



Piia Hotakainen

Digitalisaation mahdollisuudet rakennustyömaalla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Rakennusmestari

Rakennusalan työnjohto

Opinnäytetyö

31.10.2023

Tiivistelmä

Tekijä: Piia Hotakainen
Otsikko: Digitalisaation mahdollisuudet rakennustyömaalla
Sivumäärä: 64 sivua
Aika: 31.10.2023

Tutkinto: Rakennusmestari (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Rakennusalan työnjohto
Ammatillinen pääaine: Talonrakennustekniikka
Ohjaajat: Työpäällikkö Tero Luoma
Lehtori Joonas Pusila

Tämä opinnäytetyö tehtiin YIT Suomi Oy:lle. Digitalisaation hyödyntäminen rakennusalalla on lisääntynyt valtavasti, ja alalle suunnattua teknologiaa ja digitaalisia apuvälineitä on saatavilla runsaasti. Opinnäytetyön aiheena oli koota yhteen raporttiin rakennusalan digitaaliset mahdollisuudet nykyrakentamisessa. Tarkoituksena oli karsoittaa digitalisaation kehityssuuntia ja jo käytössä olevia menetelmiä, sekä perehtyä keinoihin, miten digitaaliset työkalut tuottavat arvoa rakennushankkeille. Opinnäytetyö rajattiin koskemaan talonrakennustyömailla hyödynnettäviä digitaalisia apuvälineitä.

Työssä perehdyttiin digitalisaation mahdollisuuksiin koulutuksien, seminaarien ja tutkimuksien avulla, sekä tutustumalla digitaalisia apuvälineitä tarjoavien yritysten tuotteisiin. Opinnäytetyössä käsiteltiin rakennusalan digitaalista tulevaisuutta kokonaisuutena, jotta saatiin ymmärrys siitä, mihin suuntaan kehitystyötä ollaan viemässä. Kokonaisuus auttaa ymmärtämään digitaalisten työkalujen arvon niin rakentamisen kuin koko rakennuksen elinkaaren aikana.

Rakennusalan tuottavuutta halutaan parantaa digitalisaation avulla lyhentämällä hankkeiden läpimenoaikaa ja parantamalla rakentamisen laatua. Rakennusprojektit sisältävät lukemattoman määrän tietoa, ja tavoitteena on saada tieto koneluettavaan muotoon siten, että järjestelmät voivat hyödyntää dataa automaattisesti ja tieto pääsee virtaamaan reaaliajassa. Rakennustyömaiden toimintamalleja halutaan tehostaa parantamalla tiedon läpinäkyvyyttä koko tuotantoketjussa. Ohjelmistokehityksen trendinä voidaan nähdä selain- ja mobiiliversiot, sekä tietomallintamisen ja pilvipalvelun hyödyntäminen. Rakennuksen tietomallista halutaan kehittää täydellinen versio todellisesta rakennuksesta. Puhutaan rakennuksen digitaalisesta kaksosesta, jossa kaikki tieto on hyödynnettävissä koneluettavassa muodossa.

Rakennustyömaalla käytettävät digitaaliset apuvälineet hyödyntävät uutta teknologiaa ja niitä voidaan käyttää monipuolisesti tuotannon läpiviennin tukena. Digitalisaation avulla voidaan parantaa muun muassa rakentamisen laatua, turvallisuutta ja tehokkuutta. Tämä opinnäytetyö toimii oppaana digitaalisten menetelmien hyödyntämiseen rakennushankkeissa.

Avainsanat: rakennusalan digitalisaatio, tietomalli, tiedon vakiointi

Abstract

Author: Piiia Hotakainen
Title: Possibilities Of Digitalization In Construction Sites
Number of Pages: 64 pages
Date: 31 October 2023

Degree: Bachelor of Construction Management
Degree Programme: Construction Management
Professional Major: Building Construction
Supervisors: Tero Luoma, Construction Manager
Joonas Pusila, Senior Lecturer

This thesis was conducted for YIT Suomi Oy. The use of digital tools in construction industry has increased enormously. The subject of the thesis was to collect the opportunities of digitalization in modern day construction into a single report. The objective was to chart the trends of the developments, methods already in use and to investigate ways digital tools can provide value to construction projects. The thesis was limited to digital tools employed in building sites.

The study familiarizes with the possibilities of digitalization through trainings, seminars, studies and products of service providers. The thesis covers the digital future of construction industry as a whole to understand the value of digital tools for both the construction time and for the entire life cycle of the buildings.

Productivity is wished to increase with digitalization by shortening the projects and enhancing quality. The objective is to get the data into machine-readable format so that it can be utilized in real-time to increase effectiveness and enhance transparency in the whole chain of production. Building information models are aimed to be made into a complete version of a real-life building, a so-called digital twin. This thesis functions as a guide in taking advantage of digital methods in development of construction.

Keywords: digitalization in construction, building information model, data standardization

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Tietomallintaminen ja digitalisaation kehityssuunnat	2
2.1	Rakennuksen tietomalli	2
2.2	Open BIM-teknologia ja IFC-tiedostomuoto	4
2.3	Yhdistelmämalli	4
3	Digitaalisessa muodossa olevien suunnitelmien hyödyntäminen työmaalla	6
3.1	Ohjelmat ja sovellukset suunnitelmien hyödyntämiseen	6
3.2	Digitaalisten suunnitelmien hyödyntäminen valmistelu- ja rakentamisvaiheessa	8
3.3	Projektipankki	8
3.4	Ohjelman ominaisuudet ja valintakriteerit	10
3.5	Suunnitelmat QR-koodin takana	11
4	Työmaatoteutuksen ajallisen ja taloudellisen läpiviennin digitaaliset apuneuvot	12
4.1	Projektinhallintajärjestelmät työmaalla	12
4.2	Määrälaskenta ja kustannusten hallinta	13
4.3	Digitaaliset aikatauluohjelmat	14
4.3.1	Digitaaliset menetelmät tahtituotantoon	16
4.3.2	4D-aikataulu	18
5	Digitaalisuus työmaan tuotannonohjauksessa	20
5.1	Tietomallinnus apuna työmaan aluesuunnittelussa	20
5.1.1	Aikaulottuvuus lisänä 3D-aluesuunnitelmassa	23
5.2	Logistiikan paikannusjärjestelmä	23
5.3	Aikataulujen integrointi ohjaukseen	25
5.3.1	Aikataulut mobiilisovelluksessa	26
5.3.2	Opastenäytöt	26
6	Paikannusteknologia ja digitaalinen tiedonkeruu	27
6.1	Paikannusteknologia	27

6.2	Tietomallipohjainen rakennusmittaus	28
6.3	Pistepilvi	29
6.4	Laserkeilaus	30
6.4.1	Skannausmenetelmät	32
6.4.2	Pistepilven hyödyntäminen työmaalla	32
6.5	360-kuvantaminen	34
6.6	Fotogrammetrinen skannaus	35
6.6.1	Matterport-syvyyskamera	37
6.7	Autonominen tiedonkeruu	38
6.7.1	IoT-sensorit	39
6.7.2	Ilmakuvaus	40
6.7.3	Robottikoira	42
7	Työmaan tilannekuvan ja laadun hallinta	43
7.1	Tilannekuvan määritelmä	43
7.2	Digitaalinen tilannekuva	44
7.2.1	Mobiilisovellukset laadun ja työturvallisuuden hallintaan	45
7.2.2	Datapohjainen oppiminen ja laatupankit	47
7.3	Tilannetiedon keruutavat 360-kuvantamisen keinoin	48
7.4	Olosuhdehallinta	49
7.4.1	IoT-olosuhdehallinta	49
7.4.2	Lämpötilan seuranta	50
7.4.3	Kosteudenhallinta	50
7.4.4	Pölynhallinta	51
7.5	Lämpökuvauksen digitaaliset apuvälineet	51
7.6	Tiiveysmittauksen digitaaliset apuvälineet	52
7.7	Resurssipaikannus apuvälineenä rakennustyömaalla	53
8	Digitaalinen kaksonen	54
9	Virtuaalinen ympäristö	56
9.1.1	MR-todellisuus	56
9.2	Laajennettu todellisuus	56
9.2.1	VR-todellisuus	57
9.2.2	AR-todellisuus	58
9.2.3	Todellisuuksien hyödyntäminen rakennushankkeissa	58
10	Rakennushankkeen luovutuksen digitaalinen materiaali	60

10.1	Digitaalinen luovutusaineisto	60
10.2	Digitaalinen ylläpitomalli	61
11	Pohdintaa	62
12	Yhteenveto	63
	Lähteet	1

Lyhenteet ja käsitteet

DWG	AutoCAD-ohjelmiston alkuperäinen tiedostomuoto
IFC:	Industry Foundation Classes. Avoin tiedostomuoto, joka mahdollistaa 3D-tietomallin siirron eri ohjelmien välillä.
IMU	Inertial Measurement Unit. Inertiamittausyksikkö. Laite, joka mittaa omaa sijaintiaan liikkeessä, kun lähtöpiste on tunnettu.
Konekieli	Tietokoneen suorittimen ymmärtämä muotokieli.
LiDar	Light Detection and ranking. Valotutka, joka mittaa etäisyyttä lähettämällä laservalopulssin avulla.
Plaanikuva	Elementtikaavio. Arkkitehti- ja rakennekuvista laadittu tasokuva.
PPP	Precise Point Positions.
Revisio	Tietojen tarkentumista. Tässä yhteydessä uusi rakennuspiirustuksen versio, johon on tehty muutoksia.
REVIT	Revise-Instantly. Mallinnus ja suunnitteluohjelmiston käyttämä tiedostomuoto.
RTK	Real-Time Kinematic.
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping. Mittaa reaaliaikaista kolmiulotteista kuvaa ympäristöstä ja muodostaa kartan paikantamisen yhteydessä.
Softa	Ohjelmistokokonaisuus
Tietomalli	Tässä yhteydessä tietomallilla tarkoitetaan IFC-tietomallia.

Topografia Tarkoittaa maan pinnanmuotojen yksityiskohtaista kuvaamista.

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajayrityksenä toimii YIT Suomi Oy. YIT on Suomen suurin rakennusyhtiö, joka toimii asuntorakentamisen, toimitilarakentamisen ja infrarakentamisen toimialoilla. Opinnäytetyö rajataan koskemaan digitalisaation hyödyntämistä rakentamisen aikana talonrakennustyömailla.

