



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Tomi Malkki

3D-tulostamisen mahdollisuudet rakentamisessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Rakennusmestari (AMK)

Rakennusalan työnjohto

Opinnäytetyö

19.11.2020

Tekijä Otsikko	Tomi Malkki 3D-tulostamisen mahdollisuudet rakentamisessa
Sivumäärä Aika	45 sivua + 3 liitettä 19.11.2020
Tutkinto	Rakennusmestari (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennusalan työnjohto
Ammatillinen pääaine	Talonrakennustekniikka
Ohjaajat	Lehtori, Anu Ilander Työnjohtaja, Ari Piironen
<p>Opinnäytetyön aiheena oli 3D-tulostamisen mahdollisuudet rakentamisessa. Tavoitteena oli selvittää, minkälaista hyötyä 3D-tulostaminen tuo perinteisiin rakennustapoihin nähden sekä sen tulevaisuuden näkymiä. Työ toteutettiin tutkimalla eri verkkoaineistoja ja 3D-tulostukseen liittyvää kirjallisuutta. Opinnäytetyön tilaajana toimii MPI-Rakennus Oy sekä Savonlinnan PR-Urakointi Oy.</p> <p>Työ aloitettiin perehtymällä verkko- ja kirjallisuusaineistoon ja sitä kautta kartoitettiin 3D-tulostamisen nykytilaa rakentamisen työkaluna. Aineistosta kasattiin tietopaketti, jota eri rakennusalan toimijat voivat hyödyntää tulevaisuudessa hankinnoissaan. Työssä on myös esitelty 3D-tulostamiseen liittyvää perustason tietoa sekä termistöä. Lopussa on esitelty kolmen eri yrityksen tarjoamat 3D-tulostus mahdollisuudet rakentajille.</p> <p>Lopputuloksena voidaan todeta 3D-tulostuksen sisältävän runsaasti potentiaalia rakennusosalalla, mutta tulostusmateriaalien ja laitteistojen kehitys ei ole vielä sillä tasolla, että se pärjää kilpailussa nykypäivän rakennustekniikoita vastaan. 3D-tulostaminen tarjoaa mielenkiintoisen kehityssuunnan rakennusosalalla ja tällä hetkellä se onkin jatkuvan kehityksen kohteena.</p>	
Avainsanat	3D-tulostus, Rakentaminen, FDM-tekniikka

Author Title Number of Pages Date	Tomi Malkki Possibilities of 3D Printing in construction 45 pages + 3 appendices 19 November 2020
Degree	Bachelor of Construction Management
Degree Programme	Construction Site Management
Professional Major	Building Construction
Instructors	Anu Ilander, Principal Lecturer Ari Piironen, Site Manager
<p>The topic of the study is the possibilities of 3D printing in construction. The aim was to find out what kind of benefits 3D printing brings compared to traditional building methods as well as its future prospects. The study was carried out by researching various online materials and literature related to 3D printing. The study was commissioned by MPI-Rakennus Oy and Savonlinnan PR-Urakointi Oy.</p> <p>The study was started by getting acquainted with the online and literature material and thereby mapping the current state of 3D printing as a construction tool. An information package was compiled from the material, which can be used by various construction industry parties in future procurements. The study also introduces basic information and terminology related to 3D printing. The study introduces the 3D printing opportunities for builders currently offered by three different companies.</p> <p>To conclude, 3D printing has a lot of potential in the construction industry, but the development of printing materials and equipment is not yet at the level to compete against today's construction technologies. 3D printing offers another interesting direction in the construction industry and is currently undergoing continuous development.</p>	
Keywords	3D-printing, Building, FDM-technology

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta ja tavoite	1
1.2	Menetelmät ja rajaukset	1
2	3D-tulostamisen historia ja kehitys	2
2.1	Taistelu patenteista	2
2.2	Suurten massojen työkaluksi	3
2.3	Tehokkuuden lisääminen rakentamisessa	4
3	3D-tulostamisen periaatteet	6
3.1	Perinteinen paperitulostus	6
3.2	Toimintaperiaate 3D-tulostuksessa	6
3.3	3D-tulostustekniikat	7
3.3.1	FDM-tekniikka	8
3.3.2	SLA-tekniikka	9
3.3.3	SLS-tekniikka	10
3.4	3D-tulostamisen edut	10
4	Suunnittelusta toteutukseen	12
4.1	Yleistä	12
4.2	3D-mallinnus	13
4.3	Mallin viipalointi	13
4.4	Tulostusvaihe	14
4.5	Tulosteen viimeistely	15
4.6	3D-tulostamisen rajoitukset	16
5	Materiaalit	18
5.1	Yleisesti materiaaleista	18
5.2	Muovit	18
5.3	Metallit	18
5.4	Hybridiseokset	19
5.5	Sementtipohjaiset	20
6	Tulosteen rakenne	21

6.1	Materiaalin optimointi	21
6.2	Kennorakenteet	22
6.3	Hybridirakenne	23
7	Muutokset rakentamisen eri osapuolille	24
7.1	Arkkitehdit	24
7.2	Rakennesuunnittelijat	25
7.3	Rakennustuotanto	26
7.4	Tilaaajat	27
8	3D-tulostamisen käyttökohteita rakentamisessa	27
8.1	Tilanne vuonna 2020	27
8.2	Apis Cor	28
8.3	Cobod	30
8.4	Yingchuang Building Technique (Shanghai) Co. Ltd (Winsun)	32
9	Haasteet rakentamisessa	33
9.1	Tekniset haasteet	33
9.2	Asenteelliset haasteet	34
9.3	Määräykset ja asetukset	35
9.4	Sementtipohjaiset materiaalit	36
9.5	Kustannukset	38
10	Pohdintaa rakennusten tulostamisesta	39
11	Yhteenveto	40
	Lähteet	42
	Liitteet	
	Liite 1. Apis Cor, Dubai projekti	
	Liite 2. Sementtipohjaisen 3D-tulostusmassan kustannusarvio	
	Liite 3. Yingchuang Building Technique (Shanghai) Co. Ltd (Winsun)	

Lyhenteet

FDM

Fused deposition modelling. Tulostustekniikka, jossa materiaalia pursotetaan kerroksittain ja näin muodostaen valmiin objektin. Yleisin käytössä oleva tekniikka 3D-tulostimissa.

Open Source

Lisenssimalli, joka antaa luvan vapaasti käyttää, muokata ja jakaa tuotteen suunnitelmia tai sen sisältöä. Lisenssin alla julkaistu materiaali on usein ilmainen käyttäjille.

RepRap

Hanke, jonka tarkoituksena on valmistaa itseään monistava laite. Hankkeen tulokset ovat kaikkien saatavilla ilmaiseksi. Merkittävien innovaatioiden lähde 3D-tulostamisen parissa.

SLA

Stereolithography Apparatus. Tulostustekniikka, jossa tehokkaan laserin avulla kovetetaan nestemäistä hartsia kerroksittain.

SLS

Selective Laser Sintering. Tulostustekniikka, jossa tehokkaan laserin avulla kovetetaan jauhetta kerroksittain.

1 Johdanto

1.1 Työn tausta ja tavoite

Opinnäytetyö lähti liikkeelle omasta ajatuksesta selvittää 3D-tulostamisen mahdollisuuksista rakennusalalla. Työn tilaajiksi sain MPI-Rakennus Oy:n sekä Savonlinnan PR-Urakointi Oy:n. Molemmat yritykset ovat pitkään toimineet rakennusalalla, ja heitä erityisesti kiinnosti aiheessa taloudelliset mahdollisuudet.

Työn tavoitteena on selvittää 3D-tulostamisen nykytila, sen mahdollisuudet ja tulevaisuuden näkymät. Työ on kirjoitettu rakennusalan tarpeiden näkökulmasta. Koska aihe on melko uusi rakennusalalla ja yritysten tietämys yleisesti 3D-tulostamisesta ovat vajavaiset, niin päätin lisätä työhön myös tarvittavat perustiedot 3D-tulostamisesta ja siihen liittyvistä eri tekniikoista. Tekniikka tulostamisen ympärillä menee kovaa vauhtia eteenpäin, joten työ kuvaa tilannetta vuonna 2020.

1.2 Menetelmät ja rajaukset

Tutkimuksen taustamateriaalina ovat useat alan julkaisut, tutkimukset sekä uutiset. Aiheena 3D-tulostaminen on erittäin tekninen, joten työssä on pyritty kansantajuisen lähestymiseen menemättä liian syvälle teknisiin termeihin. Työ on läpileikkaus aiheesta, minkä avulla saa peruskäsityksen mistä 3D-tulostamisessa on kysymys ja miten sitä voisi hyödyntää rakentamisessa. Kaikki työssä olevat esimerkkikohteet on toteutettu ulkomailla. Suomesta ei kirjoitushetkellä vielä löytynyt yhtään kohdetta, jossa 3D-tulostustekniikkaa olisi hyödynnetty rakentamisen apuna.

2 3D-tulostamisen historia ja kehitys

2.1 Taistelu patenteista

Ensimmäiset kirjoitetut viitteet 3D-tulostuksen olemassaolosta ovat 1970-luvulta. Tutkija David E.H. kirjoitti säännöllisiä kolumneja New Scientist -lehteen ja yhdessä näistä hän visioi konseptin koneesta, jolla pystyisi tulostamaan käyttöesineitä. 1980-luvulle tultaessa visiot alkoivat saada konkretiaa, jolloin tutkija Hideo Kodama teki ensimmäisen patentti hakemuksen liittyen 3D-tulostamiseen. Kyseinen hakemus kuitenkin hylättiin, koska hän ei pystynyt saattamaan patenttiprosessia määräaikaan mennessä valmiiksi. [1.]

Vuonna 1984 ranskalainen tutkija Alain le Mehaute ryhmänsä kanssa jatkoi tutkimustyötä 3D-tulostamisen parissa. Ryhmä jätti patenttihakemuksen stereolitografia (SLA) -laitteesta, mutta Ranskan patenttilaitos hylkäsi sen, koska heidän mielestä kyseisellä patentilla ei ollut riittävästi kaupallista potentiaalia. Kolme viikkoa myöhemmin kyseisestä tapahtumasta amerikkalainen tutkija Charles Hull jätti oman patenttihakemuksen SLA-tekniikasta paikallisille viranomaisille. Patentti hyväksyttiin vuonna 1986 ja näin hänestä tuli 3D-tulostamisen "keksijä". [2.]

Hänen yhtiönsä 3D Systems toi markkinoille vuonna 1988 ensimmäisen kaupallisen 3D-tulostimen nimeltä SLA-1. Vaikka laite on vuodelta 1988, niin se vastaa kokoluokaltaan nykyajan kotikäyttöön soveltuvia laitteita. Nykyään 3D Systems on maailman suurimpia 3D-tulostamiseen keskittyneitä yrityksiä ja heillä on hallussaan useita patenteja koskien 3D-tulostus tekniikoita. Ensimmäisiä tulostettuja objekteja oli silmän huuhtonakuppi. Kuvassa 1 on SLA-1 tulostin. [2.]



Kuva 1. SLA-1 tulostus valmiudessa. [2.]

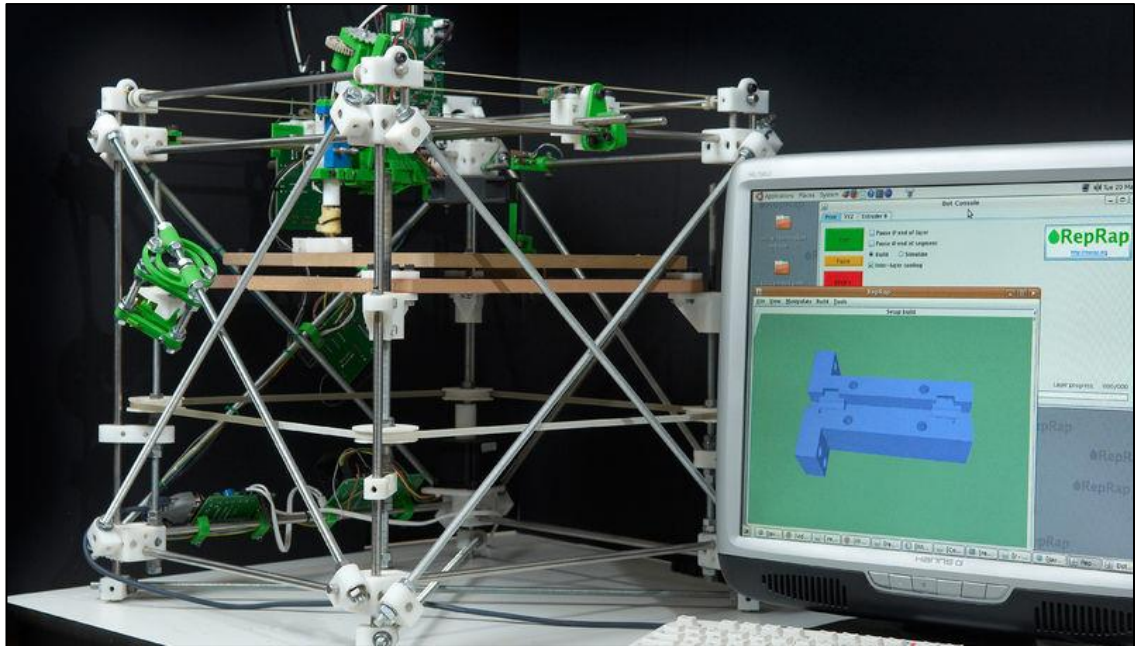
2.2 Suurten massojen työkaluksi

1980-90-lukujen aikana, 3D-tulostaminen oli harvojen käytössä. Laitteiden kalliit hinnat ja patentit pitivät ne suurten massojen ulottumattomissa. Jokainen yritys suojeli patenttejaan ja haastoi oikeuteen muita yrityksiä rojaltien toivossa. Toiminta ei eronnut tämän päivän teknologiayritysten toiminnasta. 2000-luvulle tultaessa patenttien voimassaoloajat alkoivat kuitenkin raueta toistensa perään. Noin 225 vanhinta patenttia ja 16 merkittävää 3D-tulostuspatenttia vanhenivat vuosina 2002 - 2014. [3.]

Eryityisesti "Fused deposition modelling" (FDM) tulostamisessa käytetty tekniikka ja sen patenttien raukeaminen mahdollisti 3D-tulostamisen yleistymisen massojen työkaluna. Myös elektroniikkakomponenttien hintakehitys vauhditti 3D-tulostimien markkinoille tuloa.

Vuonna 2004 tohtori Adrian Bowyer käynnisti RepRap-nimisen hankkeen, jonka tarkoituksena oli luoda "open source" periaatteen mukainen 3D-tulostin. Tulostin pystyi tulostamaan suurimman osan sen vaatimista osista ja näin ollen monistamaan itsensä. Tämän hankkeen ansiosta ihmisillä oli mahdollisuus päästä käsiksi teknologiaan, joka ennen oli tarkoin varjeltu salaisuus. Sittemmin olemme nähneet monia kaupallisia yrityksiä, jotka perustuvat RepRap hankkeeseen. [4.] Kuvassa 2 on RepRap "Darwin", ensimmäinen versio, joka pystyi tulostamaan noin puolet siinä käytetyistä osista. Nykyään laitteesta on tehty tuhansia eri variaatioita, joiden esikuvana laite on toiminut.

