

Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden korkeakoulu
Rakennus- ja ympäristötekniikan koulutusohjelma

3D-tulostamisen sovellukset tulevaisuuden rakennustekniikassa

Kandidaatintyö

10.4.2014

Miikka Heinonen

Tekijä Miikka Heinonen

Työn nimi 3D-tulostamisen sovellukset tulevaisuuden rakennustekniikassa

Koulutusohjelma Rakennus- ja ympäristötekniikka

Pääaine Rakennetekniikka**Pääaineen koodi** R3001

Vastuopettaja Leena Korkiala-Tanttu

Työn ohjaaja(t) Jarkko Niiranen

Päivämäärä 10.4.2014**Sivumäärä** 19 + 3 liitettä**Kieli** suomi

Tiivistelmä

Tämä kandidaatintyö tutkii 3D-tulostusteknologian sovelluksia tulevaisuuden rakennustekniikassa. Tavoite on luoda realistinen ennuste siitä, mihin tarkoitukseen 3D-tulostusta tullaan rakennus- alalla käyttämään. Työ tutkii myös 3D-tulostuksen etuja ja rajoituksia eräisiin nykypäivänä käytössä oleviin tuotanto- ja rakentamismenetelmiin verrattuna. Tämän kandidaatintyön tulokset perustuvat lähinnä olemassa olevaan kirjallisuuteen.

Tuloksena saatiin selville, että 3D-tulostus tulee tulevaisuudessa mitä todennäköisimmin yleistymään rakennusalalla. Talojen rakentaminen Contour Crafting -menetelmällä (CC) olisi nykymenetelmiä halvempaa ja ympäristöystävällisempää, mikä johtuu CC:n aiheuttamasta työvoimatarpeen ja materiaalihukan oleellisesta vähenemisestä. Lisäksi 3D-tulostaminen tulee lisäämään suunnittelijoiden vapautta, muun muassa siksi, että tulostamisen kustannukset eivät juuri riipu tulostetun esineen muodon monimutkaisuudesta. Erillisten rakenneosien, kuten teräspalkkien ja -liitosten tuotannossa 3D-tulostus tulee olemaan nykymenetelmiä kannattavampaa vain, jos näitä rakenteita ei tuoteta suuria määriä standardikokoisina. 3D-tulostusta tullaan todennäköisesti käyttämään tulevaisuudessa tämänlaisten erityisrakenteiden tuotannossa.

3D-tulostus on jo käytössä useissa arkkitehtitoimistoissa, missä se on apuväline rakennusten hahmottamisessa pienoismallien muodossa. Tähän käyttöön 3D-tulostusteknologia on jo käytännössä osoittautunut olevan hyödyllistä. On siis odotettavissa, että 3D-tulostimien käyttö arkkitehtuurissa tulee yleistymään edelleen.

Avainsanat Contour Crafting, D-Shape, Concrete Printing, Laser Engineered Net Shaping, Direct Metal Laser Sintering, Stereolitografia, 3D Printing, 3D-printtaus, 3D-printtaaminen, 3D-tulostus, pikavalmistus, rapid manufacturing, rapid prototyping, additive manufacturing

Sisällys

Liitteet	3
1 Johdanto	4
2 3D-tulostamisen perusteet	5
3 3D-tulostamisen ja eräiden perinteisten valmistusmenetelmien vertailu	7
3.1 Yleistä	7
3.2 Ruiskuvalun ja 3D-tulostamisen vertailu	8
3.3 Valssauksen ja pursotuksen vertailu 3D-tulostamiseen	9
4 3D-printtausteknologioita ja niiden soveltuvuus rakennusalalle	9
4.1 Yleistä	9
4.2 Laser Engineered Net Shaping (LENS)	10
4.3 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	11
4.4 Stereolitografia (SLA)	12
4.5 3D Printing (3DP)	12
4.6 Contour Crafting (CC)	13
4.7 D-Shape	16
4.8 Concrete printing (CP)	17
5 Yhteenveto ja johtopäätökset	18
Lähteet	20
Liite 1. Contour Crafting -rakentamismenetelmä	3
Liite 2. D-Shape-tulostin	3
Liite 3. Concrete Printing -tulostin	3

Liitteet

Liite 1. Contour Crafting –rakentamismenetelmä

Liite 2. D-Shape-tulostin

Liite 3. Concrete Printing -tulostin

1 Johdanto

Tämä kandidaatintyö käsittelee 3D-tulostuksen sovelluksia tulevaisuuden rakennustekniikassa. 3D-tulostuksen käyttökohteita rakennusalalla ovat esimerkiksi pienoismallien teko (arkkitehdeille hyödyllistä), valmiiden rakenneosien teko tai peräti kokonaisten rakenteiden tai rakennusten tulostaminen.

Työn tarkoitus on tutkia seuraavia kysymyksiä: Mihin tarkoituksiin 3D-tulostamista tullaan käyttämään rakennusalalla? Mitkä ovat 3D-tulostamisen edut ja rajoitukset nykyisiin rakentamis- ja tuotantomenetelmiin verrattuna?

Tämän työn tavoitteena on luoda mahdollisimman realistinen ennuste siitä, miten 3D-tulostamista tullaan tulevaisuudessa käyttämään rakennusalalla. Tämä kandidaatintyö perustuu olemassa olevaan kirjallisuuteen.

3D-tulostuksen tutkiminen on erityisen tärkeää juuri nyt, sillä kyseinen teknologia on nykyään yleistyvä sekä kaupalliseen että yksityiseen käyttöön. 3D-tulostuksen ajankohtaisuus näkyy selkeästi tilastoista. Vuonna 1989 3D-tulostimia myytiin maailmanlaajuisesti 104 kappaletta. Vuonna 2000 niitä myytiin 1320 kappaletta. Vuonna 2011 niitä myytiin peräti yli 13 000 kappaletta, joista melkein puolet myytiin kaupalliseen käyttöön. Tämä vuosi oli ensimmäinen kerta, kun yksityiseen käyttöön myytiin määrällisesti enemmän 3D-tulostimia kuin kaupalliseen käyttöön. (Lipson & Kurman, 2013 s. 34), (Wohlers, 2001. s. 5)

3D-tulostuksen tutkiminen erityisesti rakennustekniikassa on tärkeää, koska rakennusalan voidaan katsoa olevan automatisoinnissa useita muita teollisuuksia jäljessä, kuten esimerkiksi lentokoneteollisuutta, autoteollisuutta ja laivanrakentamista. Rakentamisen keskeiset periaatteet eivät ole erityisesti muuttuneet pitkään aikaan. Nykyiset rakennusmenetelmät rajoittavat mielikuvitusta, mikä hidastaa innovaatiota. Usein myös laissa säädetyt vaatimukset kannustavat käyttämään perinteisiä menetelmiä, sen sijaan että uusia menetelmiä kehitettäisiin. Maissa, joissa on vanheneva väestö, on kasvava puute taitavasta työvoimasta. Rakentamisprojekteissa tilaajat joskus haluavat rakenteita, joita ei voida rakentaa millään nykypäivänä tunnetulla menetelmällä (Buswell, et al. 2007. s. 10). Lisäksi paine muuttua ympäristöystävällisemmäksi on kasvussa. Rakentamisessa käytettävän automaation lisääminen 3D-tulostuksen muodossa on mahdollinen ratkaisu näihin pulmiin. (Buswell, et al. 2007. s. 3)

Tässä kandidaatintyössä käydään aluksi läpi 3D-tulostamisen perusteet luvussa 2. Kyseisessä luvussa annetaan perustietoa, joka pätee 3D-tulostamiseen yleisesti riippumatta siitä, minkälaista 3D-tulostinta käytetään tai mihin sovellukseen sitä käytetään. Kolmannessa luvussa vertaillaan 3D-tulostamista eräisiin perinteisiin valmistusmenetelmiin: ruiskuvaluun, valsaukseen ja pursotukseen. Kyseisessä luvussa käsitellään esimerkiksi tuotannon kannattavuutta talouden näkökannasta eri menetelmillä. Luvussa 4 käsitellään erilaisia 3D-tulostusteknologioita ja niiden mahdollisia sovelluksia rakennustekniikassa. Valituista 3D-printtausmenetelmistä neljä ovat yleisiä menetelmiä, joita ei ole erityisesti suunniteltu rakennusalaan varten. Näitä menetelmiä seuraa kolme 3D-tulostusmenetelmää, jotka on kehitetty nimenomaan rakentamista varten: Contour Crafting, D-Shape ja Concrete Printing. Esitellyt 3D-tulostusmenetelmät on valittu sillä tavalla, että työ sisältää tietoa erilaisiin sovelluksiin käyttökelpoisista 3D-tulostusmenetelmistä. Seuraava luku on viimeinen luku ja se sisältää tämän kandidaatintyön yhteenvedon ja johtopäätökset.

