistavat (Wu, P. et al. 2016, s. 29).

Materiaalikustannukset voivat olla myös suurempia lisäävässä valmistuksessa verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin, vaikka materiaalimenekki vähenisi. Erityisesti metallien jauhepetisulatuksessa käytetyt jauheet ovat kalliita ja tulostetun kappaleen

kustannuksista voi puolet muodostua materiaalikustannuksista. WAAM-menetelmän tapauksessa tilanne on eri, sillä syöttömateriaalina toimii myös perinteisissä menetelmissä käytetty hitsauslanka. Materiaalikustannuksia tulee myös mahdollisista epäonnistuneista tulosteista (Buchanan & Gardner 2019, s. 27).

Vaikka materiaalia lisäävät valmistusprosessit ovat pitkälle automatisoituja, liittyy niihin vielä paljon työvoimaa vaativia toimenpiteitä, kuten mallitiedoston käsittelyä, tulostuslaitteen puhdistusta, tukirakenteiden poistamista ja lämpö- sekä pintakäsittelyitä (Buchanan & Gardner 2019, s. 27). Myös rakenneosien lisääntyvästä optimoinnista ja yksilöinnistä syntyy lisää työvoimakustannuksia suunnitteluun ja asennukseen liittyen (Labonnote et al. 2016, s. 359). Optimoitujen rakenteiden mallintaminen ja analysointi luotettavalla tasolla vaatii paljon laskentatehoa ja muistia tietokoneilta, mistä aiheutuu laskutoimituksiin liittyviä kustannuksia (Paolini et al. 2019, s. 8).

Luvun 3.1 esimerkkihankkeissa tutkitut metalliset liitososat eivät vielä tutkimusten aikaan osoittautuneet kustannuksiltaan kilpailukykyisiksi verrattuna vastaaviin perinteisesti valmistettuihin. Mrazovic et al. laskivat (2017, s. 4) lisäävästi valmistetun julkisivun kiinnikeosan valmistuskustannusten olevan 4 – 10 kertaa korkeammat kuin perinteisesti tehdyllä. Suuri vaihteluväli kustannuksille syntyi eri materiaalien ja lisäävien valmistusmenetelmien eroista.

3.3.2 Valmistusprosessin vaihtelevuus

Tällä hetkellä suuri haaste liittyy materiaalia lisääviin valmistusmenetelmiin on standardisoinnin puute valmistuskäytännöissä. Sama 3D-mallitiedosto voi tuottaa monenlaisia valmiita kappaleita menetelmästä riippuen. Tämä standardisoinnin puute voi edistää laitevalmistajien myyntiä toimittajaloukun kautta, kun asiakkaiden on vaikea hankkia materiaaleja ja tarvikkeita kilpailijoilta, mutta se myös vaikeuttaa lisäävän valmistuksen käyttöönottoa laajemmin. Tarvetta on materiaalien, prosessien, kalibroinnin, testauksen ja tiedostomuotojen standardeille. Myös samaan menetelmään perustuvien laitteiden tulosteiden välillä voi esiintyä laadun vaihtelua, joten uusia laadunvarmistusmenetelmiä tarvitaan (Buchanan & Gardner 2019, s. 27).

Useimmat lisäävän valmistuksen teknologiat ja niiden soveltamiseen keskittyneet hankkeet ovat yksityisomistuksessa. Tämän takia yksityiskohtaista julkista tietoa on vähän, mikä hankaloittaa menetelmien välistä vertailua ja niiden tutkimusta (Camacho et al. 2017, s. 8).

3.3.3 Suunnittelumenetelmien muutokset

Materiaalia lisäävän valmistuksen on ennustettu mullistavan suunnittelun filosofiaa kääntämällä vanhan suunnitteluperiaatteen ”design for manufacturing” (DFM) pääläelleen ”manufacturing for design” (Yang et al. 2017, s. 3). Vapaasti suomennettuna tämä tarkoittaa, että materiaalia lisäävä valmistus vähentäisi tarvetta suunnitella valmistettavuutta ja vapauttaa suunnittelijat keskittymään enemmän valmistettavan asian funktioon. Kuten jo todettua, tällä hetkellä lisääviin valmistusmenetelmiin liittyy mahdollisuuksien lisäksi myös rajoituksia, jotka täytyy ottaa suunniteltaessa huomioon. ”Design for additive manufacturing” (DfMA) tarkoittaa suunnittelua, jossa nämä otetaan huomioon. (Buchanan & Gardner 2019, s. 28).

Jotta lisäävästä rakentamisesta saataisiin täysi hyöty irti, suunnittelijoilta vaaditaan nykyistä enemmän tietoteknistä osaamista (Buchanan & Gardner 2019, s. 28). Labonnote et al. (2016, s. 363) mukaan lisäksi tarvitaan nykyistä kokonaisvaltaisempaa suunnitteluprosessia. Suunnitteluprosessi pitäisi nähdä arkkitehtien, insinöörien ja rakentajien tiiviinä yhteistyönä, jossa suunnittelun alusta alkaen huomioidaan materiaaalitekniikka, rakentamistekniikka ja rakennussuunnittelu.

Suunnittelustandardien kehittämistä tarvitaan lisäävän rakentamisen alalla. Kuitenkaan perinteinen suunnittelukoodien seuraaminen tuskin riittää suunnittelutyössä, vaan edistyneitä analyyseja tarvitaan, jotta voidaan hyödyntää vapautta geometrian ja materiaaliominaisuuksien suhteen (Buchanan & Gardner 2019, s. 29).

Paolini et al.:n mukaan (2019, s. 9) rakennusten tietomallinnuksessa käytettyä IFC-tiedostomuotoa tulee kehittää yhteensopivammaksi lisäävän rakentamisen vaatimusten kanssa. IFC-standardin tulisi mahdollistaa nykyistä monipuolisemman geometria- ja materiaalitiedon kuvauksen sekä sisältää myös valmistuksen suunnittelutietoa. Lisäksi on tarvetta eri AM-järjestelmien kanssa yhteensopivalle suunnitteluohjelmistolle.

3.3.4 Rakenteiden luotettavuus

Nykyisiä suunnittelukäytäntöjä ei voi käyttää sellaisenaan lisäävällä rakentamisella tehtyjen teräsrakenteiden kestävyuden varmistamiseen. Metallien lisäävän valmistuksen menetelmillä valmistetuissa kappaleissa esimerkiksi geometriset epätarkkuudet, jäännösjännitykset ja anisotrooppisuus ovat suurempia verrattuna perinteisiin menetelmin valmistettuihin. Erityisesti tämä pätee WAAM-menetelmään. Nämä isot laadunvaihtelut vaikuttavat ennen kaikkea rakenteiden stabiilisuusiimiöihin, kuten nurjahdukseen ja lomahdukseen (Buchanan & Gardner 2019, s. 29).

Rakenteita ei myöskään kannata optimoida äärimilleen, sillä se tekee niistä vaurioherkkiä yllättävissä kuormitustilanteissa (Labonnote et al. 2016, s. 359). Materiaalia lisäävästi valmistettujen rakenteiden luotettavuutta heikentää lisäksi niiden pitkäaikaiskestävyyteen liittyvän tiedon puute. Myös aiemmin mainittu materiaalien standardoimattomuus luo haasteita (Buchanan & Gardner 2019, s. 29).

Euroopassa lainsäätäjät ovat edesauttaneet lisäävän rakentamisen yleistymistä hyväksymällä rakenteita testauksen kautta. Sen sijaan esimerkiksi Kaliforniassa lisäävän rakentamisen käyttö julkisissa rakennelmissa on kielletty vastuuvollisuuksiin liittyvien huolien takia (Richardson 2017, s. 17). Lisäävään rakentamiseen liittyvät vastuukysymykset voivat olla monimutkaisia osapuolten lukuisan määrän takia, joita voi olla suunnittelija, rakentaja, laitteen valmistaja ja materiaalin valmistaja (Labonnote et al. 2016, s. 361).

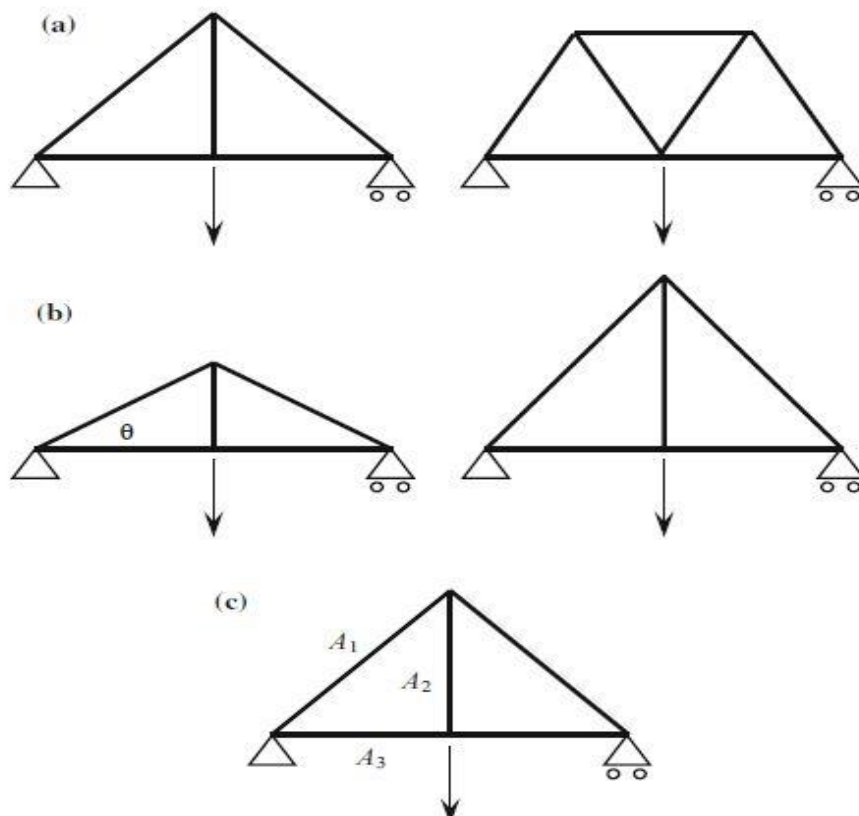
Buchananin ja Gardnerin mukaan (2019, s. 29) tarvitaan tiukkaa valvonta- ja testauselintä sekä laadunvarmistusmenetelmiä, joilla varmistetaan rakenneosien tuotannon tapahtuvan suunnittelijan haluamalla tavalla. On myös kaavailtu, että lisäävän valmistamisen pitäisi tulla rakennusmarkkinalle jonkin vain vähän rajoitetun ja standardisoidun segmentin kautta. Esimerkiksi katukalusteet ja julkiset väliaikaiset rakenteet voisivat toimia uusien valmistusteknologioiden esittelykanavana (Ghaffar et al. 2018, s. 9).