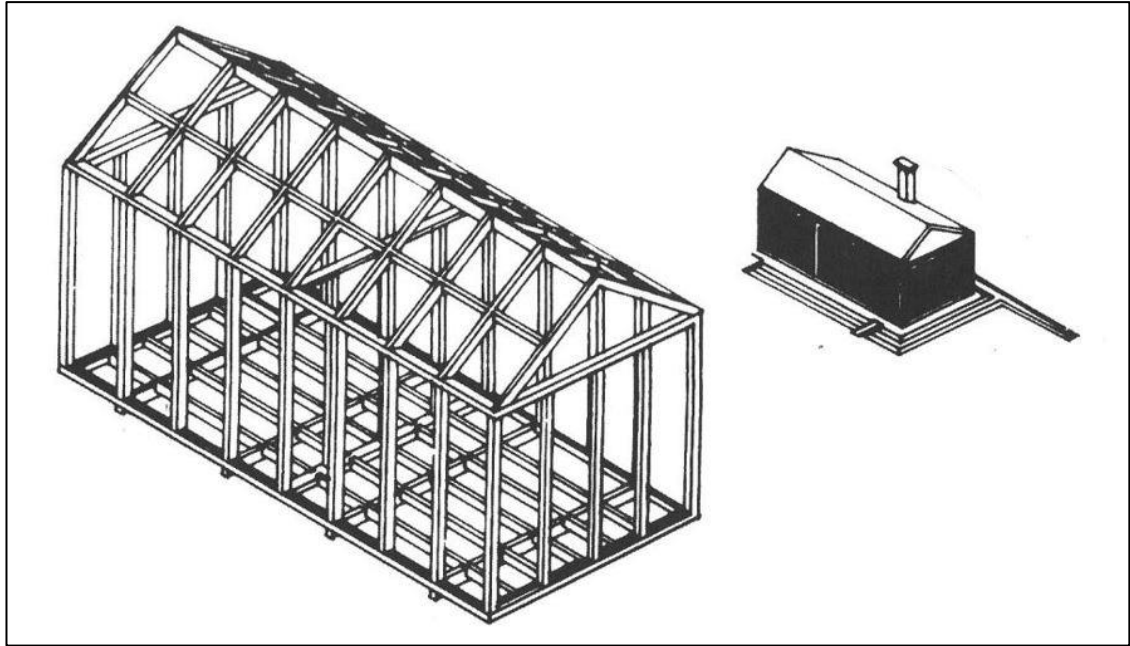
3D-tulostaminen ja teknologia sen ympärillä todistavat hyvin sen, miksi patentit ovat kehityksen käsijarruja ja avoimuus on kehityksen valtatie.



Kuva 2. Darwin 1.0 tulostamassa siinä käytettävää osaa. [4.]

2.3 Tehokkuuden lisääminen rakentamisessa

Kysynnän kasvaessa, tuotannon tehostaminen on ensimmäinen asia, jota yritykset ja valtiot alkavat pohtia paikatakseen vajetta. Esimerkiksi Suomessa 1940-luvulla, toisen maailmansodan jälkeen oli suuri vaje asunnoista. Hirsirakentaminen oli ennen sotia yleisin tapa valmistaa pientaloja, mutta se oli hidasta ja tehotonta rakentamista. Jotta kysyntään pystyttiin vastaamaan, niin Suomessa mallia päätettiin ottaa Yhdysvalloista, jonne rakennetut siirtokunnat oli toteutettu puurankatekniikalla. Siirtolaisten majoitukset valmistettiin Englannissa ja rahdattiin laivoilla kohdemaahan. Tämä oli aikanaan mullistava keksintö rakentamisessa. [5.] Vastaavalla rakennustekniikalla Suomeen rakennettiin tuhansia pientaloja, jotka saivat kansankielessä nimen rintamamiestalo. Kuvassa 3 on rintamamiestalon esikuva.



Kuva 3. Rintamamiestalon prototyyppi. [5.]

Tultaessa 1960-luvulle kaupungistuminen jatkoi kasvuaan. Tähän asti kerrostalorakentaminen oli pitkälti koostunut muuratuista seinistä ja paikallavaletuista betonirungoista. Tämä oli myös hidasta ja työlästä rakentamista. Tuotannon tehostamiseksi kehitettiin betonielementti. Aluksi elementit valmistettiin työmaalla, mutta kuljetus- ja nostokaluston kehityksen myötä tuotanto siirrettiin tehtaisiin. Tämä yli 60-vuotias tekniikka on edelleen käytetyin tapa valmistaa kerrostaloja Suomessa.

2000-luvulle saavuttaessa on maailmanlaajuinen asuntokriisi jatkanut kasvuaan. Tonttimaan arvo on noussut tasaisesti maailman metropoleissa, joten tarvetta on erityisesti edullisille ja kompakteille asunnoille. Ongelma ei vielä näy Suomessa, koska väkilukuun suhteutettuna meillä on paljon tilaa asukasta kohden ja muutenkin Suomi kuuluu maailman vauraimpien maiden joukkoon, joten rakennekustannuksissa ei tarvitse säästellä. Uusia innovaatioita on kuitenkin alkanut tulla rakentamiseen ja yksinäistä on 3D-tulostaminen.

Useat yritykset ovat lähteneet kehittämään 3D-tulostusta rakentamisen tehostamiseksi. 3D-tulostamisen myötä työmaille tulee uusi tapa toimia, mikä on ollut pitkään käytössä muilla teollisuuden aloilla, nimittäin automaatio. Tällä hetkellä ei ole vakiintuneita käytäntöjä siitä, miten tulostaminen suoritetaan tai mitä materiaaleja käytetään. Vuonna

2020 elämmekin vielä aikaa, jolloin 3D-tulostamisen historiaa kirjoitetaan rakentamisen osalta.

3 3D-tulostamisen periaatteet

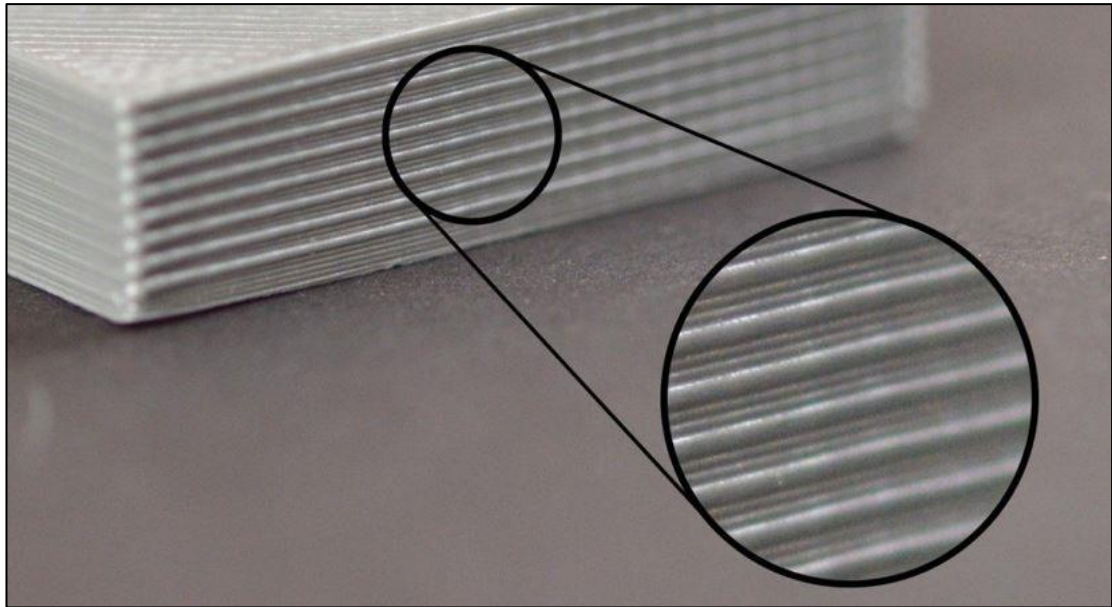
3.1 Perinteinen paperitulostus

Ensimmäinen asia mihin 3D-tulostamista yleensä verrataan, on perinteinen paperille tulostava mustesuihkutulostus. Paperitulostimet ovatkin toimintaperiaatteelta hyvin samanlaisia kuin 3D-tulostimet. Paperille tulostaessa käytössä on kaksi akselia, X ja Y. 3D-tulostamisessa käytössä on mukana kolmas akseli Z, mistä syntyykin suurin ero perinteisen- ja 3D-tulostamisen välillä. 3D-tulostin seuraa sille annettuja ohjeita samalla tapaa kuin paperitulostinkin, mutta 3D-tulostin luo useita kerroksia päällekkäin muodostaen fyysisen objektin. [6, s.11.] Kerrosten paksuudella voidaan vaikuttaa tulosteen laatuun aivan samalla tapaa, kuin pikseleiden määrällä vaikutetaan paperitulosteen laatuun. Kerrokset voivat olla myös väriltään ja muodoiltaan erilaisia, kuten kirjaimet paperilla.

3.2 Toimintaperiaate 3D-tulostuksessa

3D-tulostimet eivät leikkaa tai muovaa objekteja samalla tapaa kuin perinteisesti ihminen on tottunut työstämään esineitä. Valmistaminen kerroksittain avaa uusia mahdollisuuksia toteuttaa muotoja ja rakenteita. Tyypillinen tulostusprosessi etenee seuraavasti: Tulostimelle syötetään halutun objektin tai rakenteen koordinaatit. Tulostin seuraa näitä ja samalla ruiskuttaa, sulattaa tai kovettaa tulostusmateriaalia tietyn kuvion mukaan. Kun ensimmäinen kerros on kovettunut, tulostin palaa lähtöpaikkaan ja aloittaa uuden kerroksen valmistamisen. Tämä toistuu useita kertoja, kunnes ohuet kerrokset muodostavat valmiin kolmiulotteisen objektin. [6, s.12.]

Kuvassa 4 on perusperiaate, miten useista kerroksista muodostuu valmis objekti. Kerrosten paksuudella voidaan vaikuttaa valmiin tulosteen laatuun. Pienempi kerrospaksuus tuottaa tarkempia tulosteita. [31.]



Kuva 4. Valmiin 3D-tulosteen pinta. [31.]

3.3 3D-tulostustekniikat

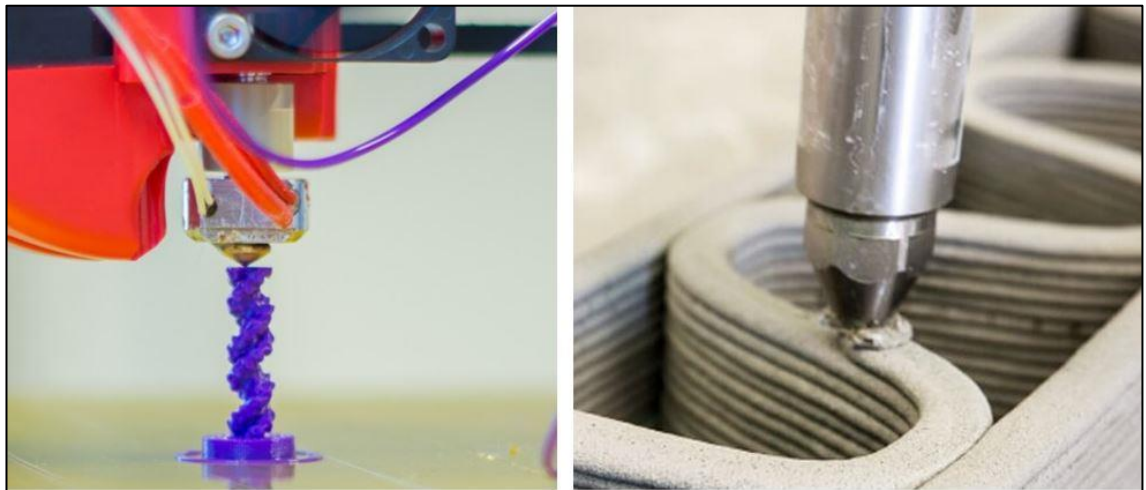
3D-tulostimista on tehty useita eri variaatioita. Niiden fyysinen koko vaihtelee pöytämallista aina kuorma-auton kokoihin tulostimiin. Erityisesti rakentamisessa käytetyt tulostimet ovat kooltaan hyvinkin suuria, koska tulostettava pinta-ala voi olla useita neliömetrejä. Tulostustekniikoita ja materiaalejakin on kymmeniä erilaisia. Tulostimet voidaan karkeasti jakaa teollisuus- ja kotikäyttöön soveltuviin malleihin. Teollisuuden vaatimukset laitteistolle ovat huomattavasti kovemmat ja ne ovatkin usein suunniteltu tiettyyn tulostustarpeeseen. Materiaalivalikoima on myös huomattavasti laajempi teollisuustulostimissa.

Tässä työssä esitellään kolme yleisintä tulostustekniikkaa, FDM, SLA ja SLS -tulostus. Pääpaino on kuitenkin FDM-tekniikassa, koska sillä on tällä hetkellä eniten käyttöä rakennusosalalla. Kyseisistä tekniikoista on useita eri variaatioita, mutta peruseräpäätteet tulevat hyvin esille näiden kolmen esittelyllä. Kaikille tekniikoille kuitenkin löytyy käyttökohteita rakennusosalalta.

3.3.1 FDM-tekniikka

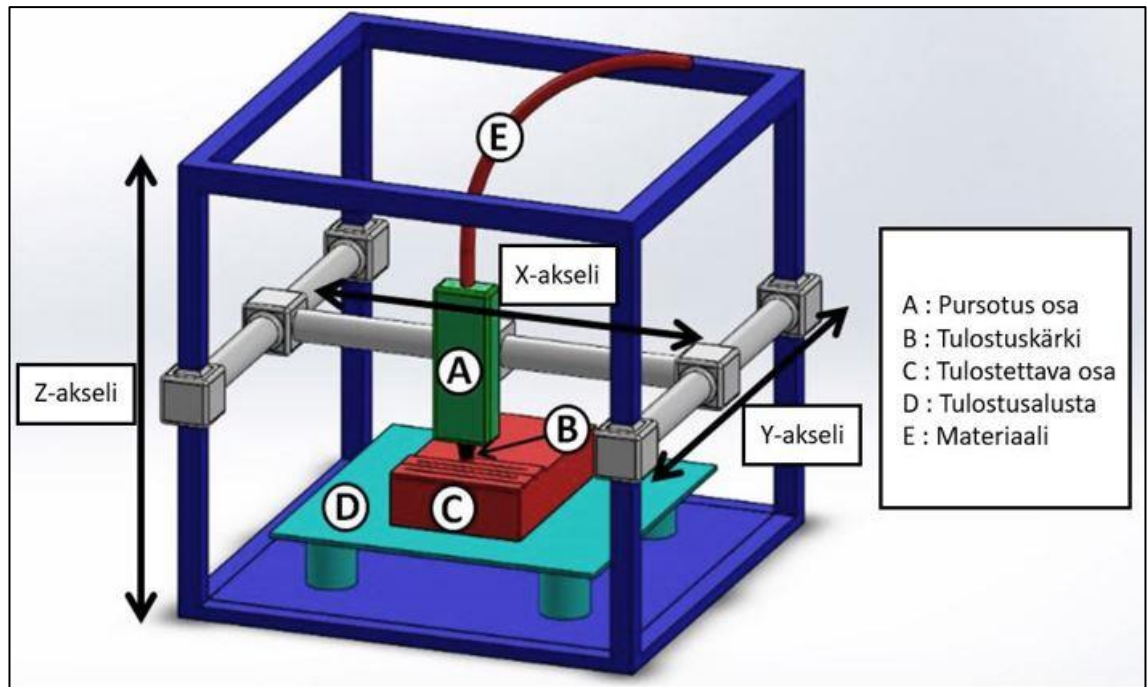
FDM-tulostimen periaate on samanlainen kuin kuumaliimapistoolin. Siinä pienen suuttimen lävitse pursotetaan sulaa massaa kerroksittain. Erona on tietokoneohjattu tulostuskärki, joka noudattaa sille annettuja koordinaatteja. Valmis objekti muodostuu useista toisiinsa liimaantuneista kerroksista. [7, s.111.] Kerrospaksuudet vaihtelevat 0.2 mm aina 30 mm asti. Pöytätulostimien tulostuskärjen halkaisija on 0.2-1 mm, kun taas sementtitulostimessa se on 10-50 mm. [32, 33.]

Rakennusalalla käytetyissä tulostimissa käytetään sementtipohjaista massaa, jota pursotetaan samaan tapaan kerroksittain. Massa valmistetaan erillisessä sekoittimessa, josta se syötetään tulostuskärkeen. Sementtipohjaista massaa ei tarvitse kuumaliimapistoolin tapaan lämmittää. Kuvassa 5 on muovi- ja sementtipohjaisen massan pursotukseen soveltuvat tulostuskärjet.



Kuva 5. Erikokoisia tulostinkärkiä. [32, 33].

Tulostuskärki on kiinnitetty kehikkoon, joka mahdollistaa tulostimen liikkeitä 3-akselin suuntaisesti. X- ja Y-akselit hoitavat liikkeitä vaakatasossa ja Z-akseli pystysuuntaiset liikkeitä. Tulostimen kehikon kokoa voidaan kasvattaa, mikä on tärkeä ominaisuus rakentamista ajatellen. [7, s.111.] Akseleita ohjataan askelmoottoreilla, jotka saavat ohjeet tietokoneelta. Ohjeet tulevat G-koodimuodossa, joka on yleisesti käytetty koodikieli tietokoneohjatuissa työkaluissa. Peruskäyttäjän harvoin tarvitsee muuttaa tätä automaattisesti generoitavaa koodia. Kuvassa 6 on peruseriaate miltä tulostuskehikko näyttää ja tulostimen peruskomponentit.