2 3D-tulostamisen perusteet

Tässä luvussa käsitellään lyhyesti, mitä 3D-tulostaminen on. Kyseisestä tekniikasta käytetään monta eri nimeä, joista yleisiä ovat 3D-tulostaminen, 3D-printtaus, pikavalmistus (engl. ”rapid manufacturing”) ja englanninkielinen ”additive manufacturing”. (Lipson & Kurman, 2013 s. 11)

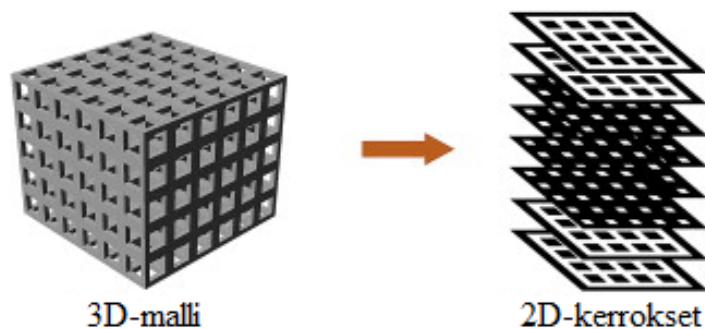
Kaksiulotteisessa tulostamisessa tulostin vastaanottaa informaatiota tietokoneelta ja tulostaa tämän kaksiulotteisesti musteena paperille. Kolmiulotteinen tulostaminen on ikään kuin sarja kaksiulotteisia tulostuksia (kolmiulotteisen kappaleen poikkileikkauksia), jotka tehdään peräjälkeen toistensa päälle. Näin saadaan käyttöön kolmas avaruusulottuvuus. Materiaalina 3D-tulostuksessa tosin käytetään muita aineita kuin mustetta. Lopputuloksena on kolmiulotteinen kappale, jonka materiaali on nykypäivänä useimmiten muovia, mutta muitakin materiaaleja voi käyttää, riippuen 3D-tulostimesta. (Lipson & Kurman, 2013 s. 11–13)

3D-tulostamisen historia alkoi 1980-luvulla. Chuck Hull työskenteli pienessä yhtiössä, joka tuotti päällysteitä pöydille käyttämällä nestemäistä polymeeriä ja ultraviolettivaloa. Kun Hull ehdotti, että ultraviolettivaloa voisi käyttää tietokonemallien muuttamiseen fyysisiksi prototyypeiksi, hänen käyttöönsä annettiin pieni laboratorio, jossa hän pystyi kehittämään ideaansa. Vuonna 1983 Hullin kehittämä 3D-printteri tulosti maailman ensimmäisen 3D-tulostetun esineen. 3D-tulostusteknologia syntyi siis tarpeesta tuottaa prototyyppejä nopeammin ja halvemmalla kuin ennen. Hänen kehittämänsä 3D-tulostusmenetelmää kutsutaan stereolitografiaksi. Tätä menetelmää käsitellään tarkemmin tämän kandidaatintyön luvussa 4. Seuraavaksi esitellään 3D-tulostusprosessin vaiheita. (Ponsford, 2014.)

Tulostettava kappale pitää ensin suunnitella 3D-mallintamisohjelmistolla. Tätä varten on monta vaihtoehtoa. Valinta riippuu esimerkiksi siitä, kuinka tarkka malli tarvitaan tai mitä ohjelmaa käyttäjä on tottunut käyttämään. Kolmiulotteisen mallin voi tehdä myös skannaamalla olemassa olevan esineen. (Lipson & Kurman, 2013 s. 87–97)

3D-tulostimien käyttämät ohjelmistot eivät osaa käsitellä 3D-mallintamisohjelmistojen käyttämiä tiedostotyyppiejä. Tämän takia nämä tiedostot pitää muuttaa STL-tiedostoiksi, joita 3D-tulostimet ymmärtävät. Lyhenne STL on lähtöisin englanninkielisestä sanasta ”stereolithography”. STL-tiedosto määrittelee kappaleen muodon jakamalla sen pinnan pieniin kolmioihin. Se sisältää jokaisen kolmion kulmien x, y ja z-koordinaatit ja jokaisen kolmion yksikkönormaalini eli yksikkövektorin, joka osoittaa ulospäin mallista. Yksikkönormaalit siis kertovat, kumpi puoli on tulostettavan mallin ulkopuoli. STL-tiedosto ei sisällä tietoa tulostettavan kappaleen mittakaavasta, eikä se tyypillisesti myöskään kerro mitään kappaleen väristä. Kun kappaletta tulostetaan, sen mittakaava voidaan valita vapaasti. Mitä suurempi kappale on, sitä kauemmin sen tulostaminen kestää ja sitä enemmän materiaalia siihen kuluu. (Lipson & Kurman, 2013 s. 77–80), (Burns, 1997. luku 6.5)

Kun STL-tiedosto on olemassa, 3D-tulostus voi alkaa. 3D-tulostimia on monenlaisia, joten käsitellään prosessi hyvin yleisellä tasolla. Tulostaminen alkaa tulostettavan kappaleen alimmaasta kerroksesta. Tulostin kokoaa alimman kerroksen kasaan. Tämän jälkeen tulostin siirtyy tekemään seuraavaa vaakasuoraa kerrosta ja se kokoaa sen viime kerroksen päälle. Tämä prosessi toistuu, kunnes kappale on valmis, jolloin tulostin lopettaa. Näiden ohuiden kerroksien tekemiseen käytettävä metodi voi olla hyvinkin erilainen riippuen tulostimesta. (Lipson & Kurman, 2013 s. 11–13)



Kuva 1. Periaatekuva 3D-mallin jakamisesta vaakasuoriksi kerroksiksi.
(Melchels, et al. 2010. s. 3)

Printattavien esineiden maksimikoko vaihtelee paljonkin riippuen siitä, mitä 3D-tulostinta käytetään. Jokaisella 3D-tulostimella on jokin tietty kolmiulotteinen tila, jonka sisään tulostettavan esineen tulee mahtua, jotta se voidaan tulostaa. Tästä tilasta käytetään muun muassa englanninkielistä termiä ”build chamber”, joka suomennetaan tässä kandidaatintyössä tulostustilaksi. Rakennuksissa käytettäväksi tarkoitetut rakenneosat ovat usein kokoluokaltaan useiden metrien kokoisia. Eräiden 3D-tulostimien (kuten Contour Crafting) on tulevaisuudessa tarkoitus kyetä rakentamaan kokonaisten talojen runkoja, mikä vaatii suurta tulostustilaa. Tulostustilan käsite on erityisen tärkeä 3D-tulostamisen soveltamisessa rakentamiseen.

Ennen tulostamisen aloittamista, tulostimen pitää tietää kaikki liikkeet, jotka se tulee tekemään tulostuksen aikana. Tähän käytetään niin sanottua G-koodia, jonka tulostimen käyttämä tietokoneohjelma luo ennen tulostamista. G-koodi jakaa jokaisen kerroksen viivoiksi. Se kertoo 3D-tulostimelle, mihin koordinaattipisteeseen mennä ja kuinka paljon materiaalia tällä matkalla pitäisi käyttää. Koordinaattina käytetään jotain pistettä, joka löytyy kyseisen printterin tulostustilasta. Käytettävän materiaalin määrä voidaan ilmoittaa esimerkiksi yksikössä millimetriä/minuutti. G-koodi on tärkeää tuottaa kullekin 3D-tulostimelle tarkoitetulla tietokoneohjelmalla, sillä 3D-tulostimissa on eroja. G-koodi, joka sopii hyvin esineen tulostamiseen jollain tietyllä tulostimella, ei välttämättä toimi hyvin jollain muulla tulostimella. (Zamiska, et al. 2013. s. 25–27.)

3D-tulostusprosessi voidaan jakaa näihin kahdeksaan askeleeseen:

- hahmottaminen ja CAD
- muunto STL-formaattiin
- STL-tiedoston siirto ja muunteleminen (esimerkiksi mittakaavan valitseminen) 3D-tulostimella
- 3D-tulostimen asetusten säätäminen
- varsinainen tulostaminen
- tulostetun esineen poistaminen tulostimesta, esineen siivoaminen ja mahdollisten tukirakenteiden poistaminen
- tulostetun esineen jälkihoito eli esimerkiksi pinnan tasoittaminen
- esineen käyttöönotto

(Mellor, et al. 2013. s. 2).

3 3D-tulostamisen ja eräiden perinteisten valmistusmenetelmien vertailu

Tässä luvussa tarkastellaan eräiden perinteisten valmistusmenetelmien ja 3D-tulostamisen eroja. Lisäksi tässä luvussa pyritään selvittämään, minkälaisessa tuotannossa 3D-tulostamista kannattaisi käyttää.

3.1 Yleistä

3D-tulostamisen erityispiirteet johtavat seuraavanlaisiin hyötyihin:

- Työstämistä ei tarvita, mikä lyhentää tuotannon käynnistämiseen kuluvaan aikaan. Lisäksi tämä laskee kustannuksia.
- 3D-tulostus soveltuu erityisesti pienten tuotantoerien tuottamiseen.
- 3D-printtaus mahdollistaa tuotteen helpon muokkaamisen. Riittää, että tietokoneella olevaa mallia muokataan ja sitten uudenlainen tuote voidaan tulostaa.
- Tuote voidaan optimoida käyttötarkoitustaan varten.
- Yhden kappaleen tuotantoerä voidaan tuottaa taloudellisesti. Muottiin valuun perustuvilla menetelmillä tämä olisi huomattavasti kalliimpaa.
- 3D-tulostus antaa mahdollisuuden vähentää materiaalihukkaa.
- 3D-tulostus mahdollistaa yksinkertaisemmat toimitusketjut ja lyhyemmät läpimenoajat. Lisäksi se mahdollistaa sen, että varastossa pidetään pienempi määrä tuotetta samanaikaisesti.

(Mellor, et al. 2013. s. 2).

Rakentamisessa joskus käytetään erikoisia rakenneosia, joita ei tuoteta suurina määrinä, jolloin 3D-printtaus on realistinen vaihtoehto kyseisten rakenneosien tuottamiseen.