4. TOPOLOGIAN OPTIMOINTI FEM-OHJELMISTOA HYÖDYNTÄEN

Kuten jo todettua, topologiaaltaan optimoidut rakenteet ovat usein geometrialtaan hyvin monimutkaisia ja niiden valmistus on monesti mahdollista vain lisäävän valmistuksen menetelmin. Topologian optimointimenetelmät voivat avata uusia mahdollisuuksia myös rakentamisen piirissä. Tässä luvussa tehdään katsaus topologian optimoinnin perusteisiin ja erityisesti SIMP-menetelmään.

4.1 Topologian optimointi

Rakenteiden optimointiongelmat voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan, joita ovat topologian optimointi, muodon optimointi ja rakenneosien dimensioiden optimointi. Näiden eroja on havainnollistettu kuvassa 20 esitettyjen yksiaukkoisten, jännevälän keskeltä kuormitettujen ristikkorakenteiden avulla.



Kuva 20. Rakenteiden eri optimointiluokat havainnollistettuna ristikkorakenteilla: a) topologian optimointi b) muodon optimointi c) rakenneosien dimensioiden optimointi (Rothwell 2017, s. 20)

Optimoimalla ristikkorakenteen topologiaa optimoidaan sen sisältämien rakenneosien määrää ja järjestystä. Kuvan 20 a-kohdassa on esitettyä kaksi erilaista ristikon topologiaa, joista vasemmanpuoleisessa on 4 solmupistettä ja oikeanpuoleisessa 5. B-kohdassa on tietyn topologian (4 solmua) omaavan ristikon kaksi erilaista muotoa, jotka riippuvat solmupisteiden sijainnista. C-kohdassa esitetyllä rakenteella rakenteen osien optimoinnilla tarkoitetaan tietyn topologian ja muodon omaavan rakenteen osien optimointia. Ristikkorakenteella tämä tarkoittaa sauvojen ja paarteiden poikkileikkausalojen optimointia. Tällä hetkellä yksittäisten rakenneosien dimensioiden optimointi on näistä menetelmistä käytetyin käytännön suunnittelutyössä. Vaikka edellä esitetyissä ristikkorakenteissa optimointiluokat ovat helposti erotettavissa toisistaan, voi monissa muissa tapauksissa yksiselitteinen luokittelu olla vaikeampaa (Rothwell 2017, s. 19-21).

Yleisesti ottaen topologian optimoinnilla tarkoitetaan matemaattista menetelmää, jolla haetaan rakenteelle mahdollisimman tehokas materiaali-jakauma annetuilla kuormilla ja reunaehdoilla. Optimointi tehdään useimmiten elementtimenetelmällä (FEM) tavoitteena rakenteen jouston (*compliance*) minimointi tai kääntäen ilmaistuna jäykkyyden (*stiffness*) maksimointi (Laaksonen et al. 2016, s. 77; Krishna et al. 2017, s. 77).

Monista kaupallisista FEM-ohjelmistoista löytyy topologian optimointi -ominaisuus, mikä on edesauttanut menetelmän yleistymistä eri teollisuudenaloilla (Rozvany 2009, s.220). Tässä työssä FEM-ohjelmistoista tarkemman tarkastelun kohteena on Ansys ja sen tarjoamat mahdollisuudet topologian optimointiin. Ansysillä on tällä hetkellä mahdollista optimoida topologiaa kolmella eri menetelmällä: SIMP-menetelmällä, tasa-arvojoukkoihin perustuvalla menetelmällä (*level set based optimization*) tai ”ristikko-optimoinnilla” (*lattice optimization*). Lattice optimization -ominaisuuden avulla voidaan laskea optimaalinen ristikkomainen materiaali-jakauma annetulle geometrialle. Level set -menetelmällä taas voidaan hakea geometrialle optimaalista ulkomuotoa. SIMP-menetelmä on tiheyteen perustuvan optimoinnin (*density based optimization*) sovellus, ja sitä käydään tarkemmin läpi seuraavassa alaluvussa (Ansys Workbench 2020 R1 User's Guide).

4.2 SIMP-menetelmä

Useimmat kaupallisten FEM-ohjelmistojen topologian optimointi -algoritmit perustuvat SIMP-menetelmään (Rozvany 2009, s. 220). SIMP tulee sanoista *solid isotropic material/microstructure with penalization* ja menetelmässä suunnittelumuuttujina käytetään yksittäisten elementtien tiheyksiä, jotka ovat linkitetty elementtien kimmomoduulien arvoihin (Laaksonen et al. 2016, s. 77).

SIMP-menetelmällä rakenteen topologiaa optimoimalla tavoitteena on määrittää annetun isotrooppisen materiaalin optimaalinen sijoittaminen tilassa. Toisin sanoen päätetään, mitkä pisteet tilassa täytetään materiaalilla ja mitkä jätetään tyhjäksi. Elementtimenetelmään sovellettaessa nämä pisteet ovat elementtiverkon yksittäisiä elementtejä. Tämä materiaalijakaumaongelma on mahdollista ratkaista rakenteen jouston minimointitehtävällä, joka voidaan esittää muodossa

$$\begin{aligned} \min \quad & f^T u \\ \text{s. e.} \quad & K(E_e)u = f, \\ & E_e \in E_{AD}, \end{aligned} \tag{1}$$

missä f on voimavektori, u on siirtymävektori ja K on jäykkyyssmatriisi, joka riippuu elementin e jäykkyydestä E_e . E_{AD} tarkoittaa suunnitteluongelman kannalta hyväksyttäviä jäykkyyssensoreita.

Edellä kuvatun diskreetin materiaalijakaumaongelman kannalta hyväksyttäviä jäykkyyssensoreita ovat tensorit, joille pätee

$$E_{ijkl} = 1_{\Omega^{mat}} E_{ijkl}^0, \quad 1_{\Omega^{mat}} = \begin{cases} 1 & \text{jos } x \in \Omega^{mat} \\ 0 & \text{jos } x \in \Omega \setminus \Omega^{mat} \end{cases}, \tag{2}$$

$$\int_{\Omega} 1_{\Omega^{mat}} d\Omega = Vol(\Omega^{mat}) \leq V,$$

kun Ω^{mat} merkitsee kappaleen viemää tilaa referenssiavaruudessa (*reference domain*) Ω , joka on toisin sanoen optimoitavan rakenteen alkumuoto. Tensori E_{ijkl}^0 on annetun isotrooppisen materiaalin jäykkyyssensori ja V tarkoittaa sallittua määrää materiaalia, jonka ehdolla joustoa minimoidaan. Kaavan 2 muotoilu tarkoittaa, että jäykkyyssensorin hyväksytyt arvot ovat $1 * E_{ijkl}^0$ (materiaalia) tai $0 * E_{ijkl}^0$ (ei materiaalia).

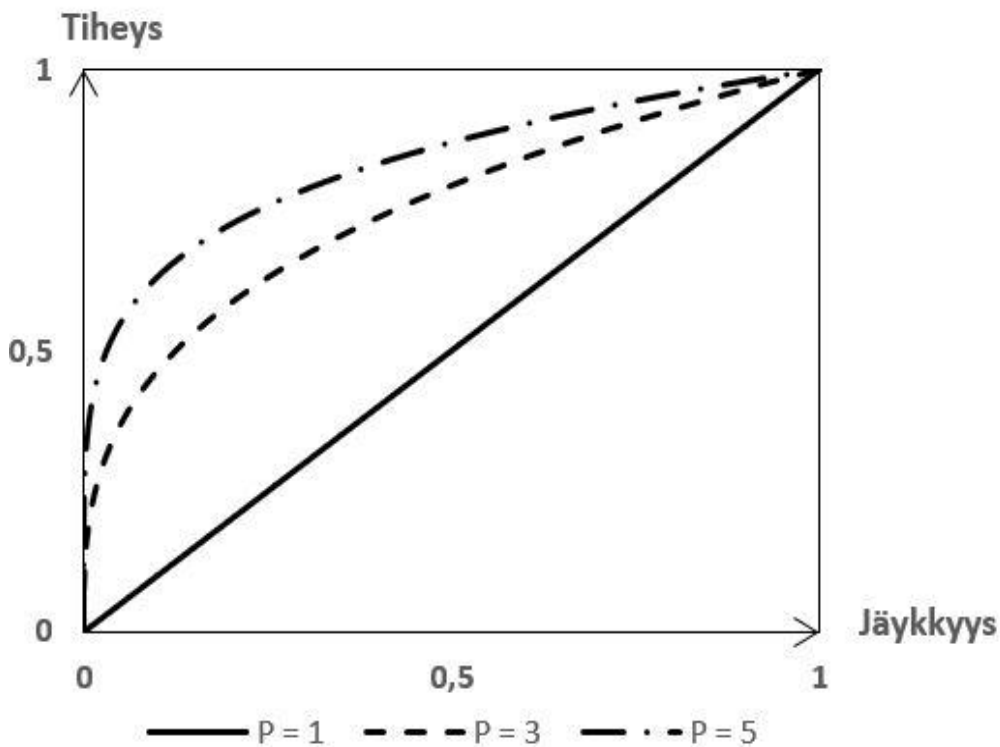
SIMP-menetelmässä ongelma ratkaistaan käyttämällä kokonaislukumuuttujien sijaan jatkuvia muuttujia, jonka jälkeen saadut arvot ohjataan diskreeteiksi 0-1 -arvoiksi. Elementin jäykkyyssmatriisi muotoillaan riippumaan funktiosta, joka tulkitaan sen tiheydeksi. Tämä keinotekoinen tiheysfunktio voi saada arvoja välillä 0-1 ja väliarvot muutetaan diskreeteiksi arvoiksi sakkoeksponentin (*penalization parameter*) avulla. SIMP voidaan muotoilla