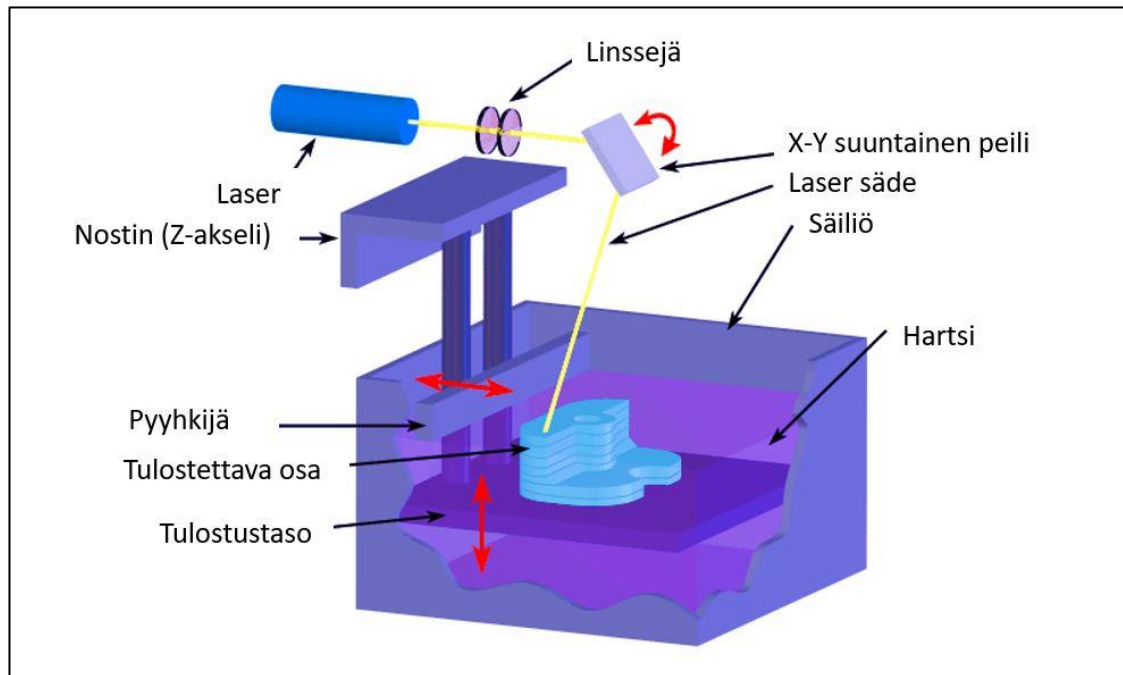


Kuva 6. Tyypillinen esimerkki FDM-tulostimesta. Kehikon etuna on skaalautuvuus moneen eri kokoluokkaan. [34.]

3.3.2 SLA-tekniikka

SLA-tulostin muodostaa objektit laservalon ja valoherkän hartsipohjaisen nesteen avulla. Laservalo valottaa tulostusalustalle objektin kerroksittain. Kerrosten välissä tulostusalusta nousee ylöspäin ja seuraava kerros voidaan valottaa. Prosessi jatkuu, kunnes objektin kaikki kerrokset on luotu. Tulostimessa on käytössä ainoastaan pystysuuntainen Z-akseli. [8.] SLA-tekniikka on huomattavasti monimutkaisempi kuin FDM tekniikka, mutta se on tulostustarkkuudessa omassa luokassaan. Kerrospaksuus voi olla jopa 0,05 mm. Tulostuksen jälkeen objekti siirretään vielä vahvistumaan voimakkaan UV-valon alle, jotta se saavuttaa lopullisen lujuuden. Kuvassa 7 on SLA-tulostimen perusperiaate.

SLA-tulostusta ei voida hyödyntää rakennusalalla tuotannolliseen toimintaan. Tämä johtuu käytetystä materiaalista sekä tulostustekniikasta. Sen hyödyt tulevat esille enemmän suunnittelupuolella. SLA-tekniikalla voidaan luoda tarkkoja pienoismalleja rakennuskohteista ja näin ollen tutkia esimerkiksi rakenteiden käyttäytymistä eri tuulo-olosuhteissa. Tekniikka on parhaimmillaan suunniteltaessa monimutkaisia mekaanisia laitteistoja sekä näiden prototyypppejä.



Kuva 7. SLA tulostimen kokoa on huomattavasti hankalampi skaalata rakennusalan tarpeisiin sopivaksi. [35.]

3.3.3 SLS-tekniikka

Tekniikka on hyvin samanlainen kuin SLA:ssa, mutta nestemäisen hartsin tilalla on jauhemainen seos, joka sulatetaan kerroksittain tehokkaan laservalon avulla. Muista tekniikoista poiketen, SLS-laitteilla voidaan valmistaa myös metallisia objekteja. Myös toinen etu muihin tekniikoihin verrattuna on objektien valmistus ilman tukimateriaaleja. [9.] SLS-laitteet ovat kalleimpia laitteita mitä markkinoilla on tarjolla. Hintansa puolesta ne ovatkin pitkälti teollisuuden käytössä. Rakennusteollisuus voi hyödyntää laitteistoa pienten komponenttien valmistamiseen ja tuote kehitykseen.

3.4 3D-tulostamisen edut

3D-tulostaminen on lähtökohtaisesti kehitetty nopeuttamaan prototyyppien valmistusta eri teollisuuden aloilla. Nykyään 3D-tulostamalla voidaan myös valmistaa loppukäyttäjille suunnattuja tuotteitakin. Tuotannon nopeudessa 3D-tulostaminen ei kuitenkaan pärjää perinteisille valmistusmenetelmille, kuten ruiskupuristemuoteille, joilla suurin osa

kuluttaja käyttöön tulevista muovituotteista valmistetaan. [6, s.26.] Mutta tulostuslaitteiden tekninen kehitys ja hintakehitys kurovat vuosi vuodelta rakoa umpeen. 3D-tulostamisen yksi isoimmista eduista on mahdollisuus valmistaa komponentteja, joita perinteisin tuotantomenetelmin ei voida valmistaa. Kuvassa 8 näkyy lämmönsiirrin, joka on tulostettu yhdessä osassa. Millään muulla tekniikalla ei voida toteuttaa yhtä monimutkaista komponenttia. Tulosteen sisäinen rakenne voidaan suunnitella tarkoin. Tällä voidaan vähentää materiaalimenekkiä sekä optimoida tukirakenteiden sijainti. [36.]



Kuva 8. Metallijauheesta tulostettu lämmönsiirrin. [36.]

Toinen 3D-tulostamisen eduista liittyy yksilöllisyyteen. Perinteinen massatuotantolinjasto on optimoitu tuottamaan isoja määriä samoja tuotteita. Pienetkin muutokset tuotteissa vaativat suuria investointeja linjastoon. Yritykset joutuvatkin punnitsemaan tuottavuuden ja yksilöllisten tuotteiden välillä. [6, s.27.] Usein tuottavuus vie voiton. 3D-tulostaminen hämärtää tätä tuottavuuden ja yksilöllisyyden rajaa.

Aivan kuten perinteinen mustesuihkutulostin voi tulostaa tekstiä riippumatta sen sisällöstä ja pituudesta, niin 3D-tulostin tekee saman fyysisille objekteille. Ei ole merkitystä onko objekti pyöreä vai kantikas, niin voidaan se toteuttaa samalla laitteella. Tulostusaika luonnollisesti vaihtelee objektin koon mukaan, mutta se on toteutettavissa juuri niin kuin asiakas sen haluaa. 3D-tulostaminen myös vähentää kokoonpanolinjastojen tekemää työtä, koska tulostamalla voidaan toteuttaa ehjiä kokonaisuuksia.

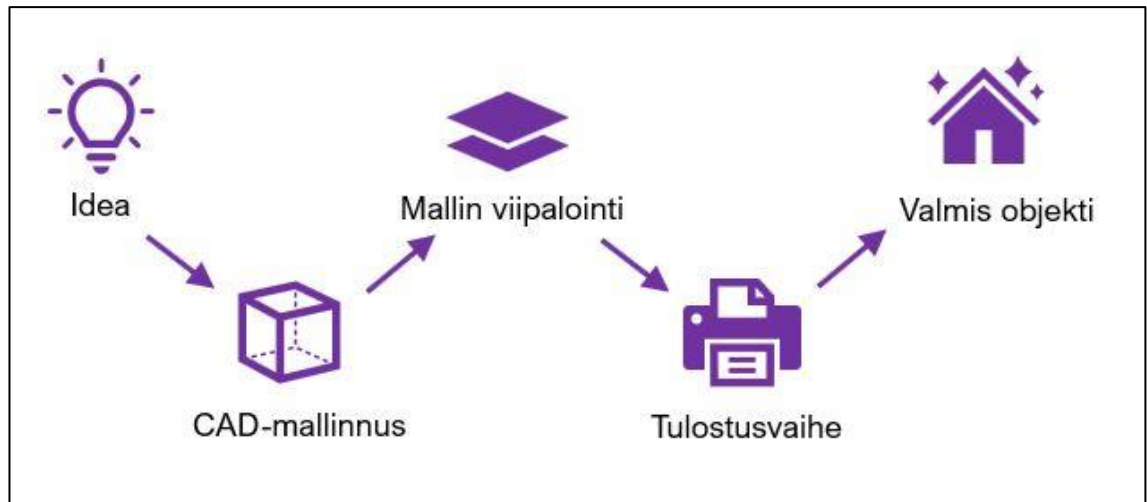
Rakentamisen kannalta tämä yksilöllisyys tuo aivan uuden vaikuttamisen mahdollisuuden asiakkaille miltä heidän kotinsa voi näyttää. On aivan selvää, miksi tämän päivän rakentamisessa vallitsee kantikkaat muodot. Niitä on kustannustehokkaampaa valmistaa tuotantolaitoksissa. 3D-tulostamisen myötä tulemme näkemään tulevaisuudessa enemmän pyöreitä ja yksilöllisiä muotoja arkkitehtuurissa. Ei ole merkitystä onko seinä suora vai kaareva, koska tulostamiseen käytetty aika on sama. Sanotaankin, että 3D-tulostaminen on jossain massatuotannon ja käsityön välimaastossa. [6, s.27.]

4 Suunnittelusta toteutukseen

4.1 Yleistä

Käytetystä tulostustekniikasta riippumatta, tulostusprosessi on hyvin samanlainen. Ensiksi objekti mallinnetaan tietokoneella. Seuraavaksi objekti viipaloidaan ja luodaan tulostimille koordinaatit minkä mukaan tulostetaan. Tulosteen suunnittelussa on tärkeää kuitenkin muistaa, että tulostin on lähtökohtaisesti ”tyhmä”. Eli tulostin tekee juuri sen, mitä sen on käsketty tekemään kirjaimellisesti. Suunniteltaessa malleja tuleekin pitää koko ajan mielessä tulostimen rajoitteet. Tulevaisuudessa esimerkiksi rakennusalalla voisi suunnittelijoiden apuna toimia 3D-kordinaattori, jonka tehtävä on ohjata suunnittelijoita ja tarkastaa suunnitelmat, jotta ne ovat tulostuskelpoisia. Ohjelmistot toki kehittyvät koko ajan ja tulevaisuudessa ne osaavat huomauttaa käyttäjää mahdollisista ongelmista ja riskitekijöistä, mutta ohjelmistotkin vaativat koulutusta. Kuvassa 9 on kaavio, missä on kuvattu tulostusprosessin suunnittelusta valmiiseen tulosteeseen.

Teollisuuden automaatiolaitteet yleisesti vaativat paljon kalibrointia toimiakseen halutulla tavalla ja 3D-tulostimet eivät tee poikkeusta tähän. Suunnittelun lisäksi tulostusprosessissa myös kalibrointi ja tulostamisen optimointi ovat tärkeitä osatekijöitä, kun ajatellaan tulostamisen laatua ja kustannustehokkuutta. 3D-tulostamisen myötä tulemme näkemään muutoksia työmaahenkilöstön toimenkuvissa sekä heidän vaatimuksissa.



Kuva 9. Prosessikaavio ideasta valmiiseen objektiin.

4.2 3D-mallinnus

3D-tulostusprosessi alkaa digitaalisesta suunnitelmasta tai mallista. Malli on digitaalinen kolmiulotteinen esitys kiinteästä objektista, joka koostuu polygoneista. Mallista luodaan tiedosto, joka pitää sisällään tiedon objektin geometriasta. Kaikki 3D-mallit koostuvat polygoneista, mitkä määrittävät mallin muodon. [7, s.8.]

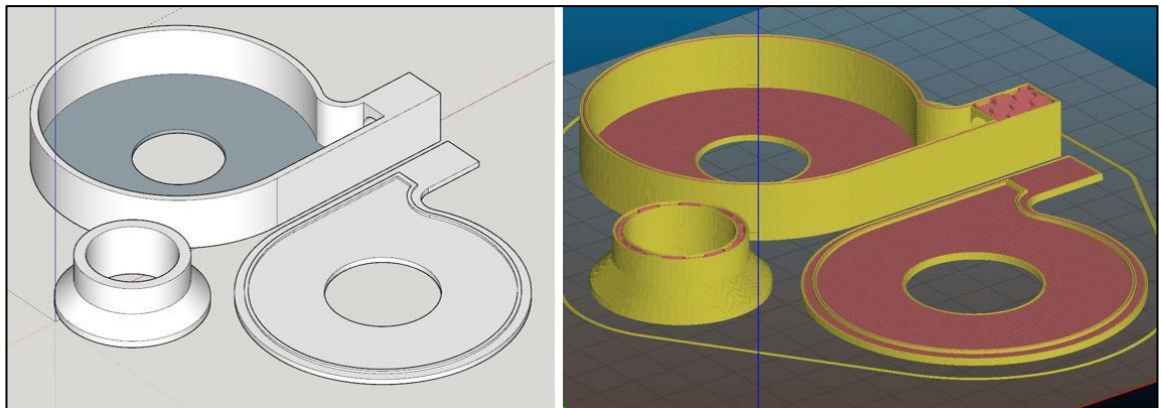
Mallit voidaan luoda tietokoneohjelmalla, 3D-skannerilla, valokuvaamalla tai jopa matemaattisia kaavoja hyödyntämällä. Yleisin tapa on kuitenkin tietokoneavusteinen mallintaminen (CAD). Varsinkin rakennusalalla, jossa kohteet ovat suuria ja eri alojen suunnittelijoiden tulee toimia yhdessä, on CAD mallinnus paras vaihtoehto. Mallinnus tapahtuu samalla periaatteella kuten nykyään käytössä olevien tietomallien. Tietomallit ovatkin tärkeässä roolissa 3D-tulostusta silmällä pitäen. Tietomallintaminen lähtökohteisesti pakottaa suunnittelijat ajattelemaan kolmiulotteisesti, koska koko suunnittelu-prosessi toteutetaan 3D-ympäristössä. Tietomallien sisällä on jo periaatteessa tarvittava tieto, jotta se voidaan 3D-tulostaa. Mallin tiedostomuotoa muuttamalla ja siirtämällä se toiseen ohjelmistoon viipaloitavaksi, saadaan aikaan 3D-tulostuskelpoinen tiedosto.

4.3 Mallin viipalointi

Viipalointi tarkoittaa 3D-mallin valmistelua tulostettaviin kerroksiin. Viipalointiohjelmilla annetaan myös muita ohjeistuksia tulostimelle kuten tulostusnopeus, kerrospaksuus,

sisäisenrakenteen täyttökuvio, tulostuslämpötila ja monia muita parametrejä. [7, s.10.] Tulostuskerrosten paksuus on suoraan verrannollinen tulostuksen laatuun ja siihen käytettyyn aikaan. Viipalointiohjelmat osaavat myös simuloida tulostustapahtuman. Tämän avulla käyttäjä voi analysoida tulostusta ja tehdä siihen parannuksia tarpeen mukaan. Onkin pitkälti käyttäjän varassa, miten hyvin tulostus onnistuu. Suunnittelijalta vaaditaan erityistä huolellisuutta viipalointivaiheessa, koska siinä määritetään ajoradat 3D-tulostimelle. Huolellinen viipalointi on avain onnistuneeseen lopputulokseen.

