

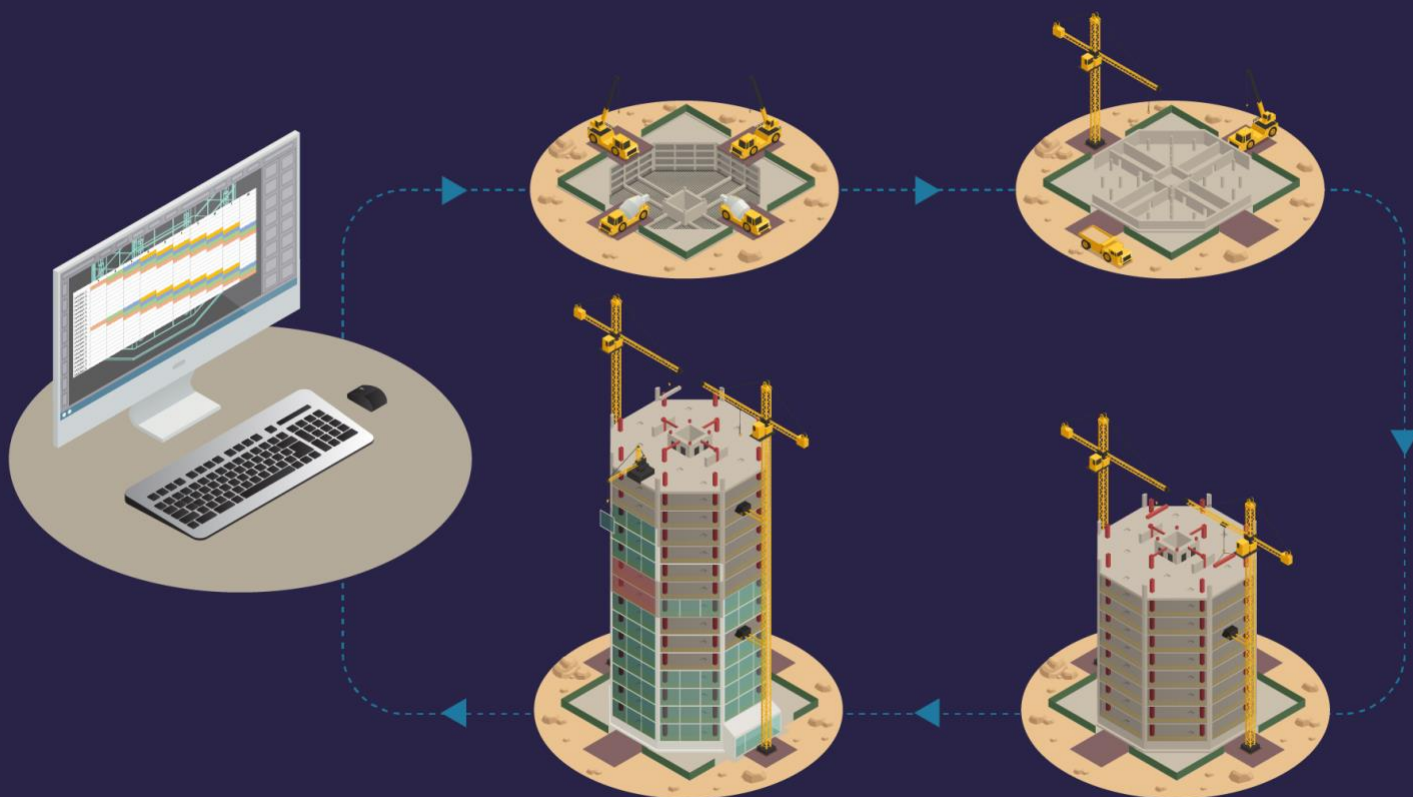
Building 2030: Tuotantoprosessin digitaalinen kaksonen

Loppuraportti

Kirjoittajat:

Aalto-yliopiston tutkijat: Olli Seppänen, Eelon Lappalainen, Alaa Al Barazi,
Christopher Görsch, Yuan Zheng, Hisham Abou Ibrahim

Aalto-yliopiston opiskelijat: Joni Laine, Arttu Huovinen



Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	3
1.1	Tutkimuksen tausta.....	3
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja menetelmät.....	3
2	Digitaaliset kaksoset tuotantoprosessissa	5
2.1	Mikä on tuotantoprosessin digitaalinen kaksonen?	5
2.2	Digitaalisia kaksosia tutkivat EU-hankkeet	6
2.3	Käyttötapauksia ja teknisiä testejä	8
2.4	Johtopäätökset – missä ollaan nyt ja mihin ollaan menossa?	18
3	Suunnitteluprosessin digitaalinen kaksonen.....	20
3.1	Mikä on suunnitteluprosessin digitaalinen kaksonen?	20
3.2	BIM-analytiikka osana digitaalista kaksosta	20
3.3	Jatkotutkimusaiheet.....	22
4	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	23
	Lähdeluettelo	25

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Digitaalinen kaksonen on rakennusosalalla pitkään ymmärretty lähinnä tietomallina, jota käyttö- ja ylläpitovaiheessa rikastetaan reaaliaikaisella tiedolla rakennuksen toiminnasta. Suunnittelu- ja rakennusvaiheen käyttötapaukset ovat jääneet vähemmälle huomiolle. Sacks ym. (2020) julkaisivat tärkeän artikkelin digitaaliseen kaksoseen perustuvasta rakennusprosessista. Tämän jälkeen tutkimus aiheeseen liittyen on lisääntynyt ja EU on rahoittanut kolme konsortiohanketta, joissa tutkitaan ja kehitetään digitaalisia kaksosia.

Suomessa on hyvät edellytykset asian edistämiseen, koska tilannekuvateknologian käyttö on yleistynyt. COVID-19-pandemian aikana esimerkiksi 360-videomateriaalia on alettu kerätä työmailta ja monet yritykset käyttävät rakentamisen aikana olosuhdesensoreita tai resurssipaikannusta. Building 2030 -konsortio päätti rahoittaa digitaalisiin kaksosiin liittyvän tutkimushankkeen, koska konsortion jäsenille oli epäselvää, miten digitaalinen kaksonen voisi toimia rakennusvaiheessa ja mitä eroa sillä on digitaaliseen tilannekuvaan nähden.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja menetelmät

Tutkimuksen tavoitteena oli kartoittaa käynnissä oleva tutkimus, määrittää vaatimukset digitaaliselle kaksoselle rakennusvaiheessa ja selvittää, miten digitaalinen kaksonen vaikuttaisi rakentamisen prosessiin.

EU-hankkeisiin tutustuttiin julkisen aineiston kautta ja järjestämällä työpajoja hankkeiden edustajien kanssa. Fira on mukana yhdessä EU-hankkeista ja he esittelivät hanketta konsortion työpajoissa. Lisää ymmärrystä digitaalisista kaksosista saatiin teknisillä testeillä, joissa pyrittiin yhdistelemään tietoja eri tietolähteistä digitaalisen kaksosen aikaansaamiseksi.

Hankkeessa toteutettiin korkean rakentamisen logistiikan digitaalinen kaksonen, joka hyödynsi työmaahissien dataa ja käsin kerättyä paikkatietoa. Lisäksi testattiin kansainvälisiä markkinoilla olevia sovelluksia, joista esimerkiksi Buildots kävi esittäytymässä hankkeen työpajassa.

Hankkeen aikana tehtiin kaksi diplomityötä, joissa selvitettiin vaatimuksia digitaalisille kaksosille urakoitsijoiden näkökulmasta ja testattiin digitaalisen kaksosen toimintaa elementtiasennukseen liittyen.

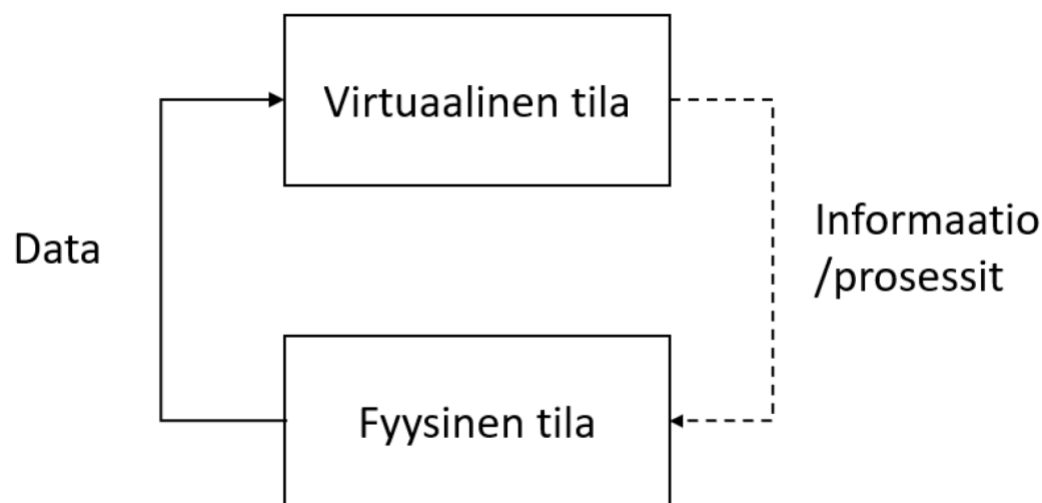
Tutkimusta laajennettiin hankkeen kuluessa käsittämään myös suunnitteluvaihe, ja tehtiin teknisiä testejä liittyen tietomallien automaattiseen analyysiin prosessin näkökulmasta. Tavoitteena oli selvittää, voidaanko suunnittelun tila päätellä pelkästään tietomallien etenemistä tarkastelemalla.

Yhdessä tarkasteltuna tulokset auttoivat ymmärtämään, mikä digitaalinen kaksonen voisi tarkoittaa suunnittelussa ja rakentamisessa ja minkälaista teknologiaa tarvitaan, jotta nykyisistä tilannekuvaratkaisuista päästään digitaaliseen kaksoseen pohjautuvaan rakentamiseen.