$$E_{ijkl}(x) = \rho(x)^p E_{ijkl}^0, \quad p > 1, \tag{3}$$

$$\int_{\Omega} \rho(x) d\Omega \leq V; \quad 0 \leq \rho(x) \leq 1, \quad x \in \Omega,$$

missä $\rho(x)$ on "tiheys", E_{ijkl}^0 edustaa annetun isotrooppisen materiaalin ominaisuuksia ja p on sakkoeksponentti, joka yleensä on vähintään 3. SIMP-menetelmän voidaan ajatella olevan pohjimmiltaan eräänlainen yksittäisten rakenneosien dimensioiden optimointimenetelmä, jossa rakenneosina toimivat alkumuodossaan olevan rakenteen elementit. Elementtien mahdolliset "dimensiot" ovat 0 (tyhjä) tai 1 (materiaalia) (Bendsøe & Sigmund 2004, s. 2 - 6).

Kuvassa 21 on havainnollistettu eksponentin p vaikutusta elementin "tehollisen" kimmo-
moduulin eli jäykkyyden arvoon. Kuvasta näkee, että p :n arvon kasvaessa tiheyden väliarvoilla saavutetut jäykkyyden arvot pienenevät. Tämän seurauksena tiheyden väliarvot ovat epätaloudellisempia haettaessa jäykkyyden suhteen optimaalista materiaali-
kaumaa (Christensen & Klarbring 2009, s. 188 - 189).



Kuva 21. Elementin jäykkyyden ja tiheyden suhde kolmella eri sakkoeksponentin p arvolla (mukaillen Rozvany 2009, s. 218).

Liian suurta p :n arvoa käytettäessä on huomattu, että optimoinnin ratkaisu voi olla globaalin minimin sijaan paikallinen minimi. Lisäksi suurella p :n arvolla ratkaisu riippuu herkemmin optimoitavasta alkumuodosta ja sen suunnittelussa tehdyistä ratkaisuisista. Tämän takia suositellaan, että p :n arvoa kasvatetaan pikkuhiljaa optimoinnin aikana ja suoritetaan useampia laskentakertoja (Bendsøe & Sigmund 2004, s. 22).

4.2.1 SIMP-menetelmän haasteet

Vaikka SIMP-menetelmä onkin jo levinnyt laajalle käytännön sovelluksissa, liittyy siihen joitain yleisesti tunnettuja ongelmia ja monet tutkijat moittivat sitä heuristiseksi menetelmäksi (Rozvany 2009, s. 220). Ratkaisuissa voi ilmetä helposti materiaalin jakautuminen ”shakkilautakuvioon”, eli tietyn alueen vierekkäiset elementit ovat tyhjiä tai täysiä siten, että täydet elementit ovat yhteydessä toisiinsa vain nurkkapisteistään. Luonnollisesti tämmöisiä ratkaisuja ei käytännössä haluta ja ne ovat ainoastaan laskennallisesti optimaalisia. Shakkilautakuvion välttämiseksi on kehitetty useita menetelmiä, joista yhtenä yleisimmistä on tiheyssuodattimien (*density filters*) käyttö, jolloin elementin jäykkyyteen vaikuttaa myös sen viereisten elementtien jäykkyydet (van Dijk et al. 2010, s. 2).

Toinen merkittävä SIMP-menetelmään liittyvä ongelma on tulosten riippuvuus elementtiverkosta. Samalle rakenteelle voidaan saada laadullisesti erilaisia optimoinnin ratkaisuja riippuen elementtiverkon tiheydestä. Elementtiverkkoa tihennettäessä optimoitu rakenne sisältää usein enemmän reikiä ja tätä riippuvuutta voidaan hallita rajoittamalla rakenteen ympärysmittaa (*perimeter control*). Ympärysmitalla tarkoitetaan tässä kappaleen kaikkien ulko- ja sisärajojen alojen summaa. Ratkaisun riippuvuutta elementtiverkosta voidaan rajoittaa myös muilla keinoilla ja esimerkiksi tiheyksien suodattaminen auttaa myös tähän ongelmaan (Bendsøe & Sigmund 2004, s. 28-35).

4.2.2 Optimoinnin kulku

Yksiaineisen ja isotrooppisesta materiaalista koostuvan rakenteen topologian optimoinnin laskentamenettely voidaan jakaa kolmeen eri työvaiheeseen:

1. geometrian ja kuormien esikäsitteily
2. optimointi
3. tulosten jälkikäsitteily

Ensimmäisessä vaiheessa valitaan sopiva referenssiavaruus eli perusrakenne (*ground structure*), jota lähdetään optimoimaan. Perusrakenteeseen määritellään kohdat, jotka ovat optimoinnin piirissä ja mitkä jätetään sen ulkopuolelle, eli missä kohtaa materiaalia pitää ainakin olla. Perusrakenteen geometrian ja reunaehtoien määrittelyn jälkeen luodaan riittävän tiheä elementtiverkko. Elementtiverkko pidetään samanlaisena koko suunnitteluprosessin läpi.

Toisessa vaiheessa lasketaan suunnittelumuuttujana toimivan materiaalin tiheyden ρ optimaalinen jakautuminen perusrakenteen sisällä. Laskenta-algoritmi toimii iteratiivisesti laskien rakenteen jäykkyyden erilaisilla tiheysjakaumilla. Iterointi loppuu, kun parannus

edelliseen rakenteeseen verrattuna on enää marginaalinen tai muut optimoinnin ehdot täyttyvät.

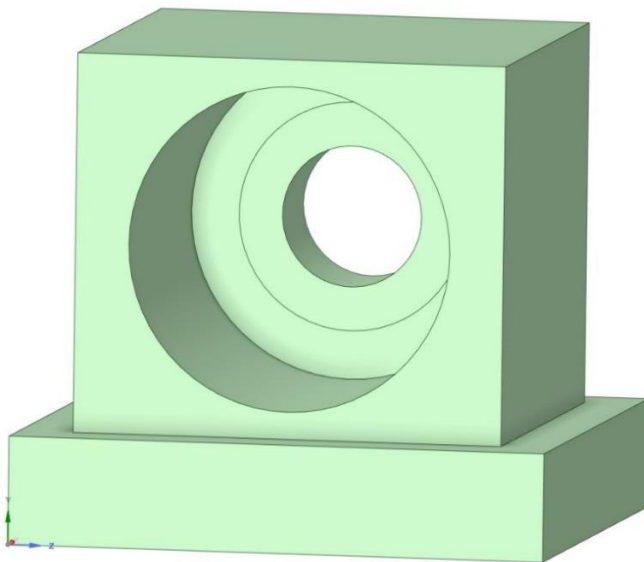
Lopuksi, kun SIMP-algoritmin avulla on laskettu rakenteelle uusi materiaali jakauma, täytyy rakenteen uutta muotoa usein vielä hienosäätää. Rakenteen geometrian viimeistely tehdään CAD-ohjelmaa käyttäen (Bendsøe & Sigmund 2004, s. 12–13).

5. RUUVILIITOSKAPPALEEN TOPOLOGIAN OPTIMOINTI JA VALMISTUS WAAM-MENETELMÄLLÄ

Tässä luvussa käydään läpi esimerkkikappaleen topologian optimointi Ansysin SIMP-algoritmia hyödyntäen, sekä optimoidun kappaleen valmistus WAAM-menetelmällä. Innoitusta on saatu luvussa 3.2.4 esittelystä Darmstadtin yliopiston tutkijoiden (Feucht et al. 2019) mallintamasta optimoidusta palkin päätylevyjatkoksesta (kuva 17). Tavoitteena oli mallintaa vastaava optimoitu M12-ruuviliitososa, joka voidaan tulostaa WAAM-menetelmällä suoraan palkkiin.

