



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Atte Silvonen

3D-TULOSTEET KOMMUNIKAATIOVÄLINEINÄ RAKENNUSLIIKETOIMINNASSA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 29.05.2017

Valvoja: Professori Petri Kuosmanen
Ohjaaja: DI Joonas Saikkonen

Tekijä Atte Silvonen

Työn nimi 3D-tulosteet kommunikaatiovälineinä rakennusliiketoiminnassa

Koulutusohjelma Konetekniikka

Pääaine Koneensuunnittelu

Koodi K3001

Työn valvoja Professori Petri Kuosmanen

Työn ohjaaja DI Joonas Saikkonen (NCC Suomi Oy)

Päivämäärä 29.05.2017

Sivumäärä 55

Kieli suomi

Tiivistelmä

Fyysisten pienoismallien käyttö rakennusalalla on tällä hetkellä hyvin vähäistä keskittyen lähinnä arkkitehtien omassa toiminnassaan käyttämiin malleihin. Arkkitehdit ovat perinteisesti valmistaneet malleja käsityönä, jolloin ulkopuolisille malleja tuottaessa niiden kustannukset ovat olleet varsin korkeita. Tietokoneavusteisen suunnittelun ja numeerisesti ohjattujen työstökoneiden yleistyessä ja teknologioiden kehittyessä helpommin lähestyttäviksi mallinvalmistajat ovat ottaneet käyttöönsä muun muassa 3D-tulostimia, laserleikkureita ja CNC-työstökoneita. Näillä teknologioilla mallinvalmistuksen kustannuksista on voitu karsia merkittävästi.

Tässä työssä tutkitaan kirjallisuusselvityksen ja oman empiirisen tutkimuksen kautta erilaisten pienoismallien kommunikaatioarvoa rakennusliiketoiminnassa. Empiirisen tutkimuksen mallit valmistetaan käyttäen työn toimeksiantajan hankkimaa 3D-tulostinta. Työssä pyritään selvittämään, millainen on fyysisten pienoismallien arvo suhteessa rakennusalalla laajasti käytettyihin tietomalleihin ja missä tilanteissa fyysisistä malleista saadaan irti suurin arvo.

Fyysisillä malleilla todettiin olevan etuja, jotka ovat perusteltavissa käytettävyyden ja kognitiivisen psykologian sekä havaintopsykologian kautta. Kun malleja käytetään kommunikaation tukena erityisesti viestittäessä asiakkaalle tai rakennuskohteen käyttäjälle, on tärkeää, että viestinnän apuvälineenä käytetty malli tukee oppimista ja hahmottamista. Fyysisten mallien käsin kosketeltavuus tukee todistetusti keskittymiskykyä ja avaruudellista hahmotuskykyä sekä aktivoi käsien kautta aivoja kokonaisvaltaisemmin. Monet kokevat fyysiset pienoismallit ja niiden käytön positiiviseksi ja miellyttäväksi kokemukseksi, mikä osaltaan tukee esimerkiksi oppimista.

Avainsanat 3D-tulostus, Tietomallinnus, Käytettävyys, Kommunikaatio, Havaintopsykologia

Author Atte Silvonen

Title of thesis 3D printed scale models as communication tools in construction industry

Degree programme Mechanical Engineering

Major Mechanical engineering

Code K3001

Thesis supervisor Professor Petri Kuosmanen

Thesis advisor MSc Joonas Saikkonen (NCC Suomi Oy)

Date 29.05.2017

Number of pages 55

Language Finnish

Abstract

The use of physical miniature models in the construction industry is currently very limited, focusing mainly on the models used by the architects in their own operations. Traditionally, architects have been making models by hand, making the cost of outsourcing their designs quite high. With computer-aided design and numerically controlled machine tools becoming more and more accessible to developers, 3D printers, laser cutting machines and CNC machine tools have been introduced by model manufacturers. With these technologies, manufacturing costs have been significantly decreased.

This paper examines the communication value of various miniature models in the construction business through a literature review and by own empirical research. Empirical research models are produced using a 3D printer acquired by the employer. The aim of this thesis is to find out what the value of physical miniature models is in relation to the widely used CAD models in the construction industry, and in which situations the greatest values come from a physical model.

Physical models are said to have clear benefits justified by usability and cognitive psychology as well as perceptual psychology. When physical models are used to support communication, especially to communicate to a customer or a user of a building, it is important that a template that is used as a communications aid supports learning and perception. Tactility of physical models is proven to be helpful in terms of concentration and spatial perception, as well as activating brains through hands more comprehensively. Many experience physical models and their use as a positive and enjoyable experience, which supports learning, for example.

Keywords 3D printing, Communication, BIM, Usability, Perceptual psychology

Alkusanat

Tämän työn toimeksiantaja NCC Suomi Oy hankki vuonna 2015 3D-tulostimen tarkoituksenaan tutkia sen mahdollisuuksia omassa toiminnassaan ja luodakseen positiivista, kehittäväää, uusien teknologioiden tutustumiseen kannustavaa ilmapiiriä oman työyhteisönsä sisällä. Sain kesällä 2016 työtehtäväkseni koneen toimintakuntoon saattamisen ja 3D-tulosteiden empiirisen tutkimisen käytännössä rakennusosalalla. Kesän kokemusten perusteella todettiin, että yrityksen sisällä aiheesta olisi hyvä viestiä kirjallisesti ja riittävän kattavasti ja että tutkimuksessa riittäisi sisältöä diplomityöksi asti. Koska hankittu 3D-tulostin kykenee tuottamaan melko pienikokoisia, muovisia kappaleita, päädyttiin rajaamaan diplomityön aihe koskettamaan kommunikaatiota tukeviin pienoismalleihin. Tavoitteeksi työlle asetettiin löytää konkreettisia tapoja hyödyntää hankittua 3D-tulostinta, tutkia mallien käytettävyyttä ja tuottaa alalle kirjallinen dokumentti vastaavan laitteen hyödyistä.

Työn ohjaajana toimeksiantajan puolesta toimi DI Joonas Saikkonen. Aalto-yliopistolta työn valvoi teollisuuden konejärjestelmien professori Petri Kuosmanen.

Kiitos kaikille työn empiirisessä osuudessa panoksensa haastatteluiden muodossa antaneille, mielenkiinnolla työn edistymistä seuranneille ja eteenpäin auttaneille työtovereille sekä työn tekemisen mahdollistaneelle ja rahoittaneelle NCC:lle.

Espoo 29.05.2017

Atte Silvonen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	1
Lyhenteet	2
1 Johdanto	3
1.1 Tausta	3
1.2 Tutkimusongelma	3
1.3 Työn tavoite	4
1.4 Rajaukset	4
1.5 Menetelmät	4
2 Teoria ja aikaisemman tiedon kuvaus	6
2.1 Mallin määrittelmä	6
2.2 Fyysiset mallit rakennusalalla	6
2.3 Virtuaaliset mallit rakennusalalla	10
2.4 Käytettävyys	15
2.4.1 Kognitiivinen psykologia ja havaintopsykologia	16
2.4.2 Kosketusaistin merkitys	17
2.4.3 Fyysisten ja virtuaalisten mallien vastakkainasettelu kirjallisuudessa	18
2.5 3D-tulostus pikavalmistustekniikkana	20
2.5.1 3D-tulostus materiaalia pursottamalla	23
2.5.2 3D-tulostus kohdennettua sidosenergiaa käyttämällä	25
3 Materiaalit ja menetelmät	29
3.1 Mallien valmistus	29
3.2 3D-tulosteilla arvoa asiakkaalle	30
3.3 3D-tulosteet oman toiminnan tehostamisessa	32
4 Tapaustutkimukset ja tulokset	33
4.1 Tapaus 1 – Tarjoustoiminta	33
4.2 Tapaus 2 – Hankekehitys	35
4.3 Tapaus 3 – Töiden suunnittelu ja työmaaperehdytys	37
4.4 Tapaus 4 – Työmaaperehdytys	40
5 Pohdinta	45
6 Yhteenveto	50
Lähteet	52
Liitteet	

Lyhenteet

ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
AM	Additive manufacturing
AR	Augmented reality
BIM	Building information modeling
CC	Contour crafting
CAD	Computer aided design
CNC	Computur numerical control
DLP	Digital light processing
FDM	Fused deposit modeling
FFF	Fused filament fabrication
PLA	Poly lactid acid
RP	Rapid prototyping
SLA	Stereolitography
SLS	Selective laser sintering
VR	Virtual reality
3DP	Three-dimensional printing

1 Johdanto

1.1 Tausta

Rakennusalan kehitystä on viime vuosina johtanut mallintamisen ja varsinkin tietomallintamisen mahdollistama suunnittelun ja visualisoinnin kehitys. Rakentamisessa käytetään paljon apuna valtavia määriä informaatiota sisältäviä tietomalleja. Rakennushankkeita myydään ja markkinoidaan käyttäen apuna tietokonemallinnuksista tuotettuja visualisoivia havainnekuvia ja periaatteessa tietomalleja voidaan käyttää myös tarjouslaskentaprosessissa ja tehtävien aikataulutuksessa ja suunnittelussa. Muun muassa Nyström (2015) ja Lund (2014) ovat kuitenkin tulleet opinnäytetöissään johtopäätökseen, ettei tietomalleja pystytä vielä hyödyntämään halutulla tasolla käytännössä. Tähän ovat vaikuttaneet tietomallien saatavuus ja käytettävyys, mallien sisällön taso ja henkilöstön osaaminen. Lopulta tietomalleja on käytetty lähinnä havainnollistamisen välineinä, jolloin mallien potentiaalista hyödynnetään vain murto-osa.

Toisin kuin puhtaassa rakennustekniikassa, arkkitehtien keskuudessa on pitkään panostettu fyysisten pienoismallien rakentamiseen, tehden siitä jopa oman taiteenalansa. Tietokonemallinnustyökalujen vahva kehittyminen on kuitenkin saanut arkkitehditkin pohtimaan käsin kosketeltavien mallien asemaa ja arvoa (Poikonen 2016). Osaltaan tietokonemallinnuksia on puoltanut niiden tuottamisen nopeus ja edullisuus. Fyysiset arkkitehtimallit on pitkään valmistettu käsityönä, jolloin valmistukseen vaaditaan huomattavasti enemmän aikaa ja rahaa. Valmiin fyysisen mallin muokkausmahdollisuudet ovat yhtä lailla hankalia tietokonemalliin verrattuna.

1.2 Tutkimusongelma

Tietokoneavusteisen mallintamisen nopeuden ja suuren informaatioarvon sekä toisaalta fyysisten mallien valmistuksen hitauden vuoksi painopiste on siirtynyt lähes yksinomaan virtuaalisten tietomallien hyväksikäyttöön. On kuitenkin viitteitä siitä, että sopivalla yksityiskohtien tasolla fyysiset kolmiulotteiset mallit toimivat tehokkaammin havainnollistamisen välineinä (Sun et al. 2013).

3D-tulostus on prototyyppien ja muiden havainnollistavien kappaleiden pikavalmistustekniikkana kehittynyt siihen pisteeseen, että fyysisten mallikappaleiden valmistus on sekä monin verroin nopeampaa että kustannuksiltaan selvästi esimerkiksi arkkitehtien käsityönä tekemiä malleja edullisempaa. Tällöin kannattaa nostaa esille fyysisten pienoismallien merkitys esimerkiksi arkkitehtikilpailuissa ja rakennushankkeiden tarjoustoiminnassa. Onko fyysisillä malleilla lisäarvoa, jota tietokonemallinnuksilla ei pystytä tarjoamaan? Kuinka kommunikoida mahdollisimman tehokkaasti ja havainnollisesti, kun onnistunut lopputulos vaatii keskustelukumppanilta tilan tai rakennuksen avaruudellista hahmotuskykyä? Millaisella tieteellisellä tutkimustiedolla on mahdollista asettaa fyysiset ja virtuaaliset mallit eriarvoiseen asemaan? Miten ihminen havaitsee fyysistä ympäristöään verrattuna kolmiulotteista todellisuutta mallintavaan tietokonemalliin? Voidaanko kolmiulotteisilla, fyysisillä havainnekappaleilla tehostaa muita rakennusalan prosesseja?

Diplomityötä edeltävät kokemukset omavalmisteisista 3D-tulostetuista pienoismalleista ovat olleet pääsääntöisesti positiivisia. Useimmat pienoismallin käyttöönsä saaneet ovat kokeneet mallit miellyttäväksi ja virkistävän helpoiksi tavoiksi tukea keskustelua

visuaalisesti. Tutkimuksen haasteeksi saattaa kuitenkin muodostua arvioiden taso, jonka malleja käyttäneet tahot kykenevät esittämään. Kokemus on osoittanut, että helposti arvio mallista ja esimerkiksi asiakkaan reaktioista jää helposti kovin pintapuoliseksi. Millaista tieteellistä taustatietoa ja johdattelua tarvitaan, jotta arviosta: ”ihan kiva, asiakas ainakin piti”, päästään pidemmälle ja saadaan vedettyä syvempiä johtopäätöksiä?

1.3 Työn tavoite

Työn päällimmäisenä tavoitteena on löytää ja todentaa käytännössä keinoja, joilla 3D-tulostuksesta mallien valmistuksessa saadaan arvoa rakennusliiketoiminnassa. Tarkoituksena on myös perehtyä fyysisten ja virtuaalisten mallien eroihin kommunikaatiovälineinä. Toisaalta, tuottamalla riittävän kattava kirjallinen dokumentti, työllä haetaan myös näkyvyyttä ja tietoisuutta suuren yhtiön sisällä, jotta toiminnan kehittämiseksi saadaan luotua oikea ilmapiiri ja puitteet.

Työn tuloksena tavoitellaan konkreettisia tapoja, joilla toimeksiantajan hankkimasta tulostimesta voidaan jatkossa saada mahdollisimman tehokkaasti potentiaalinen hyöty irti. Yhtä lailla tavoitteena on tuottaa alalle dokumentti, jonka avulla vastaavan toiminnan perustamisen vaativat resurssit on helppo ymmärtää.

1.4 Rajaukset

Työssä keskitytään tarkastelemaan suhteellisen pienikokoisten fyysisten mallien kommunikaatio-arvoa toimeksiantajan liiketoimintasektorilla, eli rakennusalalla. Työssä ei siis esimerkiksi pyritä löytämään mahdollisuuksia käyttää 3D-tulostusteknologiaa oikeiden rakennusteknisten komponenttien valmistuksessa. Näin ollen esimerkiksi rakennusala koskettava betonin 3D-tulostus, sekä metallien 3D-tulostus jäävät tarkastelun ulkopuolelle. Näihin rajauksiin on johtanut halu tuottaa tällä diplomityöllä konkreettisia, helposti käyttöön otettavia toimintatapoja olemassa olevin työkaluin.

1.5 Menetelmät

Työn teoriaosuudessa perehdytään kirjallisuusselvityksen keinoin pienoismallien valmistukseen ja käyttöön rakennusalalla. Lisäksi tutustutaan mallien valmistuksessa käytettyihin pikavalmistustekniikoihin, erityisesti 3D-tulostustekniikoihin ja niiden soveltuvuuteen erilaisten rakennus- ja rakennemallien valmistuksessa. Kirjallisuuden ja haastatteluiden avulla kartoitetaan myös virtuaalisten mallien käyttöä rakennusalalla ja pohditaan fyysisten mallien käyttömahdollisuuksia ja arvoa näissä kohteissa. Olemassa olevan kirjallisuuden avulla pyritään vastaamaan kysymykseen, miten fyysiset ja virtuaaliset mallit eroavat kommunikaatiovälineinä toisistaan ja miten niillä voidaan kenties tukea toisiaan.

Tämän työn toimeksiantajalle on tehty useita opinnäytetöitä tietomallien hyödyntämisestä eri toiminnoissa rakennushankkeissa. Niistä saatavaa tietoa käytetään osaltaan kartoittamaan oman toiminnan tasoa.

Työn kokeellisessa osuudessa valmistetaan 3D-tulostamalla kirjallisuusselvityksen inspiroimia fyysisiä malleja tapaustutkimuksia varten. Käytössä on Leapfrog Xeed 3D-tulostin, jolla fyysiset mallit tuotetaan. Valmistettavat mallit pyritään valitsemaan mahdollisimman erilaisiin käyttötarkoituksiin. Apuna valinnoissa käytetään muun muassa kirjallisuutta sekä toimeksiantajan omia kohteita, joissa tällä hetkellä hyödynnetään 3D-

mallinnusta jollain tavalla. Varsinainen tutkimus on luonteeltaan empiirinen, kvalitatiivinen tutkimus, jonka kautta voidaan pohtia mallien arvoa. Menetelmää sovelletaan haastattelemalla jokainen 3D-tulosteen käyttöönsä saanut taho. Haastattelu on tässä tapauksessa ainut menetelmä, jolla voidaan yrittää koota tehdyistä malleista jokin yhtenäinen arvio, sillä tehtävät mallit valitaan oman harkintakyvyn mukaan mahdollisten kohteiden joukosta ja mallit tehdään hieman erilaisiin käyttötarkoituksiin. Työssä pyritään tarjoamaan tarvittavat lähtötiedot tutkimuskysymyksien ymmärtämiseen, mutta painopiste on tarkoitus pitää selvästi työn kokeellisessa, laadullisessa tutkimuksessa.

2 Teoria ja aikaisemman tiedon kuvaus

Teoria-luvussa esitetään työn kirjallisuusselvityksenä tehty osuus ja kuvataan näin omaa tutkimusta varten oleellinen aikaisempi tieto. Tällä teoreettisella tarkastelulla luodaan pohja työn kokeelliselle ja analysoivalle osuudelle. Luvussa käsitellään yleisesti kolmiulotteisten mallien käyttöä rakennusalalla, olivat ne sitten fyysisiä tai virtuaalisia. Kirjallisuuden avulla pyritään tuomaan esille eroja fyysisten ja virtuaalisten mallien välillä ja pohditaan jo hieman mallien käytettävyyttä ja näiden välisiä suhteita. Mallien arvoa ja käytettävyyttä pyritään työssä myöhemmin arvioimaan haastattelussa ilmenneiden arvioiden kautta. Tätä menetelmää silmällä pitäen tässä luvussa tuodaan myös kognitiivisen psykologian näkökulmaa erilaisten tuotteiden käyttöön, jotta tapaustutkimusten pohdinnalla on jokin selkeä tieteellinen tausta. Luvussa myös esitellään yleisimmät 3D-tulostustekniikat ja esitetään arvioita niiden soveltuvuudesta rakennusliiketoimintaan mallien tuottamisessa. Teoriakuvauksessa esitellään erilaisia malleja ja niiden käyttötarkoituksia, joten tämä luku aloitetaan määrittelemällä termi malli.

2.1 Mallin määritelmä

Malli voi olla graafinen, matemaattinen, fyysinen tai verbaalinen kuvaus tai yksinkertaistettu versio käsitteestä, ilmiöstä, suhteesta, rakenteesta, järjestelmästä tai muusta todellisuuden aspektista. Mallin ensimmäisenä päämääränä on helpottaa mallin kohteen ymmärtämistä ja hahmottamista, usein yksinkertaistuksen keinoin. Toisena tarkoituksena malli auttaa käyttäjänsä päätöksenteossa havainnollistamalla erilaisia skenaarioita ja kolmanneksi selittää, ohjaa ja helpottaa ennustamaan ja ennakoimaan tulevaa. Johtuen reaali maailman kohteiden ja ilmiöiden kompleksisuudesta, malleihin sisällytetään yleensä vain ne tekijät, jotka ovat ensiarvoisen tärkeitä mallin tarkoituksen saavuttamiseksi. Joskus tarkoitus voidaan saavuttaa muutamalla käsin piirretyllä luonnoksella, joskus kohteen selvittämiseen tarvitaan miljoonia rivejä kirjoitettua koodia. Mallit voidaan jakaa kolmeen kategoriaan niiden abstraktiuden tason perusteella. Ensimmäisen kategorian mallit ovat vähiten abstrakteja. Ne ovat usein fyysisiä tai virtuaalisia näköiskappaleita kohteestaan. Toisen kategorian mallit ovat hieman abstraktimpia, mutta niillä on kuitenkin selkeä yhtymä kohteeseensa. Tällaisia ovat esimerkiksi erilaiset kaaviot, diagrammit ja prosessikaaviot. Kolmannen kategorian mallit ovat vielä astetta abstraktimpia; esimerkkeinä matemaattiset kaavat ja matemaattisesti muotoillut fysiikan lait. (Burry et al. 2016, Business directory 2017)

2.2 Fyysiset mallit rakennusalalla

Vaikka fyysisten pienoismallien käytöllä rakennusalalla on pitkät perinteet, ovat mallit tätä nykyä käytännössä poikkeuksetta niin kutsuttuja arkkitehtuuripienoismalleja. Tämän hetken toiminnassa rakennusteknisten fyysisten mallien käyttö rakennusalalla on lähes täysin hävinnyt tietomallien ja CAD-työkalujen kehityksen myötä. Fyysisten mallien rakentaminen on perinteisesti ollut aikaa vievää ja kallista käsityötä. Arkkitehdit ovat tietoteknisten työkalujen koko ajan kehittyessä pitäneet kuitenkin fyysisten mallien valmistuksen tärkeänä osana liiketoimintaansa ja koulutustaan. Arkkitehtuuripienoismallit, tai lyhyemmin ilmaistuna arkkitehtimallit, ovat yksi pienoismallien alalajeista. Yksinkertaisesti ne ovat tapa esitellä arkkitehtonisia ratkaisuja. Arkkitehtimalleja ovat niin asuin- ja toimitilojen, asuinalueiden, hallien ja tehtaiden, urheilukenttien, asemien ja esimerkiksi vesistöjen ja maastojen pienoismallit. Yleisimmät arkkitehtimallit, rakennusmallit, voidaan luokitella massamalleiksi, työmalleiksi, julkisivumalleiksi,

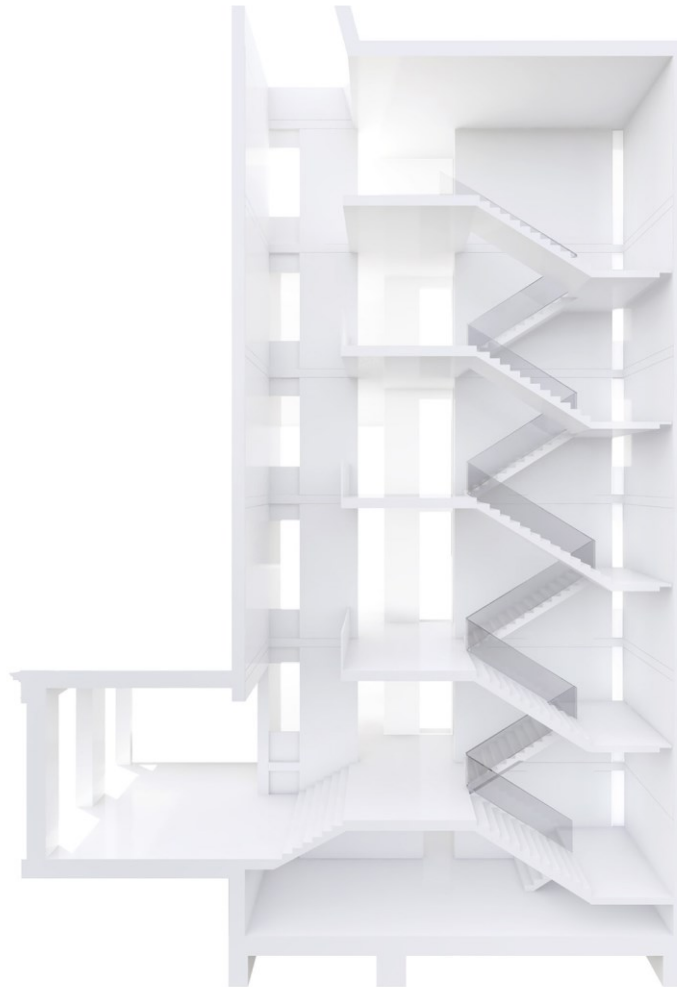
rakennemalleiksi ja detaljimalleiksi. Kokonaisuudessaan mallit voidaan luokitella käyttötarkoituksensa mukaan työskentelymalleihin, kilpailumalleihin ja esittelymalleihin. Työskentelymallit ovat malleja, joita käytetään varhaisessa suunnitteluvaiheessa hahmotuskyvyn ja kommunikaation apuvälineenä. Niiden kautta tutkitaan muun muassa rakennuksen massoitteita ja helpotetaan tilojen ja rakenteiden hahmottamista kolmiulotteisesti. Työskentelymallit voivat olla joko vain arkkitehdin omaan käyttöön valmistettuja hyvinkin karkeita malleja, tai niitä voidaan käyttää ideoiden esittelyyn ulkopuoliselle taholle, esimerkiksi kollegalle tai asiakkaalle. Usein työskentelymallit ovat reippaasti yksinkertaistettuja nopean palautteen saamiseksi. Työskentelymalleja saatetaan valmistaa omaan käyttöön suunnitteluprosessin edetessä useitakin, jolloin on tärkeää, että valmistus on riittävän nopeaa, jotta se ennemmin tehostaa suunnittelua kuin hidastaa sitä. (Burry et al. 2016, Knoll et al. 2006)



Kuva 1 Arkkitehtisuunnittelussa käytettyjä työskentelymalleja. Mallit ovat karkeita luonnoksia, joilla hahmotellaan rakennusmassaa. (Hill 2014)