Koska 3D-mallit ovat lähtökohtaisesti onttoja, voidaan viipalointiohjelmalla generoida mallille sisäinen rakenne. Tätä sisäistä rakennetta kutsutaan täytöksi. Varsinkin rakentamisessa on tärkeää pystyä määrittämään tarkasti esimerkiksi ulkoseinän sisäinen rakenne. Mihin väliin tulee eristekerrokset, miten paksu on kantavaosa seinästä, ulko- ja sisäkuoren yhdistäminen toisiinsa. Materiaalien ja sitä kautta kustannusten optimointi on yksi merkittävistä eduista mitä 3D-tulostaminen tuo rakentamiseen. Kuvassa 10 on esimerkki miltä 3D-malli näyttää viipalointiohjelmassa.



Kuva 10. Vasemmalla 3D-mallinnettu objekti ja oikealla viipaloitu malli valmiina tulostukseen.

4.4 Tulostusvaihe

Kun 3D-malli on valmiina ja viipalointi suoritettu voidaan siirtyä tulostusvaiheeseen. Riippuen tulostimesta ja käytetystä tekniikasta on tulostimelle suoritettava erinäisiä tarkastustoimenpiteitä ja kalibrointeja. Yksi esimerkki tarkastustoimenpiteestä voi olla tulostuskärjen ja alustan välisen etäisyyden mittaus. Rakennusalan termein puhutaan korkomaailman tarkistuksesta. Tulostinta operoivan työmaahenkilön tulee myös varmistaa tulostusmateriaalin riittävyys sekä esteetön syöttö tuloskärjelle. Muutoin tulostus

on autonominen tapahtuma eikä vaadi operaattorin läsnäoloa. Yksi operaattori voi hoitaa useampaa tulostusta samanaikaisesti.

Tulostusaika riippuu hyvin monesta tekijästä. Mallin koko, tulostusnopeus, kerrospaksuus sekä siitä onko sisäinen rakenne ontto vai yhtenäinen. Sillä ei ole merkitystä onko tulostettava pinta suoraa vai kaarevaa. Kustannusten kannalta on erittäin suuri merkitys missä ajassa ja minkälaisella materiaalimenekillä tulostustyö hoidetaan. Tämä sama periaate pätee tavanomaisessakin rakentamisessa.

4.5 Tulosteen viimeistely

3D-tulosteen tyypillisesti tunnistaa objektin pinnassa olevista selkeistä kerroksista. Tämä johtuu tulostuksessa käytetystä tekniikasta. Esimerkiksi kokonaisen talon tulostamiseen tarkoitettu FDM-tekniikalla varustettu tulostin jättää hyvinkin selkeän kerrosjäljen. Kerrospaksuudella voidaan olennaisesti vaikuttaa lopullisen pinnanlaatuun. Kuvassa 11 on tyypillinen esimerkki siitä, miltä valmis tulostuspinta näyttää nykyisillä sementtipohjaista massaa käyttävillä laitteilla. Tulosteiden laadullinen parantaminenkin on tärkeä tutkimuskohde varsinkin rakennusalan tarpeita ajatellen.



Kuva 11. Codob-nimisen yrityksen tulostin tulostamassa seinäpintaa. [20.]

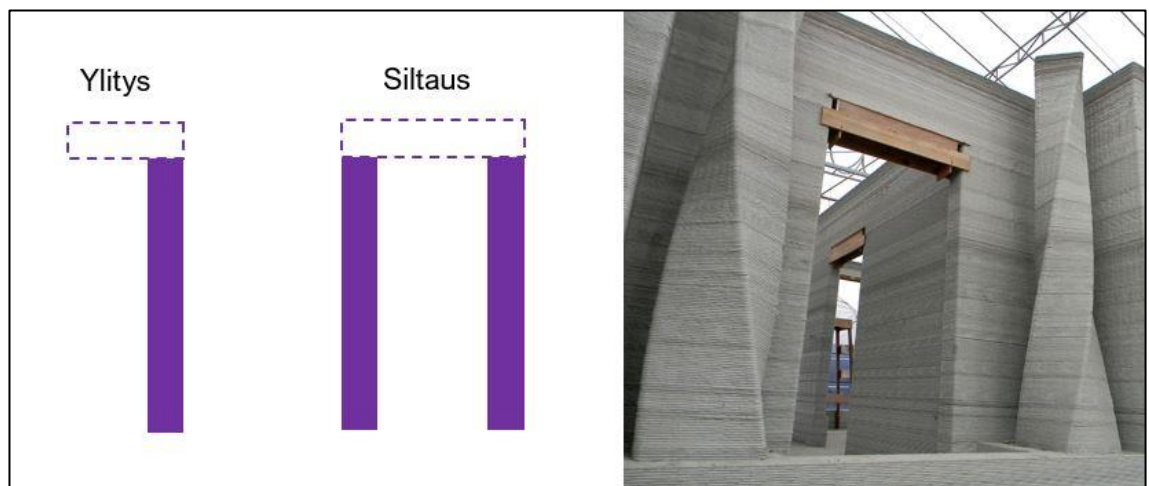
Mikäli sementtipohjainen tulostuspinta halutaan täysin sileäksi, niin se voidaan yli tasoittaa vastaavilla menetelmillä kuin normaalit betoniseinätkin. Muovia tulostettaessa

voidaan kerroksia yrittää peittää muovia sulattavilla aineilla, kuten asetonilla. On siis selvää, että tulosteiden pinnanlaatu ei vastaa nykyisiä suosituksia mitä esimerkiksi betonielementtiteollisuudessa on totuttu näkemään. Toisaalta aaltoilevaa pintaa voidaan pitää arkkitehtuurin puolesta mielenkiintoisena ja näin ollen jättää se näkyviin.

4.6 3D-tulostamisen rajoitukset

Vaikka ensisilmäyksellä tulisi vaikutelma, että 3D-tulostaminen on täydellinen ratkaisu tuotannon automatisointiin, niin on siltäkin rajoituksensa. Eri tulostustekniikoilla on omat rajoitteensa, mutta jos otetaan lähempään tarkasteluun FDM-tulostimet, koska ne vastaavat parhaiten rakentamisen tarpeita tällä hetkellä. Siinä jokainen tulostettava kerros tukeutuu alla olevaan kerrokseen. Mikäli halutaan tulostaa kerroksia, jotka eivät ole toistensa päällä tarvitaan erillinen tukirakenne, jonka päälle voidaan tulostaa. Yleisesti voidaan sanoa, että jos rakenteessa ylityksiä tai siltauksia, niin tarvitaan tukirakenne. Kuvassa 12 on periaate, mitä ylityksillä ja siltauksilla tarkoitetaan, sekä havainne Filippiineillä tulostetusta hotellista. [10.]

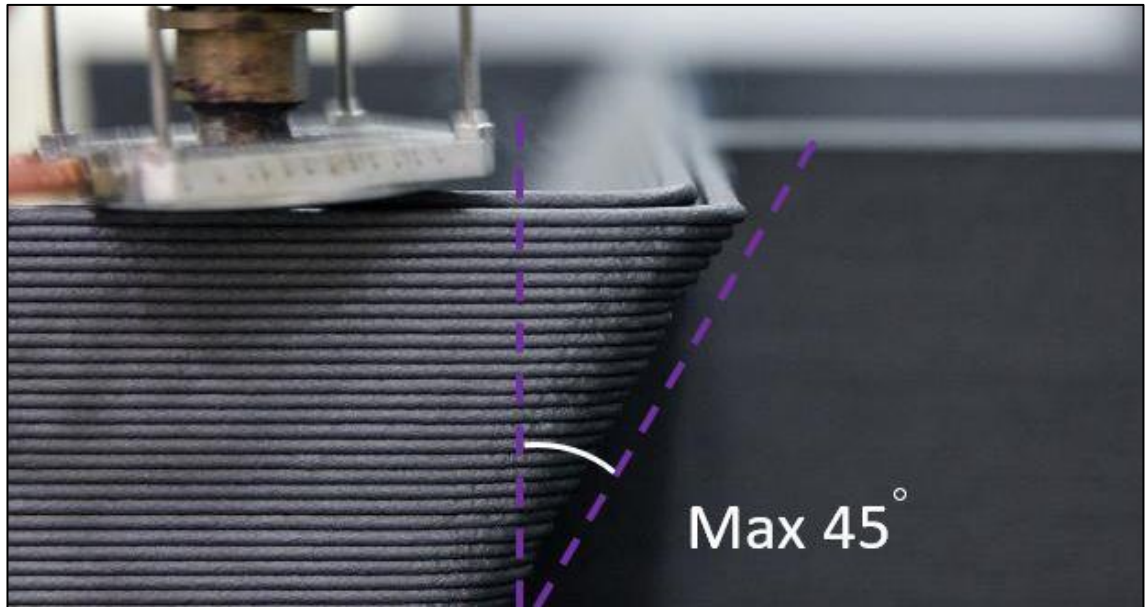
Rakennuksista löytyy hyvin paljon kohtia, joista voidaan käyttää 3D-tulostustermiä siltaus tai ylitys. Ylitystä voidaan verrata esimerkiksi ulokeparvekkeisiin. Eli rakenteeseen, jonka alapuolella ei ole tukea. Siltauksia esiintyy esimerkiksi ovien ylityksissä.



Kuva 12. Havainne siltauksesta sekä ylityksestä. [38.]

Kaikki ylitykset eivät kuitenkaan tarvitse tukirakennetta. Yleisesti ajatellaan, että jos ylitys on pystysuuntaisesti alle 45 astetta, niin tukea ei tarvita. Tulostin pystyy siirtä-

mään kerroksia sivusuunnassa aavistuksen edelliseen kerrokseen nähden ja tällä tavoin valmistaa vinoja pintoja. On hyvä muistaa kuitenkin, että kerrospoikkeama riippuu hyvin paljon tulostimesta, sen asetuksista sekä käytetystä materiaalista. Esimerkiksi sementtipohjainen materiaali ei välttämättä pidä itseään kasassa yhtä hyvin kuten muovinen. Kuvassa 13 on havainne sivusuuntaisesta kerroksen siirrosta. [10.]



Kuva 13. Hyvä yleisohje on pitää sivusuuntainen siirtyä alle 45:ssä asteessa. [10.]

Toinen merkittävä rajoitus varsinkin talonrakentamista ajatellen on tulostimien fyysinen koko. Rakennukset ovat usein useita neliömetrejä ja vaativat suuren tulostimen valmistamiseen. Suurin osa nykypäivän tulostimista voivat tulostaa 100 – 200 m² kokoisia alueita. Tämä luonnollisesti sanelee tarkat rajat suunnittelulle. Tulostinta voidaan toki siirtää, mutta yleisesti tulostimen uudelleen sijoittaminen ja synkronointi edelliseen tulostukseen on hankalaa. Synkronoinnilla tarkoitetaan tässä tapauksessa tulostuskärjen ja tulostetun kerroksen uudelleen säätämistä kohdakkain.

Myös materiaalit tuovat omat rajoitteensa. Tämän päivän tulostimet yleisesti tulostavat pelkästään yhtä materiaalia kerrallaan. Tämä luo haasteita rakenteiden kuormituskäytävyyden kannalta. Hyvin usein rakennuksen rakenteisiin lisätään terästä, mutta tulostettavissa rakenteissa perinteinen teräsvahvistus ei toimi. Vahvistus pitää saada tulostusmateriaalin sisälle, mutta ilman ihmisen avustusta se ei onnistu. Materiaalien kehitys onkin yksi olennaisimpia rajoituksia mikä hidastaa tulostamisen yleistymistä rakentamisen parissa.

5 Materiaalit

5.1 Yleisesti materiaaleista

3D-tulostamisessa käytettävät materiaalit vaihtelevat erilaisista muoveista aina lääketieteen käyttämiin kantasoluihin asti. Jokaisella materiaalilla on omat hyödyt ja heikoudet, joten jääkin käyttäjän varaan arvioida sopivin materiaali kulloiseenkin projektiin. Tulostintekniikka vaikuttaa olennaisesti myös käytössä oleviin materiaaleihin. Esimerkiksi teollisuustason tulostimet käyttävät materiaalina jauhemaista seosta, kun taas kotikäyttöön tarkoitetut laitteet hyödyntävät usein kiinteää muovilankaa. [6, s.130.]

5.2 Muovit

Muovi on yleisin käytetty materiaali 3D-tulostimissa. Se voi olla kiinteässä tai nestemäisessä muodossa riippuen käytetystä tulostin tekniikasta. Muovia voidaan yhdistää muihin materiaaleihin ja näin muuttaa sen ominaisuuksia. Värivalikoima kattaa lähes kaikki olemassa olevat sävyt. Hinnaltaan tuloste muovit ovat halvimpia. Muovit maksavat noin 15,00 € - 100,00 €/kg riippuen sen ominaisuuksista ja laadusta. Tyypillisiä kiinteitä muovilaatuja ovat PLA (Polylactic Acid), ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) ja PETG (Polyethylene terephthalate glycol). Nestemäiset muovit ovat usein epoksipohjaisia. [7, s.132.]

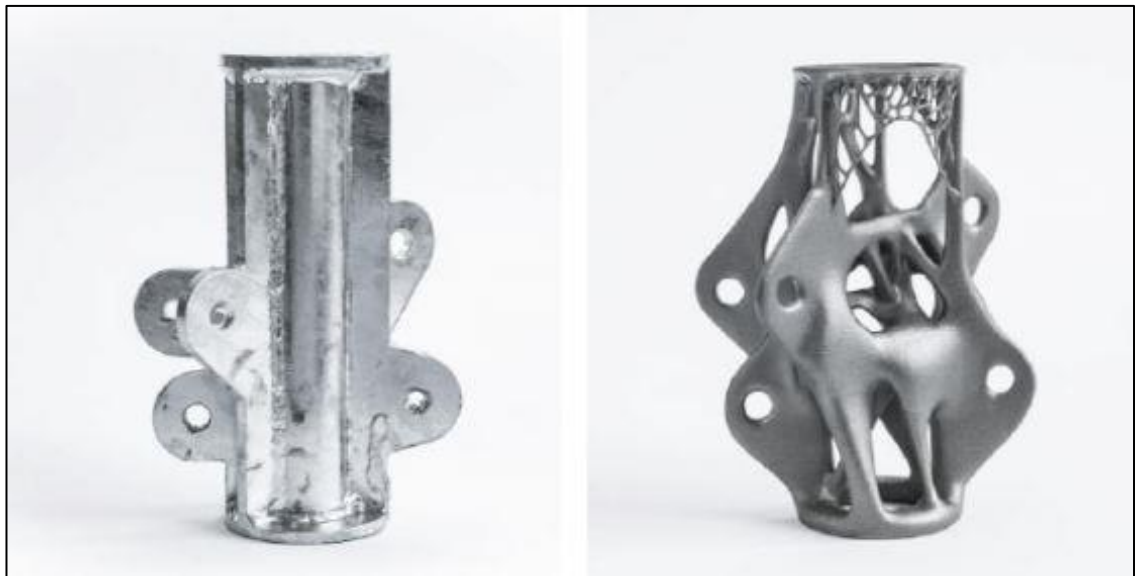
Materiaalina muovi ei tarjoa suurta hyötyä rakennusalan tarpeita silmällä pitäen. Rakennusalalla on kyllä käytössä lukuisia muovituotteita, mutta tehokkaaseen rakennustoimintaa tulostettavat muovit eivät pysty vastaamaan. Muovitulosteet ovatkin parhaimmillaan tutkimus- ja kehitystyön apuna. Suunnittelijat voivat nopeasti testata uusien tuotteiden ja ideoiden prototyyppejä käytännön tasolla.

5.3 Metallit

Metallinen tulostusmateriaali on usein pulverimaista jauhoa, jota tuotetaan alumiinista, kuparista, teräksestä ja jopa titaanista. Tulostetut metallit saavuttavat hyvän vetolujuuden, jopa paremman kuin perinteisin menetelmin valmistettu metalli. Väsymislujuudessa tulostettu metalli ei kuitenkaan pärjää perinteisesti jalostetuille metalleille. [11.] Me-

tallia voidaan käyttää myös muoviseosten jatkeena ja luoda näin uusia hybridimateriaaleja. Materiaalin hinnat vaihtelevat 300,00 € - 600,00 €/kg. Vertailuksi esimerkiksi perinteinen harjateräs, joka maksaa karkeasti 1,00 €/kg.