Esimerkkinä tällaisesta osasta voidaan käyttää arkkitehti Adrian Priestmanin suunnittelemaa teräksistä palaa, joka on asennettu liitoskohdan päälle teräsrakenteeseen. Kyseinen osa on tosin vain dekoratiivinen; varsinainen liitos on sen alla piilotettuna. (Grozdanic, 2013)



Kuva 2. Adrian Priestmanin suunnittelema teräksinen liitososa. (Grozdanic, 2013)

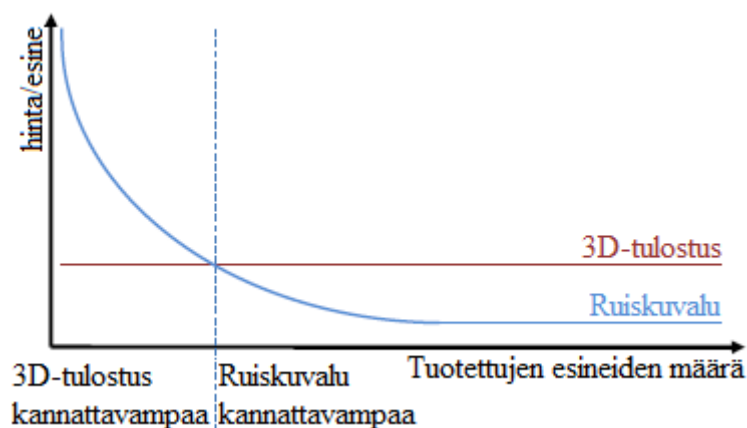
Rakentamisessa seinät, lattiat, paneelit ja monet muut rakenneosat ovat useimmiten mitoiltaan ainutlaatuisia. Tästä johtuen näitä osia tehdään usein joko leikkaamalla standardikokoisia rakenneosia sopivan kokoisiksi tai tekemällä sopivanlainen muotti. Standardikokoisten rakenneosien leikkaaminen aiheuttaa materiaalihukkaa. Muottien tekeminen on työlästä ja vie aikaa. Näiden tekijöiden vuoksi syntyy tarve käyttää rakennusprojektissa samanlaisia elementtejä monessa paikassa. (Lim, et al. 2012. s. 3)

Jos rakenne suunnitellaan tietokoneella ja tulostetaan 3D-tulostimella, rakenne voidaan tehdä sopivankokoisena pienellä materiaalihukalla ja ilman muottia. 3D-tulostus voi mahdollisesti poistaa tarpeen käyttää projektissa samanlaisia rakenteita useassa paikassa, mikä antaa suunnittelijoille lisää vapautta. (Lim, et al. 2012. s. 3)

3.2 Ruiskuvalun ja 3D-tulostamisen vertailu

Seuraavaksi vertaillaan keskenään 3D-tulostamista ja ruiskuvalua, joka on yleisesti käytössä oleva perinteinen tuotantomenetelmä. Ruiskuvalulla tuotetaan tyypillisesti muoviesineitä, mutta sillä voidaan tuottaa myös metalliesineitä. Ruiskuvaluprosessissa materiaalia (yleensä sulaa kestumuovia) puristetaan muottia vasten käyttäen painetta. Muotin muoto määrittelee tuotettavan esineen muodon. Jäähdytymisen aikana esine kovettuu ja näin saadaan tuotettua halutunmuotoinen esine. (Rosato, et al. 2000).

Jos tuotetaan mitä tahansa tuotetta ja pitäisi valita ruiskuvalun ja 3D-tulostuksen väliltä, alla oleva kuvaaja kertoo, kumpi menetelmä kannattaisi valita. Jos tuotetaan pienen määrän kyseistä tuotetta, 3D-tulostus on kannattavampaa. Jos tuotetaan suuren määrän kyseistä tuotetta, ruiskuvalu on kannattavampaa. Tämä johtuu siitä, että ruiskuvalussa on tuotannon aloittamisvaiheessa suuria kustannuksia, kuten muottien tekeminen. Kun tuottaminen on saatu käyntiin, tuotekohtainen hinta on pieni, minkä takia ruiskuvalu päihittää 3D-tulostuksen silloin kun esineitä tuotetaan erittäin suuria määriä. 3D-tulostus maksaa yhtä paljon jokaista tulostettua esinettä kohti, koska tuottamisen aloituskustannuksia ei käytännössä ole. Pitää vain olla olemassa printattava STL-tiedosto ja 3D-tulostin, ja tulostaminen voi alkaa. (Lim et al. 2012. s. 2–3)



Kuva 3. 3D-tulostuksen ja ruiskuvalun kannattavuusvertailu (Lim, et al. 2012. s. 3).

Yllä oleva kuvaaja olettaa, että jokainen tuotettu esine on aivan samanlainen. Jos tuotetuissa esineissä olisi eroja, ruiskuvalussa täytyisi jokaiselle erilaiselle esineelle olla oma muotti, jonka valmistaminen on kallista. 3D-tulostamisessa jokaisella erilaisella esineellä olisi eri STL-tiedosto. Olettaen, että esineisiin kuluu suunnilleen sama määrä materiaalia ja niiden tulostamisessa kestää suunnilleen yhtä paljon aikaa, niin tuotekohtainen hinta pysyisi edelleen samana riippumatta siitä, kuinka monta erilaista tuotetta tulostetaan. (Lim, et al. 2012. s. 2–3)

3.3 Valssauksen ja pursotuksen vertailu 3D-tulostamiseen

Eräitä perinteisiä metallikappaleiden valmistusmenetelmiä ovat esimerkiksi valssaus ja pursotus. Valssaus (engl. rolling) on perinteinen menetelmä muokata metallia. Valssauksessa metallikappale kulkee vastakkaisiin suuntiin pyörivien rullien välistä, jolloin sen muoto muuttuu. Rullia voi olla useita ja ne voivat olla erimuotoisia, jolloin metallikappaleelle saadaan haluttu poikkileikkaus. (Smithells, 2004. luku 30.5.2.3)

Metallin pursotus (engl. extrusion) on jo kauan käytössä ollut prosessi, jossa materiaalia kulkee suuttimen läpi. Tällä tavalla voi tuottaa esineitä, joilla on vakiopoikkileikkaus. Tämän poikkileikkauksen muodon määrää suuttimen muoto. Smithells (2004) vertaa tätä prosessia hammastahnauksen puristamiseen ulos hammastahnatuubista. Pursotuksessa käytettäviä materiaaleja ovat esimerkiksi polymeeri ja metalli. Jos käytettävä materiaali on polymeeriä, kutsutaan tätä prosessia kuitenkin ekstruusioksi. (Smithells, 2004. luku 30.5.2.1)

Yhteistä valssaukselle ja pursotukselle on se, että molemmat prosessit vaativat valmistamisen alkuvaiheessa suuret investoinnit, mutta tuotannon kunnolla käynnistyttyä kustannukset eivät ole erityisen suuria. Tämä johtuu niin sanotuista suurtuotannon eduista (Lipson & Kurman, 2013 s. 25–28). Sen vuoksi voidaan päätellä, että jos näiden prosessien kannattavuutta vertaillaan 3D-tulostuksen kannattavuuteen, saadaan käyrä joka muistuttaa pääpiirteiltään yllä olevaa käyrää (kuva 2). Esimerkiksi rakentamisessa käytetyt palkit ovat useimmiten standardikoisia ja niitä tuotetaan suuria määriä, joten näiden tuottaminen 3D-printtaamalla mitä todennäköisimmin ei olisi kannattavaa.

4 3D-printtausteknologioita ja niiden soveltuvuus rakennusallalle

4.1 Yleistä

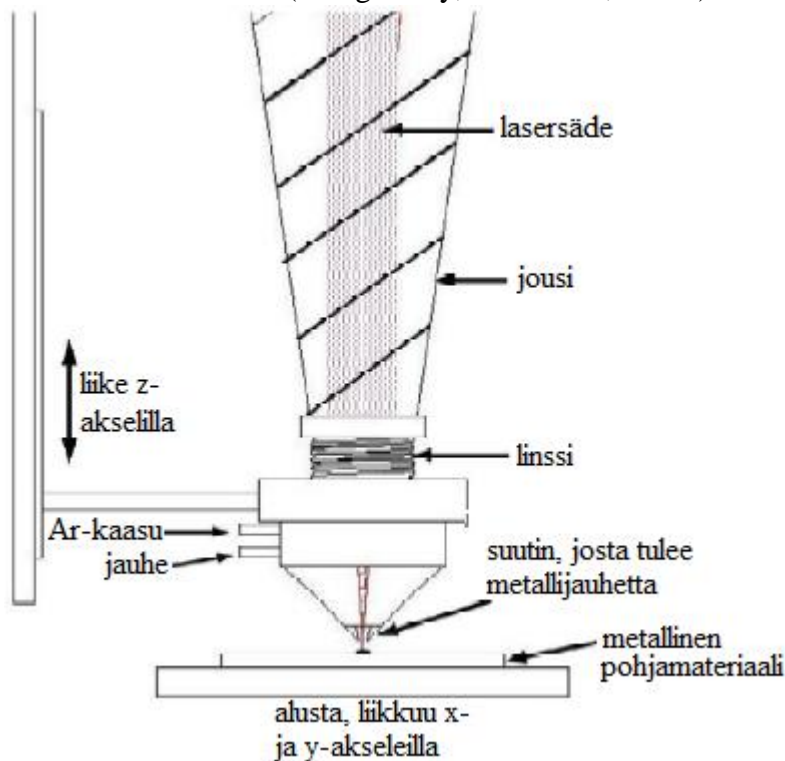
Useimmat 3D-tulostimet voidaan jakaa karkeasti kahteen pääryhmään. Ryhmistä ensimmäinen on niin kutsuttu selektiivinen kerrostaminen (engl. selective deposition) johon kuuluvat tulostimet printtaavat pursuttamalla pehmeää ainetta tai suihkuttamalla jauhemaista ainetta suuttimesta ulos. Tämä kandidaatintyö viittaa tähän ryhmään kuuluviin tulostimiin sanalla ”kerrostava”. (Lipson & Kurman, 2013. s. 68)

