

VAASAN YLIOPISTO
TEKNILLINEN TIEDEKUNTA
TUOTANTOTALOUS

Jukka Lakkonen

3D-TULOSTAMINEN

Tuotantotalouden
Pro Gradu -tutkielma

VAASA 2015

SISÄLLYSLUETTELO	sivu
LYHENTEET	3
KUVAT	4
1. JOHDANTO	7
2. 3D-TULOSTAMINEN	9
2.1. Tulostamisen historia	9
2.2. Gutenbergin painokone	9
2.3. Mustesuihkutulostin	10
2.4. 3D-tulostamisen historia	11
3. 3D-TULOSTIMEN TOIMINTA	14
3.1. 3D-malli	14
3.2. 3D-tulostimet	15
3.2.1. Kasaavat tulostimet	16
3.2.2. Sitovat tulostimet	19
4. 3D-TULOSTAMISEN VAIKUTUS TUOTANTOKETJUUN	22
4.1. Tuotantoketjun määritelmä	22
4.2. 3D-tulostamisen vaikutus tuotantoketjuun	23
5. 3D-TULOSTUKSEN VAIKUTUKSET TEOLLISUUTEEN JA TUOTANTOON	24
5.1. Ympäristövaikutukset	24
5.2. Taide	25
5.3. Koulutus	25
5.4. Riippumattomat tukikohdat	26
5.5. Massatuotanto	26
5.6. Lääketiede	27
5.7. Koti	28
5.8. Kehitysmaat	28
5.9. Vaikutukset maailmantalouteen	28
5.10. Immateriaalioikeudet	29
6. 3D-MASSIIVITULOSTUS TÄNÄPÄIVÄNÄ	30
7. D-SHAPE TULOSTUS	34
7.1 Teknologia	34
7.2 Nykytila ja tulevaisuuden näkymät	37
7.3 Käyttökohteet	38
8. CONTOUR CRAFTING	40
8.1 Teknologia	40
8.2 Nykytila ja tulevaisuuden näkymät	43
8.3 Käyttökohteet	44

9. JOHTOPÄÄTÖKSET	46
10. YHTEENVETO	49
LÄHDELUETTELO	50

LYHENTEET

CAD Computer-Aided Design

CC Contour Crafting

FDM fused deposition modelling

LENS laser engineered net shaping

LOM laminated object manufacturing

PP polyjet printing

SDP selective deposition printers

SL stereolitographia

STL stereolitographia tulostusformaatti

SLS selective laser sintering

3DP three dimensional printing

KUVAT

Kuva 1. Fused Deposition Modeling (Thre3D).....	16
Kuva 2. Polyjet Printing (Thre3D)	17
Kuva 3. Laset Engineered Net Shaping (Thre3D).....	18
Kuva 4. Laminated Object Manufacturing (Thre3D)	18
Kuva 5. Stereolitography (Thre3D)	19
Kuva 6. Selective Laser Sintering (Thre3D)	20
Kuva 7. Three Dimensional Printing (Thre3D).....	21
Kuva 8. Maaailman suurin 3D-tulostin (www.3ders.com 2014a)	31
Kuva 9. Suuttimet (The Huffington Post 2013)	35
Kuva 10. Sidosaineen valuttaminen (www.3ders.org 2013).....	36
Kuva 11. Radiolaria taideteos ennen ja jälkeen hiomisen (D-Shape 2014b)	37
Kuva 12. Nosturiteline (Contour Crafting 2015b).....	40
Kuva 13. Suutin ja muurauslastat (Khoshnevis, B. & Bekey, G. 2015).....	41

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta**

Tekijä:	Jukka Lakkonen	
Tutkielman nimi:	3D-tulostaminen	
Ohjaajan nimi:	Anna-Maija Wörlin	
Tutkinto:	Kauppatieteiden maisteri	
Pääaine:	Tuotantotalous	
Opintojen aloitusvuosi:	2010	
Tutkielman valmistumisvuosi:	2015	Sivumäärä: 52

TIIVISTELMÄ:

Tässä tutkielmassa perehdyttiin 3D-tulostamisen kehitykseen ja sen tarjoamiin mahdollisuuksiin tulevaisuudessa. Tutkielmassa käsiteltiin myös 3D-tulostamisen mahdollisista vaikutuksista tuotantoketjuun ja tuotantoon. Tärkeimpänä tutkimuskohteena oli 3D-massiivitulostus ja sen varteenotettavat vaihtoehdot. Tutkimusongelmat ovat: mitä on 3D-tulostus, miten 3D-tulostus vaikuttaa toimitusketjuihin ja tuotantoon, sekä kuinka 3D-tulostamista voidaan tulevaisuudessa hyödyntää laajoissa rakennusprojekteissa.

Tutkielmassa käytettiin aineistona sähköisiä ja kirjallisia lähteitä. Johtuen tieteenalan uutuudesta ja valmistuneiden tutkimusten vähyydestä tutkimusten todenperäisyys varmistettiin lähdekritiikillä, sekä tutkimusten vertailulla. Lähteiden pohjalta löydettiin vastauksia tutkimusongelmiin ja kartoitettiin mahdollista tarvetta jatkotutkimukselle tulevaisuudessa.

Tutkielma jakautuu selviin osioihin. Ensin kuvattiin tulostimien kehitys pisteeseen jolloin ensimmäinen 3D-tulostin luotiin. Tämän jälkeen selitettiin 3D-tulostimen ja sen vaatimien ohjelmistojen toimintaa. Tekniikan selventämisen jälkeen paneuduttiin tuotantoketjun muuttumisen tarkasteluun. Tuotantoketjuista siirryttiin koko tuotannon tarkasteluun ja muutoksen aiheuttamien seurausten selvittämiseen. Tämän jälkeen, kun 3D-tulostamisen yleiset periaatteet oli selvitetty, keskityttiin tarkastelemaan 3D-tulostuksen käyttömahdollisuuksia laajoissa rakennusurakoissa. Lopuksi koottiin tehdyt johtopäätökset.

Avainsanat: 3D-tulostus, tuotantoketju, teollisuus, tuotanto, massiivitulostus

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology****Author:**

Jukka Lakkonen

Top of the Master's Thesis:

3D-printing

Instructor:

Anna-Maija Wörlin

Degree:Master of Science in Economics
and Business Administration**Major subject:**

Industrial management

Year of Entering the University:

2010

Year of Completing the Master's Thesis:

2015

Pages: 52

ABSTRACT:

In this study I focused in 3D printing progress and the opportunities it offers in the future. The thesis also discussed the potential impact of 3D printing in production chain and production. The main research subject was the large-scale 3D printing and its viable alternatives. The research questions were: What is 3D printing, how does 3D printing affect supply chains and production, as well as how 3D printing can be utilized in the future large-scale construction projects.

In this study both electronic and written sources were used. Due to the fact that the area of study is so new and there is not much completed research to be found the authenticity of those researches were ensured by comparing different researches with eachother.

The thesis is divided into clear sections. First section describes printer development to the point when the first 3D printer was created. After this, 3D printer and its required software operations were explained. After explaining the technology, the supply chain was explained and the changes in it focused. Subsequently, when the general principles of 3D-printing had been cleared, the research focused on the 3D printing in large-scale construction works. Finally the conclusions were drawn.

KEYWORDS: 3D-printing, supply chain, production, large-scale 3D printing

1. JOHDANTO

3D-tulostamiselle taikka kolmiulotteisella tulostamisella tarkoitetaan valmistusmenetelmää, missä valmistettavan kappaleen kolmiulotteinen tietokonemalli tulostetaan tarkoitukseen suunnitellulla laitteistolla valmiiksi kappaleeksi, joko kerralla taikka pienemmissä osissa.

Termi 3D-tulostaminen on saanut nimensä Massachusetts Institute of Technology:n tutkijoilta, jotka patentoivat kehittämänsä prosessin 3DP:ksi vuonna 1993. Nykypäivänä termiä käytetään kuvaamaan yleisesti kaikkia 3D-tulostamisen prosesseja ja menetelmiä. Läheisesti sidoksissa 3D-tulostamiseen on myös CAD, eli Computer-aided design, tietokoneavusteinen suunnittelu. CAD-ohjelman avulla suunnitellaan tietokoneella kolmiulotteinen malli, joka sitten sähköisesti siirretään tulostimella, mikä tämän jälkeen tulostaa kolmiulotteisen kappaleen. (Encyclopedia Britannica 2013).

Tutkimusten mukaan kaksi kolmesta tuotannonalanyrityksestä on jo tutkinut yrityksen mahdollisuutta käyttää tulevaisuudessa 3D-tulostusta. Vaikka tekniikka onkin tällä hetkellä vielä alkutekijöissä, kun puhutaan 3D-tulostamisesta suurten yritysten tuotannossa, on tutkimuksen mukaan joka neljäs yritys aikomassa ottaa tekniikkaa tulevaisuudessa osaksi tuotantoaan. Suurimmiksi esteiksi 3D-tulostuksen käyttöönotolle vastaajat ilmoittivat epävarmuuden tuotteiden laadusta, sekä osaavan työvoiman puutteen. (MHLnews 2014).

3D-tulostus on herättänyt myös kysymyksiä siitä, miten tuotantoketjujen tulisi sopeutua tällaiseen muutokseen ja onko realistista ajatella, että jo lähitulevaisuudessa toimitusketjut voisivat olla ainoastaan yksiosaisia, jolloin välistä jäisivät pois kokonaan esimerkiksi tuotanto, varastointi ja toimitus jotka nyt muodostavat toimitusketjujen oleellisimman osan.

Tämä tutkielma vastaa seuraaviin tutkimusongelmiin: mitä on 3D-tulostus, miten 3D-tulostus vaikuttaa toimitusketjuihin ja tuotantoon, sekä kuinka 3D-tulostamista voidaan tulevaisuudessa hyödyntää laajoissa rakennusprojekteissa. Näihin tutkimusongelmiin haetaan ratkaisu keräämällä kattava aineisto ja analysoimalla kerätty tieto. Tutkielma rakentuu siten, että ensin käydään läpi tulostamisen historiaa aina 2000-luvulle asti, jolloin ensimmäisiä käytännöllisiä 3D-tulostimia alkoi tulla markkinoille, tämän jälkeen selitetään 3D-tulostamisen toimintaperusteet, edellytykset ja rahoitukset, jonka jälkeen paneudutaan itse tutkimuskysymyksiin. Lopuksi annetaan käsitelyihin tutkimusongelmiin ratkaisu, jonka jälkeen saatu tieto kootaan lyhyeen tiivistelmään.

Tutkielman aihe on valittu aiheen ajankohtaisuuden, sekä mahdollisuuksien vuoksi. 3D-tulostaminen liittyy myös olennaisesti kirjoittajan omaan tietoon, mielenkiintoon ja koulutukseen.

2. 3D-TULOSTAMINEN

Vaikka tulostustekniikat ovatkin huomattavasti muuttuneet vuosisatojen aikana, ovat tulostamisen peruseriaatteet ja tarkoitus pysynyt samana. Tulostamalla on aina pyritty tuottamaan ennalta määrätty kuva, kuvio taikka teksti jollekin valinnaiselle pinnalle tai tasolle. Tärkeä ominaisuus tulostamisessa on sen toistettavuus. Oli kyse sitten alkuperäisistä painolevyistä, taikka nykypäivän 3D-tulostimista on sama tuotos pystytty aina toistamaan ja täten säästetty aikaa verrattaen kokonaan uuden tuotteen valmistamiseen.

2.1. Tulostamisen historia

Tulostamisen historia voidaan määrittää alkavaksi jo varhaisina Mesopotamian aikoina noin 3000 eaa. Tuolloin monistaminen tapahtui käyttäen leimasimia ja varsinaisten massatulostustekniikoiden syntymistä saatiinkin odottaa huomattavan paljon pidempään. Vuosituhannen vaihteessa Time-Life lehti valitsi Johannes Gutenbergin painokoneen 1400-luvun puolivälistä vuosituhannen tärkeimmäksi keksinnöksi jättäen taakseen muun muassa keksinnöt kuten rokotuksen ja sähkövalon (Mansourov & Campara 2011: xiii). Painokone mahdollisti kirjojen ja uutisten massatuotannon, joka taas avasi uusia mahdollisuuksia niin tiedonvälityksessä kuin kulttuurin kasvussa. Varhaisina aikoina kirjoitettu teksti oli ollut ainoastaan rikkaiden etuoikeus kirjojen ollessa erittäin arvokkaita. Niiden kopioiminen oltiin aikaisemmin jouduttu tekemään käsin kirjoittamalla. Painokoneen keksimisen jälkeen tuotantomäärät tuhatkertaistuivat verrattuna käsin kopiointiin ja tämä tuntuikin hintojen valtavana laskuna.

2.2. Gutenbergin painokone

Johannes Gutenbergin painokone vuodelta 1450 perustuu ideaan missä aluksi valetaan suurimäärä kirjainten peilikuvien muotoisia irtokirjasimia. Nämä kirjasimet sijoitetaan sitten kehikkoon, niin että ne muodostavat halutun tekstin. Tämän jälkeen kirjasimet valetaan musteella, asetetaan paperi kirjasimien päälle ja puristetaan yhteen. Näin syntyy

tulostusta voidaan monista satoja, jopa tuhansia kertoja (Tampereen yliopiston viestintätieteiden yliopistoverkosto 2014).