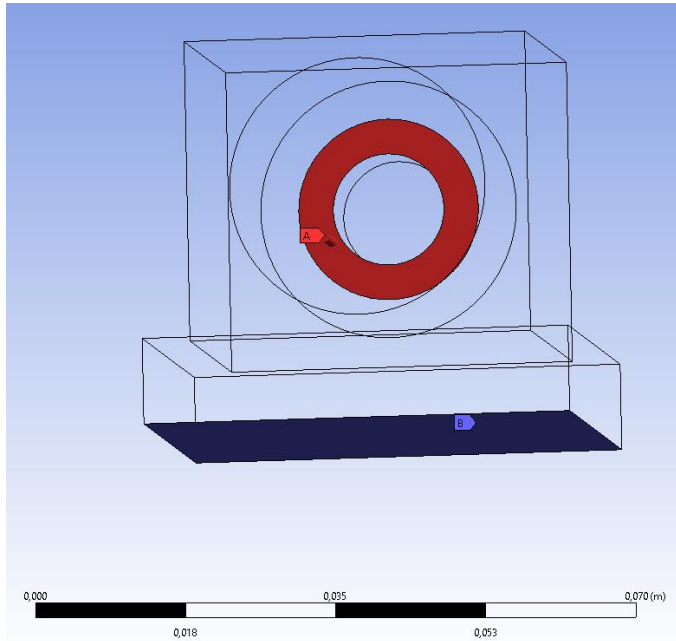
5.1 Ruuviliitoskappaleen topologian optimointi Ansysella

Ruuviliitoskappaleen optimointi tehtiin Ansys Workbench 2019 R3 -ohjelmistolla (versio 19.5.0.2019072818). Topologian optimointia varten mallinnettiin ensin perusrakenne, eli geometrian alkuarvaus, joka on esitettyinä kuvassa 22. Tähän perusrakenteeseen luodaan elementtiverkko ja SIMP-algoritmin avulla poistetaan materiaali elementeistä, joissa sitä ei tarvita.



Kuva 22. Topologian optimointia varten tehty ruuviliitososan perusrakenne. Optimoitavan kappaleen korkeus on 35 mm ja pituus sekä leveys 40 mm. Kappaleessa on halkaisijaltaan 13 mm reikä M12-ruuville, sekä 30 mm pultin asennuskolo. Kappaleen seinämävahvuus reiän kohdalla on 10 mm. Tulostusalustan koko mallissa on 50 mm x 50 mm.

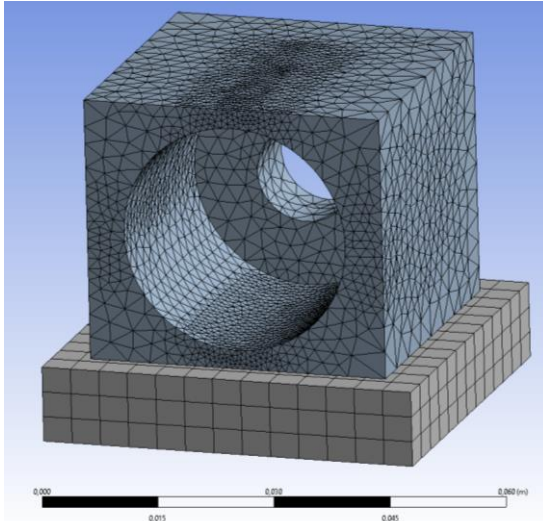
Laskentamallissa pultin reiän ympärille laitettiin vaikuttamaan 48,6 kN normaalivoima, joka vastaa lujuusluokan 8.8 M12-ruuvien mitoitustuokeuskestävyyttä EN 1993-1-8 mukaan. Voiman vaikutusalueena käytettiin halkaisijaltaan 21,1 mm:n ympyrän ja reiän väliin jäänyttä alaa. 21,1 mm on M12-ruuvien kuusiokannan suurin halkaisija, joten voiman vaikutusalue on todellisuudessa hieman pienempi. Tulostusalustan alatahkoon laitettiin jäykkä tuki koko pinta-alalle. Kuvassa 23 näkyy laskentamallin tuki ja vaikuttava normaalivoima.



Kuva 23. Laskentamallissa normaalivoima vaikutti punaista aluetta kohtisuoraan (puristusta) ja tulostusalustan alatahko tuettiin mallissa jäykästi.

Elementtiverkkoon liittyvät rajoitteet voivat aiheuttaa virheviestin, kun topologiaaltaan optimoitu malli siirretään jatkoanalysointia varten validoitavaksi (*design validation*). Ansyksen ohjeissa (Ansys Workbench 2020 R1 User's Guide) neuvotaan luomaan elementtiverkko *Patch Independent* -menetelmällä, jonka algoritmi tihentää ja harventaa verkkoa automaattisesti tarvittavissa paikoissa. Menetelmää käyttäessä ohjelma antaa laskennan aikana hieman epäluottamusta herättävän ilmoituksen, että kyseinen elementtiverkonluontimenetelmä saattaa poistua seuraavien ohjelmaversioiden myötä: "The *Patch Independent option for Tetrahedron method controls* has been deprecated and may be removed in a future release".

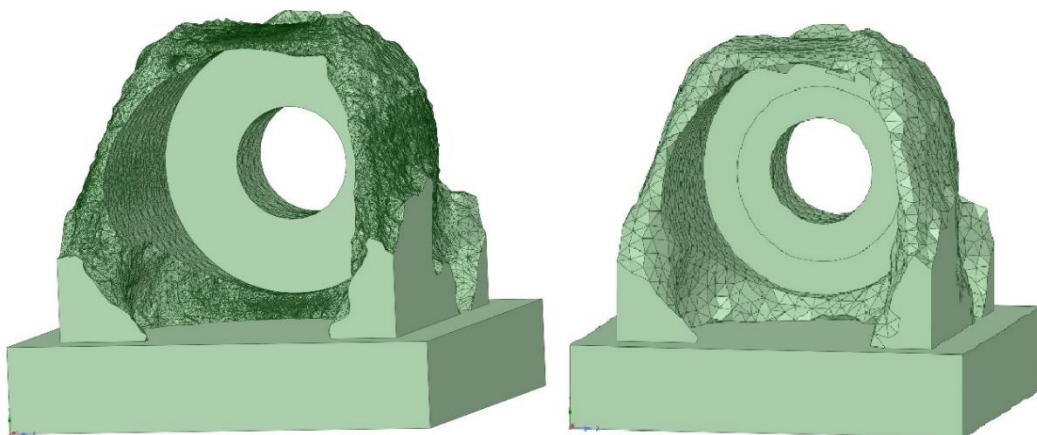
Mallin optimoitavan liitoskappaleen elementtiverkko luotiin kuitenkin käyttäen kyseistä menetelmää ja koko malli koostui 116 628 elementistä. Kuvassa 24 esitetty elementtiverkko pyrittiin pitämään mahdollisimman tiheänä, jotta SIMP-algoritmi saisi "vapaa kädet" optimaalisen muodon laskemiseen alkuarvauksesta. Toisaalta elementtien määrän kasvaessa laskenta-aika pitenee, joka myös täytyi pitää järkevän pituisena.



Kuva 24. Elementtiverkko koostui 116 628 elementistä.

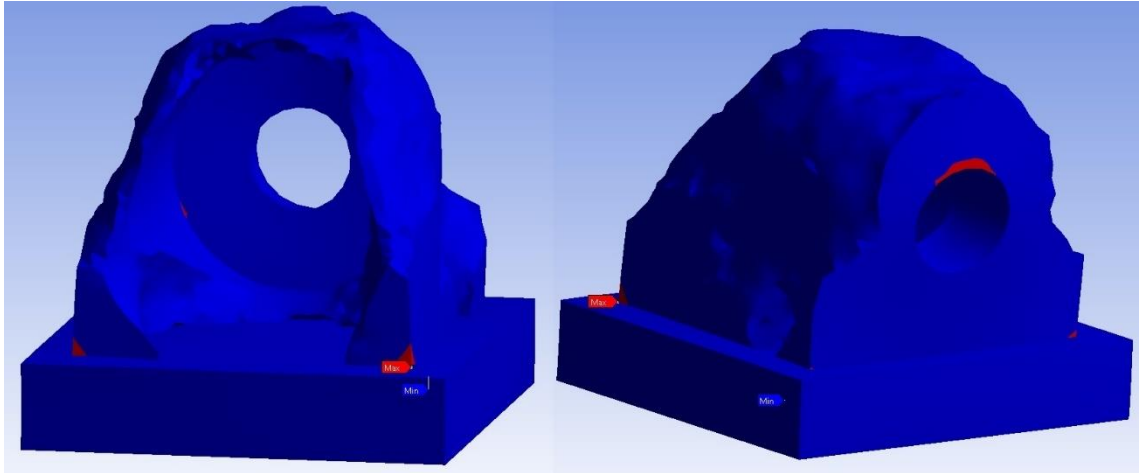
Topologian optimointi tehtiin Ansysin SIMP-algoritmin avulla ja sakkoeksponentin p arvona käytettiin kolmea. Optimointitehtävänä (*objective*) oli jouston minimointi (*minimize compliance*) eli jäykkyyden maksimointi ja optimointiehtona käytettiin kappaleen massaa, jonka piti olla 50 % alkuperäisestä. Optimoinnin ulkopuolelle jätettiin liitososan tulostusalue sekä M12-pultin kannan kiinnitysalue. Muilta alueilta SIMP-algoritmin annettiin vapaasti poistaa materiaalia.

Topologiaaltaan optimoitu malli oli hyvin monimutkainen ja uusi geometriamalli vaati ”siistimistä”, jotta sen analysointi olisi mielekästä. Siistimättömän geometriamallin koko solid-malliksi muutettuna oli 165 Mt, vaikka kyseessä on mitoiltaan varsin pieni kappale. Kuvassa 25 on liitososan optimoitu geometriamalli sekä siistitty yksinkertaisempi versio.