Rakennusalla erilaisten digitaalisten ohjelmien saatavuus on kasvanut nopeasti ja digitaalisten menetelmien sekä niihin liittyvien toimintatapojen hyödyntäminen koko rakentamisen arvoketjussa on lisääntynyt. Käytössä on kuitenkin edelleen paljon ohjelmia, joissa tieto ei liiku eri ohjelmistojen välillä. Myös monimutkaiset käyttöjärjestelmät saattavat rajoittaa ohjelmien monipuolista ja kokonaisvaltaista hyödyntämistä. Uuden teknologian ja digitaalisten apuvälineiden avulla toimintaa voidaan virtaviivaistaa. Kehityksen suuntana voidaankin nähdä halu yhdistää tietoa, sekä tehdä siitä kaikille avointa ja helppokäyttöistä. Digitalisaatio mahdollistaa myös täysin uusien keinojen hyödyntämistä rakennusprosessin eri vaiheissa. Tässä opinnäytetyössä perehdytään erityisesti digitalisaation uusimpiin mahdollisuuksiin ja kehityssuuntiin rakennushankkeissa. Tarkoituksena on koota yhteen yleisellä tasolla laaja kirjo tämän hetken digitalisista apuvälineistä ja niiden rakennustyömaata hyödyntävistä ominaisuuksista.

Uusi maankäyttö- ja rakennuslaki on astumassa voimaan vuonna 2025. Sillä pyritään edistämään rakentamisen digitalisaatiota ja uusia säännöksiä on tulossa muun muassa ilmastonmuutoksen torjunnan ja rakentamisen sujuvoittamisen osilta koko rakennuksen elinkaaren ajalle. Laki vaatii tulevaisuudessa esimerkiksi, että kaikista hankkeista tehdään tietomalli, jota voidaan hyödyntää koko rakennuksen elinkaaren ajan. Pitkän ajan tavoitteena on luoda täydellinen kopio fyysisestä rakennuksesta, niin sanottu digitaalinen kaksonen, joka pitää sisällään kaiken olemassa olevan tiedon ja kykenee kaksisuuntaiseen vuorovaikutukseen todellisuuden kanssa.

Rakennuksen tietomallintaminen on keskiössä digitaalisen kehityksen tiellä, jonka vuoksi opinnäytetyössä tullaan perehtymään tietomallintamisen vaatimuksiin ja ominaisuuksiin myös tulevaisuutta ajatellen. Rakennusalan erilaiset digitaaliset työkalut linkittyvät vahvasti tietomalliin ja sen sisältämään dataan. Tietomalli ei itsessään ole uusi asia rakennushankkeissa, mutta on syytä uskoa, että digitalisaation kehittyessä tietomallintamisen mukana tuomat uudet mahdollisuudet tulevat olemaan koko rakennusala mullistavat.

Rakennusosalalle on tarjolla monenlaisia eri ohjelmia ja sovelluksia. Digitaalisia rakentamisen menetelmiä ja työkaluja pyritään kehittämään jatkuvasti, jotta saataisiin kyky tuottaa muun muassa suurempia kustannus- ja tehokkuushyötyjä. Teknologian edistyneemmät käytötavat auttavat saamaan hankkeen päätökseen aikataulun ja budjetin puitteissa parantamalla jokaisen hankkeen osapuolen tuottavuutta sekä vähentämällä virheiden määrää. Rakennusosalalle tyypillinen ongelma on esimerkiksi suuret hukkatunnit. Tehollisen työajan kasvattamisen lisäksi muu tuottavuuden parantaminen sekä kiristyvät aikataulut vaativat uusia keinoja hankkeen läpi viemiseen, ja digitalisaation laajemmasta hyödyntämisestä toivotaan apua näiden ongelmien ratkaisemiseen.

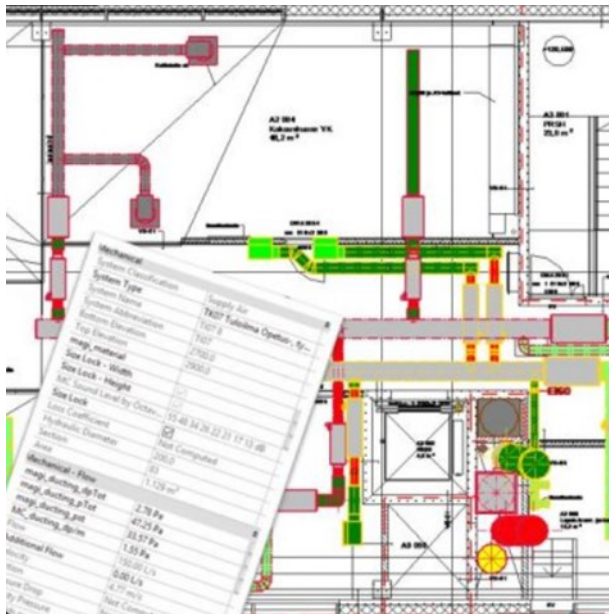
Digitalisaatio tulee olemaan vahva osa rakentamisen tulevaisuutta, joten kehityksessä mukana pysyminen on tärkeää. Digitaalisten työkalujen monipuolisempi käyttö helpottaa rakentamista, mutta tekee siitä myös avoimempaa, toimivampaa, taloudellisempaa sekä turvallisempaa.

2 Tietomallintaminen ja digitalisaation kehityssuunnat

2.1 Rakennuksen tietomalli

Jotta rakennusalan digitalisaation kehityssuuntaa pystyy kunnolla ymmärtämään, on oltava perillä rakennuksen tietomallista (BIM; Building Information Model) sekä sen tulevista vaatimuksista ja mahdollisuuksista. Rakennuksen tietomallilla tarkoitetaan BIM-tekniologialla luotua digitaalisessa muodossa olevaa kolmiulotteista ja todellisuutta vastaavaa rakennuksen virtuaalimallia. Tietomalli ei ole

kuitenkaan pelkästään 3D-malli, vaan se sisältää suuren määrän informaatiota. BIM-malli sisältää rakennuksen ominaistiedot ja geometrian, joita tarvitaan rakentamisen, tuoteosien valmistamisen ja hankintojen tukemiseksi rakennusvaiheessa (Kuva 1). Ilman näitä attribuutteja kyseessä on vain 3D-malli. Tietomallia käyttämällä voidaan hallita valtavasti dataa koko rakennusprojektin aikana ja jopa myöhemmin rakennuksen koko elinkaaren loppuun asti (RT 10-11078; Magicad).



Kuva 1. Tietomalli sisältää eri rakenneosien tiedot.

Tietomallin kolmiulotteisuutta hyödynnetään hankkeen visualisointiin. Kolmiulotteisuus helpottaa rakenteiden hahmottamista kaksiulotteisiin tasopiirustuksiin verrattuna. Tietomallin avulla on tarkoitus kyetä hallinnoimaan koko rakennuksen elinkaarta suunnittelusta toteutukseen, sekä ylläpidosta koko elinkaaren loppuun asti (Leica Geosystems Oy). 2D-piirustuksille ominaista on, että ne vaativat ihmisen lukemaan ja ymmärtämään kokonaisuuksia yleensä useita eri piirustuksia hyödyntäen. Kun suunnitelmiin tehdään muutoksia, täytyy 2D-kuvissa muutokset tehdä useampaan kuvaan. Ajallisen hukan ja inhimillisten virheiden mahdollisuuksien lisäksi, nämä seikat luovat riskin vanhentuneiden piirustuksien käytöstä rakentamisen aikana. Tietomalli tuo yhteen rakennelman kaikki tarvittavat tiedot reaaliajassa, sillä tiedot ovat koneluettavia ja muutokset päivittyvät koko malliin yhdellä kertaa automaattisesti.

Rakennuksen tietomallien erityisiä hyötykäytön kohteita on lukuisia. Työmaalla tietomallia voidaan hyödyntää esimerkiksi turvallisuus-, logistiikka-, aikataulu- ja työvaihesuunnittelussa, työohjauksessa sekä suunnitelmien laatutarkastelussa. Rakennushankkeeseen voidaan tehdä myös esimerkiksi kolmiulotteinen perehdytysanimaatio ja 4D-aluesuunnitelma, johon on kolmiulotteisuuden lisäksi lisätty ajallinen ulottuvuus (Jääskeläinen 2021). Hyötykäyttöä helpottavat kohteen yksilöidyt tietomallintamisen vaatimukset, mutta jo ihan tavanomaisessa tietomallipohjaisessa hankkeessa edellä mainitut esimerkit ovat mahdollisia (RT 10-11078; Leica Geosystems Oy).

2.2 Open BIM-teknologia ja IFC-tiedostomuoto

Avoin tietomallintaminen (Open BIM) tarkoittaa toimintatapaa, jolla sallitaan tiedonvaihto eri sovelluksien kesken. Koneluettava data ja kehittyneet ohjelmistot mahdollistavat tietojen jakamisen kaikkien osapuolien kesken rakennusprosessin eri vaiheissa. Ajatuksena on, että projektitiedot määritellään jaettaviksi, jotta kaikki hankkeen osapuolet pystyvät saumattomasti osallistumaan hankkeeseen sen koko elinkaaren ajan (BuildingSMART).

Lähtökohtaisesti tietomallintamista on kahta tyyppiä. Avoimen tietomallin valmistajariippumattoman tiedonsiirron mahdollistaa IFC-tiedosto (Industry Foundation Classes), joka on kansainvälisesti rakennusalalla käytetty tiedostomuoto tiedonsiirtoon eri ohjelmistojen välillä. Suunnitteluohjelmistoille on erikseen olemassa omat tallennusformaatinmukaiset tietomallit (Ympäristöministeriö, 2022).

2.3 Yhdistelmämalli

Yhdistelmämallilla tarkoitetaan tietomallia, johon on yhdistetty eri suunnittelualojen tietomallit. Yhdistelmämalli sisältää myös tuote- ja materiaalitiedot hankkeesta. IFC4-tiedostopohjainen tiedonsiirto mahdollistaa yhdistelmämallin luomisen. Yhdistelmämalli kokoaa ARK-, RAK- ja LVIAS-mallit samaan koordinaatistoon, joka rikastaa rakennuksen tietomallin vastaamaan todellista kuvaa rakennuksesta. Käytännössä eri alojen suunnittelijat saavat siirrettyä omilla

suunnitteluohjelmistoillaan mallintamansa suunnitelmat yhdistelmämalliin, jossa tietomalleja voidaan vertailla päällekkäin muiden suunnittelijoiden tekemien mallien kanssa. Yhdistelmämallista voidaan havaita esimerkiksi yhteensovittamisen ongelmakohdat hyvissä ajoin. Tietomallin havainnollisuus ja avoimuus parantavat viestintää, tuotannonohjausta, kustannus- ja määrälaskentaa sekä projektinhallintaa. Yhdistelmämalli on myös erinomainen työkalu laadunhallintaan, sillä mallia tarkastelemalla saadaan hyvin todellinen visuaalinen kuva kokonaisuudesta (RT 10-11078; Latvala, 2012).