Kilpailumallit ovat arkkitehtikilpailujen tärkeitä visualisointivälineitä. Taidokkailla kilpailumalleilla on monesti suuri merkitys arkkitehtikilpailuissa pärjäämiselle. Suuremmalle yleisölle arkkitehtien mallit ovat kuitenkin aina olleet enemmän tai vähemmän taideteoksiin verrattavia kilpailu- tai esittelymalleja, joita harvoin on mahdollista käyttää vapaasti oman työskentelyn ja toiminnan apuna. Esittelymalli eroaa kilpailumallista tavallisesti niin, että siinä pyritään esittämään usein jo valmistunutta

rakennussuunnitelmaa tai rakennusta vaikkapa rakentajalle tai kohteen tuleville asiakkaille. (Burry et al. 2016, Knoll et al. 2006, Poikonen 2016)



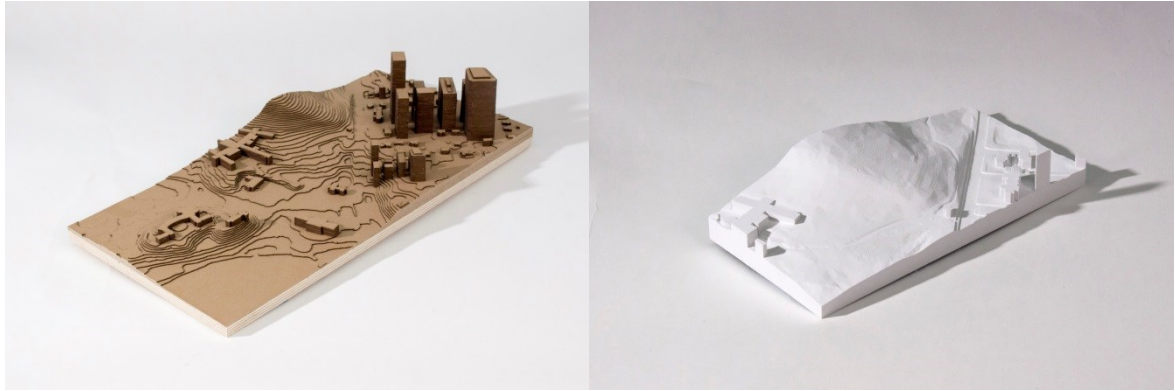
Kuva 2 Arkkitehtikilpailun malli. Kilpailumalleilla visualisoidaan suunnitelmia arkkitehtitoimiston ulkopuoliselle taholle. (Hill 2014)

Yleisen rakenteen viestinnän lisäksi malleja käytetään myös muiden prosessien tarkastelussa. Pienoismalleja käytetään esimerkiksi rakennettavuuden tarkastelussa ja talotekniikan sovittamisen suunnittelussa monimutkaisiin tai ahtaisiin tiloihin. Mallit voidaan rakentaa erillisistä komponenteista koottaviksi ja uudelleenpurettaviksi sisäisten geometrioiden hahmottamiseksi. Niitä voidaan käyttää valaistuksen, akustiikan ja esimerkiksi ilmanvaihdon toimivuuden testaamiseen ja välttää näin mahdolliset kalliit korjaustoimenpiteet rakennusvaiheessa. Pienoismalleilla on myös pedagoginen käyttökohde. Monella tieteenalalla fyysisten mallien rakentaminen on jopa kasvussa. Mallinrakentamisen on huomattu vaikuttavan positiivisesti visuaalisen ajattelun ja hahmotuskyvyn kehittymiseen verrattuna kaksikulotteisen kuvan tai tietokoneavusteisesti tuotetun mallin tarkasteluun. Vaihtoehtoiset tavat eivät kuitenkaan ole toisiaan poissulkevia, vaan fyysisten mallien tutkimisen yhdessä 2D-piirustusten kanssa on todettu vahvistavan entisestään avaruudellisen hahmotuskyvyn kehitystä. (Gibson et al. 2002, Nagpure 2016)

Arkkitehtimallien valmistus on pitkään ollut pienoismallien valmistusta perinteisin menetelmin käsityönä. Perinteisillä valmistustekniikoilla tarkoitetaan tässä yhteydessä kaikkia niitä menetelmiä, joissa apuvälineenä ei käytetä tietokoneohjattuja laitteita. Arkkitehtimalleja on näillä menetelmillä valmistettu hyvin laajasta skaalasta erilaisia materiaaleja, käyttäen työkaluina yhtä lailla moninaista joukkoa laitteita ja apuvälineitä. Tärkeimmät, arkkitehtimallien valmistuksessa kulmakiviksi muodostuneet materiaalit pitävät sisällään esimerkiksi erilaiset paperit, kartongit, puupahvit, vaahtomuovit, kevytlevyt, muovailumassat, puut, lasit, akryylit, metallilevyt ja luonnosta poimitut kappaleet. Työkaluina arkkitehdit ovat käyttäneet perinteisesti yksinkertaisista askarteluvälineistä alkaen kaikkea aina raskaisiin puun ja metallien työstökoneisiin saakka. Työskentelymallien valmistus on tavallisesti hoidettu yksinkertaisemmin ja nopeammin käsityökaluin helposti työstettävistä ja materiaaleista, mutta kilpailumallit vaativat usein jo laajan arsenaalin työkaluja ja laitteita. (Burry et al. 2016, Knoll et al. 2006). Niin sanottujen perinteisten valmistusmenetelmien arkkitehtimallien kustannuksista ja valmistusprosessin vaatimasta ajasta on haastavaa antaa kirjallisuuden perusteella yleispätevää arviota. Arkkitehtitoimistot ja muut mallinvalmistajat antavat usein mallien valmistusajaksi muutamasta viikosta pariin kuukauteen. Mallien hinnat vaihtelevat käytetyn ajan ja materiaalien mukaan. Puhtaiden mallinrakentajien ja arkkitehtitoimistojen tuntiveloitus vaihtelee suurella skaalalla. Lopullinen hintahaitari on laaja: malleja on tuotettu muutaman sadan ja jopa miljoonan euron kustannusvälillä.

2000-luvulla arkkitehtimallien valmistusmenetelmät ovat vahvasti muotoutuneet CNC-teknologioiden (computer numerical control), eli numeerisesti ohjattujen valmistusmenetelmien, ympärille. Arkkitehdit ovat muun muassa omaksuneet numeerisesti ohjatut työstökoneet, laserleikkurit ja 3D-tulostimet osaksi mallinvalmistusvälineistöään. Nämä teknologiat ovat mahdollistaneet nopean ja toistuvan mallinvalmistuksen, joka osaltaan on muokannut suunnittelutyön iteraatiokierroksia tehokkaampaan sykliin aiempaa alhaisemmilla kustannuksilla. Numeerisesti ohjatut valmistusmenetelmät ovat myös merkittävästi vähentäneet tarvittavien työkalujen määrää vähentäen näin resurssien tarpeita. (Burry et al. 2016)

Alla olevassa kuvassa (Kuva 3) on kaksi esimerkkiä numeerisesti ohjatuilla työstökoneilla valmistetuista aluemalleista. Ensimmäinen malli on valmistettu kustannustehokkaasti laserleikkaamalla askartelupahvia. Valmistusprosessi vaati 8 tuntia CAD-tiedoston valmistelua, 5 tuntia laserleikkurin käyttöä ja 10 tuntia käsin tehtävää kokoonpanotyötä. Kuvan toinen malli on valmistettu 3D-tulostamalla lasersintrausta hyödyntävällä laitteella (teknologiasta lisää luvussa 2.5.2). Tämän mallin esivalmisteluun käytettiin aikaa 11 tuntia, 3D-tulostukseen 34 tuntia ja jälkikäsittelyyn ja kokoonpanoon 1 tunti. Pahvista valmistetun mallin materiaalikustannukset olivat tässä tapauksessa lähes kymmenkertaisesti pienemmät, pahvin hinnan ollessa noin 30 yhdysvaltojen dollaria neliöjalalta. (Seyl 2015)



Kuva 3 Numeerisesti ohjatuin valmistusmenetelmin tuotettuja malleja. Vasemmalla laserleikattu ja oikealla 3D-tulostettu aluemalli (Seyl, 2015)

Arkkitehtimallien lisäksi rakennusalalla on toteutettu myös erilaisia hieman teknisempään käyttöön tarkoitettuja pienoismalleja. Esimerkkinä kiinalainen rakennusyhtiö, Gammon Construction, on kokeillut toiminnassaan rakennustyömaalla 3D-tulostettuja pienoismalleja. Koko työmaa-alueen kattavaa pienoismallia on käytetty yhdessä tietomallien kanssa töiden suunnittelussa ja rakennustyömaan työvaiheiden viestinnässä koko työmaahenkilöstölle. Mallinvalmistuksessa rakennusyhtiö on käyttänyt varsin pitkälle automatisoituja menetelmiä. 3D-tulostimelle syötettävä maastomalli on tuotettu autonomisella kuvauskopterilla, joka laserkeilauksen menetelmin tuottaa tarkasti todellisuutta vastaavan mallin työmaa-alueesta ja sen pinnanmuodoista. Pienoismalli on osaltaan auttanut vähentämään virheistä johtuvaa lisätyötä ja viivästyksiä ja helpottanut riskienhallintaa. Virtuaalisten mallien käyttökohteita mukaillen pienoismallit ovat osoittautuneet myös käytännöllisiksi välineiksi rakennettavuuden arvioimisessa ja turvallisuusseikkojen huomioonottamisessa. Lisääntynyt havainnollisuus nostaa esiin rakennusteknisiä ongelmakohtia ja vaaranpaikkoja. (Gammon Construction Ltd 2013).

2.3 Virtuaaliset mallit rakennusalalla

Virtuaalisia malleja käytetään rakennusalalla paljon ja ne ohjaavatkin jo toimintaa esimerkiksi töiden suunnittelussa ja visualisoinnissa sekä projektien esittelyssä asiakkaalle tai muulle taholle, joka ei välttämättä ole rakennusalan ammattilainen. Virtuaalisten mallien käyttöä käsitellään seuraavaksi jakamalla se niin kutsuttuihin tietomalleihin sekä myynnin ja markkinoinnin, toisin sanoen asiakasrajapinnan, tarpeiden malleihin. Tässä luvussa käsitellään myös muita tällä hetkellä yleistäviä, tietokoneen monitorille vaihtoehtoisia, virtuaalisten mallien katseluteknologioita.

Rakennuksen tietomalli (engl. Building Information Model, BIM) on rakennuksen ja rakennusprosessin koko elinkaaren aikaisten tietojen virtuaalinen kokonaisuus. Malli on kolmiulotteinen digitaalinen esitys rakennuksesta, rakentamiseen käytetyistä tuotteista ja tuotteiden ominaisuuksista. Tietomalli voi sisältää tietoja muun muassa rakennuskomponenttien fyysisistä mitoista, valmistajasta, materiaalista, pintakäsittelystä sekä erilaisista standardisoiduista luokituksista ja vaatimuksista. Rakennushankkeen tietomallipohjainen tiedonhankinta yhdistää suunnittelussa, tuotevalmistuksessa, rakentamisessa ja rakennusten käytössä ja ylläpidossa tarvittavat tiedot. Tietomallintaminen muuttaa rakennuksen suunnittelun perinteisestä 2D-projektiosuunnittelusta 3D-suunnitteluksi. Rakennuskomponentteihin voidaan myös liittää

aikataulutieto, jolloin aika tuo tietomalliin neljännen ulottuvuuden. Tällöin puhutaan 4D-suunnittelusta. (Sulankivi et al. 2009, Eastman et al. 2008)

Tietomallintamisen kantavana ideana on kolmiulotteisen geometriatiedon ja muun tietosisällön hyödyntäminen suunnittelussa ja tuotannossa. Tavalliset tietomalleista raportoidut hyödyt ovat olleet havainnollisuuden lisääntymisestä seuranneet suunnittelu- ja mittavirheiden vähentymiset. Tietomalleilla on haettu tehokkuutta määrä- ja kustannuslaskentaan, niillä on tuotettu energia-, valaistus- ja palosimulointeja sekä havainnollista markkinointimateriaalia. Tietomalleille on myös ideoitu käyttökohteita työturvallisuuden suunnittelussa ja hallinnassa. Eri suunnittelualojen (arkkitehtuuri, rakennesuunnittelu, talotekniikka) yhteensovittamiseen ja mahdollisten ristiriitojen havaitsemiseen tietomallit ovat tarjonneet tehokkaan ratkaisun. (Sulankivi et al. 2009, Huang et al. 2009)

Tietomalli voidaan toteuttaa myös koko työmaan alueen ja toimintojen kattavana mallina. Tällöin puhutaan työmaan tietomallipohjaisesta aluesuunnittelusta. Työmaan aluesuunnitelma on päätoteuttajan laatima suunnitelma, jonka perustavoitteena on suunnitella työmaan toimintojen sijoittelu ja niiden vaatimat järjestelyt mahdollisimman sujuviksi rakentamisen eri vaiheissa. Aluesuunnitelmalla on myös viestinnällinen tarkoitus. Aluesuunnitelmaa käytetään tiedonvälityksessä työmaan sisäisistä ja ulkoisista logistiikkajärjestelyistä sekä työ- ja turvallisuusjärjestelyistä kaikille asianomaisille. Aluesuunnitelma ei ole hankkeen alussa lukkoon lyötävä suunnitelma, vaan suunnitelmaa päivitetään työmaan edetessä tarpeen mukaan parhaaksi katsotulla tavalla. Tavallista on, että hankkeen maarakennus-, perustus-, runko- ja sisätyövaiheisiin laaditaan omat versionsa aluesuunnitelmasta. Perinteinen tapa tehdä aluesuunnitelma on tehdä merkintöjä asemakaavapiirroksen joko tietokoneavusteisesti, käsin tai tarralapuin. Alla olevassa kuvassa on esimerkki perinteisestä työmaalta löytyvästä aluesuunnitelmasta. (Sulankivi et al. 2009)



Kuva 4 Perinteinen työmaatoimiston seinältä löytyvä aluesuunnitelma (Sulankivi et al. 2009)

Tietomallintaminen avaa uusia mahdollisuuksia työmaa-alueen suunnitteluun ja suunnitelmien esittämiseen. Työmaan korkoerojen havainnollistaminen kolmiulotteisesta mallista on huomattavasti luontevampaa kuin perinteisestä 2D-suunnitelmasta. Monet korkoeroista johtuvat vaaratekijät saadaan näin tehokkaammin viestittyä eteenpäin. Tietomallipohjaisen aluesuunnitelman sisältämää tietosisältöä voidaan myös hyödyntää esimerkiksi tietomallipohjaisen putoamissuunnitelman, telinesuunnitelman ja elementtiasennussuunnitelman tekemiseen. Alla on esimerkkinä kuvakaappaus (Kuva 5) tietomallipohjaisesta 3D-aluesuunnitelmasta. (Sulankivi et al. 2009)



Kuva 5 Työmaan tietomallipohjainen aluesuunnitelma. Tietomallien sisältämää informaatiota on täydennetty työmaakomponenteille, kuten torninosturilla, työmaakopeilla, aidoilla ja jätelavoilla. (Sulankivi et al. 2009)

Useista mahdollisuuksista huolimatta tietomallien hyödyntäminen todellisuudessa jää vielä kauas niiden käyttöpotentiaalista. Tehokas hyödyntäminen painottuu selkeästi rakennusprosessin suunnitteluvaiheeseen, eikä niinkään tuotannon- ja tehtäväsuunnitteluun. Jonkin verran tuotannosuunnittelussakin tietomalleja kuitenkin käytetään. Rakennuskomponenttien määrätietojen hakeminen ja 2D-piirustusten lukemisen helpottaminen havainnollisuuden kautta ovat tietomallien toistaiseksi yleisimmät raportoidut käyttötavat. Kuitenkin mallien hyödyntämisen kehittäminen on jo useamman vuoden keskittynyt aikataulutietojen tuoman 4D-suunnittelun simulointiin. Tietomallin sisältämiä geometria- ja määrätietoja voitaisiin hyödyntää myös esimerkiksi menetelmäsuunnitteluun, vaihtoehtoisten työjärjestysten simulointiin, henkilö- ja materiaalivirtojen suunnitteluun ja simulointiin ja työturvallisuuteen liittyvään suunnitteluun. (Sulankivi et al. 2009)

Rakennusalalla on monille toimeksiantajille tehty 2000-luvulla useita opinnäytetöitä, joissa on selvitetty tietomallien hyötyjä erilaisissa toiminnoissa ja kartoitettu niiden tähänhetkistä käyttöastetta. Esimerkkeinä Nyström (2015) on tutkinut tietomallien käyttöä urakointiliiketoiminnan tarjouslaskentaprosessissa, Lund (2014) rakennustyömaan

tehtäväsuunnittelussa ja Kauppi (2014) elinkaarihankkeiden kiinteistöjohtamisessa. Kaikki kolme ovat opinnäytteissään havainneet selviä hyötyjä tietomallien käyttöön otosta, mutta samalla todenneet todellisen käytön olevan tällä hetkellä varsin vähäistä. Lähinnä sekä tarjouslaskentaprosessissa, tehtäväsuunnittelussa että kiinteistöjohtamisessa tietomallien käyttö on keskittynyt vain mallin tarjoaman visuaalisuuden hyödyntämiseen. Vaikeat rakenteet ja kokonaisuudet on ollut helpompi hahmottaa kolmiulotteisesta mallista ja esimerkiksi työturvallisuuteen liittyvien suojien ja telineiden tarpeellisuuden ja sijoittelun on voinut tehokkaammin suunnitella etukäteen. Varsinaista tietosisältöä on hyödynnetty kovin harvoin. Mallien hyödyntämisen tasoon ovat vaikuttaneet esimerkiksi mallien tarkkuus ja virheiden määrä. Käytetyissä malleissa havaittiin turhan karkeita yksinkertaistuksia, tai niistä saattoi puuttua joitakin oleellisia elementtejä. Mikäli toiminnassa nojataan tietomalliin, täytyy käyttäjän pystyä luottamaan, että malli on kunnossa. Toisaalta mallien vähäiseen hyödyntämiseen on vaikuttanut henkilöstön tietotekninen osaaminen. Visuaalisuudesta huolimatta mallin kautta kohteiden tarkastelu on koettu haastavaksi ja tehokas käyttöönotto vaatisi henkilökunnan koulutusta. (Nyström 2015, Lund 2014, Kauppi 2014)

Tietomallien ja aluesuunnitelmamallien lisäksi virtuaalisia 3D-malleja käytetään rakennusalalla lähinnä myynti- ja markkinointimateriaalin tuottamiseen. Malleista pystytään tuottamaan fotorealistisia kuvakaappauksia tai vaikkapa liikkuvaa videokuvaa rakennushankkeen visualisointi- ja esittelytarpeisiin. Myyntiin ja markkinointiin liittyen virtuaalisia malleja käytetään myös asiakkaan osallistavan suunnittelun ja hankekehityksen tukena, sekä sisäisesti konseptisuunnitteluvaiheessa, jolloin ne tehostavat yhteistoiminnallista työskentelyä ja kommunikointia. On myös huomattu, että visuaaliset 3D-mallit toimivat hyvin suunnittelijoiden ja rakentajien rajapinnassa kommunikoinnin tehostajina. (Bouchlaghem et al. 2005)

Tietoteknisten välineiden kehittyessä huomiota on alettu antaa myös mallien katselutekniikalle erityisesti asiakasrajapinnassa, mutta myös itse rakentamisessa. Erilaisilla virtuaalitodellisuuden ja yhdistetyn todellisuuden sovellutuksilla on haettu vaihtoehtoisia tapoja tuoda rakennustekniikassa paljon käytetyt tietomallit osaksi alan toimintoja. Myös virtuaalitodellisuuden ja yhdistetyn todellisuuden laitteiden kehittäjät pitävät kiinteistökehitystä ja rakentamista yhtenä kaikkein potentiaalisimmista aloista teknologian hyödyntämiseen tulevaisuudessa. (Issa 2000, Woodward et al. 2010)

Virtuaalitodellisuus sananmukaisesti korvaa ympäröivän todellisuuden jollakin toisella, virtuaalisella todellisuudella. Se on tapa tuoda erilaiset, aiemmin kaksiulotteiset, aineistot tarkasteltavaksi niin, että vähintäänkin tuntemus vastaa lähemmin fyysisessä kolmiulotteisessa todellisuudessa ympäristön havainnointia. Virtuaalitodellisuuden käytännön toteuttamiseen rakennusalan sovelluksissa on tällä hetkellä useampia kilpailevia vaihtoehtoja. Suosituin tapa lienee kuitenkin silmille asetettavat ”virtuaalilasit” (kts. **Error! Reference source not found.**). Laseihin sisäänrakennetulla optiikalla ja tarkalla näyttöteknologialla korvataan näkökentän todellinen ympäristö jollakin toisella, virtuaalisella todellisuudella. Tällaisella päähän asetettavalla tekniikalla voidaan vasemmalle ja oikealle silmälle projisoida samanaikaisesti sama kuva, mutta hieman eri katselukulmasta, jolloin syntyy vahvempi syvyyden havainnointi stereonäön ansiosta. Päähän asetettavat virtuaalilasit hyödyntävät usein pään liikkeitä mittaavia antureita, jolloin mallissa liikkuminen ja katseen kohdistaminen on hyvin intuitiivista. Ei tarvita erillistä käyttöliittymän hallitsemista. (Issa 2000)



Kuva 6 Oculus Rift virtuaalitodellisuuden teknologia (Oculus VR 2017)

Yhdistetyn todellisuuden ja lisätyn todellisuuden sovellutukset ja aiheen tutkimukset rakennusalaan koskien ovat viime vuosina lisääntyneet. Erona virtuaalitodellisuuteen, lisätyn ja yhdistetyn todellisuuden laitteilla tarkastellaan digitaalista informaatiota jossakin todellisessa, fyysisessä ympäristössä. Yhdistetty todellisuus on näistä kahdesta vielä astetta vuorovaikuttisempi ympäristönsä kanssa. Sen sovellukset kartoittavat fyysistä ympäristöä erilaisten antureiden avulla, jolloin katselulaitteella voidaan sitoa jokin kolmiulotteinen virtuaalinen malli todelliseen fyysiseen ympäristöön. Laitteet voivat olla esimerkiksi Microsoft HoloLens:n (kts. Kuva 7) kaltaisia virtuaalilasien tapaan päähän asetettavia laitteita, tai vaikkapa kameran sisältävän mobiililaitteen näytön kautta tarkasteluja näkymiä. Rakennusallalla teknologialle on kaavailtu monia käyttötapoja. Hyötyjä tavoitellaan esimerkiksi rakentamisen aikaisesta seurannasta ja tulevien töiden visualisoinnista, kustannusten hallinnasta, turvallisuuden parantamisesta, asennusvirheiden välttämisestä ja myynnin tehostamisesta. Monet näistä kaavailuista hyödyistä ovat käytännössä vain tapa tarkastella jo olemassa olevia tietomalleja uudella menetelmällä. Teknologialla kuitenkin on kuitenkin muitakin hyötyjä kuin kasvanut havainnollisuus. Tavallisesti tietomallien käyttöä varten tarvitaan tietokone, jota käytetään työmaatoimistossa. Työmaatoimistossa ollaan kuitenkin vielä suhteellisen kaukana tarkasteltavasta kohteesta. Yhdistetyn todellisuuden laitteilla pyritään esimerkiksi mahdollistamaan todellisuuden ja suunnitelmien yksiselitteinen vertailu paikan päällä, jolloin tilanneseurantaan ja tulevien töiden suunnitteluun saadaan huomattavaa lisätukea. (Woodward et al. 2010)

Vaikka tällä hetkellä laitteiden tutkimukseen ja kehitykseen on käytetty runsaasti resursseja, on toistaiseksi tehty hyvin vähän konkreettisia tekoja teknologian integroimiseksi osaksi muita toiminnan järjestelmiä. (Jiao et al. 2013, Woodward et al. 2010)

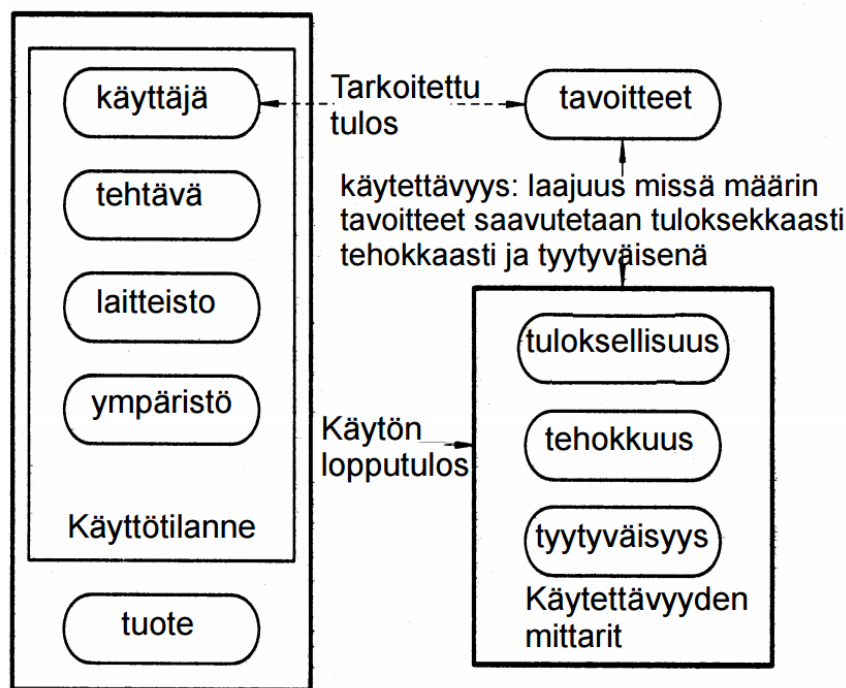


Kuva 7 Microsoft HoloLens - yhdistetyn todellisuuden teknologia (Microsoft 2017)

2.4 Käytettävyys

Tässä luvussa pyritään kirjallisuuden kautta tuomaan esille käytettävyyden ja kognitiivisen psykologian aspekteja, jotka voivat vaikuttaa ja selittää fyysisten ja virtuaalisten mallien eroja käytettävyydessä.