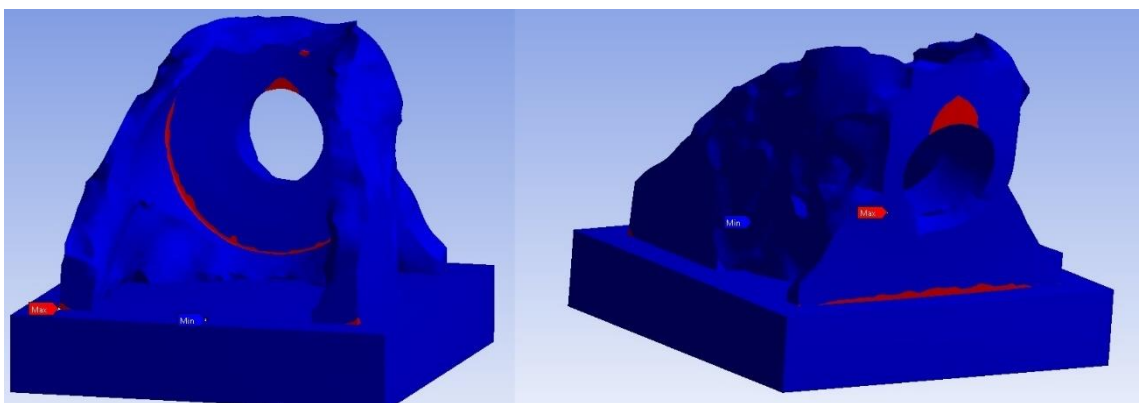
Kuva 25. Topologiaaltaan optimoitu geometriamalli. Vasemmalla ”siistimätön” solid-malli, jonka tiedostokoko on 165 Mt. Oikealla Ansysin automaattityökaluja käyttämällä siistitty solid-malli, jonka koko oli enää alle 8 Mt.

Kertaalleen optimoidun liitososan von Mises vertailujännityksen arvot olivat suhteellisen alhaisia verrattuna WAAM-menetelmän yhteydessä käytettävien materiaalien myötörajoihin. Kuvassa 26 on esimerkiksi esitettyä alueet, joissa jännitys on yli 355 MPa. Kuvasta voi huomata, että alueet ovat pieniä ja harvassa.



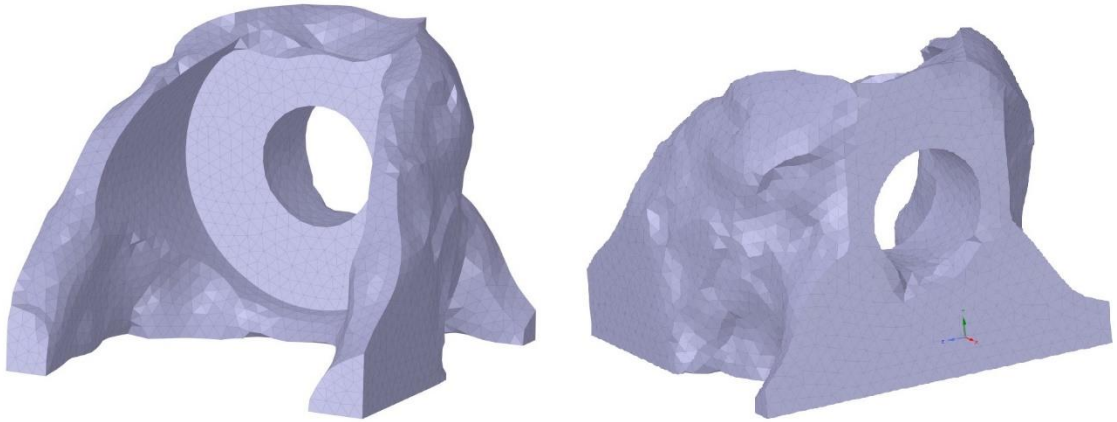
Kuva 26. Punaisella alueet, joissa von Mises vertailujännityksen arvo ylittää 355 MPa kertaalleen optimoidussa liitososassa.

Liitososalle tehtiin vielä toinen vastaava topologian optimointikierrös Ansyskella ja tämän jälkeen von Mises jännitykset kasvoivat jo paikoin yli 500 MPa ja nämä alueet ovat esitettyinä kuvassa 27. Lopputulos näyttää hyvin samanlaiselta, kuin Darmstadtin yliopiston tutkijoiden mallintama liitoskappale. Liitoksen mitoituksessa tulisi tarkistaa myös kiinnityspintana toimivan palkin kestävyys, mikä rajattiin tämän työn ulkopuolelle.



Kuva 27. Punaisella alueet, joissa von Mises vertailujännityksen arvo ylittää 500 MPa kahteen kertaan optimoidussa liitososassa.

Kuvassa 28 on topologiaaltaan optimoitu ruuviliitoscappale muutettuna STL-formaattiin. STL-formaatissa mallin geometriatiedon voi siirtää CAM-ohjelmistoon (*Computer-aided manufacturing*), jossa malli valmistellaan tulostusta varten ja määritellään tulostusradat.

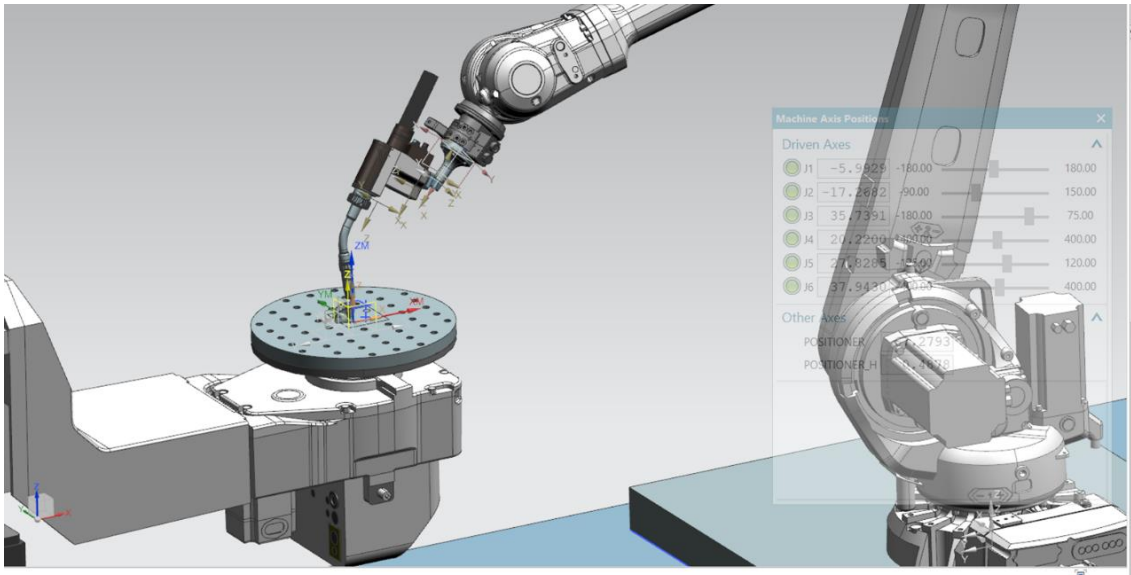


Kuva 28. Topologiaaltaan optimoitu liitososa muutettuna STL-formaattiin.

5.2 Optimoidun ruuviliitoscappaleen valmistus WAAM-menetelmällä

Tässä alaluvussa käydään läpi topologiaaltaan optimoidun ruuviliitoscappaleen valmistusta WAAM-menetelmällä. Mallin esikäsittely valmistusta varten ja kappaleen valmistus tehtiin Tampereen yliopiston automaatio- ja konetekniikan yksikössä.

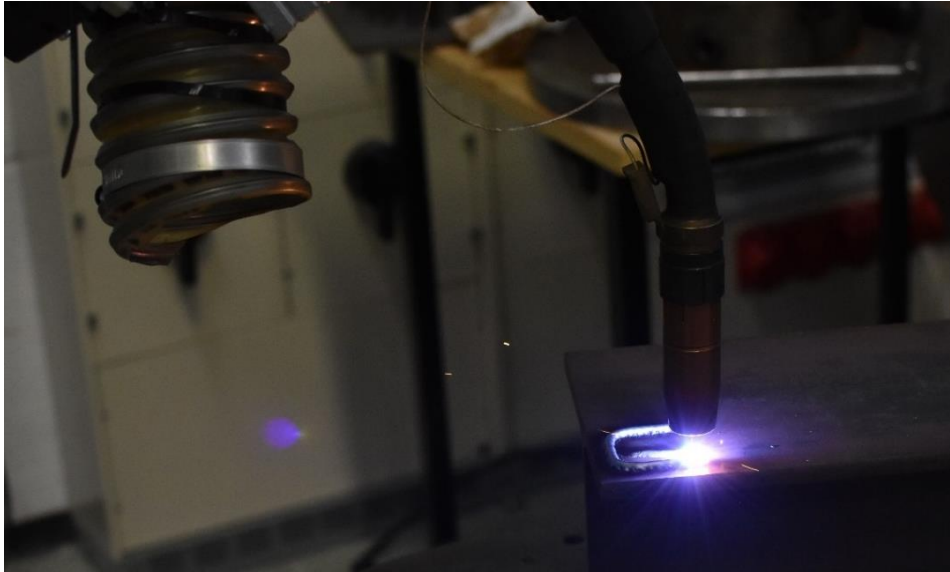
Optimoidun ruuviliitoscappaleen valmistettavuutta parannettiin käyttämällä samaa seinämävahvuutta kappaleen joka kohdassa. Kappale olisi ollut valmistettavissa WAAM-menetelmällä myös monimuotoisempänä, mutta geometriaa yksinkertaistamalla nopeutettiin mm. tulostusratojen mallintamista. Radat mallinnettiin Siemens NX -ohjelmistolla. Kuva 29 on kuvakaappaus NX-mallista, jossa näkyy myös muutama käytetyn WAAM-järjestelmän komponentti. Järjestelmä koostui mm. ABB:n IRB 4600 -robotista sekä Froniuksen hitsauslaitteistosta. Ennen ohjelman siirtoa robotille se tarkistettiin vielä ABB:n RobotStudio-ohjelmistolla.