Yhdistelmämalliin saadaan liitettyä tarkempia osia asennusaikataulusta (4D), kustannuksista (5D), käytön aikaisesta ylläpidosta (6D) sekä uudelleenkäytettävyydestä (7D). Tiedot ovat hyödynnettävissä koko rakennusprosessin ajan kiinteistön ylläpitoon asti. Avoin tietomallintaminen on avainasemassa digitalisaation kehitykselle, sillä se parantaa digitaalisen datan saatavuutta, käytettävyyttä, hallintaa ja kestävyyttä (United BIM).

Uusi rakennuslaki astuu voimaan vuonna 2025 ja kolmen vuoden siirtymän aikana lain vaatimat muutokset astuvat voimaan. Laki tulee vaatimaan, että yhdistelmämalli tehdään jo rakennuslupavaihetta varten. Täydellistä lain vaatimuksia vastaavaa tietomallia ei vielä kuitenkaan ole saatavilla, mutta sellainen pyritään kehittämään vuoteen 2025 mennessä. Yhdistelmämallin on vastattava voimassa olevaa asetusta yleisistä tietomallivaatimuksista (Ympäristöministeriö, 2022)

Tällä hetkellä voimassa on Yleiset tietomallivaatimukset 2012, mutta muutoksia määräyksiin on tulossa lähivuosina. Ympäristöministeriön ylläpitämä RYHTI-hanke eli Rakennetun ympäristön tietojärjestelmähanke tekee kehitystyötä tietomallintamisen kehittämiseksi. Mukana on kehityshankkeita, jotka pyrkivät luomaan yhdessä toimivan lain vaatimukset täyttävän tietomallin. Mikäli lakiuudistus toteutuu nykytiedon valossa, täytyy rakennuslupavaiheessa kaikki omakotitaloa suuremmat uudiskohteet tietomallintaa jo rakennuslupaa varten. Käytännössä vaaditaan perustietojen ja järjestelmien tietomallintamisen lisäksi ARK-, RAK- ja LVIAS-tietomallit eli yhdistelmämalli. Tieto menee rakennusvalvontaan saakka ja tiedoista tehdään tietopankki valtiolle, jossa näkyy koko rakentamiskanta.

Yhdistelmämallissa pitää olla tuote- ja materiaalitiedot, päästöinformaatio sekä elinkaariajattelua tukevaa huolto- ja käyttöohjeisiin liittyvää dataa. Yhdistelmämallin ominaisuudet ovat erittäin hyödyllisiä myös rakentamisen vaiheessa, joten uudistus tulee koskemaan koko rakentamisen arvoketjua (Ympäristöministeriö, 2022).

Tulevaisuuden tietomalli tulee vaatimaan jokaisen komponentin tarkkaa tuotetietoutta. Tietojen pitää sisältää esimerkiksi tuotteiden mitat, sijainnit ja materiaalit. Tekniset järjestelmät vaativat tarkat laitetiedot ja mahdollisuuden tarkastella muun muassa virtausnopeuksia sekä paine- ja äänitasoja. Kehitystyötä vaativat erityisesti taloteknisten tuotesisältöjen IFC-tietomallien vaatimukset. Tarkoituksena on, että tiedot saadaan koneluettua suoraan tietomallista ilman erillisiä määrä- ja komponenttiluetteloita. Tietomallin on mahdollistettava esimerkiksi, että hiilijalanjälkilaskentaan tarvittavat tiedot ovat koneluettavassa muodossa.

3 Digitaalisessa muodossa olevien suunnitelmien hyödyntäminen työmaalla

3.1 Ohjelmat ja sovellukset suunnitelmien hyödyntämiseen

Tietomallipohjaisten suunnitelmien hyödyntäminen on haastanut ohjelmatuottajat valtavan kehitystyön äärelle. Ohjelmistokehityksessä on nykypäivänä panostettu erityisesti selainpohjaisten versioiden saatavuuteen sekä mobiilisovelluksiin, joissa suuri määrä tietoa saadaan kulkemaan pilvipohjaisesti. Digitalisaatio tuo rakennuksen suunnitelmat hankkeen kaikkien osapuolien saataville. Ominaisuuksien ansiosta pystytään mahdollistamaan reaaliaikaisten suunnitelmien hyödyntäminen kaikkialla, ilman että on kytköksissä tietokoneen kanssa työpisteellä. Suunnitelmia voidaan tarkastella, vaikka työmaalta käsin puhelimen tai tabletin välityksellä. Tietokoneohjelmistoista tehdään myös selainpohjaisia versioita, mikä helpottaa esimerkiksi etätöytätekeviä pääsemään käsiksi suunnitelmiin paikasta riippumatta (Kuva 2).



Kuva 2. Rakennuksen suunnitelmat ovat käytettävissä 2D- ja 3D-muodossa kaikilla laitteilla. (Dalux).

Suunnitelmien avoimuus on omiaan parantamaan rakentamisen laatua, tehokkuutta ja tuottavuutta. Tarjolla on laaja kirjo piirustuksia, tietomalleja ja muita dokumentteja sisältäviä ohjelmistoja. Tietomallintaminen on mullistanut suunnitelmien visualisoinnin ja lisännyt saatavilla olevan tiedon määrää.

Nykypäivänä lähes kaikki suunnitelmat tehdään 3D-muotoon ja 2D-suunnittelu on jäämässä historiaan. Tietomalli mahdollistaa suunnitelmien tarkastelun kuitenkin myös tasopiirustuksina. Moniin ohjelmistoihin on kehitetty mahdollisuus tarkastella suunnitelmia sekä tietomallina, että perinteisinä 2D-kuvina, mutta myös suunnitelmatyypin rinnakkaiskäyttö on mahdollista. Tietomallia hyödynnetään erityisesti yhteensovittamisessa, kokonaiskuvan hahmottamisessa ja rakennusosien ominaistietojen tarkastelussa, mutta usein edelleen käännetään 2D-kuvien puoleen, kun halutaan tarkastella esimerkiksi pohjakuvia (Dalux). Ominaisuus kuvien yhtäaikaisestä käytöstä rikastuttaa näkymää ja helpottaa hahmottamista. Sillä voidaan pyrkiä estämään virheiden syntymistä digitalisaation omaksumisen aikana, sillä vakioituneet piirrostavat ja merkinnät ovat kaikille tuttuja. Rinnakkaiskäytöllä voidaan helpottaa siis kaikkien hankeen osapuolien hyötymistä digityökaluista.

3.2 Digitaalisten suunnitelmien hyödyntäminen valmistelu- ja rakentamisvaiheessa

Tietomallia hyödyntävillä ohjelmilla pystytään visuaalisesti hahmottamaan rakennus ja tarkastelemaan tietomallin sisältämiä tietoja. Ohjelmien avulla voidaan esimerkiksi mitata etäisyyksiä ja pinta-aloja, sekä tarkastella eri objektien tietoja, kuten materiaaleja, painoja, sijainteja ja lukemattomia muita ominaisuuksia. Tietomallia hyödyntäen päästään perehtymään kohteeseen ja sen suunnitelmiin perinpohjaisesti jo ennen rakennustöiden aloittamista. Työmaan henkilöstö saa hankittua tietoa määrälaskennan avulla tarjousvaiheeseen, hankintoihin ja työmaantoteutukseen. Visuaalinen hahmottaminen helpottaa suunnitelmien mahdollisten päällekkäisyyksien havaitsemista, kuten taloteknisten komponenttien rakennetörmäyksiä. Hyvissä ajoin huomattuihin ongelmiin voidaan reagoida ajoissa, ja siten välttyä rakennusvirheiltä. Virheet voivat kostautua jo rakentamisen aikana, mutta pahimmillaan ne voivat jäädä huomaamatta ja kasvaa merkittäviksi taloudellisiksi tappioiksi rakennuksen luovutuksen jälkeen (Pashonin, 2023).

Rakentamisen aikana tietomallia voidaan hyödyntää tiedonvaihdossa ja työn koordinoinnissa. Kun eri suunnittelualojen tietomallit on yhdistetty samaan alustaan, pystytään helpommin tarkastelemaan eri työvaiheiden rakennettavuutta. Tällä voidaan edesauttaa esimerkiksi monimutkaisen talotekniikan asennusjärjestyksen ohjaamista. Hyvin suunnitellut työjärjestykset auttavat tekemään tuotannon läpiviennistä sujuvaa ja turvallista. Tietomalli mahdollistaa rakenteiden sijaintitiedon siirron suoraan mittalaitteisiin. Sijaintitietoja voidaan hyödyntää rakentamisen aikana ja sen jälkeenkin esimerkiksi piiloon jäävien rakenteiden osalta (Pöytäkivi, 2019).

3.3 Projektipankki

Projektipankki on nykypäivänä laajasti käytössä oleva työväline, jonka tärkeimpänä tehtävänä on jakaa tietoa vaivattomasti ja turvallisesti koko projektiryhmän kesken. Projektipankki on kuin hankkeen kirjasto, johon on tarkoitus sisällyttää

kaikki hankkeesta saatavilla olevat ajankohtaiset asiakirjat ja piirustukset. Projektipankin on hyvä olla käytännöllinen, joustava ja toimiva, jotta se säästää koko organisaation aikaa. Selkeä ja järjestyksessä oleva dokumentaatio hankkeen alusta loppuun helpottaa eri työvaiheiden hallintaa. Nykypäivän projektipankki on kattava projektinhallintaohjelmisto, joka toimii myös rakentamisen jälkeisenä aikana dokumentaation ja tiedonjaon välineenä esimerkiksi takuutöissä ja ristiriitaisissa tilanteissa (Sokopro).

Digitalisaation kehittyessä käyttäjien tarpeet muuttuvat, joten myös projektipankkien ominaisuuksia pyritään parantamaan ja laajentamaan tarpeiden mukaan. Projektipankki sisältää paljon luottamuksellista ja vain tietyille käyttäjille tarkoitettua dokumentaatiota. Riippuen käytettävästä projektipankista, eri käyttäjäryhmille on saatavilla räätälöidyt käyttöluvat, joiden katseluoikeudet voidaan määrittää erikseen. Näin projektipankkia on mahdollista hyödyntää turvallisesti koko rakentamisen ketjussa työntekijöistä lähtien (SokoPro).

Tärkeää on, että kaikilla projektin osapuolilla on aina pääsy hankkeen uusimpaan tietoon. Projektipankki mahdollistaa uusimpien revisioiden saamisen käyttöön reaaliajassa ja revisioiden keskinäisen vertailun. Rakennushankkeissa on mukana useita eri sidosryhmiä, joten projektipankin yhteiskäyttö tulisi olla joustavaa ja sujuvaa. Tärkeänä piirteenä on alustasta riippumaton projektipankki, joka mahdollistaa käytön kaikkien osapuolten käyttämällä laitteilla. Nykytrendinä onkin luoda selainversioiden lisäksi myös mobiililaitteille käyttäjäystävällisiä projektipankkien katseluohjelmia. Projektipankki luo mahdollisuuden reaaliaikaiseen kommunikointiin ja dokumenttien jakoon kaikkien käyttäjiensä välillä (Silventoinen, Huusko, 2021).