ISO-standardi 9241-11 määrittelee käytettävyyden mitaksi, miten hyvin määrätyt käyttäjät voivat käyttää tuotetta määrättyssä käyttötilanteessa saavuttaakseen määritetyt tavoitteet mittareinaan tuloksellisuus, tehokkuus ja miellyttävyys. Tuloksellisuudella tarkoitetaan tarkkuutta ja täydellisyyttä, jolla käyttäjät saavuttavat määritetyt tavoitteet. Tehokkuus ilmaisee voimavarojen käyttöä suhteessa tarkkuuteen ja täydellisyyteen käyttäjien saavuttaessa tavoitteet. Miellyttävyys/tyytyväisyys muodostuu epämukavuuden tunteen puuttumisesta ja myönteisestä suhtautumisesta tuotteen käyttöön. Käyttötilanne sisältää kaikki käyttäjät, tehtävät, laitteistot, ohjelmistot ja aineistot sekä fyysisen ja sosiaalisen ympäristön, jossa tuotetta käytetään. Tavallisesti käytettävyyttä arvioidessa on tarpeen käyttää tuloksellisuudelle, tehokkuudelle ja tyytyväisyydelle ainakin yhtä mittaria. Mittareiden ja niiden tarkkuuden valinta riippuu arvioinnissa mukana olevien tahojen tavoitteista. (SFS-EN ISO 9241-11 1998)



Kuva 8 Käytettävyyden käsite rakenne (ISO 9241-11)

Käytettävyyteen liittyy olennaisesti oppiminen ja opittavuus. ISO 9241-10-standardi määrittelee vuorovaikutuksen tuotteen ja ihmisen kanssa silloin soveltuvaksi oppimiseen, kun se tukee ja opastaa käyttäjää järjestelmän oppimisessa. Saman standardin osa 11 käyttää opittavuuden määritelmään samaa kaavaa kuin itse käytettävyydenkin. Opittavuus määrittyy tuloksellisuuden, tehokkuuden ja miellyttävyyden kautta. Kognitiiviseen tutkimukseen pohjautuvan konstruktivistisen oppimiskäsityksen mukaan oppiminen on tehokkainta, kun siihen kytkeytyy myönteisiä tunne-elämyksiä, itsensä toteuttamista ja saavutettua tunnustusta. Pystyäkseen käyttämään jotakin tuotetta käyttäjän on pystyttävä havaitsemaan tehtävän suorittamisen kannalta kaikki oleellinen. Yhtä lailla käyttäjän on kyettävä havaitsemaan tekemiensä toimenpiteiden vaikutukset tuotteeseen. (Sinkkonen et al. 2006, SFS-EN ISO 9241-10 1998, SFS-EN ISO 9241-11 1998)

Käytettävyyden psykologian ja opittavuuden merkitys korostuu, kun työn kolmannessa luvussa esiteltävien 3D-tulostettuena pienoismallien käyttöä ja havaitsemista neljännessä luvussa pohditaan. Fyysisten ja virtuaalisten mallien käytettävyydessä on ehdottomasti suuriakin eroja, jotka selittävät osaltaan mallien herättämiä tunteita ja mielipiteitä.

2.4.1 Kognitiivinen psykologia ja havaintopsykologia

Havaintopsykologia on tieteenä psykologian osa-alue, joka tutkii aisteja ja havaintoja. Havaintopsykologisissa tutkimuksissa tutkitaan aistimisen ja havaitsemisen taustalla olevia kognitiivisia ja neuraalisia prosesseja. Tutkimusmenetelminä ovat usein kokeellisen psykologian ja psykofysiikan menetelmät.

Havaintopsykologian tutkimuskohteisiin kuuluu myös esimerkiksi ala, jossa tutkitaan ihmisen havainnointia fyysisestä todellisuudesta ja havainnon muodostumista. Tälle työlle relevanttia on tuoda tätä taustaa vasten myös tarkastelua siitä, millainen havainto

muodostuu todellisuutta esittävästä kuvasta ja miten tämä havainto syntyy. Kuinka yhteneviä fyysisestä todellisuudesta ja kuvasta tehdyt havainnot voivat olla?

Monet vanhat havaintopsykologian teoriat perustuvat olettamukseen, että ihminen havainnoi jatkuvaa todellisuutta käytännössä sarjana pysähtyneitä kuvia. Uudempi käsitys, useiden tutkijoiden osoittamana kuitenkin on, että todellisuuden havainnointi tapahtuukin enemmän liikkeen tuottaman informaation ja aktiivisen ”suoran havainnoinnin” kautta. Fyysisen todellisuuden havainnoinnin toiminnot on monissa tutkimuksissa todettu automaattisiksi ja aktiivisiksi. (Pienimäki 2000)

Vaikka fyysisen todellisuuden havainnointi ja hahmottaminen tapahtuisikin ennen kaikkea liikkeen tuottaman informaation ja aktiivisen suoran havainnoinnin kautta, on tämän työn kannalta relevanttia syventyä hieman havaintopsykologiaan liittyvään kuvatutkimukseen. Rakennusalan tekniset dokumentit ovat usein vahvasti kuitenkin kuvia – joko fyysisesti paperiarkilla tai tietokoneen monitorilla. Myös 3D-tietokone-mallin tarkastelu on usein staattista yhden näkymän tarkastelua tietokoneen monitorilla, jolloin sekin voidaan rinnastaa täysin pysähtyneeksi yksittäiseksi kuvaksi. Monitori on kuitenkin yhtä lailla kaksiulotteinen elementti. Kuvatutkimukseen liittyy myös esimerkiksi tärkeänä osana tarkastelu, millainen on kolmiulotteista maailmaa esittävästä kuvasta muodostuva havainto ja millainen vastaavuus sillä on fyysisestä todellisuudesta tehdyn havainnon kanssa. (Pienimäki 2000)

Kolmiulotteista maailmaa esittävällä kuvalla on luonteestaan johtuen tavallaan kaksi todellisuutta. Fyysisesti kuva saattaa olla esimerkiksi paperiarkki, jolla on tietty paksuus ja jossa on jonkinlaisia graafisia merkintöjä, esimerkiksi viivoja ja värejä. Näin ollen kuva voidaan käsittää joko omana fyysisenä kappaleenaan kolmiulotteisessa fyysisessä ympäristössään, tai sitten kuvan esittämänä sisältönä, jonakin kolmiulotteisena virtuaalisena kohteena. Kuvan laatijan täytyy päättää kuvassa käytettävä perspektiivi ja katselukulma. Näiden todenmukaisuus ja luonnollisuus hahmottuvat ihmisille hieman eri tavoilla. Kuvan nähdessään ihminen valitsee, katseleeko hän fyysistä kaksiulotteista pintaa vai muodostaako hän aivoissaan kuvasta kolmiulotteisen virtuaalisen maailman. Monesti reaktio on täysin automaattinen esimerkiksi valokuvia katsellessa, mutta myös valokuvien esittämän kolmiulotteisen maailman ymmärtäminen vaatii harjaantumista niiden tulkittamisessa. (Pienimäki 2000)

Jotta ihminen osaisi lukea ja tulkita kuvia, täytyy kyetä vertailemaan sitä, mitä näemme katsellessamme normaaleja fyysisiä kohteita siihen, mitä näemme tarkastellessamme kuvia. Kuvan havaitseminen sen esittävänä kohteena vaatii siis tietoa, vertailua ja päättelyä. Kaikki mainitut ovat opittuja taitoja. Nämä prosessit voivat poiketa henkilökohtaisesti hyvinkin ratkaisevasti, jolloin kaksi ihmistä saattaa havaita kuvan esittämän todellisuuden oman pohjatietonsa, vertailunsa ja päättelynsä johdosta eri lailla. Kuvan esittämän todellisuuden havaitseminen ja ymmärtäminen vaatii aina lähtökohtaisesti enemmän kognitiivisia prosesseja, kuin fyysisten kohteiden havaitseminen. (Pienimäki 2000)

2.4.2 Kosketusaistin merkitys

Kosketuksella on useita merkityksiä, jotka vaikuttavat huomattavasti tapaan, jolla koemme fyysisen ympäristömme. Fyysinen kohtaaminen ja tunteminen ovat iso osa oman kehomme tiedostamista. Fyysinen kanssakäyminen ja kosketuksen aistiminen varsinaisesti

muodostavat käsityksen siitä, että olemme fyysisiä olentoja fyysisessä ympäristössä. Vaikka ihminen kykenee näköaistillaan havainnoimaan omaa kehoaan ja ympäristöään, se ei riitä tietoisuuden muodostumiseen näistä kahdesta. Tarvitaan tuntoaisti. Tuntoaisti eroaa näkö- ja kuuloaistista myös siinä, että se perustuu fyysiseen kontaktiin ja aistielimet ovat levittyneet laajasti koko kehoon. (Hatwell et al. 2003, Sonneveld et al. 2008)

Kosketus on oman tietoisuuden lisäksi elintärkeä ympäröivän todellisuuden havainnointiväline. Ihmiset voivat nähdä muotoja ja värejä, kuulla ääniä ja haistella tuoksua, mutta vasta tuntoaistin kautta välittyy todelliset fyysiset ominaisuudet. Tästä näkökulmasta ihmisen on jopa pakko käyttää tuntoaistiaan fyysisen ympäristönsä ymmärtämiseen. (Sonneveld et al. 2008)

Kun fyysistä objektia tutkitaan käsin koskettamalla, käännelemällä ja tunnustelemalla, lisätään ymmärrystä sen fyysisistä ominaisuuksista huomattavasti. Objektin kovuus, jäykkyys ja elastisuus määritetään kohdistamalla esimerkiksi puristusta ja vääntöä käsin objektiin. Yhteistä näiden ominaisuuksien määrittämisellä on se, että toiminnot yrittävät fyysisin keinoin muokata objektia. Yhtä lailla lämpötila välittyy tuntoaistin kautta selvemmin, kuin minkään muun. Samoin tekevät pinnan ominaisuudet, kuten erilaiset tekstuurit, karheus ja liukkaus. Tämän työn kannalta mielenkiintoisin aihe on kuitenkin muodon ja koon hahmottaminen kosketuksen kautta fyysistä objektia tunnustelemalla. Ihmisille luonteenomainen tapa hahmottaa ja oppia jonkin objektin geometriset ominaisuudet on tarttua siihen, pidellä sitä käsissä, käänneellä sitä omin käsin ja näin katsella sitä eri kulmista ja tunnustella sormin sen pinnanmuotoja ja kulmia. Muotojen erottaminen voi perustua jyrkkiin pintojen epäjatkuvuuksiin, kuten reunoihin, kulmiin ja reikiin, jatkuviin kolmiulotteisiin pintoihin (vs. tasaiset pinnat) ja pintojen orientaatioon (horisontaalinen, vertikaalinen, kalteva). Erilaisten geometristen ominaisuuksien tärkeys riippuu siitä, tarkastellaanko objektia pääsääntöisesti visuaalisesti vai koskettaen. Visuaalisessa tarkastelussa ja objektin hahmottamisessa orientaatiota ei pidetä kovinkaan tärkeänä, vaan korostetaan pintojen kaarevuuksien muutosten tarkastelua. Kosketusaistin kautta tarkasteltuna tilanne kääntyy pääläelleen. (Sonneveld et al. 2008)

Käsin koskettaminen ja käsillä tekeminen on vaikuttanut suuresti ihmisen aivojen kehittymiseen. Merkittävä osa aivokuoresta on aktiivisena käsiin liittyvissä toiminnoissa. ”Käsillä tekeminen tehostaa oppimista, keskittymistä ja muistamista sekä kehittää luovuutta ja ongelmanratkaisukykyä”, sanoo Helsingin yliopiston ja Työterveyslaitoksen professori ja aivotutkija Minna Huotilainen. Käsillä tekemisellä on suuri merkitys kolmiulotteisen tilan havaitsemisessa ja avaruudellisen hahmotuskyvyn kehittämisessä. (Kuismin 2013)

2.4.3 Fyysisten ja virtuaalisten mallien vastakkainasettelu kirjallisuudessa

Kuten jo luvussa 2.2 todettiin, CAD-työkalujen ja tietomallinnuksen kehitys on käytännössä täysin syrjäyttänyt fyysisten mallikappaleiden käytön havainnollistamisen välineinä rakennustekniikassa, pois lukien arkkitehtimallit (Dadi et al. 2014). Arkkitehdit ovat laajalti pitäneet fyysisten mallien valmistuksen sekä oman suunnittelunsa apuvälineenä että arkkitehtikilpailujen havainnollistamisvälineenä. Tietoteknisin työkaluin mallien tuottaminen on silti huomattavasti nopeampaa ja niin halutessaan malleissa voidaan esittää pienimmätkin yksityiskohdat. Viime vuosien kehitys fyysisten mallien pikavalmistustekniikoissa on saanut asiantuntijat kuitenkin tutkimaan käsinkosketeltavien

mallien eroja virtuaalisiin malleihin. Tässä luvussa perehdytään kirjallisuuden ja valittujen tutkimustapausten avulla fyysisten ja virtuaalisten mallien eroihin kolmiulotteisen hahmotuksen apuvälineinä.

Sun et al. (2013) pohtivat tutkimusartikkelissaan fyysisten pienoismallien arvoa ja syitä, miksi kehittyneiden virtuaalisten mallinnustyökalujen ohella edelleen käytetään fyysisiä mallikappaleita. Tutkimuskysymyksen ollessa varsin laaja, artikkelissa keskitytään tarkastelemaan ihmisten avaruudellisen hahmotuskyvyn eroja fyysisten ja virtuaalisten mallikappaleiden välillä. Tutkimusmenetelmänä osallistujaryhmälle näytettiin sattumanvaraisessa järjestyksessä fyysinen ja virtuaalinen malli. Malli koostui erikorkuisista skaalatuista rakennuksista, joiden korkeutta osallistujien piti pystyä arvioimaan. Mallista osoitettiin kerrallaan kaksi verrokkirakennusta, joiden välistä korkeuseroa pyydettiin arvioimaan. Lisäksi osallistujia pyydettiin arvioimaan yhden rakennuksista todellista korkeutta ja antamaan näkemys mallin mittakaavasta. Fyysinen ja virtuaalinen malli olivat mitoiltaan identtiset, ja niitä tarkasteltiin samoista katselukulmista ja etäisyyksiltä, jolloin skaalat olivat verrannollisia. Varsinainen ero oli siinä, että virtuaalista mallia katseltiin tietokoneen monitorilta. (Sun et al. 2013)

Tutkimuksessa kyettiin osoittamaan ero fyysisten ja virtuaalisten mallien välillä. Tulosten perusteella fyysisestä, tässä tapauksessa 3D-tulostetusta, mallista tehtiin nopeampia ja tarkempia arvioita mallin osien koista. Tutkimuksessa vedettiin johtopäätös, että fyysiset mallit ovat intuitiivisempia tilavuuksien hahmottamisen välineitä kuin virtuaaliset vastineensa. Tutkimuksessa ei varsinaisesti pyritty selittämään ilmiötä, vaan ainoastaan toteamaan se käytännössä. (Sun et al. 2013)

Samankaltaisen tutkimuksen ovat suorittaneet myös tutkijat Dadi, Goodrum, Taylor ja Maloney (2014). Heidän tekemänsä tutkimuksen taustalla on oletamus, että heikko rakennussuunnitelmien havainnollistaminen työn tekijöille johtaa tulkintavirheisiin ja korjaustarpeisiin. Tutkimusartikkelissaan he pohtivat kommunikaation tehokkuutta sekä virtuaalisia CAD-malleja että fyysisiä 3D-tulosteita käyttäen. Tutkimuksessakin todettiin fyysisten kolmiulotteisten mallien valmistuksen ratkaisevasti vähentyneen tietokonemallinnustyökalujen vallatessa alaa. Nyt kuitenkin 3D-tulostusteknologiat ovat mahdollistaneet fyysisten mallien tehokkaan tuottamisen suoraan CAD-mallista, mikä kannustaa taas fyysisen kappaleen valmistamiseen. Tutkimus (Dadi et al. 2014) suoritettiin antamalla koehenkilöille pienoismallin rakennustehtävä valmiista rakennusosista. Osallisille näytettiin sekä 2D-piirustukset, CAD-malli, että 3D-tuloste vuorollaan, sattumanvaraisessa järjestyksessä. Jokaisen mallin perusteella oli tarkoitus koota sama rakenne. Tutkimuksessa vertailtiin muun muassa tehtävään kulunutta aikaa, kognitiivista kuormitusta ja virheiden määrää. Perimmäisenä tavoitteena oli ymmärtää erilaisten havainnollistamiskeinojen (2D-piirustukset, virtuaalinen 3D-malli ja fyysinen 3D-malli) tehokkuutta rakennustehtävän suorittamiseksi. (Dadi et al. 2014)

Fyysinen 3D-tulostettu malli tuotti parhaat tulokset sekä tehtävän kokonaissuoritusajassa, kognitiivisessa kuormittavuudessa että suoran tehdyn työn määrässä. Tutkimukseen osallistuneet henkilöt käyttivät tietokonemallin kanssa rakenteen hahmottamiseen enemmän aikaa kuin fyysisen mallin kanssa. Kokeessa vähäisin korjaustarpeiden/uudelleentyön määrä saavutettiin hieman yllättäen käytettäessä paperille painettuja 2D-piirustuksia. Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan sanoa, että fyysiset kolmiulotteiset mallit tarjoavat varteenotettavan vaihtoehdon tällä hetkellä

perinteisemmille menetelmille, kun työn suorittaminen vaatii avaruudellista hahmotuskykyä. Täysin korvaavaksi dokumentointimenetelmäksi siitä ei kuitenkaan ainakaan toistaiseksi ole, sillä esimerkiksi dimensioiden ja muiden spesifikaatioiden sisällyttäminen esimerkiksi 3D-tulostamalla valmistettuun malliin on haastavaa ja epäkäytännöllistä. Fyysisille malleille rakennusalalla Dadi et al. (2014) ehdottavat käyttöä tilanteissa, jotka vaativat tilojen ja kappaleiden visualisointia ja tilatarkastelua. Tällaisia tilanteita voivat olla esimerkiksi suurten elementtien nostotyöt vaikeissa paikoissa, teräsrakenteiden asennustöiden suunnittelu ja logistiikkavirtojen suunnittelu. (Dadi et al. 2014)

Arkkitehtimallien valmistuksesta kertovassa kirjallisuudessa pohditaan usein fyysisten mallien arvoa aikana, jolloin tietokonemallinnuksista voidaan tuottaa nopeasti ja kustannustehokkaasti näyttäviä fotorealistisia kuvia ja videoita. Mitä fyysisillä malleilla voidaan saavuttaa arkkitehtisuunnittelussa, vertailussa virtuaalisten vastineidensa kanssa? Kirjallisuudessa korostetaan fyysisen mallin merkitystä jo suunnittelun alkuvaiheessa. Rakentamalla malli vasta valmiista suunnitelmasta esimerkiksi arkkitehtikilpailua varten menetetään monia suunnitteluprosessia tehostavia tekijöitä. Fyysiset mallit paljastavat usein ongelmakohtia suunnittelussa tai antavat kokonaiskäsityksen kohteesta, jollaiseen tietokoneen ruudulta tarkasteltava 3D-malli tai 2D-kuvat eivät pysty. Tietokoneen ruutu on ainakin toistaiseksi vielä kaksiulotteinen elementti, ja tällöin kolmiulotteisen tilan hahmottaminen ja perspektiivin muodostaminen tapahtuvat jokaisen aivoissa yksilöllisesti, vaikka ruudulta tarkasteltaisiin 3D-mallia. Perspektiivin oikeellinen ja tehokas muodostuminen riippuu katsojan aikaisemmista kokemuksista ja havainnoista, eikä siten ole täysin luotettava keino. (Burry et al. 2016, Werner 2011, Jetsonen 2001, Poikonen 2016). Virtuaalisten mallien käyttöä käsittelevässä luvussa esitellyillä immersiiivisillä virtuaalitodellisuuden sovellutuksilla saadaan toki katsojalle vahvempi kokemus avaruudellisista mittasuhteista. Toistaiseksi näiden teknologioiden rajoituksena on vain näköaistin kautta tapahtuva havainnollistaminen. Fyysisten kappaleiden käsin kosketeltavuus mahdollistaa tuntoaistin kautta astetta helpommin lähestyttävän, intuitiivisemmän kokemuksen.

2.5 3D-tulostus pikavalmistustekniikkana

Tässä luvussa esitellään pikavalmistustekniikoita ja niiden soveltuvuutta erilaisten mallien valmistukseen. Eritoten keskitytään erilaisten arkkitehti- ja rakennemallien valmistuksen asettamiin vaatimuksiin. Toisaalta tekniikoista esitellään ainoastaan tälle diplomityölle relevantit, pienemmän kokoluokan muovisten mallien valmistukseen soveltuvat teknologiat.

Englanninkielisessä kirjallisuudessa 3D-tulostusteknologiasta on käytetty laajalti nimitystä *Rapid Prototyping (RP)* (vapaasti suomennettuna prototyyppien pikavalmistus). Termi kuvaakin osuvasti prosessia, jossa tarkoituksena on valmistaa nopeasti tuotteen tai sen osan malli ennen varsinaisen lopputuotteen valmistusta. Toisin sanottuna, teknologialla tuotetuilla kappaleilla kehitetään lopullisen tuotteen valmistukseen tähtäävää tuotekehitysprosessia. RP:llä voidaan tarkoittaa myös muita kehityshankkeen aikana tuotettuja palveluita, joiden avulla pyritään saamaan palautetta ja kehittämään lopputuotetta. (Gibson et al. 2010)

Yleisesti pikavalmistustekniikoilla ja 3D-tulostamisella kuitenkin tarkoitetaan materiaalia lisäävää teknologiaa, jolla kyetään valmistamaan CAD-mallista fyysinen kappale numeerisesti

ohjatuin menetelmin, automatisoidusti. Teknologian kehittyessä valmistusmenetelmä on mahdollistanut myös yhtä lailla suoran lopputuotteiden valmistuksen, jolloin teknologian käyttäjien mielestä termi *Rapid Prototyping* ei enää riitä kuvaamaan prosessia. RP ei myöskään kuvaa millään tavalla 3D-tulostuksen materiaalia lisäävän valmistuksen luonnetta, jota on pidetty tärkeänä osana teknologiaa. Niinpä nykyään yleisempi, prosessia paremmin kuvaava termi AM (*Additive Manufacturing*, vapaa suomennos materiaalia lisäävä valmistus) on otettu laajalti käyttöön. (Gibson et al. 2010)

Termin AM lähtökohtaisiin peruseriaatteisiin kuuluu, että alkuaan tietokoneavusteisesti luodusta mallista voidaan ilman vaativia valmistusprosessin suunnitteluja valmistaa suoraan fyysinen kappale. Tilanne ei todellisuudessa ole aivan yhtä yksinkertainen, kuin miltä kuvaus kuulostaa. Kuitenkin teknologia yksinkertaistaa kompleksisten kappaleiden valmistusta CAD-dataa hyödyntäen huomattavasti. Perinteisissä työstömenetelmissä, joissa materiaalin lisäämisen sijasta poistetaan materiaalia, valmistusprosessi täytyy huolellisesti suunnitella, jotta päädytään haluttuun lopputilaan. Prosessin suunnitteluun kuuluu esimerkiksi työkalujen valinta, työstövaiheiden järjestyksen suunnittelu ja mahdollisesti tuotteen pilkkominen pienempiin osiin valmistusta helpottamaan, jälkeinpäin kokoonpantavaksi. Tähän verrattuna AM:n vaatima ammattitaito on selkeästi alemmalla tasolla. Käytännössä tarvitaan vain riittävä ymmärrys siitä, miten AM-laite ja sen käyttämät materiaalit toimivat ja käyttäytyvät. (Gibson et al. 2010)

3D-tulostimien (AM-laitteiden) toimintaperiaatteen ytimessä on kerroksittainen materiaalin lisääminen. Kerrosten määrittäminen tapahtuu jakamalla CAD-malli ohuisiin, samansuuntaisiin poikkileikkauksiin. Poikkileikkauksille on luonnollisesti määritettävä äärellinen paksuus. Näin ollen lopulta 3D-tulostimelle syötettävä data eroaa alkuperäisestä CAD-datasta hieman, tehden jatkuvasta geometriasta askelittaisen. Valmistuvan kappaleen ja alkuperäisen tietokonemallin eron suuruus riippuu valittavasta poikkileikkausten kerrospaksuudesta. Kerrospaksuuden lähestyessä nollaa, kappale vastaa täysin virtuaalista malliansa (Kuva 9). Yhtä lailla nollaa lähestyvä kerrospaksuus kasvattaa valmistusajan äärettömyyteen. Kaikki kaupalliset 3D-tulostimet toimivat tällä periaatteella. Eroja syntyy mahdollisista käytettävistä materiaaleista, yksittäisen poikkileikkauskerroksen tuottamismenetelmästä ja erillisten kerrosten yhdistämisestä toisiinsa. Nämä tekijät vaikuttavat mahdolliseen valmistusnopeuteen, jälkikäsitteilyn tarpeeseen, laitteen toiminnallisiin mittoihin ja laitteen kokonaiskustannuksiin.



