

Mikko Haapanen

TIETOMALLINTAMISEN ROOLI RAKENNUSHANKKEEN KUSTANNUSHALLINNASSA

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Taija Puolitaival
12/2022

TIIVISTELMÄ

Mikko Haapanen: Tietomallintamisen rooli rakennushankkeen kustannushallinnassa
(Role of BIM in construction project cost management)

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

12/2022

Rakennushankkeen keskeisimmät vaatimukset perustuvat laatuun, aikaan ja kustannuksiin. Hankkeen kustannushallinta on laaja kokonaisuus, ja sen keskeisimpänä haasteena on analogisten tai puolittain digitaalisten prosessien tehottomuus, joka usein johtaa suunnittelu- ja tiedonkulun ongelmien myötä kustannusten ylittymiseen, ja sitä kautta myös aikataulutukseen liittyviin haasteisiin. Tietomallintamisen yleistyy osana rakennushanketta, ja sen avulla pystytään oikein käytettynä pienentämään kustannushallintaan liittyviä riskejä. Tämä kuitenkin vaatii hankkeen osapuolilta vankkaa yhteistyökykyä ja mallinnusprosessin tarkkaa suunnittelua.

Tämän työn tavoitteena oli selvittää, minkälaisia hyötyjä tietomallintamisesta voidaan saada rakennushankkeen kustannushallinnan näkökulmasta, sekä miten mallinnusprosessi itsessään toteutetaan. Lisäksi tavoitteena oli tutkia, mitä ongelmia tietomallintamiseen ja sen sisällyttämiseen osaksi rakennushanketta liittyy. Työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena, jossa pääasiallisina tieteellisinä lähteinä käytettiin vertaisarvioituja journali- ja konferenssiartikkeleita yhdistettynä käytännönläheisempään tietoon RT-korteista sekä kirjoista.

Tutkimus osoittaa, että tietomallintamisesta saatavat hyödyt kustannushallinnan näkökulmasta ovat merkittävät. Sen avulla on mahdollista tukea sekä suunnitteluprosessia, että hankkeen eri osapuolien päätöksentekoa ja tiedon välittymistä. Koska rakennushankkeen kustannukset määräytyvät pääosin hankkeen alkuvaiheessa, ovat nämä tekijät kriittisiä tarkkojen kustannusarvioiden ja -tavoitteiden tuottamisessa. Rakentamisvaiheen aikana tietomallintamisen tarjoamien työkalujen avulla voidaan tavanomaisia keinoja huomattavasti tehokkaammin valvoa, ohjata ja analysoida kustannusten kertymistä, jonka myötä kustannustavoitteisiin pääsy on varmempaa ja riskit voidaan minimoida. Tämä pätee myös rakennuksen käyttöönottoon sekä sen elinkaaren aikaisiin toimintoihin ja niiden ylläpitämiseen. Tutkimuksen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että mallintamiseen liittyy myös laajamittaisesti haasteita. Ne perustuvat pääosin hankkeen resurssien kulutukseen sekä teknologisten ratkaisujen osittaiseen vajavuuteen ja käyttöön liittyviin vaatimuksiin. Näiden haasteiden tutkiminen ja ratkaisujen löytäminen onkin tulevaisuudessa tärkeää, jotta tietomallintamisesta saatavat hyödyt saadaan rakennushankkeissa käyttöön vielä nykyistä laajemmassa mittakaavassa.

Avainsanat: Tietomalli, BIM, 5D, kustannushallinta

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet	1
1.2 Tutkimusalueen rajaus ja tutkimusmenetelmä	2
2. RAKENNUSTEN TIETOMALLIT	3
2.1 Määrittely	3
2.2 5D-tietomallit	3
3. TIETOMALLIEN HYÖDYNTÄMINEN KUSTANNUSTEN HALLINNASSA	6
3.1 Rakennushankkeen kustannushallinta yleisesti	6
3.2 Tietomallien hyödyntäminen kustannushallinnassa rakennushankkeen eri vaiheissa	7
3.3 5D-tietomallin tuottaminen ja sen käyttö rakennushankkeen kustannushallinnassa käytännössä	10
3.3.1 Aikatauludatan lisääminen 5D-tietomalliin	13
3.4 Ongelmat ja käytön rajallisuus	13
4. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	18
LÄHTEET	20

LYHENTEET

BIM	Rakennuksen tietomalli, Building Information Model tai rakennuksen tietomallintaminen, Building Information Modeling
5D-tietomalli	Rakennuksen tietomalli, johon sisältyy kustannukset
IFC	Tietomallinnuksen kansainvälinen tiedonsiirtoformaatti, Industry Foundation Classes
Objekti	Tietomallissa oleva yksittäinen osa, jolle voidaan antaa ominaisuuksia (Ratu KI-6033 2018)
CAD	Tietokonepohjainen suunnittelu, Computer-Aided Design
WBS	Yleisesti menetelmä, jonka avulla projektin osat jaetaan pienemmiksi osiksi, mallintamisessa koskee rakennusosien pilkkomista pienempiin osiin (Work Breakdown Structure)

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Lawrence et al. (2014) toteavat artikkelissaan tarkan ja oikea-aikaisen kustannustiedon tuottamisen olevan kriittinen osa rakennuksen suunnitteluvaiheen päätöksentekoa. Sepasgozarin et al. (2022) mukaan kustannusten ylittyminen on ollut kautta aikain yksi rakennustuotannon suurimpia riskejä, ja nykyaikaisia digitaalisia ratkaisuja voidaan käyttää laajalti sen ehkäisyyn erityisesti suunnitteluvaiheessa. Kustannushallinnan haasteet rakennushankkeissa vaikuttavat osaltaan myös rakentamisen tuottavuuteen. Rakennusalan tuottavuuskasvu on Suomessa ollut hyvin hidasta vuosien 2000–2017 välisenä aikana (Ahonen et al. 2020, s. 44). Tietomallinnusta hyödyntämällä on mahdollista nimenomaan kehittää työn tuottavuutta, joten osaltaan se tarjoaa ratkaisuja myös kyseiseen laajamittaisempaan ongelmaan.

Tutkimuksen tavoitteena on tutkia tietomallintamisen käytön hyötyjä ja mahdollisia ongelmia rakennushankkeen kustannushallinnassa. Tarkemmin tavoite on tutkia miten ja minkälaisia rakennuksen tietomalleja kustannushallinnassa voidaan hyödyntää rakennushankkeen eri vaiheissa, sekä mitä haittapuolia tällä mahdollisesti on.

Päättökysymys: Miten tietomallintamista voidaan hyödyntää rakennushankkeen kustannushallinnassa?

Edellisestä voidaan johtaa tutkimustyötä varten kolme eri tutkimuskysymystä:

- Mitä vaatimuksia tietomallille on, jotta sitä voidaan hyödyntää kustannushallinnassa?
- Miten tietomallia voidaan käyttää rakennushankkeen eri vaiheissa kustannushallinnan näkökulmasta?
- Mitä ongelmia tietomallinnukseen liittyy kustannushallinnan osalta?

Osaltaan näihin tutkimuskysymyksiin vastaaminen myös tuottaa tietoa siitä, miten suomalaiset rakennusyrietykset voivat hyötyä tietomallintamisesta omien rakennushankkeidensa kustannushallinnassa ja mihin tekijöihin sen sisällyttäminen hankkeessa muutoin vaikuttaa.

1.2 Tutkimusalueen rajaaminen ja tutkimusmenetelmä

Tutkimusalue on rajattu käsittelemään pääasiallisesti tietomallien käyttöä kustannushallinnassa, sillä niitä käytetään kokonaisuutena myös paljon muihin käyttötarkoituksiin, kuten suunnittelun, tuotannonhallinnan sekä aikatauluttamisen työkaluna. Tutkimusmenetelmänä toimii kvalitatiivisen tutkimuksen tekeminen teoreettiselta kannalta jo olemassa olevasta aineistosta, eli kyseessä on kirjallisuustutkimus.

Tärkeinä tieteellisinä lähteinä työssä käytetään journaali- ja konferenssiartikkeleita. Käytännönläheisempinä lähteinä taas käytetään Rakennustieto Oy:n laatimia julkaisuja, kuten RT-kortteja ja kirjoja.

2. RAKENNUSTEN TIETOMALLIT

2.1 Määrittely

Rakennuksen tietomallilla tarkoitetaan rakennuksen tai rakennusprosessin kokonaisuutta digitaalisessa muodossa, joka koostuu tila- ja rakennusosaobjekteista, niiden ominaisuuksista ja geometriasta (Ratu KI-6033 2018, s. 29). Yleisesti mallinnusta voidaan hyödyntää rakennushankkeen kaikissa vaiheissa, sillä tieto liikkuu vaiheesta toiseen mallin mukana (Popov et al. 2010). Sen päätavoitteina on tukea suunnittelua ja rakentamisen laatua, tehokkuutta, turvallisuutta ja kestävästä kehitystä rakennuksen hanke- ja elinkaari-prosessin aikana (RT 10-11072 2012, s. 2).