Painopisteen siirtyessä perinteisistä 2D-piirustuksista 3D-malleihin, on projektipankkeihin tuotu mahdollisuus myös tietomallien tarkasteluun tasopiirustuksien lisäksi. Tasopiirustuksien ja 3D-mallien hyödyntämisestä rinnakkain voikin olla hyötyä työmaalla. Projektipankista ladattavat 2D-kuvat ovat helposti luettavissa kaikilla mobiililaitteilla. Vakioituneet piirrostavat ja merkinnät ovat kaikille tuttuja.

Myös tietomallista voidaan tehdä 2D-projektioita, leikkauskuvia ja plaanikuvia, (Kirby, 2022)

3.4 Ohjelman ominaisuudet ja valintakriteerit

Digitaalisille ja tietomallia tukeville suunnitelmille tarkoitettuja ohjelmia on olemassa runsaasti ja ohjelman valintaan vaikuttavien ominaisuuksien painoarvoa on syytä punnita tarkkaan ja kauaskantoisesti. Mittatarkat, informatiiviset ja reaaliaikaiset suunnitelmat ovat tärkeitä ohjelmisto-ominaisuuksia. Yksi oleellisimmista ominaisuuksista nykypäivänä on ohjelman IFC-tiedostotuki, mikä itsessään mahdollistaa avoimen tietomallintamisen. Eri käyttötarkoituksiin soveltuvien ohjelmistojen integraatio mahdollistaa suunnitelmien mutkattoman tiedonsiirron ohjelmistojen välillä. Digitalisaation kehitys on mahdollistanut esimerkiksi projekti-pankin ja suunnitelmien sisältämien projektinhallintaohjelmien yhdistämisen (Sokopro, Congrid).

Digitalisaation kehitystä tukevat myös mobiiliversion saatavuus, ohjelman pilvipohjaisuus, viestintämahdollisuus sekä ohjelmistotuottajan tahtotila jatkokehitykseen. Ohjelman käyttömukavuutta saadaan lisättyä mahdollisuudella valita käyttökieleksi tarvittaessa oma äidinkieli. Ohjelmistokehityksessä onkin panostettu laajentamaan kielivalikoimaa erityisesti koko työmaan henkilöstölle tarkoitettujen ohjelmien kanssa.

Ohjelmistojen laaja-alaiseen käyttöön vaikuttavat myös käytöstä tulevat kustannukset. Joissakin ohjelmistoissa on saatavilla ilmaisversioita tai mahdollisuus antaa ilmaisia käyttöoikeuksia työmaan henkilöstölle. Tämä saattaa myös vaikuttaa merkittävästi ohjelman valintaan, mutta hyötysuhdetta kannattaa kuitenkin punnita pidemmällä tähtäimellä ja panostaa käyttäjäystävälliseen ratkaisuun. Helpokäyttöiset, selkeät ja hyödylliseksi koetut ohjelmistot tekevät apuvälineen käytöstä mieluisempaa, ja siten edesauttavat ohjelmistojen laajempaa hyödyntämistä. Digitalisten apuvälineiden yleistymisen edellytyksenä onkin positiivisia käyttökokemukset.

Rakennuksen digitaaliset suunnitelmat vaativat suunnattoman määrän tallennustilaa. Valtava datamäärä yhdessä avoimuuden periaatteen kanssa tekee pilvipalveluiden hyödyntämisestä välttämätöntä. Pilvipalveluja käyttävän BIM-ohjelmiston tietoturvallisuuden huomioiminen on tärkeää, jotta asiaan kuulumattomat henkilöt eivät pääse käsiksi salaisina pidettäviin tietoihin. Tietoturvallisuuteen voidaan vaikuttaa myös erilaisilla käyttäjäprofiileilla ja mobiilisovelluksilla. Ominaisuutta hyödyntämällä suunnitelmia voidaan hyödyntää avoimemmin koko työryhmän kesken. Osa ohjelmistoista ja sovelluksista mahdollistaa vain tietomallin katselun, mutta ohjelmistoihin on yleensä myös saatavilla työkaluja käyttäjäprofiilien oikeuksien tarkempaan muokkaukseen (Lehtoviita, Rautiainen. 2019).

3.5 Suunnitelmat QR-koodin takana

Tietomallin laajamittaiselle käytölle työmailla on liittynyt käytännön esteitä, sillä ohjelmistot ja sovellukset ovat vaatineet kaikilta käyttäjiltä käyttöoikeuksia ja rekisteröitymistä. Jotta tietomallit saadaan kaikkien osapuolten käyttöön, on asia vaatinut uudenlaista lähestymistapaa. Yhtenä ratkaisuna on otettu käyttöön QR-koodit. QR-koodilla tarkoitetaan kaksiulotteista kuviokoodia, joka sisältää koodattua informaatiota. QR-koodeista voidaan tehdä staattisia tai dynaamisia. Staattisen koodin sisältöä ei voida muuttaa, kun taas dynaaminen koodi mahdollistaa informaation muutokset jälkikäteen. QR-koodeista on tehty myös muunnelmia, jotka mahdollistavat esimerkiksi salatun tiedon käsittelyn (QR-infoa).

Suunnitelmien visuaaliseen tarkasteluun on kehitelty ohjelmistoja, jotka mahdollistavat helpon ja nopean katselun esimerkiksi puhelimella tai tabletilla luettavalla QR-koodilla. Koodi vie suoraan katselijansa haluttuun kohtaan tietomallista. Katselu ei vaadi ladattavaa sovellusta tai ohjelmaa, vaan QR-koodi on kaikkien luettavissa 2D-piirustuksesta toimistosta tai työmaalta käsin, ja avautuu selainpohjaiseen katseluversioon (Sweco).

QR-koodilla saatava malli on niin sanotusti pilkottu pienempään osaan. Käytännössä siis urakoitsijat, työntekijät sekä työnjohto voivat nopeasti ja helposti lukea halutun näkymän tietomallista, ilman että oikeaa näkymää tarvitsee suodattaa

koko rakennuksen mallista. Selainpohjaiset ilmaisversiot mahdollistavat yleensä vain mallin visuaalisen katselun. 3D-mallin lisäksi QR-koodin polkuun voidaan lisätä halutessa myös muita elementtejä, kuten periaatekuvia, kytkentäkaavioita sekä avustavia detaljeja. QR-koodeja voidaan hyödyntää myös dokumentoinnissa ja viestinnässä. Koodi avaa selainpohjaisen näkymän, josta voidaan tehdä jaettava linkki esimerkiksi sähköpostiin tai kokouksen pöytäkirjaan (Salo, 2018).

4 Työmaatoteutuksen ajallisen ja taloudellisen läpiviennin digitaaliset apuneuvot

4.1 Projektinhallintajärjestelmät työmaalla

Tietomallin hyötykäyttö halutaan tuoda laajemmin mukaan myös ajalliseen ja taloudelliseen projektinhallintaan. Ohjelmia kehitetään siihen suuntaan, että ne kykenevät mahdollisimman automaattisesti konelukemaan dataa suoraan tietomallista, mutta myös rikastuttamaan mallia omilla ominaisuuksillansa. Se, että tietomallista ei tarvitse enää käsin siirtää tietoja, nopeuttaa ja helpottaa koko prosessia huomattavasti. Myös ajalliseen ja taloudelliseen läpivientiin suunnattujen ohjelmien välistä yhteyttä pyritään parantamaan, jotta tieto saataisiin siirtymään ohjelmien välillä automaattisesti. Olennaista on siis, että ohjelmat kykenevät hyödyntämään jo olemassa olevaa dataa, ja siten vältetään käsin tehtävä tiedonsiirto. Koneluettavuus tekee projektinhallinnasta myös luotettavampaa, sillä inhimillisten virheiden mahdollisuus vähenee huomattavasti. NykYTEknologia mahdollistaa esimerkiksi suunnitelmamuutoksien automaattisen päivittymisen tietomallista määrälaskentaohjelmistoon. Kaikki hankkeen suunnitelmat sisältävä mahdollistaa datan reaaliaikaisuuden, joten myös muutoksien hallinta helpottuu (Kallio 2017, Palonen 2020).

Vaikka rutiininomaisuus vähenee, kun projektinhallinnasta tehdään tietomallipohjaista, työnkuva muuttuu vaativammaksi. Joidenkin ohjelmien hallinta saattaa vaatia erityistä asiantuntijuutta, eikä kalliita ohjelmia kannata ostaa, jos osaaminen ei ole riittävällä tasolla yrityksessä (RT 10-11072, osa 7, 2012). Monesti joudutaankin turvautumaan palvelun tilaamiseen ulkopuoliselta toimijalta.

Ohjelmista pyritään kehittämään kuitenkin käyttäjäystävällisempiä, jotta niitä osattaisiin hyödyntää mahdollisimman monipuolisesti. Selkeät ohjelmistot auttavat myös viestinnässä muiden sidosryhmien kanssa. Myös ohjelmien selainpohjaisuutta pyritään tuomaan projektihallintaohjelmiin, jotta työskentelystä saadaan paikasta riippumatonta ja töitä voitaisiin tehdä esimerkiksi etänä ilman omaa työpistettä.

4.2 Määrälaskenta ja kustannusten hallinta

Tietomallia pyritään hyödyntämään materiaali- ja määrätietojen laskennassa. Tuotteiden ja menekkien laskenta on työlästä ja aikaa vievää rutiinityötä, kun niitä lasketaan erikseen piirustuksista, kaavioista ja luetteloista. Tietomallinnetut objektit sisältävät tarkkaa tietoa rakennusosien geometriasta, materiaaleista ja sijainneista rakennuksessa. Kehityksen suuntana voidaan nähdä tietomallin datan rikastuttaminen siten, että kaikista rakentamisen osa-alueista olisi saatavilla tarvittavat tiedot kattavaan määrälaskentaan. Vaikka tasopiirustuksista, kuten DWG- tai PDF-tiedostoista laskettava data on hyödynnettävissä määrälaskentaohjelmien avulla, on laskentatapa työläs ja mahdollisuus inhimillisille virheille suurempi. Virheet voivat rakennushankkeen aikana moninkertaistua. Tietomallia hyödyntävillä laskentaohjelmilla voidaankin pienentää laskenta- ja käsittelyvirheiden mahdollisuutta, sekä vähentää työkuormaa ja sitä kautta työn kustannuksia. Tavoitteena on tietojen yhdenmukaisuus ja vertailukelpoisuus. Luotettavat lähtötiedot takaavat myös laadukkaamman rakentamisen (RT 10-11072).