Kuva 9 CAD-malli ja kerrospaksuuden vaikutus lopputuotteeseen 3D-tulostettaessa. Kerrospaksuuden pienentyessä valmistuva kappale vastaa lähemmin digitaalista malliansa. (Gibson et al. 2010)

Käyttökohteita AM-teknologialla on laaja skaala. Kuten todettua, menetelmää käytettiin alun perin kuitenkin nimenomaan visualisoivien mallien valmistukseen tuote-/hankekehitysvaiheessa. Yleisesti edelleen vallitsee käsitys, jonka mukaan fyysiset mallit voivat olla paljon hyödyllisempiä ja tehokkaampia verrattuna piirroksiin tai fotorealistisiin kuviin, kun tarkoituksena on tehdä ymmärrettäväksi kohteen konseptisuunnittelua. 3D-tulostusteknologiat ovat kuitenkin kehittyneet prototyyppien valmistuksesta lopputuotteiden valmistusta kohti vääjäämättä, kun käytetyt materiaalit, tarkkuus ja yleinen laatu ovat parantuneet. Voidaan käyttää materiaaleja, joilla on tarvittavat lopputuotteiden ominaisuudet ja päästään jopa kokoonpanoissa toimimiin valmistustoleransseihin. Tiukimpiin sovitteisiin vaaditaan toki edelleen tarkkaa koneistusta.

3D-tulostusprosessi koostuu tavallisesti kuudesta vaiheesta:

1. CAD-mallin luominen
2. STL-muunnos
3. Koneenohjauuskoodin luominen
4. 3D-tulostimen asetusten määrittäminen
5. Kappaleen valmistus
6. Jälkikäsittely

3D-tulostusprosessi alkaa aina CAD-mallin luomisella. Tehtävään sopii käytännössä mikä tahansa mallinnusohjelma, joka kykenee kiinteiden mallien tai pintamallien luomiseen. Malli voidaan tuottaa myös esimerkiksi laserskannausteknologialla. Malli vietään lähes poikkeuksetta stl-tiedostomuotoon, joka voidaan tuoda 3D-tulostimen ohjauuskoodin

määrittävään ohjelmaan. Myös muita mahdollisia tiedostomuotoja on olemassa, mutta stl-tiedostosta on tullut alalla varsin vakiintunut käytäntö. Koneenohjauskoodi ja 3D-tulostimen asetukset määritetään ohjelmalla, joka muodostaa tuodusta stl-tiedostosta poikkileikkaustasoja. Näiden tasojen paksuus ja esimerkiksi kappaleen orientaatio ja skaalaus määritetään tässä vaiheessa. Samalla voidaan myös vaikuttaa erilaisiin 3D-tulostimen parametreihin, kuten lämpötiloihin ja tulostusnopeuteen. Parametrien asettamisen jälkeen itse tulostusvaihe on pitkälti automatisoitu prosessi. Käyttäjältä ei vaadita muuta kuin ajoittaista valvontaa laitteen virhetilojen varalta. Kappaleiden jälkikäsittelyn tarve vaihtelee käytettävästä tulostusmenetelmästä riippuen. Voidaan tarvita esimerkiksi tukimateriaalien poistoa, lämpökäsittelyä, kovettaja-aineita, hiontaa, maalausta tai kokoonpanoa. (Gibson et al. 2010)

Tulostintyyppistä riippumatta nämä vaiheet käydään aina läpi. Käytettävä tulostusteknologia määrittää kappaleen tekniset ominaisuudet, kuten materiaalimahdollisuudet, massan, lujuusominaisuudet ja esimerkiksi jälkikäsittelyn tarpeen. (Gibson et al. 2010)

3D-tulostustekniikat voidaan karkeasti jakaa kahteen kategoriaan. Ensimmäisen kategorian laitteet muodostavat kolmiulotteisia kappaleita pursottamalla juoksevassa olomuodossa materiaalia, joka jähmettyy nopeasti jäähtyessään tai kuivuessaan jäykäksi rakenteeksi. Toisen kategorian laitteet käyttävät valmistusmateriaalinaan jauhemaista tai nestemäistä ainetta, joka kiinteytetään tarkasti kohdennettua sidosainetta tai lämpöenergiaa hyväksi käyttäen. Näillä teknologioilla on toteutettu valtaosa tämän hetken markkinoilla olevista laitteista, joten muut, marginaalisemmat tekniikat, on rajattu tämän työn tarkastelun ulkopuolelle.

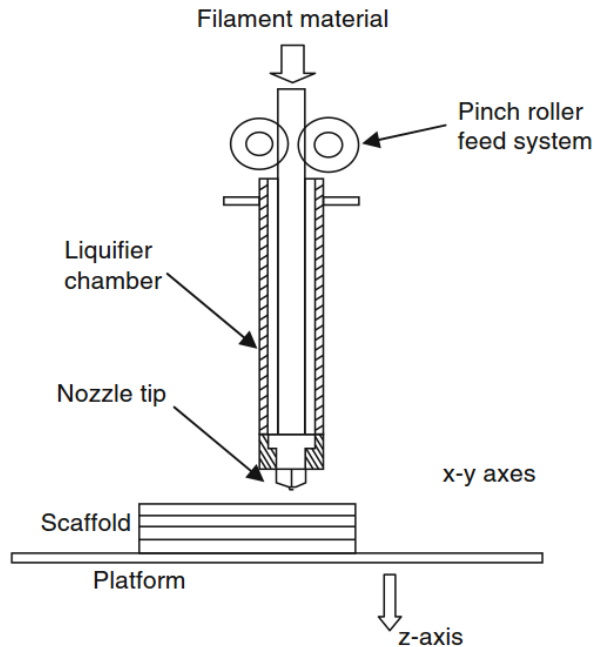
2.5.1 3D-tulostus materiaalia pursottamalla

Materiaalia pursottavista menetelmistä käytetään useita eri nimityksiä, kuten *Fused Filament Fabrication (FFF)*, samaa menetelmää tarkoittava *Fused Deposit Modeling (FDM)* ja esimerkiksi betonin 3D-tulostusta tarkoittava *Countour Crafting (CC)*. Betonin 3D-tulostus pois lukien pursottavat menetelmät käyttävät materiaalinaan lähes yksinomaan erilaisia muovilaatuja. (Gibson et al. 2010). Tässä luvussa käsitellään lähinnä edellä mainittua FDM-tekniikkaa sen ollessa tällä hetkellä kuluttajamarkkinoiden yleisin pursotusmenetelmä. Toimintaperiaate materiaalia pursottavissa menetelmissä on kuitenkin kaikissa hyvin samankaltainen.

FDM-tekniikka on 3D-tulostusmenetelmistä toistaiseksi kuluttajaystävällisin. Laitteiden hankintakustannukset vaihtelevat noin 300 ja 10000 euron välillä. Tulostusmateriaaleja on laajalti saatavissa materiaalin kilohinnan vaihdellessa karkeasti 20 ja 50 euron välillä. Materiaalit ovat kaikki erilaisia polymeerejä. Käytetyimmät materiaalit ovat maissitärkkelyksestä valmistettu PLA-muovi sekä raakaöljypohjainen, hyvän sitkeyden, kovuuden ja kulutuskestävyyden ABS-muovi. (Gibson et al. 2010)

Tulostusmateriaali säilytetään lankamaisessa muodossa kerälle käärittynä. Lankaa syötetään syöttökoneistolla tulostuspäälle, jossa lanka kuumenee juoksevaan olomuotoon. Kuuma tulostusmateriaali pursotetaan tulostuspäässä olevan pienen reiän läpi tulostustasolle, jolla se jäähtyessään jähmettyy nopeasti pursotettuun muotoonsa. Tulostuspään reiän halkaisija määrittää pienimmän mahdollisen elementin, joka tulostimella voidaan valmistaa. Tavallisesti pienin reiän halkaisija, josta materiaalia saadaan vielä syötettyä läpi, on noin 0,2 mm. Tulostuspäällä on kolme liikkuvuusastetta

tulostustasoon nähden, joten päällä tavoitetaan kaikki tilavuuden pisteet, laitteiston koon asettamin rajoituksin. Tavallisesti tulostuspäätä ohjataan lineaarijohtimilla xy-tasossa ja z-suuntainen liike tuotetaan tulostustason pystysuuntaisella liikkeellä esimerkiksi kuularuuvin välityksellä (Kuva 10). (Gibson et al. 2010)



Kuva 10 FDM-tekniikan periaate. Lankamaista materiaalia pursotetaan kuuman tulostuspään läpi tulostustasolle. (Gibson et al. 2010)

Teknologia soveltuu hyvin pienten muovisten tulosteiden valmistukseen, myös teollisuuden tarpeisiin. Kerrosten välille syntyy tulostusmenetelmällä varsin vahva sidos korkean lämpötilan johdosta. Tämän ansiosta menetelmällä voidaan valmistaa materiaaliominaisuuksiltaan hyvin lähelle muovien ruiskupuristettuja tai valettuja kappaleita. Suuremmissa tulosteissa materiaalien lämpölaajeneminen ja epätasainen jäähtyminen aiheuttaa kappaleissa ongelmia ja vääristymisiä. Pursottavalla, materiaalia lisäävällä menetelmällä ei voida luonnollisesti tulostaa materiaalia tyhjän päälle, vaan aina tarvitaan jokin alapuolinen pinta, jolle tulostusmateriaali pursotetaan. Tämä tekee vaakasuuntaisten, ”roikkuvien” rakenteiden tulostamisen hieman epäedullisemmäksi. Roikkuvaa rakennetta varten täytyy aina tulostaa alemmasta kiinteästä tasosta lähtien tukimateriaalia, josta syntyy tukien verran hukkamateriaalia. Joissain tapauksissa tukimateriaalin jälkikäteinen irrottaminen saattaa myös olla haastavaa tai mahdotonta. Muiksi teknologian haasteiksi luetaan usein nopeus, tarkkuus ja materiaalien tiheys. Nopeus muodostuu tulostusmateriaalin syöttönopeudesta ja tulostuspään liikkumisnopeudesta tulostustasolla. Lopullisen tulostusnopeuden kasvattaminen vaatii molempien mainittujen nopeuksien nostamista. Materiaalin syöttönopeuden kasvattaminen todennäköisesti johtaisi suurempaan liikuteltavaan massaan, mikä tekisi tulostuspään tarkasta ohjauksesta haastavampaa. Prosessia on päädytty nopeuttamaan heikentämällä kiinteiden kappaleiden materiaalityttöä. Kiinteän kappaleen sisus tulostetaan usein hunajakennorakenteiseksi tai ristikkorakenteiseksi, jolloin materiaalia säästyy ja prosessi nopeutuu, mutta toisaalta rakenne heikkenee. (Gibson et al. 2010)

Tämän tutkimuksen tekemiseen käytössä on FDM-tekniikalla toteutettu 3D-tulostin. Valmistaja ilmoittaa laitteen kykenevän tuottamaan maksimissaan 220x280x230 mm kappaleita (Leapfrog Xeed datalehti 2016). Johtuen FDM-tulostusteknologian asemasta johtavana teknologiana kuluttajamarkkinoilla ja menetelmän ollessa käytössä tämän työn puitteissa, sitä pidetään lähtökohtana, johon muita jatkossa esitettäviä tulostusteknologioita ja niiden kustannuksia verrataan.

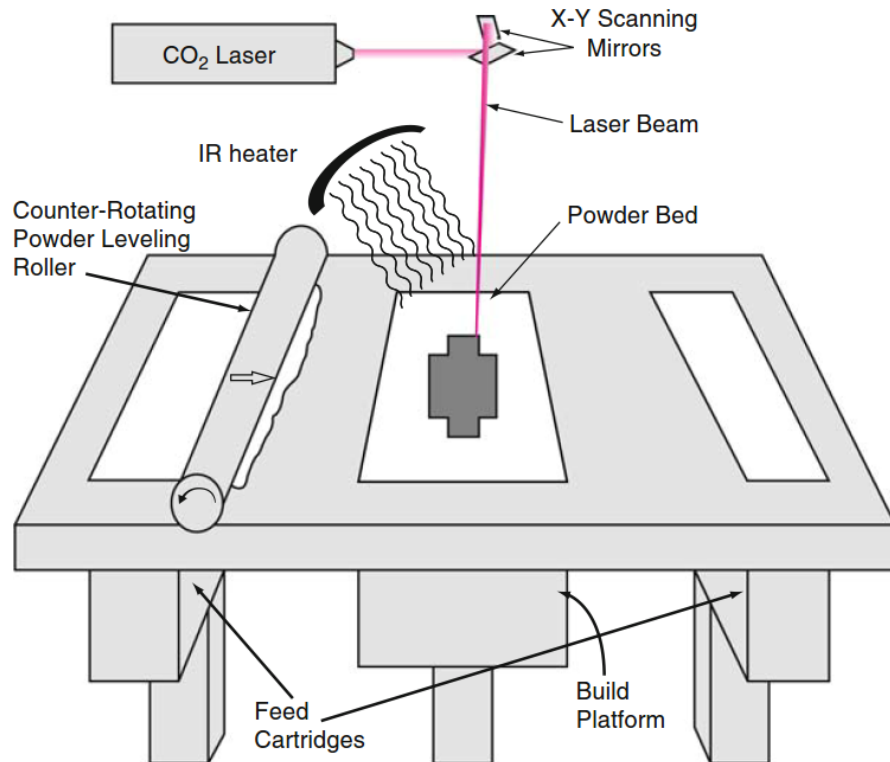
2.5.2 3D-tulostus kohdennettua sidosenergiaa käyttämällä

Materiaalia pursottavien menetelmien rinnalla on toinen, usein teollisuuden suosima 3D-tulostumenetelmä. Tässä teknologiassa kappaleiden valmistusmateriaali on joko erittäin hienojakoista jauhemaista tai valoon tai lämpöön reagoivaa nestemäistä materiaalia.

Kaikki jauhemaista materiaalia käyttävän 3D-tulostustekniikat toimivat hyvin samankaltaisella toimintaperiaatteella. Menetelmiä kutsutaankin yhteisnimityksellä jauhepetimenetelmät. Kappaleen valmistusprosessissa tulostustasolle levitetään mekanismilla kerros jauhetta, minkä jälkeen valmistettavan kappaleen kulloinenkin poikkileikkaus kovetetaan käyttäen kohdennettua lämpöenergiaa tai valoa tai muita sidosaineita.

Selective Laser Sintering (SLS) oli yksi ensimmäisistä kaupallistetuista 3D-tulostusmenetelmistä. Menetelmässä jauhepartikkelien lämpötila nostetaan kohdennetulla laserilla hieman materiaalin sulamispisteen alapuolelle. Tässä lämpötilassa materiaali on vielä kiinteässä, jauhemaisessa olomuodossa, mutta lämmitettyjen partikkelien välille syntyy sintrautumalla vahva sidos. SLS-tekniikka soveltuu käytettäväksi myös muiden kuin polymeerikappaleiden valmistuksessa. Materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi erilaisia metallijauheseoksia ja valmistaa tällöin lopputuotteita, joiden valmistus ei perinteisin työstömenetelmin olisi mahdollista tai kannattavaa. Jälkikäsitteilyllä saadaan varmistettua kappaleiden mekaaniset ja dynaamiset ominaisuudet, jolloin menetelmää voidaan käyttää myös tiettyjä lujuusominaisuuksia vaativien kappaleiden valmistuksessa. Jauhepetimenetelmien, myös SLS:n, etuihin lukeutuu menetelmien kyky tulostaa materiaalia ilman erillisiä tukirakenteita. Tämä johtuu siitä, että tulostusalue on koko prosessin ajan täynnä jauhemateriaalia, jolloin kaikki tason pisteet ovat jatkuvasti alhaalta päin tuettuja. Menetelmä mahdollistaa FDM-tekniikkaa joustavammin käytännössä täysin vapaiden geometrioiden 3D-tulostamisen. Periaatteessa ainoa mahdoton rakenne on ulkokuoreltaan täysin umpinainen, mutta sisältä onttorakenne, sillä tulostusprosessissa onttorakenne täyttyy kovettumattomalla jauheella. (Gibson et al. 2010)

SLS-teknologian laitteiden hankintahinnat ovat viime vuosina perinteisesti liikkuneet noin 200 000 euron ja 1,5 miljoonan euron välillä, joten puhutaan huomattavasti hinnakkaammista laitteista FDM-tulostimiin verrattuna. Myös käytettävien tulostusmateriaalien kustannukset ovat selvästi korkeampia, materiaalien kilohintojen ollessa suuruusluokaltaan jopa kymmenkertaisia FDM-filamentteihin verrattuna (Seyl 2015).



Kuva 11 Lasersintrausta hyödyntävän SLS-tekniikan periaatekuvaus (Gibson et al. 2010)

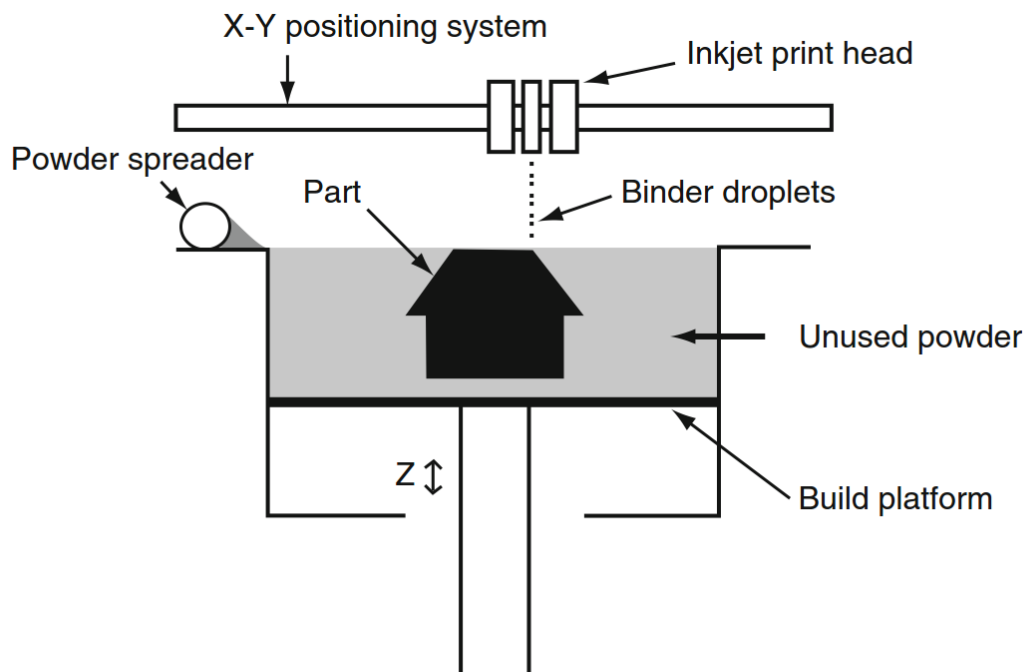
Stereolitografia (SLA) on tulostekniikoista FDM-laitteiden lisäksi toistaiseksi ainoa, joka on onnistuttu tuomaan markkinoille tavallisen kuluttajan käyttöön hankinta- ja käyttökustannuksiansa sekä laitteiden kokojen puolesta. Menetelmä on hyvin lähellä edellä esiteltyä SLS-tekniikkaa, mutta jauhemaisen valmistusmateriaalin sijasta käytetään nestemäistä fotopolymeerihartsia, joka kovetetaan kohdennetun UV-laserin tai projektorin avulla. Teknologialla mahdollistetaan FDM-tulostimia tarkempi lopputulos. Laitteessa on huomattavasti vähemmän liikkuvia osia, jolloin poikkileikkausten välillä laatueroit minimoituvat. Tekniikka mahdollistaa myös selkeästi ohuempien kerrosten tulostamisen, jolloin voidaan valmistaa paremmin mallin todellista geometriaa vastaavia tuotteita. Perinteisesti fotopolymeerimateriaaleista ei ole pystytty valmistamaan varsinaisia rasiinusta kestäviä käyttöesineitä, mutta uusimpien materiaalien kanssa niin lämmönkestävyys, lujuus kuin sitkeysikin ovat parantuneet. (Gibson et al. 2010)

UV-projektorilla käyttävät laitteet pystyvät yksittäisen lasersäteen sijasta heijastamaan tulostusmateriaalille kokonaisia poikkileikkauksia kerrallaan tehden prosessista selvästi nopeamman. Teknologiasta käytetään monesti SLA:sta erotettua nimitystä *Digital Light Processing (DLP)*. Toisin kuin SLS-tekniikan laitteiden kanssa, SLA-prosessi vaatii roikkuvien rakenteiden erillisen tukemisen ja tukien suunnittelun. (Gibson et al. 2010)

Laitteiden hankintahinnat ovat viime vuosien aikana lähestyneet FDM-laitteiden hintoja tuoden tavalliselle kuluttajalle enemmän vaihtoehtoja, mutta käyttökustannukset ovat vielä selvästi korkeammat. Nestemäisen fotopolymeerihartsin litrahinta on tällä hetkellä yleisesti noin 5-10-kertainen FDM-filamenttien kilohintaan nähden. (Grieser 2015)

3DP (*Three-Dimensional Printing*) on yleisnimitys tulostustekniikasta, jossa jauhepartikkelit sidotaan toisiinsa käyttämällä nestemäistä sidosainetta. Sidosaaine levitetään jauhekerrokselle käyttäen perinteisistä mustesuihkutulostimista tuttua kirjoitinta muistuttavaa mekanismia. Englanninkielisessä kirjallisuudessa menetelmästä käytetään myös esimerkiksi nimitystä *inkjet printing*, joka kuvaa hyvin tulostuspään samankaltaisuutta tavallisen mustesuihkutulostimen tulostuspään kanssa. Tulostusprosessi ei itsessään vaadi lämpöä, joten erilaisilta lämpölaajenemisen mukanaan tuomilta haasteilta vältytään. Toisaalta jauhepartikkelien sidosten vahvuus ei ole yhtä luja kuin lämpöä prosessissa käytävillä menetelmillä ja näin valmistetut kappaleet vaativatkin jälkikäsittelyä fysikaalisten ominaisuuksien vahvistamiseksi. Tuloksena on silti heikomman lujuuden ja kovuuden kappaleita kuin esimerkiksi FDM-, SLS- tai SLA-menetelmillä valmistettaessa. Sidosaaineena voidaan käyttää myös värillisiä nesteitä, jolloin menetelmällä voidaan tuottaa helposti monivärisiä kappaleita. Nämä seikat huomioon ottaen 3DP-menetelmä soveltuu erinomaisesti juuri erilaisten esittelymallien valmistukseen. Tulostusresoluutio on varsin tarkka, prosessi on robusti ja tulosteista saadaan monivärisiä ilman jälkikäsittelyn tarvetta. (Gibson et al. 2010)

3DP-periaatteen laitteet ovat kokonaiskustannuksiltaan kuitenkin selkeästi FDM-tulostimia kalliimpia. Laitteiden hankintahinnat vaihtelevat halvempien, noin 20 000:n ja kalliimpien, jopa miljoonan yhdysvaltain dollarin välillä. Yhtä lailla materiaalien hankinta on haastavampaa tavalliselle kuluttajalle. Monesti laitteen valmistaja saattaa velvoittaa käyttämään valmistajan omia materiaaleja tai muita vaihtoehtoja ei yksinkertaisesti ole olemassa. FDM-tekniikan käyttämiin filamentteihin verrattuna 3DP-materiaalien kustannukset voivat olla jopa kymmenkertaisia (Gibson et al. 2010).