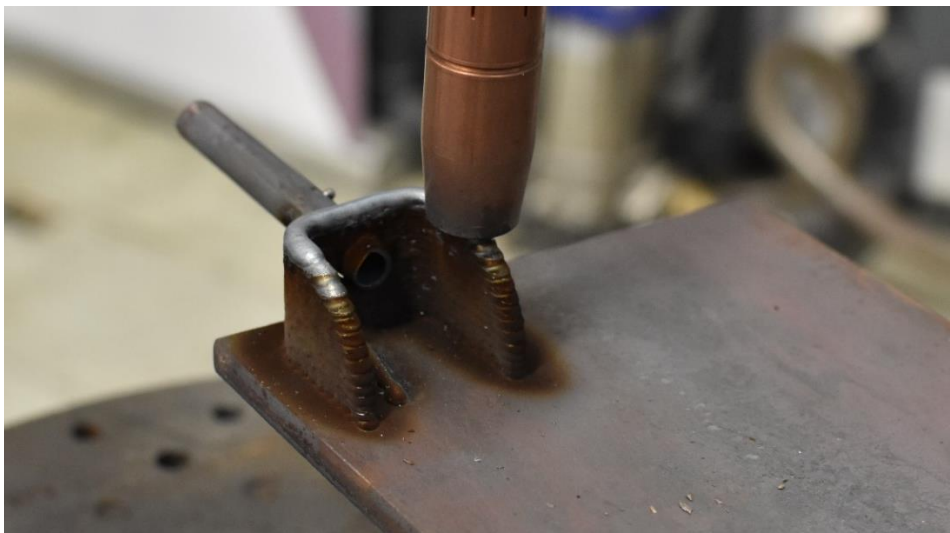
Kuva 29. Tulostettava kappale sekä laitteiston komponentteja mallinnettuna Siemens NX-ohjelmistossa. Käytössä oli ABB:n robotti IRB 4600 ja pyörityspöytä sekä Froniuksen hitsauspistooli.

Valmis tulostusohjelma testattiin robotilla hitsausparametrien säätöä varten. Testituloksella huomattiin mm. kappaleen ylikuumentuminen ja viimeisillä tulostuskerroksilla kappale alkoi menettää muotoaan. Tätä varten ohjelmaan lisättiin jokaisen tulostuskerroksen loppuun noin 10 sekunnin jäähtytysaika, joka riitti pitämään lämpötilan hallinnassa. Myös kappaleessa oleva ruuvin reikä vaati erityistoimenpiteitä. Reiän ylitystä varten sulaa hitsiä vaati tukiranteen ja asia ratkaistiin asettamalla sopivan kokoinen kupariputki muodostuvan reiän kohdalle (kuva 31).

Testausten jälkeen lopulliset kappaleet tulostettiin HEA-palkin laipan päälle. Kuvassa 30 on ensimmäisen kappaleen tulostus alkuvaiheessaan. Yhteensä kappaleita tulostettiin neljä kappaletta, kaksi palkin molempiin päihin. Vain yksi kappale tehtiin reiällisenä ja muihin reikä täytyy tehdä jälkikäteen poraamalla.

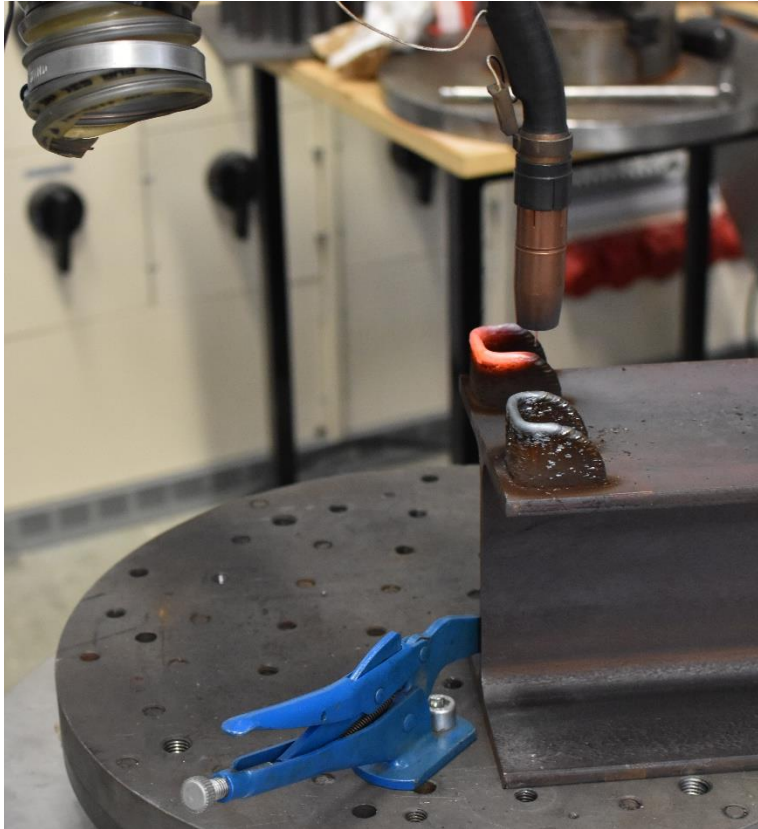


Kuva 30. Ensimmäisen kappaleen tulostus alkuvaiheessa.



Kuva 31. Ensimmäinen kappale juuri tulostettuna ja reiän tukirakenteena toiminnut kupariputki vielä paikallaan.

Reiällisen kappaleen tulostamiseen meni aikaa noin 20 minuuttia, kun reiättömällä aikaa kului noin 15 minuuttia. Hitsausparametreja ei optimoitu nopeuden suhteen. Reiän kohdalla tulostukseen tuli tauko, kun hitsauspistooli siirtyi reiän yli, mikä hieman pidensi valmistusaikaa. Tauko tulostuskierroksen välissä näkyi myös selvänä lämpötilaerona reiällisen ja reiättömän kappaleen välillä tulostuksen aikana. Kuvassa 32 näkyvää reiättömän kappaleen tulostuskierroksen jälkeistä hehkua ei juuri esiintynyt reiällisen kappaleen tulostuksessa.



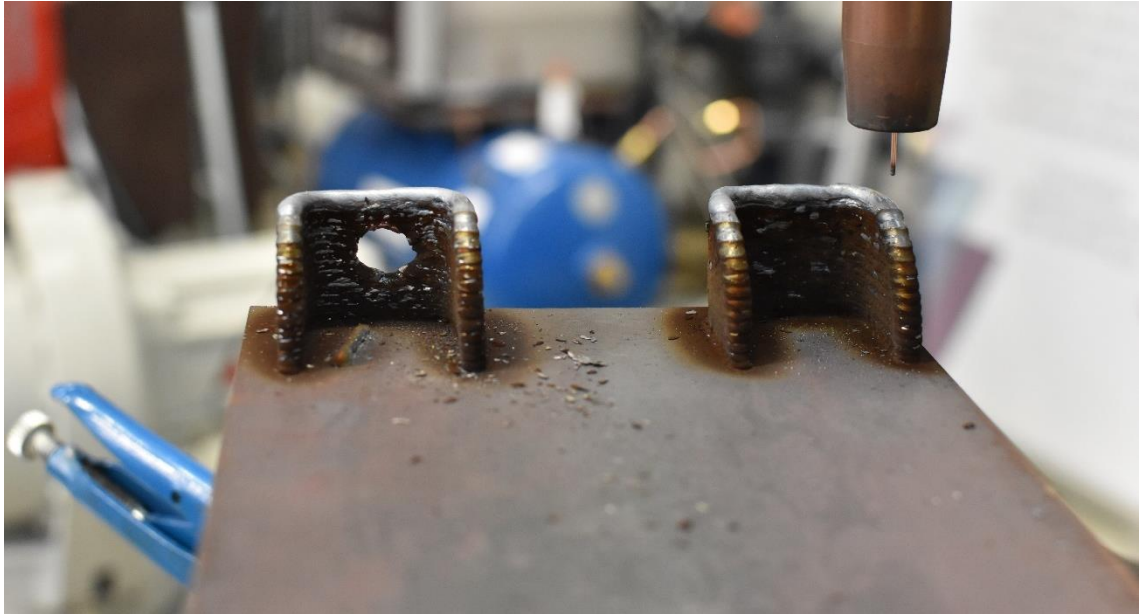
Kuva 32. Toisen liituskappaleen tulostus loppuvaiheessa.

Taulukossa 4 on koottuna käytetyt hitsausparametrit. Lankana käytettiin 1,2 mm paksuista G3S1-lankaa, jonka kilohinta on muutaman euron luokkaa, joten langan kustannusvaikutus on vähäinen näin pienen kokoluokan kappaleilla. Materiaalikustannuksiin lankaa enemmän vaikuttaa käytetty suojakaasu, jonka kustannus on noin 20 €/h.

Taulukko 4. Liituskappaleiden valmistuksessa käytetyt hitsausparametrit.

Virta	Jännite	Langan-syöttö	Kaasu	Lanka	Hitsaus-nopeus	Vaaputus
12,5 A	82 V	1,9 m/min	Mison 8 (15 l/min)	G3S1 (1,2 mm)	6 mm/s	Amplitudi 4 mm, taajuus 2 Hz

Kuvassa 33 on palkin toisen pään liituskappaleet valmiina ja reiän tukirakenne poistettuna. Kuvasta voi huomata, etteivät kappaleet sijaitse aivan symmetrisesti palkin laipalla. Kaikkien kappaleiden tarkan sijainnin olisi voinut jo etukäteen määrittää tulostusohjelmaan mallintamalla HEA-palkin ja asettamalla tulostuksen nollapisteen esimerkiksi laipan kulmaan. Nyt kappaleet tulostettiin erikseen ja sijainti palkkiin nähden säädettiin palkkia siirtämällä silmämääräisesti.