Kun määrälaskennan tiedot linkittyvät tietomallin kanssa, saadaan dataa hallittua luotettavasti. Määrälaskentaohjelmiston näyttää laskettujen objektien sijainnin tietomallissa, mikä helpottaa tietojen tarkastelua jälkikäteen. Tarkoituksena on, että määrälaskenta suoritetaan kertaalleen, ja tiedot ovat hyödynnettävissä koko hankkeen ajan ja koneluettavaa dataa saadaan hyödynnettyä myös seuraavissa hankkeissa. Erityisesti asuntotuotannossa ominaisuutta on mahdollista hyödyntää varsin kattavasti, sillä usein hankkeet muistuttavat monilta osin toisiaan ja edellisten kohteiden dataa voidaan hyödyntää uudelleen. Kun määrälaskenta

tehdään tietomallipohjaisesti, saadaan tiedoista läpinäkyviä kaikille projektin osapuolille (Tocoman).

Määrälaskentaohjelmalla kyetään yhdistämään rakennukseen tarvittavat rakennusmateriaalit sekä työpanosten määrät toisiinsa. Määrälaskennalla saadaankin tehtyä tarkat määräluettelot, joita voidaan hyödyntää rakentamisen aikana. Määräluetteloista on mahdollista erotella materiaalit ja työn osuudet halutuissa lohkoissa, jolloin myös data työmääristä on hyödynnettävissä myös aikataulutuksessa. Määräluetteloiden lähtötiedot saadaan varmistettua tarvittaessa jälkikäteen, joten esimerkiksi työnjohdolta vapautuu aikaa, kun ei tarvitse laskea määriä uudelleen. Tietomallipohjainen määrälaskentaohjelmisto onkin oiva työkalu rakennustöiden suunnitteluun ja ajanhallintaan työmaalla (Koskenvesa, Soila, 2018).

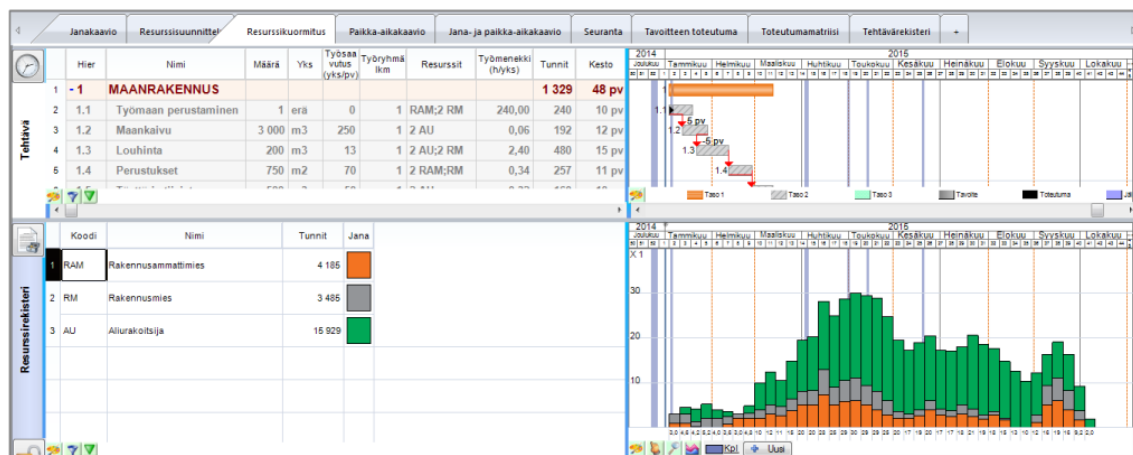
BIM-pohjainen kustannuslaskenta perustuu tietomallintamalla tehtyjen suunnitelmien määräluetteloihin. Tietomalliin perustuvien määrälaskelmien pohjalta tehty kustannuslaskenta vähentää laskentavirheiden määrää. Kun kaikki olennaiset tiedot ovat luotettavassa ja yksiselitteisessä koneluettavassa muodossa, on tietoja helpompi tarkastella jälkikäteen. Määrälaskenta- ja kustannustenhallintaohjelmistojen yhdistäminen samaan ohjelmistokokonaisuuteen tietomallintamisen kanssa virtaviivaistaa datan keruuta ja hallintaa. Nykypäivän määrä- ja kustannuslaskentaohjelmasta on mahdollista saada suoraan tiedot hankkeen eri vaiheista ja materiaaleista, kuten sijainneista, määristä, yksiköistä, työsaavutuksista ja resursseista (Tocoman).

4.3 Digitaaliset aikatauluohjelmat

Aikataulu on tuotannonohjauksen tärkein työväline. Nykypäivän aikatauluohjelmistoja voidaan hyödyntää monipuolisesti. Perusajatuksena on, että aikatauluohjelmaan syötetään hankkeen tiedot, joiden pohjalta ohjelmalla saadaan yhdellä kertaa luotua erilaisia aikatauluja, kuten jana- ja paikka-aikakaavioita, sekä mahdollisesti tahtiaikatauluja. Aikatauluohjelmat kykenevät hyödyntämään kertaalleen lisättyjä tietoja eri aikataulumuodoissa. Sinänsä ohjelmistojen pääpiirteet

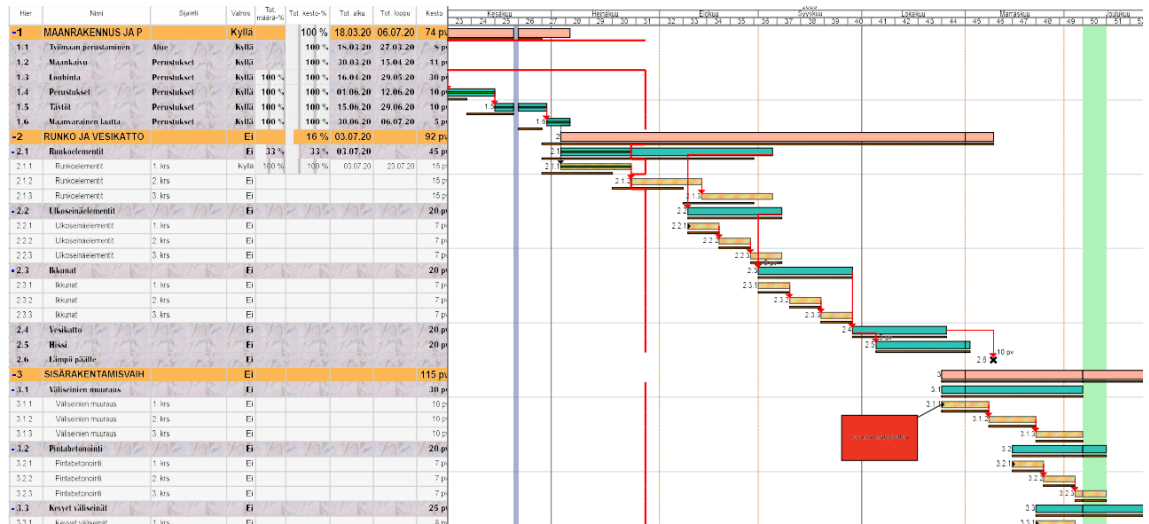
ovat hyvin samankaltaisia, mutta vaihtelevuutta esiintyy erityisesti toiminnan laajuudessa. Toiset aikatauluohjelmat ovat keskittyneet pelkästään aikataulun suunnitteluun, kun taas joillakin ohjelmistoilla aikataulut on yhdistetty kokonaisvaltaiseen toiminnanohjaukseen (Tocoman., Sitedrive).

Aikatauluohjelmaan ladataan tiedot rakennusvaiheittain. Työn osat saa pilkottua haluamiinsa osa-alueisiin. Aikataulua laatiessa on hyvä tarkistaa, mitkä suoritteet kuuluvat minkäkin aikatautehtävän yhteyteen. Tarvittavat määrätiedot lisätään kunkin osa-alueen kohdalle, jotta saadaan mitoitettua työsaavutus. Työryhmän saavutukset voivat perustua esimerkiksi RATU-korttien työmenekkitietoihin. Aikatauluohjelman lähtötietoihin voidaan hyödyntää määrälaskentaohjelmien tietokantaa. Hankkeen aikataulutuksen lisäksi ohjelmilla voidaan hallita ja tarkastella muun muassa käytettävissä olevia henkilöresursseja (Kuva 3).



kuva 3. Resurssikuormitusnäköymä aikatauluohjelmassa (Tocoman).

Aikatauluohjelmalla voidaan seurata työn edistymistä rakennushankkeen aikana toteumatietoa hyödyntäen (Kuva 4). Toteumatiedon hyödyntäminen vaatii työnjohtolta säännöllistä panostusta tilannekuvan seurantaan ja kirjaamiseen, jotta tietoa on reaaliaikaisesti saatavilla. Toteumatietoja voidaan hyödyntää monella tapaa. Ensisijaisesti toteumatiedot kertovat työnjohtolle realistista kuvaa työmaan etenemisestä aikataulussa, mutta sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi tuotannon ohjauksessa ja työmaan kokouksissa (Tocoman).



Kuva 4. Aikatauluohjelmalla saadaan seurattua hankkeen toteumatietoa punaisen seurantaviivan avulla (Tocoman).

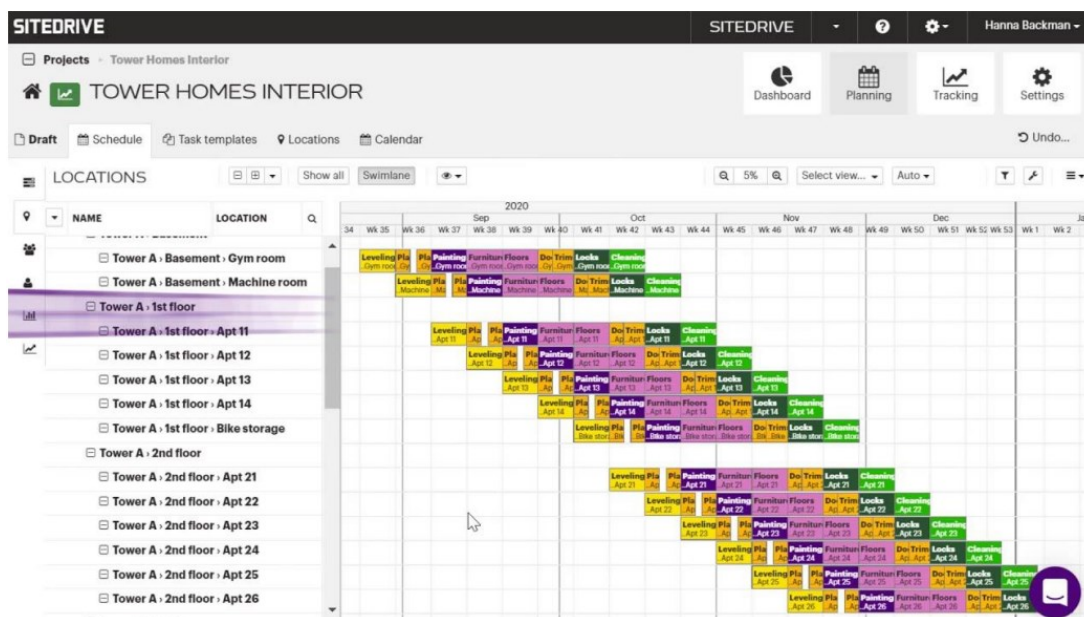
Aikataulutuksen hyödyntämistä halutaan lisätä kehittämällä palveluja kaikkien saataville. Myös aikataulutukseen kehitetään selainpohjaisia versioita, jotta mahdollisimman moni voisi, paikasta ja välineistä riippumatta, hyödyntää reaaliaikaista aikataulua. Selainpohjaisia ohjelmistoja ja mobiiliversioita on mahdollista käyttää esimerkiksi rakennustyömaalla älypuhelimien tai tabletin avulla (Tocoman Tempo).