Toiseen ryhmään kuuluvat tulostimet liimaavat, sintraavat tai muuten kiinnittävät tulostus-
alustalla olevia ainehiukkasia toisiinsa. Tähän ryhmään kuuluviin printtereihin viitataan tässä kandidaatintyössä sanalla ”kiinnittävä”. (Lipson & Kurman, 2013. s. 68)

Nämä kaikki ovat additiivisia prosesseja, millä tarkoitetaan sitä, että ne tuottavat printattavan kappaleen lisäämällä ainetta, aloittaen tyhjästä. Tämä on olennainen ero useisiin muihin työmenetelmiin, kuten esimerkiksi poraamiseen, sorvaamiseen tai sahaamiseen, joissa haluttu muoto saadaan aikaiseksi poistamalla ainetta olemassa olevasta kappaleesta. (Lipson & Kurman, 2013. s. 65, 79)

4.2 Laser Engineered Net Shaping (LENS)

LENS-tulostimissa on lasersäde, joka kulkee pienen ikkunan kautta suljettuun laatikkoon. Laatikon sisällä on metallijauhetta puhaltava suutin sekä alusta, jolle tulostettava tuote tehdään. Lasersäde osuu metalliin ja sulattaa siihen pienen lätkön. Suuttimesta tai suuttimista tulevat metallipartikkelit osuvat tähän sulaan metallilätkäkköön ja sulavat osaksi tulostettavaa kappaletta. Tämän toimintaperiaatteen takia alustalla pitää jo olla metallinen kappale, jotta tulostaminen voidaan aloittaa. LENS-tulostimet kykenevät tulostamaan kappaleeseen ulkonevia osia, kunhan ulkoneman ja tulostettavan kappaleen pinnan yksikkönormaalien välinen kulma ei ole alle 30°. (Smugeresky, et al. 1997, s. 5–6)



Kuva 4. Periaatekuva LENS-tulostamisesta.
(Das, et al. 2013. s. 4)

Nesteen tai kaasun syrjäyttämiseen perustuvilla menetelmillä mitattuna LENS-menetelmällä tuotetut metallikappaleet ovat täyttä metallia, eli niissä ei ole huokosia. Toisaalta, ultraäänimenetelmä osoitti, että kyseiset metallikappaleet sisältävät 1–5 µm:n kokoisia pieniä huokosia. Samassa tutkimuksessa LENS-menetelmällä tuotettujen kappaleiden vetolujuus mitattiin. Testikappaleet olivat materiaaliltaan SS316 ruostumatonta terästä. Vetokokeissa teräskappaleiden myötölujuusarvoksi saatiin 448 MPa:ia. (Griffith, et al. 1996. s. 4–5)

Koska suuttimia voi olla enemmän kuin yksi, LENS-tulostimilla voi tuottaa esineitä, jotka koostuvat metalliseoksesta. Tällöin eri suuttimista tulee eri metalleja, ja metallien suhdetta voi muuttaa säätämällä suuttimen sijaintia. (Lipson & Kurman, 2013. s. 71–72)

LENS-tulostimilla on suhteellisen suuri tulostustila. Esimerkiksi LENS-prosessia käytävällä koneella LENS-850R:llä on 900 x 1500 x 900 mm³ tulostustila. (Strauss, 2012. s. 60)

LENS-menetelmällä tuotettujen metallikappaleiden tiheyttä on tutkittu nesteen tai kaasun tilavuuden syrjäyttämiseen perustuvilla menetelmillä, sekä myös ultraäänikuvauksella.

Ottaen huomioon LENS-menetelmän suhteellisen ison tulostustilan ja kyseisellä menetelmällä tuotettujen esineiden hyvät mekaaniset ominaisuudet, voidaan päätellä, että LENS-menetelmää voidaan käyttää metallisten rakenneosien tuotannossa.

4.3 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

DMLS on kiinnostava 3D-tulostusmenetelmä, joka muistuttaa monin tavoin LENS-tulostusmenetelmää. Pääerona on se, että LENS on kerrostava menetelmä, kun taas DMLS on kiinnostava. DMLS:ssä metallijauhe on tulostusalustan päällä. Lasersäde kohdistetaan jauheeseen, jolloin se sulaa ja sen jälkeen kovettuu. Kun kerros on valmis, tulostusalusta siirtyy hieman alaspäin ja sen päälle tuodaan uusi kerros metallijauhetta, jolloin laser taas luo uuden kerroksen sulattamalla tätä jauhetta. Tämä prosessi toistuu, kunnes kappale on valmis. LENS-tulostimiin verrattuna DMLS:llä on se hyvä puoli, että esinettä printattaessa sitä ympäröi metallijauhe, joka antaa esineelle tukea. Toisaalta tämän jauhealtaan koko rajoittaa printattavan esineen maksimikokoa. DMLS-printtereitä muistuttavat Selective Laser Sintering (SLS) -tyyppiset tulostimet voivat käyttää materiaalina muovia. (Lipson & Kurman, 2013. s. 75), (Khaing, et al. 2001. s. 1)

Khaing et al (2001) mittasivat DMLS-tulostusmenetelmää käyttävän EOSINT M 250- tulostimen tarkkuuden. He saivat tulokseksi, että kyseisen tulostimen tulostamissa esineissä olevat mittavirheet vaihtelevat 0,003 mm:n ja 0,082 mm:n välillä. Toisaalta, lieriömäisten kappaleiden mitoissa havaittiin peräti 0,025–0,34 mm:n suuruisia mittavirheitä. 0,34 mm:n virhe on huomattava, mutta useimpia rakentamissovelluksia varten se todennäköisesti ei aiheuttaisi ongelmia. (Khaing, et al. 2001. s. 3)

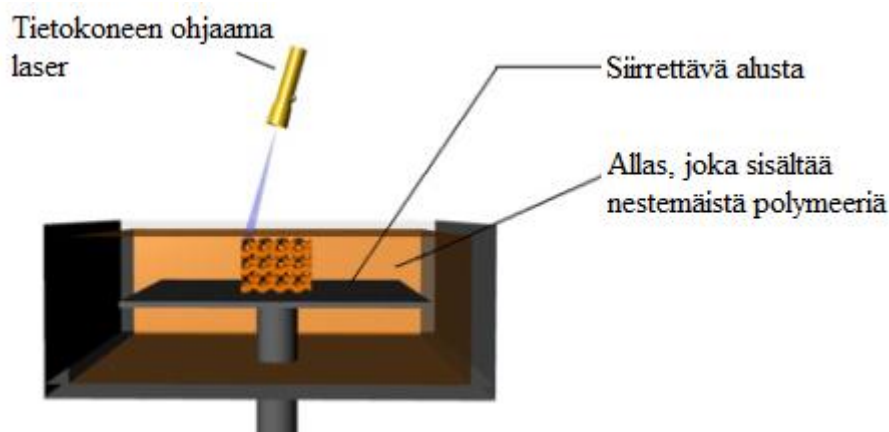
Kuten LENS-tulostimet, DMLS-tulostimet voivat tehdä esineitä metalliseoksista. DMLS:llä tuotettujen esineiden materiaaliominaisuudet ovat lähes yhtä hyviä kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä saavutetut. (Tang, et al. 2003. s. 1) DMLS kykenee korkeaan tarkkuuteen ja hyvään tulokseen, mutta rakentamiskäyttöä rajoittaa tulostustilan pieni koko. Esimerkiksi DMLS-menetelmää käyttävällä tulostimella EOSINT M 270 on tulostustila 250 x 250 x 215 mm³. Tämä tulostustila voi tosin riittää esimerkiksi pienten teräslitosten tulostamiseen. (Strauss, 2012. s. 60)

Kiinalaisessa yliopistossa North Western Polytechnical University (NPU) on tulostettu 3 metriä pitkä titaanipalkki. Tähän käytettiin Laser Additive Manufacturing (LAM) -tulostinta, jonka toimintaperiaate on pitkälti sama kuin DMLS-tulostimilla. Tämä palkki on tosin tarkoitettu asennettavaksi lentokoneeseen. Se kuitenkin osoittaa, että suuria metallipalkkeja voi tuottaa kiinnostavilla 3D-tulostimilla. (Park, 2013.)

4.4 Stereolitografia (SLA)

Stereolitografia (engl. stereolithography) on kiinnittävä 3D-tulostusteknologia. Stereolitografiassa käytetään kerrospaksuutena yleensä 25–100 µm. SLA kykenee myös tätä pienempiin kerrospaksuuksiin, kuten esimerkiksi 10 µm, joten tällä teknologialla voi tulostaa hyvin yksityiskohtaisia esineitä (Buswell, et al. 2007). SLA-tulostimissa on allas, joka sisältää nestemäistä polymeeriä. Tämä polymeeri muuttuu kiinteäksi, kun siihen osuu laser. Altaassa on alusta, joka on tulostamisen alkuvaiheessa niin korkealla, että sen yllä on vain pieni kerros nestemäistä polymeeriä. Lasersäde kulkee sille määrätyn reitin ja tekee tulostettavan esineen ensimmäisen kerroksen. Alusta siirtyy hieman alaspäin ja kovettuneen polymeerin päälle tulee uusi kerros nestemäistä polymeeriä. Tämä prosessi toistaa itseään, kunnes kappale on valmis. (Melchels, et al. 2010)

SLA-tulostimella tulostetut esineet voivat olla mitoiltaan melko suuriakin. Esimerkiksi Materialise-yhtiö omistaa SLA-printtereitä, joiden tulostustila on 2100 x 600 x 780 mm³ (Lim, et al. 2012, s. 2). SLA:n soveltamista rakentamiseen rajoittaa erityisesti se, että SLA kykenee tulostamaan vain muovisia kappaleita. (Melchels, et al. 2010) Korkean tarkkuuden ja melko suuren tulostustilan ansiosta SLA-tulostimet soveltuvat hyvin arkkitehtonisten pienoismallien tulostamiseen (Buswell, et al. 2007).