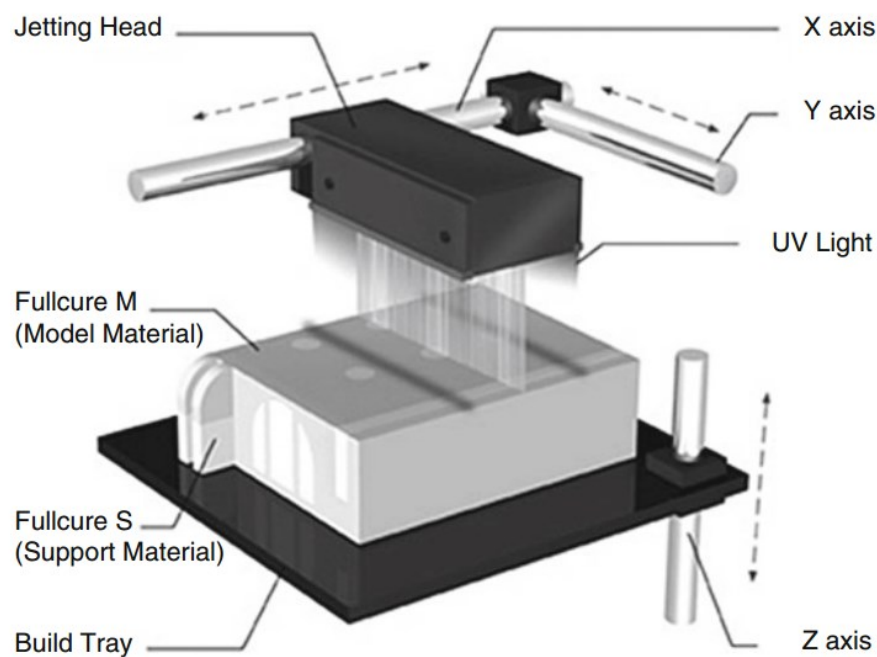


Kuva 12 3DP-prosessi (Gibson et al. 2010)

Myös 3DP-menetelmällä pystytään tuottamaan periaatteessa geometrialtaan täysin vapaita kappaleita. Kuten SLS-menetelmässä, myös tässä tulostusprosessissa syntyvää kappaletta

ympäröi koko ajan kovettamatonta jauhe, mikä mahdollistaa ”tyhjän päälle” tulostamisen. Käytännössä ainoa mahdoton kappale on täysin umpinainen, ontto (täynnä ilmaa oleva) kappale, sillä kovettamatonta jauhe jäisi tällöin tulostusprosessissa kappaleen sisään. Verrattuna pursotusmenetelmiin, jauhepetimenetelmät ovat myös yleisesti hieman nopeampia.

Muovikappaleiden tulostamiseen on kehitetty myös teknologia, joka sisältää elementtejä useammasta yllä esitellystä. Teknologia perustuu SLA:n tavoin fotopolymerisaatioon. Nestemäistä tulostusmateriaalia siis kovetetaan UV-valon avulla. Englanninkielisessä kirjallisuudessa menetelmästä käytetään muun muassa nimityksiä *material jetting* ja *multijet printing*, jotka voidaan suomentaa esimerkiksi materiaaliruiskutukseksi. Tulostuspäässä käytetty teknologia muistuttaa vahvasti 3DP-laitteiden tulostuspäätä. Tässä menetelmässä pisaramainen tulostusmateriaali kuitenkin kovetetaan heti suihkutuksen jälkeen UV-valolla. Tämän menetelmän tulosteet sopivat SLA:n tavoin tarkkojen prototyyppien tekoon. Laitteiden käyttämä materiaali vastaa hankintahinnaltaan SLA-laitteiden käyttämää materiaalia. Laitteiden hankintahinnat vastaavat aika lailla 3DP-laitteiden hintoja, joten muovisten tuoteprototyyppien valmistukseen teknologia on tällä hetkellä kalliimmasta päästä. (Gibson et al. 2010).



Kuva 13 Material Jetting (Gibson et al. 2010)

3 Materiaalit ja menetelmät

Tutkijat Foy ja Shahbodaghrou (2015) ovat julkaisussaan pohtineet 3D-tulostettujen pienoismallien hyötyjä rakennuttajalle ja urakoitsijalle. Artikkelissaan he ovat päätyneet kolmeen hyödyntämisen kategoriaan. Ensinnäkin tulosteilla voidaan tuottaa arvoa asiakkaalle erityisesti tarjoustoiminnassa ja hankekehityksessä kommunikaation apuvälineenä. Toisekseen malli voidaan tuottaa rakennustyömaan tarpeisiin korvaamaan kaksiulotteisia asema- ja aluesuunnitelmia. Kolmantena Foy ja Shahbodaghrou esittävät mahdollisuuden valmistaa 3D-tulostustekniikoin tuoteprototyyppisiä tai valmiita työkaluja. Esimerkkinä tästä ovat valumuotit kertaluontoiseen tarpeeseen, jolloin muotin valmistuskustannuksista ja kehitystyöhön kuluva ajasta saadaan säästöjä. Kaksi ensimmäistä hyötyä liittyvät selkeästi pienoismallin potentiaaliseen kommunikaatioarvoon.

Tässä osuudessa esitetään käytetyt menetelmät työn toteuttamiseksi. Työn kokeellisessa osuudessa pyritään tutkimaan laadullisen tutkimuksen kautta 3D-tulostettujen mallien hyötyjä rakennusliiketoiminnan eri osa-alueilla. Käytännössä tämä tarkoittaa oman harkintakyvyn käyttämistä esimerkkitapausten valinnassa ja hyötyjen toteutumisen arviointia haastattelujen, havainnoinnin ja keskustelujen pohjalta. Valintoja on ohjannut pitkälti kirjallisuus tietokonemallien käytöstä rakennusliiketoiminnassa. Virtuaalisia malleja on pyritty hyödyntämään toiminnassa monella osa-alueella, joita on esitelty työn toisessa luvussa. Näitä hyödyntämiskohteita mukaillen pohditaan empiirisen tutkimuksen kautta fyysisten, mahdollisesti helpommin lähestyttävien mallien arvoa virtuaalisten mallien korvaavana, tai niitä tukevana välineenä. Luvussa esitellyt käyttökohteet on jaettu kahteen kategoriaan: ensimmäisillä pyritään tuottamaan suoraan arvoa asiakkaalle tarjoustoiminnassa, neuvotteluhankkeissa ja hankekehityksessä, kun taas toisilla tehostetaan ja havainnollistetaan omaa toimintaa erityisesti rakennustyömaalla.

Työn teoriaosuudessa on pyritty perustelemaan fyysisten pienoismallien yleisiä hyötyjä ja niiden suhde virtuaalisiin tietokonemalleihin. Kirjallisuuskartoituksen perusteella on myös löydetty selkeitä kohteita, joissa rakennusliiketoiminnassa fyysisiä malleja voidaan hyödyntää. Tässä luvussa kuvataan mallien valmistuksen resurssit ja lähtökohdat, joista malleja tapauskohtaisesti työn empiirisessä osuudessa valmistetaan.

3.1 Mallien valmistus

Tässä luvussa esitellään käytettyjä työkaluja ja suunnitteluratkaisuja mallien valmistuksessa. Tarkoituksena on antaa käsitys vaadittavista resursseista, jotta vastaavia malleja kyetään valmistamaan.

Mallien valmistuksen keskiössä oli työn toimeksiantajan hankkiman 3D-tulostimen hyödyntäminen. Tulostin on hollantilaisen 3D-tulostinvalmistajan, Leapfrog:n, valmistama Xeed-malli. Laite on teknologialtaan perinteinen FDM-tulostin. Se käyttää materiaaleinaan halkaisijaltaan 1,75 mm paksuisia PLA- ja ABS-filamentteja. Valmistaja ilmoittaa laitteen tulostustilavuudeksi ja samalla suurimman mahdollisen tulostettavan objektin dimensioiksi 280*220*230 mm. Leapfrog Xeed on kahden tulostuspään tekniikkaa hyödyntävä 3D-tulostin, jolloin periaatteessa voidaan valmistaa kappaleita, joiden valmistuksessa on käytetty kahta eri materiaalia, mahdollistaen kaksiväriset tulosteet. Kaksivärisyyttä ei tämän diplomityön puitteissa tehdyissä malleissa kuitenkaan käytetty.

Kaikki mallit ovat jonkinlaisia rakennusten tai alueiden pienoismalleja. Mallit ovat kaikki ensin itse suunniteltu ja mallinnettu SketchUp Pro –mallinnusohjelmistolla. Tällöin mallinnettaessa on tehty erilaisia ratkaisuja yksityiskohtien tasosta, mittakaavasta ja muista esitysteknisistä ominaisuuksista, kuten mallien avattavuudesta/koottavuudesta ja muilla keinoin tietosisällön lisäämisestä malliin. Kaikki mallit sisältävät 3D-tulostettujen osien lisäksi alustan. Alustat ovat käyttötarkoituksensa mukaan tehty joko kirkkaasta akryylilevystä (esittelymallit asiakkaalle) tai laminoidusta paperiarkista (mallit rakennustyömaalle). Alustojen avulla malleihin on tuotu lisää visuaalisuutta värien ja informaattiosisällön kautta.

Valmistusprosessi on siis sisältänyt kaikki luvussa 2.5 esitetyt 3D-tulostusprosessin vaiheet. Ajankäyttö valmistuksessa jakautui prosessien vaiheille epätasaisesti siten, että valtaosa varsinaisesta työajasta kului suunnitteluvaiheeseen ja 3D-mallinnukseen. Kaikissa luvun 4 tulosteissa tämä vaihe toteutettiin kuitenkin karkeasti arvioiden noin kahden työpäivän aikana. Suunnittelun ja mallinnuksen jälkeen itse tulostukseen kului keskimäärin arviolta 20 tuntia. Tulostuksen ollessa pitkälle automatisoitua, tätä ei kuitenkaan voida samalla lailla laskea käytetyksi työajaksi. Koko prosessin läpimenoaikaan se toki vaikuttaa merkittävästi. Materiaalikustannuksiltaan kaikki tulosteet jäivät alle 30 euron.

Mallien valmistukseen käytetyn ajan, työkalujen ja materiaalien yksinkertaisuutta mukaillen malleista ei pyritty tekemään kalliiden arkkitehtimallien vertaisia taideteoksia. Tärkeämpänä pidettiin ketteryyttä mallien valmistuksessa ja joustavuutta aikataulussa. Tällöin toiminnalla oli mahdollista saavuttaa jotakin, mihin todella harva ulkopuolinen mallinvalmistaja kykenee. Valmistuksen nopeuden turvin malleja voitiin käyttää tilanteissa, joissa muuten ei aikataulujen puolesta ole ennen ollut mahdollista malleja käyttää. Usein malleille, varsinkin asiakasrajapinnassa, ilmeni tarve vain muutamaa vuorokautta käyttöhetkeä ennen.

3.2 3D-tulosteilla arvoa asiakkaalle

Rakennusala on muuntumassa yhä kasvavassa määrin palveluliiketoiminnaksi. Palveluliiketoiminnassa keskiössä on arvon tuotto asiakkaalle. Rakennusurakoiden hinnan rinnalle tärkeiksi kilpailutekijöiksi ovat nousseet yhä voimakkaammin yhteistyö- ja palvelukyky. Asiakkaan tyytymättömyyttä lisäävät tekijät muodostuvat yhä harvemmin itse rakennuksen toteutuksesta ja laadusta, vaan koko palveluprosessista ja palvelun laadusta. Asiakastyytyväisyyden ja yritysten tuottavuuden välillä on odotetusti todettu yhteys. Tyytyväisyys myös johtaa kehittyneen yhteistyösuhteen myötä pitkäaikaisiin asiakassuhteisiin, jotka usein ovat molemmille osapuolille kannattavia. (Kärnä et al. 2007)

Asiakastyytyväisyys on luonteeltaan sellaista, että se joko lisääntyy tai vähenee kumulatiivisesti koko palveluprosessin ajan. Asiakastyytyväisyys muodostuu käytännössä lopputuloksen (tai välitulosten) ja asiakkaan alkuperäisen käsityksen vertailusta. Näin ollen työn laadulla ja esimerkiksi aikataulujen toteutumisella on toki tärkeä, muttei kuitenkaan ensisijainen merkitys lopulliseen asiakastyytyväisyyteen. Tärkeintä on, että asiakkaalle on muodostunut mahdollisimman todenmukainen käsitys rakennushankkeen toteutuksesta (Kärnä et al. 2007). Tällöin sidosryhmien välisen kommunikaation laadulla on huomattava merkitys. Asiakas ei aina välttämättä ole harjaantunut teknisten dokumenttien tulkinnassa, jolloin ymmärryksen lisäämiseksi käytetään usein tietokoneella tuotettua 3D-mallia tai 3D-mallista tuotuja kuvakaappauksia hahmottamisen apuvälineenä. Näin visualisoimalla voidaan välttyä ongelmilta, joita saattaa muodostua asiakkaan väärinymmärryksistä.

Rakennushankkeessa asiakaslähtöisyys on asiakkaan kokema laatua, joka muodostuu asiakkaiden odotusten ja hankkeelle asetettujen tavoitteiden täyttämistä ja tarpeiden tyydyttämisestä. Hankkeen edetessä odotukset, kokemukset ja tyytyväisyyden taso muuttuvat dynaamisesti rakennushankkeen ollessa tavallisesti varsin pitkäaikainen prosessi. Jukka Pekkanen (2005) on tunnistanut väitöskirjassaan asiakkuuden menestys- ja uhkatekijöitä rakennushankkeessa. Keskeisimmiksi menestystekijöiksi voidaan määritellä tavoiteohjaus, vaatimusten hallintaprosessi ja -järjestelmä sekä vuorovaikutusprosessi. Yksiselitteiset ja kattavuudeltaan riittävät sopimukset hankkeen osapuolten välillä täytyy olla kunnossa ja asiakkaan odotukset ja tavoitteet yhteistyölle määriteltynä. Vaatimusten hallintaan liittyy asiakkaan prosessien ja vaatimusten ja odotusten ymmärtäminen ja niihin vaikuttaminen. Vuorovaikutusprosessilta kaivataan avointa yhteistyötä ja kommunikaatiota, systemaattista tiedonvaihtoa, joustavuutta, läpinäkyvyyttä, yhteistä ongelmanratkaisukykyä ja keskinäisen luottamuksen syntymistä. (Pekkanen 2005, Kärnä et al. 2007)

Edellä lueteltuihin vuorovaikutusprosessin tarpeisiin voidaan vaikuttaa monella konkreettisella tavalla. Tässä työssä tutkitaan fyysisten, 3D-tulostettujen pienoismallien toimivuutta ja tehokkuutta kommunikaatiossa ja yhteisen ymmärryksen saavuttamisessa.

Tämän luvun tarpeisiin esitellään työn tulokset-osiossa kaksi tapausta, joissa on asiakasrajapinnassa käytetty kommunikaation tukena 3D-tulostettua fyysistä mallia. Tulosten esittelijän havainnot kirjataan haastattelutilanteessa jälkikäteen. Havainnot pyritään tuomaan esille avoimen keskustelun kautta, mutta apuna käytetään myös muutamia seuraavaksi esitettyjä, ennalta määritettyjä kysymyksiä:

- Asiakkaasta halutaan tietää hieman taustoja. Minkä alan ammattilainen on kyseessä ja mikä on tapaamisen tarkoitus?
- Millaista kokemusta asiakkaalla on teknisten dokumenttien (piirustusten) lukemisesta?
- Mitä muuta dokumentaatiota (esimerkiksi 2D-piirustuksia tai CAD-mallia) tapaamisessa käytetään havainnollistamisen välineenä?

Näihin kysymyksiin on usein mahdollista saada vastaus jo ennen asiakastapaamista. Palaverin jälkeen käydään läpi havainnot ainakin seuraaviin kysymyksiin:

- Miten 3D-tuloste esiteltiin?
- Mikä oli asiakkaan ensireaktio?
- Mikä palaverissa käytetty dokumentaatiomuoto toimi parhaiten?
- Minkä näistä kanssa vietettiin eniten aikaa?
- Kaivattiinko 3D-tulosten rinnalle selvästi tarkempaa dokumentaatiota?
- Jäikö 3D-tuloste asiakkaan haltuun?
- Ilmaisiko asiakas selkeästi mielipiteensä tulosteesta?
- Mikä oli mallin esittelijän oma näkemys sen hyödyllisyydestä tässä tapauksessa?

Kysymyksillä ei pyritä liikaa johdattamaan haastateltavaa suuntaan taikka toiseen, vaan tarkoituksena on lähinnä käydä läpi mallin käyttötilanne ja saada haastateltava antamaan

omia näkemyksiään mallin käytettävyydestä kyseisessä tilanteessa ja kertomaan havaintojaan muiden läsnäolijoiden mielipiteistä ja teoista.

3.3 3D-tulosteet oman toiminnan tehostamisessa

Omalla toiminnalla tarkoitetaan tässä yhteydessä toimintaa rakennustyömaalla. Käyttökohteet on valittu tietomallien ja muiden virtuaalisten 3D-mallien käyttöä mukaillen. Parhaaksi nähtiin tuottaa käytännössä rakennustyömaan aluesuunnitelma fyysisessä muodossaan ja käyttää sitä erilaisiin tarkoituksiin.

Tässä luvussa esitetään oman toiminnan tehostamiseksi rakennustyömailla tehtävien 3D-tulosteiden lähtökohdat. Mallien tavoiteltavat/potentiaaliset hyödyt käydään samoin läpi. Työn tulokset-osiassa hyötyjen toteutumista arvioidaan valittujen tapaustutkimusten kautta.

Omassa toiminnassa rakennustyömaalla käytetään havainnollistamisen välineinä esimerkiksi erilaisia CAD-malleja ja 2D-työpiirustuksia. Näiden käyttökohteita mukaillen valmistetaan joko koko työmaasuunnitelmasta tai sen osasta fyysinen 3D-tulostettu malli. Erilaisin tutkimuskysymyksiin pyritään selvittämään 3D-tulosteiden arvoa työmaan neuvottelu-/kokoustilanteessa, töiden ja logistiikkavirtojen suunnittelussa ja työmaaperehdytyksessä. Haastatteluilla selvitetään muun muassa mallin käyttöastetta ja hyötyvän henkilömäärän laajuutta. Tulosten sijoittelulla se voidaan asettaa jopa kaikkien työmaalla työskentelevien milloin vain tarkasteltavaksi. Ainakin seuraaviin kysymyksiin pyritään keskusteluissa saamaan näkemyksiä:

- Kuinka usein joku tarkastelee mallia? Ihmisten ensireaktioita havainnoimalla voidaan vetää johtopäätöksiä muun muassa mallin lähestyttävyydestä.
- Miten mallia lähestytään ja tutkitaan intuitiivisesti ja millaisia ajatuksia se on herättänyt?

Kuten luvussa 2.2 on todettu, tietomallien käyttö ei vastaa niiden käyttöpotentiaalia. Haastatteluilla pyritään selvittämään fyysisten mallien vaikutusta tietomallien käyttöön:

- Toimiiko malli porttina tietomallien laajempaan hyödyntämiseen, vai vähentääkö tai korvaako se niiden käyttöä?
- Mikä on käytännössä ollut ensisijainen havainnollistamisen väline, kun esimerkiksi työmaan rakennetta esitellään tai siitä keskustellaan?
- Mikä on ollut ensisijainen töiden suunnittelun apuväline?

Avoimen keskustelun perusteella pyritään myös selvittämään, miten malli on toiminut esimerkiksi työntekijän perehdytystilanteessa.

4 Tapaustutkimukset ja tulokset

Tässä luvussa esitellään kaikki edellisen luvun ajatusten mukaisesti valmistetut 3D-tulosteet. Jokainen malli on oma yksilönsä ja valmistettu tiettyä käyttötarkoitusta varten. Näin ollen jokaisen mallin arvoa ja toimivuutta tarkastellaan tässä luvussa erikseen kvalitatiivisen, eli laadullisen tutkimuksen menetelmin. Alalukujen 4.1 ja 4.2 tapaukset käsittelevät kokemuksia fyysisistä malleista asiakasrajapinnassa, kun lukujen 4.3 ja 4.4 tapaukset on tehty rakennustyömaiden omaan käyttöön.

4.1 Tapaus 1 – Tarjoustoiminta

Tässä tapauksessa 3D-tulostetulla mallilla haettiin arvoa tarjoustoiminnassa. Järvenpään Kinnarin uuden koulun rakennushankkeesta on tämän tapauksen kirjoittamishetkellä jätetty alustava tarjous. Hankkeen tilaajan ja erilaisten käyttäjäryhmien kanssa on järjestetty työpajoja, joissa on käyty läpi hankkeen toteutusmahdollisuuksia. Yhden työpajan agendana oli alustavan tarjouksen sisällön ja kehitysehdotusten läpikäynti. Esityslistalla oli myös arkkitehtitoimiston referenssikohteiden ja tulevan koulun alustavien arkkitehtonisten suunnitelmien ja massoittelun esittelyä.

Työpajaan osallistui yhteensä kahdeksan rakennusliikkeen edustajaa, arkkitehti, hankkeen tilaajan edustaja, kaksi johtotason henkilöä Järvenpään kaupungin perusopetuksen puolelta, kolme rehtoria ja kaksi rakennuttajakonsultin edustajaa. Neuvottelupöydälle sijoitettavaksi valmistettiin 3D-tulostettu malli koulun alueesta. Se sisälsi noin 80 cm pitkän ja 30 cm leveän akryylilevyalustan, jonka pohjalle tulostettiin värillinen ilmakehitys alueesta. Alustalle sijoitettavaksi ja liikuteltavaksi 3D-tulostettiin sekä kaikki vanhat rakennukset että arkkitehdin ensimmäisten luonnosten mukaiset mallit uusista koulurakennuksista. Uuden koulun päärakennuksen malli tehtiin kaksiosaiseksi. Sen kattorakenne oli nostettavissa pois, jolloin oli mahdollista tutkia myös sisäpuolisia suunnitelmia. Näin fyysinen malli saatiin sisältämään kaikki arkkitehdin suunnitelmien informaatio. Mallilla pyrittiin luomaan positiivista ja helposti lähestyttävää tapaa esitellä arkkitehdin ensimmäisiä luonnoksia tulevista koulurakennuksista.



Kuva 14 Työpajaan valmistettu malli vanhoilla koulurakennuksilla.

Muutaman tunnin mittainen työpaja koostui kolmesta kokonaisuudesta. Iltapäivä alkoi alustavan tarjouksen mukaisen projektisuunnitelman ja sen kehitysehdotusten esittelyllä. Tässä vaiheessa mukana tuotu malli pidettiin vielä piilossa läsnäolijoilta. Työpajan toinen vaihe sisälsi tulevan hankkeen toimintatapojen esittelyä. Teemoina toimivat allianssimuotoisen rakennusurakan periaatteet, käyttäjälähtöisyys rakentamisessa ja terveellinen rakentaminen. (Jaakkola, 2017)

Iltapäivän kolmas vaihe koostui arkkitehdin pedagogisen vision ja referenssikohteiden esittelyllä. Tätä vaihetta varten neuvottelupöydälle nostettiin kartta-alusta ja siihen aseteltiin tämänhetkiset, olemassa olevat rakennukset (Kuva 14). Kiinteät mallit herättivät nopeasti positiivista huomiota. Malli todettiin varsin helposti lähestyttäväksi, sillä hyvin nopeasti läsnäolijat ottivat rakennuksia käsiinsä lähempään tarkasteluun. 3D-tulostus mallien valmistusmenetelmänä ilmeni myös hyvin nopeasti, mikä osaltaan teki läsnäolijoihin vaikutuksen ja herätti kiinnostusta ja ihastelua. Referenssien esittelyn jälkeen tilaajalle ja käyttäjäryhmälle näytettiin arkkitehdin alustava luonnos tulevista koulurakennuksista ja niiden sijoittelusta tontille. Tässä vaiheessa neuvottelupöydällä olleesta mallista siirrettiin purettavat rakennukset sivuun ja alustalle nostettiin uudet, arkkitehdin luonnosten mukaiset rakennukset (Kuva 15). Uuden päärakennuksen mallista nostettiin katto pois. Tämä herätti innostuneisuutta asiakasryhmissä siinä määrin, että kauimpana mallista istuneet nousivat paikoiltaan ja siirtyivät lähemmäs tarkastelemaan mallia. (Jaakkola, 2017)

Fyysisen mallin lisäksi vaihtoehtoja arkkitehdin suunnitelmien visualisoimiseksi oli kaksi kappaletta. Arkkitehdillä oli omat pohjapiirustuksensa tilojen suunnittelusta ja yksi havainnekuva kokonaisuudesta. Tämän lisäksi tuotettiin videoanimaatio, jossa esitettiin liikkuvan kuvan avulla purettavien rakennusten häviäminen ja uusien rakennusten ilmestyminen tontille. Näistä kolmesta visualisointivaihtoehdosta selvästi eniten kiinnostusta ja huomiota herätti fyysinen malli ja sen kanssa vietettiin eniten aikaa. Fyysisen mallin kanssa läsnäolijat pääsivät jo hieman itse leikkimään esimerkiksi rakennusten sijoittelun kanssa tontille. Malli koettiin helposti lähestyttäväksi ja vaivattomaksi hahmottaa. Myös joitakin kommentteja tilojen sijoittelusta heräsi. Esimerkiksi arkkitehdin keskelle rakennusta sijoittama liikuntasali herätti keskustelua ja sitä tarkasteltiin ensisijaisesti fyysisen mallin kautta. (Jaakkola, 2017)

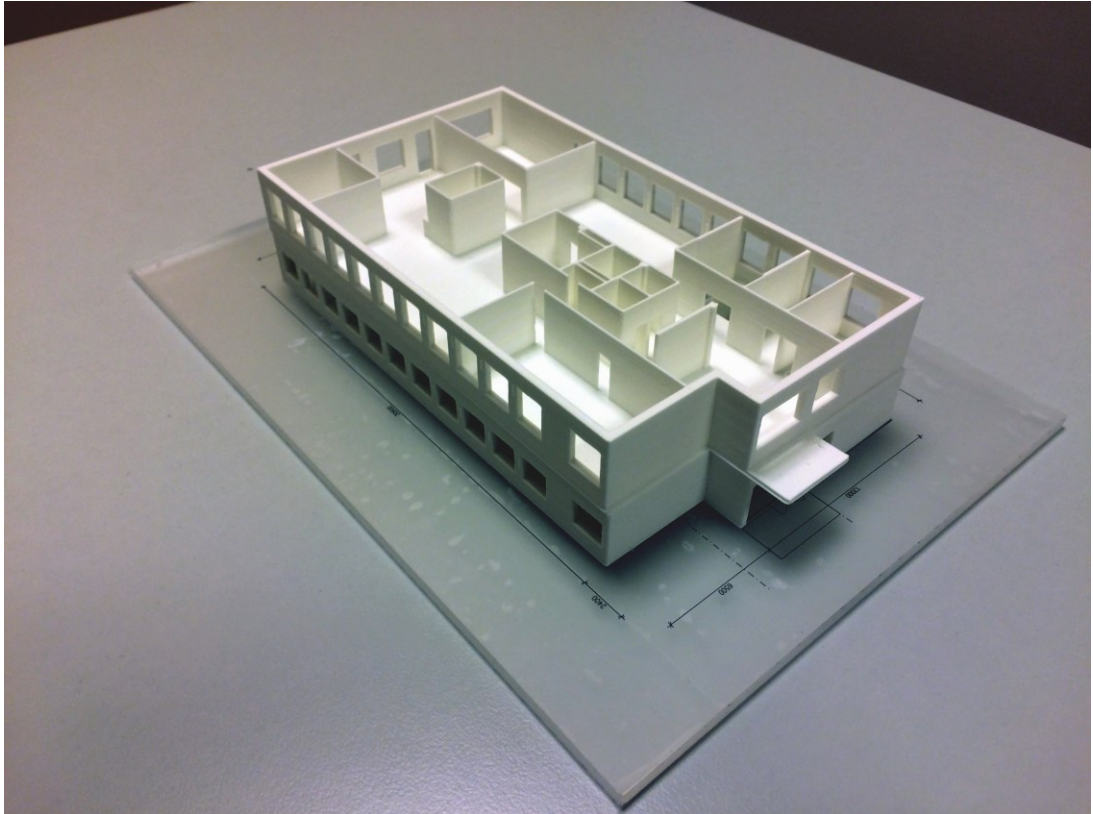


Kuva 15 Malli uusien koulurakennusten luonnosten kanssa.