4.3.1 Digitaaliset menetelmät tahtituotantoon

Rakentamisen tuottavuutta ja tehokkuutta on pyritty parantamaan aikataulutuksen keinoin siirtymällä tahtituotantomalliin. Aikataulutussmallilla voidaan saavuttaa jopa 30–50 % lyhyempi tuotannon läpivientiaika (Mölsä, 2019). Tahtituotannon tarkoituksena ei ole, että työntekijät joutuvat tekemään työtä nopeammin, vaan tavoitteena on vähentää hukkatuntien määrää. Tahtituotanto tekee rakentamisesta systemaattista toimintaa ja sitä voidaan kehittää hankkeista toiseen (Salminen, 2020).

Tahtituotanto perustuu Lean-ajattelumalliin, jota on käytetty teollisuudessa jo pitkään. Tarkoituksena on poistaa lopputuotteenkannalta turhat toiminnot pois prosessista. Parhaiten Lean-ajattelun filosofian ymmärtää muilla teollisuuden aloilla

käytetyn liukuhihnatyöskentelyn periaatteena. Peruskäsitteenä toimii tahtiaika, jolla kuvataan yksittäisen työvaiheen kestoja virtauksena toimivassa tuotannossa. Tahtituotannossa projektin työvaiheet jaetaan samanpituisiksi ”vaunuiksi”, jotka seuraavat toisiaan virtaavasti (Salminen, 2020). Tahtiaikataulua varten on tehty kyseiseen aikataulutukseen soveltuvia ohjelmistoja, mutta saatavilla on myös eri aikataulumalleja yhdisteleviä ohjelmia (Kuva 5).



Kuva 5. Aikatauluohjelmistossa on myös tahtituotannon suunnittelutyökalu (Sitedrive).

Tahtituotannon suunnittelussa on sovitettava tuotannosuunnitelmat yhteen tilaajan tarpeet ja tuotannon kokonaisuuden tavoitteet huomioiden. Avain-asemassa ovat tahtialueen ja -ajan määrittäminen, visuaalinen johtaminen, logistiikan integrointi, suunnittelun ohjauksen integrointi, sekä työntekijöiden perehdytys ja osallistaminen (Salminen, 2020). Tahtituotanto on tarvinnut uusia toimivia digitaalisia työkaluja, jotka palvelevat juuri tätä tuotantojärjestelmää. Digitaalisia apuvälineitä pyritään jatkuvasti kehittämään entistä toimivimmiksi. Rakennuksen tietomalli on hyvä apuväline tahtiaikataulujen laadinnassa, mutta teknologia vaatii vielä kehitystyötä. Tietomalli voi tulevaisuudessa parhaimmillaan sisältää kaiken tahtituotantoon tarvittavan informatiivisen datan visuaalisessa ja koneluettavassa

muodossa, mikä tulee onnistuessaan helpottamaan aikataulunlaadintaa. Tietomallin hyödyntämistä halutaankin lisätä tahtiaikatauluohjelmissa (Granlund).

4.3.2 4D-aikataulu

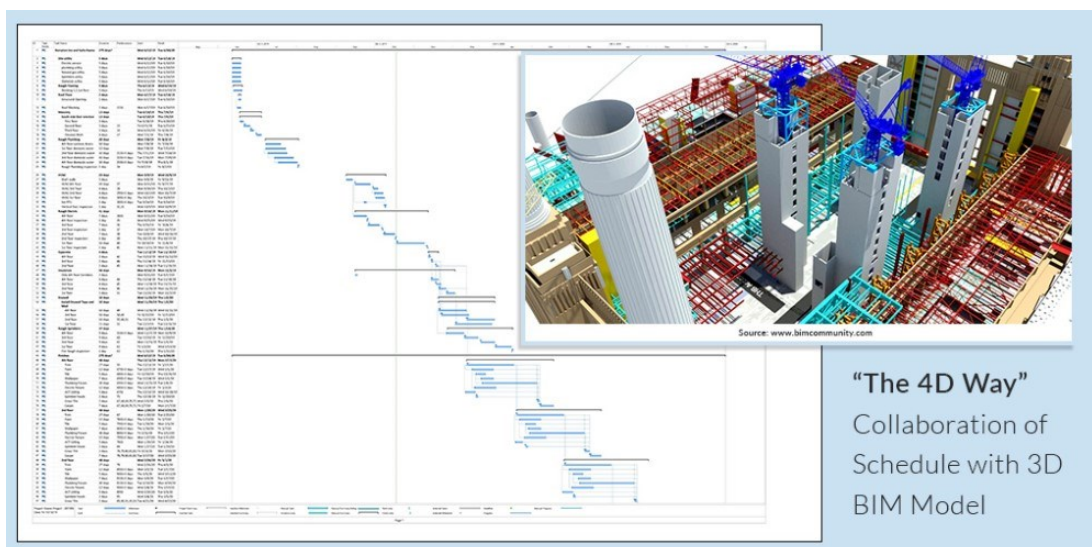
Nykypäivänä 4D-teknologiaa pystytään hyödyntämään aikataulutuksessa. 4D-aikataululla tarkoitetaan tietomalliin linkitettyä aikataulutusta, jonka lähdeaineistona voidaan hyödyntää mitä tahansa IFC-tiedostopohjaista 3D-tietomallia. Tietomalleille asetetut vaatimukset aikataulusuunnittelussa liittyvät pitkälti määrien poimimiseen ja visualisointiin.

Lyhykäisyydessään 4D-aikataulusuunnittelussa IFC-tiedosto syötetään tietomallin rikastusohjelmistoon. Hankkeen menekkitiedot (RATU, LVI-TES, Sähkö-TES, suunnittelutunnit) sekä sijaintitiedot (lohkot, kerrokset, ym.) syötetään ohjelmistoon. Tietomallin rikastaminen standardoi datan, jonka vuoksi lähtötiedot voidaan hyödyntää muissa formaateissa. Rikastettu ICF-malli siis syötetään 4D-aikatauluohjelmistoon. Lopuksi hankkeelle määritellään käytettävä nimikkeistö (Talo2000, LVI2010, Sähkö2010, ARKRAKLVISA2018). Itse aikataulutusta tehdään manuaalisesti määrittelemällä hankkeen etenemisjärjestys, jonka jälkeen rakenneosat liitetään aikatauluun mukaan (RT 10-11072.; Granlund).

4D-aikataulu voidaan tehdä kaikista rakentamisen vaiheista, kuten rakennuksen rungon mallista sekä maanrakennus-, TATE-, sisätyö ja prosessimallistakin. Tietomallin dataa hyödyntämällä pystytään laskemaan aikataulujen pituus, sillä hankkeen määrätiedot saadaan suoraan mallista, eikä niitä ei tarvitse erikseen syöttää aikatauluohjelmaan. Tavoitteena on, että jatkossa datapohjainen aikataulutusta on yhtenäinen prosessi, jossa koko hankkeen aikataulut löytyisivät samasta mallista ja hanke pystyttäisiin ohjaamaan alusta loppuun digitaalisesti (Granlund).

4D-aikataulutuksen etuna on rakennushankkeen kaikkien osapuolien välinen yhteisymmärrys. Visualisointi helpottaa hahmottamista sekä vähentää inhimillisten virheiden ja eriävien tulkintojen mahdollisuutta. Kolmiulotteisuuden lisäksi visuaalisuutta saadaan lisättyä värikkäillä aikaan sidotuilla objekteilla (Kuva 6). Riskit

pienenevät erityisesti monimutkaisissa hankkeissa (Dahlgren, 2017.; Niemi 2021).



Kuva 6. Aikataulun visualisointi auttaa hahmottamaan työmaan tilanteen kolmiulotteisuuden ja värillisten objektien avulla (Verkkolähde).

4D-aikatauluttaminen voidaan aloittaa heti kun ensimmäinen arkkitehdin tilamalli on julkaistu. Paras hyöty 4D-aikatauluttamisesta saadaan, kun aikataulutusta tehdään alusta asti 4D-muotoon, mutta aikataulun toteutus onnistuu myös myöhemmin hankkeen eri vaiheissa. Yleisaikataulun visualisointi auttaa hahmottamaan ongelmakohtat etukäteen, joka vähentää riskiä aikataulun venymiseen ja sitä kautta kustannusten nousuun. 4D-aikataulutusta voidaan kuitenkin hyödyntää myös hankkeen toteutettavuuden varmentamiseen, vaikka rakentamisaikataulu olisi tehty vanhemmalla tekniikalla. 4D-aikataulutusta mahdollistaa tiedon linkityksen, virtauksen ja suunnitelmaratkaisujen vaikutusten havainnoinnin koko rakennusprosessin aikana. Etuna on myös tiedon jäljitettävyyden ja luotettavuuden (Dahlgren, 2017.; Niemi 2021.; Granlund).

Työmaan ohjauksessa 4D-aikataulu on hyödyllinen apuväline, sillä sen avulla pystytään osoittamaan visuaalisesti, kuinka paljon aikaa eri työvaiheiden toteutukseen on varattu ja miten rakentaminen edistyy. Työmaalla ajantasaista ja tarkkaa tietoa voidaan hyödyntää tuotannon suunnittelua ja projektihallintaa varten. 4D-aikataulun luonnissa on tärkeää määrittää aikataulun kannalta oleelliset

työvaiheet. Nämä Keypointeina kuvatut välitavoitteet helpottavat aikataulun jaksoista. Keypointit voidaan määrittellä hankekohtaiseen tarpeeseen (Ratu KI-6031). Olennaista on, että Keypoint auttaa hahmottamaan visuaalisesta 4D-aikataulusta tärkeät etapit, jotka on oltava valmiita ennen seuraavaa työvaihetta.