Tarkemmin tietomallien tavoitteena on toimia yhtenäisenä digitaalisena rakennuksen tietopankkina, jota eri rakennushankkeen sidosryhmät pystyvät päivittämään ja josta ne voivat saada ajantasaista tietoa missä hankkeen vaiheessa tahansa (Ha 2021). Tällä pyritään tukemaan päätöksentekoprosessia, sitouttamaan hankkeen eri osapuolet tavoitteisiin, havainnollistamaan suunnitteluratkaisuja, auttamaan suunnitteluprosessissa ja yhteensovittamisessa, parantamaan rakennusprosessin ja lopputuotteen laatua sekä turvallisuutta ja tehostamaan rakentamista yleisesti. Tietomallin toimivuuden saavuttamiseksi sille tulee asettaa hankekohtaiset painopistealueet ja tavoitteet. (RT 10-11072 2012, s. 2)

Tietomallien periaatteiden mukaisesti niille on olemassa useita eri ulottuvuuksia (Mesároš et al. 2018). Niistä tarkasti määritellyt ja yleisesti käytössä olevat ovat:

- 3D – Geometria
- 4D – Aikatauluhallinta
- 5D – Kustannushallinta

Ainoastaan kolmas ulottuvuus on tietomallissa graafisesti näkyvänä osana. 4D ja 5D ovat ei-graafisia, omilta osa-alueiltaan tietoa sisältäviä tietomallin osia. (Mesároš et al. 2018)

2.2 5D-tietomallit

5D-tietomallit yhdistävät kolmiulotteisen geometrian ja viidenennen ulottuvuuden, joiden avulla voidaan seurata hankkeen erilaisia tapahtumia ja niihin liittyviä kustannuksia. Tähän on mahdollista myös lisätä aikataulunhallintaominaisuuksia 4D-tietomallin muodossa, mutta on tärkeää huomata, että 5D- ja 4D-tietomallit eivät ole toisistaan

riippuvaisia. (Agostinelli et al. 2019) 5D-mallin avulla pystytään siis seuraamaan, miten materiaalien, pohjapiirrosten ja muiden rakennusosien muuttaminen vaikuttaa sekä ulkonäköön ja rakennusteknisiin ratkaisuihin että hankkeen kustannuksiin ja aikatauluihin. 5D-tietomalleja pystytään luomaan useilla ohjelmilla, kuten saksalaisen RIB Software AG:n iTWO-ohjelmalla, Trimble Navigation Ltd:n Vico Softwarella ja Autodeskin Navisworksilla. (Hakanen 2017, s. 30) Lee et al. (2016) tutkivat artikkeliaan varten 5D-tietomallintamista käytännössä CAD-mallintamiseen verrattuna. Kuvassa 1 esitetään kullekin 5D-tietomallinnusprosessin vaiheelle vaatimustaso, yhteentoimivuus ja tiedon tuoton laajuus sekä mahdolliset rajoitukset, joita 5D-mallintamisesta aiheutuu. Yhteentoimivuudella tarkoitetaan kahden tai useamman järjestelmän kykyä vaihtaa ja käyttää vaihdettua tietoa yhdessä.

Vaihe	Prosessi	Vertailuperuste	Havainto
1	Rakennustiedon kerääminen ja sisällyttäminen 3D-tietomalliin	Mallinnuksen vaatimustaso	Kohtalainen
		<u>Yhteentoimivuus</u>	Huono
		Tiedon tuotto	Hyvä
		Rajoitukset	Sidosryhmät, joilla ei ole tietomallinnusmahdollisuuksia, eivät pysty siirtymään vaiheeseen 2.
2	Tiedon lisääminen kustannusten tarkastelua varten	Mallinnuksen vaatimustaso	Matala
		<u>Yhteentoimivuus</u>	Kohtalainen
		Tiedon tuotto	Hyvä
		Rajoitukset	Toimittajat eivät pysty suoraan päivittämään kustannustietoja
3	Tiedon lisääminen aikataulutusta varten	Mallinnuksen vaatimustaso	Kohtalainen
		<u>Yhteentoimivuus</u>	Hyvä
		Tiedon tuotto	Hyvä
		Rajoitukset	Vaatii työmaatietämystä ja paikallista kokemusta realistisen tuloksen saavuttamiseksi
4	5D-tietomallinnuksen virtualisointi	Mallinnuksen vaatimustaso	Kohtalainen
		Yhteentoimivuus	Hyvä
		Tiedon tuotto	Hyvä
		Rajoitukset	Mallinnusprosessi hankaloituu suurilla tietomäärillä

Kuva 1. 5D-tietomallin tuottamisen käytännöllisyys 2D CAD-mallinnukseen verrattuna (perustuu lähteeseen Lee et al. 2016)

5D-tietomalleilla saavutetaan useita hyötyjä aiemmin mainitun lisäksi. Sen avulla voidaan luoda ja jakaa tietoa koko hankkeen elinkaaren ajan, ja välttyä tiedon ristiriidoilta, jatkuvalta uudelleen lisäämiseltä, menettämiseltä sekä kommunikaatio- ja käänkösongelmilta. Käyttäjä voi myös muokata tietoja materiaalien hintatason vaihteluiden mukaan missä tahansa hankkeen vaiheessa, sekä laskea tehokkaasti määriä aikataulun ja vaihtoehtoisten ratkaisujen määrittämiseksi 3D-mallin pohjalta. (Popov et al. 2010)

5D-tietomalleihin liittyy myös haasteita. Etenkin yritysjohton vakuuttaminen 5D-tietomallintamisen hyödyistä on todettu hankalaksi. Ne vaativat käyttäjiltä verrattain korkeatasoista teknologista osaamista, jonka kouluttaminen resursseja kuluttavaa. Kaikkia kustannuslaskentaan sisällytettäviä rakenneosia ei haastavuutensa takia mallinneta, ja väliaikaisten tilojen ja rakenteiden mallintaminen on usein puutteellista ja jopa mahdotonta. (Sattineni & Macdonald 2014)

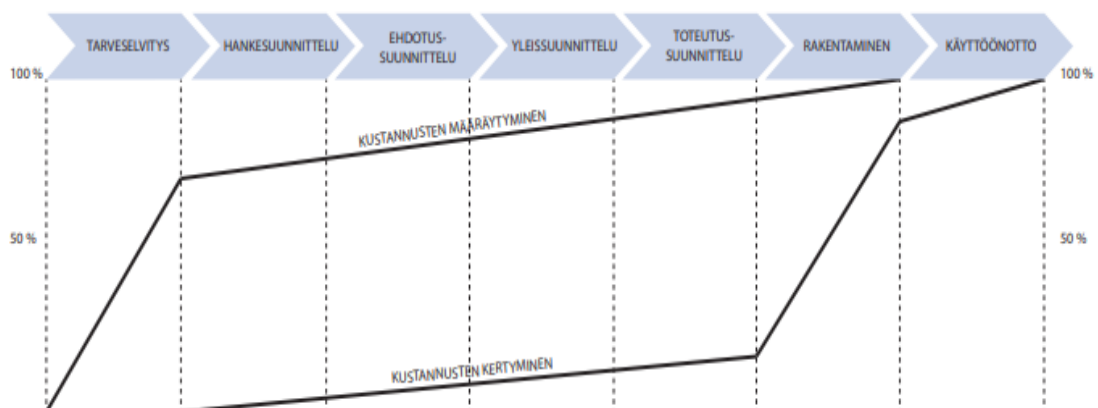
3. TIETOMALLIEN HYÖDYNTÄMINEN KUSTANNUSTEN HALLINNASSA

3.1 Rakennushankkeen kustannushallinta yleisesti

Suomalainen rakennushanke jaetaan seitsemään eri osaan (RT 10-11226 2016, s. 2):

1. tarveselvitys
2. hankesuunnittelu
3. ehdotussuunnittelu
4. yleissuunnittelu
5. toteutussuunnittelu
6. rakentaminen
7. käyttöönotto.

Yleisesti rakennushankkeen kustannukset sisältävät kaikki hankkeeseen liittyvät kustannukset, mukaan lukien työn, materiaalien ja työvälineiden lisäksi muun muassa myös kaikki viranomais- ja testikustannukset sekä verot (Ha 2021). Kuten kuvasta 2 nähdään, kustannusten määräytyminen ja näin myös arviointi alkaa jo hankkeen alkuvaiheessa ja jatkuu rakennusvaiheen loppuun saakka. Varsinainen kustannusten keräytyminen ja sitä kautta myös seuranta tapahtuu kuitenkin pääasiassa vasta rakennusvaiheessa.