2.3. Mustesuihkutulostin

Mustesuihkutulostin on varsinaisesti ensimmäinen nykypäiväistä 3D-tulostamista muistuttava tulostustapa. Vaikka mustesuihkutulostus kehitettiin jo vuonna 1951, tulostamaan muun muassa sairaaloissa käytettyjä pulssikäyriä sen varsinainen läpilyönti tapahtui vasta elokuussa 1977 kun Canonin insinööri Ichiro Endo keksi nykypäiväisen mustesuihkutulostimen. (Kelly & Lindblom 2006: 204).

Mustesuihkutulostimia on tänä päivänä kahdenlaisia, mutta kummankin perusidea on sama ainoan eroavaisuuden ollessa mustesuuttimen toimintoperiaate. Tulostuksen alkaessa paperi liikkuu tulostimen tulostusosaan. Kelkassa kiinnioleva suutin siirtyy paperin laidasta laitaa rivikerrallaan, päästään suuttimesta määrätyn määrän mustetta paperiin. Kelkan päästessä toiseen laitaa siirtää tulostustaso paperia rivin verran ylemmäs ja kelkka palaa takaisin lähtöpisteeseen. Kun tällä menetelmällä viimeinenkin tulostettava rivi on valmis, työntyy paperi kokonaan ulos ja tulostus on näin valmis.

Mustesuihkutulostimen toimintaperiaatetta voidaan pitää 3D-tulostamisen edeltäjänä kahdesta syystä. Ensinnäkin ensimmäistä kertaa tulostimessa käytettiin erillistä suutinta, joka päästi lävitseen tietyn määrän mustetta, muodostaen täten juuri tietyn vahvuisen jäljen, eikä esimerkiksi ainoastaan ennalta määrättyjä merkkejä. Toinen suuri harppaus kohti 3D-tulostamista oli tulostuskelkan ja suuttimen yhteistoiminta. Kelkka liikkuu X- ja Y-akselilla (tässä tapauksessa liikkuva paperi muodostaa Y-akselin), jolloin suutin käy läpi jokaisen kohdan tulostettavalla pinnalla, mutta suutin laskee mustetta lävitseen ainoastaan haluttuihin pisteisiin.

2.4. 3D-tulostamisen historia

3D-tulostuksen historiaa voidaan pitää tyypillisenä kehityskulkuna puhuttaessa moderneista teknologioista. Ennen satoja vuosia kestänyt kehitystyö nopeutuu tänä päivänä eksponentiaalisesti kun sekä vapaanlähdekoodin, että kattavien tietoverkkojen ansiosta tutkimustuloksia ja tietoa on saatavilla joka puolella maailmaa miltei reaaliajassa. 3D-tulostuksen historia kattaakin tänä päivänä vasta 20vuotta, siinä missä Gutenbergin painokoneesta mustesuihkutulostin kehitykseen meni 500vuotta. Mustesuihkutulostimen kehitykseen vaikutti toki vahvasti muukin, kuten esimerkiksi sähköön löytäminen. 3D-tulostuksessa sitävastoin taas tulostusmateriaaleissa, tavoissa ja käyttökohteissa harppauksia voidaan pitää yhtä suurina.

- 1984 kehitetään Stereolitographia. Myöhemmin 3D Systems:in perustanut Charles Hull patentoi vuonna 1984 stereolitografiaksi (SL) kutsutun 3D-tulostamismenetelmän, joka mahdollisti kolmiulotteisten kappaleiden tulostamisen tietokone-mallista. Tämä helpotti huomattavasti suunnittelijoiden työtä, kun nyt koekappaleita pystyttiin tuottamaan ilman kalliiden tuotantomenetelmien rakentamista. (T. Rowe Price 2013).
- 1992 ensimmäinen SL teknologiaa hyödyntävä tulostin valmistetaan. 3D systems valmistaa ensimmäinen SL-tulostimen. Tulostin perustuu fotopolymeeri nesteseen, jonka pintaan suunnataan laser säde. Pintaan osuessaan säde kovettaa 0,05-0,15mm paksuisen kerroksen. Yhden kerroksen tulostamisen jälkeen kovettunut pinta lasketaan taas nesteen alle, jotta seuraava kerros voidaan tulostaa. (T. Rowe Price 2013).
- 1999 3D-tulostettu virtsarakko siirretään potilaaseen. Wake Forrestin yliopiston tutkijat kehittävät teknologian jolla voidaan tulostaa uusia elimiä, jotka pinnoitetaan potilaan omilla soluilla. Siirrettyjen elimien riski joutua kehon hylkimäksi on erittäin pieni, koska tulostamisessa on käytetty potilaiden omia soluja. (T. Rowe Price 2013).
- 2002 valmistetaan ensimmäinen kokoaan 3D-tulostettu elin. Wake Forrestin yliopiston tutkijat onnistuvat tulostamaan toimivan munuaisen pienoismallin, joka kykenee suodattamaan verta. (T. Rowe Price 2013).

- 2005 Tohtori Adrian Bowyer perustaa RepRap:in, joka valmistaa vapaan lähdekoodin 3D-tulostimia, jotka pystyvät itse tulostamaan suurimman osan käyttämistään osista. RepRapin tarkoitus on mahdollistaa 3D-tulostimien leviäminen kaikkialle, jotta mahdollisimman monella ihmisellä olisi mahdollisuus itse tuottaa päivittäin tarvitsemiaan tuotteita. (T. Rowe Price 2013).
- 2006 markkinoille saatiin ensimmäinen SLS (selective laser sintering)-tulostin. Tulostin sulattaa laserilla metallijauhetta 3D-tulostamiseen tarvittavaan muotoon. Tämä keksintö mahdollisti massaräätälöimisen ja 3D-tulostamisen laajemmassa tuotantolaitoskäytössä. (T. Rowe Price 2013).
- 2006 ilmestyi markkinoille myös ensimmäinen tulostin jolla pystyttiin tulostamaan useasta eri materiaalista koostuva kappale (T. Rowe Price 2013).
- 2008 RepRap tuo markkinoille 3D-tulostimen joka pystyy valmistamaan suurimman osan tarvitsemistaan osista itse ja täten mahdollistaa 3D-tulostimien laajemmän levikin (T. Rowe Price 2013).
- 2008 Shapeways julkaisee taiteilijoille, arkkitehdeille ja suunnittelijoille suunnatun palvelun, minkä tarkoituksena on mahdollistaa edullinen 3D-tulostus (T. Rowe Price 2013).
- 2008 onnistutaan ensimmäisen kerran tulostamaan kokonainen jalkaproteesi nivelineen, joka ei vaadi osien erillistä kokoamista (T. Rowe Price 2013).
- 2009 MarketBot Industries tuo markkinoille ensimmäisen täysin kotikäyttöön suunnatun 3D-tulostimen (T. Rowe Price 2013).
- 2009 Organovo onnistuu tulostamaan ensimmäisenä verisuonen hyväksikäyttäen tohtori Gabor Forgacs:en kehittelemää teknologiaa (T. Rowe Price 2013).
- 2011 Southamptonin yliopistossa valmistetaan ensimmäinen 3D-tulostettu lentokone. 5.000£ budjetilla valmistetun miehittämättömän lentokoneen valmistaminen kestää ainoastaan 7 vuorokautta ja tuotantotapa mahdollistaa ellipsin muotoisten siipien valmistamisen, mikä tavanomaisilla menetelmillä on erittäin kallista. (T. Rowe Price 2013).
- 2011 Kor Ecologic paljastaa TEDxWinnipegissä Urbee:n, auton jossa on kokonaan 3D-tulostettu runko (T. Rowe Price 2013).

- 2011 i.materilise mahdollistaa ensimmäisenä maailmassa kullan ja hopean käytämisen 3D-tulostamisessa (T. Rowe Price 2013).
- 2012 Hollantilaiset lääkärit ja insinöörit yhteistyössä valmistavat ensimmäisen 3D-tulostetun alaleuan kroonisesta luusairaudesta kärsivälle potilaalle, mikä mahdollistaa uuden luukudoksen muodostumisen (T. Rowe Price 2013).

3. 3D-TULOSTIMEN TOIMINTA

3D-tulostaminen muistuttaa läheisesti mustesuihkutulostamista. Edellä esitellyssä mustesuihkutulostuksessa tulostuskelkka liikkuu X- ja Y-akselilla, mutta siirryttäessä kolmiulotteiseen tulostamiseen otetaan mukaan myös Z-akseli. Tämä käytännössä tarkoittaa sitä, että ennaltaan vaakatasossa liikkuva kelkka, jossa tulostuspää sijaitsee, liikkuu nyt myös korkeussuunnassa. Tulostus aloitetaan alimmasta kerroksesta. Kun tulostuspää on järjestelmällisesti käynyt läpi ensimmäisen kerroksen, nousee kelkka yhden kerroksen ylöspäin ja aloittaa seuraavan kerroksen tulostamisen. Tätä prosessia jatketaan aina niin pitkään kunnes koko tulostettava kappale on valmis. Jotta tulostettava kappale pysyisi kasassa, käytetään tulostettaessa materiaaleja jotka jaksavat tulostamisen jälkeen kantella seuraavan kerroksen painon. Yleisimpiä käytettyjä materiaaleja ovat muun muassa muovi, teräs ja lasi.

3.1. 3D-malli

Kuten edellä todettu 3D-tulostaminen tekniikasta riippumatta perustuu kerroksen pinnoamisesta toistensa päälle. Jotta tulostin osaisi tulostaa kappaleen, tarvitsee se tarkat tiedot kappaleesta eli niin sanotun 3D-mallin. 3D-mallinnukseen tapoja on useita, aina laser skannauksesta piirtämiseen. Tärkeintä kuitenkin on, että tulostettavat pinnat ovat yhtenäisiä eli suljettuja. Mikäli tulostettava kohde ei ole solidi, eli sitä ei niin sanotusti tulosteta täyteen vaan pinnan alla osa jää osittain tai kokonaan tyhjäksi, on otettava huomioon kappaleeseen kohdistuvat rasitteet. Mikäli kappale on suuri, taikka siihen muuten kohdistuu painetta, tulee myös tarvittavat tuennat mallintaa kappaleen sisäpuolelle. (AIPWorks 2014).

Jotta tulostin ymmärtäisi 3D-mallin, tulee se kääntää STL(Stereolitography)-muotoon. Vaikka 3D-tulostus onkin uusi teknologia, on STL-formaatti saanut standardin aseman ainakin toistaiseksi. Käännettäessä 3D-mallia STL-muotoon muuttaa tietokone kappaleen koostumaan pienistä kolmioista. Mitä enemmän kolmioita STL-malliin sisällytetään, sitä

tarkempi mallista tulee, mutta myös tiedoston koko ja mallin käännoisaika kasvavat huomasti. Kotitulostimia käytettäessä tulee myös muistaa, että mallista on turha tehdä tarkempaa kuin mitä tulostin itsessään pystyy tulostamaan. Tehdastasoissa tulostimissa mallin tarkkuudella kuitenkin on merkitystä. Mallien tarkkuuden huomaa jo paljaalla silmällä. (AIPWorks 2014).

Ennen tulostamista tulostusohjelma viipaloi mallin kaksiulotteisiksi kerroksiksi. Kerrosten määrä määräytyy kappalekoon ja kerrospaksuuden perusteella. Pienempi kerrospaksuus johtaa useampaan kerrokseen ja täten parempaan lopputulokseen, mutta tällöin myös tulostusnopeus laskee. Itse viipalointia voidaan verrata kananmunan viipalointiin. Tulostusohjelma viipaloi STL-formaatissa olevan mallin erimuotoisiin kerroksiin, jotka tulostin sitten tulostaa kerros kerrokselta. (AIPWorks 2014).

3.2. 3D-tulostimet

Vahvasti yleistäen voidaan 3D-tulostimet jaotella kahteen joukkoon. Ensimmäisen joukon muodostavat tulostimet, joissa tulostustekniikka perustuu tulostuspäähän mikä pursottaa raaka-ainetta kerros kerrokselta valmistuen vähitellen näin valmiin tuotteen. Toisen joukon muodostavat tulostimet jossa tulostin sitoo raaka-aineita kerros toisensa jälkeen.

Ensinnä esiteltyjä tulostimia kutsutaan kasaaviksi tulostimiksi (selective deposition printers, SDP). Nämä tulostimet ruiskuttavat, pursottavat taikka puristavat joko nesteinä, tahnana taikka jauheena olevan raaka-aineen kerros kerrokselta päällekkäin valmistuen näin valmiin tuotteen. Kotikäytössä esiintyy useimmiten juuri kasaavia tulostimia johtuen niiden käyttövarmuudesta sekä turvallisuudesta. (Lipson & Kurman 2013: 68).

Toista tulostinjoukkoa kutsutaan sitoviksi tulostimiksi (selective binding printers). Nämä tulostimet perustuvat useimmiten laser säteeseen taikka valonsäteeseen, joka kohdistetaan joko pulveriin taikka fotopolymeeri nesteeseen, josta kovettuu ohut kerros edellisen valmiin kerroksen päälle. (Lipson & Kurman 2013: 68).