Kuva 33. Tulostettuja liitoskappaleita.

Tässä kokeessa kaikki kappaleet tulostettiin yksinkertaisuuden vuoksi HEA-palkin ylälaipan päälle. Liitoksesta saataisiin jäykempi, jos ruuvit ja liitoskappaleet tulisivat laippojen molemmiin puolin. Kappaleiden tulostus laippojen sisäpuolille onnistunee vaihtamalla hitsauspistoolin kulmaa.

Kuten mainittua, reiän tekeminen vaati käsityötä kupariputken asettelun verran, joten itse valmistusprosessin täysi automatisointi on vaikeaa tutkitun kappaleen tapauksessa. Käytännössä reiän tekeminen on poraamalla järkevintä.

Mahdollisena jatkotutkimuksena voisi olla kappaleille tehtävät vetokokeet. Valmistusta varten topologiaaltaan optimoitua mallia yksinkertaistettiin melko runsaasti, joten uuden muodon analysointi FEM-ohjelmalla olisi kuitenkin paikallaan ennen niitä. Tämän työn puitteissa ei ollut resursseja valmistaa geometrialtaan kovin monimuotoista kappaletta, joten kappaleen seinämävahvuus päätettiin pitää vakiona. Mahdollisessa jatkotutkimuksessa voisikin kehittää tulostettavaa mallia lähemmäksi topologiaaltaan optimoitua mallia.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät, eli arkikielessä 3D-tulostusmenetelmät, ovat mullistamassa tuotteiden valmistusprosessia monilla eri aloilla. Menetelmät muuttavat valmistusprosessin lisäksi myös valmistettavia tuotteita, kun uudenlaiset geometriat ja jopa materiaaliominaisuudet ovat mahdollisia. Jotta materiaalia lisäävästä valmistamisesta saadaan sen sisältämä potentiaali hyödynnettyä, tulee suunnittelijoiden omaksua uusia työkaluja ja taitoja. On jopa puhuttu uusien valmistusmenetelmien mukanaan tuomasta suunnittelufilosofian murroksesta, jossa perinteisestä valmistettavuuden suunnittelusta voidaan luopua ja kappaleen muodon määräisi vain sen käyttötarkoitus. Tämä ei ole kuitenkaan vielä mahdollista ja eri AM-järjestelmien ominaispiirteet tuovat valmistusprosessiin omat rajoitteensa. Rakenneosaa suunniteltaessa tulisi jo tietää käytettävä tulostusjärjestelmä ja tuntea siihen liittyvät rajoitteet, jotta rakennesuunnittelijan CAD-malli olisi valmistettavissa.

Metallien 3D-tulostaminen on moniin muihin materiaaleihin verrattuna haastavaa, mutta siihen on kehitetty useita eri teknologioita. Tällä hetkellä kaupalliseen tarkoitukseen tulostetut metallituotteet ovat usein korkean arvon lopputuotteita, jotka ovat pitkälle kustomoituja ja tuotantoeriltään pieniä. Erityisesti lääke- ja lentokone-teollisuudessa on löytynyt kysyntää näille. Myös rakentamisalalla ollaan heräämässä materiaalia lisäävän valmistuksen tarjoamiin mahdollisuuksiin. Rakennusmateriaaleista on eniten tutkittu betonin 3D-tulostamista, mutta myös metallirakentamisen alalla on tehty tutkimuksia.

Erityisesti hitsausrobotiikkaan perustuvaa WAAM-menetelmää pidetään tällä hetkellä lupaavana menetelmänä rakennusalan tarpeisiin sen suhteellisen halpojen materiaalikustannusten sekä nopeuden vuoksi. Lisäksi menetelmän käyttöönottoa rakentamisessa voi helpottaa sen yhteensovittavuus perinteisten teräsrakentamisen menetelmien kanssa. Esimerkiksi optimoituja liitoskappaleita pystytään WAAM-menetelmällä tulostamaan valssattuihin standardiprofiileihin. Jauhepetisulatus on tällä hetkellä käytetyin menetelmä yleisesti metallien tulostamisessa, mutta teknologiassa käytetyt metallijauheet ovat kalliita, joka on haitaksi kustannuserkällä rakennusalalla. WAAM-menetelmällä voidaan nykylaitteistoilla tulostaa kokoluokaltaan useiden metrien kappaleita, kun taas jauhepetisulatusjärjestelmillä kappaleiden maksimikoot ovat useimmiten sivumitoiltaan muutamankymmenen senttimetrin luokkaa. Rakentamisessa käytetyt rakenneosat ovat usein suhteellisen isoja, joten tämäkin puoltaa WAAM-menetelmän yleistymistä rakennusalalla ennen muita AM-teknologioita. Jauhepetisulatuksen etuna WAAM:iin verrattuna on kuitenkin merkittävästi parempi pinnantasaisuus valmistetuilla kappaleilla.

Metallien materiaalia lisäävä rakentaminen sisältää paljon uusia mahdollisuuksia, mutta sen yleistymisen tiellä on vielä monta ratkaisematonta ongelmaa. Monet tutkijat ovat kuitenkin optimistisia sen suhteen, että nämä haasteet ratkaistaan tulevaisuudessa.

Tulostamalla voidaan valmistaa geometrialtaan entistä optimoidumpia rakenteita, mikä tarkoittaa tehokkaampaa materiaalin käyttöä. Materiaalia säästyy myös valmistusprosessin myötä, sillä tulostamalla materiaalia laitetaan vain sinne missä sitä tarvitaan ja hukkapaloja ei synny. Materiaalikustannussäästöjen lisäksi potentiaalia nähdään myös rakentamisen aiheuttaman ympäristökuormituksen vähentämisessä. Ottaen kuitenkin huomioon maailmassa tapahtuvan rakentamisen määrän, tulisi lisäävän rakentamisen vallankumouksen olla hyvin radikaali, jotta sillä olisi vaikutusta koko rakennusalan ympäristöhaittoihin. On hyvin vaikea nähdä, että lähitulevaisuudessa materiaalia lisäävä rakentaminen korvaisi niin suuressa määrin rakentamista perinteisin menetelmin, että sillä ratkottaisiin akuuttia ympäristökriisiä.

Makrotason geometrian optimoinnin lisäksi mahdollisuuksia on mikrotason optimointiin, jolloin vaikutetaan materiaaliominaisuuksiin. AM-menetelmät avaavat mahdollisuuksia optimoida esimerkiksi materiaalin lujuus-, sitkeys- lämpö- ja akustiikkaominaisuuksia.

Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät liittyvät kiinteästi digitalisaatio- ja automaatiokehitykseen. Rakennusalalla työn tuottavuus on pysynyt liki samana viime vuosikymmenet, joten painetta uusille innovaatioille on. Automaatioasteen kasvulla on monia inhimillisiä ja yhteiskunnallisia seurauksia. Rakentamisen alalla on nykyisin paljon vähän koulutettua työvoimaa ja automaation lisääntyminen herättää pelkoa työpaikkojen vähenemisestä. Toisaalta on nostettu esiin kehityksen seurauksena syntyvien uusien työpaikkojen mahdollisia positiivisia puolia, kuten turvallisuus, sukupuolten välinen tasa-arvo ja työn luovuus.

Kustannustekijät määräävät viime kädessä uusien valmistusmenetelmien käyttöönoton, ellei muuta pakkoa käyttöönotolle ole. Tähän menneissä tehdyissä tutkimuksissa valmistetut rakenneosat ovat olleet huomattavan paljon kalliimpia valmistaa, kuin niitä vastaavat perinteisin keinoin valmistetut rakenneosat. Kun otetaan huomioon vielä vähintään satojen tuhansien eurojen laitehankintakustannukset, on vielä paljon matkaa kaupallisesti kannattavaan metallien materiaalia lisäävään rakentamiseen. Myös optimoitujen rakenneosien suunnittelu valmistettavuus huomioon ottaen on vielä hyvin työlästä ja vaatii useiden ohjelmistojen ja valmistusprosessin hallintaa. Kustannussäästöjä oletetaan kuitenkin saavutettavan rakennusajan lyhenemisen kautta ja tuotantoketjun yksinkertaistumisen seurauksena, kun materiaalin käsittely-, kuljetus- ja varastointitarpeet vähenevät.

Kasuvat kustannukset eivät olisi ongelma, jos ne voitaisiin kattaa samalla kasvavan kysynnän avulla. Materiaalia lisäävä rakentaminen mahdollistaa kustomoinnin ja tuotteiden massaräätälöinnin ennennäkemättömällä tavalla. Onkin oleellista, että löytyykö markkinoilta kysyntää uudentlaisille kustomoiduille tuotteille, sillä AM-menetelmät eivät pärjää perinteisille valmistusmenetelmille kustannusvertailussa, jos valmistetaan yksinkertaisia tuotteita.

Materiaalia lisäävästi valmistettujen kantavien rakenteiden suunnittelu poikkeaa tällä hetkellä merkittävästi nykyisistä eurokoodi-pohjaisista suunnittelukäytännöistä. Rakennesuunnittelun kannalta AM-menetelmien käyttöönottoon liittyviä haasteita ovat mm. valmistusprosessin vaihtelevuus, rakenteiden luotettavuus sekä suunnittelumenetelmien muutokset. Samaan AM-menetelmään perustuvien järjestelmienkin välillä voi esiintyä suuria laadunvaihteluita, joten uusia laadunvarmistusstandardeja tarvitaan ennen laajamittaista lisäävästi valmistettujen kantavien rakenteiden käyttöä. Lisäksi tulostettujen metallien materiaaliominaisuudet voivat poiketa merkittävästi verrattuna perinteisesti valmistettuun. Nykyiset suunnittelussa käytetyt materiaalivarmuusmenettelyt eivät siis sovellu sellaisenaan lisäävästi valmistetun rakenteen suunnitteluun. Materiaalinkäytöltään äärimmilleen optimoidut rakenteet ovat myös vaurioherkempiä yllättävissä kuormitustilanteissa.