Kuva 2. Kustannusten määräytyminen ja kertyminen rakennushankkeen aikana (RT 10-11226 2016, s. 1)

Rakennuskustannuksiin vaikuttavat useat eri tekijät. Alkuvaiheessa laadittavassa hankeohjelmassa määritellään rakennettava kohde ensimmäistä kertaa, ja tässä vaiheessa myös kohteen kustannukset siis määräytyvät alustavasti. Muita kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat olosuhteet, joihin kuuluvat erityisesti kaava- ja tonttiolosuhteet sekä markkinatilanne, suunnitteluratkaisut ja hintatekijät. Yhtenä suurena tekijänä ovat myös toteutus- ja tuotantoratkaisut, joista varsinkin hankkeen toteutusmuoto vaikuttaa merkittävästi kustannusten määräytymiseen ja jakautumiseen. (Ratu KI-6033 2018, s. 21)

3.2 Tietomallien hyödyntäminen kustannushallinnassa rakennushankkeen eri vaiheissa

Rakennustuotannon nykymuodot pyrkivät yhä tehokkaampaan budjetointiin, ja tietomallinnuksella pystytään tehostamaan kustannushallintaa visuaalisuuden, nopeuden ja tarkkuuden sekä laadunvarmistuksen yksinkertaisuuden ansiosta, jolloin resurssien kulutus voidaan optimoida (Raheem 2021). Tietomallintaminen on nykyisin laajalti käytössä etenkin suuremmissa rakennusyrityksissä tuotannon apuvälineenä. Niiden käyttäminen kustannushallinnassa vaatii kuitenkin toimintaprosessin ja työkalujen muutosta (Ratu KI-6033 2018, s. 31).

Tarveselvitys- ja hankesuunnitteluvaiheessa selvitetään hankkeelle tilantarpeet, rakennuttajan tavoitteet sekä mahdollisia ratkaisuvaihtoehtoja ja näiden kustannusvaikutuksia sekä määritellään hankkeelle kustannustavoite (RT 10-11226 2016, s. 2). Jo tässä vaiheessa tietomallinnusprosessin tarkalla dokumentaatiolla voidaan saavuttaa suuria hyötyjä. Yleisesti tietomallille ei vielä tässä vaiheessa mallinneta kolmiulotteista geometrista muotoa, vaan siihen sisällytetään vaatimusmalli. Se sisältää aina vähintään rakennuksen tilojen tai tilaryhmien erikoisvaatimukset, ja lisäksi siihen lisätään erilaisia rakennuskohtaisia tavoitteita. (RT 10-11066 2012, s. 6) Hankkeen tilaajan ja rakennuksen käyttäjän vaatimusten huomiointi on kustannushallinnan näkökulmasta erityisen tärkeää, jotta voidaan välttyä rakentamisen aikaisilta tilojen ja niiden käyttötarkoitusten muutoksilta, sillä ne aiheuttavat usein vaikeasti hallittavia kustannusmuutoksia. (Ratu KI-6033 2018, s. 21) Suunnitteluvaatimusten laajuudella ja dokumentaation tarkkuudella on suora vaikutus kustannustavoitteen luomiseen (Ha 2021). Tietomallintamisella voidaan laajamittaisesti tukea kustannustavoitteen asettamista, jotta tavoite itsessään olisi mahdollisimman luotettava. Hankesuunnitteluvaiheessa hankkeen kustannuksiin voi vaikuttaa kaikkein eniten (Ratu KI-6033 2018, s. 53). Siksi on tärkeää, että jo tässä vaiheessa vaatimusmallin dokumentaatio on mahdollisimman tarkkaa, jotta kustannuslaskentaa

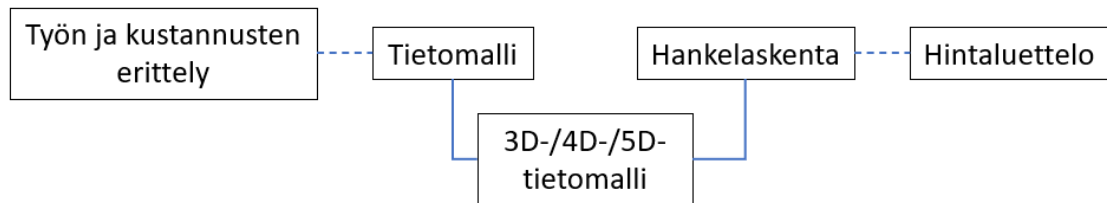
tekevä henkilöstö pystyy mahdollisimman tehokkaasti käyttämään sitä kustannusten arvioinnissa (Pang & Zheng 2021).

Ehdotussuunnitteluvaiheessa valittava ehdotussuunnitelma tehdään jatkosuunnittelun pohjaksi (RT 10-11226 2016, s. 3). Varsinainen 3D-tietomallintaminen alkaa tässä vaiheessa. (RT 10-11066 2012, s. 7). 3D-mallin avulla tehtävällä havainnollistamisella voidaan laajamittaisesti tukea rakennuttajan päätöksentekoa ja tukea osallistavaa suunnittelua (Pang & Zheng 2021). Suunnittelijat pystyvät ehdotussuunnitteluvaiheessa saamansa palautteen pohjalta tekemään tietomalliin nopeita muutoksia, ja 5D-tietomallia hyödyntämällä niiden vaikutukset hankkeen kustannuksiin voidaan nähdä suoraan ilman laajamittaisempaa kustannusten uudelleen laskemista. Erityisesti haastavampien rakennuksen ominaisuuksien, kuten energiatehokkuuden, päästöjen, valaistuksen ja ilmanvaihdon, mallintamisen avulla rakennuksen suorituskyvyn ja täten myös erilaisten kustannuslähteiden arviointi helpottuvat. Tällä voidaan edelleen tukea rakennuttajan päätöksentekoa ehdotussuunnitelman valinnassa. (Mesároš et al. 2018)

Yleissuunnitteluvaiheessa hyväksytään hankkeen yleissuunnitelma ja suunnittelijat tuottavat pääpiirustukset (RT 10-11226 2016, s. 4). Sen lisäksi, että tietomallissa rakennuttajan mahdollisesti suunnittelun aikana muuttuvien tavoitteiden mukaan tehtävä suunnitelmien muokkaaminen on monessa tapauksessa vähemmän resursseja kuluttavaa, ovat suunnitteluvaiheessa tietomallin avulla suunnittelijoiden tekemät piirustukset hankkeen kustannushallinnan kannalta pelkkiä tavallisia kaksiulotteisia tasopiirustuksia parempi ratkaisu. 3D-mallin törmäystarkasteluominaisuudet mahdollistavat rakenneosien yhteensopivuuden tarkastelun. Ilman sitä hankkeessa on riski suurillekin suunnitteluvirheille. Törmäystarkastelulla voidaan välttää rakennusvaiheessa tapahtuva kustannusten odottamaton nousu välttämättömien suunnitteluratkaisujen muutosten ja jopa rakenneosien purkamisen osalta rakennusvaiheen aikana. (Pang & Zheng 2021) Sama pätee myös rakenne- ja viimeistelyratkaisujen yhteensopivuuteen (Raheem 2021). Näihin äkillisiin muutoksiin ei voida muutoin varautua, ja ne lisäävät suunnittelu- ja tuotantokustannuksia sekä aikataulumuutosten aiheuttamia kustannuksia (Ha 2021).

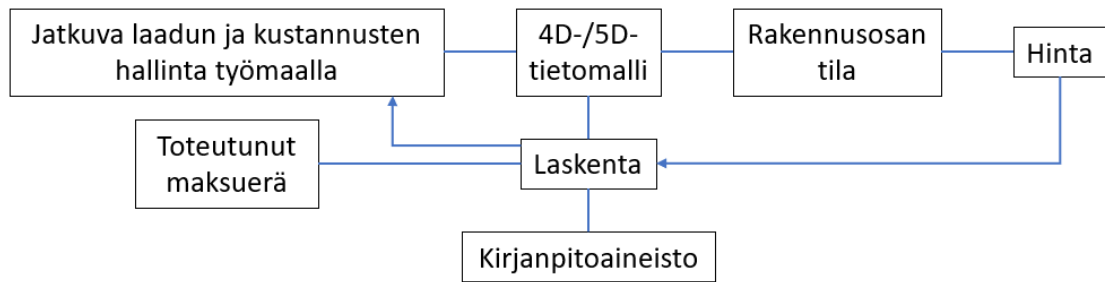
Toteutussuunnitteluvaiheessa hankkeen kustannuksiin vaikuttavat tuotantotekniikkaan ja työmenetelmiin liittyvät ratkaisut (RT 10-11226 2016, s. 4). Pangin ja Zhengin (2021) mukaan tietomallin mahdollistaman simulaation avulla voidaan helpottaa tuotantoteknisten ratkaisujen valintaa, suunnitella työmenetelmiä ja realisoida eri rakennusvaiheita, jolloin huonosti organisoitujen ratkaisujen aiheuttama hukka voidaan minimoida. Hankintojen suunnitteluun kuluvia resursseja voidaan vähentää käyttämällä tietomallista saatavia objektiokohtaisia tietoja. Paino-, tilavuus- ja pinta-alatietojen helppo

saatavuus mallista nopeuttaa tuotantotietojen tarkentamista merkittävästi. (Korhonen 2021, s. 51) Oikein luokiteltuna tietomallista saatava määrätieto vähentää myös päällekkäisyyksien ja puutteiden riskiä etenkin mahdollisissa suunnitelumuutoksissa (Pang & Zheng 2021). Kuvassa 3 on havainnollistettu toteutussuunnitteluvaiheen osia. Tavanomaisessa ilman tietomallia tehtävässä hankkeessa siirrytään suoraan työn ja kustannusten erittelystä hankelaskentaan, ja tällöin edellä mainitut tietomallinnuksen avulla saavutettavat hyödyt jäävät saavuttamatta.