Rakennusteollisuudessa on runsaasti käyttökohteita metallisille komponenteille ja vahvistuksille. Tällä hetkellä metallien tulostaminen ei ole rakentamisen skaalassa millään muotoa kannattavaa. Materiaalin hinnat ja tulostusajat eivät ole kilpailukykyisiä perinteisiin menetelmiin verrattuna. Tulevaisuudessa tulostettavat metallit kuitenkin mahdollistavat tarkan rakenteiden optimoinnin ja näin materiaalin käyttö ja hukka pienenevät. Kuvassa 14 on esitelty perinteisin menetelmin valmistettu komponentti ja 3D-tulostimella valmistettu korvike, jonka suunnittelussa on hyödynnetty uuden tyyppistä topologioptimointia. Siinä tietokoneohjelma laskee optimaalisen muodon rakenteelle. Suunnittelun tulevaisuudessa voi jopa hoitaa tekoälyn ohjaamana. [12, s. 10.]



Kuva 14. Uuden tyyppisellä suunnittelulla ja työkaluilla voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä. [12.]

5.4 Hybridiseokset

Hybridiseoksella tarkoitetaan kahden tai useamman eri aineen muodostamaa tulostinmateriaalia. Siinä esimerkiksi muoviseokseen lisätään hiilikuitua, metallia tai puuta muuttamaan alkuperäisen aineen ominaisuuksia. Hiilikuidulla saavutetaan parempi kestävyys. Metallilla voidaan lisätä materiaalin magneettisuutta tai lisätä sen sähkö-

johtavuutta. Tämä sähkönjohtavuuden lisäys mahdollistaa sähkönkuljettamisen pitkin tulostetta. Puu parantaa tulosteen jälkityöstettävyyttä ja on visuaalisesti miellyttävä, mikäli tavoitteena on saada mahdollisimman luonnollisen näköistä pintaa.

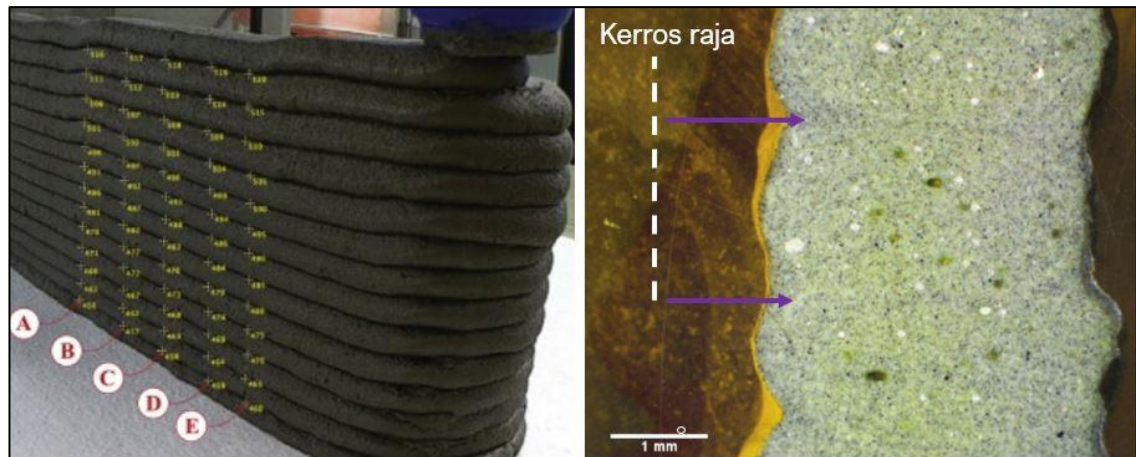
Hybridiseokset ovat tärkeä kehityssuunta, kun halutaan lisätä materiaalin ominaisuuksia. Rakentamisessa tarvitaan lujia ja kestäviä materiaaleja. Esimerkiksi sementinjoukkoon lisättävät kuidut vahvistavat rakennetta ja ne voivat mahdollisesti korvata raudoitteet rakenteen sisällä. Kuidut voivat olla joko lyhyitä suoraan massan sisään laitettavia tai yhtenäistä lankaa, jota tulostuksen yhteydessä lisätään kerrosten väliin. [13.]

5.5 Sementtipohjaiset

Sementtipohjainen seos koostuu samoista aineista kuten muutkin yleisin käytössä olevat betonimassat. Vesi, kiviaines, sementti ja mahdolliset lisäaineet. Jokaisella valmistajalla on omat seokset ja ainakin toistaiseksi valmistajat eivät paljasta kaikkia ainesosia mitä heidän seoksensa sisältää. Mutta yleisesti massa on koostumukseltaan laastimaista, korkean sementti suhteen omaava seos. Kiviaineksen raekoko on yleensä 2-3 mm luokkaa. Suurempiakin rakeisuuksia on kokeiltu. [16.] Massan joukkoon on voitu lisätä erinäisiä kuituja vahvistamaan sitä.

Muista tulostusmateriaaleista poiketen, sementtipohjainen seos tulee sekoittaa veden kanssa ennen sen tulostamista. Veden ja sementin yhdistäminen käynnistää kemiallisen reaktion, joka saa sementin kovettumaan. Kovettumisaika tuo omat haasteensa tulostamiseen, koska sekoitus täytyy tehdä mahdollisimman lähellä tulostuskärkeä. Tällä minimoidaan seoksen ennen aikainen kovettuminen tulostimen sisälle. Toisaalta kun tulostaminen tapahtuu kerroksittain, on edellisen kerroksen saavutettava riittävä lujuus, jotta se kestää seuraavan kerroksen aiheuttaman painon. Massan on oltava siis riittävän notkeaa, sen pitää säilyttää hyvä tarttuvuus eri kerrosten kanssa sekä säilyttää muotonsa ylempien kerrosten paineen alla. [16.]

Materiaalina sementtiseokset ovat siis erittäin haastavia. Sementtipohjaiset tulostusmassat ovat rakennusalan tarpeita ajatellen tärkein kehitys suunta. Niiden avulla voidaan saavuttaa kestäviä ja kustannustehokkaita rakennuksia. Kuvassa 15 on muutama esimerkki laboratoriotesteistä, joita tulostetulle betonille suoritetaan.

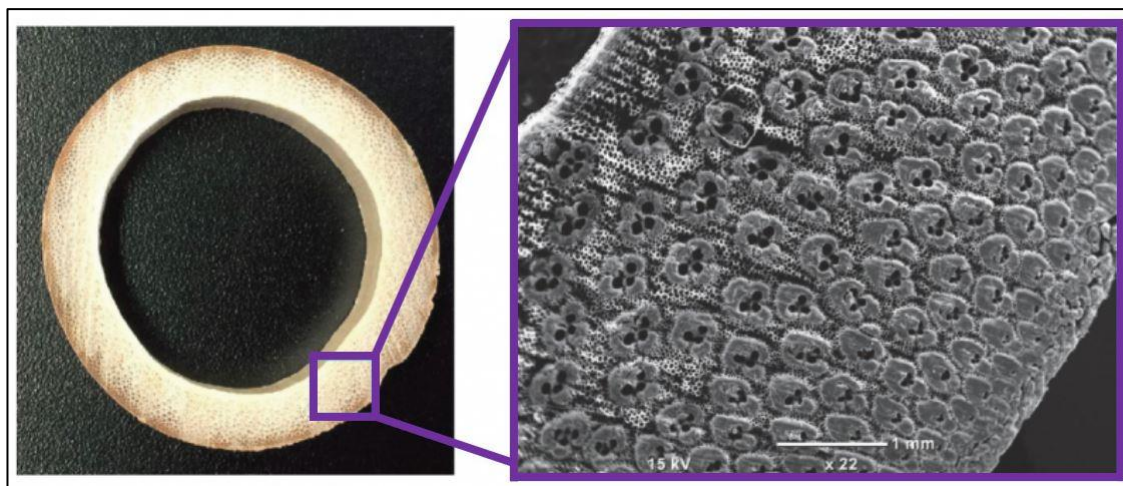


Kuva 15. Vasemmassa kuvassa tutkitaan kerrosten paksuuden muutoksia oman painon alla. Oikealla on läpileikkaus tulosteesta, jossa kerrokset muodostavat ehjän kokonaisuuden. [29.]

6 Tulosteen rakenne

6.1 Materiaalin optimointi

3D-tulostaminen mahdollistaa materiaalien optimoinnin rakenteissa tavalla, jota ei tavanomaisin keinoin ole pystytty toteuttamaan. Bambupuu on hyvä esimerkki luonnon omasta optimoinnista ja mitä sillä voidaan saavuttaa. Yleisesti tiedetään, että bambu on kovaa, kestäväää ja kevyttä materiaalia. Teoreettisesti, sillä on kaikki haluttavat materiaali ominaisuudet. Kun bambua tarkastellaan sisältä päin, huomataan sen sisältävän suurilta osin ilmaa. Bambun puinen ulkokuori koostuu tuhansista kennoista ja niiden välissä on kuitu vahvikkeita. Kuidut ovat sijoittuneet bambun ulkokuoren lähetyville, ja ne vähentyvät sisälle päin rakenteessa siirryttäessä. Tämä antaa bambulle paremman taivutuskestävyyden. Tutkijat ovat tutkineet bambujen kuitujen jakautumaa ja verranneet sitä matemaattisesti optimaaliseen jakaumaan ja todenneet sen olevan lähes identtinen. [14.] Kuvassa 16 näkyy bambun läpileikkaus.



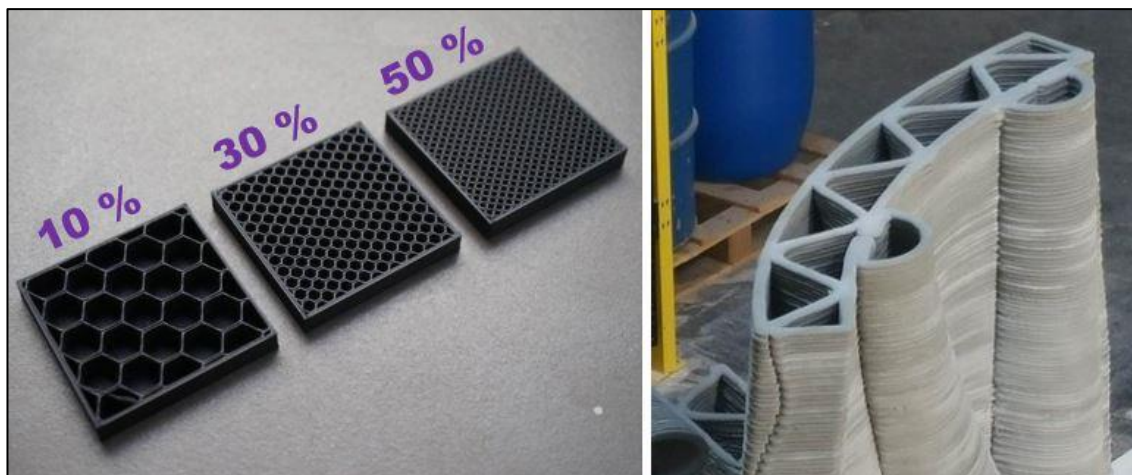
Kuva 16. Bambu koostuu tuhansista kennoista, jotka tukeutuvat toisiinsa optimaalisesti. [14.]

Materiaalin optimoinnilla pyritään siis saavuttamaan maksimaalinen hyöty, mahdollisimman pienellä materiaali menekillä. Perinteisistä rakennusmateriaaleista ehkä kevytsora-harkko ja erilaiset polyuretaanieristeet ovat lähempänä vastaavaa rakennetta. Mikäli optimointi halutaan viedä bambua vastaavalle tasolle, on 3D-tulostaminen loistava vaihtoehto sen toteuttamiseen.

6.2 Kennorakenteet

Perinteinen betonirakentaminen on hyvä esimerkki materiaalin hukkakäytöstä. Usein rakenteet ovat täynnä betonia, vaikka pienempikin määrä riittäisi lujuutensa puolesta. Sementtiteollisuuden tuottamat päästötkin vastaavat jopa 8 % maailmalla tuotetusta CO₂. [15.] Taloudellisesti hukka on myös maailman mittapuulla huomattava. Materiaalimenekin ja ympäristökuormituksen vähentämiseksi kennorakenteet ovat yksi potentiaalisista ratkaisuista.

3D-tulostamisessa kennorakenteelle käytetään termiä täyttö (eng. *infill*). Sillä viitataan rakenteen sisäiseen tiheyteen. Täyttö ilmoitetaan prosentti lukuna rakenteen tilavuudesta. Esimerkiksi jos rakenne tulostetaan 100 % täytöllä, on se käytännössä kiinteä rakenne. Eli mitä isompi täyttöaste, sen kestävämpi ja painavampi rakenne on. Täytön määrä vaikuttaa olennaisesti tulostusaikaan, materiaalimenekkiin ja sitä kautta kustannuksiin. [7, s.177.] Materiaalisäästö on huomattava, jos täyttörakenne suunnitellaan optimaalisesti. Kuvassa 17 on esimerkkejä erilaisista täyttökuvioista ja niiden prosenttiosuuksista tilavuuteen suhteutettuna.



Kuva 17. Vasemmalla eri täyttöasteen omaavia testipaloja [40.]. Oikealla esimerkki tulostetun seinärakenteen täytöstä. [39.]

Kennorakenteet muuttavat rakennustapaa ja suunnittelua olennaisesti. Sen avulla voidaan tuottaa rakenteita, jotka ovat kevyitä ja kestäviä. Materiaalia laitetaan enemmän vain rakenteellisesti kriittisiin kohtiin ja siellä missä rasitus on pienempää, voidaan materiaalia vähentää. Olemme toki kaukana vielä bambun tasoisesta optimoinnista, mutta suunta on oikea.

6.3 Hybridirakenne

Kuten aikaisemmin todettiin 3D-tulostimet pystyvät tulostamaan hyvin erilaisia materiaaleja aina kovista metalleista pehmeisiin kumimaisiin materiaaleihin. Näiden eri materiaalien yhdistelmiä kutsutaan hybridirakenteiksi. Rakentamisen perspektiivistä perinteinen sandwich-elementti on tyypillinen esimerkki hybridirakenteesta. Siinä kahden betonisen kuoren välissä on eristekerros. Tällä samalla periaatteella voidaan myös 3D-tulostaa erityylisiä rakenteita. Tulostimet voidaan varustaa erilaisilla tulostuskärjillä, jotka käyttävät eri materiaaleja tulostamiseen. Esimerkiksi ruiskutettava polyuretaanivahto on ominaisuuksien ja koostumuksensa puolesta erittäin hyvä materiaali 3D-tulostamisen kannalta.

7 Muutokset rakentamisen eri osapuolille

7.1 Arkkitehdit

Tämän päivän arkkitehdit joutuvat suunnittelemaan luomuksensa hyvin usein nykyisten rakennustekniikoiden ehdoilla. Kantikkaat ja suorat linjat ovat hallinneet lähes vuosisadan. 3D-tulostaminen todennäköisesti tulee muuttamaan tämän ja mullistamaan arkkitehtien työn. Tulostaminen tulee mahdollistamaan rakenteet, jotka ennen olivat vaikeita ja kalliita toteuttaa. Kaarevat ja pyöreät muodot tulevat takaisin tulevaisuuden arkkitehtuurissa. Samalla se on myös askel kohti luonnollista ja orgaanisempaa suunnittelua. Luonnossa harvoin mikään on täysin suoraa tai kantikasta. Jokainen sukupolvi jättää oman jälkensä arkkitehtuuriin ja itse koenkin, että 3D-tulostamisesta tulee rakentamisen uusi renessanssi.

3D-tulostuksen hyödyt eivät ainoastaan rajoitu rakennuksen ulkopintaan, vaan se myös mullistaa sisustus- ja maisema-arkkitehtien työn. Samat kaarevat muodot ottavat haltuun rakennuksen sisäpuolen tilaratkaisujen ja kalusteiden osalta. Ratkaisut voivat olla täysin uniikkeja jokaiseen kohteeseen. Arkkitehdin ei tarvitse tyytyä pelkästään markkinoiden tarjontaan, vaan jokainen yksityiskohta voidaan suunnitella yksilöllisesti. Taiteellinen vapaus on asia mitä monet arkkitehdit kaipaavat ja 3D-tulostamisen myötä se on mahdollista. Kuvassa 18 on betonipilareita, jotka on valmistettu 3D-tulostamalla. Pilarit ovat 2,7 m pitkiä ja niiden tulostaminen kesti 2,5 tuntia. Ne ovat osa ulkonäyttämön rekvisiittaa. Pilarit on suunnitellut ja valmistanut ETH Zurich -koulun opiskelijat. [41.]