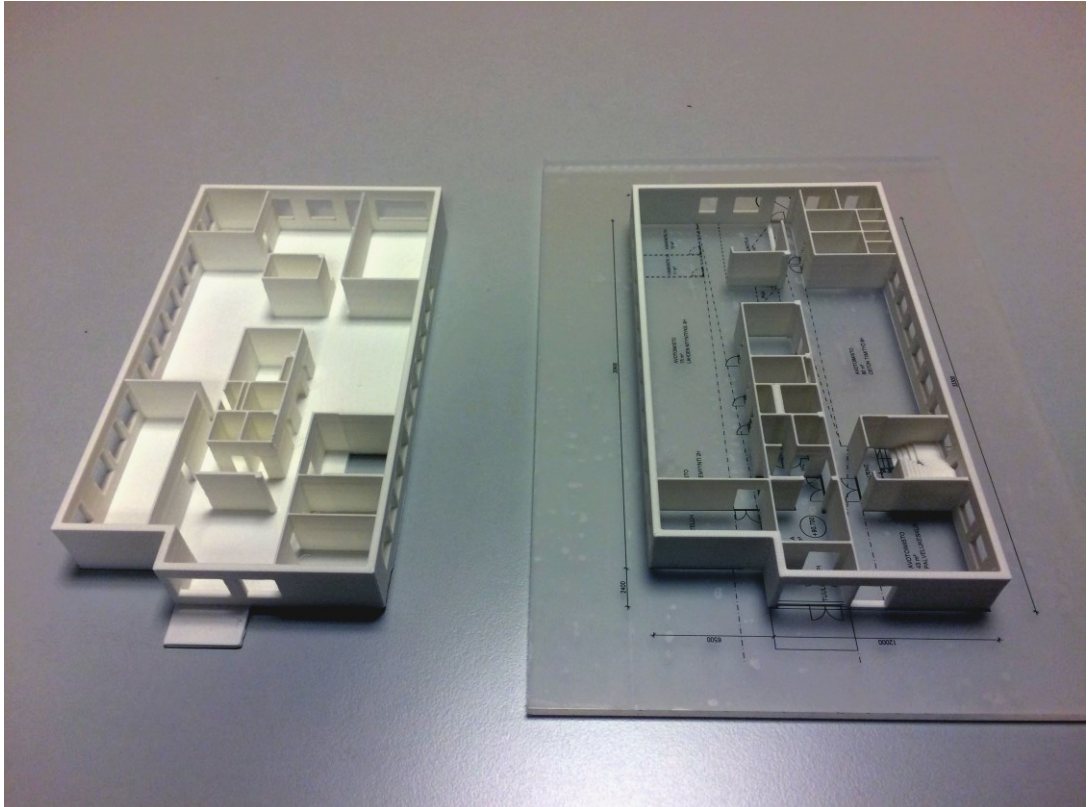
Fyysinen malli todettiin tapaamisessa erinomaiseksi välineeksi tarkastella rakennusten massoitteita ja esittää suunnitelmia ihmisille, joilla ei ole teknisen alan koulutusta ja rakennusteknisten piirustusten lukutaitoa. Tässä tapauksessa malli myös osoittautui kiinnostavammaksi kuin virtuaalisesta 3D-mallista tuotettu animaatio. (Jaakkola, 2017)

4.2 Tapaus 2 – Hankekehitys

Tämän tapauksen kautta arvioidaan 3D-tulostetun mallin arvoa havainnollistamisen välineenä neuvottelutilanteessa hankekehitysvaiheessa. Toimittaja ja tilaaja ovat solmineet yhteistyösopimuksen uusien toimitilojen kehityksestä ja toteutuksesta. Sopimuksessa on muun muassa sovittu hintahaarukasta, johon urakka on sovitettava. Osapuolten väliseen tapaamiseen valmistettiin fyysinen malli (Kuva 16 ja Kuva 17) arkkitehtipiirrosten pohjalta. Mallissa kyettiin havainnollistamaan koko rakennuksen layout-suunnittelu valmistamalla malli kahdessa osassa kerroksittain. Mallin tarkoituksena oli toimia tiloja havainnollistavana viestinnän ja kommunikoinnin välineenä ja herättää mahdollisimman tehokkaasti keskustelua tilojen toimivuudesta ja kehitystarpeista. (Leino, 2016)



Kuva 16 Hankekehityspalaveriin valmistettu 3D-tuloste uusista toimitiloista. Mallia käytettiin havainnollistamaan suunniteltuja tiloja ja herättämään keskustelua ja ideoita kehitystarpeista.



Kuva 17 Malli valmistettiin kahdessa osassa, jolloin pystyttiin tuomaan julki molempien kerrosten layout-suunnittelu.

Palaverissa asiakkaan organisaatiota edustivat kaksi talousjohtajaa. Paikalla oli myös sähkösuunnittelija ja kolme toimittajan organisaation edustajaa. Asiakkaan 2D-piirustusten lukutaidosta ei ollut varsinaista tietoa, mutta oletettavaa on, ettei sujuva piirustustenlukutaito kuulu talousjohtajien ydinosaamiseen. (Leino, 2016)

Palaverin alussa 3D-tulostettu malli nostettiin neuvottelupöydälle kaikkien nähtäville. Malli herätti välittömästi kiinnostuksen toisen asiakkaan ottaessa sen heti lähempään tarkasteluun ja käsin pyöriteltäväksi. 3D-tulostus valmistusmenetelmänä kävi nopeasti mallia esiteltäessä ilmi ja ensivaikutelma oli positiivinen. (Leino, 2016)

Palaverin aikana tarkoituksena oli erityisesti paneutua kohteen talotekniikan läpikäyntiin. Fyysisen, neuvottelupöydällä kaikkien kosketeltavissa olevan mallin lisäksi projektorilla heijastettiin seinälle arkkitehdin laatimat kerrosten pohjapiirustukset. Tilasuunnittelun tarkastelussa kommunikaation tukena käytettiin paljon fyysistä mallia, josta kaikki pystyivät samanaikaisesti osoittamaan tiloja ja ottamaan kantaa tilaratkaisuihin varsin havainnollisesti. 3D-tulosteen ensimmäisen kerroksen pohjana käytettiin akryylilevylle liimattua pohjapiirrosta, joten malli sisälsi myös tämän dokumentin informaation. Samankaltaista menettelyä olisi kaivattu myös toisen kerroksen pohjaksi, jolloin malli olisi ollut täysin itsensä selittävä. Tarkemmalle dokumentaatiolle ei palaverissa ollut tarvetta. (Leino, 2016)

Mallin kautta oli kommenttien perusteella huomattavasti selkeämpi hahmottaa kerrosten väliset suhteet kuin esimerkiksi kahta erillistä pohjapiirrosta tarkastelemalla. Keskustelua herättivät esimerkiksi wc-tilojen ja taukotilojen sijoittelu. Ensimmäiseen kerrokseen oli suunniteltu yhteensä viisi wc:tä, kun toiseen kerrokseen niitä oli sijoitettu kaksi. Näiden kohdistuksesta ja tasapainotuksesta kerroksittain keskusteltiin. Talotekniikan puolesta esimerkiksi wc-tilojen kerroksittainen kohdistaminen olisi suotavaa. Taukotilat on tässä mallissa sijoitettu rakennuksen pätyyn. Ratkaisun toimivuus nostettiin esille mallin kautta ja esitettiin mahdollisuus siirtää taukotilat rakennuksen pitkällä keskilinjalla esimerkiksi täysin keskelle. Malli oli koko palaverin ajan kaikkien tarkasteltavissa ja se jätettiin asiakkaan käyttöön esimerkiksi eri henkilöstöryhmien kanssa tutkittavaksi. Asiakas koki 3D-tulosteen hyväksi sisäisen keskustelun herättäjäksi myös omassa käytössään. (Leino, 2016)

Tällaisessa neuvotteluhankkeessa suuren rakennusliikkeen on tuotettava asiakkaalle lisäarvoa, jota pienemmät toimijat, jotka todennäköisesti pystyisivät tarjoamaan toteutuksen halvemmalla, eivät pysty tarjoamaan. Asiakaslähtöisyyden merkitys korostuu kilpailukyvyn takaamiseksi. 3D-mallinnuksella ja fyysisten mallien valmistuksella luodaan kuvaa edelläkävijyydestä ja tuodaan monesti vaikeat rakennustekniset dokumentit kaikkien helposti ymmärrettäviksi. (Leino, 2016)

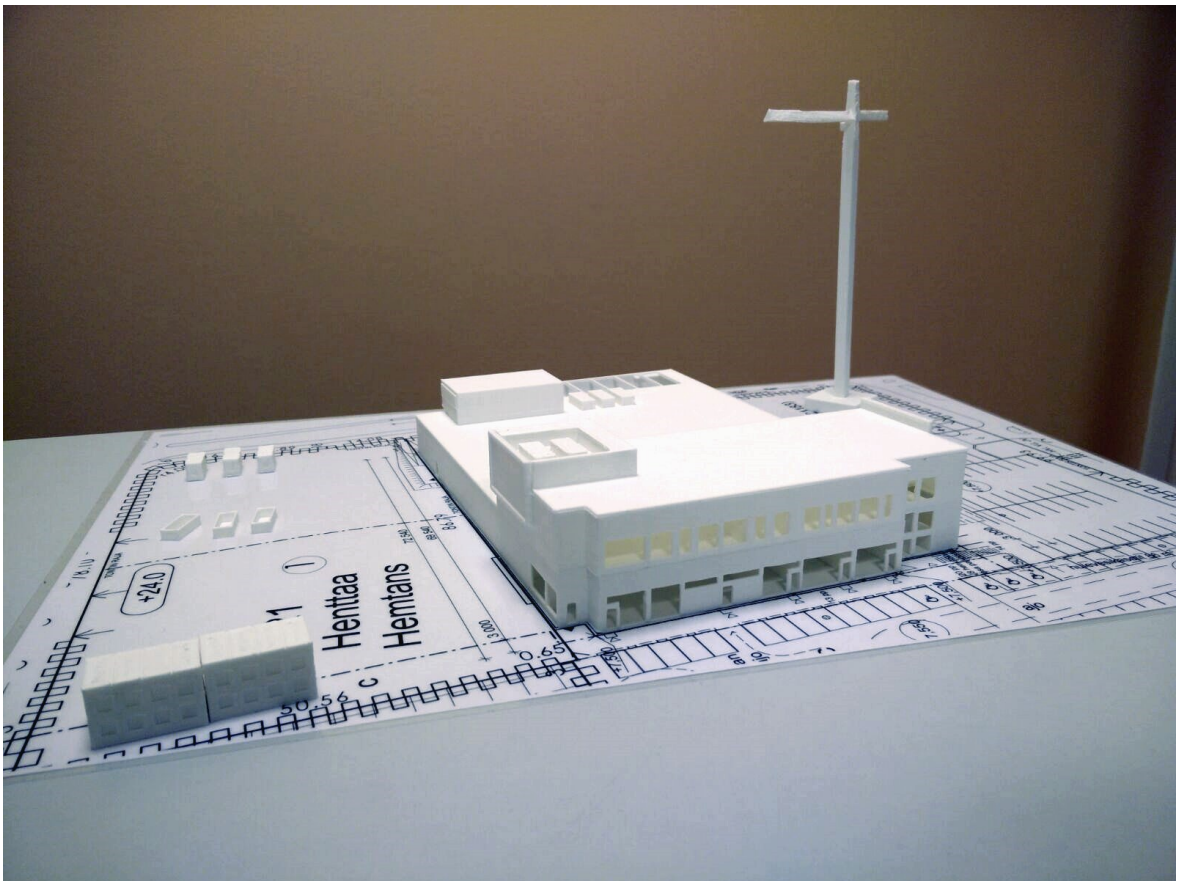
4.3 Tapaus 3 – Töiden suunnittelu ja työmaaperehdytys

Tässä tutkimustapauksessa 3D-tuloste tehtiin työmaan henkilöstön päivittäiseen käyttöön. Espoon Suurpeltoon on rakenteilla liikekeskus. Keskus sisältää tulevia ravintola- ja liiketiloja kahdessa kerroksessa ja suurimman osan liikekeskuksen pinta-alasta vievän päivittäistavarakaupan. Tulosteen valmistushetkellä rakennustyöt työmaalla ovat käynnistyneet ja perustusvaihe on meneillään.

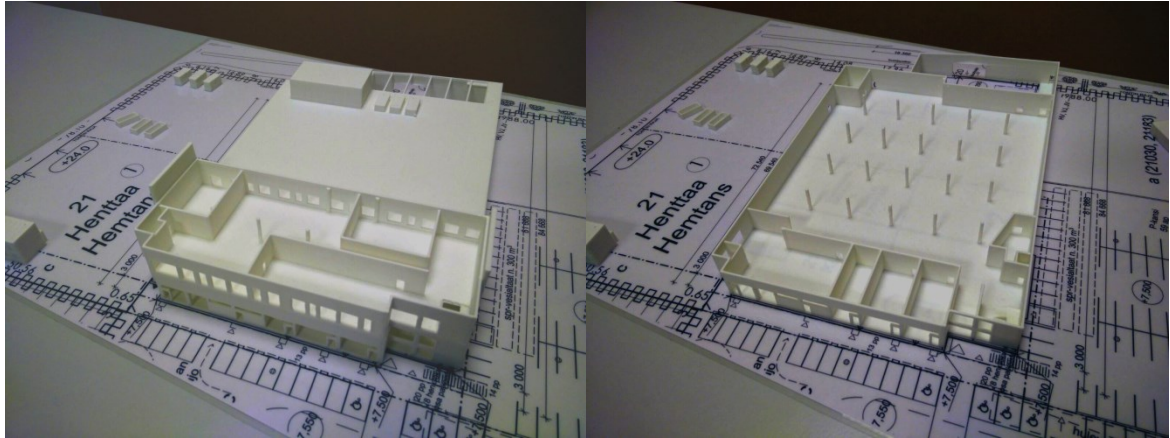
Valmistettu tuloste koostuu yhteensä 13 erillisestä objektista. Liikekeskus tehtiin kolmessa osassa, jolloin myös rakennuksen sisätiloja päästään tutkimaan mallin kautta. Alustana tulosteessa toimii laminoitu asemakaava. Työmaaojekteista mallissa on työmaatoimistot, jätelavat ja varastokopit. Lisäksi mallissa on pienehkö torninosturi, jonka korkeus skaalaamattomana on 60 metriä ja puomin pituus 30 metriä. Mallin mittakaava on noin 1:380.

Mallilla pyritään tarjoamaan vaihtoehtoinen havainnointiväline perinteiselle aluesuunnitelmalle. Kuten tämän työn teoriaosuudessa todettiin, aluesuunnitelmaa käytetään muun muassa töiden suunnittelun ja työmaaperehdytyksen apuvälineenä. Luonnollisesti aluesuunnitelmassa havainnollistetaan myös työturvallisuuteen ja ensiapuun sekä kulkureitteihin liittyviä seikkoja.

Tuloste vietiin työmaahenkilöstön käyttöön rakennusurakan alkuvaiheessa ja se alustettiin käymällä läpi ylemmällä otsikkotasolla esiteltyjä tutkimus- ja haastattelukysymyksiä, joihin muutaman kuukauden käytön jälkeen pyritään saamaan vastauksia.



Kuva 18 Espoon Suurpellon liikekeskuksen työmaasta tehty malli



Kuva 19 Liikekeskuksen malli avattuna

3D-tulosteen käytöstä ja siitä heränneistä ajatuksista käytiin kvalitatiivisen tutkimuksen mukainen avoin keskustelu noin kahden ja puolen kuukauden käyttöjakson jälkeen. Keskustelussa käytiin ylempällä luvussa 3.3 esitetyjä tutkimuskysymyksiä läpi. Niin mallin toimivuudesta perehdytystilanteessa, sen yleisestä havainnollisuudesta kuin kokemuksista töiden suunnittelussakin esitettiin havaintoja ja mielipiteitä.

Työmaalla ensisijaisena havainnollistamisvälineenä on käytetty tietomallia. Tietomallin avaaminen ja sen kautta kulloinkin havainnollistettavan kohdan tai kokonaisuuden tarkastelu on koettu riittävän helpoksi ja nopeaksi toimeksi, joten se on säilyttänyt asemansa tärkeimpänä välineenä. Katseluohjelman käynnistäminen ja tietomallissa navigoiminen luonnistuu keskinkertaisellakin tietokoneella sujuvasti, mikä tekee käytöstä miellyttävää. Tietomallin käyttöön on kannustanut myös luonnollisesti sen tietosisältö ja tarkkuus. (Ranta 2017)

Tulostetta pidettiin koko käyttöjakson ajan työmaatoimiston neuvotteluhuoneen pöydällä, josta käsin se oli työmaahenkilöstön tarkasteltavissa. Näin ollen se oli myös läsnä käytännössä kaikissa työmaatoimistossa pidetyissä kokouksissa. Mallin käyttö (tarkastelu) oli käyttöjakson aikana päivittäistä. Tämän koettiin johtuvan laajalti siitä, että fyysinen malli on aina läsnä tilassa, jolloin se omalla tavallaan kutsuu tarkastelemaan itseään. Kynnys käyttää mallia hyväksi työmaan asioista keskustellessa koettiin varsin matalaksi. Suurin arvo koettiin mallista saatavan sen helposti välittyvästä havainnollisuudesta. Tilat ja mittasuhteet oli helppo hahmottaa omin käsin pyöriteltävästä mallista. (Ranta 2017)

Haastattelussa huomioitiin tarve nimenomaan kolmiulotteisen aluesuunnitelman vaihtoehdoiselle esitysmuodolle. Ainakin tämän työmaan käytössä ollut tietomalli sisälsi ainoastaan tulevan liikekeskuksen ja sen rakenteet. Tästä johtuen tietomalli soveltuu ainoastaan liikekeskuksen havainnollistamiseen, ei läheisten alueiden tarkasteluun ja esimerkiksi töiden suunnitteluun. Kuten aiemmin todettu, tietomallin katseluohjelman avaaminen ja sen kautta mallin tarkasteleminen koettiin helpoksi ja vaivattomaksi, mikä antoi tietomallille kärkiaseman havainnollistamisen välineenä. Aluesuunnitelmakin toki työmaalta löytyy 3D-tietokonemallina, mutta sen käyttö koettiin huomattavasti hankalammaksi. Erona tietomalliin aluesuunnitelma on työmaahenkilöstön itse mallintama tietokonemalli eri mallinnusohjelmistolla. Hankaluus johtuu pääasiassa työkalujen kankeudesta käytössä olevilla välineillä. Mallinnusohjelman avaaminen, mallin käyttäminen ja siinä liikkuminen on koettu häiritsevän hitaaksi ja kangertelevaksi. Tämä

on johtanut siihen, ettei mallinnettua aluesuunnitelmaa varsinaisesti käytetä kovinkaan usein, kun työmaa-alueen toimintoja esitellään, havainnollistetaan ja suunnitellaan. Enemmän on käytetty paperille tulostettuja kaksiulotteisia kuvia. Tässä siis selvästi tiedostettiin tarve helppokäyttöisemmälle aluesuunnitelmalle. (Ranta 2017)

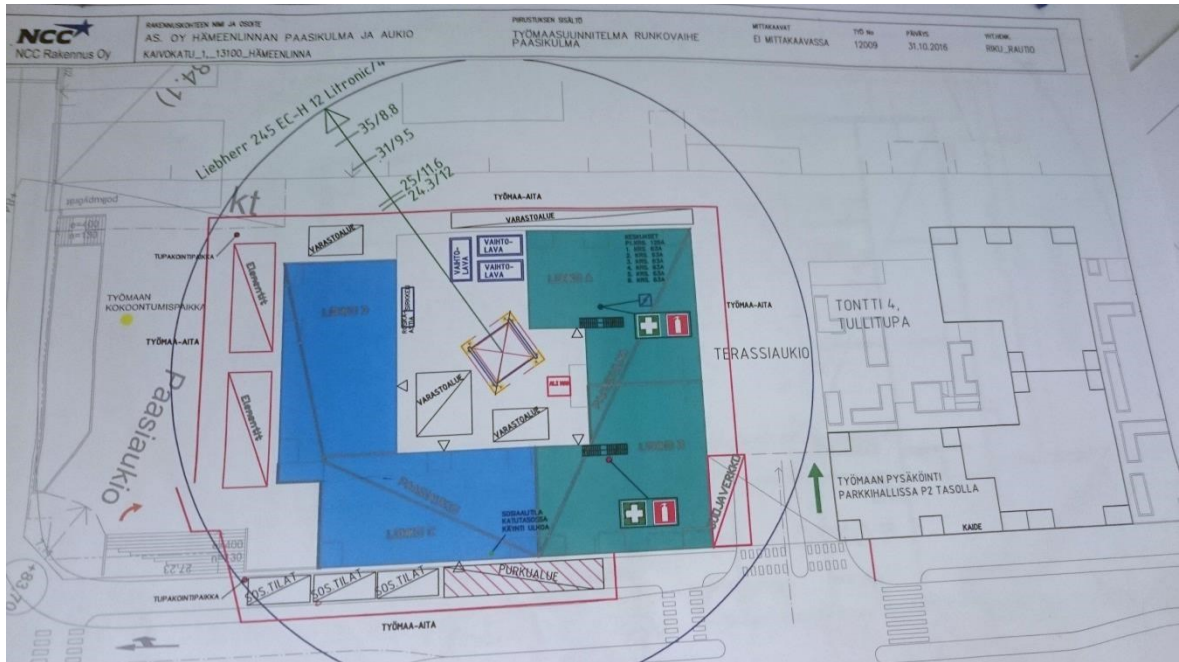
3D-tuloste ei kuitenkaan asemakaava-alustastaan huolimatta toiminut kovinkaan hyvin aluesuunnitelman korvikkeena. Mallin eri osien irrallisuus arveltiin suurimmaksi vaikuttavaksi tekijäksi. Isoin kokonaisuus, eli itse liikekeskuksen 3D-tuloste otettiin usein omiin käsiin tutkittavaksi, jolloin alusta ja siinä olleet muut objektit jäivät vähemmälle huomiolle. Asemakaava ei myöskään sellaisenaan toiminut täysin toivotulla tavalla, jotta kokonaisuutta olisi tehokkaasti käytetty nimenomaan aluesuunnitelman korvikkeena. Paremmiin olisi toiminut yksinkertaisempi karttapohja, johon olisi pääpiirteittäin merkitty työmaa-alueen komponentit ja rajat. (Ranta 2017)

Avoimessa keskustelussa huomioitiin myös haastateltavan omia näkemyksiä siitä, missä tällaisten fyysisten pienoismallien suurin käyttöarvo on. Malli miellettiin hyväksi apuvälineeksi, kun keskustelukumppanina ei ole rakennusalan ammattilainen, tai muu teknisten piirustusten lukutaitoinen henkilö. Mallista saatava hyöty on parhaimmillaan, kun keskustelukumppanilla ei ole etukäteen hyvää käsitystä kohteen geometriasta. Toimitilojen vuokraajan näkökulma koettiin yhdeksi potentiaalisimmista käyttökohteista. Tulevaa asiakasta kiinnostaa aina oman liiketilansa sijoittuminen rakennuksessa. Näitä tiloja vuokraava asiakas ei myöskään useimmiten ole teknisten dokumenttien ja pohjapiirustusten asiantuntija, jolloin on suositeltavaa käyttää jotakin muuta keinoa tilojen havainnollistamiseen. 3D-tulostettu fyysinen malli on koettu helposti lähestyttäväksi ja havainnolliseksi vaihtoehdoksi. (Ranta 2017)