Kuva 3. Tietomalli toteutussuunnitteluvaiheessa (perustuu lähteeseen Agostinelli et al. 2019)

Kuten aiemmin todettiin, kustannusten keräytyminen ja varsinainen seuranta alkavat vasta rakentamisvaiheessa. Rakentamisvaiheen aikaiseen kustannushallintaan kuuluvat tavoitteen asettaminen, yksittäisten hankintojen ja tehtävien suunnittelu eli tehtäväsuunnittelu, hankkeen kulun valvonta ja ennustaminen, tavoitteen mukainen ohjaaminen sekä loppuselvitykset ja jälkilaskenta (Ratu KI-6033 2018, s. 80). Suuri osa rakentamisvaiheessa realisoituvista tietomallintamisen hyödyistä tehdään jo toteutussuunnitteluvaiheessa. Tietomallintamisella voidaan kuitenkin rakentamisvaiheessakin helpottaa rakennustyömaan henkilöstön ja suunnittelijoiden yhteistyötä, vähentää tuotantoon kuluva aikaa ja kustannuksia sekä yksinkertaistaa rakennustyön valvomista (Raheem 2021). Kuvan 4 kaaviolla kuvataan rakennusvaiheen aikaista kiertokulkua, jossa osa rakennusosista ja -vaiheista saavuttavaa kustannusten näkökulmasta lopputilansa, eli kyseiseen osaan tai vaiheeseen liittyvä maksuerä toteutuu, ja tämän seurauksena se irtautuu kustannushallinnasta. Kokonaisuuden kannalta nämä rakentamisvaiheen eri osat ja vaiheet jatkavat kiertoa niin kauan, kunnes jokainen niistä on valmis rakennusvaiheen päättyessä. Kun tietomallia päivitetään hankkeen etenemisen mukana jatkuvasti, helpottuu rakentamisen ja sen aikaisten kustannusten seuranta huomattavasti. (Agostinelli et al. 2019)



Kuva 4. Tietomalli rakentamisvaiheessa (perustuu lähteeseen Agostinelli et al. 2019)

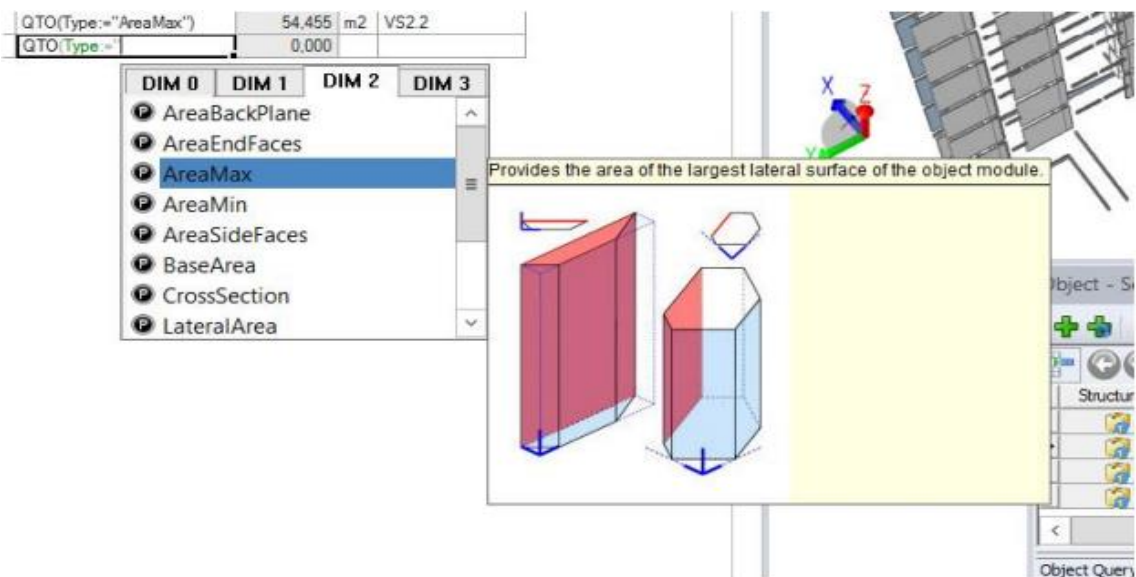
Käyttöönottovaiheessa ja rakennuksen elinkaaren aikana aiemmissa vaiheissa kootulla ja käytetyllä tietomallilla voidaan edelleen saavuttaa huomattavia etuja. Simulaatioiden ja analysoinnin avulla voidaan tehostaa rakennuksen hallintaa ja hallinnointia sekä tehokkaasti suunnitella rakennuksen elinkaaren aikaisia toimintoja (Raheem 2021). Kustannushallinnan kannalta saatava hyöty perustuu edellä mainittujen asioiden resurssien kulutuksen pienenemiseen tietomallintamisen ansiosta. Lisäksi mallintamisella voidaan yksinkertaistaa lopullisten kustannusten sekä yleisesti muun, esimerkiksi viranomaisia varten tarvittavan dokumentoinnin esittämistä (Ha 2021). Rakennuksen elinkaareissa tietomallintamisen avulla jo suunnitteluvaiheessa tehdyt rakenneratkaisut ja materiaalivalinnat voivat myös helpottaa rakennuksen huoltamista ja pidentää huoltovälejä (Mesároš et al. 2018).

3.3 5D-tietomallin tuottaminen ja sen käyttö rakennushankkeen kustannushallinnassa käytännössä

Siitä huolimatta, että 5D-tietomallintamiseen on käytössä useita eri ohjelmia, ovat pääasialliset mallintamisen vaiheet kaikissa pääasiallisesti käytössä olevissa ohjelmissa samat. Kuten aiemmin mainittiin, hankkeen alkuvaiheessa toteutetaan vaatimusmalli, josta saadaan tilakohtaiset tiedot ja erikoisvaatimukset. Leen et al. (2016) mukaan tämän jälkeen data kerätään ja sisällytetään 3D-tietomalliin, jonka jälkeen 3D-malli tarkastetaan ja viedään 5D-mallintamiseen soveltuvaan ohjelmaan, jossa voidaan toteuttaa rakennusosien määrien, kokojen ja muiden ominaisuuksien määrittäminen. Määrälaskennasta saatavien tietojen avulla ohjelmaan voidaan lisätä rakennusosille tarvittavat kustannustiedot. Tämän jälkeen ohjelmaan voidaan lisätä rakennusosa- ja vaihekohtainen aikatauludata, vaikkei tämä olekaan 5D-mallintamisen kannalta pakollista. Viimeisessä vaiheessa voidaan myös toteuttaa hankkeen virtualisointi animoinnin tai aikajanan muodossa, jonka jälkeen mallissa on tarvittava tieto sekä kustannushallintaa että suunnittelun- ja rakennustyön ohjaamista, hallintaa ja havainnollistamista varten.

Tietomallikoordinaattori laatii hankkeen alkuvaiheessa tietomallintamisen tavoitteet ja selvittää lähtötietojen saatavuuden. Uudiskohteissa luodaan 3D-tietomalli rakennuspaikasta, korjausrakennuskohteissa taas mallinnetaan olemassa oleva rakennus tai rakennukset eli luodaan inventointimalli. Ehdotussuunnitteluvaiheessa arkkitehti tekee lähtötietojen perusteella 3D-tilamallin, ja rakennesuunnittelija arkkitehtimallin perusteella tämän jälkeen 3D-rakennusosamallin. (RT 10-11066 2012, s. 7) 3D-mallintamiseen on käytössä omat ohjelmistonsa, kuten Trimble Solutions Oy:n Tekla Structures ja Autodeskin Revit. Agostinelli et al. (2019) toteavat artikkelissaan, että 3D-mallien rakenneosien mallinnuksen oikeellisuuden, täydellisyyden ja yhdenmukaisuuden tarkastaminen on tärkeää, jotta niiden käyttö on seuraavissa mallinnuksen vaiheissa mahdollisimman tehokasta ja virheetöntä. Lisäksi 3D-mallin rakennusosille tulee mallia tehtäessä luoda yksilölliset tunnuksensa (Popov et al. 2010). Näin elementin tunnistaminen helpottuu mallintamisprosessin aikana.