Kuva 18. 3D-tulostamalla valmistettuja betonipilareita. [41.]

Tällä hetkellä arkkitehdit hyötyvät 3D-tulostamisesta lähinnä suunnitelmien visualisoinnissa asiakkailleen. Pienoismallin tulostaminen kohteesta auttaa hahmottamaan rakennuksen kokonaisuudessa ja miten se istuu ympäristöönsä. Arkkitehdin luoma CAD-malli voidaan muuttaa tulostimelle sopivaan muotoon ja tulostaa yhdessä tai useammassa osassa.

7.2 Rakennesuunnittelijat

3D-tulostamisen myötä rakennusten rakenteet kokevat suuria muutoksia. Samat laskentaperiaatteet ovat kuormitusten osalta edelleen käytössä, mutta tapa miten määräysten mukaisiin mitoituksiin päästään muuttuu merkittävästi. Uudenlaiset hybridi- ja kennorakenteet, materiaalit ja tulostimien erilaiset rajoitteet asettavat suunnittelijoille uusia haasteita. Suunnittelijan rooli rakentamisessa tulee kasvamaan entisestään, koska tuottavan työn tekee kone eikä ihminen. Rakennustyön edetessä ihminen saattaa huomata ristiriitoja rakenteiden välillä, mutta koneet tekevät juuri sen mitä se on käsketty tekemään. Eli suunnittelijan virheet tulostuvat juuri sellaisenaan kuin ne on piirretty. Toisaalta 3D-mallinnus myös vähentää ristiriitojen määrää, mikä on huomattu käytössä olevien tietomallien kohdalla.

Alkuvaiheessa rakennesuunnittelijoiden työnkuva kokee muutoksen ja myöhemmin perässä seuraavat talotekniikan LVIS-suunnittelijat. 3D-tulostamalla voidaan periaatteessa tulostaa myös talon putki- ja sähköjärjestelmät suoraan rakenteiden sisään. Markkinoilla on jo sähköä johtavia materiaaleja muoveista puhumattakaan. Suunnitteli-

joiden työ tulee ainakin alkuvaiheessa lisääntymään, mutta tietotaidon lisääntyessä sekä suunnittelu automaation yleistyessä työmäärä tasoittuu ja jopa loppuu kokonaan. Vastaava kehityskulku on nähty monien aikaisempien teknologioiden kohdallakin. Tietäessä mielessä suunnittelijat ovat keihään kärkenä, kun 3D-tulostaminen tulee rakentamiseen mukaan.

7.3 Rakennustuotanto

Tuotantopuoli kokee myös suuria mullistuksia. Ei pelkästään tuotantotavassa, vaan henkilöstön määrässä sekä heidän tehtävissä työmailla. Rakennustyömaa on tunnetusti hyvin konservatiivinen työympäristö. Muutosvastaisuus on tyypillistä eikä työmailla olla nähty suuria innovaatioita sitten 1960-luvun betonielementtien saapumisen. Toki uusia tuotteita ja toimintatapoja nähdään vuosittain, mutta suuret mullistukset odottavat itseään.

Tuottavaa työtä tekevän henkilöstön määrä tulee vähenemään työmailla. Automatisoitu 3D-tulostin pystyy hoitamaan useamman henkilön työt. Työtä voidaan tehdä kolmessa vuorossa kuten monissa muissakin automaatiota hyödyntävissä työpaikoissa. Esimerkiksi auto- ja elektroniikkateollisuus on jo pitkään käyttänyt automatisoituja tuotantolinjastoja, jotka toimivat ympäri vuorokauden. Työnjohtajasta tulee enemmän konetta ohjaava operaattori, jonka tehtävänä on varmistaa koneiden toiminta. Todennäköisesti heille jää myös enemmän aikaa valvoa työn laatua. Aikataulujen venyessä odotetusta, työnjohtaja lisää tulostus nopeutta piiskarahan sijasta. Materiaalitoimitukset keskittyvät enemmän raakamateriaalin toimituksiin, verrattuna nykyisten valmistustuotteiden tuontiin työmaalle. Raakamateriaalit voivat olla erilaisia tulostimen käyttämiä sementtejä, muoveja, metalleja tai eristemateriaaleja.

Rahoittajia varmasti ilahduttaa työmaan läpimenoajan lyhentyminen ja aikataulun ennustettavuuden paraneminen, koska koko tuotantoprosessi on simuloitavissa ennen rakennushanketta. Ennen tulostusta tiedetään tulostusaika sekä materiaalimenekki hyvinkin tarkasti. Näihin visoihin on vielä matkaa, mutta ensiaskeleet on jo otettu.

7.4 Tilajaat

Yksilöllisyys on asia, jota nykyajan asiakkaat haluavat. Oli kyse sitten vaatteista, viihde-elektroniikasta, sisustuksesta tai lomamatkasta, niin asioista halutaan tehdä itsensä näköisiä. Tutkimustenkin mukaan tämä ei ole pelkästään kehittyvien maiden suuntaa, vaan maailmanlaajuinen ilmiö. [17.] Väestömäärän lisääntyessä erottautumisesta on tullut itseilmaisun keino. Se miten 3D-tulostaminen vastaa tähän tarpeeseen on selvä. Yksilöllisyys siirtyy aivan uudelle tasolle.

Talonrakennuspuolella asiakkaan vaikutusmahdollisuudet tyypillisesti ovat rajoittuneet huoneiston seinien sisään. Sielläkin valinnat ovat suoraan katalogista valittuja tuotteita, jotka on ennalta määritetty jonkun toimesta. Yksilöllisyys on tuotu esille sisustuksen kautta. Tulevaisuudessakaan vaikutusmahdollisuudet tuskin ylettyvät huoneiston ulkopuolelle, mutta sisäpuolen muutostyöt voidaan suunnitella asiakkaan kanssa hyvinkin tarkasti. Väliseinät voivat olla kaarevia, ovi aukot pyöreitä, kylpyhuoneen kaakeleissa voi olla itse suunnittelema kuviointi tai lattia voi olla täydellinen kopio lapsuuden kodista. Omakotitalon rakentajalle tulostaminen tuo vielä huomattavasti enemmän vapauksia, kun koko rakennuksen muoto on asiakkaan valittavissa huomioiden valitsevan kaavamääräyksen.

8 3D-tulostamisen käyttökohteita rakentamisessa

8.1 Tilanne vuonna 2020

Vuonna 2020 elämme vielä aikaa, jolloin otamme ensiaskeleita kohti uuden tyyppistä rakentamista. Jokainen yritys on enemmän tai vähemmän kokeilu asteella. Yliopistot ympäri maailman kehittävät omia tekniikoita tulosteiden parantamiseksi ja pyrkivät löytämään ratkaisuja rakentamisen tarpeisiin. 3D-tulostaminen kaipaa tällä hetkellä ennakkoluulottomia visionäärejä, jotka eivät pelkää haasteita tai epäonnistumista. Onnistuessaan luvassa on jättipotti, niin rahallisesti kuin yhteiskunnankin näkökulmasta.

Rakentamisen ympärillä pyörii suuret rahavirrat, joten sijoittajille 3D-tulostaminen tarjoaa paljon mahdollisuuksia. Mikäli sijoittaja päättää lähteä mukaan alkuvaiheen yrityksiin on hyvä muistaa, että tutkimus- ja kehitystyö on tunnetusti kallista. Monet kehitysvai-

heen yritykset kariutuvat pois kovassa ja haastavassa kilpailussa. Valitsin tähän työhön kolme erityyppistä yritystä, jotka kukin tarjoavat omaa näkemystä 3D-tulostamisesta rakennusallalla. Tulostinlaitteistolle tai materiaaleille ei ole vielä vakiintuneita standardeja. Jokainen yritys tekee omaa kehitystyötä ja pyrkii sitä kautta saavuttamaan etua muihin kilpailijoihin nähden.

8.2 Apis Cor

Apis Cor on Venäjältä lähtöisin oleva yritys, jonka tulostin pystyy tulostamaan yhtenäisen 132 m² kokoisen alueen. Laite tulostaa kaikki rakennuksen rakenteet kattoa lukuun ottamatta suoraan työmaalla. Valmistajan mukaan tällä saavutetaan 25 - 40% säästö perinteiseen rakentamiseen verrattuna. Säästöä perusteellaan pienemmillä henkilöstökuluilla, prosessin automatisoinnilla sekä nopeammalla rakennusajalla. Ajallinen säästö tyyppillisessä pientalossa on muutamia päiviä ja materiaalihukka on huomattavasti pienempi. [18.] Kuvassa 19 on yrityksen tulostama pientalo. Pientalon koko on noin 37 m² ja sen hinnaksi on esitetty noin 10.000 €. Tulostusaika kohteelle on 24 tuntia.



Kuva 19. Venäjälle 3D-tulostettu esimerkkikohde. [18.]

Valmistaja on antanut listauksen, miten kulut jakautuvat rakennuksen eri osien välillä. Hinnoille ei ole mitään perusteita, joten niihin tulee suhtautua varauksella ja enemmänkin markkinointina kuin todellisina kustannuksina. [25.]

• Perustukset	277,00	\$
• Seinät	1624,00	\$
• Lattia ja katto	2432,00	\$
• Kaapelointi	242,00	\$
• Ikkunat ja ovet	3548,00	\$
• Ulkopuolen viimeistely	831,00	\$
• Sisäpuolen viimeistely	1178,00	\$
• Yhteensä	10150,00	\$

Tulostin on helposti siirrettävissä nykyisillä kuljetuskalustoilla. Painoa tulostinyksiköllä on noin 2 tuhatta kiloa. Mikäli tulostusalueita halutaan kasvattaa, voidaan tulostinta siirtää tai asentaa toinen tulostin yksikkö jatkamaan tulostus aluetta. Tulostin pystyy pyörimään 360 astetta akselinsa ympäri. Tulostin voidaan asentaa lähes mille alustalle tahansa korkoeron ollessa alle 100 mm. Tulostimen saa käyttökuntoon noin 30 minuutissa. Tulostusmateriaali on perinteistä hiekkasementtisekoitusta, johon on lisätty lisäaineita parantamaan kovettumista ja juoksevuutta. [18.] Kuvassa 20 näkyy yrityksen käyttämä tulostin. Liitteessä 1 on lisää kuvia muista rakennushankkeista, joissa yritys on mukana.

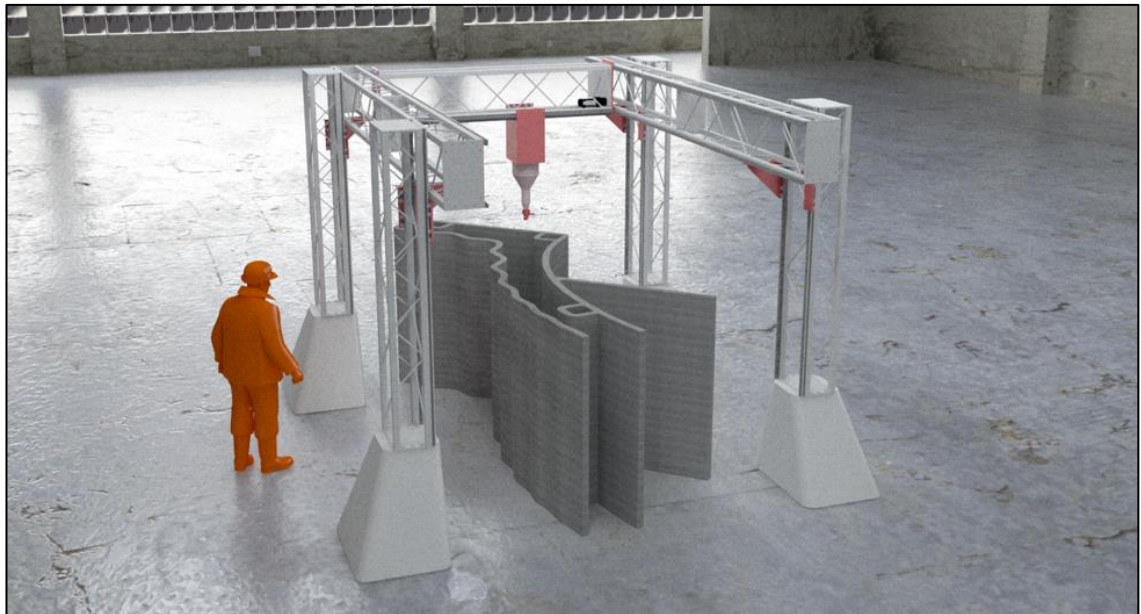


Kuva 20. Apis Cor yrityksen 3D-tulostin valmistamassa rakennusta. [18.]

8.3 Cobod

Cobod on tanskalainen yritys, joka on vuonna 2017 tulostanut Euroopan ensimmäisen rakennuksen. Rakennus on toteutettu eurooppalaisia rakennusstandardeja noudattaen. Yritys on myös tehnyt yhteistyösopimuksen muottijärjestelmä valmistaja Perin kanssa. Peri toimittaa Saksan alueelle Cobod 3D -tulostimia työmaakäyttöön. Peristä on yhteistyön myötä tullutkin merkittävä osakas yrityksessä. Yritys on myynyt vuonna 2019 Saudi-Arabiaan suurimman koskaan valmistetun 3D-tulostimen. Se pystyy tulostamaan 3-kerroksisen talon, jossa jokainen kerros on noin 300 m². [20.]

BOD2 on heidän toisen sukupolven tulostin. Tulostimen rakenne muistuttaa hyvin paljon teollisuudessa paljon käytössä olevia siltanostureita. Siinä metallisen kehikon päällä kulkee palkki, johon tulostuspää on kiinnitetty. Kuvassa 21 on havainne tästä laitteesta. Tulostinta voidaan myös käyttää nostimena pieniin työmaalla tapahtuviin nostoihin. Teoreettinen nostokapasiteetti on 400 kg. Tulostimen käyttöönottoon menee noin kahdesta kolmeen päivään riippuen sen fyysisestä koosta tai työryhmästä. Tulostimen hinnat vaihtelevat 180.000 € aina 1.000.000 € asti. [20.]



Kuva 21. Havainnekuva yrityksen valmistamasta 3D-tulostimesta. [20.]

Tulostinpää pystyy liikkumaan jopa 1000 mm/s, mutta tulostusnopeudeksi luvataan maksimissaan 300 mm/s. Tulostusnopeuden rajoitus johtuu pitkälti tulostusmateriaalin syöttämiseen käytetyistä pumpuista. Materiaalina tulostin käyttää sementtipohjaisia massoja. Tulostimessa voidaan käyttää lähes mitä vain sementtipohjaista materiaalia, kunhan sen rakeisuus on alle 12 mm. [20.]

Käyttäjät voivat itse kokeilla omia seoksiaan vapaasti ja tätä kautta löytää heille sopivimman vaihtoehdon. Yritys on kuitenkin julkaissut sivuillaan heidän käyttämän massan reseptin. Massa on 10–20 % perinteistä betonimassaa kalliimpaa, johtuen suuremmasta sementti määrästä. Puristuslujuus on 52 MPa ja vetolujuuden oletetaan olevan noin 10 % tästä [20]. Liitteessä 2 on listattu materiaalit ja hinnat massan valmistamiseen.

Cobod yrityksenä on huomattavasti avoimempi kuin monet muut alan toimijat. Heidän sivuillaan on avoimesti kerrottu tulostimen tekniikasta sekä siihen liittyvistä ohjelmista ja jopa hintalaskuri, jolla voi laskea teoreettisia hintoja rakennuksille. Heillä on selkeästi haluja kehittää järjestelmää ja tuoda se massojen käyttöön mahdollisimman nopeasti. Yksi syy avoimuuteen voi liittyä Tanskan valtion haluun kehittää eurooppalaista 3D-tulostamista rakentamisen apuna. Yritys saikin idean lähteä kehittämään 3D-tulostamista osallistuttuaan Tanskan valtion järjestämään projektiin, jolla haluttiin selvittää 3D-tulostettavien rakennusten tila maailmalla. Projektin myötä Tanskaan tulostettiin ensimmäinen talo vuonna 2017. Kuvassa 22 on esitetty kyseinen talo.



Kuva 22. Tanskan ensimmäinen 3D-tulostettu pientalo. [20.]