Kuva 5. Periaatekuva stereolitografiatulostimesta. Tässä esimerkissä laser tulee yläpuolelta ja alusta liikkuu alaspäin. (Melchels, et al. 2010. s. 3)

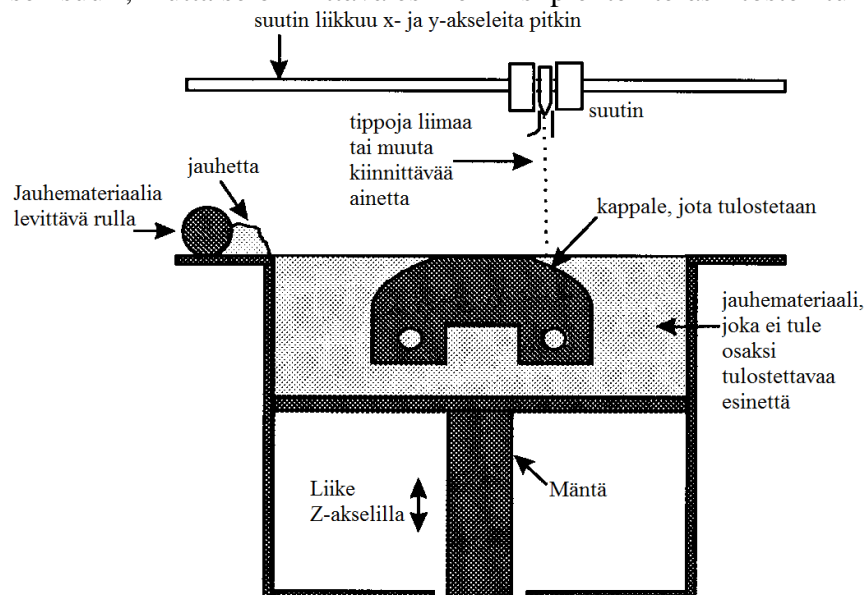
4.5 3D Printing (3DP)

3DP on kiinnittävä 3D-tulostusmenetelmä, jossa suuttimesta tulee liimaa tai muuta ainetta, joka kiinnittää jauhealtaassa olevia materiaalihiukkasia toisiinsa. 3DP-tulostimet voivat käyttää lähestulkoon mitä tahansa jauhemaista materiaalia, kuten esimerkiksi muovi, metalli, savi, lasi tai peräti luu tai sahanpuru. Metallia printattaessa kappaletta pitää kuumentaa, jotta partikkelit sintraantuvat kiinni toisiinsa. Eräs haittapuoli 3DP-tulostimissa on tulostetun esineen pinnan rosoisuus. Toisaalta, 3DP-printterit voivat tulostaa monivärisiä esineitä käyttämällä väriainetippoja liimaavan aineen kanssa. (Lipson & Kurman, 2013 s. 76–77)

3DP-tulostimella tuotetuilla metallikappaleilla on saavutettu peräti 406-765 MPa:n vetolujuus. Tämän vetolujuuden omaavia esineitä tosin tehdään laitteella, jonka tekemien esineiden maksimikoko on 20 x 20 x 15 cm³, mikä rajoittaa tämän soveltamisesta rakentamiseen. (Dimitrov, D. 2006. s. 11) Toisella metallia tulostavalla 3DP-tulostimella, M-Flexillä, on 40 x 25 x 25 cm³ tulostustila. (RP+m:n verkkosivu).

Toisaalta, suuremmissa 3DP-printtereissä tulostettavien esineiden maksimikoko on tätä huomattavasti suurempi. S15-laite kykenee peräti 150 x 75 x 75 cm³:n kokoisten esineiden tulostamiseen. Tämä laite on tosin tarkoitettu valuhiekalla tulostamiseen. 3DP-tulostimet tuskin tulevat tulevaisuudessakaan riittämään useiden metrien kokoisten esineiden tulostamiseen, sillä tämä vaatisi hyvin suuren materiaaliastian. (Dimitrov, D. 2006. s. 11)

Arkkitehtonisten pienoismallien tuottaminen on mahdollinen sovellus 3DP-tulostimille. Tätä sovellusta edesauttaa etenkin 3DP:n kyky tuottaa monivärisiä esineitä. Myös teräksisten rakenneosien tekeminen 3DP:llä on mahdollista. 3DP:n mahdollistama tulostustila ei ole erityisen suuri, mutta se on riittävä esimerkiksi pienten teräslitosten tulostamiseen.

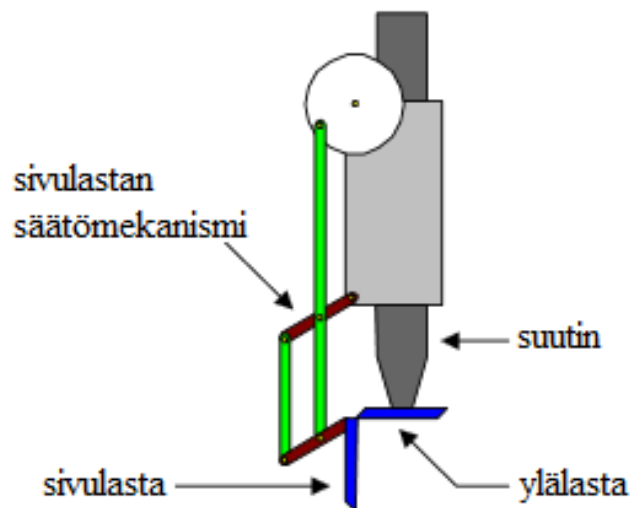


Kuva 6. Periaatekuva 3DP-tulostamisesta.
(Moon, J. et al, 2001. s. 2)

4.6 Contour Crafting (CC)

CC on valmiiden rakenneosien rakentamista varten kehitetty kerrostava 3D tulostusmenetelmä. CC-tulostimien nykyinen tulostustila on kooltaan kuutio, jonka sivu on 6 metriä pitkä. Tätä tulostilaa voidaan helposti suurentaa, sillä se riippuu vain siitä, kuinka pitkälle suutin ulottuu liikkumaan. (Strauss, 2012, s. 55) Materiaalina CC käyttää betonin kaltaista ainetta, jota tulostin pursuttaa suuttimesta ulos. Tämä materiaali koostuu seuraavista aineista: portlandsementti, hiekka, vesi ja pehmentävä lisäaine. Sen puristuslujuus kovettuneena on keskimäärin 18,9 MPa. Tämä arvo on kolmen testikappaleen mitattujen puristuslujuuksien keskiarvo. Vaikka tämä materiaali ei ole aivan tavallista betonia, sitä kutsutaan tässä alaluvussa betoniksi. (Hwang, et al. 2005)

Suuttimessa on kiinni kaksi lastaa. Toinen niistä on sivulasta, joka tasoittaa betonia sivulta. Ylälasta tasoittaa betonikerrosta yläpuolelta. Muun muassa lastojen ansiosta CC kykenee käyttämään suuriakin kerrospaksuuksia. Suuri kerrospaksuus on hyödyksi, sillä se nopeuttaa tulostusprosessia. Tämä on rakentamissovelluksissa erityisesti hyödyksi, sillä tulostetut esineet ovat usein suuria. Kerroksen paksuutta rajoittaa sivulastan korkeus. Suurilla kerrospaksuuksilla betonin pinta saisi kupruilevan muodon, jos sivulasta ei tasoittaisi sitä. Ylälasta luo kerrokselle tasaisen yläpinnan, mikä parantaa seuraavan kerroksen kykyä tarttua alempaan kerrokseen. (Hwang, et al. 2005)



Kuva 7. Periaatekuva CC-tulostimen suuttimesta. (Hwang, et al. 2005, s. 3)

Contour Crafting tekee betoniseiniä printtaamalla betoniseinälle ensin muotin. Suutin liikkuu suunnitellun muotin ulkoreunoja pitkin ja tekee muotin betonista kerros kerrokselta. Kun CC-tulostin on tulostamassa muottia, siihen tulee manuaalisesti lisätä tähän tarkoitukseen suunniteltuja teräksisiä muottisiteitä 30,48 cm välein vaakasuunnassa ja 12,7 cm välein pystysuunnassa. (Khoshnevis, et al. 2006) Jos seinään halutaan ikkuna tai oviaukko, täytyy tulostuksen aikana laittaa paikoilleen päällyslauta, jonka päälle betonia voidaan pursuttaa. (Lim, et al. 2012. s. 5)

Kun muotti on valmis ja tarpeeksi hyvin kovettunut, sen sisälle valetaan betonia. Betoni pitää valaa 13 cm korkea kerros kerrallaan. Tämän kerroksen annetaan kovettua yhden tunnin ajan, minkä jälkeen seuraava kerros betonia voidaan kaataa edellisen päälle. Betonikerrosten valamisen välinen aika voi betonin kovettumisnopeudesta riippuen olla myös enemmän tai vähemmän kuin 60 minuuttia. Odottamisen tarkoitus on, että betonin aiheuttama paine ei riko eikä taivuta muottia. Hitaasta valamisnopeudesta huolimatta tällä keinolla on mahdollista pystyttää 3 metriä korkea betoniseinä yhdessä päivässä. (Khoshnevis, et al. 2006. s. 7–8)