2 Digitaaliset kaksoet tuotantoprosessissa

2.1 Mikä on tuotantoprosessin digitaalinen kaksonen?

Grievessin (2014) mukaan digitaalinen kaksonen on silta fyysisen ja digitaalisen maailman välillä (Kuva 1). Fyysinen tuote ja digitaalinen malli ovat vastakappaleita, joiden välillä siirretään reaaliaikaisesti tietoa. Digitaalista mallia päivitetään fyysisestä prosessista tai tuotteesta kerätyllä tiedolla ja käytetään tukemaan päätöksentekoa tai hälyttämään poikkeamista. Digitaalisen mallin pohjalta päätetyt toimenpiteet vaikuttavat fyysiseen todellisuuteen ja toimenpiteiden vaikutusta voidaan arvioida lisää dataa keräämällä.



Kuva 1: Grievessin (2014) esittämä digitaalisen kaksosen toiminta

Rakentamisessa on yleensä lähdetty rakentamaan digitaalista kaksosta BIM-tietomallien päälle. Haasteena rakennusprosessin näkökulmasta on kuitenkin se, että tietomalli kuvaa rakentamisen lopputulosta eikä useinkaan sisällä prosessitietoa. Tämä on johtanut digitaalisten kaksosten käyttöön lähinnä ylläpitovaiheessa, kun tietomallin kuvaama rakennus on jo olemassa.

Prosessista ei yleensä ole käytössä hyvää digitaalista mallia. Aiempi tutkimus on osoittanut, että aikataulujen osumatarkkuus on heikko (Zhao ym. 2021) ja aikataulun ulkopuolelle kokonaan jäävien tehtävien osuus on suuri (Salerto 2019). Suurin osa asentajien työajasta kuluu johonkin muuhun kuin aikataulun mukaisiin tehtäviin. Automaattisesti sensoreilla kerätty tieto on tarkemmalla tasolla kuin tehdyt suunnitelmat, mikä on ongelma, jos halutaan saada reaaliaikainen yhteys todellisuuteen.

Digitaalisten kaksosten haaste rakennusvaiheessa onkin nimenomaan kehittää rakentamista nykyisiä aikatauluja tarkemmin kuvaava digitaalinen malli, johon voidaan liittää tietoja toimitusketjuista, kuvatietoa, sensoritietoja, paikkatietoja, kaluston järjestelmistä saatavia tietoja ja tietysti myös sovelluksiin syötettyä tietoa. Erilaiset simulointimallit ovat suosittuja tähän tarkoitukseen erityisesti tehdasympäristössä, joten teimme teknisiä testejä simulointimalleilla myös tässä hankkeessa.

Jos digitaalinen kaksonen saataisiin toimimaan rakennusprojekteissa, se voisi mullistaa rakentamisen johtamisen. Tietoa voisi käyttää työmaan toiminnan ohjaukseen ja materiaali- ja aliurakkahankintojen ohjaukseen. Aiempien projektien tietoja voisi paremmin hyödyntää tulevien projektien suunnittelussa esimerkiksi koneoppimista hyödyntämällä. Käyttäen lähtökohtina eri toteutusvaihtoehtoja voitaisiin ennustaa todennäköisiä aikataulu-, kustannus-, laatu- ja työturvallisuusongelmia. Digitaalinen kaksonen voisi automaattisesti hälyttää poikkeamista vastuuhenkilöitä. (Sacks ym. 2020)

Digitaalista kaksosta helpompaa on saavuttaa digitaalinen varjo. Digitaalinen varjo voidaan toteuttaa esimerkiksi keräämällä tietoa useista lähteistä samaan paikkaan. Tällainen kojelauta (dashboard) auttaa päätöksentekijää näkemään useita tietoja yhtä aikaa ja tekemään parempia päätöksiä. Esimerkiksi useissa yrityksissä ja projekteissa jo käytössä olevat tilannekuvajärjestelmät ovat digitaalisia varjoja. Niistä kuitenkin puuttuu digitaalisen kaksosen edellyttämä optimointi ja ennustaminen, mikä vaatii tuekseen kehittyneempiä digitaalisia malleja. Voidaankin sanoa, että suomalaisilla rakennusliikkeillä on jo edellytykset rakentaa rakennusprosessin digitaalinen varjo mutta digitaaliseen kaksoseen tarvitaan vielä paljon kehitystyötä ja tutkimusta.

Sekä digitaaliseen kaksoseen että digitaaliseen varjoon tarvitaan dataa, joka on koneluettavassa muodossa ja yhdisteltävissä muiden järjestelmien tietoihin. Tietojen automaattinen kerääminen ei ole edellytys digitaaliselle kaksoselle, vaan käsin syötetystäkin datasta voidaan rakentaa digitaalinen kaksonen (Laine 2022). Haasteena on järjestelmistä luettava data. Moni yritys on rakentanut prosesseja esimerkiksi Excel-tiedostojen päälle, jolloin dataa ei saada helposti liikkumaan järjestelmien välillä. Kaupallisilla toimijoilla on usein erilaisia vientitoimintoja järjestelmästäan mutta monesti tärkeää dataa ei voida siirtää järjestelmän ulkopuolelle. Digitaalisen kaksosen rakentamiseksi tarvitaankin vielä lisää satsauksia järjestelmien yhteentoimivuuteen.

2.2 Digitaalisia kaksosia tutkivat EU-hankkeet

Tutkimuksen aikana tutustuttiin kolmeen EU-rahoitteiseen hankkeeseen, joissa kehitetään ja tutkitaan digitaalisia kaksosia. Tietoa kerättiin hankkeiden verkkosivuilta, ja kahden hankkeen tutkijoiden kanssa järjestettiin työpaja, jossa käytiin läpi hankkeiden tavoitteita. Kaikki hankkeet ovat kolmivuotisia. Ne on käynnistetty vuonna 2021, joten tuloksia ei tutkimushetkellä vielä ollut julkaistu. Hankkeiden tavoitteet olivat kuitenkin julkisia ja kaikki

tutkimustulokset julkaistaan niiden valmistuttua. Tämän raportin kirjoitushetkellä verkkosivuilta löytyy jo erilaisia julkaisuja ja demokohteita.

Hankkeiden tavoitteita, painopistealueita ja lähestymistapaa rakennusvaiheeseen on esitetty taulukossa 1. Kaikkien hankkeiden tavoitteena on digitaalisen kaksosen alusta mutta lähestymistapa vaihtelee paljon.

Cogito ja ASHVIN rakentavat digitaalisen kaksosen alustaa pääosin BIM-mallien päälle. Cogito-hanke keskittyy tuottavuuden sijaan enemmän laadunvarmistukseen, työturvallisuuteen ja älykkäisiin sopimuksiin. ASHVIN-hankkeessa on tuottavuusnäkökulma ja erityisesti tavoitteena on kehittää parempia aikatauluennusteita. BIM2TWINin näkökulma sopii erityisen hyvin Building 2030 -yrityksille, koska tavoitteet rakentuvat lean-rakentamisesta tutun Plan-Do-Check-Act -ajattelutavan ympärille, ja päätavoitteena on vähentää hukkaa. Hankkeessa on mukana Building 2030 -konsortion jäsen Flow Technologies (osa Fira-konsernia).

Taulukko 1: EU:n rahoittamat digitaalisen kaksosen hankkeet

	ASHVIN	Cogito	BIM2TWIN
Tavoitteet	Tuottavuus, kustannussäästöt, työturvallisuus, digikaksosen standardi	Datan yhteensopivuus, BIMin laajennus (IOT / tekoäly), yhteiset alustat	Lean-näkökulma: hukan vähentäminen, tilannekuva-alusta, Plan-Do-Check-Act
Kehityksen painopistealueet	Digitaalisen kaksosen alusta, suunnittelumallista as-built -sensorien avulla (ml. konenäkö), tuottavuus	Digitaalisen kaksosen alusta, konenäkö, laadunvalvonta, työturvallisuus	Digitaalisen kaksosen alusta (prosessimallinnus, BIM + AI), tilannekuvan yhdistäminen (Project Status Model)
Rakennusvaiheen lähestymistapa	BIM + sensorit + konenäkö, paremmat aikatauluennusteet	BIM + sensorit + konenäkö (turvallisuus + laatu), älykkäät sopimukset, prosessimallinnus	Automaattinen valvonta, toimitusketjun yhdistäminen, nykytilanteen mallinnus linkitettyinä tietomalliin, simulointipohjaiset ennusteet
Julkinen verkkosivu	Ashvin.eu	Cogito-project.eu	Bim2twin.eu

Hankkeiden verkkosivuille vuoden 2022 lopussa lisätyt raportit osoittavat, että projekteissa tehdään oikeita asioita ja lopputuloksena saadaan varmasti aikaan hyppäys digitaalisiin kaksosiin liittyvässä tiedossa ja toivottavasti myös käyttöön otettavia työkaluja. Esimerkiksi BIM2TWIN -hanke on julkaissut raportteja liittyen digitaalisten kaksosten vaatimusmäärittelyyn, tunnuslukuihin ja datankeräystyökaluihin liittyen. Kaikki raportit

löytyvät hankkeiden kotisivuilta kohdasta ”Deliverables” tai ”Knowledge hub” ja tulevat julkisiksi niiden valmistuttua.

2.3 Käyttötapauksia ja teknisiä testejä

2.3.1 Urakoitsijan digitaalinen kaksonen

Joni Laine (2022) selvitti diplomityössään suomalaisten rakennusliikkeiden mahdollisuuksia rakentaa digitaalinen kaksonen. Työn perusolettama oli, että digitaalinen kaksonen on ”järjestelmien järjestelmä” (System of Systems) eli digitaalinen kaksonen on muodostettavissa, jos pääurakoitsijan kannalta tärkeät tiedot ovat saatavissa digitaalisessa muodossa. Digitaalinen kaksonen edellyttää siis koneluettavaa, systemaattisesti tuotettua tietoa, joka voidaan helposti ja tehokkaasti siirtää osaksi digitaalista kaksosta.