Topologiaaltaan optimoitujen rakenteiden suunnittelu edellyttää rakennesuunnittelijoilta uusien laskentamenetelmien ja ohjelmistojen hallintaa. Suunnitteluprosessi tulostettavaksi kappaleeksi nopeutuisi myös, jos rakennesuunnittelija hallitsisi CAM-ohjelmiston käytön sekä tuntisi valmistusprosessin asettamat reunaehdot. Tällä hetkellä optimointiin käytetyt laskentaohjelmistot ja tulostettavan mallin esikäsittelyohjelmistot ovat usein erillisiä ohjelmistoja.

Tässä työssä toteutetun esimerkkikappaleen optimoinnissa ja valmistuksessa voitiin todeta, että topologiaaltaan optimoidun rakenneosan suunnittelu valmistukseen asti vaatii vielä paljon työvaiheita ja -tunteja. Yksittäisen topologiaaltaan optimoidun rakenneosan suunnittelu valmistukseen asti ei ole kustannustehokasta ja suunnitteluprosessin automatisointi on välttämätöntä. Tällä hetkellä maailmalla on kehityshankkeita tähän liittyen, kuten esimerkiksi Takenakan ja MX3D:n yhteishanke, ja on mielenkiintoista nähdä, että minkälaisiin tuloksiin näissä päästään.

Vaihtoehto jokaisen valmistettavan kappaleen pitkälle automatisoidulle kustomoinnille voisi olla standardikappaleet, joita voitaisiin valmistaa sarjassa, kun ne on kertaalleen optimoitu. Tämä ratkaisu voisi toimia kompromissina, jossa yhdistyy uudet ja vanhat valmistusmenetelmät hybridirakentamisen hengessä. Esimerkiksi tässä työssä tutkitusta

ruuviliitoscappaleesta voisi kehittää loppuun asti optimoidut versiot eri kokoisille ruuveille. Konepajalla valmistusta voitaisiin automatisoida hitsausrobotiikkaa käyttämällä ja asennustyössä voitaisiin hyödyntää edelleen vanhoja tuttuja ruuvikiinnikkeitä. Kyseisen liitoscappaleen täysin automatisoituun valmistukseen liittyy kuitenkin edelleen ruuvin reiän aiheuttama ongelma.

Metallien materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien viime vuosien nopea kehitys, joka jatkuu edelleen, luo täysin uusia näköaloja myös teräsrakentamisen tulevaisuuteen. Vanhimmat tässä työssä tarkastellut metallien materiaalia lisäävän rakentamisen parissa tehdyt tutkimukset ovat reilun kymmenen vuoden takaa. Näissä tutkijoiden esiin nostamat ongelmat ovat edelleen läsnä, mutta edistystä on myös tapahtunut ja kehitystyö jatkuu.

LÄHTEET

Aniwaa.com, Metal 3D printers in 2020: a comprehensive guide, saatavilla <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/best-metal-3d-printer/>, viitattu 20.10.2020

Ansys Workbench 2020 R1 User's Guide

Baddoo, N. (2017). Käsikirja - Ruostumattomien terästen käyttö kantavissa rakenteissa, neljäs painos, Teräsrakenneyhdistys ry

Bendsøe, M.P. & Sigmund, O. (2004). Topology Optimization - Theory, Methods and Applications, Springer

Buchanan, C. & Gardner, L. (2019). Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges, Engineering Structures

Camacho, D.D., Clayton, P., O'Brien, W., Ferron, R., Juenger, M., Salamone, S. & Seepersad, C. (2017). Applications of Additive Manufacturing in the Construction Industry – A Prospective Review, 2017

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

Davtalab, O., Kazemian, A. & Khoshnevis, B. (2018). Perspectives on a BIM-integrated software platform for robotic construction through Contour Crafting, Automation in Construction, pp. 13-23

Fabric8Labs, saatavilla: <https://fabric8labs.com/>, viitattu 10.9.2020

Feucht, T., Lange, J. & Erven, M. (2019). 3-D-Printing with Steel - Additive Manufacturing of Connection Elements and Beam Reinforcements

Galjaard, S., Hofman, S., Perry, N. & Ren, S. (2015). Optimizing Structural Building Elements in Metal by using Additive Manufacturing

Galjaard, S., Hofman, S. & Ren, S. (2015). New Opportunities to Optimize Structural Designs in Metal by Using Additive Manufacturing, in: Anonymous (ed.), Advances in Architectural Geometry 2014, Springer International Publishing, pp. 79-93

Ghaffar, S.H., Corker, J. & Fan, M. (2018). Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution, Automation in Construction, pp. 1-11

IEA (2019). 2019 Global Status Report for Buildings and Construction, United Nations Environment Programme

Jarosinski, W. & Zhang, J. (2018). 2. Additive manufacturing process and equipment, in: Zhang, J. & Jung, Y. (ed.), Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications, Butterworth-Heinemann

Jokinen, A. & Riipinen, T. (2016). Lisäävän valmistuksen keskeiset materiaalit ja niiden ominaisuudet, VTT

Krishna, L.S.R., Mahesh, N. & Sateesh, N. (2017). Topology optimization using solid isotropic material with penalization technique for additive manufacturing, *Materials Today: Proceedings 4* (2017), pp. 1414-1422

Laaksonen, H., Ukonaho, M. & Cumini, A. (2016). 3D tulostuksen mahdollisuudet: case topologian optimointi, pp. 71-80

Labonnote, N., Rønquist, A., Manum, B. & Rüther, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities, *Automation in Construction*, pp. 347-366

Lehtinen, K. Materiaalia lisäävän valmistuksen keskeisistä termeistä koottu kolmikielinen sanasto, saatavissa: http://firpa.fi/html/sanasto_html.html, viitattu 6.5.2021

Metal Am.com, Metal powders - the raw materials, Inovar Communications Ltd, saatavilla: <https://www.metal-am.com/%20introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/metal-powders-the-raw-materials/>, viitattu 4.9.2020

Moynihan, M., C & Allwood, J., M (2014). Utilization of structural steel in buildings, *Proceedings of the Royal Society*

Mrazovic, N., Baumers, M., Hague, R. & Fischer, M. (2018). Guiding building professionals in selecting additive manufacturing technologies to produce building components, *Materials Today Communications*, pp. 199-202

Mrazovic, N. & Mocibob, D. (2015). FEASIBILITY STUDY TO 3D PRINT A FULL SCALE CURTAIN WALL FRAME AS A SINGLE ELEMENT, Per-masteelisa R&D Group

Mrazovic, N., Mocibob, D., Lepech, M. & Fischer, M. (2017). ASSESSMENT OF ADDITIVE AND CONVENTIONAL MANUFACTURING: CASE STUDIES FROM THE AEC INDUSTRY, in: Anonymous (ed.), *Resilient Structures and Sustainable Construction*, ISEC Press

MWES (2018). MWES: ADDere system - Utilizing Layered Metal Deposition, for 3D Additive Manufacturing, A Midwest Engineered Systems

MX3D, Connector for Takenaka, 2021, saatavissa: mx3d.com/industries/construction/, viitattu 6.11.2020

Paolini, A., Kollmannsberger, S. & Rank, E. (2019). Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods, *Additive Manufacturing*

Rehme, O. & Emmelmann, C. (2009). Selective laser melting of honeycombs with negative Poisson's ratio, *Journal of Laser Micro / Nanoengineering*, pp. 128-134

Richardson, V. (2017). 3D printing becomes concrete: exploring the structural potential of concrete 3D printing, *The Structural Engineer*, pp. 10-17

Rothwell, A. (2017). *Optimization Methods in Structural Design*, Springer International Publishing

Rozvany, G.I.N. (2009). A critical review of established methods of structural topology optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization* 37, pp. 217-237

Salmi, J., Keskinen, J., Sillanpää, H. & Ruuskanen, P. (1996). FG-materiaalien valmistus isostaattisella kuumapuristuksella ja SHS-menetelmällä, VTT

- Savonia (2018). Formnext 2018 - Katsaus esillä olleista laitteista ja laitteistovalmistajista, saatavissa: <https://3dtulostus.savonia.fi/fi/tietopankki/3d-julkaisut>, viitattu 8.11.2020
- SFS-EN ISO 17296-2:2016 (2016). Additive manufacturing. General principles. Part 2: Overview of process categories and feedstock, Suomen Standardoimisliitto SFS ry
- SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 (2017). Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia, Suomen Standardoimisliitto SFS ry
- Strauß, H. (2013). AM Envelope - The potential of Additive Manufacturing for facade construction, Delft University of Technology
- Strauß, H., Pfenninger, E. & Knaack, U. (2015). Additive Manufacturing for Future Facades - The potential of 3D printed parts for the building envelope, Journal of Facade design and Engineering, pp. 225-235
- van Dijk, N.P., Langelaar, M. & van Keulen, F. (2010). Critical study of design parameterization in topology optimization; The influence of design parameterization on local minima, 6.-9.9.2010
- Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J. & Norrish, J. (2018). A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, Journal of Manufacturing Processes, pp. 127-139
- Wu, P., Wang, J. & Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry, Automation in Construction, pp. 21-31
- Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M. & Wiener, S. (2017). Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production, Springer, 18-37 p