3.2.1. Kasaavat tulostimet

Fused deposition modeling, FDM. FDM on ensimmäinen ja kotikäytössä yleisin 3D-tulostus tekniikka. Perusajatuksena on, että tulostin pursottaa suuttimen läpi juoksevaa raaka-ainetta, on se sitten muovia, metallia taikka esimerkiksi ruoan tulostamisessa useasti käytettyä juustoa. Tulostuksen alkaessa tulostimen suutin piirtää ensin tietokoneella luodusta 3D-mallista ensimmäisen kerroksen, aloittaen ensin ääri viivoista ja sitten täyttämällä ääri viivojen sisäpuolen. Tämän jälkeen suutin siirtyy kerroksen ylöspäin ja aloittaa alusta. Tätä toimenpidettä toistetaan kunnes viimeinenkin kerros on tulostettu. Edellä selitetty 3D-mallin viipalointi on merkittävä vaihe juuri tässä tulostamisen vaiheessa. Mitä tarkemmin 3D-malli on viipaloitu, sitä tarkemmin tulostin voi sen tulostaa ja täten saadaan aikaiseksi myös tarkka lopputulos. (Lipson & Kurman 2013: 68-70).



Fused Deposition Modeling

Kuva 1. Fused Deposition Modeling (Thre3D)

Polyjet printing, PP. Polyjet tulostus yhdistää vahvasti sekä kasaavaa-, että sitovaa tulostusmenetelmää. Suutin suihkuttaa pisaroita tulostettavalle pinnalle pursottamisen sijasta ja tämän jälkeen kirkas UV valo kovettaa materiaalin. Polyjet tulostuksen suurimpana etuna on sen tarkkuus. Menetelmällä saadaan 0,016mm tarkkuus, minkä ansiosta se soveltuu erittäin hyvin esimerkiksi lääketieteen käyttöön kun otetaan vielä huomioon, että tulostuksessa voidaan samanaikaisesti käyttää useita eri materiaaleja, joita ruiskutetaan

omista suuttimistaan. Menetelmän ainoa varsinainen heikkous on tulostettavien materiaalien vähyys. Polymeeriset aineet ovat muoveja ja vaikka niiden hinta onkin korkea, jää kestävyys sitä vastoin heikoksi. Tämä rajoittaa selvästi käyttökohteita. (Lipson & Kurman 2013: 70).



Polyjet Printing

Kuva 2. Polyjet Printing (Thre3D)

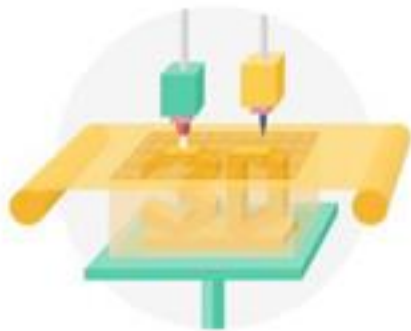
Laser Engineered Net Shaping, LENS. Tulostimessa suutin puhalttaa pulveria voimakkaaseen laser säteeseen jossa se kovettuu. Kun tulostimen suutin ja laser näin seuraavat 3D-mallista luotua tulostusmallia kerros kerrokselta, saadaan aikaiseksi valmis tuote. Menetelmän suurin vahvuus on käytettävien materiaalien laaja kirjo. Tällä menetelmällä pystyttiin vihdoinkin tulostamaan kovia materiaaleja kuten terästä ja titaania, mikä taas aikaansai huomattavan määrän kiinnostusta 3D-tulostamista kohtaan varteenotettavana tuotantomuotona. Johtuen menetelmän tarkkuudesta pystytään täten valmistamaan tuotteita, joiden valmistaminen ei perinteisin valamismenetelmin olisi mahdollista. Usean suuttimen käyttö mahdollistaa myös esimerkiksi metalliseosten tarkan valmistuksen, kun laser säteeseen voidaan samanaikaisesti puhalttaa tietyssä suhteessa eri metalleja. (Lipson & Kurman 2013: 71-72).



Laser Engineered Net Shaping

Kuva 3. Laset Engineered Net Shaping (Thre3D)

Laminated object manufacturing, LOM. LOM-tulostus eroaa muista kasaavista tulostimista siten, että siinä ei käytetä ollenkaan suutinta. Tulostimessa kappale kasataan tulostuspöydällä rullaavasta kalvosta josta leikataan kerros kerrokselta paloja irti joko laser säteellä taikka veitsellä. Kalvot useimmiten liimataan paikalleen, mutta osa tulostimista sulattaa ne yhteen ultraäänellä. Kun yksi kerros on leikattu, pyörähtää jäljelle jäänyt materiaali sivuun ja irti leikatun kerroksen päälle siirtyy uusi kalvo. Tulostuksessa voidaan käyttää materiaalina esimerkiksi paperia, muovia taikka metallia. Koska tulostuksen yhteydessä paljon materiaalia menee hukkaan, kerää osa tulostimista ylijäämän talteen. (Lipson & Kurman 2013: 72-73).

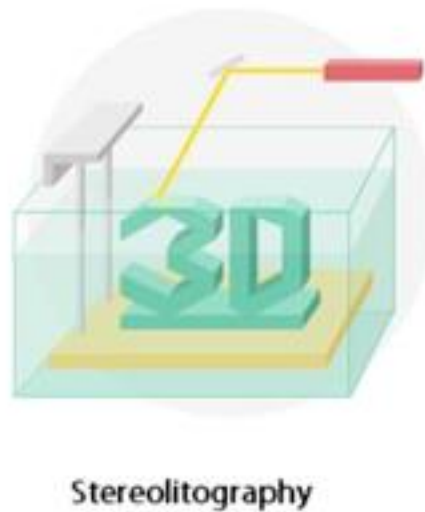


Laminated Object Manufacturing

Kuva 4. Laminated Object Manufacturing (Thre3D)

3.2.2. Sitovat tulostimet

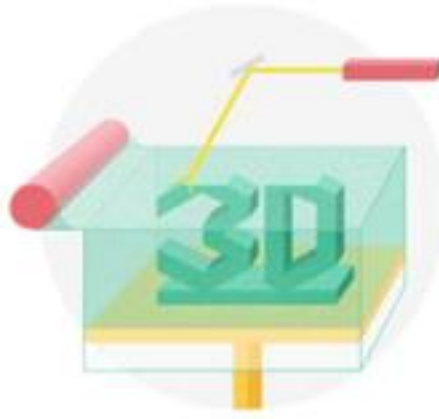
Stereolitography, SL. Stereolitographia on ensimmäisiä kaupallisia 3D-tulostus menetelmiä. SL tulostimessa tulostustaso upotetaan photopolymeerineesteeseen. Kun taso on peitynyt halutulla kerroksella nestettä, suunnataan siihen tehokas laser säde. Kun laser osuu UV-herkkään nesteeseen saa se aikaan reaktion jossa materiaali kovettuu. Kun koko kerros on täten kovetettu joko yhden tai useamman laser säteen toimesta, lasketaan tulostustasoa alaspäin niin, että kappale peittyy taas uudestaan nesteellä. Menetelmän ehdottomina etuina on sen nopeus ja tarkkuus, kun tulostus voidaan hoitaa usealla laser säteellä samaan aikaan. Haittapuolina voidaan mainita tulostuksesta syntyvät haitalliset kaasut, sekä se, että tulostuneet kappaleet pitää materiaalista riippuen toisinaan kovettaa vielä UV-uunissa taikka hioa, jotta pinnasta saadaan tasainen. (Lipson & Kurman 2013: 73-74).



Kuva 5. Stereolitography (Thre3D)

Selective laser sintering, SLS. Laser sintraus kehitettiin myös jo 1980-luvulla Texasin yliopistossa. Menetelmä muistuttaa läheisesti stereolitographiaa, mutta nesteen sijasta tulostin käyttää pulveria johon laser säde sitten kohdistetaan. Menetelmän suurimpana etuna voidaan pitää sitä, että pulveri tukee keskeneräistä kappaletta tulostuksen aikana. Laser sintrausta ei kuitenkaan enää juuri käytetä johtuen sen haittapuolista. Tulostetut

pinnat jäävät usein karheiksi ja mikäli pulveria käsitellään väärin, saattavat tietyt materiaalit aiheuttaa räjähdyksen tulostettaessa. (Lipson & Kurman 2013: 75-76).



Selective Laser Sintering

Kuva 6. Selective Laser Sintering (Thre3D)

Three dimensional printing, 3DP. 3DP muistuttaa läheisesti sekä laser sintrausta, että kasaavia tulostimia. Erona laser sintraukseen 3DP menetelmässä ei pulveriin suunnata laseria, vaan pursotetaan liimaa tai muuta ainetta joka sitoo pulveria. Menetelmä on suhteessa muihin erittäin edullinen, kun tulostimen valmistaminen on edullista, eivätkä tulostusmateriaalit myöskään nosta tulostamisen hintaa muita korkeammaksi. Vaikka menetelmällä ei saadakaan aikaan tehdastasoista lopputulosta, soveltuu se hyvin esimerkiksi kotikäyttöön hintansa puolesta. Toisin kuin muissa menetelmissä, 3DP tulostimessa tulostuvan kappaleen väriä pystytään myös muokkaamaan, kun sitovan aineen sekaan sekoitetaan väriainetta. (Lipson & Kurman 2013: 76-77).



Three Dimensional Printing

Kuva 7. Three Dimensional Printing (Thre3D)

4. 3D-TULOSTAMISEN VAIKUTUS TUOTANTOKETJUUN

3D-tulostamista on kutsuttu kolmanneksi teolliseksi vallankumoukseksi, joka tulee muuttamaan tapamme ajatella maailmaa. Kyse ei ole pelkästään siitä miten tulevaisuudessa tulemme hankkimaan tuotteita, vaan myös siitä miten tuotteita valmistavat yritykset sopeutuvat tämän uuteen tuotantotapaan.

Ensimmäinen teollinen vallankumous alkoi Englannissa 1700-luvun lopulla tekstiiliteollisuuden teollistumisen myötä. Ennen satojen käsityöläisten kotonaan tekemä käsityö koottiin puuvillatehtaisiin. Toista teollista vallankumousta saatiin odottaa vain reilut 100 vuotta, kun Henry Ford kehitti ensimmäisenä tuotantolinjan 1900-luvun alkupuolella, josta sittemmin alkoi massatuotannon aikakausi. (The Economist 2012).

4.1. Tuotantoketjun määritelmä

Tuotantoketju on joukko yrityksiä jotka kuljettavat materiaalia eteenpäin. Normaalisti, useat yksittäiset yritykset ovat mukana valmistamassa tuotetta ja saattamassa sen loppukäyttäjän saataville tuotantoketjussa – raaka-aine ja komponentti valmistajat, tuotteiden kokoajat, tukkurit, jälleenmyyjät ja kuljetusliikkeet ovat kaikki osa tuotantoketjua. (La Londe & Masters 1994).

Tuotantoketju on niiden yritysten verkko, jotka ovat mukana joko kysyntä- tai tarjontaketjun kautta, eri prosesseissa ja toiminnoissa jotka tuottavat lisäarvoa asiakkaalle toimitetulle lopulliselle tuotteelle taikka palvelulle (Christopher 1992).

Tuotantoketjulle löytyy tänä päivänä kirjallisuudesta melkein pä yhä monta määritelmää kuin löytyy sen tutkijoita. Kaikkia niitä yhdistää kuitenkin sama ajatus verkostosta, jossa yhdistyvät kaikki ne toimijat, jotka ovat mukana lopputuotteen valmistamisessa, kuljetamisessa, varastoinnissa taikka muissa sidostoimissa. Tuotantoketjuun kuulumisen ei

siis välttämättä vaadi lisäarvon tuottamista tuotteelle, kuten esimerkiksi jos kyse on väli-varastoinnista. Tärkeimpänä nyrkkisääntönä voidaankin siis pitää, että yritys kuuluu tuotteen tuotantoketjuun, mikäli se on konkreettisesti tekemisissä tuotteen kanssa.

Tänä päivänä tuotantoketjut eivät enää ole niin yksiselitteisiä kuin edellä on kuvattu. Esimerkiksi keskiverto auto koostuu useasta tuhannesta osasta jolla jokaisella on yleensä oma valmistaja. Tämän vuoksi tuotantoketjun hallinnalla onkin alati kasvava merkitys yrityksen toiminnassa.

4.2. 3D-tulostamisen vaikutus tuotantoketjuun

Varsinaisesti ensimmäisistä tuotantoketjuista voidaan puhua jo aikojen alusta asti, jolloin vaihtokaupalla käsityöläiset ostivat raaka-aineita esimerkiksi venereittejä pitkin kulkevilta kauppiailta, omalla ammattitaidoillaan saivat aikaan valmiita tuotteita, joita he sitten myivät toreilla ja markkinoilla. Vuosituhansien kuluessa tämä tuotantoketju on vain kasvanut ja haarautunut yhä sekalaisemmaksi. Raaka-aineiden toimittajia voi olla kymmeniä jos ei jopa satoja, kuljetusliikkeitä on useita ja yrityksen asiakkaina voivat olla niin yritykset, tukkurit kuin yksityiset kuluttajatkin. Tietotekniikan kehitys on huomattavasti edesauttanut tuotantoketjujen hallinnassa kun tietoa voidaan siirtää reaaliajassa ympäri maapalloa. (3D Printing Industry 2014a).