Työssä luokiteltiin kirjallisuuskatsauksen perusteella pääurakoitsijan kannalta tärkeät tiedot seuraaviin luokkiin: ympäristö (olosuhteet), aikataulu, työn edistyminen, laatu, turvallisuus ja kustannukset.

Työssä kehitettiin rakentajan digitaalista valmiutta arvioiva työkalu, jossa selvitettiin tiedon digitaalisuutta ja tiedonsiirron automaatiota. Työkalua kommentoitiin myös Building 2030 -hankkeen työpajoissa. Lopullinen arviointityökalu on esitetty kuvassa 2 ja sen pisteytysohje kuvassa 3.

Saadakseen parhaat mahdolliset pisteet osa-alueelta hankkeen piti mitata osa-alueen dataa ja tallentaa se järjestelmään, josta se on haettavissa koneluettavassa muodossa. Parhaassa tapauksessa tiedonsiirto toteutui automaattisesti. Automaattisuus ei kuitenkaan ollut edellytys ensimmäisen vaiheen digitaalisen kaksosen rakentamiseksi.

Digitaalisen kaksosen valmiuden arviointityökalu

Työmaan tiedot	
Yritys	
Kohde	
Urakkamuoto	
Aikataulu	
Laajuus	
Käynnissä olevat työvaiheet	
Arviointipäivämäärä	

Mitattava osatekijä (esimerkki)	Järjestelmä (1/0)	Pisteet (0-3)	Automaatio (0-2)	Datan lähde	Päivityssyky	Tietojen sijainti
Työn edistyminen (kuvat, videot, paikkatiedot, työntekijöiden lkm)						
Turvallisuus (kuvat, videot, paikkatiedot)						
Ympäristö (lämpötila, kosteus, melu)						
designed, betonin kosteusmittaus, laatutarkastukset)						
Kustannukset						
Aikataulu						
Pisteet yhteensä						

Kuva 2: Digitaalisen kaksosen valmiuden arviointityökalu (Laine 2022: 50)

Digitaalisen kaksosen valmiuden arviointityökalun pisteytysohjeistus

Järjestelmä

- 1 = Osatekijän datan tallentamiseen löytyy järjestelmä
- 0 = Osatekijän datan tallentamiseen ei löydy järjestelmää

Pisteytystaulukko, pisteytetään digitaalisesti edistyneimmän toiminnon mukaan

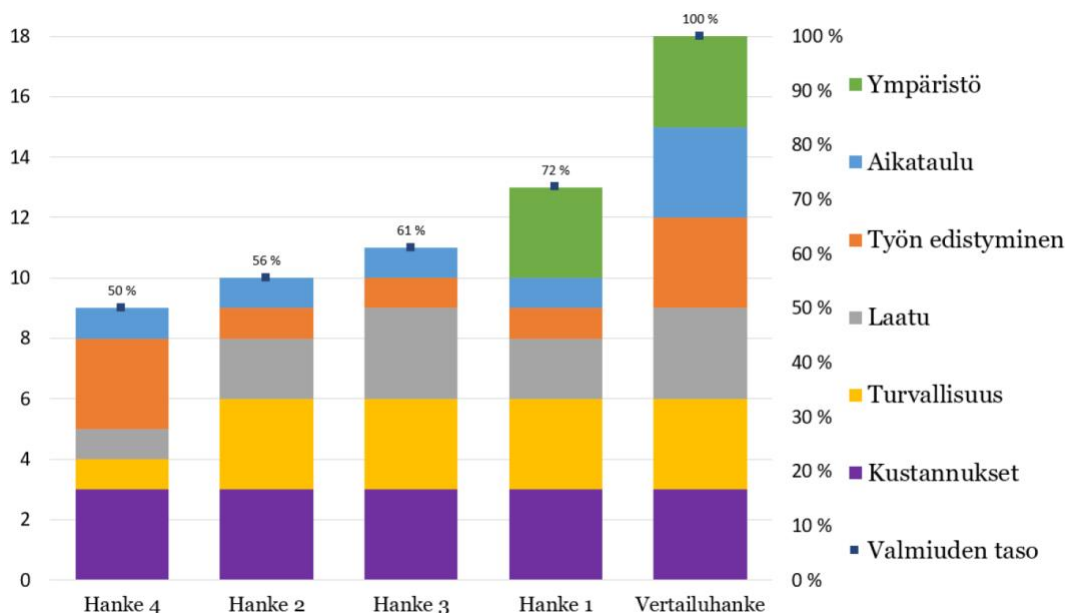
- 0 = Dataa ei mitata/seurata
- 1 = Dataa mitataan/seurataan ja dokumentoidaan
- 2 = Dataa mitataan/seurataan ja dokumentoidaan digitaalisesti organisaation saataville
- 3 = Dataa mitataan/seurataan ja se tallennetaan järjestelmään, josta se on saatavilla koneluettavassa muodossa

Automaatio, edistynein

- 0 = ei automatisoitua tiedonsiirtoa
- 1 = osittain automatisoitu tiedonsiirto
- 2 = täysin automatisoitu tiedonsiirto

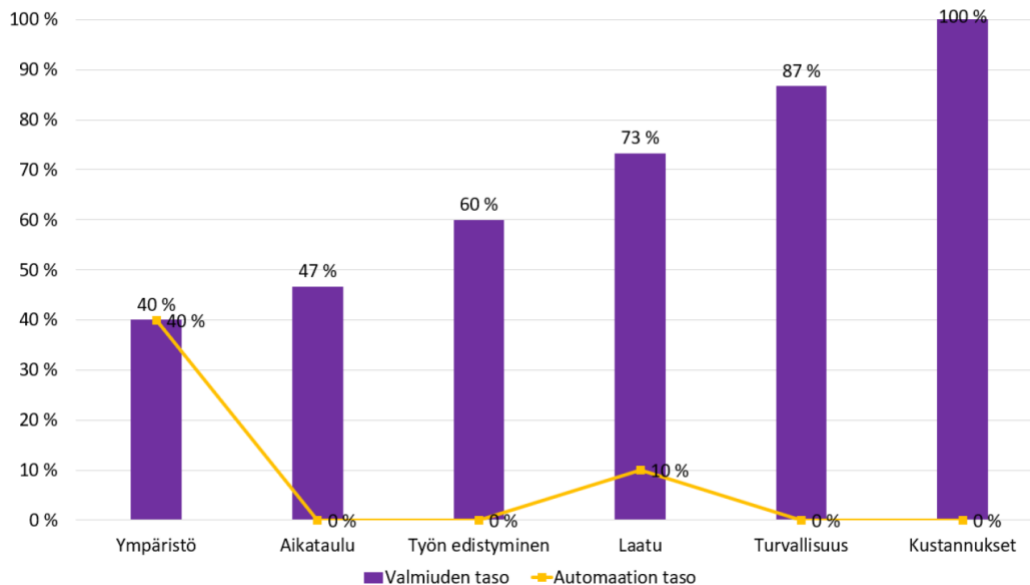
Kuva 3: Digitaalisen kaksosen valmiuden arviointityökalu (Laine 2022: 50)

Mittaustyökalua testattiin neljässä tekijän työnantajan hankkeessa ja yhdessä digitaalisesti edistyneessä vertailuhankkeessa. Konsortion jäsenten työmaista valittu digitaalisesti edistynyt vertailutyömaa oli edistynein hankkeista ja siellä edellytykset digitaalisen kaksosen rakentamiset olivat diplomityön mukaan olemassa. Vertailutyömaalla ei kuitenkaan ollut vielä rakennettu digitaalista kaksosta, vaan siellä oli käytössä PowerBI:n päälle rakennettu digitaalinen varjo. Eri hankkeiden valmiudet vaihtelivat 50%:stä 100 %:iin (kuva 4).



Kuva 4: Tutkittujen hankkeiden valmius digitaaliseen kaksoseen (Laine 2022: 67)

Parhaat valmiudet hankkeilla oli toteuttaa digitaalinen kaksonen kustannustietojen osalta ja heikoimmat olosuhteiden osalta (työssä käytetty termiä ympäristö). Vain harvoin tieto siirtyi automaattisesti. Käytännössä vain olosuhdesensorit tuottivat poikkeuksetta automaattisesti päivityvää dataa ja muut tiedot olivat käsin syötetyn tiedon varassa (kuva 5).



Kuva 5: Digitaaliset valmiudet ja automaation taso osa-alueittain (Laine 2022: 68)

Tutkimus osoittaa, että digitaalisissa valmiuksissa on saman yrityksenkin sisällä huomattavaa vaihtelua. Kaikkiin osa-alueisiin löytyy kuitenkin markkinoilta järjestelmiä, jotka mahdollistavat tiedonsiirron ulospäin siten, että digitaalinen kaksonen on muodostettavissa tiedoista.

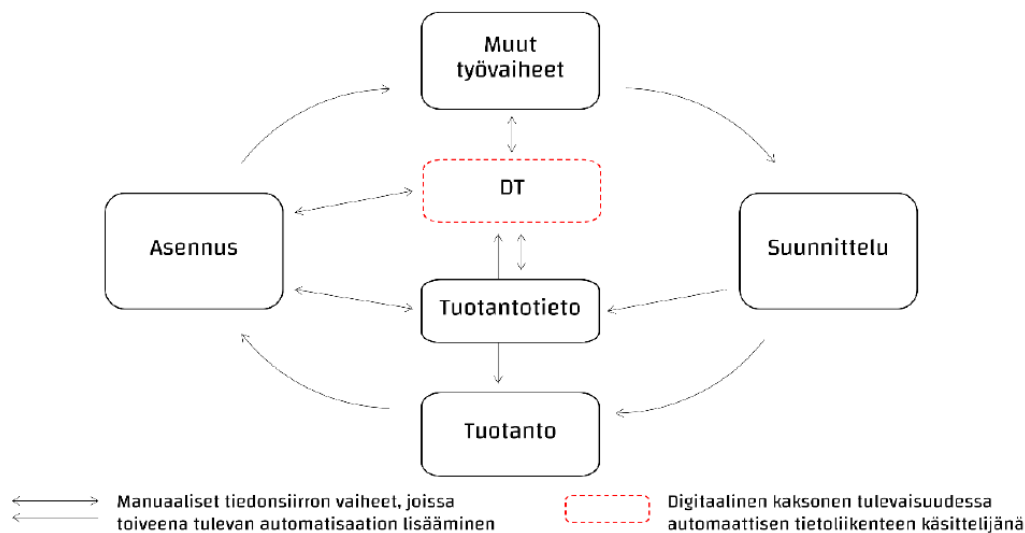
Kustannushallinta oli ainoa osa-alue, joka oli järjestelmien osalta kunnossa kaikissa hankkeissa, mikä osoittaa, että järjestelmät on sen osalta standardoitu. Automaatiota löytyi sen sijaan vain olosuhteiden ja laadunhallinnan osalta, eli nykyjärjestelmistä koottu digitaalinen kaksonen olisi pitkälti syöttötiedon varassa.