8.4 Yingchuang Building Technique (Shanghai) Co. Ltd (Winsun)

Winsun on kiinalainen 3D-tulostamiseen keskittynyt yritys. Yritys nousi otsikoihin vuonna 2013 esittelemällä Kiinan markkinoille tulostettuja pientaloja. Myöhemmin yritys on myös tulostanut 5-kerroksisen kerrostalon sekä muita pienempiä rakennuksia pääsääntöisesti Aasian markkinoille. Muista yrityksistä poiketen, Winsun valmistaa 3D-tulosteet tehtaassa ja kuljettaa ne työmaalle, missä ne asennetaan paikalleen samaan tyyliin kuten perinteiset betonielementit. Winsunia voidaan pitää edelläkävijänä rakennusten 3D-tulostamisessa. [21.]

Kiinalaiset ovat edenneet todella vauhdikkaasta uuden teknologian käyttöönotossa ja kehityksessä. Varsinkin kun verrataan muuhun maailmaan, missä vielä tulostetaan yksien kokoisia koppeja, niin Kiinassa on tulostettu kokonaisia toimistorakennuksia. Kuvassa 23 on Winsunin konttori Shanghaissa. Winsun on esitellyt lehdistötiedotteissaan suuria hankkeita, joiden on tarkoitus alkaa lähivuosina. Kiinan valtio on vahvasti mukana yrityksen toiminnassa mikä varmasti omalta osaltaan vauhdittaa hankkeiden käynnistystä. Winsun on avaamassa tehtaita myös ulkomaille ja sitä kautta hakemassa jalansijaa länsimaisilta markkinoilta. [22.]



Kuva 23. Rakennuksen julkisivu on tehty 3D-tulostamalla, mutta sen runkorakenteesta ei ole tietoa. Värit on maalattu jälkikäteen. [21.]

Liitteessä 3 on enemmän esitelty Winsunin tuotantoa sekä rakenteita. Winsunin käyttämä tulostuslaitteisto kuvien mukaan vastaa Codot-yrityksen kehittämää tulostinta, mutta tarkempia tietoja tästä ei ole annettu julkisuuteen.

9 Haasteet rakentamisessa

9.1 Tekniset haasteet

Teknisiä haasteita uuden teknologian käyttöönotossa tulee väistämättä. Uudet toimintatavat niin hankinnassa kuin toteutuksessa pakottavat yritykset panostamaan koulutukseen. Rakentamisen säädöksiä joudutaan muuttamaan sekä työympäristön turvallisuus joudutaan miettimään uusiksi. Automaattiset koneet ja ihmiset on saatava toimimaan turvallisesti keskenään. Alla on listattu muutamia teknisiä haasteita muutamista haasteista mitä 3D-tulostamisessa on tällä hetkellä.

- Kestävyys
- tulosteen viimeistely
- ulokkeet ja ylitykset.

Jotta 3D-tulostetusta sementtipohjaisesta massasta saadaan riittävän kestäviä rakenteita aikaan, on siihen lisättävä terästä tai vastaavaa materiaalia. Tämän päivän tulostimet voivat tulostaa pelkästään rakenteita ilman teräsvahvistuksia mikä hidastaa tekniikan käyttöönottoa rakentamisen parissa. Tulostusmassan sekaan lisättävät kuidut kyllä vahvistavat sitä, mutta se ei yksin riitä takaamaan riittävän kestäviä rakenteita. Vahvistavat teräkset onkin lisättävä perinteisin työmenetelmin rakenteiden sisään mikä tavallaan vesittää ajatuksen automaattisesta rakentamisesta. Sama ongelma pätee myös seinän sisälle tulevien talotekniikka osien suhteen.

Toinen haaste varsinkin FDM-tulostimille on tyypillinen raidallinen tulostusjälki. Tämä siis johtuu kerroksittaisesta tulostamisesta. Tietyissä tapauksissa sillä voidaan saavuttaa visuaalisessa mielessä mielenkiintoinen pinta, mutta usein lopputuloksen kuitenkin halutaan olevan tasainen. Pinta voidaan tasoittaa suoraksi samoilla tekniikoilla kuin normaalit kiviseinätkin. Toistaiseksi tulostimet tulostavat vain yhtä materiaalia kerralla, joten jos pinnoille halutaan eri värejä, täytyy ne toteuttaa jälkikäteen käsityönä.

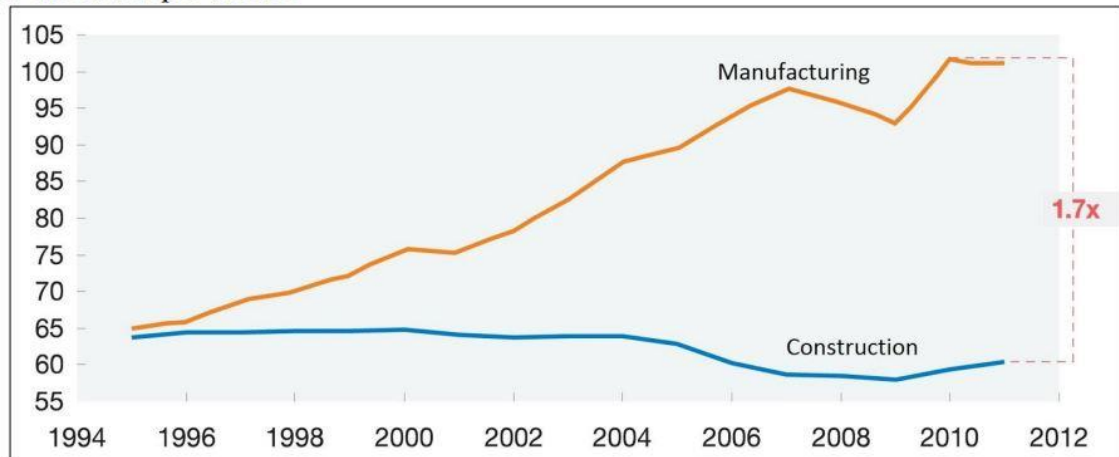
Kolmas haaste liittyy aukkojen ulokkeisiin ja ylityksiin. Tulostimet eivät voi tulostaa suoraan ilmaan, vaan vaativat aina kovan pohjan minkä päälle kerrokset tulostetaan. Ylitykset on usein toteutettu asentamalla puinen kehikko ovi- tai ikkuna-aukkoon, jonka päälle tulostin on voinut tulostaa kerrokset. Katon tulostaminen suoraan paikalleen on myös haastavaa. Tämä ongelma voidaan osittain kiertää käyttämällä valmiiksi tulostettuja elementtejä ja nostamalla ne paikalleen. Esimerkiksi käyttämällä vastaavia aukkojen ylityspalkkeja, jotka ovat käytössä muurattujen seinärakenteiden kohdalla.

9.2 Asenteelliset haasteet

On arvioitu, että maailmanlaajuisesti 7 % työikäisistä ihmisistä työskentelee eri rakennusalan yrityksissä ja rakentamisen ympärillä pyörivät rahavirrat ovat noin 10 triljoonaa euroa vuosittain. Voisi siis kuvitella rakennusalan kehittävän kilpaa uusia tekniikoita tehokkuuden lisäämiseksi, koska pienikin prosentuaalinen säästö rakennusprosessissa toisi suunnattomat rahalliset tuotot. Perinteiset rakennusmenetelmät eivät ole tuottavuuden näkökulmasta kovin tehokkaita eivätkä ne useinkaan perustu nykyajan tekniikkaan. Muilla teollisuuden aloilla pitkään käytössä olleet tekniikat tekevät pikkuhiljaa tuloaan myös rakennusosalalle, kuten automaatio. Tuottavuus onkin jäänyt selvästi jälkeen, kun verrataan muuhun tuotantoteollisuuteen. [23. s,38.] Kuvassa 24 on esitetty tuottavuus-

denkehityskaavio, jossa verrataan rakennusalan ja muun tuotantoteollisuuden tehokkuutta.

\$ Thousand per worker



Kuva 24. Tuottavuuden kehitys vuodesta 1994 vuoteen 2012. Tuotantoteollisuus on lähes tuplannut tehokkuuden verrattuna rakennusalaan. [23. s,39.]

Konservatiiviset asenteet sekä rahoittajien tuomat tulospaineet ovat varmasti yksi osasy syy miksi uuden teknologian adaptointi osaksi rakentamista on kestänyt näinkin pitkään. Rakentamisessa raha ja aika käytetään ajansaotossa opittuihin tapoihin ja uusien innovaatioiden tuleekin todistaa toimivuutensa ensin muilla teollisuuden aloilla. Yritykset, jotka alkaisivat tosissaan panostamaan muuhunkin kuin rahalliseen tuottoon, kuten uudelleenlaiseen rakentamiskulttuuriin sekä teknologiaan, ovat pitkässä juoksussa voittajien joukossa. [23. s,39.]

9.3 Määräykset ja asetukset

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa sanotaan yleisesti rakennusten käyttöturvallisuudesta seuraavaa.

Rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava siitä, että rakennus sen käyttötarkoituksen edellyttämällä tavalla suunnitellaan ja rakennetaan siten, että sen käyttö ja huolto on turvallista. Rakennuksesta eikä sen ulkotiloista ja kulkuväylistä saa aiheutua sellaista tapaturman, onnettomuuden tai vahingon uhkaa, jota ei voida pitää hyväksyttävänä. [27.]

Jokainen rakennusluvan varainen rakennus tulee ennen kaikkea olla turvallinen sen loppukäyttäjille. 3D-tulostusteknologian kehittyessä pitää myös lainsäädännön pysyä

mukana kehityksessä. Uudenlaiset rakenteet ja rakennustavat lisäävät tarvetta opastukselle, jota viranomaiset voivat jakaa suunnittelijoille sekä rakennushankkeisiin ryhtyville. Vaikka toistaiseksi 3D-tulostetut rakennukset eivät Suomessa ole ajankohtaisia, niin viranomaisten tulee olla valmistautuneita niiden tuloon. Viranomaisten tekninen tietämättömyys ja kokemusten puute on todellinen uhka arvioidessa 3D-tulostettujen rakennusten turvallisuutta. Prosessin standardisointi on ensimmäinen askel, kun halutaan luoda viitekehykset 3D-tulostettujen rakennusten turvallisuudelle. [26.]

Amerikkalainen yhtiö Underwriters Laboratories, UL on luonut pohjan, jonka avulla voidaan arvioida 3D-tulostettujen rakennusten määräysten täyttymistä. Heidän luoma raportti UL 3401 pitää sisällään määrittämiä rakenteista kuten seinät, palkit, pilarit ja katto rakenteet, jotka ovat valmistettu 3D-tulostamalla. Raportista löytyy myös suosituksia rakenteiden mekaanisesta kestävyydestä sekä palonkestävyydestä, ilmatiiveydestä, eristävyydestä ja sisäilman laadusta ja elinkaaresta. Viranomaisia varten raportissa on ohjeita, miten suhteuttaa 3D-tulostettu rakennus nykyisiin rakennusmääräyksiin. [28.]

Ohjeistus ottaa myös kantaa tuotannon seurantaan ja valmisteluun. Käytössä olevien ohjelmistojen tulee täyttää tietyt standardit, jotta voidaan varmistaa turvallinen ja tasalaatuinen tulostusjälki rakennukseen. 3D-tulostinlaitteistoille on annettu suosituksia niiden turvallisuuteen ja laatuun liittyen. Käytettävien materiaalien tasalaatuisuus ja koe näytteiden ottamiseen on myös omat suosituksensa. [28.]

Raportti UL 3401 on tärkeä pelinavaus, kun uudelle teknologialle halutaan luoda säännöt. Jokaisen maan viranomaiset joutuvat tekemään vastaavan ohjeistuksen omille markkinoilleen tekniikan yleistyessä. Tällä hetkellä raportista on luettavissa vain englanninkielinen tiivistelmä ja koko raportin voi ostaa yrityksen verkkokaupasta.

9.4 Sementtipohjaiset materiaalit

3D-tulostamisessa käytetylle sementtipohjaiselle massalle on paljon laadullisia vaatimuksia, jotta saavutetaan hyvä lopputulos. Alla on listattu muutamia ominaisuuksia, jotka sementtipohjaisen massan tulee täyttää. [29.]

- Massan tulee olla pumpattavaa

- sen tulee säilyttää muotonsa mahdollisimman hyvin pumppauksen jälkeen
- työstettävyys aika tulee olla riittävä hyvän tartunnan saavuttamiseksi eri kerrosten välillä
- riittävän puristus- ja vetolujuuden saavuttaminen
- kutistumisen hallinta suuren haihduttavan pinta-alan takia
- mittatarkkuuden säilyttäminen.

Prosessin toistettavuus ja materiaalin tasalaatuisuus ovat keskeisiä asioita, jotta tulostaminen rakentamisen parissa saadaan yleistymään. Useat tutkijat ympäri maailman pyrkivät löytämään ratkaisuja näihin kysymyksiin, mutta tehtävä ei ole helppo. Monet yritykset tekevätkin omaa kehitystyötään materiaalien osalta saavuttaakseen paremman lopputuloksen sekä etua kilpailijoihin verrattuna. Kuvassa 25 on Apis Cor -yrityksen tulostama seinän osa puristuslujuustestin jälkeen. [30.] Testipalasta voidaan myös tarkastella eri kerrosten välistä tarttuvuutta mikä on olennainen kysymys 3D-tulostuksessa.



Kuva 25. 3D-tulostettu seinän osa puristuslujuus testissä. [30.]

9.5 Kustannukset

Uuden teknologian ensimmäisten joukossa käyttöön ottavat joutuvat maksamaan siitä kovemman hinnan kuin perässä seuraajat. Tämä ilmiö näkyy hyvin kulutus elektroniikka markkinoilla, jossa lanseerataan joka vuosi uusia tuotteita. Suurten 3D-tulostimien markkinoilla olemme myös alkuvaiheessa, jolloin tarjonta on rajattua ja tuotteiden laatu vaihtelee valmistajan mukaan. Hinnat kuitenkin putoavat ajan kuluessa, kun markkinoille tulee yhä uusia yrityksiä uusine innovaatioineen. Onkin lähes mahdotonta vielä vuonna 2020 antaa tarkkaa ja ennen kaikkea vertailukelpoisia hintoja 3D-tulostetun talon hinnasta.

Useat valmistajat antavat viitteellisiä kustannus- ja aikataulutietoja, mutta ne ovat enemmän tai vähemmän mainospuheita, joilla pyritään lisäämään yrityksen markkina-arvoa. Esimerkiksi Codob-yrityksen osakas Jakob Jørgensen kertoi seminaarissa, että julkisuuteen kerrotut tulostusajat eivät ole koko totuus. [24.]

”Tulostukseen käytetty aika on kyllä realistinen, mutta tulostuksen keskeytykset, materiaali- ja ohjelmisto ongelmat sekä erinäiset päivitykset pidentävät tulostusaikaa usealla kuukaudella”.

Eli yritysten ilmoittamat kustannukset ja tulostusajat ovat tulevaisuudessa mahdollisia, kunhan prosessin toimintavarmuus paranee sekä saamme paremmat standardit alalle. Toinen vertailua hankaloittava tekijä on tulostettujen talojen muoto, mitä on hankala perinteisillä rakennustavoilla toteuttaa [24]. Markkinointimielessä on haluttu tehdä rakennuksia, jotka poikkeavat valtavirrasta uniikilla muotokielellä ja näin korostaa 3D-tulostinten mahdollisuuksia. 3D-tulostamisen kustannuksia voidaan yleisesti tarkastella neljän eri kategorian kautta.

- Tulosteen laatu
- kestävyys
- tulostusnopeus
- materiaali menekki.

Näiden avulla voidaan määrittää kulloiseenkin tarpeeseen kustannustehokkain ratkaisu. Kuvassa 26 on diagrammi, joka vertaa kerrospaksuutta tulosteen täyttöön. X-akselilla näkyy kerrospaksuus millimetreissä ja y-akselille on sijoitettu tulosteen täyttöaste prosentteina. Esimerkiksi jos halutaan nopeuttaa tulostamista, niin valitaan 0,3

mm kerrospaksuus ja pienennetään täyttöaste 10 %. Tällä on positiivinen vaikutus myös materiaalimenekkiin, mutta tulosteen laatu ja kestävyys kärsivät. [44.] Taulukko on suunniteltu pöytätulostimia silmällä pitäen, mutta periaate on sama isommissa tulostimissa.



Kuva 26. Diagrammilla voidaan vertailla kerrospaksuuksien ja täyttöasteen suhdetta. [44.]