Ensimmäisen ja toisen teollisen vallankumouksen seurauksena yhteiskunnan rakenne muuttui yhä enemmän kaupunkikeskeiseksi ja aikaansai varallisuuden kasvua. Kolmas teollinen vallankumous on viemässä maailmaa juuri vastakkaiseen suuntaan, mikä aiheuttaa nimenomaan tuotantoketjujen uudistamiseen suurta painetta. 3D-tulostamisella on potentiaalia tuoda tuotanto lähemmäs loppuasiakasta ja täten vähentää tuotantoketjujen rajoitteita. Tuotannon muunneltavuus ja mahdollisuus tuottaa pieniäkin tuotantomääriä tarpeen ilmentyessä kustannustehokkaasti ilman suuria muutoksia tuotantolinjoihin on avainasemassa teknologian yleistymisessä. Uusi tuotantotapa vähentää myös välivarastojen tarvetta. Tulevaisuudessa varaosien tuotannosta ja lähetyksestä tulee tarpeetonta kun varaosia voidaan tulostaa suoraan kohteessa. (3D Printing Industry 2014a).

5. 3D-TULOSTUKSEN VAIKUTUKSET TEOLLISUUTEEN JA TUOTANTOON

Massatuotannon vaatimien ratkaisuiden kehittämistä voidaan pitää yhtenä 3D-tulostamisen isoimmista haasteista. Vielä tällä hetkellä käytössä olevalla tekniikalla ei pystytä tuotamaan kustannustehokkaasti yhtä paljon tuotteita kuin halvan työvoiman maissa sijaitsevassa perinteisessä tuotantolaitoksessa. Tästä johtuen 3D-tulostusta voidaan pikemminkin pitää lisänä tavalliseen tuotantoon, eikä niinkään sen korvaavana tuotantotapana. Jotta tänä päivänä voitaisiin tuotantomäärissä kilpailla perinteisten tuotantolaitosten kanssa, vaatisi se lukemattomien teollisuus kokoluokan 3D-tulostimien hankkimisen mikä taas vaatisi tähtitieteellisiä rahasummia. (3D Printing Industry 2014b).

Kuten historia on jo useasti osoittanut, ei 3D-tulostuksenkaan tulevaisuus kuitenkaan näytä kariutuvan tämänhetkisiin esteisiin. Tekniikan yleistyessä ja tuotekehityksen kokoajan mennessä eteenpäin, saadaan markkinoille jatkuvasti tehokkaampia ja taloudellisempia tulostimia. Jo tällä hetkellä käytössä olevalla teknologialla pystytään valmistamaan sellaisia tuotteita, joiden valmistaminen ilman 3D-tulostamista ei mitenkään voisi olla mahdollista. 3D-tulostamisella onkin jo nyt ollut suuri vaikutus teollisuuteen sekä tuotantoketjuihin. Näitä vaikutuksia tullaan käsittelemään alempana. (3D Printing Industry 2014b).

5.1. Ympäristövaikutukset

Tavallinen tuotanto aiheuttaa useasti runsaasti saasteita ja jätettä ympäristöön. 3D-tulostus onkin monin tavoin puhtaampaa ja hiilijalanjäljeltä huomattavasti ympäristöystävällisempi vaihtoehto tuotannolle. Ympäristöystävällisyys voidaan 3D-tulostuksessa jakaa neljään osaan:

- 3D-tulostuksessa syntyy huomattavasti vähemmän hukkamateriaalia tavalliseen tuotantoon nähden. Johtuen tulostustavasta, itse tuotteen valmistamiseen vaaditaan ainoastaan lopputuotteeseen tarvittavamäärä tulostettavaa materiaalia, kuten esimerkiksi biohajoavaa muovia. (TechRepublic 2014).
- Nykypäivänä usein joudutaan muuten toimivia tuotteita heittämään pois, vain koska yksi osa hajoaa eikä varaosia ole saatavilla. Jo tänä päivänä 3D-tulostaminen tarjoaa tähän ratkaisun mahdollistamalla varaosien valmistamisen itse. (TechRepublic 2014).
- Tuotteiden valmistaminen paikanpäällä vähentää huomattavasti saasteita. Tänä päivänä tuotteet usein matkaavat eripuolilta maailmaa edestakaisin eri tuotantovaiheissa. 3D-tulostuksen käyttöönotolla ainoa kuljetettava materiaali on tulostettava raaka-aine, jonka kuljettaminen on huomattavasti taloudellisempaa. Tänä päivänä suurimäärä tuotteita joutuu kaatopaikalle myymättöminä, johtuen joko liikatuotannosta taikka mallien vanhentumisesta. Tähän 3D-tulostaminen tarjoaa ainakin osittaisen ratkaisun, kun varmuusvarastoja saadaan pienennettyä huomattavasti. (TechRepublic 2014).

5.2. Taide

Taide on ollut yksi ensimmäisistä aloista joka on omaksunut 3D-tulostamisen tarjoamat mahdollisuudet. Jo tänä päivänä taiteilijat myyvät internetissä töidensä 3D-malleja, joista tavallinen kuluttaja pystyy omalla tulostimellaan tulostamaan taiteilijoiden suunnittelemaa taideteoksia tai käyttöesineitä. (TechRepublic 2014).

5.3. Koulutus

MarketBot julkisti 2013 kampanjan, jonka tarkoitus on saada 3D-tulostin jokaiseen kouluun Yhdysvalloissa. Kampanjan tarkoituksena on opettaa nuoret ajattelemaan uudella tavalla, kun heillä on perustietoa 3D-tulostamisen tarjoamista mahdollisuuksista. (TechRepublic 2014).

5.4. Riippumattomat tukikohdat

Oli kyse sitten tutkimusasemasta Antarktiksella, taikka kansainvälisestä avaruusasemasta, tarjoaa 3D-tulostus huomattavia mahdollisuuksia parantaa asemien riippumattomuutta ulkomaailmasta. Aikaisemmin erilaisten työkalujen sekä varaosien kuljettaminen on aiheuttanut suunnattomia kustannuksia, kun lähtökohtaisesti kaikkeen on pitänyt varautua. 3D-tulostaminen tarjoaa tähän huomattavasti tehokkaamman vaihtoehdon, kun nyt valmiita, ainoastaan yhteen tai muutamaaan tarkoitukseen soveltuvia osia ei enää tarvitse lähettää, vaan mukaan tarvitaan ainoastaan 3D-tulostin, sekä tulostukseen soveltuvia materiaaleja. Mahdollisuudet eivät kuitenkaan rajoitu vain työkaluihin ja rakennusmateriaaleihin, sillä NASA on myöntänyt 2013 apurahan prototyypille, joka tulostaa ruokaa astronauteille. Tämä tulostettu ruoka on huomattavasti parempaa kuin pakastekuivattu ruoka, mikä on ollut tällä hetkellä astronauttien pääasiallinen ravinnonlähde. (TechRepublic 2014).

5.5. Massatuotanto

3D-tulostuksen suurin ongelma tällä hetkellä on sen kustannustehottomuus massatuotannossa. Tekniikan kehittyessä se avaa kuitenkin aivan uudenlaisia mahdollisuuksia aloille missä sitä on jo totuttu käyttämään, sekä myös aloille missä sen käyttöä ei välttämättä tule edes ajatelleeksi.

- Elektroniikkateollisuutta voidaan pitää yhtenä luonnollisimpana teollisuudenalana joka tulee hyötymään 3D-tulostuksesta. Tuotettavat kappaleet ovat kokonsa ja materiaaliensa puolesta erinomaisesti tulostettavaksi soveltuvia. (TechRepublic 2014).
- Autoteollisuus on jo pitkään käyttänyt 3D-tulostusta prototyyppien ja koekappaleiden valmistamiseen. Varsinaisessa tuotannossa tekniikasta tulevat kuitenkin hyötymään ensin yritykset kuten ruotsalainen Koenigsegg, jotka valmistavat käsin autonsa alusta loppuun täysin yksilöllisistä osista ja ainoastaan muutaman auton

vuodessa. Isoilla valmistajilla kuten Toyotalla ja Fordilla teknologia tulee luultavasti jokapäiväiseen käyttöön ensin varaosien valmistuksessa, josta se sitten yleistynee varsinaisten osien valmistukseen. (TechRepublic 2014).

- Armeijaa voidaan pitää luonnollisena tekniikan käyttöönottajana. Varaosia ja rakennusmateriaaleja tarvitaan nopeasti, eikä ylimääräisten osien kuljettamiseen ole varaa. Aseteollisuus on jo pitkään ollut teknologian edelläkävijä, joten on vain ajan kysymys milloin 3D-tulostus valtaa alan lopullisesti. (TechRepublic 2014).
- Ruokateollisuutta voidaan pitää alana, missä ensimmäisenä ei tulisi mieleen käyttää 3D-tulostamista tuotantomenetelmänä. Lähtökohtaisesti esimerkiksi leivän valmistamiseen käytetään kuitenkin täysin 3D-tulostamiseen soveltuvia aineita, kuten jauhoa ja vettä, jossa jauho toimii rakennusaineena ja vesi ikään kuin liimana. 3D-tulostaminen tarjoaakin huomattavia mahdollisuuksia aloille missä sitä ei vaan ole ymmärretty aikaisemmin hyödyntää. (TechRepublic 2014).

5.6. Lääketiede

Lääketiede on pitkään ollut teknologiakehityksen kärkipäässä puhuttaessa 3D-tulostuksesta. Keinotekoisien kudosten valmistamisella, eli Biotulostamisella, on jo tänä päivänä saatu merkittäviä tuloksia aikaiseksi. Biotulostuksella on saatu aikaan jo huomattavaa edistystä muun muassa proteesien valmistuksessa. Viimeisimpänä harppauksena voidaan mainita toimivan maksan tulostaminen. Vaikka lääketieteessä edistysaskeleet ovatkin olleet valtavia, on paljon vielä tehtävissä. Tämänhetkinen vallitseva teknologia mahdollistaa 50-80% tulostettujen solujen selviämisen tulostuksesta. Tutkijat Human Methodist Research Institute:ssa ovat kehittäneet uuden Block Cell Printing nimeä kantavan teknologian, jonka ansiosta jopa 100% soluista selviää tulostuksen aiheuttamasta räsityksestä. (TechRepublic 2014).

5.7. Koti

Suurin muutos tuotannossa tulee tapahtumaan kodeissa. Jo tällä hetkellä 3D-tulostimien hinnat ovat laskeneet noin 1.000€. Tänä päivänä tuotanto kotona rajoittuu monesti ainoastaan harrastemielessä tehtyihin kynttilänjalkoihin ja vaatekoukkuihin, mutta tulevaisuudessa kun 3D-mallit internetissä yleistyvät, mahdollistaa tämä muun muassa varaosien helpon valmistamisen. Esimerkiksi rikkoutunut kahva pesukoneessa ei enää vaadikaan varaosan metsästystä joko tavarantoimittajalta taikka kokonaan koneen vaihtamista, vaan tulevaisuudessa osan 3D-malli voidaan suoraan ladata valmistajan verkkosivuilta ja tarvittava osa tulostaa suoraan kotona. Strategy Analyticsin tutkijat ovatkin arvioineet, että koti 3D-tulostaminen voi kasvaa jopa 70 miljardin dollarin toimialaksi jo vuoteen 2030 mennessä. (TechRepublic 2014).

5.8. Kehitysmaat

Tänä päivänä kehitysmaat ovat usein tavallisten tuotantoketjujen saavuttamattomissa. Tämä pätee niin tavallisiin kestokulutushyödykkeisiin, kuin esimerkiksi lääketieteen valmistamiin proteeseihinkin. Re-3D yhteistyössä StartUp Chilen kanssa ovatkin käynnistäneet valtavaan menestykseen johtaneen Gigabot kickstarter kampanjan, jonka avulla on pystytty tuottamaan edullinen teollisuustason 3D-tulostin kehitysmaihin. Gigabot:ia pystytään käyttämään kehitysmaissa niin koulutustarkoituksessa, tutkimuksessa kuin varsinaisessa tuotannossakin. Gigabot maksaa 5.950 dollaria ja on täten kymmeniä kertoja edullisempi kuin vastaavan kokoluokan tulostimet. Gigabot on kooltaan 100cm x 80cm x 100cm, joten se mahdollistaa jo isojenkin kappaleiden tulostamisen. (TechRepublic 2014).

5.9. Vaikutukset maailmantalouteen

On jo nyt selvää, että 3D-tulostaminen tulee vaikuttamaan tulevaisuudessa merkittävästi talouteen ja toimitusketjuihin. McKinsey Global Institute julkaisi 2013 raportin jonka

mukaan 3D-tulostaminen tulee aikaansaamaan merkittäviä muutoksia vuoteen 2025 mennessä. Ennusteen mukaan 3D-tulostaminen tulee mahdollistamaan aivan uudenlaisia tuotekehitysmahdollisuuksia, mitkä nojaavat vahvemmin asiakaslähtöisyyteen. Tuotekehityksen hintojen odotetaan myös laskevan merkittävästi. 3D-tulostaminen laskee myös huomattavasti markkinoille tulon kustannuksia, mikä helpottaa uusien yritysten asemaa markkinoilla. Kiina on tällä hetkellä johtava maa 3D-tulostamisen saralla, johtuen siellä tehdyistä suurista investoinneista teknologian kehitykseen, sekä tuotekehitykseen. (TechRepublic 2014).