Nykytilanteessa rakennusliikkeen on vaikea investoida digitaalisen kaksosen kehittämiseen, koska hankkeiden välillä on suurta vaihtelua käytetyissä järjestelmissä. Osa-alueet pitäisi saada ensin standardoitua, jotta digitaalinen kaksonen olisi laajasti hyödynnettävissä eikä jäisi hankekohtaiseksi innovaatioksi. Digitaalisen kaksosen ensimmäinen versio olisi kuitenkin edistyneimmillä työmailla mahdollista rakentaa jo nyt. Toistaiseksi ratkaisuja ei kuitenkaan ole vielä kehitetty digitaalista varjoa pidemmälle.

2.3.2 Elementtiasennuksen digitaalinen kaksonen

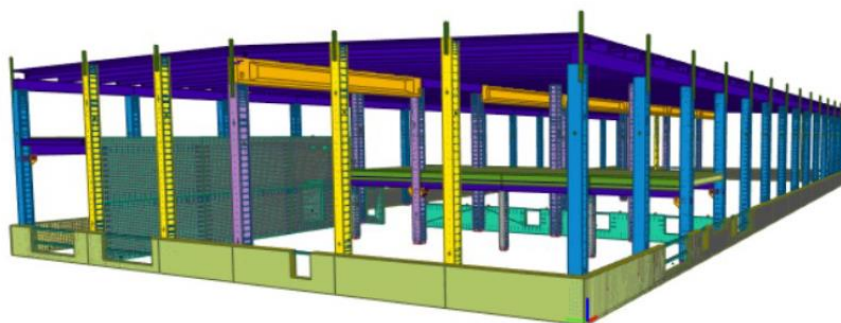
Arttu Huovinen (2022) lisäsi diplomityössään ymmärrystä digitaalisiin kaksosiin liittyen selvittämällä, mitä digitaaliset kaksoset voisivat olla elementtiasennusprosessissa. Lähestymistapana oli tilannetietojen kerääminen työmaalla ja tekniset testit, joissa linkitettiin elementtitehtaan tuotantotietoja tietomalliin elementtitasolla. Teknisten testien tavoitteena ei ollut ohjelmoida tuotantokäyttöön digitaalista kaksosta, vaan selvittää käytännön haasteita,

jotka on ratkaistava ennen kuin digitaalinen kaksonen voidaan rakentaa. Tavoitteena oli malli, jossa tiedot suunnittelusta, tuotannosta ja asennuksesta päivittyisivät automaattisesti, jotta digitaalisen kaksonen avulla voitaisiin tulevaisuudessa automaattisesti ohjata prosessia. Voidaankin sanoa, että tavoiteltiin mahdollisimman tarkkaa digitaalista varjoa automaattisesti järjestelmistä löytyvien tietojen pohjalta. Kuva 6 esittää tavoitellun tiedon siirtymisen mallin.



Kuva 6: Datan siirtymisen mallin visio (Huovinen 2022: 54)

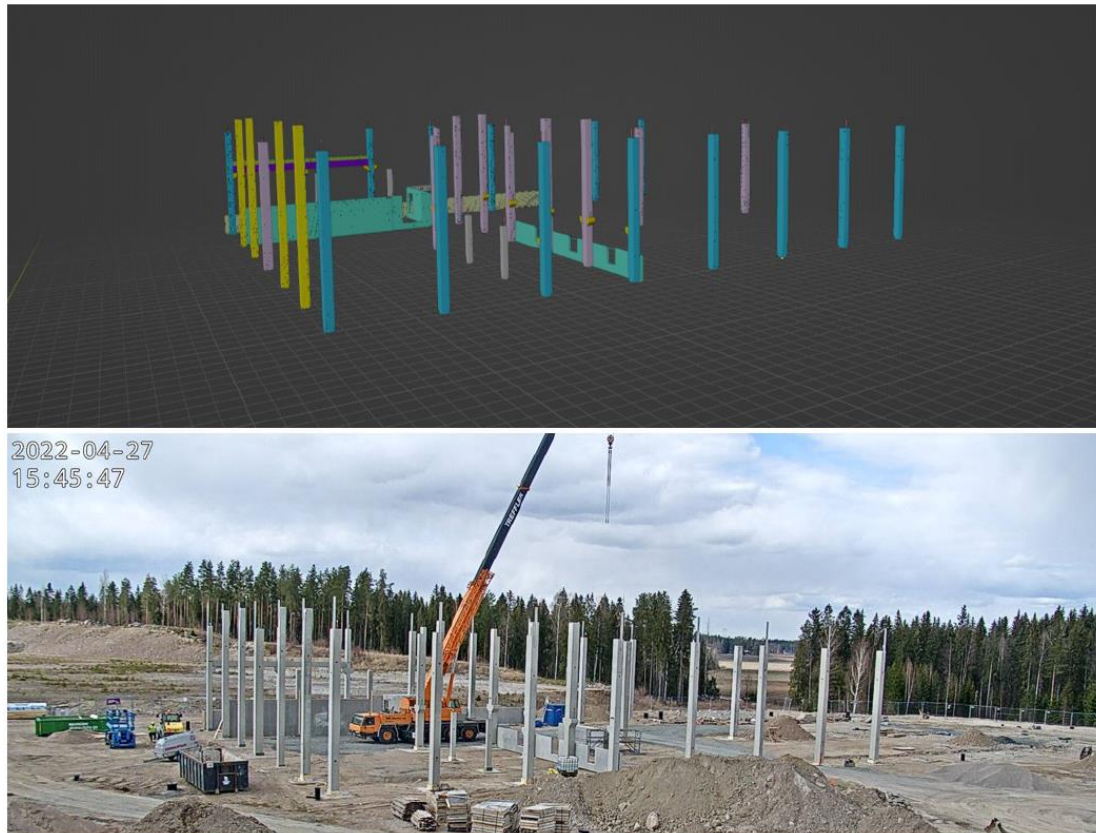
Testikohteena oli varsin yksinkertainen pilari-palkkirunkoinen tuotantohalli, joka tehtiin elementeistä (kuva 7). Kohteen elementtitoimittaja tarjosi pääsyn tuotantoportaaliin, josta oli mahdollista hakea tietoa. Portaali näytti vain ajantasaista tietoa, joten esimerkiksi historiatietoa tilanteesta ei voitu jälkikäteen hakea. Haasteena oli siis määritellä haettavat tiedot tarkasti etukäteen ja tehdä haku määrämuotoisesti joka päivä.



Kuva 7: Testikohteen runkomalli (Huovinen 2022: 52)

Kohteen elementit tuotettiin kolmella eri tehtaalla. Tehtaat syöttivät portaaliin tietoja eri tavalla, ja vain yhden tehtaan tiedot sisälsivät yksilöllisen tunnisteiden (GUIDin). Kaikilta tehtailta tallentui tieto sisäisestä elementtitunnisteesta mutta sitä ei voinut automaattisesti linkittää tietomalliin. Tuotantotiedon automaattinen hyödyntäminen olikin tunnisteiden

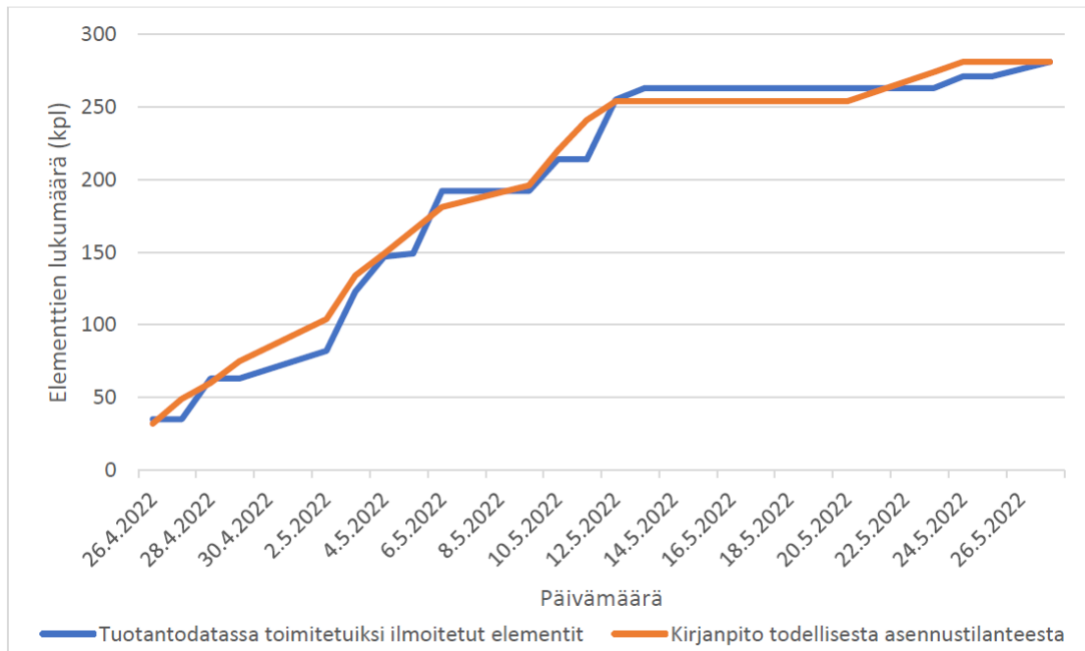
puuttuessa mahdotonta. Käsini syöttäen data saatiin korjattua ja tuotettua tilannekuva, joka varmennettiin samoina päivinä kohteista otetuilla kuvilla. Esimerkki yhden päivän tilanteesta kuvassa 8.