Tulevaisuudessa on tarkoitus, että CC-tulostin myös printtaisi automaattisesti muotin sisälle tulevan betonin samalla kun se tulostaa muottia. Tätä ei ole vielä toteutettu. (Khoshnevis, et al. 2006. s. 9)

Toisin kuin perinteisessä betonin valamisessa, CC:n tekemissä betoniseinissä muottia ei poisteta vaan se jää osaksi rakennetta. Kun muottia tulostetaan, uudet kerrokset aloitetaan eri kohdista, jotta muottiin ei syntyisi heikkoa kohtaa. Kerrosten tulostamisen aloittaminen samasta kohdasta joka kerroksessa edesauttaisi halkeamien leviämistä. (Khoshnevis, et al. 2006. s. 16–17)



Kuva 8. CC-tulostimen tekemä betonimuotti, johon ollaan parhaillaan valamassa betonia. Huomaa suuri kerroskorkeus muotissa. (Hwang, et al. 2005, s. 5)

Edellä selostettu betoniseinän valmistusmenetelmä ei ole ainoa tapa, jolla CC-tulostin voi valmistaa betoniseiniä. CC-tulostin voi myös printata kaksi toisistaan vakioetäisyydellä olevaa kapeaa betoniseiniä ja niiden väliin CC-tulostin printtaa betonirakenteen, jonka muoto on kolmiomainen, niin sanottu siksak-kuvio. Tämä yhdistää seinän molemmat puolet yhtenäiseksi rakenteeksi. Tällainen seinä koostuu kokonaan CC-tulostimen printtaamasta betonista, jonka puristuslujuus on vain noin 18,9 MPa ja huomattava osa tämän seinän poikkileikkauksen pinta-alasta on ilmaa. Nämä tekijät rajoittavat tällä tavalla valmistetun seinän käyttöä kohteissa, joihin vaikuttaa suuret kuormat. Tämän menetelmän etuja ovat muun muassa seinän valmistamisen nopeus ja edullisuus. (Zhang 2013)

Tulevaisuudessa on tarkoitus, että CC-tulostimen suutin kiinnitetään kiskoilla kulkevaan pukkinosturiin työmaalla. Pukkinosturiin voisi suuttimen lisäksi asentaa osan, joka poimii ja asentaa tukipalkkeja rakenteeseen. Tällöin talo voitaisiin rakentaa kyseisen pukkinosturin alle yhdellä printtausoperaatiolla. Tätä menetelmää käyttäen CC:n avulla voitaisiin saavuttaa monia etuja, kuten monien eri materiaalien käyttäminen, aukkojen tekeminen seiniin, raudoitusten automatisoitu asentaminen seiniin, automatisoitu laatoittaminen, automatisoitu putkien ja sähköjohtojen asentaminen ja seinien automatisoitu maalaaminen. Tämä on kuvaus siitä, mihin CC-tekniikalla pyritään. Tätä ei ole vielä saavutettu. (Khoshnevis, 2004. s. 3–6)

CC-tulostimen kehittänyt Behrokh Khoshnevis väittää, että ennustusten mukaan Contour Crafting voi vähentää rakentamisen kustannuksia peräti noin 80 prosentilla. Lisäksi hän väittää, että CC-tulostimella voi tehdä 185,8 m² talon vuorokauden sisällä. Tätä ei ole tosin vielä saavutettu. (Khoshnevis, 2014.)

4.7 D-Shape

D-Shape on myös erityisesti rakentamista varten tarkoitettu kiinnittävä 3D-printtausteknologia. Toisin kuin CC:llä, D-Shapella on tarkoitus tuottaa rakenneosia laboratorio-oloissa eli työmaan ulkopuolella. Ei kuitenkaan ole mitään erityistä syytä, miksi sitä ei voisi käyttää myös työmaalla. D-Shapen tulostama kerrospaksuus on noin 4–6 millimetriä. D-Shape tulostaa käyttäen seuraavanlaista menetelmää. Ensin tulostusalustalle levitetään tasainen kerros hiekkaa suuttimen avulla. Tämän jälkeen hiekan päälle suihkutetaan sopiviin paikkoihin klooriin perustuvaa nestettä, joka kiinnittää hiekanjyviä toisiinsa. Tätä prosessia toistetaan, kunnes tulostettava kappale on valmis. Nestesuuttimia on useita, maksimissaan peräti kolmesataa. Ne ovat toisistaan 20 mm etäisyydellä. (Lim, et al. 2012. s. 3–6)

D-Shape pursuttaa suuttimesta enemmän hiekkaa kuin varsinaiseen tulostettavaan kappaleeseen tarvitaan. Ylimääräinen hiekka toimii tulostuksen aikana tukirakenteena ja se poistetaan tulostuksen päätyttyä. Ylimääräisen hiekan ansiosta D-Shape pystyy tulostamaan esineitä joissa on niin sanottuja siltoja, eli kohtia joiden alla on ilmaa. Hiekka tukee tällaisia rakenteita tulostusvaiheessa ja kun rakenne on kovettunut, se pysyy kasassa ilman tukea. Ylimääräinen hiekka ei mene hukkaan, vaan se voidaan käyttää uudestaan toisen esineen tulostamisessa. (Lim, et al. 2012 s. 3–6)

D-Shapen nykyinen tulostustila on kooltaan 6 x 6 x 6 m³. Tätä voidaan periaatteessa laajentaa minkä kokoiseksi tahansa. Tähän mennessä D-Shapella on tehty vain rakenneosien esimerkkikappaleita ja veistoksia. D-shapella tulostetut esineet vaativat tulostamisen loputtua manuaalista työtä. Ylimääräinen materiaali pitää poistaa ja tulostetun kappaleen pinta tulee tasoittaa. D-Shapen tuottamien kappaleiden materiaaliominaisuuksista ei ole vielä tarkkaa tietoa saatavissa. (Strauss, 2012, s. 57–58)



Kuva 9. D-Shapella tulostettu ”Radiolaria”-veistos. Sen korkeus on noin 3 metriä, mikä osoittaa, että D-Shape kykenee tulostamaan suuressa mittakaavassa. (D-Shapen verkkosivu)

4.8 Concrete printing (CP)

Concrete Printing (CP) on rakentamista varten kehitetty kerrostava 3D-tulostusmenetelmä. CP-tulostin käyttää yhtä suutinta kerrallaan. CP:n tulostusresoluutio on 4–6 millimetriä. CP-tulostimen suutin ei käytä lastaa, joten sillä tulostettu kappale saa kupruilevan pinnan, ellei sitä manuaalisesti tasoiteta ennen sen kovettumista tai hiota tasaiseksi tulostuksen jälkeen. (Lim, et al. 2012. s. 5) CP-tulostinprototyyppi on kooltaan 5,4 x 4,4 x 5,4 m³. Nämä mitat kertovat koko tulostimen koon, joten itse tulostustila on sitä jonkin verran pienempi. (Le, et al. 2012. s. 2)

CP:n käyttämä materiaali on betonia, jolla hiekan ja sidosaineen suhde on 3:2. Sidosaineen koostumus on 70 % sementtiä, 20 % lentotuhkaa ja 10 % piioksidia eli silikaa. Lisäksi se sisältää 1,2 kg/m³ polypropeenikuituja. Tämä betoni on saavuttanut puristuskokeessa peräti 110 MPa:n puristuslujuuden. (Le, et al. 2012. s. 11) Tulostusprosessin takia betonikerrokseen syntyy ilmakehkeitä, jotka laskevat CP:llä tulostetun betonin puristuslujuutta. Puristuslujuuden arvo on kuitenkin yli 80 MPa tulostamisen jälkeen, joten tämä ei ole suuri ongelma. (Lim, et al. 2011. s. 3)

CP-tulostimella voi tehdä ulkonevia osia, kuten oviaukkojen ja ikkuna-aukkojen yläpuolella olevia betoniosia. Tätä varten CP-tulostin käyttää väliaikaisia tukirakenteita, jotka tulostetaan käyttämällä toista suutinta. Nämä tukirakenteet tehdään eri materiaalista kuin varsinainen rakenne. Tukirakenteet poistetaan manuaalisesti tulostuksen loputtua. (Lim, et al. 2012. s. 5) Kun CP-tulostin määrittelee G-koodia tulostusta varten, se käyttää ohjelmistoa, joka optimoi suuttimen kulkeman reitin niin, että se sisältää mahdollisimman vähän sellaista liikettä, jonka aikana suuttimesta ei tule ulos betonia. Tämä ohjelmisto kehitettiin varta vasten CP:tä varten. Tulostettavan kohteen monimutkaisuudesta riippuen tällä optimoinnilla voidaan saavuttaa jopa 30 % lyhyempi tulostusaika. (Lim, et al. 2012.s. 6–7)



Kuva 10. Tämä on osa CP-tulostimella tehdystä betonipenkistä.
Teräskappaleet lisättiin manuaalisesti tulostuksen jälkeen.

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

3D-tulostuksen mahdollisia sovelluksia rakennustekniikassa ovat esimerkiksi arkkitehtonisten pienoismallien tulostaminen, erillisten rakenneosien printtaaminen (tehtaalla tai työmaalla) ja kokonaisten talojen tulostaminen työmaalla.