5.10. Immateriaalioikeudet

Johtuen 3D-tulostamisen uutuudesta on sen yleistymisessä vielä muitakin kuin teknologisia haasteita. Varsinkin kotikäytössä 3D-mallit ladataan usein internetistä asiaan keskittyneiltä sivuilta ja mallin lataamisen jälkeen tuotteita pystytään tulostamaan teoriassa rajaton määrä. Tänä päivänä mallit ovat sivustoilla vapaassa käytössä ja koko kuluttaja teknologia perustuu vahvasti vapaaseen lähdekoodiin. Ongelmia on jo tänä päivänä nousut, kun yksityiset ihmiset ovat ladanneet internettiin malleja rekisteröityjen yritysten tuotteista. Yritykset ovatkin nyt alkaneet haastaa yksityisiä henkilöitä oikeuteen vedoton patenttiloukkauksiin. Ennen kun teknologia voi lopullisesti lyödä itsensä läpi, vaaditaan lainsäädännöltä merkittäviä uudistuksia. (TechRepublic 2014).

6. 3D-MASSIIVITULOSTUS TÄNÄPÄIVÄNÄ

2000-luvun alusta asti automaatio on kasvanut ja kukoistanut miltein kaikilla muilla teollisuuden aloilla paitsi rakentamisessa. Automaation lisääntymiseen rakennusalalla on toki useita syitä, mutta seuraavaa listaa voidaan pitää pääpiirteittäin kattavana:

1. Saatavilla olevat automaattisen valmistuksen tekniikat eivät skaalaudu riittävän isoihin rakennelmiin, jotta niitä voitaisiin käyttää massiivitulostuksessa. (Warszawski & Navon 1998)
2. Perinteinen suunnittelu ei sovi massiivitulostukseen, jossa tuote kasataan kerroskerrokselta alhaalta ylöspäin, eikä esimerkiksi palkki kerrallaan. (Warszawski & Navon 1998)
3. Etenkin rakennusalalla yhden mallin tuotantomäärät ovat huomattavasti pienemmät kuin muilla teollisuuden aloille, kuten esimerkiksi varaosateollisuudessa. (Warszawski & Navon 1998)
4. Tulostusmateriaalit ovat olleet esteenä tulostimien kehittämislle, koska saatavilla olevat tulostuksen raaka-aineet eivät ole täyttäneet niiltä vaadittavia kriteereitä ja edellytyksiä. (Warszawski & Navon 1998)
5. Suuret automaatiolaitteet ovat erittäin kalliita suunnitella, valmistaa sekä kuljettaa kohteesta toiseen. (Warszawski & Navon 1998)
6. Kuten kaikessa muutoksessa niin myös rakennusalalla uusien teknologioiden käyttöönotto kohtaa vastustusta varsinkin työnjohdon osalta, koska se auttamatta johtaa uusien taitojen hankintaan ja uusien kykyjen nousuun vanhojen mestareiden ohi. (Warszawski & Navon 1998)

Toisaalta taas seuraavia kohtia voidaan pitää rakennusalan suurimpina ongelmina:

1. Työtehokkuus on hälyyttävän alhainen
2. Työtapaturmien määrä työmailla on korkea
3. Työnlaatu on heikkoa
4. Valvonta työmailla on riittämätöntä ja vaativaa, jonka lisäksi osaavan työvoiman määrä laskee kokoajan

Jo ennestään voidaan todeta, että automatisointi voi ainakin osittain parantaa jos ei jopa kokonaan poistaa näitä ongelmia (Pegna 1997). Kysymys kuuluukin nyt, pystyykö 3D-tulostaminen vastaamaan rakennusalaan rasittaviin haasteisiin?

Kuten aikaisemmin on jo todettu, 3D-tulostuksen mahdollisuudet eivät suinkaan rajoitu ainoastaan kooltaan alle kuutiometrin kokoisiin tuotteisiin. Qingdao Unique Products Develop Co Ltd. toi vuoden 2014 kesäkuussa markkinoille 3D-tulostimen joka on kooltaan 12m x 12m x 12m. Tulostin painaa 120 tonnia ja sen kokoamiseen käytettiin useita nostokurkia. Tulostin sijaitsee tällähetkellä paikallisessa 3D-tulostus yrityspuistossa. Tulostimella aiotaan ensimmäisenä tulostaa seitsemän metriä korkea pienoismalli Kiinan suurimmasta tempelistä käyttäen FDM tulostusmenetelmää. (www.3ders.org 2014a)



Kuva 8. Maailman suurin 3D-tulostin (www.3ders.com 2014a)

Tulostettaessa suuria objekteja on tulostusmateriaalin valinnalla suuri merkitys. Kiinassa tulostettava Taivaan tempelin pienoismalli aiotaan tulostaa grafeeni-lasikuituvahvistetusta muovista ja betonista tehdystä sekoituksesta. Massiivisen rakennelman valmistamiseen käytetään 20 tonnia materiaalia, joka koostuu 8 tonnista uutta raaka-ainetta ja 12 tonnista betonia. Yrityksen perustajan ja toimitusjohtajan Wang Hongin mukaan tavallisilla menetelmillä samankokoisen pienoismallin valmistamiseen kuluisi 150 tonnia betonia. Betoniin verrattuna uuden tulostusmateriaalin suurin etu on sen fyysiset ominaisuudet. Vahvistettu betoni on huomattavasti kevyempää, vahvempaa, se kestää paremmin

happosateita ja loppuviimein se on myös ympäristöystävällisempää kuin tavallinen teräsbetoni. (www.3ders.org 2014a)

Tänäpäivänä käytössä olevilla tekniikoilla useimmiten tulostetaan kuitenkin pienempiä kappaleita kerralla, jotka sittemmin kootaan suuriksi rakennelmiksi. Valmistusmenetelmä muistuttaa siis läheisesti tänäpäivänä talonrakennuksessa valtaosin käytettävää menetelmää, jossa taloelementit valmistetaan tehtaalla ja kuljetetaan sitten paikanpäälle koottaviksi. Suurimpana erona tavallisiin menetelmiin 3D-tulostus tuo mukanaan säästöt raaka-aineissa. WinSun Decoration Design Engineering Co. valmisti vuonna 2014 Shanghaihin 10 kappaletta 3D-tulostettuja asuntoja, joista jokainen oli pinta-alaltaan 200 neliömetriä. Raaka-aine kustannukset asunnoissa olivat ainoastaan 4.800\$. (www.3ders.org 2014b)

Kuten aikaisemmin on jo tullut esille, on 3D-tulostamisella lähes rajattomat mahdollisuudet. Puhuttaessa kuitenkin suuren kokoluokan tulostamisesta on huomioon otettava aivan uudenlaiset haasteet. Ensimmäisenä törmätään rakenteiden kestävyyskysymyksiin. 3D-tulostuksen edellytyksenä on, että edellisen kerroksen tulee pystyä kannattelemaan uuden kerroksen paino. Käytännössä tämä ongelma pystytään ratkaisemaan uusien tulostusmateriaalien avulla, mutta tulevaisuudessa kun tulostusnopeudet tulostimissa kasvavat joudutaan asiaan vääjäämättä palaamaan uudelleen. Toinen haaste on itse tulostimen rakenne. Pelkästään jo siirrettävyys aiheuttaa ongelmia ja kun mukaan vielä otetaan tulostettavien kappaleiden vaihtelevat muodot, on itse tulostimen muoto ja rakenteeseen sidottuna suuri osa sen mahdollisesta käyttöpotentiaalista.

Tällähetkellä tulostustekniikkaan on kolme vartenotettavaa ratkaisua. Ensimmäisenä näistä voidaan mainita D-Shape. D-Shapen ideana on, että stereolitografiaa muistuttavalla menetelmällä tulostin sitoo ja kovettaa hiekkaa kerros kerrokselta käyttäen merivedestä johdetun nesteiden ja magnesium pohjaisen sidosaineen sekoitusta. Vielä kehitystasolla oleva Countour crafting, vapaasti käännettynä äärikiiva tulostus, perustuu ajatukseseen jossa rakennuksen ympärille pystytetään kiskot joiden päällä tulostuspää liikkuu. Tulostin ruiskuttaa yhdestä tai useammasta suuttimesta betoniseosta kerros kerrokselta. Tekniikan etuna on, että kehikkoon voidaan tulostuspään lisäksi kiinnittää muitakin

lisäosia kuten esim. nostin. Kahteen muuhun teknologiaan vielä huomattavasti varhaisemmassa kehitysvaiheessa oleva Foster + Partnersin ja ruotsalaisen betonivalmistajan Skanskan yhteistyönä kehittelemä tulostusmenetelmä on kuitenkin ehkä kaikista lupaavin. Tekniikkaa on mukana kehittelemässä muitakin isoja alan toimijoita, kuten esimerkiksi automaatioon erikoistunut ABB ja tulostuksen raaka-aineisiin erikoistuneet Buchan Concrete ja Lafarge Tarmac.

7. D-SHAPE TULOSTUS

D-Shape tulostin on massiivinen stereolitographiaa hyödyntävä 3D-tulostin, joka sitoo hiekkaa kivenkaltaiseksi aineeksi käyttäen hyväksi suolavedestä ja magnesiumista tehtyä sidosainetta. Vuonna 2006 D-Shape tulostuksen keksijä, Enrico Dini, patentoi menetelmän joka pystyi epoksi sidosainetta käyttäen sitomaan hiekkaa kiveä muistuttavaksi kovaksi rakennusaineeksi. Kohdattuaan ongelmia epoksin ominaisuuksien kanssa Enrico Dini siirtyi käyttämään uutta meriveden ja magnesiumin sekoituksesta valmistettua sidosainetta tulostimessaan. Hän patentoi menetelmän vuonna 2008 ja on siitä lähtien vienyt tekniikkaa eteenpäin tavoitteenaan tulostaa perheelleen luksus huvila vuonna 2015.

7.1 Teknologia

D-Shape tulostuksessa kaikki alkaa kuten muissakin 3D-tulostus menetelmissä, eli CAD-mallin laatimisella. D-Shape tulostin tulostaa 5-10mm paksuja kerroksia, joten mallin luonnin jälkeen tulos viipaloidaan tämän kokoisiksi siivuiksi. Erona tavanomaisiin rakennus, sekä 3D-tulostus menetelmiin on se, että tulostettaessa suuriakin rakennelmia D-Shape tulostus ei vaadi erillisiä tukirakenteita edes siltoja taikka holvia rakennettaessa. Tämä on yksi D-Shape tulostuksen suurimmista eduista. (D-Shape 2014a).

D-Shape tulostin on kevyt ja helppo kasata. Tulostimen kasaamiseen tarvitaan ainoastaan kaksi työmiestä ja koska sen valmistamiseen on keytetty lähes pelkästään alumiinia, on se helppo kuljettaa vaikeapäästöiseenkin maastoon. Itse tulostin koostuu 6m x 6m kokoisesta alumiinirungosta jonka maksimi tulostukorkeutta voidaan säädellä lisäämällä alumiinisia tukirakenteita toistensa päälle. Neliönmuotoinen tulostin ei tarvitse varsinaista tasaista pohjaa vaan tolpat voidaan asettaa epätasaiseenkin maastoon. Itse tulostuspää koostuu 6m leveässä tulostimessa 300 suuttimesta jotka ovat 20mm päässä toisistaan. Tulostuspää on täten koko rungon levyinen mutta myöhemmissä massatuotantoon suunnitelluissa malleissa tulostusalan pituutta voidaan kasvattaa. Suuttimet valuttavat CAD-malliin merkittyihin kohtaan merivesi-magnesium seosta joka saa hiekan sitoutumaan ja kovettumaan. (Cesaretti, Dini, De Kestelier, Colla & Pambaguian 2014).



Kuva 9. Suuttimet (The Huffington Post 2013)

Kun CAD-malli on luotu ja siirretty tulostimella alkaa varsinaisen tulostamisen ensimmäinen vaihe, eli varsinaisen rakennusmateriaalin kerääminen. D-Shape tulostin pystyy käyttämään rakennusaineenaan lähes kaikenlaista hiekkaa. Hiekka kasataan tulostimen 6m x 6m rungon sisään, jonka jälkeen tulostuspää liikkuu kerros kerrokselta kasan läpi työntäen ylimenevän hiekan syrjään. Kun kerros on saatu kokonaan tulostettua, kasataan lisää hiekkaa edellisen kerroksen päälle, jonka jälkeen tulostuspää aloittaa seuraavan kerroksen. Hiekka johon ei valuteta merivesi-magnesium seosta jää tukemaan varsinaista tulostettavaa kappaletta ja poistetaan kun kappale on kokonaan tulostettu ja kuivunut. Tulostuspään sivuun siirtämä hiekka on heti valmista käytettäväksi uudestaan, joten hukkamateriaalia syntyy erittäin vähän. Tulostettavan kappaleen lopulliseen kuivumiseen menee vuorokausi. (D-Shape 2014a).