Kuva 8: Tilanne 27.4.2022 tuotantodatan pohjalta (ylempi kuva) ja valokuvassa (alempi kuva) (Huovinen 2022: 56)

Kokonaisuutena tehtaalta saatavan tiedon ja työmaa-asennuksen välillä oli joitakin eroja, jotka johtuivat mm. elementeistä, joita ei voitu asentaa heti ja elementtien tilapäisestä varastoinnista työmaalla. Erot olivat kuitenkin vähäisiä, kuten kuvasta 9 voidaan nähdä.

Kaikkia elementtejä ei voitu asentaa heti tuotannon jälkeen, mikä selittää kohdat, joissa tuotantodatassa on enemmän elementtejä kuin asennettuna. Välillä taas asennettuna oli elementtejä, joita ei ollut merkitty vielä valmistuneeksi tuotannosta. Nämä tilanteet johtuvat siitä, että tilannetiedon syöttäminen elementeille ei aina tapahtunut reaaliajassa ja siihen ei sisällynyt tehtaalla automatiikkaa. Vastaavia käsini syötön haasteita on aiemmin dokumentoitu mm. vertaamalla SiteDriveen syötettyjä toteutumatietoja sisäpaikannusdataan (Zhao ym. 2021).



Kuva 9: Tuotantodatan pohjalta päätelty tilanne vs. todellinen asennustilanne (Huovinen 2022: 57)

Testien pohjalta Huovinen (2022) esitti digitaalisen kaksosen MVP (Minimum Viable Product) -määrittelyä. Olennaista olisi saada tilannetieto mahdollisimman tarkasti ja reaaliaikaisesti.

Käsin syötön sijaan tarvitaan lisää automatiikkaa, jolla tiedon reaaliaikaisuus voidaan varmentaa. Tietoa ei saisi hukata prosessin aikana eli esimerkiksi mallinnusohjelman tunnisteiden pitäisi kulkea prosessissa mukana, jotta takaisinkytkentä on mahdollinen. Näin saataisiin toimiva digitaalinen varjo, jonka päälle voidaan rakentaa sitten digitaalisen kaksosen ominaisuuksia. Elementtiasennukseen liittyen ne voisivat olla esimerkiksi automaattinen tuotanto- ja asennusjärjestyksen suunnittelu ja aikataulun ehdottaminen ilman manuaalista syöttöä.

Mahdollisten tuotannollisten muutosten tarve pitäisi välittyä valmistajalle välittömästi. Elementtiasentajan pitäisi saada tieto asennusjärjestyksestä reaaliajassa ja digitaalinen kaksonen voisi ennakoita tulevia asennustöitä. Pidemmällä tähtäimellä digitaalinen kaksonen voisi automaattisesti tilata oikean määrän elementtejä, ehdottaa muutoksia aikatauluihin ja tarvittaessa päivittää kustannuslaskentaa ja -ennusteita.

2.3.3 Korkean rakentamisen logistiikan digitaalinen kaksonen

Yhtenä hankkeen teknisistä testeistä pilotoitiin digitaalista kaksosta korkean rakentamisen hankkeessa. Korkean rakentamisen kohteissa pystylogistiikka on usein pullonkaulana sisävalmistusvaiheessa. Työntekijät hukkaavat merkittävän osan ajastaan hissien odotteluun, jos pystylogistiikassa on haasteita. Pystylogistiikan suunnitteluun liittyy mm. hissien määrän, ominaisuuksien ja palvelualueiden suunnittelu, taukotilojen määrä ja sijainti, työaikojen ja

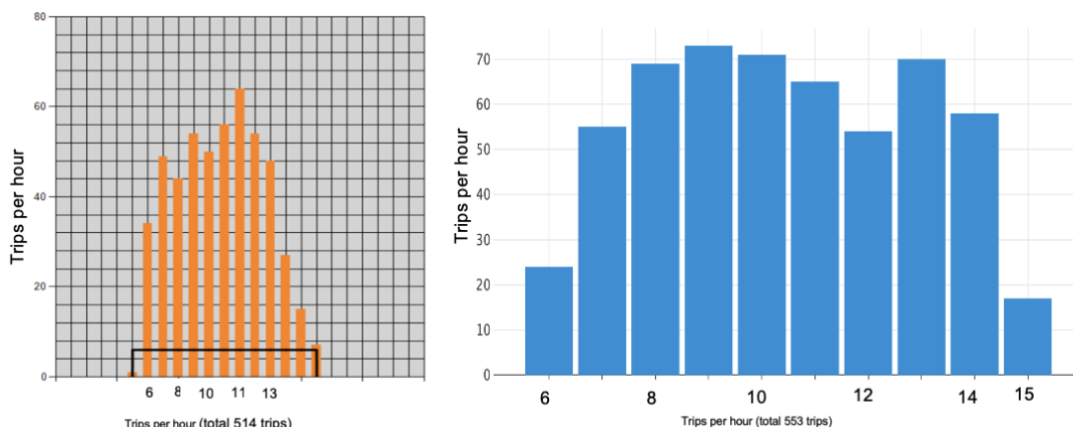
taukojen porrastus sekä työmaan aikataulutusta vähintään kerrostasolla, jotta liikennettä voidaan ennakoita.

Päätökset pystylogistiikkaan liittyen on tehtävä paljon ennen sisävalmistusvaiheen alkamista eikä suunnitteluun löydy markkinoilta työkaluja. Simulointi on yksi mahdollinen tapa tutkia pystylogistiikkaa.

Aiemmassa Building 2030 -konsortion korkeaan rakentamiseen liittyvässä tutkimushankkeessa kehitettiin pystylogistiikan simulointimalli korkean rakentamisen kohteisiin (Al Barazi et al. 2021; Seppänen ym. 2021). Hankkeessa kehitettiin simulointimalli, ja tuloksia käytiin läpi konsortion työpajoissa mutta työmaatestejä ei ehditty hankkeen aikana tekemään. Tässä hankkeessa jatkettiin työtä hyödyntämällä simulointimallia Skanskan korkean rakentamisen kohteessa. Simulointimallista kehitettiin digitaalisen kaksosen prototyyppi päivittämällä mallin oletuksia työmaalta kerätyn datan pohjalta.

Pystylogistiikan ennakoitujen haasteiden vuoksi tavoitteena oli asentaa pysyvät hissit jo rakennusvaiheessa. Hissien asennus kuitenkin viivästyi, joten digitaalista kaksosta testattiin hyödyntämällä Alimakin tuottamaa tietoa. Sekä pysyvien hissien toimittaja että Alimak tarjosivat käyttöliittymän, jonka kautta voitiin seurata hissien liikkeitä ja verrata niitä simulaation ennustamaan liikenteeseen.

Jo suunnitteluvaiheessa simuloinnilla oli ennakoitu, että pystylogistiikka yhdellä hissillä kolmen sijasta ei johtaisi merkittävästi kasvaneisiin odotusaikoihin. Alimakin tuottama tieto vastasi yllättävän hyvin simuloituja tuloksia. Esimerkiksi 16.5.2022 simulointimalli ennakoiti 514 hissimatkaa ja todellinen matkojen määrä oli 553 matkaa (kuva 10). Kuvasta näkyy myös vertailu matkojen määristä tunneittain ja hissien huippukäyttö. Mallia piti tarkentaa, koska työmaalla toteutunut työaikojen porrastus oli erilainen kuin mallissa oletettu, mikä näkyy esimerkiksi suurempana matkojen määränä kuuden ja seitsemän välillä.



Kuva 10: Vertailu Alimakin käytöstä, toteutunut (vasemmalla) ja simuloitu (oikealla)

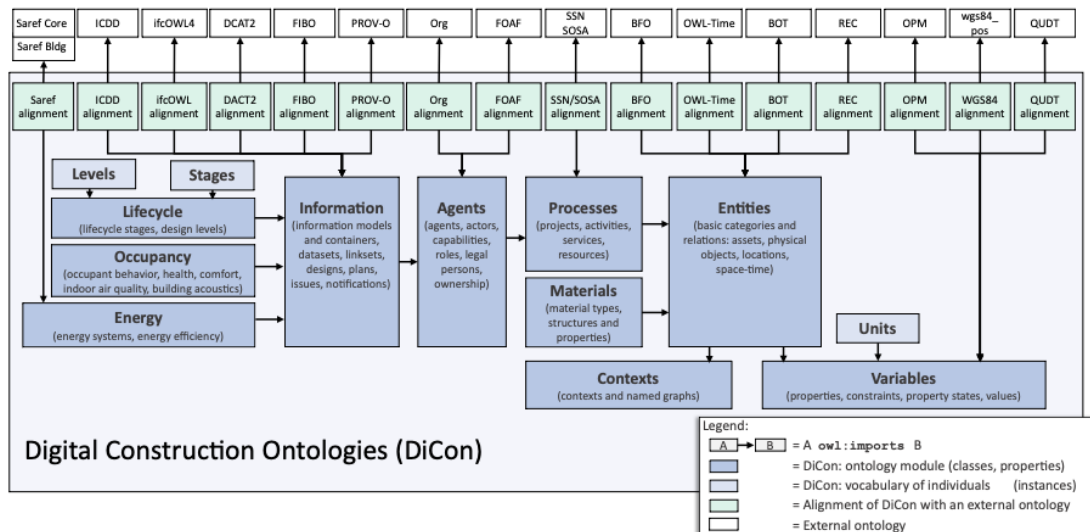
Hissien liikkeiden lisäksi ihmisten ja materiaalien liikkeet ovat olennaisia korkean rakentamisen logistiikan digitaalisen kaksosen tietolähteitä. Tutkittavassa kohteessa ei ollut käytössä paikannusjärjestelmää, joten asentajien liikkeitä tutkittiin opiskelijan suorittamalla aikaotantatutkimuksella. Tutkija seurasi asennustöitä väliseinätöihin ja sähköasennuksiin liittyen ja kirjasi liikkumisen ja liikkeiden syyt. Tätä tietoa hyödynnettiin simulointimallin oletusten päivitykseen, jolloin voitiin arvioida hissien tarvetta tulevaisuudessa. Hyötynä tästä on se, että jo kohteen alkuvaiheessa mitatulla tiedolla voidaan arvioida, miten pystylogistiikka toimii, kun kohteen vahvuus on suurimmillaan. Käytännössä mittaustietoa voisi jatkossa tulla automaattisesti esimerkiksi sisäpaikannusjärjestelmästä.