4D-aikataulua hyödyntäen on mahdollista kehittää projektin vaiheistusta, töiden yhteensovittamista, logistiikan hallintaa, työturvallisuutta ja viestintää. 4D-aikataulu nähdään tehokkaana työkaluna tahtituotannossa. Sen avulla pystytään luomaan luotettava ja ennustettava, vaiheesta toiseen etenevä tilannekuva, jossa tehtävät seuraavat tasaisesti toisiaan. Jokaiselle objektille luodaan työn kesto, jonka avulla malli pystyy kertomaan työn aiheuttamat kuormat työvaiheen ja sijainnin tarkkuudella. Visuaalisuus helpottaa ja nopeuttaa hahmottamista tässäkin. Reaaliaikaista informaatiota antava aikataulumalli tekee myös työn seurannasta helpompaa (Sweco).

Logistiikan hallintaa voidaan yksinkertaistaa hyödyntämällä aikataulun sisältämiä dataa materiaalmääristä. Näin voidaan varmistua, että työmaalla on saatavilla tarvittavat rakennusmateriaalit oikea-aikaisesti. Samalla pystytään hallitsemaan rakennusprosessin materiaalihukkaa.

4D-aikataulutusta voidaan hyödyntää edistämällä työmaan turvallisuutta. Visualisointi auttaa hahmottamaan työmaan eri asennusvaiheiden turvallisuusriskit. Ominaisuuden avulla voidaan helpommin estää esimerkiksi tilanteita, joissa työryhmät työskentelisivät toistensa yläpuolella (Tirunagari, Kone, 2019).

5 Digitaalisuus työmaan tuotannonohjauksessa

5.1 Tietomallinnus apuna työmaan aluesuunnittelussa

Tietomallien yleistyminen on mahdollistanut aluesuunnitelmien toteuttamisen 3D-muotossa. 3D-aluesuunnitelma eroaa tietomallista erityisesti puuttuvien attribuuttien ansiosta, mikä tekee suunnitelmasta sisällöllisesti kevyemmän. Attribuutilla tarkoitetaan objektien, kuten rakennusosien sisältämää tuotetietoa. 3D-

aluesuunnitelmaa voidaan hyödyntää esimerkiksi tuotannon tukena, hankinnoissa ja asiakasviestinnässä. Kolmiulotteisen aluesuunnitelman perusajatuk- sena onkin tuottaa vain visuaalista informaatiota käyttäjälleen. 3D-aluesuun- nitelma havainnollistaa tasopiirustusta paremmin työmaa-alueen, rakennukset ja ympäristön. Kolmiulotteista aluesuunnitelmaa voidaan hyödyntää erilaisten to- teutustapojen- ja ratkaisujen hahmottamiseen alueen suunnittelussa. 3D-alue- suunnitelma auttaa hahmottamaan etukäteen työmaan mahdolliset risteävyydet, riskialueet ja logistiset ongelmakohdat. Työmaan eri elementit, kuten roskalavat ja työmaakontit, saadaan mallinnettua 3D-muotoisina kappaleina helposti tunnis- tettaviksi. Saatavilla on myös 3D-objekteja, jotka luovat todellisentuntuisen kuvan mm. nostureiden ulottuvuuksista. Visuaalinen hahmotus helpottaa aluesuunnitel- man laatimista, kun nähdään selkeästi työmaaelementtien todellinen tilanvaraus- tarve (Huitti, 2016).



Kuva 7. 3D-aluesuunnitelma laadittu SketchUp-ohjelmalla (Trimble)

3D-aluesuunnitelma voidaan laatia esimerkiksi SketchUp Pro 3D -mallinnustieto- ohjelmalla, joka on suunnattu erilaisille piirustustarpeille (Kuva 7). Valmis alue- suunnitelma on tallennettavissa eri tiedostomuotoihin, kuten IFC-tiedostomuotoon. Suunnitelmaa voidaan tarkastella suoraan jo mallinnusohjelmasta käsin,

mutta se on myös ladattavissa muihin ohjelmistoihin. Käytännössä siis 3D-alue-suunnitelman tarkastelu ja käyttö voidaan toteuttaa eri ohjelmalla kuin suunnitelman laatiminen. 3D-aluesuunnitelmaa voidaan esitellä visuaalisesti esimerkiksi raskaammissa mallinnusohjelmistoissa ja projektinhallintatyökaluilla (Trimble).

Kolmiulotteisen aluesuunnitelman pitää sisältää samat tiedot kuin perinteisen 2D-suunnitelman. Olennaista on, että malliin sijoitetut työmaaelementit ovat tunnistettavissa. Nykypäivänä vaaditaan kuitenkin edelleen, että aluesuunnitelma on saatavilla tasopiirustuksena. 3D-aluesuunnitelma on tulostettavissa myös 2D-muodossa, joten samaa suunnitelmaa saadaan hyödynnettyä vaatimuksien mukaisesti. Digitalisaatio mahdollistaa myös hankkeen tietomallin ja 2D-aluesuunnitelman yhdistämisen. Rakennuksen visuaalinen 3D-muoto auttaa tässä tapauksessa työmaa-alueen ja sen ympäristön hahmottamisessa. Tarkastelu ei vaadi toimistoympäristöä, vaan aluesuunnitelmaan voi tutustua myös esimerkiksi projektinhallintaohjelmalla työmaalta käsin (Ratu C2-0454.; RT 10-11078).

3D-aluesuunnitelmaa saadaan hyödynnettyä työmaan palaverissa. Toimistolta käsin päästään tarkastelemaan työmaata todellisen tuntuudessa ympäristössä eri suunnista mallia pyörittelemällä. Kolmiulotteisen aluesuunnitelman hyödyntäminen auttaa esimerkiksi tarkastelemaan logistiikkaliikenteen kulkureittejä ja huomioimaan niin sanotut pullonkaulat hyvissä ajoin. Nostotöiden suunnittelussa useamman nosturin yhteistoiminnan hahmottaminen helpottuu, kun toimintasäde on näkyvillä kolmiulotteisesti (RT 10-11078).

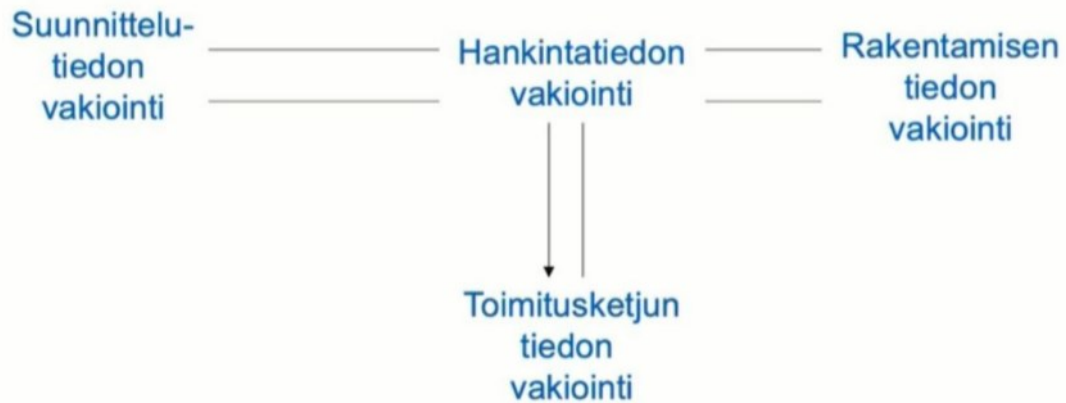
3D-aluesuunnitelman laatiminen on nykyisin saatavilla olevilla ohjelmistoilla työlästä ja vaativaa. Käyttöönottoa hankaloittaa edelleen, että laadintaan on hankittava erillinen ohjelma. 3D-aluesuunnitelman laatimisen hyötysuhteen voidaankin nähdä olevan riittävä vain suurien, haastavien ja logistisesti hankalien rakennushankkeiden osalta. Jotta digitalisaatio saataisiin ulottumaan aluesuunnitteluun laajemmin, on ohjelmistoja kehitettävä käyttäjäystävällisempään suuntaan. Luotettavat ja helppokäyttöiset digitaaliset työkalut ovat tässäkin asiassa avainasemassa (Huomo, 2023).

5.1.1 Aikaulottuvuus lisänä 3D-aluesuunnitelmassa

Kun 3D-aluesuunnitelmaan lisätään aikaulottuvuus, voidaan puhua 4D-aluesuunnitelmasta. Pohjatietoina 4D-aluesuunnitelmaa laadittaessa on hyvä olla yksityiskohtaisesti laadittu digitaalisessa muodossa oleva rakentamisvaiheen aikataulu. Tällä hetkellä aikaulottuvuuden lisääminen ei ole koneluettavasti mahdollista, vaan työ on tehtävä manuaalisesti. Aikaulottuvuuden lisääminen 3D-aluesuunnitelmaan onkin varsin työläs prosessi ja vaatii tiivistä yhteistyötä konevuokrauskumppanien ja logistiikkaurakoitsijoiden kanssa. Aikataulutettu aluesuunnitelma muuttuu työn edetessä luoden reaaliaikaista informaatiota työmaalle. Ajan tasainen tieto työmaalla olevista koneista ja logistiikasta helpottaa työn suunnittelua, tuo ilmi ongelmakohdat sekä parantaa työntekijöiden turvallisuutta (Huitti, 2016.; Huomo, 2023).

5.2 Logistiikan paikannusjärjestelmä

Materiaalilogistiikalla on suuri rooli onnistuneessa tuotannonohjauksessa, mikä linkittyy suoraan rakennusprojektin onnistumiseen. Rakentamisessa työn osuus on erotettavissa materiaaleista jo hankintavaiheessa. Digitalisaatio mahdollistaa logistiikan ohjausprosessin kehittämistä standardoituja tuotetietoja hyödyntämällä. Olennaista on, että rakennus suunnitellaan niillä tuotteilla ja materiaaleilla, joita käytetään myös rakentamisvaiheessa. Tavoitteena on saada koko logistisen hankinnan ketju kulkemaan koneluettavassa muodossa rakennuksen arvoketjun läpi. Prosessi vaatii, että suunnitelmat ovat rakenteellisena koneluettavana tietona tietokannassa, jossa jokaisen tuotteen ja materiaalin tiedot on vakioitu koko toimitusketjulle (Kuva 8). Rakentaminen vaatiikin täsmällistä tuote- ja materiaali- virtojen hallintaa, jotta työmaiden tuottavuus ja tuotannon sujuvuus paranee (Rakennustieto).