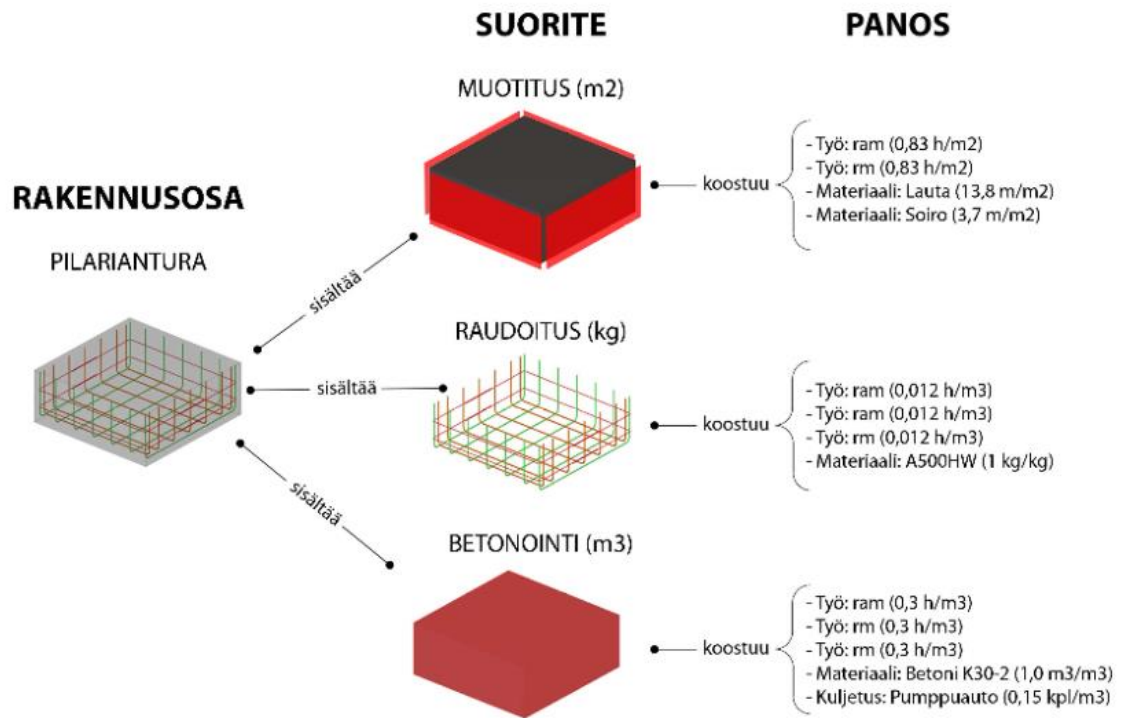
3D-tietomalli siirretään kansainvälisesti käytössä olevassa IFC-muodossa 5D-tietomallinnusohjelmaan, joka tavallisesti muuttaa mallin ohjelman itsensä käyttämään tiedostomuotoon (Hakanen 2017, s. 47). 5D-ohjelmalla pystytään tämän jälkeen automaattisesti määrittämään lähes kaikkien rakennusosien määrät ja tyypit, ja edelleen esimerkiksi dimensiotiedot yksittäisistä rakennusosaobjekteista kuten kuvassa 5 (Popov et al. 2010).



Kuva 5. Esimerkki dimensiotietojen poiminnasta yksittäisestä rakennusosasta iTWO-tietomallinnusohjelmassa (Hakanen 2017, s. 49)

Tehdyn määrälaskennan perusteella saatuihin rakennusosaobjekteihin voidaan linkittää kustannustieto. Teittisen (2009, s. 6) mukaan rakennusosa sisältää suoritteita, jotka taas

koostuvat panoksista. Panokset sisältävät suoritekohtaiset työ- ja materiaalimenekit, joiden perusteella suoritteille on mahdollista määrittää kustannukset. Tällaista jaottelua kutsutaan yleisemmin WBS:äksi (Liu et al. 2014). Rakennusosien, suoritteiden ja panosten kokonaisuus eli tuoterakenteet on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Tuoterakenteet (Teittinen 2009, s. 6)

Tässä voidaan hyödyntää esimerkiksi Talo 2000-tuotantonimikkeistöä (Hakanen 2017, s. 50). Kuvassa 7 on esitetty esimerkki siitä, minkälaisia tietoja yksittäisen rakennusosaobjektin tulisi sisältää. Siinä nähdään valittuna väliseinäobjekti, josta on listattuna ja eriteltynä työ- ja materiaalimenekit, sekä oikeassa laidassa rakennusosan numero. Suorite- ja panoskohtaiset kustannukset on peitetty, koska ne perustuvat lähteessä rakennusyhtiön omaan tuotantonimikkeistöön.

Subi...	...	Code	Description	Quantity	UoM	Quantity F...	Costs/Unit	CUR	Internal Quantity	WC No.
1			Väliseinä sisäinen. EK+metalliranka 66+EK	1,0	m ²	1,0		EUR	1,0	7411
		107110	Kirvesmies	0,5	h	1,0		EUR	0,5	
		202493	Levytyön entitelemätön ainekustannus	0,8	erä	1,0		EUR	0,8	
2			Kipsilevy EK 13mm	1,0	m ²	1,0		EUR	1,0	7412
		202612	Kipsilevy 13 mm EK	2,0	m ²	1,1		EUR	2,2	
3			Metalliranka+kisko 66	1,0	m ²	1,0		EUR	1,0	7412
		202415	Mitallistettu sahatavara 48x97mm	2,5	jm	1,1		EUR	2,8	

Kuva 7. Esimerkki yksittäisen rakennusosan työ- ja materiaalikohtaisista kustannustiedoista (Hakanen 2017, s. 49)

Näiden tietojen avulla rakennusosat voidaan liittää hankkeen kustannusarvioon. Tämä mahdollistaa sekä 3D-mallin mukaisten rakennusosaobjektien tuotantokustannusten, että koko hankkeen kustannusarvion määrittämisen (Popov et al. 2010).

3.3.1 Aikatauludatan lisääminen 5D-tietomalliin

5D-tietomalliin voidaan lisätä aikatauludata, jolloin siihen saadaan myös 4D-ominaisuudet. Tämä ei kuitenkaan ole mahdollista läheskään kaikissa 5D-mallinnusohjelmissa (Vigneault et al. 2020). Aikatauludatan lisääminen malliin voidaan tehdä joko ulkoisen aikatauluohjelman kautta tai manuaalisesti 5D-ohjelman sisällä, jossa aikatauluja voi tarvittaessa muokata myöhemmissä vaiheissa. Aikataulu liitetään tämän jälkeen jokaiseen rakennusosaobjektiin. (Lee et al. 2016) Popovin et al. (2010) mukaan aikatauludatan lisäämisen pohjalta voidaan 5D-ohjelmassa tuottaa simulaatio hankkeen toteutuksesta, tarkastella eri rakentamisen vaiheita ja niiden järjestystä sekä määrittää epäjohdonmukaisuuksia. Lisäksi 5D-malliin voidaan lisätä tietoja rahoituksesta, kuten esimerkiksi tilaajan maksutapahtumista, sekä toimituksista. Näitä tietoja voidaan käyttää budjetin ja kassavirtojen määrittämiseen ja seurantaan, joka on avainasemassa hankkeen kustannushallinnassa. Simulaation avulla voidaan myös arvioida tuotantoteknisiä ratkaisuja (Pang & Zheng 2021). Kokonaisuudessaan aiemmin mainituilla toiminnoilla voidaan 5D-ohjelman sisällä hallita ja seurata sekä koko hankkeen että yksittäisten prosessien ja kassavirtojen kulkua sekä määrittää vaadittava henkilöstö- ja kalustokapasiteetti eri vaiheisiin.

Hankkeen tuotantovaiheen aikana 5D-ohjelmalla voidaan 4D-ominaisuuksien kanssa yhdessä tuottaa tietoa asennetuista ja laskutetuista määristä joko rakennusosakohtaisella tai prosentuaalisella seurannalla. Lisäksi 5D-ohjelmat pystyvät 4D-ominaisuuksien kautta suoraan ilmoittamaan, mitkä vaiheet tulisi toteuttaa tiettyyn aikaan mennessä ja mitkä vaiheet ovat mahdollisesti jääneet toteuttamatta. (Hakanen 2017, s. 53) Tämä vaatii luonnollisesti kuitenkin mallin aktiivista päivittämistä ja tuotannon jatkuvaa seuranta ja valvontaa työmaatoimihenkilöstön toimesta. Tämä vaatii paljon resursseja, eivätkä 4D-ominaisuuksista saatavat hyödyt välttämättä ole riittävän suuret, jotta sitä kannattaisi kaikissa hankkeissa käyttää.