Taulukko 2 näyttää vertailun todellisten liikkeiden ja simulointimallin ennustamien liikkeiden välillä. Eroja hyödynnettiin käyttäytymisen tarkempaan mallintamiseen. Taulukon esimerkissä asentajan vaunu on porrastettu alkamaan myöhemmin kuin simuloinnissa on oletettu. Toisaalta taukoihin ja materiaalien siirtoihin käytetty aika on pienempi kuin oletettu. Päivityksiä mittaustiedon pohjalta mallin parametreihin voidaan tehdä asentajakohtaisesti tai yleisesti. Kun simuloinnin tulokset vastaavat todellista käyttäytymistä, mallia voidaan hyödyntää ennusteiden tekemiseen, kun tilanne muuttuu. Esimerkiksi voidaan arvioida, miten uuden taukotilan lisääminen tai työaikojen toisenlainen porrastaminen vaikuttaisi aikaan, jonka asentajat käyttävät työkohteessa.

Taulukko 2: Todellisen käyttäytymisen vertailu simuloituun (sähköasennus, 9. kerros)

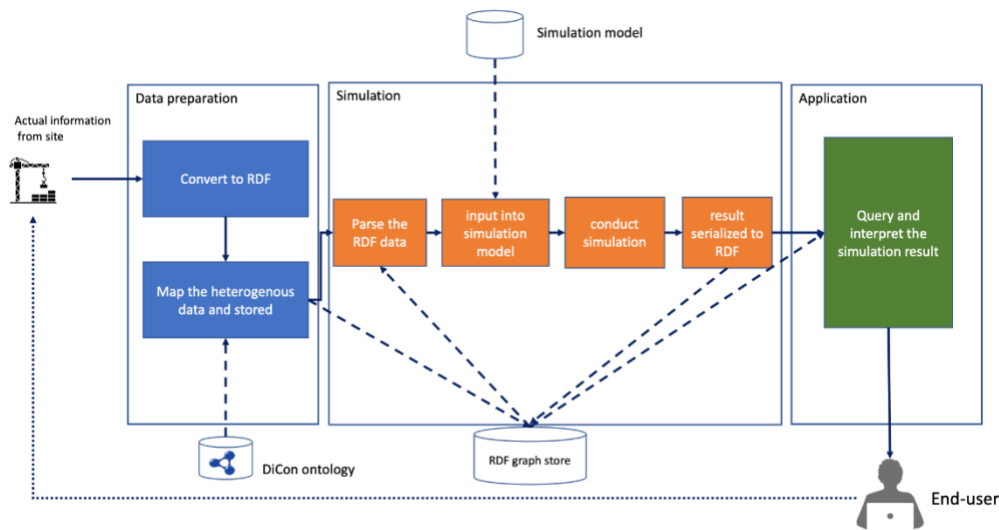
	Todellinen	Simuloitu
Saapumisaika	2022-05-17 08:40:00	2022-05-16 06:59:21
Lähtemisaika	2022-05-17 15:10:00	2022-05-16 14:50:27
Aika työmaalla	6.30.00	7.51.06
Aika työkohteessa	4.45.00	5.17.00
Aika tauoilla	1.10.00	2.20.00
Materiaalien siirrot	0.30.00	(sisältyy edelliseen)
% työkohteessa	73,08 %	67,29 %

Prototyypillä osoitettiin, että digitaalinen kaksonen voidaan toteuttaa. Digitaalinen kaksonen koettiin työmaalla hyödylliseksi ja vastaavia työkaluja ei ole vielä kaupallisesti saatavilla. Kehitetty prototyyppi ei päivity vielä reaaliaikaisesti, vaan vaatii tietojen käsin siirtoa hissijärjestelmästä eteenpäin. Reaaliaikaisuuden ei pitäisi kuitenkaan olla haaste, kun tiedetään, millä periaatteella simulointia pitää päivittää ja mistä järjestelmistä digitaaliseen kaksoseen haetaan tietoa.



Kuva 11: DiConin arkkitehtuuri

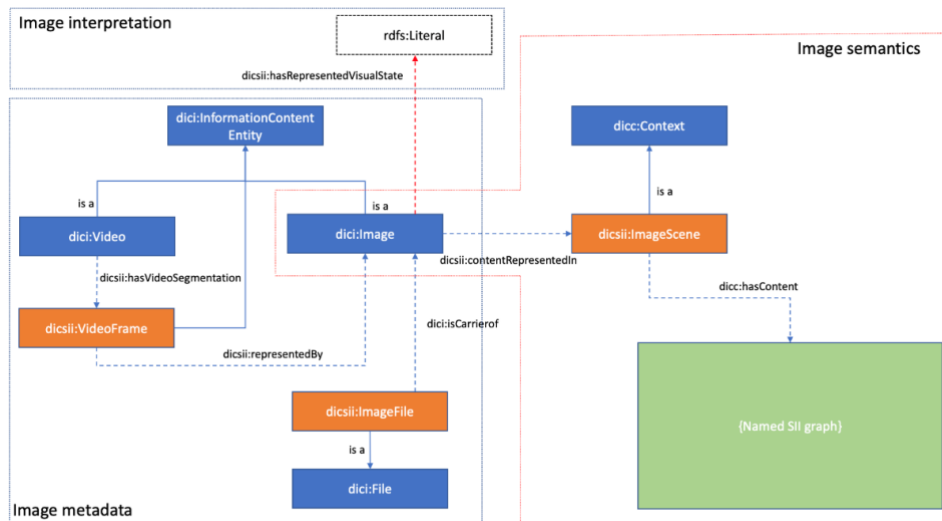
DiConia laajennettiin tässä hankkeessa siten, että se tukee digitaalisiin kaksosiin liittyviä simulaatioita. Ontologian tukema simulointimalli on kuvattu kuvassa 12. DiCon standardoi simuloinnin lähtötiedot yhdistelemällä tietoja eri lähteistä. Lisäksi DiConiin lisättiin tietorakenteet simulointituloksien tallentamiselle, jolloin simulointitiedot voivat jatkossa olla yhdistettävissä muihin tietoihin esim. tietokantakyselyin.



Kuva 12 Ontologian tukema simulointiprosessi

Kuvatieto on myös tärkeää toteutuneen rakennusprosessin taltioimiseksi ja lähtötietona digitaaliselle kaksoselle rakennusvaiheessa. Aiemmissa DiConin versioissa ei ollut kuvatietojen yksityiskohtaista tietorakennetta. Hankkeessa jatkettiin DiConin kehitystä lisäosalla DiCon-SII (SII = Semantic Image Interpretation), jolla kuvataan kuvassa olevat tiedot, jotta kuvan tiedot voidaan yhdistää muiden ulkoisten järjestelmien tietoihin.

DiCon-SII:n ontologinen malli on kuvattu kuvassa 13. Kuvatiedon ontologiaan sisältyy kuvan metatiedot ja kuvan sisällön kuvaus (ImageScene). Kuvasta tallennetaan kuvassa esitetyt asiat ja niihin liittyvät ominaisuudet ja piirteet. Tällöin voidaan kohdistaa hakuja esimerkiksi kaikkiin väliseiniin, jotka on kuvattu tietyssä sijainnissa tietyllä aikavälillä, tai hakea esimerkiksi yksittäiseen tietomallin objektiin liittyviä kuvia. Kuvissa esitetyt asiat voidaan jatkossa automaattisesti eritellä konenäkötekniikan avulla.



Kuva 13 DiCon-SII:n ontologinen malli

Hankkeessa kehitetyt DiCon -mallin lisäosat mahdollistavat digitaalisiin kaksosiin liittyvän simulointitiedon ja kuvatiedon käsittelyn ja yhdistämisen muuhun dataan. Jotta ontologioilla olisi käytännön arvoa, ohjelmistotoimittajien pitäisi järjestelmissään hyödyntää ontologian käsitteitä, jolloin tietojen hyödyntäminen yli järjestelmärajojen helpottuisi huomattavasti ja digitaalisille kaksosille olisi edellytykset.

2.4 Johtopäätökset – missä ollaan nyt ja mihin ollaan menossa?

Nykyiset digitaaliset järjestelmät mahdollistavat jo digitaalisen varjon kokoamisen projektitasolla. Digitaaliseen varjoon tarvittavat järjestelmät pitää valita kuitenkin huolella, koska monet markkinoilla olevat järjestelmät eivät vie tarvittavaa tietoa määrämuotoisesti järjestelmästä. Lisäksi useat järjestelmät vaativat manuaalisia lisäaskelaita tietojen linkittämiseksi.

Digitaalinen varjo on tehtävissä esim. PowerBI-alustalla. Osa suomalaisista rakennusliikkeistä ja monet allianssihankeet ovatkin kehittäneet käyttöönsä projektin digitaalisen varjon, joka kokoaa tietoja eri järjestelmistä.

Digitaalinen varjo on kuitenkin vasta ensimmäinen askel. Se ei edellytä tiedon yhteismitallistamista tai että kaikki järjestelmät ymmärtävät käsitteen samalla tavalla.

Digitaaliseen kaksoseen päästään vasta, kun tietoa voidaan käsitellä yhdessä ja hyödyntää sitä päätöksenteon tukena. Tämä edellyttää uusia tarkempia digitaalisia malleja rakennusprosessista ja kaiken tiedon yhteen toimivuutta.