Kuva 10. Sidosaineen valuttaminen (www.3ders.org 201c3)

Kun hiekkaan valutetaan suuttimista merivesi-magnesium seosta, muuttuu se läheisesti marmoria muistuttavaksi hiekkakiveksi. Muodustunut kiviaines on ominaisuuksiltaan samanlaista kun kiviaines oli ennen kuin siitä ajan saatossa tuli hiekkaa. Sitoutunut hiekka on kestävyydeltään huomattavasti vahvempaa kuin perinteinen Portlandsementti, jota käytetään perinteisesti betonin valmistuksessa. Seos on niin vahvaa, että esimerkiksi pat-saiden valmistuksessa siihen ei erikseen tarvitse lisätä metallivahvikkeita, toisin kuin tavalliseen betoniin. Lopputulos on ominaisuuksiltaan täysin marmoriin verrattavaa ja täysin ympäristöystävällistä. (D-Shape 2014a).

Kun viimeinenkin kerros on saatu tulostettua, annetaan lopputuloksen kuivua vuorokauden ajan. Tulostin voidaan purkaa heti kun viimeinen kerros on tulostettu, mutta ylimääräinen hiekka jätetään vielä tukemaan rakennelmaa. Rakennelman kokonaan kuivuttua poistetaan ylijäävä hiekka. Vaikka tulostin pystyykin 5-10mm tarkkuuteen, voidaan pinnan epätasaisuudet vielä hioa, jotta tuloksesta tulee viimeistellymmän näköinen. Pinta on itsessään suoraan maalauskelppoinen. (D-Shape 2014a).



Kuva 11. Radiolaria taideteos ennen ja jälkeen hiomisen (D-Shape 2014b)

7.2 Nykytila ja tulevaisuuden näkymät

Toistaiseksi D-Shape tulostinta ei ole vielä saatavana kauppaliseen tarkoitukseen. Ensimmäinen varsinainen mallikappale oli vuonna 2010 näyttelyitä varten Italiaan tulostettu 3m x 3m x 3m kooltaan oleva Radiolaria. Seuraavana merkittävä kehitysaskelena voidaan pitää vuoden 2015 kesällä alkavaa projektia, jossa D-Shape yhtiön puheenjohtajan Adam Kushnerin 1,6 hehtaarin tilalle New Yorkin osavaltioon aletaan tulostamaan yli 200m² loma-asuntoa uima-altaineen ja autotalleineen. D-Shape tulostuksen etuna on, että tulostuksessa raaka-aineena käytettävä hiekka voidaan kerätä suoraan rakennuspaikalta. Toisena etuna aikaisempiin rakennusmenetelmiin verrattuna voidaan pitää sitä, että rakennusta tulostettaessa voidaan portaikot, ilmastointikanavat ja muut vaadittavat rakenteet seinien ohella valmistaa samalla kertaa tulostuksen yhtään hidastumatta. Tällä hetkellä D-Shape tulostin pystyy tulostamaan 200m² pinta-alaltaan olevan kaksikerroksisen talon vuorokauden aikana. (3DPrint.com 2015).

D-Shape tulostuksen edut eivät rajoitu kuitenkaan ainoastaan rakennusteknisiin yksityiskohtiin ja nopeuteen. Tulevaisuuden tavoitteena on, että tavanomaisten suuttimien rinnalle pystyttäisiin rakentamaan järjestelmä mikä pystyisi ruiskuttamaan sekä betonia, että teräsvahviketta. Vaikka marmorinkaltainen kiviaines onkin betonia vahvempaa, ei se kuitenkaan vielä ole tarpeeksi vahvaa, jotta se täyttäisi Yhdysvaltojen rakennusmääräykset. Tästä syystä rakennelmia pitää vahvistaa teräksellä, kuten tehdään myös valmistettaessa asuntoja perinteisestä betonista. Tämä on yksi lukuisista ongelmista joka D-Shapen pitää vielä ratkaista ennen kuin se voi aloittaa Adam Kushnerin loma-asunnon rakentamisen. (3DPrint.com 2015).

Koska D-Shape tulostus ei vaadi erillistä pohjarakennelmaa tulostettavalle pinnalle on yhtiö yhdessä Caterpillarin ja John Deeren kanssa kehitellyt liikkuvaa tulostinta (3DPrint.com 2015). Tämä hämähäkin tapaan liikkuva kone muistuttaa läheisesti metsätaloudessakin testattua metsätyökoneetta joka liikkuu neljällä taikka kuudella jalalla erittäin vaikeakulkuisessakin maastossa luontoa vaurioittamatta. Jaloilla liikkuva 3D-tulostin, joka rakentaa asuntoja saattaa tuntua kaukaiselta ajatukselta, mutta on hyvä muistaa, että kun kuussa käytiin ensimmäisen kerran, oli käytössä vähemmän laskentatehoa kuin tämän päivän matkapuhelimissa.

7.3 Käyttökohteet

D-Shape tulostuksen mahdollisuudet eivät rajoitu ainoastaan rakennuksiin. Suurimpana etuna tekniikassa on, että raaka-ainetta ei tarvitse kuljettaa kaukaa ja tulostimen pystyttämiseen vaaditaan ainoastaan kaksi työntekijää. Tämän lisäksi kun lopputulos on marmorinkaltaista ja betoniakin kestävämpää, ovat miltein kaikki rakennuskohteet missä on aikaisemmin käytettyä betonia mahdollisuuksia.

1. Julkinen sektori. Bussipysäkit, puistonpenkit, marmoriamuistuttavat kivetykset. (D-Shape 2014c).
2. Kunnallistekniikka. Ojituksen putkityöt ja siltojen rakentaminen (D-Shape 2014c).
3. Yksityinen sektori. Uima-altaat, ulkokeittiöt, pihahuonekalut. rakentaminen (D-Shape 2014c).
4. Nopeasti valmistettavat prototyypit. 1/10 suhteessa oleva malli tulevasta asutualueesta (D-Shape 2014c).

5. Leikkikentät. Luolat, vuoret, kiipeilytelineet (D-Shape 2014c).
6. Uskonnolliset kohteet. Alttarit, temppelit, patsaat (D-Shape 2014c).
7. Arkkeologia. Millitarkat kopiot jo romahtaneista- tai sortumavaarassa olevista rakennelmista (D-Shape 2014c).

Käyttökohteet eivät suinkaan rajoitu ainoastaan näihin kohteisiin, vaan mahdollisuudet ovat lähes rajattomat. D-Shape tulostuksella pystytään valmistamaan nopeasti ja edullista lähes kaikkea minkä suunnittelijat pystyvät mallintamaan tietokoneella CAD-malliksi.

8. CONTOUR CRAFTING

Contour Crafting (CC) on rakennusten tulostamiseen eritoten kehitetty menetelmä, jonka kehittäjänä toimii tohtori Behrokh Khoshnevis University of Southern California's Information Sciences Institute:sta. Teknologia perustuu tietokoneohjattuun nosturiin taikka nosturitelineeseen jonka avulla pystytään tehokkaasti tulostamaan rakennus tai rakennuksia tulostuskerros kerrallaan käyttäen huomattavasti vähemmän työvoimaa kuin tavanomaisilla menetelmillä. Alun perin idea rakennusten 3D-tulostamiseen heräsi Khoshnevisille kun valtavat maanjäristykset runtelivat hänen kotimaataan Irania. Sortuneiden rakennusten tilalle tarvittiin nopeasti uusia ja Khoshnevis lähti hakemaan apua teknologiasta, jota oli ennen käytetty ainoastaan teollisuuden tuottamien osien muottien valmistukseen. (Contour Crafting 2015).

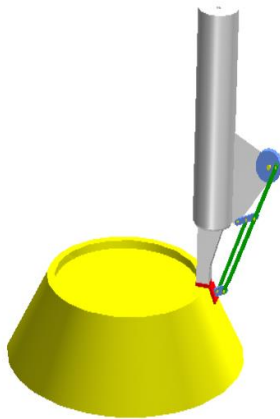
8.1 Teknologia

Rakenteeltaan Countour Craftinging käyttämä nosturiteline muistuttaa hyvin läheisesti perinteistä kotikäytössäkin toimivaa 3D-tulostinta. Tulostuspää liikkuu tukivarren varassa XYZ-asteikolla, aloittaen tulostamisen alimmasta kerroksesta ja nousee sitten seuraavaan kerrokseen. Muista tulostimista poiketen tulostimen koolla ei periaatteessa ole maksimimittaa. Nosturiteline liikkuu toiseen suuntaan kiskoilla ja kiskojen välissä menee kolmas kisko jonka varassa tulostuspää liikkuu. Tulostuspäätä kannatteleva kisko nousee kerros kerrallaan vankkoja tukivarsia pitkin.



Kuva 12. Nosturiteline (Contour Crafting 2015b)

Contour Crafting eroaa muista teknologioista kahdella tapaa. Varsinaisesti 3D-tulostuksen kannalta tärkeimpänä erona voidaan pitää kahden muurauslastan käyttöä tulostettavan materiaalin asettelussa. Muurauslastoja on käytetty jo antiikin ajoista asti, koska niiden avulla saadaan betonista taikka muista vastaavista kovettuvista massoista tasaista pintaa aikaiseksi pienelle vaivalla. Lastojen käytön mahdollisuudet eivät kuitenkaan rajoitu ai-noastaan pinnan tasoitukseen vaan niitä on käytetty ja käytetään edelleen esimerkiksi ruukkujen ja patsaiden valmistuksessa. Juuri tämä mahdollisuus muodostaa erittäin tarkkaa jälkeä 3D-tulostuksen yhteydessä on yksi CC suurimmista vahvuuksista.



Kuva 13. Suutin ja muurauslastat (Khoshnevis, B. & Bekey, G. 2015)

Tavallisesti muurauslastaa on käsitelty käsin, mutta CC yhteydessä tehtävä annetaan tietokoneelle ja kahdelle toisistaan riipumattomalle tukivarrelle jotka ohjaavat lastojen liikkeitä millitarkasti. Nosturitelineeseen kiinnitetty suutin laskee tulostettavan massan 3D-mallin mukaisiin paikkoihin muodostaen näin rakennelman ulkoreunat. Samaan aikaan kun suutin laskee tulostusmateriaalia merkittyihin paikkoihin toinen lasta tasoittaa päälipinnan luoden näin tasaisen tulostusjän seuraavan kerroksen tulostustavarten, kun samalla toinen lasta muotoilee ulkoreunaa haluttuun muotoon. CC avaa juuri tästä syystä täysin uusia mahdollisuuksia muun muassa arkkitehdeille, kun ennen satoja tunteja käsi-työtä vaatineet erikoispinnat voidaan tulostaa samalla nopeudella kuin tasainenkin seinä esimerkiksi. Kun tulostettavan kerroksen ulkoreuna on tulostettu, voidaan kerros vielä täyttää, jotta esimerkiksi seinän vahvuutta saadaan kasvatettua. Täyttämiseen voidaan käyttää esimerkiksi tavallista betonia. Tällä saadaan jo pelkästään säästettyä merkittävästi aikaa tämänhetkisiin menetelmiin verrattuna, koska nykyisillä menetelmillä ensin valmis-

tetaan mittavat kehikot laudasta, jotka sitten pumpataan täyteen betonia ja annetaan kuivua useista päivistä jopa viikkoihin riippuen rakenteen paksuudesta (Autere, L). Kerroksen tulostamisen ja tasoittamisen jälkeen nosturiteline palaa takaisin lähtöpisteeseen ja aloittaa seuraavan kerroksen.

Toinen suuri etu käytettäessä CC rakennustyömaalla on sen fyysinen rakenne. Nosturiteline liikkuu kiskoilla ja koska lähtökohtaisesti telineeseen on kiinnitetty ainoastaan yksi suutin, jää telineeseen reilusti tilaa muille lisäosille, kuten esimerkiksi nostolaitteelle. Koko CC taloudellisuus perustuu ajatukselle, että tulostuksen yhteydessä voidaan samalla rakentaa seinien ja lattioiden lisäksi myös ilmanvaihtokanavat, vesiputket, ikkunat ja esimerkiksi kaikki tukipalkit. Tämä kaikki onnistuu nimenomaan nostolaitteen avulla. Koura nostaa maasta tarvittavan palasen ja asettaa sen sopivalle paikalle kun nosturiteline on oikealla kohdalla.

Mahdollisuudet eivät tässäkään kuitenkaan rajoitu ainoastaan erinäisiin valmiisiin kappaleisiin. Esimerkiksi betonia joudutaan jatkuvasti vahvistamaan teräs- taikka muovikuiduilla, jotta sen kestävyys saataisiin vastaamaan rakennusmääräyksiä. Toisena vaihtoehtona on ollut, että raudoittajat tekevät valmiin raudoituksen jonka päälle betoni valetaan. Tälläisen raudoituksen tekeminen esimerkiksi 200m² sokkeliin vaatii jopa viikon työskentelyn. Nyt kun käytössä on kuitenkin nosturi ja tarkka tietokonemalli (CAD, Computer-Aided Design), saadaan valmis metalliverkko laskettua juuri oikeaan paikkaan ilman varsinaista lisätyötä. CC mahdollistaa myös yleensä hankalien kaarevien seinien valmistuksen, joiden valmistaminen perinteisin menetelmin on ollut huomattavan paljon aikaavievää ja kallista.