Tulevaisuudessa rakennushankkeeseen ryhtyvää joutuu siis punnitsemaan valintoja vastaavien taulukoiden kautta. Täytyy valita projektin kannalta optimaalinen yhdistelmä sen läpiviemiseksi. Esimerkiksi nopea tulostusvaihe heikentää laatua mikä merkitsee enemmän työtä viimeistelyn osalla, kun taas parempi tulosteenlaatu pidentää tulostusvaihetta, mutta vähentää jälkityön määrää.

10 Pohdintaa rakennusten tulostamisesta

Kokonaisten talojen tulostaminen on rakenteellisesti haastavaa. Varsinkin täällä pohjoisessa neljä hyvin erilaista vuodenaikaan asettaa tiukkoja vaatimuksia rakennusten toiminnalle. Meidän ei välttämättä tarvitse heti tulostaa kokonaisia taloja, vaan voisimme keskittyä vähemmän haasteellisiin rakenteisiin. Esimerkiksi piha- ja puutarharakenteet tai vaikka infra-alan tarpeisiin suunnatut betonituotteet voisi olla helpommin lähestyttävä 3D-tulostuskohde. Pienemmät pilottihankkeet eivät ole kustannusmielessä niin suu-

ria investointeja, etteikö esimerkiksi kunnat voisi kokeilla 3D-tulostusta omissa projekteissaan. Näiden avulla saataisiin paljon hyödyllistä käytännön oppia ja myös medianäkyvyyttä, jolla on myös suuri merkitys uuden teknologian yleistymisessä.

Rakennusten tulostaminen saattaa kuulostaa tieteiselokuvien fantasialta, mutta se tulee olemaan todellisuutta lähivuosina jopa meillä Suomessa. Jotta 3D-tulostaminen saadaan yleistymään rakennusalaalla Suomessa, vaaditaan siihen korkean profiilin pilotteihankkeita sekä rakentamisen parissa pitkään vaikuttaneita yrityksiä, joilla on uskottavuutta. Toinen seikka on 3D-tulostimien saatavuuden parantaminen. Esimerkiksi muotivalmistaja Peri on ottanut Saksassa valikoimiinsa 3D-tulostimen, jota rakennusalan toimijat voivat vuokrata samaan tapaan, kuin muottikalustoa. Tietoisuuden levittäminen 3D-tulostamisen mahdollisuuksista ja laitteiden saatavuuden parantaminen ovat avainasemassa uuden teknologian käyttöönotossa.

Suomessa 3D-tulostamisen pilottihankkeet rakentamisen parissa ovat olleet vähäisiä tai lähes olemattomia. Fimatec Oy ja sen yhteistyökumppanit aloittivat vuonna 2015 kokeilun, jossa testattiin 3D-tulostamisen soveltuvuutta betonielementtien valmistukseen. Mukana hankkeessa oli Lujatalo, ABB Electronics sekä yksityisiä rahoittajia. Kyseinen hanke on kuitenkin kuopattu vähin äänin, eikä siitä ole juuri mitään tietoa saatavilla. Tämä mielestäni kertoo 3D-tulostamisen haasteellisuudesta sekä kehitystyön vaatimasta suuresta euromäärästä. 3D-tulostaminen ei tarjoa pikavoittoja rahoittajille, vaan se on pitkäjänteinen kehitysprosessi. Alalle kaivataan erityisesti oman elämänsä Pelle Pelottomia sekä Elon Muskin tyylinen rahoittaja, joka saa rohkeilla visioillaan 3D-tulostamisen raketin lailla nousuun.

11 Yhteenveto

3D-tulostaminen tarjoaa runsaasti potentiaalia rakennusalan tarpeita ajatellen. Se ei pelkästään rajoitu rakenteiden tulostamiseen, vaan sillä voidaan tulevaisuudessa valmistaa erikoisosia, joita on vaikea tuottaa muilla valmistus menetelmillä. Tällä hetkellä elämme vielä aikaa, jolloin teknologia on vasta kehitysvaiheessa ja 3D-tulostamisen täyden potentiaalin hyödyntäminen on vasta edessäpäin. Laitteistojen ja materiaalien tuomat haasteet tulee ratkaista ennen kuin pystymme käynnistämään suuren mittakaavan hankkeita.

Parhaimmillaan 3D-tulostaminen tulee laskemaan rakennusten valmistuskustannuksia merkittävästi. Sen avulla materiaalit voidaan optimoida tarkemmin ja hävikkiä vähentää huomattavasti. Työvoimakustannukset pienevät, koska 3D-tulostaminen on lähes autonominen tapahtuma ja samalla työturvallisuus parantuu merkittävästi. Laadunvalvonta suoraviivaistuu, kun tuottavan työn tekee kone eikä ihminen. Rakennukset valmistuvat nopeammin, kun töitä voidaan tehdä kellon ympäri ja rakenteiden monimuotoisuus tulee kokemaan ennennäkemättömiä uudistuksia.

Mikäli näihin visioihin päästään, niin voidaan puhua suoranaisestä mullistuksesta rakennusalalla. Edellinen suuri muutos tapahtui 1960-luvulla, kun betonielementit kehitettiin. Siitä seurannut tuottavuusloikka mahdollisti edullisten asuntojen rakentamisen kaupungistuvaan maailmaan. Mikäli tulevaisuudessakin halutaan taata edullisia asuntoja kaikille, on 3D-tulostus yksi potentiaalisista ratkaisuista tähän. Kuvassa 27 on visio tulevaisuuden työmaasta, jossa on käytössä 3D-tulostin.



Kuva 27. Pientalo työmaa vuonna 2050. [45.]

Lähteet

- 1 Wikipedia. Verkkoaineisto. <https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing>. Luettu 6.6.2020.
- 2 All3dp. Verkkoaineisto. <<https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>>. Luettu 6.6.2020.
- 3 Finnegan. Verkkoaineisto. <<https://www.finnegan.com/en/insights/articles/how-patents-die-expiring-3d-printing-patents.html#:~:text=About%2016%20key%20patents%20relating,goes%20into%20the%20public%20domain.>>. Luettu 6.6.2020.
- 4 Autodesk. Verkkoaineisto, <<https://www.autodesk.com/redshift/history-of-3d-printing/>>. Luettu 6.6.2020.
- 5 Ryan E. Smith, History of Prefabrication: A Cultural Survey 2009. Verkkoaineisto, <<https://pdfs.semanticscholar.org/902a/970592fdf534e5ca082749a24fdc8cee0300.pdf>>. Luettu 6.7.2002.
- 6 Fabricated, The new world of 3D printing. Hod Lipson & Melba Kurman 2014.
- 7 3D Printing, An introduction. S.Torta & J.Torta 2019.
- 8 All3dp. Verkkoaineisto. <<https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/>>. Luettu 14.6.2020.
- 9 Formlabs. Verkkoaineisto. <<https://formlabs.com/eu/blog/what-is-selective-laser-sintering/>>. Luettu 14.6.2020.
- 10 All3dp. Verkkoaineisto. <<https://all3dp.com/1/3d-printing-support-structures/>>. Luettu 30.6.2020.
- 11 3dhubs. Verkkoaineisto. <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing/>>. Luettu 30.6.2020.
- 12 New opportunities to optimize structural designs in metal by using additive manufacturing. Advances in Architectural Geometry. Galjaard S, Hofman S, and Ren S. 2014. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/publication/278681542_New_Opportunities_to_Optimize_Structural_Designs_in_Metal_by_Using_Additive_Manufacturing>. Luettu 30.6.2020.

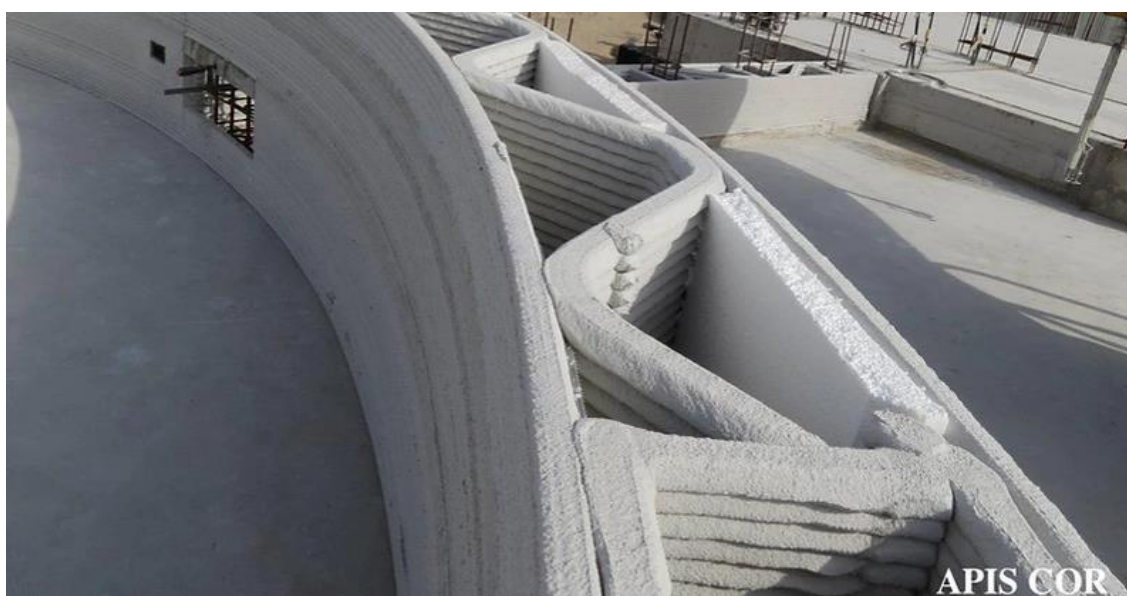
- 13 3D Natives. Verkkoaineisto. <<https://www.3dnatives.com/en/complete-guide-3d-printing-composites-280120204/#>>. Luettu 1.7.2020.
- 14 Phys. Verkkoaineisto. <<https://phys.org/news/2017-05-bamboo-optimal-toughness.html>>. Luettu 1.7.2020.
- 15 Wikipedia. Verkkoaineisto. <https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_impact_of_concrete>. Luettu 1.7.2020.
- 16 Science Direct. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884617311924>>. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, R.A. Buswella, W.R. Leal de Silvab, S.Z. Jonesc, J. Dirrenbergerd 2018. Luettu 1.7.2020.
- 17 Psychological science. Verkkoaineisto. <<https://www.psychologicalscience.org/news/releases/individualistic-practices-and-values-increasing-around-the-world.html>>. Luettu 2.7.2020.
- 18 3D Natives. Verkkoaineisto. <<https://www.3dnatives.com/en/apis-cor-3d-printed-house-060320184/>>. Luettu 3.7.2020.
- 19 All3dp. Verkkoaineisto. <<https://all3dp.com/2/3d-printed-house-cost/>>. Luettu 3.7.2020.
- 20 Codob. Verkkoaineisto. <<https://cobod.com/>>. Luettu 15.7.2020.
- 21 Future of construction. Verkkoaineisto. <<https://futureofconstruction.org/case/winsun/>>. Luettu 15.7.2020.
- 22 3D printingmedia. Verkkoaineisto. <<https://www.3dprintingmedia.network/wisun-shows-off-massive-recent-and-ongoing-construction-3d-printing-projects/>>. Luettu 15.7.2020.
- 23 Potentialities and restrictions of construction 3D printing. Teymouri Amirahmad 2017. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/138400/Teymouri_Amirahmad_2017_12_12.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Luettu 19.7.2020.
- 24 Jakob Jorgensen. Verkkoaineisto. <<https://www.youtube.com/watch?v=mYYqqXAIK68>>. Luettu 21.7.2020.
- 25 All3d. Verkkoaineisto. <<https://all3dp.com/2/3d-printed-house-cost/>>. Luettu 21.7.2020.

- 26 National Fire Protection Association. Verkkoaineisto. <<https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/NFPA-Journal/2020/March-April-2020/Features/3D-Printing>>. Luettu 21.7.2020.
- 27 Ympäristöministeriö. Verkkoaineisto. <https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskoelma/Kayttoturvallisuus>. Luettu 22.7.2020.
- 28 Underwriters Laboratories. Verkkoaineisto. <<https://www.ul.com/news/evaluation-3d-printed-building-construction-coming-soon>>. Luettu 22.7.2020.
- 29 Science Direct. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884617311924#s0040>>. Luettu 23.7.2020.
- 30 Apis Cor. Verkkoaineisto. <<https://www.apis-cor.com/as-masonry>>. Luettu 23.7.2020.
- 31 Simplify3D. Verkkoaineisto. <<https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/lines-on-the-side-of-print/>>. Luettu 23.7.2020.
- 32 Wikimedia Commons. Verkkoaineisto. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Felix_3D_Printer_-_Printing_Head_Cropped.JPG>. Luettu 23.7.2020.
- 33 Batiweb. Verkkoaineisto. <<https://www.batiweb.com/actualites/vie-des-societes/avec-l-impression-3d-xtreee-compte-revolutionner-le-monde-du-btp-2017-06-07-30619>>. Luettu 23.7.2020.
- 34 Encyclopedia. Verkkoaineisto. <<https://encyclopedia.pub/item/revision/8661be5c522344bf4c61ad55c5d6a38d>>. Luettu 23.7.2020.
- 35 Medium. Verkkoaineisto. <<https://medium.com/@hpjesrani/stereolithography-sla-569cbff15be4>>. Luettu 23.7.2020.
- 36 3D printingmedia. Verkkoaineisto. <<https://www.3dprintingmedia.network/conflux-technology-reinventing-heat-exchangers/>>. Luettu 23.7.2020.
- 37 Oak ridge national laboratory. Verkkoaineisto. <<https://www.ornl.gov/news/3d-printing-shapes-building-industry-creates-rapid-construction-potential-1>>. Luettu 24.7.2020.
- 38 Beast magazine. Verkkoaineisto. <<https://www.beastmagazine.lu/5-incredible-3d-printed-innovations/>>. Luettu 24.7.2020.

- 39 Quara. Verkkoaineisto. <<https://www.quora.com/Could-a-house-be-3D-printed-to-include-plumbing-and-electrical-components>>. Luettu 24.7.2020.
- 40 Researchgate. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/figure/Figures-1-6-and-2-8-Photos-of-3D-parts-printed-without-an-upper-shell-to-illustrate_fig1_308709141>. Luettu 24.7.2020.
- 41 Dezeem. Verkkoaineisto. <<https://www.dezeen.com/2019/07/24/3d-printed-concrete-choreography-pillars-design/>>. Luettu 1.8.2020.
- 42 Apis Cor. Verkkoaineisto. <<https://www.apis-cor.com/dubai-project>>. Luettu 1.8.2020.
- 43 Winsun Co. Verkkoaineisto. <<https://www.winsun3dbuilders.com/tag/3d-printed-revetment-wall/>>. Luettu 2.8.2020.
- 44 3D printingchat. Verkkoaineisto. <<https://3dprinterchat.com/3d-printing-layer-height-microscope/>>. Luettu 2.8.2020.
- 45 Civic construction. Verkkoaineisto. <<http://www.civicconstruction.co.uk/the-future-of-3d-printing-in-construction/>>. Luettu 2.8.2020.

Apis Cor, Dubai projekti

Apis Cor valmisti seinärakenteet 2-kerroksiseen toimistorakennukseen Dubaissa. Korkeimmat seinät ovat 9,5 m ja pohjan pinta-ala on 640m². [42.]





Sementtipohjaisen 3D-tulostusmassan kustannusarvio

Hinnat ovat Tanskan kruunuissa. [20.] Tonni valmista massaa maksaa noin 94,00 €.

Material	Quantity [ton]	Price DKK (1 EUR = 7.45 DKK)	Percentages by weight
Cement	6.12 ton	10,374 DKK	32 %
0-2mm sand	3.50 ton	595 DKK	18 %
0-4mm gravel (0-8mm)	3.50 ton	637 DKK	18 %
0-4mm recycled roofing tiles (0-8mm)	4.38 ton	525 DKK	23 %
Water	1.66 ton	62 DKK	9 %
Glenium sky 631 (superplasticizer)	0.04 ton	191 DKK	0 %
Crackstop fibers	0.02 ton	1,038 DKK	0 %
Total	19.22 ton	13,422 DKK	100 %

Yingchuang Building Technique (Shanghai) Co. Ltd (Winsun)

Kuvissa on yrityksen valmistamia kohteita.



Kuva 28. Joki alueen tulvavalli. Pituus 500 m. Kiina Suzhou, 2019. [43.]



Kuva 29. Toimistorakennus Dubai 2016. [43].



Kuva 30. Toimistorakennus Peking, Kiina. [43.]



Kuva 31. Julkinen saniteettitila, Kiina. [43.]