Rakentamisessa sijaintitieto on tärkeää lähes kaikissa järjestelmissä, joten projektin sijaintijako pitäisi olla sama kaikissa järjestelmissä, jotta tieto voidaan linkittää sijainneittain. Vastaavasti useat järjestelmät hyödyntävät tehtävätietoa, toimittajatietoa ja tuotetietoa, joten tarvitaan yhteinen kieli näiden asioiden kuvaamiseen. Tällä hetkellä yhteistä kieltä ei ole, vaan tarvitaan käsityönä tehtyä yhteensovitusta järjestelmien välillä. Yhteisten ontologioiden käyttö voisi olla vastaus tähän ongelmaan.

Lisäksi tarvitaan lisää automaattista tulkintaa. Esimerkiksi 360-videot tai dronen tekemät pistepilvet ovat hyvä tietolähde, mutta työmaahenkilöstöllä ei ole aikaa tehdä niistä havaintoja. Tekoälyn merkitys tulkinnassa korostuu. Kaupallisia ratkaisuja on jo jonkun verran esimerkiksi valmiusasteiden laskentaan pistepilvien ja videomateriaalin pohjalta. Tarvitaan lisää automaatiota, jolla voidaan esimerkiksi automaattisesti tunnistaa aloitusedellytyksiä tai tuottavan työn esteitä ja hälyttää henkilöstöä poikkeamista. Kun tieto saadaan yhteiseen muotoon, tekoälysovellukset mahdollistuvat ja niitä alkaa tulla enemmän markkinoille.

Digitaaliseen kaksoseen pääsemiseksi tarvitaan siis tietosisältöjen standardointia tai yhteisiä ontologioita, raakadatan automaattista käsittelyä tekoälyllä ja tarkempia prosessisimulaatioita, joiden avulla voidaan automaattisesti ohjata rakennustuotantoa. Ensimmäisessä vaiheessa vähempikin automaatio riittää ja järjestelmät voisivat rakentua automaattisten havaintojen, perinteisten aikataulujen ja tekoälyn muodostamien hälytysten ympärille. Ensimmäisen vaiheen digitaaliseen kaksoseen on jo olemassa teknologiset edellytykset.

3 Suunnitteluprosessin digitaalinen kaksosen

3.1 Mikä on suunnitteluprosessin digitaalinen kaksosen?

Digitaalisen kaksosen käsite on selkeämpi rakennus-, käyttö- ja ylläpitovaiheissa, koska digitaalisen kaksosen ”fyysinen” osa on todellinen rakennus. Suunnitteluvaiheessa sen sijaan ei ole selkeästi määritelty, mikä on suunnitteluprosessin ”fyysinen osa” (Abou-Ibrahim ym., 2022).

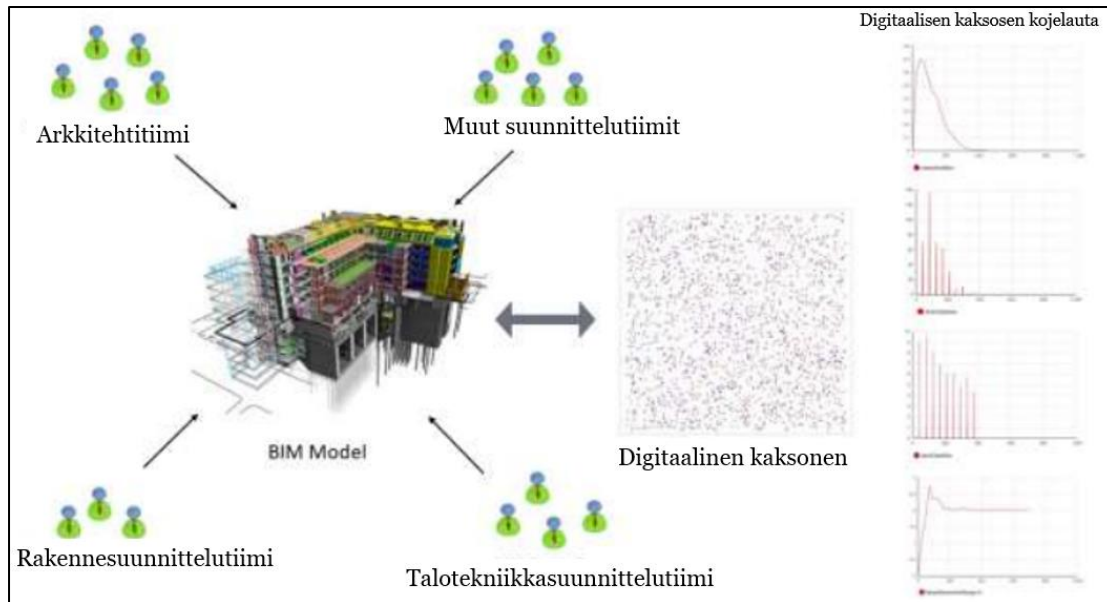
Rakentamisen aikana fyysinen järjestelmä koostuu työstä, laitteista ja materiaaleista, joita käytetään varsinaisten rakennusosien valmistamiseen, kun taas fyysinen suunnittelujärjestelmä koostuu eri alojen suunnittelijoista, jotka työskentelevät digitaalisten tietomallien parissa ja tuottavat suunnitteluratkaisuja. Tästä syystä suunnittelun digitaalinen kaksosen voidaan kehittää keräämällä tietoa suunnitteluprosessin etenemisestä, esimerkiksi tutkimalla suunnittelun tuotteena syntyviä tietomalleja. Lisäksi prosessista voidaan saada tietoja esimerkiksi tutkimalla projektipankkeihin tallennettuja tiedostoja, analysoimalla mallinnusohjelmien käyttöä tai tutkimalla esimerkiksi tekoälyn avulla suunnittelukokousten pöytäkirjoja. Tässä tutkimuksessa keskityttiin tietomallien analytiikkaan.

3.2 BIM-analytiikka osana digitaalista kaksosta

Digitaaliset kaksoset koostuvat fyysisestä ja virtuaalisesta systeemistä sekä näiden välisestä tiedon virtauksesta. Tämän tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin, miten tietomallin muutoksia havainnoimalla voidaan tehdä päätelmiä suunnitteluprosessin tilanteesta. Työmaalla tietoa kerätään esimerkiksi sijoittamalla kameroita ja antureita tarkastelemaan työmaan tapahtumia. Vastaavasti tietomallia voidaan havainnoida ”virtuaalisella kameralla”, joka kerää tietomallissa tehtyjä muutoksia. Tutkimuksessa kehitettiin useita tietomallin kehittymistä seuraavia parametreja, jotka pohjautuvat erilaisten muutosten määriin versioiden välillä (esim. lisätyt elementit, poistetut elementit ja muutokset geometriassa tai muissa ominaisuuksissa).

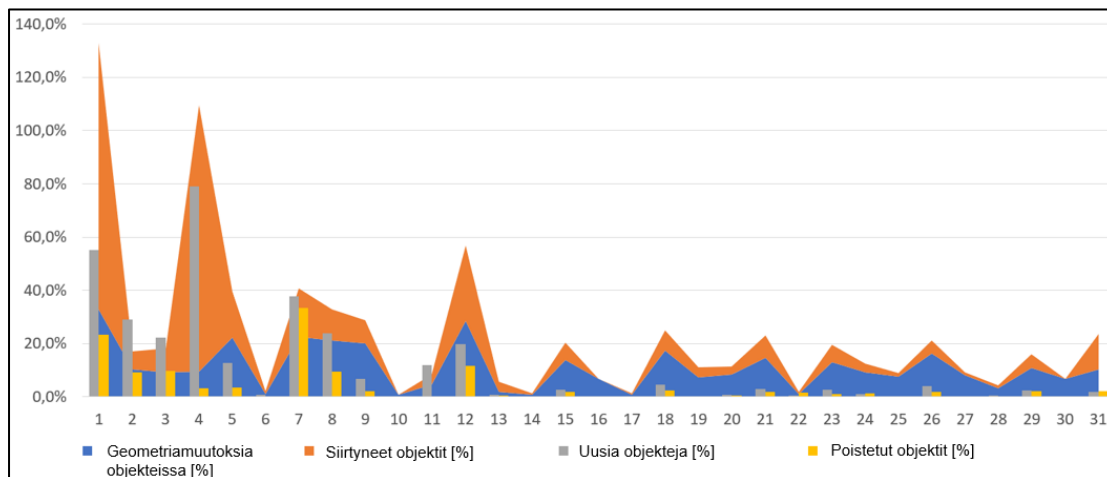
Tutkimuksen toisessa vaiheessa kehitettiin simulaatiomalli esittämään jokaista tietomallin objektia. Ajatuksena on jatkossa oppia suunnittelun etenemisestä hankekohtaisesti ja simuloida sitä. Käyttötapauksena voisi olla esimerkiksi suunnitteluprosessin suorituskyvyn jatkuva ennustaminen. Tämä voisi auttaa suunnittelujohtajia aktiivisesti seuraamaan ja hallitsemaan suunnittelun edistymää.

Simulaatiomallin kehitys on edelleen hyvin aikaisessa vaiheessa ja vaatii merkittävää jatkorahoitusta toteutuakseen. Kuva 14 esittää suunnittelun digitaalisen kaksosen konseptia.