Contour Craftin, kuten 3D-tulostustekniikat yleensäkin, mahdollistaa useamman kuin yhden aineen käyttämisen tulostusmateriaalina. Mahdollista on muun muassa tulostaa rakennuksen perustat vedenkestävällä betonilla ja ylemmät kerrokset seoksella joka on sekä kevyttä, että haponkestävää happamien sateiden varalle. Mahdollista on myös tulostaa esimerkiksi rakennuksen seinät kevyellä ja nopeasti kovettuvalla massalla jonka jälkeen sisuta voidaan täyttää tavallisella betonilla, jotta rakennelmaan saadaan lisää lujuutta. Tai-

teilijat ovat jo omalla toimialallaan hahmotelleet mahdollisuutta rakentaa suuriakin luo-
muksia edulliseen hintaan kun ainoastaan ulommainen kuori täytyy enää tulostaa kalliilla
materiaalilla ja sisältö ainoastaan tukemiseen suunnitellulla edullisemmalla massalla.
Tulevaisuuden kannalta mielenkiintoisimpana mahdollisuutena voidaan muunmuasa pi-
tää mahdollisuutta, jossa niinkutsuttua älybetonia pursotetaan juuri oikea määrä rakentee-
seen mittaamaan esimerkiksi kappaleen muodonmuutosta maanjäristyksen taikka ilmas-
tonmuutoksen mittaamiseen.

8.2 Nykytila ja tulevaisuuden näkymät

Vielä ei olla siinä tilanteessa, että kokonaista rakennusta voitaisiin tulostaa hyväksikäyt-
täen pelkkää CC tekniikkaa. Koeoloissa ollaan kuitenkin jo pienoiskoossa pystytty raken-
tamaan täydellisiä pienoismalleja tulevista suuremmista projekteista, kuten esimerkiksi
taloista. 3D-tulostuksessa lähtökohtaisesti tulee lähteä liikkeelle siitä, että isompaa on hel-
pompi tehdä kuin pientä. Samat fysiikanlait pätevät isoissakin elementeissä, mutta sama
prosentuaalinen pelivara tarkoittaa mikrometrin tarkkuudella työskenteleville koneille
isoissa töissä vaan suurempaa virhemarginaalia.

Tällähetkellä suurimpana esteenä teknologian kehitykselle ei ole suinkaan ole itse tekno-
logian puutteet vaan tilojen puutteet ja rakennuslainsäädäntö. Seuraavaksi University of
Southern California's Information Sciences Institute:ssa ollaankin siirtymässä valmista-
maan täysikokoisia elementtejä, kuten esimerkiksi kokonainen seinä.

Varsinaisesti teknologiaan rinnastettava kehityshaaste löytyy sitä vastoin itse nosturiteli-
neestä. Työmaat eroavat valtavasti toisistaan ja tasaista maata on välillä mahdotonta löy-
tää. Tämän vuoksi Khoshnevis onkin ryhmänsä kanssa tutkinut mahdollisuutta ottaa käyt-
töön NIST RoboCrane system. NIST nosturi seisoo kolmen liikuteltavan tukijalan varassa
ja varsinainen suutinta kontrolloidaan vajereiden varassa. Tämä antaisi huomattavasti
enemmän mahdollisuuksia maastolle. Tällähetkellä suurimmaksi ongelmaksi muodostuu
se, saadaanko ylimääräisiä nostimia implementoitua samaan kehikkoon vai joudutaanko
ongelmaan keksimään toinen ratkaisu. (National Institute of Standards and Technology
2012).

Kuten pienissä, niin myös massiivisissa 3D-tulostimissa hukkamateriaalin määrä on pieni. Tämä edesauttaa ympäristöön kohdistuvan rasituksen pienentämistä. Tällähetkellä rakentamisesta aiheutuu mittavat ympäristövaikutukset, kun keskimäärin jokaisesta rakennettavasta omakotitalosta aiheutuu 3-7tonnia jätettä rakentamisen yhteydessä. Tulos-tettaessa millintarkasti ainoat varsinaiset jätteet tulevat pakkausmateriaaleista kun itse ra-kennusainetta ei mene hukkaan. (Contour Crafting 2015c).

8.3 Käyttökohteet

Puhuttaessa uuden tuotteen käyttökohteista on asiaa lähestyttävä kahdelta kantilta. On tarkasteltava erikseen niitä käyttökohteita joissa tuotetta voidaan taloudellisessa mielessä käyttää heti kun tuote saadaan markkinoille, sekä niitä kohteita missä tuote voisi mahdol-lisesti toimia kun julkaisusta on kulunut jo aikaa ja tuote on kerennyt valtaamaan alaa markkinoilta.

Jo tällähetkellä voidaan CC menetelmällä valmistaa yksinkertaisia rakenteita, kuten esi-merkiksi edellämäinnittuja seiniä. Jo lähitulevaisuudessa voidaanki odottaa ensimmäisen tällä menetelmällä valmistetun talon rakentamista. Vaikka rakentaminen tälläkin hetkellä olisi jo mahdollista, ei se tekniikan kehityksen kannalta ole järkevää. Tärkeämpää on käyttää rajalliset varat tekniikan hiomiseen kuin siihen, että ostettaisiin suuri tontti jonne rakennettaisiin kokonaan uusi CC nostin vain ja ainoastaan sen vuoksi, että voidaan näyt-tää tekniikan toimivuus. Toimivuuden osoittaminen on sekin tärkeää, mutta Khoshevisin mukaan vasta kun ollaan lähempänä tuotteen markkinoille tuloa. Ensin pitää muun mu-assa ratkaista vielä se, mikä nostin soveltuu parhaiten toimimaan varsinaisen tulostuspään rinnalle ja onko viisainta käyttää yhtä vai useampaa nostinta.

3D-tulostamisella saadaan myös työntekijöiden määrää työmaalla laskettua ja työturvallisuutta parannettua. Pelkästään yhdysvalloissa loukkaantuu vakavasti, taikka kuolee työ-mailla yhteensä 400.000 työntekijää. Contour Craftingin avulla työmaalla rakentamisessa työskentelevien työntekijöiden määrä saadaan laskettua 4-6 kun rakentaminen hoidetaan tietokoneita ohjaamalla. Tämä laskee merkittävästi työntekijöiden yleistä määrää mikä on jo omiaan vähentämään tapaturmien riskiä. Työmailla useimmat tapaturmat sattuvat kun

työntekijät joko putoavat taikka jäävät kahden esineen väliin puristuksiin. Käytettäessä tietokoneita koneiden ohjaamiseen vältetään näiltä riskeiltä miltein täysin.

Siirryttäessä kauemmas tulevaisuuteen jolloin oletetaan CC tekniikan olevan jo laajemmalla käytössä pääsevät 3D-tulostuksen edut todella esille. On laskettu, että CC menetelmällä pystytään tulostamaan yli 150m² rakennus 24 tunnin aikana. Tämä tietysti edellyttää, että CC vaatima nosturiteline on pystytetty etukäteen ja raaka-aineet ovat saatavilla. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi 5 asunnon rivitalo kaikkine putkineen ja sähkötoineen sekä ilmakanavineen pystyttäisiin rakentamaan alle kuukaudessa. Tavallisella elementtimentelmällä voidaan keskimääreisesti 5 asunnon rivitalo saada valmiiksi noin 6 kuukauden aikana. (Contour Crafting 2015d).

Yhtenä mahdollisuutena Contour Craftingin käytölle ovat väliaikais asuukset. Vuonna 2014 maailmassa oli 37 miljoonaa henkilöä, jotka olivat joutuneet jättämään kotinsa useimmiten sodan taikka luonnonkatastrofin takia. Tämänhetkiset väliaikaisratkaisut asutukseen ovat 50-60m² pinta-alaltaan olevia valmISRakennuksia joiden valmistaminen maksaa noin 3.000\$. Kun mukaan lasketaan vielä rahtikustannukset, sekä useimmiten vaikeakulkuinen maasto katastrofipaikalle nousevat hinnat entisestään ja toimittaminen hidastuu. Contour Craftingin avulla pystytään nopeasti rakentamaan turmapaikalta löytyvistä raaka-aineista väliaikaisasutuksia. Paikalle tulee kuljettaa ainoastaan nosturilaitteisto, sekä tulostuspää joiden toiminnan kokoamisen jälkeen hoitavat tietokoneet mikä vapauttaa avustustyöntekijät tärkeämpiin tehtäviin, kuten esimerkiksi järjestämään puhuttua veden jakelua. (Contour Crafting 2015e).

On arvioitu, että 17% koko mailman asumuksista on yksihuoneisia majoja. Tämä tarkoittaa sitä, että mailman 7 miljardista ihmisestä noin 1,2miljardia ihmistä asuu hökkelilylissä. Tällaisten asumusten määrä ei ole tulevaisuudessa laskussa, vaan kasvuvauhti kiihtyy entisestään. On kaukainen ajatus, että nämä kaikki yli miljari ihmistä saataisiin asutettua oikeisiin asuntoihin, mutta CC tarjoaa edullisen avun edes osalle tästä määrästä. Jo yhdellä tulostimella saadaan viikossa aikaan entistä parempi asutus kymmenille, jos ei jopa sadalle ihmisille. (Contour Crafting 2015f).

9. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimusaineiston keruu osoittautui odotettua hankalammaksi tutkimusaiheen uutuuden takia. Tutkimuskysymyksiä oli useasti sivuttu eritieteenalojen lehdissä, sekä painetuissa kirjoissakin, mutta varsinaista tutkimusta 3D-tulostamisesta on ilmestynyt hyvin vähän. Vaikka pääosin artikkeleista ja muista julkaisuista koottu tieto olikin hyvin hajanaista ja rikkonaista, oli se kaikin puolin yhdensuuntaista ja johdonmukaista. Tästä johtuen johtopäätösten tekemistä niiden pohjalta voidaan pitää luetettavana.

3D-tulostus on tällä hetkellä murtamassa vahvasti toimitusketjuja. Vielä on liian varhaista sanoa tuleeko teknologia koskaan murtamaan tänä päivänä valloillaan olevia massatuotannon menetelmiä, vai jääkö se kenties ainoastaan nykyiselle tasolle tiettyjen alojen käyttöön. Mikäli teknologian kehityksen suunta jatkuu kuitenkin nykyisellään, tullaan tulevaisuudessa varmasti elämään maailmassa, missä miltein jokaisesta kotitaloudesta ja tuotannonalan yrityksestä löytyy oma 3D-tulostin.

3D-tulostus tulee myös varmasti muuttamaan tuotantoa muutenkin kuin vain tuotantotapaa. 3D-tulostuksen mahdollistama tuotteiden yksilöinti tulee vaikuttamaan selvästi siihen miten pitkälle asiakkaat tulevaisuudessa voivat muokata nykyään standardi tuotteita oman yrityksensä vaatimuksia vastaaviksi.

Tulostusmenetelmien kehittyminen tarjoaa muitakin mahdollisuuksia kuin ainoastaan hajautettua tuotantoa ympäri maailmaa ja puolivalmiiden moduulien varastoimisen. Nykyinen massatuotanto kuormittaa ympäristöä raskaasti. Kyse ei ole ainoastaan tehtaiden tuotamista päästöistä, vaan myös korkeasta energiankulutuksesta, sekä tuotteiden ympäristöhaitoista ja kierrätysongelmista. 3D-tulostuksella pystytään pidentämään tuotteiden elinkaarta, kun varaosien valmistus helpottuu. Tämän lisäksi 3D-tulostaminen on tuotantomenetelmänä suhteessa hyvinkin energiatehokasta. Myös kuljetusmatkojen lyhentymisen aikaansaa merkittäviä päästövähennyksiä.

3D-tulostus mahdollistaa myös pienyrityksien tulon markkinoilla huomattavasti alentuneiden investointien vuoksi. Siinä missä tänä päivänä tarvitaan joko oma tehdas taikka ulkopuoliselle yritykselle ulkoistettu valmistus, voi tulevaisuudessa pienyrityksiä itse omissa tiloissaan valmistaa omat tuotteensa.

Puhuttaessa 3D-tulostamisen mahdollisuudesta ei tule myöskään unohtaa sen mukanaan tuomia mahdollisuuksia vaativilla aloilla kuten lääketieteessä. 3D-tulostaminen on tuonut mukanaan aivan uudenlaisia mahdollisuuksia esimerkiksi proteesien valmistuksessa. Teknologia on mahdollistanut myös uusien elimien, kuten esimerkiksi maksan valmistamisen siirteen saajan omista soluista.

Jotta 3D-tulostamisessa päästäisiin massatuotannon tasolle, tulee eräitä ongelmia vielä kuitenkin ratkaista. Tänä päivänä massatuotannon aloittaminen vaatii suunnattomia resursseja, kun uusia 3D-tulostimia pitäisi hankkia tuotantomääristä riippuen satoja, jos ei jopa tuhansia. Tulostusmenetelmien nopeutta tulee myös kehittää, sillä nykyisellä vauhdilla tuotteita valmistuu ainoastaan kymmenesosa millin kerrospaksuudella. Näihin ongelmiin ollaan kuitenkin kokoajan kehittämässä uusia ratkaisuita, mikä edelleen nostaa 3D-tulostuksen tulevaisuudennäkymiä nykyisen massatuotannon korvaajana. Ongelmia aiheutuu myös oikeudenalalla, kun tekijänoikeuksien rajat muuttuvat entistäkin häilyvämmiksi ja patenttiloukkaukset yleistyvät.