3D-tulostamista käytetään jo nykypäivänä arkkitehtonisten pienoismallien printtaamiseen. Esimerkkinä tästä on suomalainen arkkitehtitoimisto J10, joka omistaa Leapfrog-merkkisen 3D-tulostimen. Kyseessä on Fused Filament Fabrication -tyyppinen 3D-tulostin, joka tulostaa esineitä työntämällä sulaa kestopuovia lämpimän suuttimen läpi. 3D-tulostimien myynnin kasvun perusteella voidaan odottaa, että 3D-tulostamisen käyttö arkkitehtonisten pienoismallien tuottamisessa tulee yleistymään jo lähitulevaisuudessa. (J10:n verkkosivu), (Van Noort, 2012. s. 7)

Erillisten rakenneosien printtaamiseen 3D-tulostusta on käytetty nykypäivänä erittäin vähän. Esimerkkinä 3D-printtauksen käytöstä rakenneosan tulostamiseen voidaan käyttää tämän kandidaatintyön luvussa 3.4 mainittua teräsrakenteen liitoskohdan päälle asennettavaa teräspalaa. Kuten luvussa 3 perusteltiin, 3D-tulostusta tuskin tullaan käyttämään standardikokoisten rakenneosien kuten teräspalkkien valmistamiseen, sillä perinteiset menetelmät ovat siihen tarkoitukseen taloudellisesti kannattavampia. Toisaalta, tiettyihin tarkoituksiin tuotettuja erikoisosia on kallista tuottaa perinteisin menetelmin, joten tähän tarkoitukseen 3D-tulostaminen on sopiva. (Lim, et al. 2012. s. 2–3)

Ensimmäisen 3D-tulostetun rakennuksen rakentaminen aloitettiin jo vuonna 2014 (Robertson, 2014). Tästä huolimatta on hyvin epätodennäköistä että 3D-tulostaminen tulee yleistymään tähän tarkoitukseen lähivuosina. Tulevaisuudessa Contour Crafting -menetelmällä voidaan mahdollisesti tulostaa työmaalla monesta materiaalista koostuvia taloja, jotka sisältävät kanavia putkia, sähköjohtoja ja ilmanvaihtokanavia varten. 3D-tulostusteollisuusanalyytikon Terry Wohlersin mukaan tämän teknologian käyttö ei ole käytännöllistä vielä pitkään aikaan. Vuonna 2013 hän arvioi, että kyseinen teknologia voitaisiin ehkä ottaa käyttöön vasta 30 vuoden kuluttua. (Ludwig & Harvey. 2013.)

3D-tulostus ei siis tule yleistymään talonrakentamisessa vielä. On kuitenkin hyviä syitä uskoa, että se tulee yleistymään tulevaisuudessa. Contour Crafting, D-Shape ja Concrete Printing ovat osoittaneet kykenevänsä suurien rakenteiden tulostamiseen ja ovat sopivia rakentamiseen. (Lim, et al. 2012. s. 3) Betonirakenteiden tuottaminen CC-tulostimella on nykymenetelmiä halvempaa, johtuen seuraavista tekijöistä:

- pienempi työvoimatarve
- vähentynyt materiaalihukka
- lyhyempi rakentamiseen kuluva aika.

(Khoshnevis, 2014. Powerpoint-esitys, kalvo 14)

Suurikokoiset rakenneosat, kuten betonielementit, ovat painavia, mikä tekee niiden kuljettamisesta haasteellista. Tämä puoltaa rakenteiden tulostamista työmaalla. Työmaalla tulostamisessa on ainakin kaksi vaihtoehtoa. Yksi näistä vaihtoehtoista on rakennuksen tulostaminen yhtenä kokonaisuutena siihen kohtaan, johon se halutaan rakentaa, kuten Contour Crafting-menetelmällä on tarkoitus. Toinen vaihtoehto olisi elementtien tulostaminen työmaalla, minkä jälkeen ne nostettaisiin paikoilleen. Toisaalta, betonielementtejä voitaisiin tulostaa tehtaissa, joista ne vietäisiin työmaille. Tällöin betoni ei joutuisi kovettuessaan sään armoille. Rakennuslalla ollaan yhä enemmän siirtymässä tuottamaan rakenneosia työmaan ulkopuolella, mikä parantaa laatua, tuotantonopeutta, terveellisyttä ja turvallisuutta. Näistä syistä 3D-betonitulostimien käyttö työmaan ulkopuolella on työmaakäytön lisäksi myös vartenotettava vaihtoehto. 3D-tulostamista tullaan siis luultavasti käyttämään sekä työmaalla, että elementti-tehtaissa. (Lim, et al. 2012)

Lähteet

Agarwala, M. & Bourell, D. & Beaman, J. & Marcus, H. & Barlow, J. 1995. Direct selective laser sintering of metals. *Rapid Prototyping Journal*. [Verkkolehti] Vol. 1:1 s. 26–36. [Viitattu: 3.3.2014] DOI 10.1108/13552549510078113. ISSN 1355-2546.

Burns, M. 1993. *Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing*. USA: Prentice Hall. 369 s. ISBN-10 0131194623. ISBN-13 978-0131194625. Viitattu osa saatavissa: <http://www.ennex.com/~fabbers/StL.asp>

Buswell, R.A. & Soar, R.C. & Gibb, A.G.F. & Thorpe, A. 2007. Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. *Automation in Construction*. [Verkkolehti] Vol. 16:2. s. 224–231. [Viitattu 3.3.2014] DOI 10.1016/j.autcon.2006.05.002. ISSN 0926-5805.

D-Shapen virallinen verkkosivu. <http://www.d-shape.com/> [Viitattu 5.5.2014]

Das, M. & Balla, V.K. & Kumar, T.S.S & Manna, I. 2013. Fabrication of Biomedical Implants using Laser Engineered Net Shaping (LENS™). *Transactions of the Indian Ceramic Society*. [Verkköjulkaisu] Vol: 72:3. s. 169–174. [Viitattu 7.3.2014] DOI 10.1080/0371750X.2013.851619. ISSN 0371-750X.

Dimitrov, D. & Schreve, K. & De Beer, N. 2006. Advances in Three Dimensional Printing – state of the art and future perspectives. *Journal for New Generation Sciences*. [Verkkolehti] Vol. 4:1. s. 21–49. [Viitattu 10.3.2014] DOI 10.1108/13552540610670717. ISSN 1684-4998.

Griffith, M.L. & Keicher, D.M. & Atwood, C.L. & Romero, J.A. & Smugeresky, J.E. & Harwell, L.D. & Greene, D.L. 1996. Free form fabrication of metallic components using laser engineered net shaping (LENS). *Solid Freeform Fabrication Proceedings*. [Verkköjulkaisu] Vol. 7. s. 125–132. [Viitattu 3.4.2014] ISSN 1053-2153.

Grozdanic, L. 2013. British Architect Designs First 3D Printed Element for Use in the Construction Industry. [Verkkosivu] <http://inhabitat.com/british-architect-designs-first-3d-printed-element-for-use-in-the-construction-industry/> [Viitattu 21.3.2014]

Hwang, D. & Khoshnevis, B. 2005. An Innovative Construction Process – Contour Crafting (CC). 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction. [Verkköjulkaisu], [Viitattu 3.3.2014] Saatavissa: http://www.iaarc.org/publications/proceedings_of_the_22nd_isarc/an_innovative_construction_processcontour_crafting_cc.html

IAAC Blog. MAA in Italy – workshop in D-Shape lab with Enrico Dini. 2013. [Viitattu 10.4.2014] Saatavissa: <http://www.iaacblog.com/blog/2013/maa-in-italy-%E2%80%93-visit-to-d-shape-lab-with-enrico-dini/>

J10-arkkitehtitoimiston verkkosivu. Algoritminen arkkitehtuuri. 3D-tulostustestejä. <http://www.j10.fi/services2.html> [Viitattu 3.4.2014]

- Khaing, M.W. & Fuh, J.Y.H. & Lu, L. 2001. Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterization of EOS parts. *Journal of Materials Processing Technology*. [Verkkolehti] Vol: 113:1–3. s. 269–272. [Viitattu 28.3.2014] DOI 10.1016/S0924-0136(01)00584-2. ISSN 0924-0136.
- Khoshnevis, B. 2004. Automated Construction by Contour Crafting – Related Robotics and Information Technologies. *Automation in Construction* [Verkkolehti] Vol. 13:1. s. 5–19. [Viitattu 4.4.2014] DOI 10.1016/j.autcon.2003.08.012. ISSN 0926-5805.
- Khoshnevis, B. 2014. Commercial applications. [Verkkosivu] <http://www.contourcrafting.org/commercial-applications/> [Viitattu 24.3.2014] Contour Crafting -teknologian virallinen verkkosivu
- Khoshnevis, B. 2014. Powerpoint slides. Construction application. [Powerpoint-esitys] <http://www.contourcrafting.org/powerpoint-slides/> http://contourcrafting.org/wp-content/uploads/2013/04/Construction_Application1.ppt [Viitattu 3.4.2014]
- Khoshnevis, B. & Hwang, D. & Yao, K.T. & Yeh, Z. 2006. Mega-scale fabrication by contour crafting. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*. [Verkkolehti] Vol. 1:3. s. 301–320. [Viitattu 27.2.2014]. DOI 10.1504/IJISE.2006.009791. ISSN 1748-5037.
- Le, T.T. & Austin, S.A. & Lim, S. & Buswell, R.A. & Gibb, A.G.F. & Thorpe, T. 2012. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*. [Verkkolehti] Vol: 45:8. s. 1221–1232. [Viitattu 25.3.2014] DOI 10.1617/s11527-012-9828-z. ISSN 1359-5997.
- Lim, S. & Buswell, R. A. & Le, T.T. & Wackrow, R. & Austin, S. & Gibb, A. & Thorpe, T. 2011. Development of a viable concrete printing process. *Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, (ISARC2011)*. [Verkköjulkaisu] s. 665–670. [Viitattu 9.4.2014] Saatavissa: <https://dspace.lboro.ac.uk/dspacejspui/bitstream/2134/9331/5/Wackrow%20concrete.pdf>
- Lim, S. & Buswell, R. A. & Le, T.T. & Austin, S. A. & Gibb, G. F. & Thorpe, T. 2012. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*. [Verkkolehti] Vol. 21:1 s. 262–268 [Viitattu 28.2.2014] DOI 10.1016/j.autcon.2011.06.010. ISSN 0926-5805.
- Lipson, H. & Kurman, M. 2013. *Fabricated: The New World of 3D Printing*. USA: John Wiley & Sons. 280 s. ISBN-10 1118350634. ISBN-13 978.1118350638
- Ludwig, A. & Harvey, S.E. 2013. 3D Printing Affects Every Industry, Even Homebuilding. [Verkkosivu] <http://teconomy.com/2013/07/3d-printing-affects-every-industry-even-homebuilding/> [Viitattu 1.4.2014]
- Melchels, F.P.W. & Feijen, J. & Grijpma, D.W. 2010. A review of stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*. [Verkkolehti] Vol. 31:24. s. 6121–6130. [Viitattu 3.3.2014] DOI 10.1016/j.biomaterials.2010.04.050. ISSN 0142-9612.