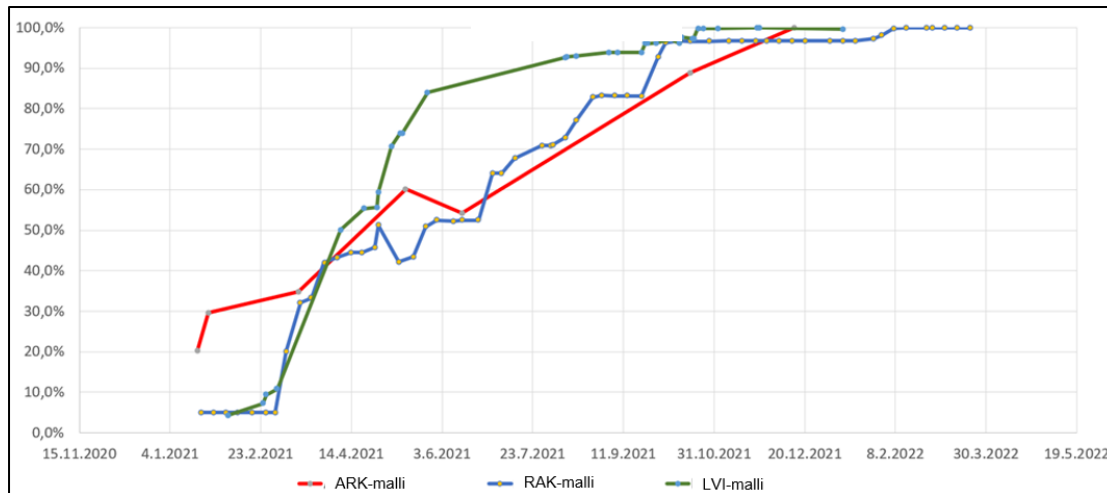


Kuva 14. Digitaalisen kaksonen konsepti suunnittelussa (Tietomalli: TM STW Architects).

Kolmannessa vaiheessa kehitettiin tunnuslukuja, joita laskettiin todellisessa suunnitteluprojektissa. Tunnuslukujen laskemiseksi tietomalleista kehitettiin tietokoneohjelma, joka lukee suunnitteluprosessin aikana jaetut IFC-tiedostot ja arvioi versioissa tehtyjä muutoksia. Ohjelmisto vertaa jokaisen IFC-version elementtejä edelliseen versioon ja laskee tunnuslukuja. Kuvassa 15 on esitetty esimerkkinä LVI-mallin muutoksia ja kuvassa 16 arkkitehtimalliin, rakennemalliin ja LVI-malliin lisättyjä elementtejä.



Kuva 15. LVI-mallin muutoksia



Kuva 16. Arkkitehti-, rakenne- ja LVI-mallien kehitys.

3.3 Jatkotutkimusaiheet

Tässä tutkimuksessa tutkittiin IFC-malleja jälkikäteen eikä analyysissä selvitetty hankkeiden todellisia tapahtumia esim. pöytäkirjoista tai aikatauluista tai tutustumalla tarkemmin tietomallien sisältöön. Nämä ovat tärkeitä seuraavia askeleita, jotta voidaan tarkastella, mitä tietomallien muutoksista voidaan oikeasti päätellä. Lisäksi tarvitaan useampien kohteiden analyysia, jotta voidaan löytää samanlaisuuksia eri hankkeiden dynamiikasta.

Kun on selvillä, mitä mallien muutoksista voi päätellä, seuraava askel on keskittyä käynnissä olevien hankkeiden reaaliaikaiseen tietomallien muutosten analysointiin ja visualisointiin. Myös visualisointien osalta on syytä jatkossa tutkia, mitkä avainmittarit soveltuvat parhaiten suunnittelijoiden oman työn kehittämiseen ja mitkä suunnittelun johtamisen tarpeisiin. Avainmittareiden kehityksessä tulee jatkossa pohtia, voidaanko objektien varustelun tai detaljoinnin kehitystä arvioida tietomalleista, ja tarvitaanko nyt kehitettyjen tunnuslukujen lisäksi lisää mitattavia suureita. Suunnittelijoiden välinen vuorovaikutus ja sen digitaalinen mallintaminen on myös mielenkiintoinen näkökulma.

Yhdistämällä tietomalleissa tapahtuvaa dynamiikkaa sekä suunnittelijoiden välistä vuorovaikutusta digitaalisesti ja analysoimalla sekä visualisoimalla sitä, on mahdollista tuottaa uudenlaista ymmärrystä suunnitteluprosessin tapahtumista, lähes reaaliajassa.

4 Yhteenveto ja johtopäätökset

Digitaaliset kaksoset suunnittelu- ja rakennusvaiheessa voivat jatkossa muuttaa rakentamisprosessia. Digitaaliset kaksoset ovat digitaalisia malleja, jotka ovat yhteydessä todelliseen tuotteeseen tai prosessiin. Yhteys voidaan alkuvaiheessa toteuttaa esimerkiksi kokoamalla erilaisista sovelluksista koneluettavaa dataa yhdelle alustalle. Jatkossa voidaan lisätä automatiikkaa ja hyödyntää esimerkiksi erilaisia sensoreita tai konenäköä. Pelkkä tiedon näyttäminen alustalla ei kuitenkaan ole digitaalinen kaksonen vaan digitaalinen varjo. Digitaaliseen kaksoseen vaaditaan, että yhdistetystä tietomassasta tehdään automaattisesti päätelmiä päätöksenteon tueksi tai automatisoidaan prosessia. Toistaiseksi rakennushankkeissa käytössä olevat tilannekuvateknologiat tai yritysten rakentamat tilanhuoneet ovat siis digitaalisia varjoja. Tutkimuksessa ei löydetty vielä yhtään tuotantokäytössä olevaa digitaalista kaksosta.

Edellytykset digitaalisen kaksosen rakentamiseen ovat kuitenkin olemassa. Esimerkiksi rakennusliikkeen kannalta olennaiset järjestelmät, joissa on aikataulu-, toteutuma-, työturvallisuus-, olosuhde- ja laatutietoa voivat jo siirtää tietoa ulos koneluettavassa muodossa. Haasteena on kuitenkin tiedon yhteensopimattomuus. Tällä hetkellä kukin järjestelmä on linkitettävä erikseen esim. Power BI-pohjaiseen näkymään. Koska vaihtoehtoisia sovelluksia eri osa-alueille on paljon, tarvitaan yhteistä kieltä, jotta kaikki järjestelmät ymmärtäisivät samat käsitteet samalla tavalla (esimerkiksi sijainti). Muuten digitaaliset kaksoset joudutaan rakentamaan erikseen jokaisen rakennusliikkeen järjestelmille tai jopa hankekohtaisesti. Tämä ei ole skaalautuva ratkaisu. Ohjelmistotoimittajat voivat tarttua tehtävään vasta, kun ohjelmistot hyödyntävät yhteisiä ontologioita ja tiedonsiirtoformaatteja.

Digitaalisten kaksosten vaatimia ontologioita on jo kehitteillä. Aallon ja VTT:n yhteistyönä on kehitetty digitaalisen rakentamisen ontologia (DiCon) (Zheng ym. 2022). Kolme EU-hanketta kehittelevät omia ontologioitaan ja osittain rakentavat niitä DiConin päälle. Tästä on vielä pitkä matka standardointiin ja sovelluksiin. Työ on kuitenkin käynnissä. Standardointia odotellessa jo nyt on mahdollista tehdä erilaisia käyttötarkoitussidonnaisia digitaalisia kaksosia esimerkiksi yksittäisten tuotantoketjujen hallintaan, kuten elementtiasennuksen digitaaliseen kaksoseen perehtynyt diplomityö osoitti. Toinen hankkeessa tehty tekninen testi osoitti, että simulointimallien päälle voidaan rakentaa esimerkiksi logistiikkaan liittyviä digitaalisia kaksosia keräämällä dataa hisseistä ja paikkatietoa asentajista.

Suunnitteluprosessiinkin voidaan jatkossa mahdollisesti soveltaa digitaalisen kaksosen käsitteistöä. Haasteena on se, että suunnittelukin tapahtuu ”virtuaalisessa maailmassa” ja suunnittelun tuotokset ovat esimerkiksi piirustuksia tai malleja. Tekemämme testit tässä hankkeessa kuitenkin osoittavat, että tutkimalla suunnittelun lopputuotteita (esimerkiksi tietomallien sisältöä), voidaan tehdä päätelmiä prosessin tilanteesta. Tutkimusta tarvitaan vielä

paljon ennen kuin tästä päästään kaupallisiin sovelluksiin ja työtä onkin päätetty jatkaa seuraavan vuoden Building 2030 -hankkeessa ”Suunnitteluprosessi 2.0”.

Lähdeluettelo

Abou-Ibrahim, H., Lappalainen, E. & Seppänen, O. (2022). Digital Twin of a Design Process: An Exploratory Study. *Proceedings of the 30th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC30)*, Edmonton, Canada, July 27-29, 1198–1209. Doi.org/10.24928/2022/0238

Al Barazi, A., Seppänen, O., Pikas, E., Lehtovaara, J., & Peltokorpi, A. (2021). Enhancing Internal Vertical Logistics Flows in High-Rise Construction: An Exploratory Study. In *Annual Conference of the International Group for Lean Construction* (pp. 717-726). IGLC. net.

Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S. & Rezgui, Y. (2020) Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*. 114: 103179. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2020.103179>.

Grieves, M. (2014). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*.

Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Springer, Cham, 85-113.

Huovinen, A. (2022). *Digitaalinen kaksonen elementtiasennusprosessissa*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu. Rakennustekniikan laitos.

Laine, J. (2022). *Rakennusvaiheen digitaalinen kaksonen – urakoitsijan rajoitteet ja mahdollisuudet*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu. Rakennustekniikan laitos.

Pauwels, P., Zhang, S. Lee, Y. (2017). Semantic web technologies in AEC industry: A literature overview. *Automation in Construction*. 73 145–165. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.10.003>.

Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H. & Girolami, M. (2020) Construction with digital twin information systems, *Data-Centric Engineering*. 1. <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>.

Salerto, S. (2019). *Hukan mittaaminen tahtihankkeessa*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu. Rakennustekniikan laitos.

Seppänen, O., Lehtovaara, J., Al Barazi, A., Pikas, E., Tetik, M., Zhao, J. (2021). *Korkea rakentaminen, loppuraportti*. Aalto-yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu. Rakennustekniikan laitos.

Zhao, J., Pikas, E., Seppänen, O., & Peltokorpi, A. (2021). Using real-time indoor resource positioning to track the progress of tasks in construction sites. *Frontiers in Built Environment*, 7, 661166.

Zheng, Y., Törmä, S. & Seppänen, O. (2021). A shared ontology suite for digital construction workflow, *Automation in Construction*. 132: 103930.
<https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2021.103930>.