3.4 Ongelmat ja käytön rajallisuus

Vaikka tietomallintamisella on tarjota valtavasti hyötyjä rakennushankkeen kustannushallinnan näkökulmasta, liittyy sen käyttämiseen myös ongelmia. Liu et al. (2014) toteavat artikkelissaan, että etenkin automatisoidun WBS:n saavuttamiseksi tietomallintamisen avulla joudutaan vielä tekemään huomattavasti tutkimustyötä. Tämän lisäksi yleisesti havaitut ongelmat liittyvät joko mallintamisen tarkkuuteen, väliaikaisten ja haastavien rakenteiden mallintamiseen, mallintamisen käyttöönoton ja käyttämisen viemiin resursseihin sekä tarpeeksi kattavan mallinnusohjelman löytämiseen.

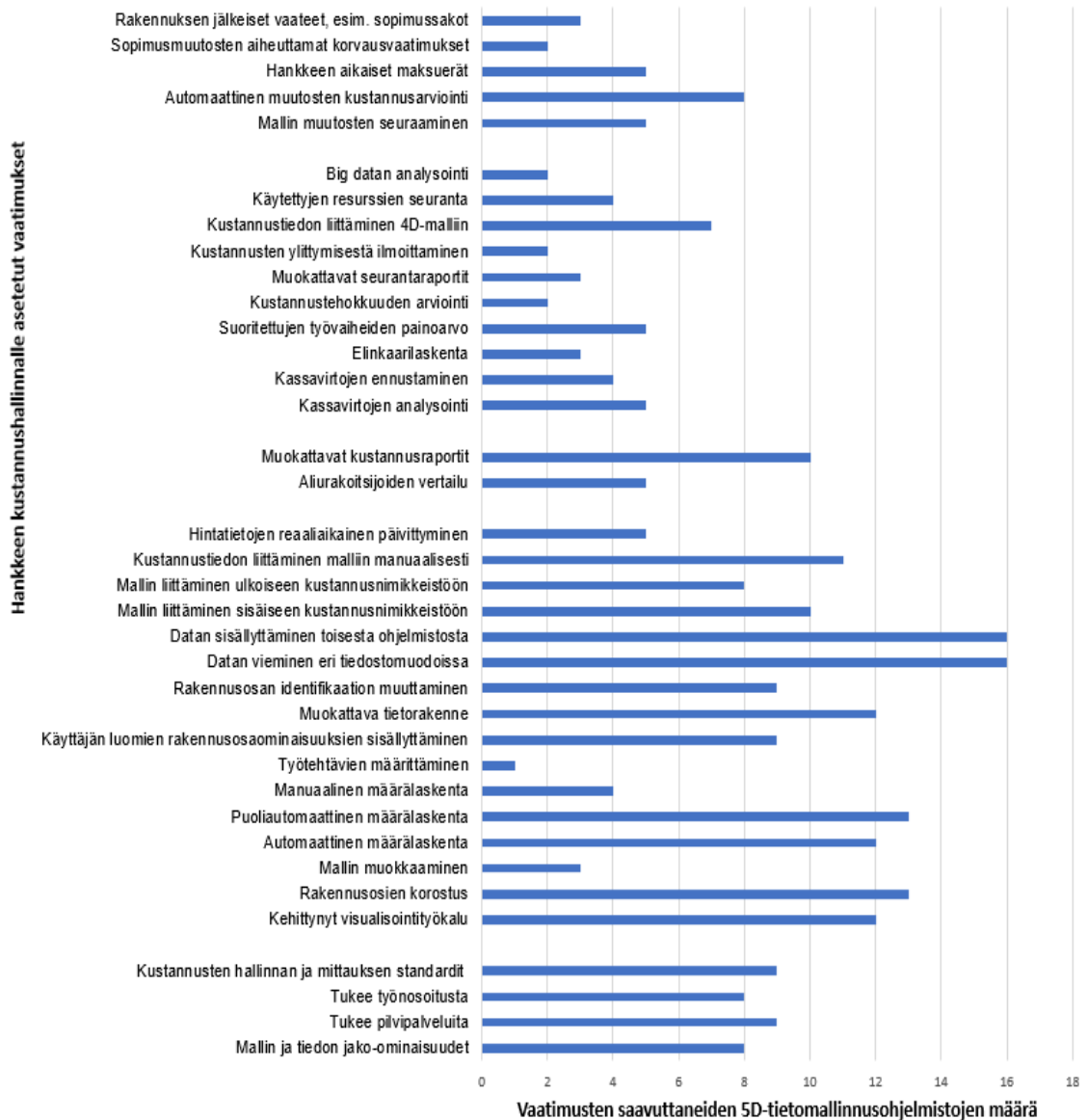
Kuten aiemmin todettiin, tietomallikoordinaattorin tehtävänä on hankkeen alkuvaiheessa laatia tietomallintamisen tavoitteet, ja samalla varmistaa mallintamiselle riittävä aika sekä täsmentää kohteen erityisvaatimukset (RT 10-11066 2012, s. 6). Joskus lähtötiedot eivät kuitenkaan ole syystä tai toisesta riittävät. Raheemin (2021) mukaan ongelmia aiheuttaa erityisesti, mikäli hankkeen alkuvaiheen sopimusten dokumentointi on puutteellista. Leen et al. (2016) mukaan 2D CAD-kuvien sisältämän tiedon sisällyttämisen tarkkuudella 3D-tietomalliin on selvä vaikutus sen käytettävyyteen, sillä 2D-kuvat sisältävät usein tärkeitä kohdekohtaisia tietoja, kuten moduuli- ja rajalinjoja. Puuttuvan informaation ja mallintamisen ohjauksen aiheuttamat epätarkkuudet ja vajavaisuudet tietomallissa taas johtavat vielä huomattavasti laajempiin ongelmiin esimerkiksi määrälaskennassa. Toisaalta kyseisiä ongelmia aiheuttaa joka tapauksessa, vaikka mallinnusprosessi olisikin toteutettu oikein, sillä kaikkien rakennusosien ja täten suoritteiden sekä panosten mallintaminen ei ole käytännössä järkevää. Erityisiä ongelmakohtia ovat monimuotoiset katot, portaiden komponentit, verhoseinät, lattia- ja seinäpinnat, listoitukset sekä muut vastaavat mallintamiselle hyötyihin nähden liian työläät rakennusosat. Monesti niiden määrät voidaan tietomallin perusteella silti määrittämään, mutta aina niistä ei välttämättä saada tietomallin kautta mitään määrälaskentaan tarvittavaa tietoa. (RT 10-11072 2012, s. 7) Tämän takia määrälaskentaa joudutaan käytännössä aina tukemaan muilla suunnitteludokumenteilla (Ratu KI-6033 2018, s. 31). Tietynlaisissa rakenteissa taas on riskinä, että vaikka tietomalli pystyy näennäisesti tuottamaan tarvittavat määrätiedot, eivät ne kuitenkaan vastaa todellisuutta. Liu et al. (2014) käyttävät artikkelissaan esimerkkiä, jossa määrälaskentaohjelma määrittää valuharkkoseinän vaatiman betonimäärän koko seinän tilavuuden perusteella, vaikka todellisuudessa määrä on harkkojen viemän tilavuuden vaikutuksesta huomattavasti pienempi.

Väli aikaisten rakenteiden mallintaminen 3D-malliin on niin ikään monissa tapauksissa haasteellista tai jopa mahdotonta. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi muottien ja telineiden määrät joudutaan edelleen määrittämään manuaalisesti. Mikäli tämä olisi kuitenkin muutoin mahdollista, vaatii väli aikaisten rakenteiden sekä tilojen mallintaminen usein laajaa ymmärrystä itse rakennusprosessista. (Liu et al. 2014)

Sattineni ja Macdonald (2014) toteavat Yhdysvaltalaiselle Hoar Constructionille tehdyssä tutkimuksessa yritysjohton asenteiden ja yrityksen henkilöstön muutosvastaisuuden yhdeksi suureksi ongelmaksi 5D-tietomallintamisen käyttöönotossa. Kuten edellisen kappaleen perusteella voidaan todeta, on 5D-tietomallin luominen ja käyttäminen osaltaan aikaa vievää ja vaatii käyttäjältä sekä teknologista osaamista että ymmärrystä rakentamisen eri prosesseista. Tietomallin käyttäjien koulutus kuluttaa yrityksen resursseja, ja työntekijät saattavat jopa kieltäytyä tai olla haluttomia opettelemaan