Yksityiskohtaisemmalle mallille arveltiin olevan enemmän hyötyjä. Tällä tasolla oleva malli sopi hyvin karkeaan massojen tarkasteluun, mutta usein jouduttiin käyttämään fyysisen mallin lisäksi tietomallia, kun jostakin työmaan osasta haluttiin keskustella yksityiskohtaisemmin. Kaikki mahdolliset lisäyksityiskohdat tekisivät mallista enemmän itsensä selittävän ja riippumattoman, jolloin sillä voisi olla suurempi arvo. (Ranta 2017)

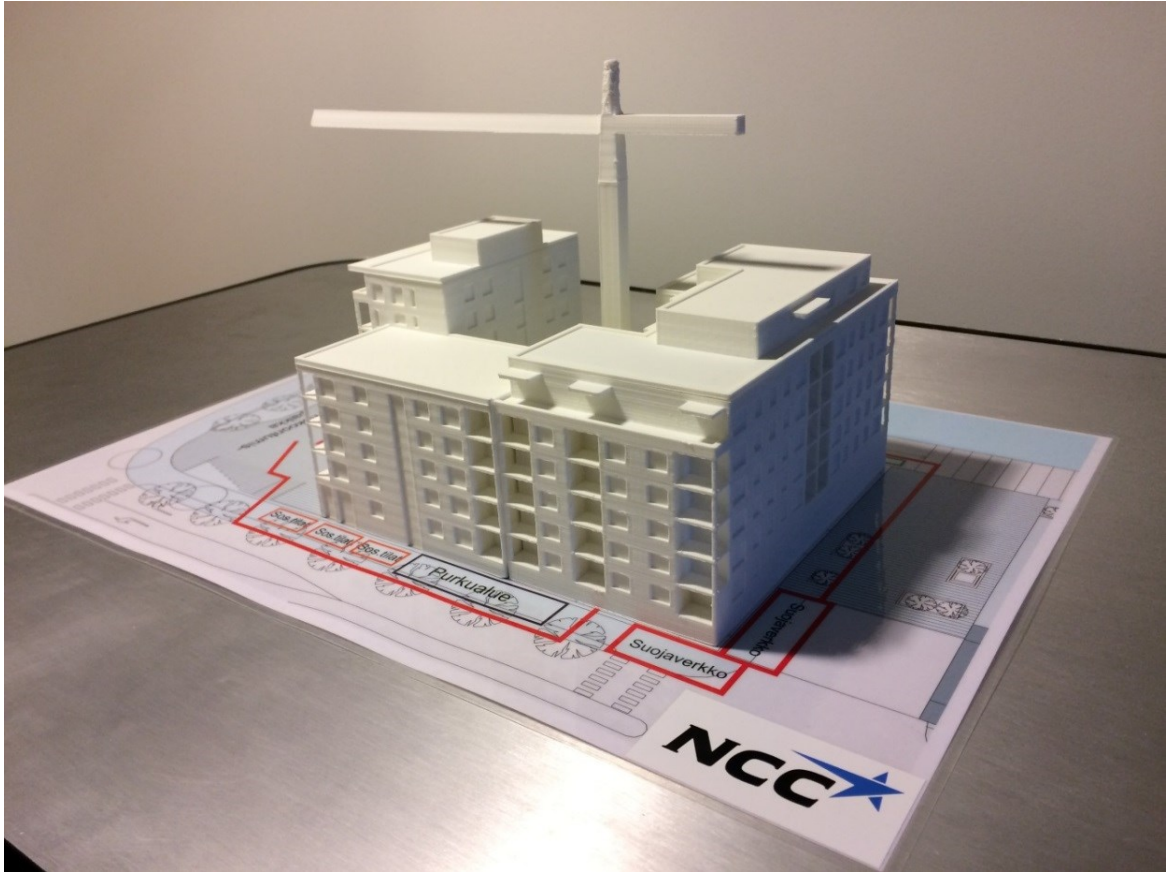
4.4 Tapaus 4 – Työmaaperehdytys

Toisena tapauksena 3D-tulosteen käyttämisestä omassa toiminnassa rakennustyömaalla tehtiin asuntorakennustyömaalle kolmiulotteinen aluesuunnitelma. Kyseisellä työmaalla aluesuunnitelmaa on käytetty käytännössä ainoastaan työntekijöiden perehdytysaineistona, joten 3D-tulosteen pääasiallinen käyttötarkoitus on tässä tapauksessa vaihtoehtoinen työmaan perehdytysaineisto. Toistaiseksi työmaata on perehdytystilanteessa esitelty 2D-muodossa A3-kokoisella paperiarkilla (Kuva 20). Tietomallin käyttö työmaalla todettiin varsin vähäiseksi, eikä sitä ollut koettu kovin tarpeelliseksi edes visualisointityökaluna. Käyttö arvioitiin kuukausittaiseksi, enemmän kuin päivittäiseksi tai viikoittaiseksi. Tämäkin kannusti hakemaan kokemuksia ennen kaikkea perehdytystilanteesta sen ollessa lähes päivittäistä toimintaa.



Kuva 20 Työmaan perehdytyksessä aiemmin käytetty dokumentti.

Malliin tulostettiin rakennettavat asuinkerrostalot ja näiden sisäpihalle sijoitettu torninosturi. Talot mallinnettiin karkealla tasolla tavoitteena tehdä mittasuhteet ja julkisivujen ulkoasu vaivattomasti hahmotettaviksi. Julkisivujen ovet, ikkunat ja parvekkeet mallinnettiin painaumina oikeisiin sijainteihinsa. Tällöin niiden lukumäärä ja asema toivat lisää tarpeellista havainnollisuutta. Alustana toimi A3-arkkikokoinen laminoitu karttapohja, jolle merkittiin aluesuunnitelman sisältämä informaatio ja elementit.



Kuva 21 Työmaalle valmistettu malli – vaihtoehtoinen perehdytysmateriaali

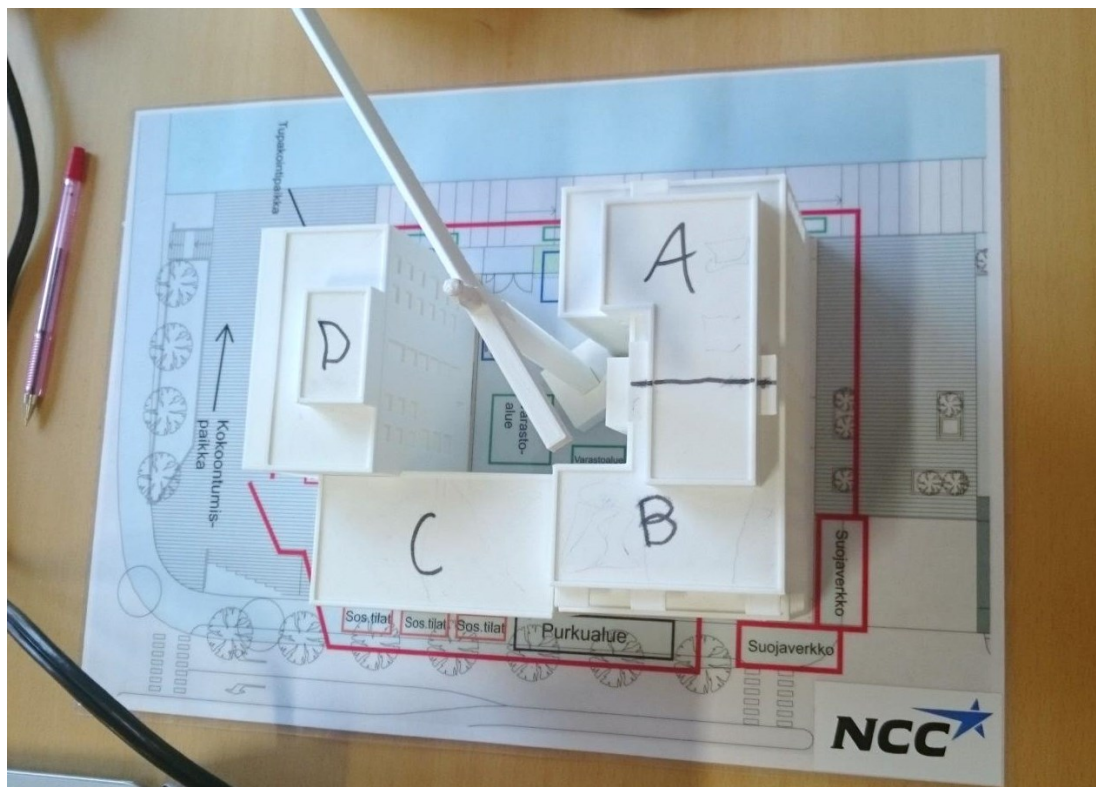
Mallin käyttökokemuksia käytiin puhelinhaastattelun muodossa noin viiden viikon käyttöjakson jälkeen. Tänä aikana työmaaperehdytyksessä kävi yhteensä arviolta 40 henkilöä. Perehdytyksissä ei nähty tarpeelliseksi käyttää muuta materiaalia fyysisen mallin lisäksi. (Rautio 2017)

Malli todettiin perehdytyksissä hyvin toimivaksi välineeksi. Yleisesti se herätti positiivista mielenkiintoa ja sai tarkastelemaan perehdytysmateriaalia hieman intensiivisemmin kuin vanhaa vastinettaan. Hieman perehdyttävästä riippuen mallilla koettiin olevan joskus jopa selkeää lisäarvoa. Esimerkkinä nousi joitakin työntekijöitä, joiden työtehtävät keskittyivät esimerkiksi jollekin vesikattotasolle tai selkeästi julkisivusta hahmotettavaan tilaan. Tällöin esimerkiksi reitin opastamisessa koettiin pienempi mahdollisuus virheille ja väärinymmärryksille. Korkeuksien havainnollistaminen ja viestiminen esimerkiksi turvallisuusriskeistä, jotka liittyvät putoamisuhaan, oli myös yksiselitteisempää. Mallia käytettiin myös silloin tällöin virallisen työmaaperehdytyksen lisäksi joissakin opastavissa tilanteissa. Positiivisena esimerkkinä nousi tilanne, jossa toiseen kerrokseen paikallavalua tekemään menevälle työntekijälle pystyttiin fyysisen mallin kautta osoittamaan tarkka kulkureitti paikalle ja samalla jopa osoittamaan tietty ikkuna-aukko julkisivusta, josta betoniletku kannatti tilaan tuoda. Menetelmä sai selkeytensä ansiosta kiitosta työntekijältä jälkikäteen. (Rautio 2017)

Perehdytysten lisäksi malli sai työmaatoimistossa huomiota muulta työmaahenkilöstöltä. Malli oli usein pöydällä työmaakokouksissa, missä sitä käytettiin keskustelun ja töiden suunnittelun apuna. Työmaahan perehtymätönkin sai näin kokouksissa nopeasti

todellisuutta riittävän hyvin vastaavan kuvan työmaatoimintojen sijoittelusta, valmistuvien rakennusten ulkomuodosta ja pystyi vaivattomasti omalla toiminnallaan kohdistamaan kysymyksensä tai puheensa tiettyyn osaan työmaasta. Eräissä työmaakokouksessa nähtiin myös esimerkiksi fyysisellä mallilla tehty asuinrakennusten valo-varjoanalyysi. Kokouksessa mietittiin, millaisen varjon työmaa-alueen viereinen rakennus luo näiden rakennusten ylle. Viereisen rakennuksen tekemää varjoa simuloitiin asettamalla mallin viereen sopivan kokoinen kirja varjoa luomaan. Tällainen simulointi oli nopeasti ja helposti tehtävissä ilman minkäänlaista tietoteknistä osaamista heti kokoustilanteessa, mikä herätti positiivista huomiota. (Rautio 2017)

Malli nähtiin myös lopulta käteväksi välineeksi joidenkin töiden suunnittelussa. Siihen tehtiin erilaisia merkintöjä kynällä ja hahmoteltiin töitä, jotka eivät tällä tarkkuustasolla 3D-tulostetusta mallista ilmi käyneet. Esimerkkinä katoille tehtävät kivitykset: eräissä seurantalaverissa kivetysten paikkaa ja muotoa hahmoteltiin lyijykynällä suoraan malliin. Menetelmä koettiin intuitiiviseksi ja erittäin havainnolliseksi tavaksi, jolla eritasoisten kattojen tuomat vaatimukset tuli otettua huomioon väistämättä. Malli osoittautui myös hyödylliseksi parvekekaiteiden ja –lasituksen urakansisältöneuvottelussa. Mallia hyödynsi käyttäen suunniteltiin ja käytiin urakoitsijan kanssa läpi asennusjärjestystä. Samalla urakoitsijalle selkeytyi joitakin oman toimintansa kannalta merkityksellisiä asioita, jotka oli ollut 2D-kuvista vaikea hahmottaa. Yhtenä esimerkkinä olivat D-talon kattoterassin dimensiot. 2D-piirustuksista ei ollut käynyt selkeästi ilmi, että ylimmän kerroksen lasitusta ja kaiteita vaativa terassi onkin koko talon levyinen eroten sekä alemmista kerroksista että muista taloista selvästi. Malli toi varmuutta 2D-kuvien lukemiseen ja vähensi väärinymmärrysten mahdollisuutta. (Rautio 2017)



Kuva 22 Perehtyksiä varten malliin tehtyjä merkintöjä

Alun perin vain perehdytystilanteeseen suunnitellulle mallille ilmaantui muutaman viikon käyttöjakson aikana siis useita muitakin hyödyllisiksi koettuja käyttökohteita. Malli keräsi positiivista huomiota olemalla helposti lähestyttävä lisä työmaalla perinteisesti käytetyille havainnollistamiskeinoille. Työmaalta saatujen kommenttien perusteella toiset näkivät mallilla oikeaa käyttöpotentiaalia ja toiset tarkastelivat mallia lähinnä huvittuneina. Kuitenkaan varsinaisesti negatiivisia kommentteja mallista ei kantautunut. Vastaavan mallin käyttöä voitaisiin suositella näillä kokemuksilla myös muilla työmailla, hieman työmaan rakenteesta riippuen. Isommilla ja monimutkaisemmilla työmailla arveltiin olevan suurin potentiaalinen arvo mallin käytölle. (Rautio 2017)

5 Pohdinta

Tapauksetutkimusten ja kvalitatiivisen tutkimuksen mukaisesti varsinaisia tuloksia ovat tehdyt haastattelut ja käydyt keskustelut, jotka on käyty läpi edellisessä luvussa. Tässä luvussa esitetään omia näkemyksiä tuloksista ja niiden käyttöarvosta. Pohdintaa ennen suoritetaan tuloksien ja tutkimusmenetelmien luotettavuuden arviointi.

Laadullinen tutkimus tutkimusmenetelmänä asetti työlle haasteita. Haastattelu- ja kyselytutkimukset pohjaavat empirismiin. Empirismen ideana taas on, että tiedon lähteenä toimii kokemus. Näin ollen kvalitatiivisessa, laadullisessa tutkimuksessa ei varsinaisesti tutkita todellisuutta, vaan tutkimukseen osallistuvien kokemuksta todellisuudesta. Tällöin on syytä pitää mielessä, että ihminen on erehtyväinen ja toimii monesti tunnepohjalta. Kvalitatiivisella tutkimuksella kerätty tieto on aina enemmän tai vähemmän epätäydellistä ja epävarmaa. Tämän tutkimuksen lähtökohtana on kuitenkin ollut vakaa uskomus sen mahdollisuuksista viedä kohti totuutta ja johdonmukaisempaa toimintaa.

Laadullisen tutkimuksen menetelmiin kuuluu, että haastatellaan ennalta valittuja yksilöitä. Haastattelun muoto pidetään monesti hyvinkin avoimena ja keskustelevana. Kerätyn aineiston totuudellisuudella ei varsinaisesti ole merkitystä, sillä kuten aiemmin todettiin, laadullisessa tutkimuksessa kerätään aineistoksi yksilöiden kokemuksia totuudesta. Laadullisessa tutkimuksessa pyritään ymmärtämään ja tulkitsemaan haastateltavan henkilön näkemyksiä. Vaikka koko tutkimusmenetelmä perustuukin kokemusten havainnointiin, on omat mielipiteet, asenteet ja uskomukset pystyttävä pitämään tutkimuksesta erillään. Eräs laadullisen tutkimuksen ominaisuus on myös syytä ymmärtää: kyselytutkimuksilla ja haastatteluilla ei pyritä eikä edes voida täysin vastata kysymykseen miksi, eli tuloksiin johtaneista syistä ei voida esittää muuta kuin henkilökohtaista pohdintaa. Laadullisen tutkimuksen pohjalta ei myöskään voida todistaa mitään valittujen erikoistapauksien ulkopuolelta, vaan voidaan ainoastaan esittää valistuneita yleistäviä oletuksia, hypoteeseja. Yleistysten arvo ja oikeellisuus jäävät jokaisen henkilökohtaisen harkinnan varaan.

Yllä esiteltyjen laadullisen tutkimuksen ominaisuuksien lisäksi haasteita ja tulkinnanvaraa aiheuttavat valmistettujen 3D-tulosteiden ulkoiset ominaisuudet. Työtä varten tehtyihin tulosteisiin on aina osaltaan vaikuttanut oma ”taiteellinen” näkemys. Inspiraation lähteenä tulostustöitä tehdessä toimivat erilaiset omaa silmää miellyttävät arkkitehtimallit. Malli on kuitenkin aina vain malli. Toisin sanoen, mallia tuotettaessa jotain on aina pakko yksinkertaistaa ja mittakaavaa muutettava. Muussa tapauksessa malli olisikin suoraan jo itse mallin kohde. Omat näkemykset ja valinnat malleja tehtäessä ohjasivat todennäköisesti melko lailla lopputuloksia. Jollakin toisella mallinusratkaisulla, yksityiskohtien tasolla tai esimerkiksi mittakaavalla olisi voitu päätyä hyvinkin erilaisiin lopputuloksiin. Toisaalta valmistettavia malleja rajoittivat käytössä olleet resurssit. 3D-tulostin, jolla työn tulokset tehtiin, kykenee käytännössä vain yksivärisiin, melko pienikokoisiin tulosteisiin. Olisiko suuremmilla, tarkemmilla ja esimerkiksi värikkäämmillä malleilla ollut erilainen vaikutus lopputulokseen?

Kokemukset jokaisesta tapauksesta käytiin läpi yhden ennalta valitun haastateltavan kautta. Haastateltava toki pyrki kuvaamaan myös muiden käyttäjien kokemuksia mallista, mutta todennäköistä on, että joitakin kokemuksia ja mielipiteitä jäi tällä tavalla huomioimatta. Asiakaskohtaamisiin tehtyjä malleja oli helpompi käydä läpi yksittäisen haastateltavan kanssa, sillä mallia käytettiin käytännössä vain yhdessä tilaisuudessa, jossa olivat samaan

aikaan läsnä kaikki mallin käyttäjät. Työmaille tehtyjen mallien kanssa tilanne on hieman haastavampi. Mallit olivat käytössä työmaille 1-3 kuukautta ennen kokemuksien purkuhetkeä, jolloin malleilla oli ehtinyt olla hyvin monenlaisia käyttötilanteita ja käyttäjiä. Haastateltava ei ole missään tapauksessa voinut olla läsnä jokaisessa hetkessä, kun mallia on käytetty. Hieman pidemmän käyttöjakson aikana on myös voinut tapahtua joitakin merkityksellisiäkin käyttökokemuksia, jotka ovat unohtuneet haastatteluhetkeen mennessä.

Asiakaskohtaamisiin tehdyille malleille koettiin aina jokin tämän diplomityön ulkopuolinen tarve. Niitä ei tuotettu varsinaisesti mallien tutkimusmielessä, vaan oikeana tarkoituksena oli tuoda asiakkaan kanssa keskustelun ja kommunikoinnin tueksi mielekäs väline. Tällaiset tarpeet ilmenevät usein varsin lyhyellä varoitusaajalla, mikä huomattiin sekä diplomityöhön arvioitaviksi päätyneiden mallien että muiden diplomityön ohella valmistettujen mallien kohdalla. Epäilen, ettei monikaan ulkopuolinen mallinvalmistaja olisi vastaavalla aikataululla kyennyt malleja tarjoamaan. Oli siis ehdottoman tärkeää, että mallinvalmistus tehtiin tilaustöiden sijaan itse, lähellä kaikkea tarvittavaa informaatiota ja ilman turhia välikäsiä. Näin on edes periaatteessa mahdollista tehdä sellaisia malleja, joita ei oikeastaan missään muussa tapauksessa olisi mahdollista tuottaa.

Tämän työn yhtenä tarkoituksena oli tuottaa kirjallinen dokumentti toimeksiantajan käyttöön vasta hiljattain hankitun 3D-tulostimen käyttömahdollisuuksista ja näin antaa näkemys sen käytöstä jatkossa ja helpottaa osaltaan päätöksentekoa toimintaa koskien. Pohjimmiltaan tämän diplomityön sovelluskohteet ovat selkeitä 3D-tulostuksen hyödyntämiskohteita. Rakennuksista tehtävissä pienoismalleissa ei sinänsä ole mitään uutta. Niiden valmistus on kuitenkin lähestulkoon loppunut rakennusliikkeiden toimesta, mikä taitaa kuitenkin johtua vain tietokonehallintamisen kehityksestä ja sen helppoudesta ja nopeudesta, eikä välttämättä siitä, että tietokonehallit olisivat oikeasti ja yksiselitteisesti aina parempia. Nyt kun 3D-tulostaminen on valmistusmenetelmänä tuonut fyysisten mallien valmistamisen aiempaa käsityönä tapahtunutta valmistusta selvästi nopeammaksi, helpommaksi ja halvemmaksi, kannattaa virtuaalisten mallien valta-asema kyseenalaistaa. Loppujen lopuksi kysymys on kuitenkin tavallaan ennestään tutun toiminnan elvyttämisestä nyt, kun valmistusmenetelmät ovat taas tehneet siitä kannattavampaa. Tämän kaltainen ajattelu on yhtenäistä monille muillekin, eri alojen piiristä havaituille, 3D-tulostamisen hyödyntämistavoille. Fyysisillä malleilla ei voida tietenkään täysin korvata tietomallien käyttöä, eikä se ole tarkoitukseen. Silloin tällöin tulee kuitenkin vastaan käyttäjiä ja tilanteita, joissa tietomallin käyttäminen ei toimi erinäisistä syistä johtuen. Käyttäjällä ei välttämättä ole riittäviä tietoteknisiä valmiuksia tai tietomallin tai muun mallin avaaminen saatetaan kokea liian työlääksi tai hitaaksi.

3D-tulostus on yleistynyt ja kehittynyt viime vuosina kuluttajaystävällisemmäksi teknologiaksi kovaa vauhtia. Siitä huolimatta tätä työtä varten tehtyjen tulosteiden kautta saadun palautteen perusteella vaikuttaa, että teknologia on monelle vielä joko täysin tuntematon tai vähintäänkin varsin uusi tuttavuus. Mallit herättivät lähes poikkeuksetta positiivista kiinnostusta ja uteliaisuutta, kun kävi ilmi, että valmistusmenetelmänä oli käytetty 3D-tulostusta. Tätä arvoa, joka syntyy esimerkiksi asiakkaalle muodostuneena positiivisena mielikuvana edelläkävijyydestä ja innovatiivisuudesta yrityksen toiminnassa, on vaikea konkreettisesti mitata. Turvallisesti voidaan kuitenkin sanoa, että kumulatiivinen koettu asiakastyytyväisyys kasvoi mallien ansiosta. Lisääntyneen havainnollisuuden vuoksi asiakas saattaa pitää neuvottelutilannetta helpompana ja mukavampana, joka voi johtaa

esimerkiksi tehokkaampaan yhteisen ymmärryksen saavuttamiseen ja onnistumisiin tarjouskilpailu- tai hankekehitysprosessissa. Nämä toiminnot ovat kuitenkin aina monitahoisia prosesseja, joissa lopputulokseen vaikuttavat osaltaan hyvin monet pienet seikat. On mahdotonta varmasti sanoa, kuinka suuri osuus milläkin seikalla on. Mukana olleet ihmiset voivat vain esittää omia, valistuneita arvioitaan.