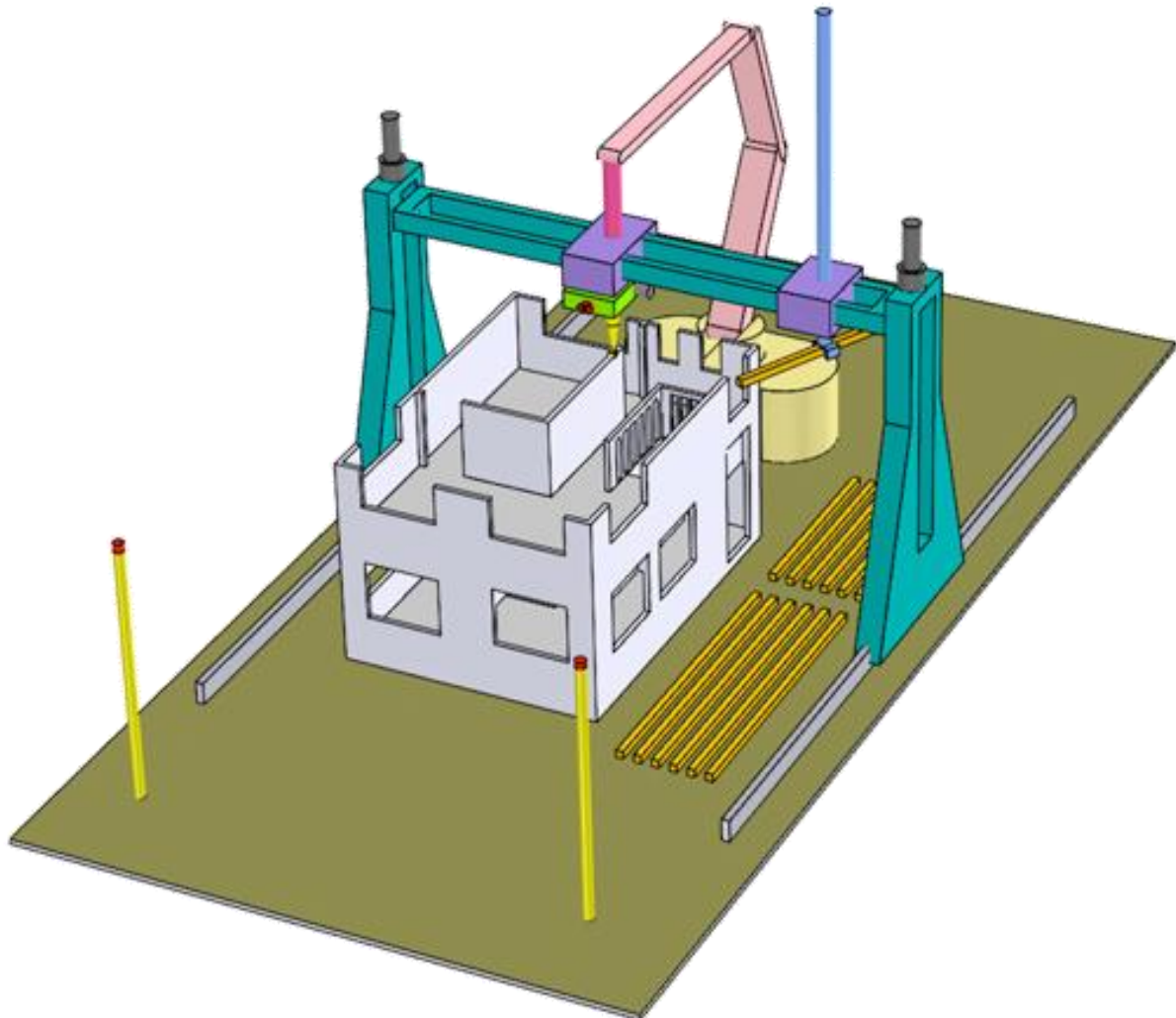
- Mellon, S. & Hao, L. & Zhang, D. 2013. Additive manufacturing: A framework for implementation. *International Journal of Production Economics*. [Verkkolehti] Vol. 149:1. s. 194–201. [Viitattu 14.3.2014] DOI 10.1016/j.ijpe.2013.07.008. ISSN 09255273.
- Moon, J. & Caballero, A.C. & Hozer, L. & Chiang, Y-M. & Cima, M.J. 2001. Fabrication of functionally graded reaction infiltrated SiC-Si composite by three-dimensional printing (3DP™) process. *Materials Science and Engineering*. [Verkkolehti] Vol 298:1–2. s. 110–119. [Viitattu 10.3.2014] DOI 10.1016/S0921-5093(00)01282-X. ISSN 0921-5093.
- Park, R. 2013. Going Large on 3D Printed Aerospace Parts. [Verkkosivu] <http://3dprintingindustry.com/2013/01/24/going-large-on-3d-printed-aerospace-parts/> [Viitattu 10.4.2014]
- Ponsford, M. 2014. The night I invented 3D printing. [Verkkosivu] <http://edition.cnn.com/2014/02/13/tech/innovation/the-night-i-invented-3d-printing-chuck-hall/> [Viitattu 25.3.2014]
- Robertson, A. 2014. A 3D-printed house is being built right now in Amsterdam. [Verkkosivu] <http://www.theverge.com/2014/3/29/5561736/a-3d-printed-house-is-being-built-right-now-in-amsterdam> [Viitattu 3.4.2014]
- Rosato, Dominick V. & Rosato, Donald V. & Rosato, M.G. 2000. *Injection Molding Handbook*. USA: Kluwer Academic Publishers. 68 s. ISBN-10 1461370779. ISBN-13 978-1461370772.
- Rp+m -yhtiön verkkosivu. <http://www.rplusplus.com/3dp--binder-jetting.html>
<http://www.rplusplus.com/documents/3DP/machine/M-Flex.pdf> [Viitattu 3.4.2014]
- Smithells, C.J. & Gale, W.F. & Totemeier, T.C. 2004. *Smithells metals reference book*. UK: Butterworth-Heinemann. 2080 s. ISBN-10 0750675098. ISBN-13 978-0750675093.
- Smugeresky, J.E. & Keicher, D.M. & Romero, J.A. & Griffith, M.L. & Harwell, L.D. 1997. Using the Laser Engineered Net Shaping (LENS™) Process to Produce Complex Components from a CAD Solid Model. *Photonics West '97. International Society for Optics and Photonics*. [Verkkajulkaisu] Vol. 2993. s. 91–97. [Viitattu: 6.3.2014] DOI 10.1117/12.270018. ISSN 0277-786X.
- Strauss, H. 2012. *AM Envelope: The Potential of Additive Manufacturing for Façade Construction*. USA: CreateSpace Independent Publishing Platform. 270 s. ISBN-10 1481214330. ISBN-13 978-1481214339.
- Tang, Y. & Loh, H.T. & Wong, Y.S. & Fuh, J.Y.H. & Lu, L. & Wang, X. 2003. Direct laser sintering of a copper-based alloy for creating three-dimensional metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*. [Verkkolehti] Vol. 140:1–3. s. 368–372. [Viitattu 10.3.2014] DOI 10.1016/S0924-0136(03)00766-0. ISSN 0924-0136.
- Van Noort, R. 2012 The future of dental devices is digital. *Dental Materials*. [Verkkolehti] Vol. 28:1. s. 3–12. [Viitattu 3.4.2014] DOI 10.1016/j.dental.2011.10.014. ISSN 01095641.

Wohlers, T. 2001. Executive summary. Wohlers report. Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. [Verkkajulkaisu], [Viitattu 1.4.2014]
<http://www.wohlersassociates.com/2001-Executive-Summary.pdf>

Zamiska, P. & Cole, J. & Lu, H. & Weise, W. 2013. Literature review 3D printer. Southern Illinois University. [Viitattu 24.3.2014]

Zhang, J. & Khoshnevis, B. 2013. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting. *Automation in Construction*. [Verkkolehti] Vol. 29:1 s. 50–67. [Viitattu 4.3.2014] DOI 10.1016/j.autcon.2012.08.006. ISSN 0926-5805.

Liite 1. Contour Crafting -rakentamismenetelmä



(Khoshnevis, 2014. Powerpoint-esitys, kalvo 24)

Liite 2. D-Shape-tulostin



(IAAC Blog, 2013)

Liite 3. Concrete Printing -tulostin.



(Le, et al. 2012. s. 3)