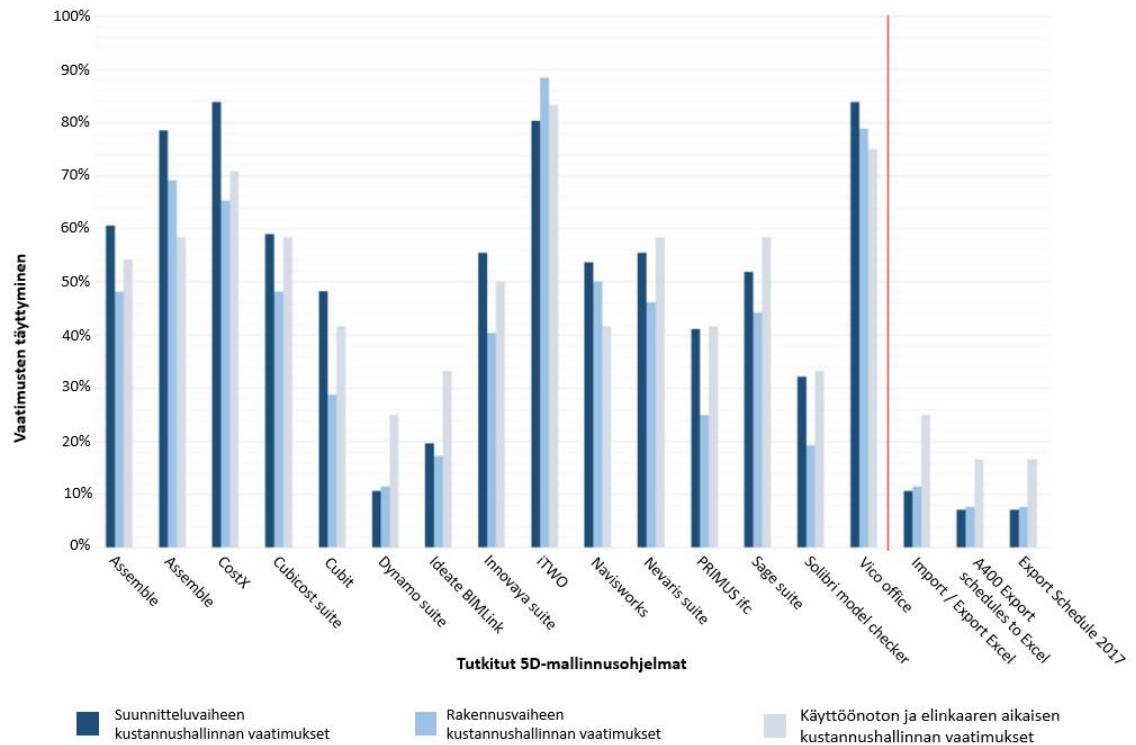
tietomallien käyttöä (Raheem 2021). Tämä on osaltaan ymmärrettävää, sillä mallintamisen opetteluun käytetty aika on pois muista työtehtävistä, jotka monissa tapauksissa tulee toteuttaa joka tapauksessa. Ilman mallintamista toteutettaviin hankkeisiin verrattuna mallintaminen siis sitoo avainhenkilöstä sen onnistumiseksi, ja etenkin käyttöönottovaiheessa tämä saattaa luoda yritykselle haasteita kannattavuuden kanssa (Hakanen 2017, s. 30). Näistä syistä yritysjohdon vakuuttaminen 5D-tietomallintamisen käyttöönotosta voi olla hankalaa, etenkin mikäli kaikki sen avulla saavutettavat hyödyt eivät ole kokonaisuudessaan tiedossa. (Sattineni & Macdonald 2014) On myös merkittävää huomata, että 5D-mallintaminen saattaa aiheuttaa etenkin tiedonkulkuun liittyviä vaikeuksia niille hankkeeseen liittyville sidosryhmille, jotka eivät kykene tietomallintamiseen, eivätkä ne ainakaan saa samoja hyötyjä mallinnuksesta. (Hakanen 2017, s. 28) Vaikka nämä sidosryhmät hyötyvätkin yleisesti tietomallintamisesta hankkeessa erityisesti suunnitteluvirheiden riskien vähenemisen myötä, haasteita voi syntyä erityisesti rakennusvaiheen aikana, mikäli tietomallien lukemiseen ja analysointiin ei ole mahdollisuuksia.

Yksi merkittävimpiä haasteita 5D-tietomallintamisen hyödyntämisessä rakennushankkeessa on niin sanotusti kaiken kattavan ohjelmiston löytäminen. Sattineni ja Macdonald (2014) kirjoittavat artikkelissaan, ettei markkinoilla ole toistaiseksi sellaista 5D-mallinnusohjelmaa, jolla kaikki tietomallintamisen mahdollistamat hyödyt saataisiin käyttöön. Vigneault et al. (2020) käsittelevät artikkelissaan laajamittaisesti eri 5D-mallinnusohjelmien ominaisuuksia. Kuvassa 8 esitetään tutkimukselle asetetut kustannushallinnan kannalta vaadittavat kriittiset ominaisuudet ja vaatimusten täyttäneiden ohjelmistojen määrä. Erityisen huomionarvoista on, että pääasiassa ohjelmistot ovat keskittyneet mallien tarkasteluun käytettäviin ominaisuuksiin sekä määrälaskentaan. Tarkempien kustannushallintatietojen, kuten kassavirtojen, hintatietojen ja maksuerien seuraaminen ei ole mahdollista suurella osalla 5D-mallinnusohjelmia. Kuvasta käy toteen myös aiemmin tehty toteamus siitä, ettei läheskään kaikkiin 5D-mallinnusohjelmiin ole mahdollista liittää 4D-ominaisuuksia.



Kuva 8. Hankkeen kustannushallinnalle asetetut vaatimukset ja vaatimusten saavuttaneiden ohjelmistojen määrä (perustuu lähteeseen Vigneault et al. 2020)

Kuvassa 9 esitetään ohjelmistoittain vaatimusten täytyminen. Kuvassa näkyvät kolme viimeistä ratkaisua ovat kaikki Excel-pohjaisia tietomallin sijaan, ja ne on lisätty vertailun vuoksi.



Kuva 9. Kustannushallinnan vaatimusten täytyminen 5D-tietomallinnusohjelmilla (perustuu lähteeseen Vigneault et al. 2020)

Kuvaajista voidaan todeta, ettei yksikään mallinnusohjelmista tosiaankaan pysty vastaamaan kaikkiin hankkeen vaihekohtaisiin kustannushallinnan vaatimuksiin. Suunnittelu- sekä käyttöönotto- ja elinkaarivaiheen kustannushallintaan vaadittavat ominaisuudet täytyvät ohjelmistoilla rakennusvaiheessa vaadittavia ominaisuuksia paremmin. Tämä johtuu siitä, että rakennusvaiheessa hyödylliset ominaisuudet perustuvat suurilta osin reaaliaikaiseen kustannusten seurantaan ja simulointiominaisuuksiin. Suunnitteluvaiheessa kustannushallinnan kannalta tärkeimmäksi ominaisuudeksi voidaan nähdä määrälaskenta, käyttöönotossa ja elinkaaren aikana taas datan ja dokumentaation poimimiseen ja siirtämiseen liittyvät ominaisuudet. (Vigneault et al. 2020) Lähimmäksi kaikkien ominaisuuksien täyttymistä pääsevät aiemminkin mainitut Trimble Navigation Ltd:n Vico Office ja RIB Software AG:n iTWO. Vigneault et al (2020) toteavat yli 80 % vaatimuksista kaikissa kolmessa hankkeen vaiheessa täyttäneen iTWO-ohjelman kuitenkin parhaaksi artikkelin julkaisuhetkellä markkinoilla olleeksi vaihtoehdoksi.

4. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Rakennushankkeen kustannukset määräytyvät pääosin jo hankkeen suunnitteluvaiheessa. Hankkeen aikana tapahtuvat muutokset sekä hankkeessa itsessään että ulkopuolisissa tekijöissä, kuten hintatasossa ja saatavuudessa, vaikuttavat kuitenkin lopullisiin kustannuksiin myös merkittävästi. Tämän takia sekä mahdollisimman tarkat kustannusarviot hankkeen alkuvaiheessa että kustannustiedon seuranta, dokumentointi ja analysointi hankkeen aikana ovat kriittisiä tekijöitä kustannusten ylittymisen välttämiseksi.

3D-mallintaminen tukee rakennushankkeen kustannushallintaa omalta osaltaan erityisesti geometristen ominaisuuksien analysoinnin ja havainnollistamisen ansiosta. Tutkimustulosten perusteella voidaan todeta, että näiden ominaisuuksien avulla urakoitsijan ja rakennuttajan päätöksentekoa sekä suunnittelua tukemalla voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä hankkeen aikana, sillä ne mahdollistavat etenkin rakennusaikaisten yllättävien kustannusten välttämisen. 3D-mallintamisen voi nähdä olevan välttämätön osa nykyaikaisia rakennushankkeita, sillä sen avulla saatavilla hyödyillä voidaan käytännössä aina vähentää rakennushankkeeseen kuluvia resursseja kaikissa sen vaiheissa.