Kuten fyysisten arkkitehtimallien valmistuksesta kertovassa luvussa todettiin, 3D-tulostus ei suinkaan ole ainoa tietokoneavusteista suunnittelua hyödyntävä numeerisesti ohjattu valmistusmenetelmä, jota mallien rakennuksessa käytetään. Paljon käytetään myös esimerkiksi CNC-jyrsimiä ja laserleikkureita. Tämän työn puitteissa kaikki mallit on valmistettu käytännössä ainoastaan 3D-tulostinta käyttäen. Kuitenkin, kun ymmärretään, ettei kyseessä ole muuta kuin mallien valmistusta hieman nykyaikaisemmin menetelmin, lienee paikallaan pohtia työkaluarsenaalin kasvattamista esimerkiksi hankkimalla 3D-tulostimen rinnalle myös laserleikkuri. Jotkin levymäiset kappaleet olisi huomattavasti tehokkaampaa leikata muotoonsa laserleikkurilla kuin valmistaa 3D-tulostamalla. Monissa tapauksissa mallin valmistukseen kulunutta kokonaisaikaa olisi vieläkin mahdollista lyhentää huomattavasti. Työkaluja/konekanta lisäämällä mallien valmistukseen olisi myös mahdollista ottaa enemmän vaikutteita arkkitehtien esittelymalleista ja näin tehdä varsinkin asiakaskohtaamisiin tarkoitetuista malleista astetta näyttävämpiä ja ammattimaisemman oloisia. Tämä olisi varsin luonnollinen kehitysaskel toiminnassa.

Luvun 3.3 oman toiminnan tukena käytettyjen 3D-tulosteiden arvioiminen yleisellä tasolla on jotakuinkin yhtä vaikeaa kuin asiakaskommunikoinnin mallienkin. Joitain seikkoja näihin kuitenkin liittyy, jotka eroavat luvun 3.2 tulosteista. Omassa toiminnassa (rakennustyömaalla) käytetyn mallin käyttöaika on usein selvästi pidempi. Kun mallille on asetettu tavoitteiksi käyttää sitä esimerkiksi työmaan perehdyttämisessä ja töiden ja logistiikan suunnittelussa, täytyy mallin olla saatavilla pidemmän jakson ajan. Mallin fyysisestä luonteesta seuraa havainnollisuuden lisäksi myös oletettavasti muitakin etuja. Tietokoneen ruudulta tarkasteltavan tietomallin voi aina sulkea pois näkyvistä ja yhtä lailla se täytyy aina avata erikseen näkyviin. Fyysistä mallia ei voi sulkea parilla hiiren klikkauksella. Fyysinen malli pysyy aina valmiina tarkastelua varten. Kun esimerkiksi työmaatoimiston neuvotteluhuoneessa halutaan havainnollistaa jokin kohta tai alue työmaalta, on sekä helpompaa, havainnollisempaa että nopeampaa osoittaa paikkaa sormella neuvotteluhuoneen pöydällä olevasta tulostetusta mallista, kuin avata tietokoneella vastaava malli. Tämä todennäköisesti myös kannustaa käyttämään mallia sellaisissakin tilanteissa, jotka eivät välttämättä vaatisi minkään mallin käyttöä, mutta siitä olisi kuitenkin mahdollista hyötyä. Tilanteissa, joissa normaalisti tietokonemallin avaaminen jäisi väliin. Yleisesti mallien kautta saatujen kommenttien perusteella syntyi käsitys, että varsinkin suurien kokonaisuuksien hahmottamisessa oli selkeä ero fyysisten ja virtuaalisten mallien välillä. Etäisyydet ja mallin osien väliset suhteet havaittiin fyysisestä mallista luontevammin. Luvun 4.4 tapauksessa koettiin syystä tai toisesta enemmän hyötyjä, kuin luvun 4.3 tapauksesta. Osaltaan tähän vaikuttaa varmaankin selkeämpi käyttötarkoitus, johon malli valmistettiin. Tarkoituksena oli antaa vaihtoehto työmaan aluesuunnitelmalle, jota voitaisiin käyttää perehdytystilanteessa. Lopulta mallia käytettiin myös muihin tarkoituksiin, joita on kuvattu tapauksen esittelyssä. Keskusteluissa ilmeni, että tietomallin käyttö kyseisellä työmaalla on ollut varsin vähäistä. Käyttö arvioitiin karkeasti vain kuukausittaiseksi. Niinpä fyysiselle kolmiulotteiselle mallille oli hyvin tilaa ja sitä käytettiin monissa visualisointia vaativissa tehtävissä, joissa joku toinen työmaa olisi ehkäpä käyttänyt enemmän tietomallia.

Sekä työn kirjallisuusselvityksen että laadullisen tutkimuksen perusteella voidaan vetää johtopäätöksiä virtuaalisten ja fyysisten mallien käytettävyyseroista. Työn toimeksiantajalle aikaisemmin tehdyistä opinnäytetöistä tietomallien hyödyntämisestä alan eri toiminnoissa saadaan hyvä, yhtenäinen kuva siitä, miten tietomalleja tällä hetkellä käytetään. Voidaan sanoa, että tällä hetkellä heikohkon käytettävyyden vuoksi tietomalleja ei käytetä kuin harvoissa tilanteissa tarpeeseen, johon ne on suunniteltu ja tarkoitettu. Toki malleista voi hyötyä hyvin moninaisilla tavoilla, mutta esimerkiksi tilojen hahmottamiseen ja muuhun visuaaliseen viestintään ei tarvita kaikkea mallien informaationsisältöä. Mallien monipuolisuus ja raskaus johtavat usein koetun käytettävyyden heikentymiseen. Jos mallin käynnistäminen tietokoneella kestää liian kauan, jää se monessa tapauksessa kokonaan avaamatta. Toisaalta mallien suuri tietosisältö vaikuttaa hallinnan puuttumisen tunteeseen, kun mallista on vaikeaa hahmottaa, mitä sillä voi tehdä ja mitä ei. Fyysisten mallien kanssa tilanne on päinvastainen. Mallien tietosisältö on hyvin vähäinen, vaikkakin malliin voidaan hyvin sisällyttää esimerkiksi kaikki työmaan aluesuunnitelman vaatima informaatio. Käytettävyyden näkökulmasta fyysiset mallit ovat mutkattomia. Malleista käy hyvin intuitiivisesti ilmi, mitä niillä voi tehdä ja mitä ei. Käsien kosketeltavuus tuo malleihin lisäarvoa, jota voi olla joskus vaikea ymmärtää. Sitä varten tarvitaan tätä työtä syvempää kognitiivisten prosessien analysointia. Ihmisten ensireaktioita seuraamalla on kuitenkin helppo antaa arvio mallien lähestyttävyydestä ja käytettävyydestä. Valtaosa ihmisistä, joille malleja on näytetty, on ottanut pikaisen silmäilyn jälkeen mallin käsiinsä, pyöritellyt sitä, katsellut eri kulmista ja näin oppinut vaivattomasti mallin kohteen ominaisuuksia. Reaktiot tietokoneen näytöltä tutkittavan 3D-mallin kanssa eivät ole kovinkaan samanlaisia. Usein tietokonemallia käyttämään tarvitaan ensinnäkin asiantunteva henkilö, joka mallinnus- tai katseluohjelmassa pyörittelee mallia tietokoneen ruudulla. Ei tapahdu samanlaista luontaista oppimisreaktiota. Kuten luvussa 2.4.1 todettiin, kaikki kolmiulotteisen materiaalin havaitseminen kaksiulotteiselta ruudulta vaatii katsojalta pohjatietoja, vertailua ja päättelyä.

Työn tulokset vaikuttavat olevan hyvin linjassa kirjallisuuden kanssa. Valmistetut fyysiset mallit onnistuivat käytettävyytensä puolesta luomaan positiivisessa hengessä keskustelua mallin kohteesta. Pienoismallien käyttöön oli hyvin matala kynnys, käyttäjät hahmottivat mallien kohteet vaivattomasti ja käsiään käyttäen oppivat tehokkaasti tarvittavat asiat. Mallien käytön miellyttävyyteen viittaa esimerkiksi se, että lähes aina visualisointia vaativa keskustelu käytiin ensi sijassa pienoismallia apuna käyttäen, vaikka vaihtoehtona olisi ollut CAD-mallikin tai havainnekuvia. Toki tarkempia yksityiskohtia tai suurempaa informaationsisältöä kaivattaessa käyttöön otettiin usein tietomalli tai 2D-piirustukset.

Pienoismalleista ja virtuaalisista malleista muodostuvien havaintojen eroa on toki tutkittu aiemminkin, kuten luvussa 2.4.3 esiteltiin. Yhtä lailla arkkitehtimallien käytöstä ja hyödyistä on puhuttu pitkään. Kuitenkaan kirjallisuusselvitystä tehdessä kertaakaan ei vastaan tullut julkaisua, joka selittäisi perimmäiset syyt näiden ilmiöiden takana. Tässä työssä näkökulma fyysisten ja virtuaalisten mallien eroihin tuotiin kognitiivisen psykologian ja käytettävyyden kautta. Muun muassa vaivattomammat kognitiiviset prosessit ja käsien käyttö aivoja aktivoivana tekijänä puoltavat fyysisten mallien käyttöä.

Luvussa 1.3 työn tavoitteiksi esitettiin tulostimen hyödyntämismahdollisuuksien kartoitus ja käytännön testaus. Lisäksi tavoitteisiin kirjattiin fyysisten ja virtuaalisten mallien erojen ymmärtäminen ja toiminnan näkyvyyden kasvattaminen toimeksiantajan yhtiön sisäisesti.

Tehdyt tapaustutkimukset lisäsivät näkyvyyttä ja aiheuttivat keskustelua. Näin tulostimesta tietoinen ja sen mahdollisuudet ymmärtävä joukko kasvoi työn teon aikana. Fyysisten ja virtuaalisten mallien välille onnistuttiin luomaan selvä, kognitiivisesta psykologiasta juontuva ero. Käyttötapojen kartoitus tehtiin tarkastelemalla pienoismallien ja virtuaalisten mallien käyttöä rakennusalalla, minkä perusteella valittiin teemat omille tapaustutkimuksille. Toteutetulla työllä päästiin ennalta asetettuihin tavoitteisiin. Tulosten ja työnaikaisten kokemusten perusteella nähdään selvemmin, mitä hankitulla tulostimella kannattaa tehdä, mitä ei ja mikä on ylipäättään mahdollista. Kokemukset helpottavat toimintaa koskevien päätösten tekoa jatkossa.

Mielenkiintoinen, jatkotutkimusta vaativa aihe on erilaisista niin kutsutuista immersiiivisistä virtuaalisen todellisuuden sovellutuksista muodostuvan havainnon vastaavuus fyysiseen ympäristöön. Luvussa 2.3 esitellyillä VR-laseilla saadaan kuitenkin näytettyä oikealle ja vasemmalle silmälle hieman eri katselukulmasta sama näkymä, jolloin syvyysvaikutelma syntyy stereonäön ansiosta luonnollisemmin. Tämänhetkisten kehitysnäkymien perusteella vaikuttaa siltä, että näillä teknologioilla haetaan vahvasti tapoja tuoda virtuaaliset mallit osaksi toimintaa. Rakennusalaa on yleisesti pidetty yhtenä potentiaalisimmista aloista teknologian käyttöönottoon.

6 Yhteenveto

Työssä tutkittiin 3D-tulostettujen pienoismallien käyttöä kommunikaation välineinä rakennusliiketoiminnassa. Työn tarkoituksena oli ymmärtää fyysisten pienoismallien arvo ja potentiaalisimmat käyttökohteet rakennusalalla, jolloin toimeksiantajan hankkimasta 3D-tulostimesta saataisiin jatkossa mahdollisimman korkea hyöty.

Työssä selvitettiin 3D-tulostettujen mallien asemaa tutustumalla sekä virtuaalisten että fyysisten mallien käyttöön rakennusalalla kirjallisuusselvityksen keinoin. Fyysisten mallien käyttö tällä hetkellä todettiin varsin vähäiseksi. Tietokonemallinnuksen ja rakennusten tietomallien kehitys on jättänyt pienoismallien rakentamisen selkeään marginaaliin. Oikeastaan vain arkkitehdit ovat kokeneet fyysisillä malleilla olevan arvoa, jota virtuaalisilla malleilla on mahdoton saavuttaa. Niinpä fyysisten mallien käytön kirjallisuuskartoitus kohdistuu tässä työssä vahvasti arkkitehtimallien tutkimiseen.

Perinteisesti arkkitehtimallien valmistus on ollut pitkälti aikaa vievää käsityötä. Numeerisesti ohjatut valmistusmenetelmät ovat kuitenkin automatisoineet fyysisten mallien valmistusta ja tehneet siitä selvästi kustannustehokkaampaa. Tietokoneavusteisella suunnittelulla ja valmistuksella on voitu pienentää huomattavasti mallien valmistuksen aiheuttamia kustannuksia ja leikata valmistukseen kulunutta aikaa.

Erilaisten tuotteiden käyttämisen ja käytettävyyden arviointi tapahtuu luonnollisimmin kognitiivisen psykologian ja havaintopsykologian menetelmien kautta. Kun fyysisten mallien käytettävyyttä verrataan virtuaalisten mallien käytettävyyteen, voidaan vetää joitakin johtopäätöksiä fyysisten mallien arvosta. Kaikki tietoteknisiin haasteisiin liittyvät käytettävyysongelmat poistuvat käytettäessä fyysistä mallia. Havaintopsykologiaan liittyvä kuvatutkimus selittää eroja fyysisten ja virtuaalisten mallien välisessä avaruudellisessa hahmotuskyvyssä. Fyysisestä objektista muodostuva tarkempi mittasuhteiden ja ulottuvuuksien käsitys selittyy ihmisten erilaisella kyvyssä vastaanottaa kolmiulotteista informaatiota kaksiulotteisesta representaatiosta. Perspektiivin ja mittasuhteiden muodostuminen kaksiulotteisesta elementistä, kuten kuvasta tai tietokoneen monitorilta, tapahtuu ihmisen aivoissa, opittuna taitona. Tällainen havaitseminen vaatii esitietoja, vertailua ja päättelyä. Fyysisen ympäristön havainnoinnissa suuressa roolissa on näköaistin lisäksi myös kaikki muut aistit. Tuntoaistin kautta välittyy varsinaisesti tietoisuus siitä, että olemme fyysisiä olentoja fyysisessä ympäristössä. Tuntoaistin, kosketuksen ja käsillä tekemisen merkitys on varsin suuri, kun uusia asioita opetellaan. Käsillä tekeminen auttaa keskittymistä ja muistamista sekä kehittää luovuutta ja ongelmanratkaisukykyä. Tarjoamalla fyysinen mallikappale käsin kosketeltavaksi ja tarkasteltavaksi tarjotaan vaihtoehtoinen, helpommin lähestyttävä ja opittava tapa ymmärtää kolmiulotteisia kohteita.

Työn empiirisessä osuudessa valmistettiin 3D-tulostamalla malleja erilaisiin rakennusliikkeen tarpeisiin kommunikaation ja viestinnän välineiksi. Työmailla saatiin hieman pidemmän käyttöjakson johdosta hyvin erilaisia hyötyjä irti. Mallit olivat käytössä niin työmaakouksissa, perehdytystilanteissa kuin päivittäisessä suunnittelussa ja ohjeistamisessakin. Kokemukset olivat kautta linjan positiivisia. Päivittäisessä tekemisessä syntyi useita hetkiä, jolloin fyysisestä mallista oli sekä nopein että yksiselitteisin opastaa työntekijä esimerkiksi oikeaa reittiä työntekopaikalle työmaa-alueella. Malli auttoi omalta osin varmasti vähentämään virheitä. Toinen työmaille tehdyistä malleista sisälsi myös rakennuksen sisäpuolisia geometrioita. Tämän mallin suurimmaksi arvoksi työmaalla arvioitiin ulkopuolisten kanssa kommunikoinnin. Tulevat tilanvuokraajat ja muut

liiketilaan ensimmäistä kertaa tutustuvat saivat helpoiten käsityksen tilojen suhteista toisiinsa fyysisen mallin kautta.

Asiakaskohtaamisiin tehtyjä malleja pidettiin ainakin potentiaaliltaan arvokkaimpina, sillä niillä oli suora vaikutus asiakkaan kokemaan palveluun. Mallien tarkoituksena oli tuoda suunnitelmien esittelyyn mahdollisimman helposti lähestyttävä ja käytettävä malli, jonka kautta väistettäisiin virtuaalisiin malleihin liittyvät ongelmakohdat ja asiakkaalta saataisiin tehokkaasti omia näkemyksiä ja kommentteja suunnitelmista. Työn molemmista asiakasrajapinnan malleista saatiin samansuuntaiset tulokset. Käyttäjät lähestyivät malleja innokkaasti ja tilanteisiin liittyi selvästi positiivisia tunne-elämyksiä. Malleja pyöriteltiin käsissä ja niitä tarkasteltiin erilaisista katselukulmista. Näissä tilanteissa käytössä oli myös visualisoivia kuvia ja esimerkiksi videokuvaa animaation muodossa, mutta fyysiset mallit todettiin käytettävyytensä puolesta tehokkaimmiksi välineiksi.

Työssä todennettiin väitteitä ja näkemyksiä fyysisten ja virtuaalisten mallien eroista kommunikaatiovälineinä ja tuotiin havaintopsykologian ja käytettävyyden kautta tieteellinen pohja fyysisten pienoismallien käytölle. Fyysisten mallien tehokas käytettävyys johti siihen, että muita visualisoimisen keinoja käytettiin selvästi vähemmän, jos tarjolla oli myös fyysinen pienoismalli.

Lähteet

Burry, M., Burry, J. (2016) Prototyping for architects. London: Thames & Hudson Ltd. 271 s. ISBN: 978-0-500-34305-0.

Business directory. Model [verkkoaineisto]. Viitattu 10.1.2017. Saatavissa: <http://www.businessdictionary.com/definition/model.html>

Bouchlaghem, D., Shang, H., Whyte, J., Ganah, A. (2005) Visualisation in architecture, engineering and construction (AEC). Automation in construction 14. s. 287-295

Dadi, G. B., Goodrum, P. M., Taylor, T. RB. Maloney, W. F. (2014) Effectiveness of communication of spatial engineering information through 3D CAD and 3D printed models. Visualization in Engineering 2:9. Saatavissa: DOI:10.1186/s40327-014-0009-8

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K. (2008) BIM handbook : a guidebook to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. New Jersey: John Wiley & Sons. 484 s. ISBN: 978-0-470-18528-5.

Eloranta, S. (2013) Tilan ymmärtäminen pienoismallien ja 3D-visualisointikuvien avulla. Opinnäytetyö. Karelia-ammattikorkeakoulu. Joensuu. 40 s.

Foy, D., Shahbodaghlu, F. (2015) 3D Printing For General Contractors: An Analysis of Potential Benefits. 51st ASC Annual International Conference Proceedings. California: Hayward.

Gammon Construction Ltd. (2013) Press Release. Viitattu 4.11.2016. Saatavissa: <http://www.gammonconstruction.com/en/html/press/press-07b0f78d171b41d08265979a0aa8c2c7.html>

Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B. (2010) Additive manufacturing technologies. New York: Springer. 447 s. ISBN: 978-1-4419-1119-3. DOI: 10.1007/978-1-4419-1120-9.

Gibson, I., Kvan, T., Ming, L. W. (2002) Rapid prototyping for architectural models. Rapid Prototyping Journal, Vol. 8 Iss: 2, s. 91 – 95. DOI: 10.1108/13552540210420961.

Grieser, F. (2015) FDM vs SLA: 3D printing explained and compared [verkkoaineisto]. Viitattu 25.4.2017. Saatavissa: <https://all3dp.com/fdm-vs-sla/>

Hatwell, Y., Streri, A., & Gentaz, E. (2003) Touching for knowing: Cognitive psychology of haptic manual perception. Amsterdam ; Philadelphia: J. Benjamins. 313 s. ISBN: 90-272-5185-1

Hill, J. (2014) On Architectural Models. World-Architects. Viitattu 21.2.2017. Saatavissa URL: http://www.world-architects.com/architektur-news/insight/On_Architectural_Models_2247

Huang, T., Li, H., Guo, H., Chan, N., Kong, S., Skitmore, M. (2009) Construction virtual prototyping : a survey of use. Construction Innovation : Information, Process, Management, 9(4). pp. 434-448

Issa, R. (2000) Virtual Reality: A Solution to Seamless Technology Integration in the AEC Industry. Construction Congress VI: Building Together for a Better Tomorrow in an Increasingly Complex World (s. 1007-1013).

Jaakkola, T. (2017) Projektipäällikkö yrityksessä NCC Suomi Oy. Haastattelu Helsingissä 14.2.2017.

Jetsonen, J. (2001) Little big houses - working with architectural models. Helsinki: Rakennustieto Oy. 174 s. ISBN: 951-682-645-8

Jiao, Y., Zhang, S., Li, Y., Wang, Y., Yang, B. (2013) Towards cloud augmented reality for construction application by BIM and SNS integration. Automation in Construction 33. s. 37-47.

Kauppi, I. (2014) Tietomallien hyödyntäminen elinkaarihankkeiden kiinteistöjohtamisessa. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. 82 s.

Knoll, W., Hechinger, M. (2006) Architectural Models – Construction Techniques. Kaupunki: J. Ross Publishing Inc. 2. painos. 143 s. ISBN: 978-1-9321-5996-7 <https://ebookcentral-proquest-com.libproxy.aalto.fi/lib/aalto-ebooks/reader.action?docID=3319454>

Kuismin, E. (2013) Käy käsiksi aivoihin [verkkoaineisto]. [viitattu 10.4.2017]. Saatavissa: http://www.earlylearning.fi/news_elli.php?n=21

Kärnä, S., Junnonen, J., Sorvala, V. (2007) Asiakastyytyväisyys rakentamisessa. Tutkimusraportti. Teknillinen korkeakoulu. Espoo. 120 s. ISBN 978-951-22-8840-3.

Leapfrog xeed datalehti.

Leino, M. (2016). Projektipäällikkö yrityksessä NCC Suomi Oy. Haastattelu Helsingissä 20.10.2016.

Lund, J. (2014) Tietomallin hyödyntäminen tehtäväsuunnittelussa. Insinööriyö. Metropolia-ammattikorkeakoulu. Helsinki. 69 s.

Latvala, J. (2012) Tietomallinnuksen hyödyntäminen työmaatoiminnassa. Tutkimusraportti.

Microsoft. Hololens [verkkosivusto]. Viitattu 10.4.2017. Saatavissa: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>

Nagpure, Y. (2016) Focus on Model Making Through Creative Learning Method in Architecture Pedagogy. International journal of Research in Civil Engineering, Architecture & Design. Volume 4, Issue 1 s. 191-197 ISSN: 2347-2855

Nyström, M. (2015) Tietomallintamisen hyödyntäminen urakointiliiketoiminnassa. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Helsinki. 41 s.

Oculus VR. Rift [verkkosivusto]. Viitattu 10.4.2017. Saatavilla: <https://www.oculus.com/rift/>

Pekkanen, J. (2005) Asiakkuuden menestys- ja uhkatekijät rakennushankkeessa. Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu. Espoo. 169 s. ISBN: 951-22-7933-9.

Pienimäki, M. (2000) Kuva, havainto ja todellisuus. Todellisuudesta ja kuvasta muodostuvat havainnot sekä niiden vastaavuus kuvioiden, objektien, tilan ja syvyyden suhteen. Pro gradu. Jyväskylän yliopisto. Taiteiden ja kulttuurin tutkimuksen laitos. 195 s.

Poikonen, A. (2016) Tietokoneavusteisia työkaluja hyödyntävä arkkitehtuuripienoismallikonsepti. Opinnäytetyö. Savonia-ammattikorkeakoulu. Kuopio. 79 s.

Ranta, E. (2017) Työmaainsinööri yrityksessä NCC Suomi Oy. Haastattelu Espoossa 25.1.2017.

Rautio, R. (2017) Työmaainsinööri yrityksessä NCC Suomi Oy. Puhelinhaastattelu 20.3.2017.

Seyl, D. G., (2015) Site Modeling Methods - Common site modeling methods and their associated costs. Viitattu 17.3.2017. URL saatavilla: <https://wiki.harvard.edu/confluence/display/fabricationlab/Site+Modeling+Methods>

SFS-EN ISO 9241-10. (2008). Ihmisen ja järjestelmän vuorovaikutuksen ergonomia1. Osa 110: Dialogin periaatteet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 55 s.

SFS-EN ISO 9241-11. (2000). Näyttöpäätteillä tehtävän toimistotyön ergonomiset vaatimukset. Osa 11: Käytettävyyden määrittely ja arviointi. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 44 s.

Sinkkonen, I., Kuoppala, H., Parkkinen, J., Vastamäki, R. (2006) Käytettävyyden psykologia. Helsinki: Edita Prima Oy. 3. painos. 334 s. ISBN: 951-37-4643-7

Sonneveld, M., Schifferstein, H. (2008) The tactual experience of objects. Teoksessa: Schifferstein, H., Hekkert, P. (2008) Product Experience. Amsterdam: Elsevier. 662 s. ISBN 978-0-08-045089-6.

Sulankivi, K., Mäkelä, T., Kiviniemi, M. (2009) Tietomalli ja työmaan turvallisuus. Tutkimusraportti. VTT. Tampere. 75 s. ISBN: 978-951-38-7142-7.

Sun, L., Fukuda, T., Tokuhara, T., Yabuki, N. (2013) Differences in spatial understanding between physical and virtual models.

Werner, M. (2011) Model Making. New York: Princeton Architectural Press. 160 s. ISBN: 978-1-56898-870-2.

Woodward, C., Hakkarainen, M., Korkalo, O., Kantonen, T., Aittala, M., Rainio, K., Kähkönen, K. (2010) Mixed reality for mobile construction site visualization and communication. 10th International Conference on Construction Application of Virtual Reality.

Wu, P., Wang, J., Wang, X. (2016) A Critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. Automation in Construction 68. s. 21-31. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.autcon.2016.04.005