3D-massiivitulostus on yksi uusimmista ja taloudellisesti kiinnostavimmista tulostuksen aloista. Tutkimukset osoittavat, että niin Contour Craftingillä, kuin D-Shape tulostuksellakin aikaa ja työtunteja saadaan säästettyä huomattavasti, turvallisuudesta puhumatta. Tämä kaikki tarkoittaa mittavia rahallisia säästöjä, joten voidaan jo tällä hetkellä pitää varmana, että seuraavan 10 vuoden aikana tulemme vielä näkemään yhä enenevässä määrin 3D-tulostettuja rakennuksia ja muuta infrastruktuuria. Se mikä mentelmä muodostuu vallitsevaksi, on vielä epäselvää, mutta varmana voidaan pitää sitä, että Contour Crafting ja D-Shape ovat ainakin tällä hetkellä pisimmälle kehittyneitä. Vaikka menetelmät eroavatkin suuresti toisistaan niin teknisesti kuin materiaaleiltaan noudattavat ne

samoja periaatteita kuin muutkin 3D-tulostimet. Suurimpana etuna ja erona voidaan tulostustekniikoiden välillä pitää sitä, että Contour Crafting näyttäisi suoriutuvat paremmin moderneista rakennusurakoista ilmanvaihtokanavineen ja sähkövetoineen. Sitä vastoin D-Shape tulostus näyttää menestyvän parhaiten karummissa oloissa johtuen siitä, että tulostuksessa tarvittavat raaka-aineet saadaan pääosin rakennuskohdetta ympäröivästä maastosta. D-Shape tulostuksen etuna karuilla alueilla voidaan pitää myös tulostimen helppoa kuljetettavuutta ja helppoa kasattavuutta.

Hinnaltaan tulostusmenetelmät noudattelevat samoja raja-arvoja massiivitulostuksessa kuin muissakin 3D-tulostuksen valmistusmenetelmissä. Laskennallisesta voidaan todeta 3D-tulostuksen olevan 2-5 kertaa halvempaa kuin kilpailevat tuotantotavat. Tuotannon hinnanlasku voidaan tiivistää viiteen pääkohtaan:

1. Tuotannon automatisointi
2. Energiatehokkuus
3. Ylimenevän raaka-aineen vähentyminen
4. Työvoiman tarpeen vähentyminen
5. Välivarastoinnin tarpeettomuus

On todettava, että vaikka 3D-tulostus onin tuotantotapana muita tapoja edullisempi on sarjatuotannon käynnistäminen vielä tänä päivänä miltein mahdotonta korkeiden aloituskustannusten vuoksi. Suuna kehityksessä on kuitenkin oikea ja kun tekniikka muuttuu halvemmaksi ja helpommin saatavaksi yleistyvät 3D-tulostimet varmasti niin kodeissa kuin työpaikoillakin.

Johtuen aiheen uutuudesta on 3D-tulostuksen tulevaisuus vielä hämärän peitossa. Jotta varmasti voitaisiin sanoa kuinka suuria mahdollisuuksia teknologia tuo mukanaan, vaaditaan vielä suuri määrä tutkimusta ja teknologian kehitystä. Teknologia kuitenkin kehityy jo tänä päivänä huimaa vauhtia ja sen mahdollistamat uudet tuotteet yleistyvät päivä päivältä. Nähtäväksi jääkin, pystyykö 3D-tulostus murtamaan vallitsevat tuotantotavat ja tuotantoketjut.

10. YHTEENVETO

Tässä työssä etsittiin vastausta seuraaviin tutkimuskysymyksiin: mitä on 3D-tulostus, miten 3D-tulostus vaikuttaa toimitusketjuihin ja tuotantoon, sekä kuinka 3D-tulostamista voidaan tulevaisuudessa hyödyntää laajoissa rakennusprojekteissa. Tutkimuksessa käytettyä aineistoa tulkitsemalla näihin kaikkiin kysymyksiin löydettiin selvät vastaukset. Aluksi pyrittiin kattavasti selvittämään mitä 3D-tulostuksella tarkoitetaan ja sen historia johdettiin aina tulostuksen kehittamisestä tähän päivään. Seuraavaksi kuvattiin eri käytössä olevat tutkimusmenetelmät ja niiden edut sekä heikkoudet.

3D-tulostuksen vaikutusta tuotantoketjuun tutkittaessa oli tuotantoketjun määrittelemisen ensimmäinen tehtävä. Lyhyen pohjustuksen jälkeen punnittiin aineiston pohjalta erilaisia vaihtoehtoja siitä, mitä vaikutuksia teknologian kehityksellä ja yleistymisellä saattaa olla.

Tutkittaessa vaikutuksia varsinaiseen tuotantoon, olivat tutkittavat alat ensin rajattava, johtuen eri alojen suuresta määrästä. Teoriassa 3D-tulostusmenetelmin voidaan tulostaa niin leipä kuin auton moottorikin, joten alat pyrittiin rajaamaan ainoastaan sellaisiin, missä koettiin olevan eniten potentiaalia.

Eniten painoarvoa tutkielmassa annettiin 3D-massiivitulostukselle. Eri teknisten vaihtoehtojen jälkeen päädyttiin tarkastelemaan ainoastaan Contour Craftingia ja D-Shape tulostusta. Tekniikat eroavat huomattavasti toisistaan niin teknisen toteutuksen kuin materiaalienkin suhteen. Teknisen selostuksen jälkeen pyrittiin tarkastelemaan valmistusmenetelmien tulevaisuuden näkymiä, sekä mahdollisia käyttökohteita.

Mahdolliselle jatkoselvitykselle on suurta tarvetta aina sitä mukaa kun teknologia yleistyy ja kehittyy. Teknologian ja laitteiden kehitys tarjoaa kokoajan uusia mahdollisuuksia ja tästä syystä tutkimuksen jatkuva tekeminen on tärkeää, jotta pysytään uusimpien teknologioiden ja mahdollisuuksien tasolla.

LÄHDELUETTELO

- 3D Printing Industry (2014)a. 3D Printing Basics: The Free Beginner's Guide [Verkkodokumentti]. [Viitattu 2.10.2014] Saatavissa: <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/global-effects-manufacturing-economy/>
- 3D Printing Industry (2014)b. 3D Printing Competitive Intelligence Report: Mass Production using Additive Manufacturing? Yes, Says a New Research Collaboration. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 2.10.2014]. Saatavissa: <http://3dprintingindustry.com/2013/12/02/mass-production-using-additive-manufacturing-yes-says-new-research-collaboration/>
- 3DPrint.com (2015). Renderings & Details Unveiled for Extraordinary 3D Printed Home in New York [Verkkodokumentti]. [Viitattu 21.5.2015]. Saatavissa: <http://3dprint.com/59753/d-shape-3d-printed-house-ny/>
- AIPWorks (2014). 3D-tulostimen toimintaperiaate. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 22.10.2014]. Saatavissa: http://www.aipworks.fi/3dtulostimen_toiminta
- Autere, L. (2015). *Itsetiivistyvän betonin ominaisuudet rakennesuunnittelussa*. Metropolia Ammattikorkeakoulu: Rakennustekniikka
- Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V. & Pambaguian, L. (2014) *Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology*. Acta Astronautica, Vol. 93, pp. 432-444.
- Christopher, M. L. (1992). *Logistics and supply chain management*. Lontoo: Pitman Publishing.
- Contour Crafting (2015)a. FAQ [Verkkodokumentti]. [Viitattu 14.5.2015]. Saatavissa: <http://www.contourcrafting.org/faq/>
- Contour Crafting (2015)b. High Resolution Photographs [Verkkodokumentti]. [Viitattu 14.5.2015]. Saatavissa: <http://www.contourcrafting.org/high-resolution-photographs/>
- Contour Crafting (2015)c. Commercial Applications [Verkkodokumentti]. [Viitattu 20.5.2015]. <http://www.contourcrafting.org/environmental-aspects/>

- Contour Crafting (2015)d. Commercial Applications [Verkkodokumentti]. [Viitattu 20.5.2015]. Saatavissa: <http://www.contourcrafting.org/commercial-applications/>
- Contour Crafting (2015)e. Commercial Applications [Verkkodokumentti]. [Viitattu 20.5.2015]. Saatavissa: <http://www.contourcrafting.org/emergency-housing/>
- Contour Crafting (2015)f. Commercial Applications [Verkkodokumentti]. [Viitattu 20.5.2015]. Saatavissa: <http://www.contourcrafting.org/low-income-housing/>
- D-Shape (2014)a. The technology [Verkkodokumentti]. [Viitattu 21.5.2015]. Saatavissa: <http://www.d-shape.com/tecnologia.htm>
- D-Shape (2014)c. Uses. [Verkkodokumentti] [Viitattu 21.5.2015]. Saatavissa: <http://www.d-shape.com/applicazioni.htm>
- D-Shape (2014)b. Radiolaria [Verkkodokumentti]. [Viitattu 21.5.2015]. Saatavissa: <http://press.d-shape.com/index.php?flag=2>
- Encyclopedia Britannica (2014). 3D printing [Verkkodokumentti]. [Viitattu 22.9.2014]. Saatavissa: <http://www.britannica.com.proxy.tritonia.fi/EB-checked/topic/593719/3D-printing>
- Kelly, J. S. & Lindblom, B.S. (2006). *Scientific Examination of Questioned Documents*. Toinen painos. Florida: Taylor & Francis Group. ISBN 978-0-8493-2044-6
- Khoshnevis, B. & Bekey, G. (2015). Automated Construction using Contour Crafting – Applications on Earth and Beyond [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.5.2015]. Saatavissa: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build02/PDF/b02105.pdf>
- La Londe, Bernard J. and James M. Masters (1994). Emerging Logistics Strategies: Blueprints for the Next Century. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 24: 7, 35-47.
- Lipson, H. & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The New World of 3D Printing*. John Wiley & Sons. ISBN 978-1-118-35063-8.
- Mansourov Nikolai & Campara Djenana (2011). *System Assurance: Beyond Detecting Vulnerabilities*. Massachusetts: Morgan Kaufmann Publishers. ISBN 978-0-12-381414-2

- MHLnews (2014). How 3-D Printing will Reshape Supply Chains [Verkkodokumentti]. [Viitattu 22.9.2014] Saatavissa: <http://mhlnews.com/technology-automation/how-3-d-printing-will-reshape-supply-chains>
- National Institute of Standards and Technology (2012). Robocrane [Verkkodokumentti]. [Viitattu 14.5.2015]. Saatavissa: <http://www.nist.gov/el/isd/ms/robocrane.cfm>
- Pegna, J. (1997) *Exploratory investigation of solid freeform construction*. Automation in construction, Vol. 5, No. 5, pp. 427-437.
- T. Rowe Price Connections (2013). Infographic: The History of 3D Printing [Verkkodokumentti]. [Viitattu 24.9.2014]. Saatavissa: <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/6262/Infographic-The-History-of-3D-Printing.aspx>
- Tampereen yliopiston viestintätieteiden yliopistoverkosto (2014). Viestinnän historiaa: Kirjapainon kulttuuri [Verkkodokumentti]. [Viitattu 24.9.2014]. Saatavissa: <http://viesverk.uta.fi/johdviest/viestistoria/kirjapaino.html>
- TechRepublic (2014). 10 industries 3D printing will disrupt or decimate. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 14.10.2014]. Saatavissa: <http://www.techrepublic.com/article/10-industries-3d-printing-will-disrupt-or-decimate/>
- The Economist (2012). The third industrial revolution [Verkkodokumentti]. [Viitattu 2.10.2014]. Saatavissa: <http://www.economist.com/node/21553017>
- The Huffington Post (2013). D-Shape Promises To Modernize New York's Shoreline Using 3D-Printing Technology [Verkkodokumentti]. [Viitattu 21.5.2015]. Saatavissa: http://www.huffingtonpost.com/2013/06/03/3d-printing-company-dshap_n_3367376.html
- Thre3D (2014). 3D Printing Processes [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.5.2015]. Saatavissa: <https://thre3d.com/how-it-works/3d-printing-process>
- Warszawski, A. & Navon, R. (1998) *Implementation of robotics in buildings: current status and future prospects*. Journal of Construction Engineering and Management, Vol.124, No.1, pp. 31-41.
- www.3ders.org (2014)a. China building world's largest 3D printer to construct houses [Verkkodokumentti]. [Viitattu 8.5.2015]. Saatavissa: <http://www.3ders.org/articles/20140625-china-building-world-largest-3d-printer-to-construct-houses.html>

www.3ders.org (2014)b. WinSun China builds world's first 3D printed villa and tallest 3D printed apartment building [Verkkodokumentti]. [Viitattu 8.5.2015]. Saatavissa: <http://www.3ders.org/articles/20140625-china-building-world-largest-3d-printer-to-construct-houses.html>

www.3ders.org (2013)c. D-Shape wins top prize in NYC Waterfront Construction Competition [Verkkodokumentti]. [Viitattu 21.5.2015]. Saatavissa: <http://www.3ders.org/articles/20130412-dshape-wins-top-prize-in-nyc-waterfront-construction-competition.html>