5D-tietomallissa yhdistyvät rakennushankkeen graafiset ominaisuudet ja niihin liittyvä kustannustieto. Tutkimus osoittaa, että sen avulla tehtävä määrälaskenta on itsessään vaivattomampaa ja luotettavampaa kuin tavanomaisessa, ilman tietomallintamista tehtävässä hankkeessa. Muutosten kustannusvaikutusten seuranta ja sen tukema päätöksenteko, tiedonsiirron helppous ja yleisesti koko hankkeen seuranta yhtenä kokonaisuutena koko sen elinkaaren ajan osoittautuivat 5D-mallintamisen tärkeimmiksi hyödyiksi rakennushankkeen kustannushallinnan kannalta. Lisäämällä 4D-ominaisuudet 5D-malliin saadaan edelleen tehostettua näitä ominaisuuksia. Tässä tulee kuitenkin ottaa huomioon, että tarvittavan tiedon kokoaminen 5D-tietomalliin on työlästä ja vaatii näin merkittävän määrän resursseja. Tehokas 5D-mallintamisen käyttö rakennushankkeessa vaatii laajaa teknologista osaamista ja saumatonta yhteistyötä hankkeen eri osapuolien kesken. 5D-ohjelmistot itsessään vaativat vielä myös kehittämistä, jotta kustannushallinnan kannalta oleellimmat tekijät rakennushankkeessa voidaan kattaa mahdollisimman laaja-alaisesti.

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että tietomallintaminen kokonaisuudessaan on tärkeä osa rakennushanketta. Sen avulla voidaan parantaa useita hankkeen aikaisia

kustannushallintaan liittyviä prosesseja, ja mallintamisen mahdollistama automatisaatio esimerkiksi määrälaskennassa tuottaa lisää mahdollisuuksia vaihtoehtojen vertailuun. Vaikka etenkin 5D-tietomallintaminen sisältää suuriakin haasteita, rakentamisen digitaalisten ratkaisujen jatkuvan kehityksen ansiosta sen voi nähdä olevan tulevaisuudessa yhä enemmän käytetty ratkaisu helpottamaan rakennushankkeen kustannushallintaa.

Tutkimuksen aihe oli osittain haastava, sillä tarkempaa tietoa aiheesta löytyi pääasiassa englanninkielisistä, muissa maissa julkaistuista konferenssiartikkeleista. Tämän tiedon suhteuttaminen yhdessä RT-korttien ja -kirjojen sisältämään, suomalaiseen rakennushankkeeseen tarkoitettuun yleisempään tietoon kustannushallinnasta ja tietomallintamisesta oli hankalaa etenkin, kun suomalaiset lähteet olivat osittain melko vanhoja aiheeseen nähden. Tutkimuksessa onnistuttiin kuitenkin vastaamaan alussa asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Tutkimuksen aihe on tärkeä sekä Suomessa että globaalisti, ja jatkotutkimus voisi olla aiheellista etenkin siitä, millä tavoin 5D-tietomallintaminen saataisiin sisällytettyä osaksi rakennushanketta käyttämättä suuria määriä hankkeen resursseja.

LÄHTEET

- Agostinelli, S., Cinquepalmi, F. & Ruperto, F. (2020). 5D BIM: Tools and methods for digital project construction management. Building Information Modelling (BIM) in design, construction and operations III, pp. 205–215. Saatavissa: https://web-s-ebSCOhost-com.libproxy.tuni.fi/ehost/ebookviewer/ebook/ZTAwMHh3d19fMjMyNjYyOV9fQU41?sid=48597ce5-8049-4b44-b495-d7b3e2a2b7ae@redis&vid=0&format=EB&lpid=lp_205&rid=0
- Ahonen, A., Junnonen, J.-M., Puhto, J., Ali-Yrkkö, J., Avela, A., Kulvik, M., Kuusi, T. & Mäkäräinen, K. (2020). Rakennusalan kilpailukyky ja rakentamisen laatu Suomessa, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja, Valtioneuvoston kanslia. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-926-4>
- Ha, I. (2021). The application of BIM to project cost management. E3S Web of Conferences 253. Saatavissa: https://www.e3s-confer-en-ces.org/articles/e3sconf/abs/2021/29/e3sconf_eem2021_02039/e3sconf_eem2021_02039.html
- Hakanen, L. (2017). Classification of cost data and its use in 5D building information modelling. Diplomityö. Tampereen yliopisto, Rakennetun ympäristön tiedekunta. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/24720>
- Korhonen, J. (2021). BIM:n hyödyntäminen hankintapaketin kustannusten hallinnassa: Runkohankinnan näkökulmasta. Diplomityö. Tampereen yliopisto, Rakennetun ympäristön tiedekunta. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/125208>
- Lawrence, M., Pottinger, R., Staub-French, S. & Nepal, M. (2014). Creating flexible mappings between Building Information Models and cost information. Automation in Construction. Vol. 45, pp. 107–118. Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.lib-proxy.tuni.fi/science/article/pii/S0926580514001174>
- Lee, X.S., Tsong, W. & Khamidi, M.F. (2016). 5D Building Information Modelling – A practicability review. MATEC Web of Conferences. Vol. 66, pp. 2–7. Saatavissa: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2016/29/matecconf_ibcc2016_00026/matecconf_ibcc2016_00026.html

Liu, H., Lu, M. & Al-Hussein, M. (2014). BIM-based integrated framework for detailed cost estimation and schedule planning of construction projects. 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2014), IAARC. Saatavissa: <https://www-proquest-com.libproxy.tuni.fi/docview/1565842504?pq-origsite=primo&accountid=14242>

Mesároš, P., Smetanková, J., Krajníková, K. & Mandičák, T. (2018). Cost management of sustainable buildings through BIM Technology. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. Vol. 18, Iss. 6.4., pp. 349–355. Saatavissa: <https://www.prquest.com/docview/2220307386/fulltextPDF/782B66697CFA4DCAPQ/1?accountid=14242#>

Pang, Y. & Zheng, Y. (2021). Application of BIM technology in engineering cost management. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 1384, pp. 45-51. Saatavissa: https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/chapter/10.1007/978-3-030-74811-1_7

Popov, V., Juocevicius, V., Migilinskans, D., Ustinovichius, L. & Mikalauskas, S. (2010). The use of a virtual building design and construction model for developing an effective project concept in 5D environment. Automation in Construction. Vol. 19., Iss. 3, pp. 357-367. Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0926580509001940>

Raheem, M. (2021). The effect of using building information modelling (BIM) (Stages: design, execution and post-execution). Materials Science and Engineering. Vol. 1076, Iss. 1. Saatavissa: <https://www-proquest-com.libproxy.tuni.fi/docview/2513012616?pq-origsite=primo&accountid=14242>

Ratu KI-6033 (2018). Rakennushankkeen kustannushallinta. Rakennustieto Oy. Saatavissa: https://kortistot-rakennustieto-fi.libproxy.tuni.fi/kortit/Ratu%20KI-6033?external_system=Juha&page=1&navref=Search

RT 10-11066 (2012). Yleiset tietomallivaatimukset 2012. Osa 1. Yleinen osuus. Versio 1.0. Rakennustieto Oy. Saatavissa: https://kortistot-rakennustieto-fi.libproxy.tuni.fi/kortit/RT%2010-11066?external_system=Juha&navref=Search&page=2

RT 10-11072 (2012). Yleiset tietomallivaatimukset 2012. Osa 7. Määrälaskenta. Versio 1.0. Rakennustieto Oy. Saatavissa: <https://kortistot-rakennustieto-fi.libproxy.tuni.fi/kortit/RT%2010-11072?navref=Search>

RT 10-11226 (2016). Talonrakennushankkeen kulku. Kustannusten muodostuminen ja ohjaus. Rakennustieto Oy. Saatavissa: <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%2010-11226>

Sattineni, A. & Macdonald, J.A. (2014). 5D-BIM: A case study of an implementation strategy in the construction industry. The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2014), IAARC. Saatavissa: https://www.iaarc.org/publications/fulltext/isarc2014_submission_112.pdf

Sepasgozar, S.M.E., Costin, A.M., Karimi, R., Shirowzhan, S., Abbasian, E. & Li, J. (2022). BIM and digital tools for state-of-the-Art construction cost management. Buildings. Vol. 12, Iss. 4., pp. 396–424. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/4/396>

Teittinen, T. (2009). Tietomallipohjainen määrä- ja kustannuslaskenta. Erikoistyö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: <https://docplayer.fi/6411623-Tietomallipohjainen-maara-ja-kustannuslaskenta.html>

Vigneault, M., Boton, C. & Chong, H. (2020). An innovative framework of 5D BIM solutions for construction cost management: A Systematic Review. Arch Computational Methods Engineering 27, pp. 1013–1030. Saatavissa: <https://link-springer-com.lib-proxy.tuni.fi/article/10.1007/s11831-019-09341-z>