Kuva 8. Digitalisaatio vaatii tiedon vakiointia koko rakentamisen arvoketjussa. (Rakennustieto).

Tahtituotannon rantauduttua rakennusalalle on logististen ratkaisujen merkitys korostunut entisestään. Hankintajärjestelmä kykenee tekemään tilaukset automaattisesti suunnitelmatietojen ja tahdin perusteella. Nykypäivänä rakennusosia usein toimitetaan työmaalle esivalmistettuna, ja rakentaminen onkin muuttunut entistä enemmän käsityöstä asentamiseksi. Rakennuskomponentit, kuten betoni- ja kylpyhuone-elementit toimitetaan niin sanottuna täsmätoimituksena eli ne asennetaan suoraan toimituksen yhteydessä. Esivalmisteita hyödyntäen voidaan saada merkittäviä kustannushyötyjä erityisesti epäsuorien kustannuksien osalta. Rakennushankkeissa suurin säästö syntyy lyhentyneenä rakennusaikana (Peltokorpi, Lavikka, Chauhan, 2019). Materiaalitoimituksissa on olennaista huomioida osaratkaisut sopiviksi eri materiaalien ja tuotannon vaiheiden perusteella. Esimerkiksi runkovaiheen toimitukset eroavat pintarakenteiden kuten kalusteiden toimituksista. Pientarvikkeiden nopeaan noutoon on saatavilla toimittajien hallinnoimia työmaavarastoja. Tiedon virtaus vaatii, että jokainen toimitusketjutyyppi on huomioitu tietokannassa (Rakennustieto).

Digitaalisella materiaalitoimituksen ohjausprosessilla on tarkoituksena tähdätä reaaliaikaiseen toimitukseen siten, että materiaali saapuu oikealle henkilölle oikeaan aikaan. Materiaalien paikannusjärjestelmää hyödyntäen on mahdollista analysoida toimintavarmuutta, varastointiaikaa sekä materiaalsiirtoja työmaalla. Materiaaleihin asennetaan esimerkiksi Bluetooth-lähetin, joka välittää

sijaintitietoa reaaliajassa työmaalla oleviin vastaanottimiin ja sitä kautta eteenpäin pilvipalveluun. Logistiikka- ja hankintaprosessin digitalisoinnilla on pyritty parantamaan hankkeen osapuolien kommunikaatiota, ja siten vähentämään inhimillisten virheiden määrää (Peltokorpi, Lavikka, Tetik, 2019).

Rakennustieto kerää parhaillaan kattavaa tuotetietojärjestelmää, jonka on tarkoitus palvella koko rakennuksen elinkaarta. Kehitystyö tähtää siihen, että jokainen rakennusosa- ja materiaali on merkitty standardoidulla tarralapulla. Tuotetiedot ovat luettavissa viivakoodilla kaikissa toimitusketjun vaiheissa. Pitkän ajan suunnitelmana on saada kehitettyä koko rakennusprosessin läpi virtaava tuotetietous, jossa data kulkee tietomallista työmaalle hankinnan ja logistiikan hyödynnettäväksi, sekä myöhemmin rakennuksen ylläpitoon. Täsmälliset osa- ja materiaaliuettelot mahdollistavat tarkan hiilijalanjälkilaskennan ja tuotetiedoista jää luettelo hyödynnettäväksi rakennuksen ylläpitoa varten (Rakennustieto).

5.3 Aikataulujen integrointi ohjaukseen

Monet pitävät hyvin laadittua ja ajantasaista aikataulua työnjohdon tärkeimpänä työkaluna tuotannossa. Aikataulussa pysyminen vaatii työnjohdolta paljon resursseja. Tiedonkulku saattaa toisinaan olla hidasta ja irrallista, ja aikataulu onkin työmaalla monesti pelkästään työnjohdon muistin varassa. Jotta aikataulutuksesta saadaan mahdollisimman suuri hyöty irti, voidaan aikataulutusta integroida ohjaukseen erilaisilla menetelmillä. Yhtenä vaihtoehtona jakaa tietoa avoimesti kaikille rakentamisen osapuolille. Kun aikataulu jaetaan esimerkiksi myös työntekijöille ja aliurakoitsijoille, on työmaan ajankohtainen tilanne myös tekijäosapuolen tiedossa (Sitedrive.; Admicom)

Avoimeen aikataulutukseen on olemassa erilaisia digitaalisia apuneuvoja, joiden avulla aikataulut ovat hyödynnettävissä kaikkien niitä tarvitsevien keskuudessa niin työmaalla, työmaatoimistossa kuin sosiaalituloissakin. Erilaisia aikataulutyyppjä voidaan hyödyntää, kuten esimerkiksi viikkoaikataululla saadaan selkeä kuva lähipäivien tapahtumista. Avoimuus vaatii aikataulun laatijalta ajantasaista ja säännöllistä työtä, jotta tieto pysyy koko hankkeen ajan luotettavana ja siten

käyttökelpoisena. Ajantasaisesti ja riittävän tarkasti laadituilla avoimilla aikatauluilla voidaan jopa parantaa tuotannon virtaavuutta merkittävästi.

5.3.1 Aikataulutus mobiilisovelluksessa

Aikatauluohjelmia voidaan nykypäivänä integroida erilaisiin projektinhallintaohjelmiin. Mobiilisovelluksiin on kehitetty ominaisuus, jossa työntekijät saavat suoraan puhelimeen ilmoituksen seuraavasta aikataulun mukaisesta työtehtävästä. Tarkoituksena on, että työntekijä kuittaa työn tehdyksi ja aikatauluohjelmaan saadaan kirjattua toteumatieto reaaliajassa. Tällä pyritään helpottamaan ja nopeuttamaan työmaan tuotannonohjausta.

Mobiilisovellusta hyödyntämällä työntekijä saa tiedon työn tarkasta sijainnista ja pääsee mahdollisesti tarkastelemaan sovelluksesta riippuen mm. rakenteen piirustuksia 2D- ja 3D-kuvina. Digitaalista apuvälinettä hyödyntäen tieto kulkee yhtä tiedonantokanavaa pitkin johdonmukaisesti sekä avoimesti, ja työnjohto pystyy antamaan toimeksiannon etäältä esimerkiksi työmaatoimistosta käsin. Ominaisuudella pystytään nopeuttamaan tiedonkulkua kiireessä, kun työnjohtolta ei mene aikaa työmaan alueen kiertämiseen ja työntekijöiden etsimiseen (Dalux).

5.3.2 Opastenäytöt

Työmaan aikataulut voidaan integroida opastenäyttöihin, jotka voidaan sijoittaa esimerkiksi työmaatoimistoon ja työntekijöiden taukutiloihin. Opastenäyttöjä on hyödynnetty työmailla jo pitkään, mutta tahtituotannon ja digitalisaation yleistyessä niiden hyötykäytön kohteet ovat moninaistuneet. Näytöillä voidaan näyttää esimerkiksi hankkeen yleisaikataulu, rakennusvaiheaikataulu ja viikkoaikataulu sekä alkavat- ja päättyvät työt. Tahtiaikataulutusessa pohjakuvaan voidaan merkitä tahtialuejako helpottamaan visuaalista hahmottamista (Seppänen, Lappalainen ja muut, 2022). Näytölle saadaan tieto myös ajankohtaisesta resurssitilanteesta, joka auttaa työn toteutuksen suunnittelussa. Visuaalinen viestintä auttaa hahmottamaan nopeasti työmaan tilanteen, eikä työaikaa kulu turhaan tilannekuvan hahmottamiseen (Pehkuri, 2011).

Opastenäyttöjä voidaan aikataulun lisäksi hyödyntää myös muissa tuotannon ohjaukseen liittyvissä asioissa. Aktiivisesti päivitetty opastenäyttö onkin oiva info-tila työmaalla. Opastenäyttöllä voidaan informoida esimerkiksi työmaan tulevista kokouksista ja tapahtumista, henkilöstötiedotteista, työturvallisuudesta sekä aluesuunnitelmasta. Opastenäyttöä voidaan hyödyntää erinomaisesti 3D- ja 4D-aluesuunnitelman esittämisessä. Näyttö on myös hyvä väline palautteiden ja kehitysehdotusten välittämiseen.

Automaattisesti vaihtuvien näyttökuvien sijasta käytännöllisempänä voidaan pitää kosketusnäyttöä. Panostamalla kosketusnäyttöön haluttu näkymä saadaan nopeasti esille ja sitä voidaan tarkastella rauhassa tarvittava aika. Tämä avaa myös mahdollisuuden digitalisaation monimuotoisemmalle hyödyntämiselle, kuten erilaisten sovellusversioiden hyötykäytölle.

Aktiivinen ja reaaliaikainen tiedotus on avainasemassa opastenäyttöjäkin hyödynnettäessä. Tietojen päivittämiselle on hyvä asettaa vastuuhenkilöt, joiden tehtävänä on huolehtia, että kaikki tieto on ajankohtaisesti saatavilla.

6 Paikannusteknologia ja digitaalinen tiedonkeruu

6.1 Paikannusteknologia

Paikannusteknologiaa on hyödynnetty pitkään erityisesti maanmittausalalla. Nykypäivänä rakennustyömailla paikannetaan vielä suhteessa hyvin vähän, mutta kehitys on ottanut suuria harppauksia eteenpäin muun muassa ohjelmistojen ja laitteiden kehityksessä. Paikantamiseen on saatavilla useita eri teknologioita, joista on valittava käytettävään formaattiin sopiva paikannustyyli. Digitalisaatio luo mahdollisuuden myös rinnakkaisten järjestelmien yhteiskäytölle, jolla paikantaminen saadaan sidottua osaksi koko rakentamisen elinkaarta. (Karelia)

Tunnetuimpana paikannusteknologiana GNSS (Global Navigation Satellite System) on koko maailman laajuinen satelliittipaikannukseen perustuva järjestelmä. Satelliittiverkosto lähettää paikka- ja aikatietoja GNSS-vastaanottimiin, joiden

avulla vastaanottimet kykenevät määrittämään tarkan sijaintinsa. GNSS-tekno-
logia vaatii siis esteettömän yhteyden taivaalla oleviin satelliitteihin, joten se ei
luotettavasti sovellu käyttöön sisätiloissa. Haasteita luovat myös esimerkiksi
kaupunkialueilla korkeat rakennukset (Kuusiniemi).

Satelliittipohjainen tarkkuus vaihtelee vastaanottimesta riippuen. GNSS-vas-
taanottimen virhemarginaalia voidaan parhaiten pienentää käyttämällä tilantee-
seen sopivaa suorituskykyisintä vastaanotinta. Suorituskykyä voidaan edelleen
parantaa erilaisilla GNSS-korjausmenetelmillä. Näistä rakennusalalla yhä suosi-
tummaksi on tullut maanpäällisiä referenssiasemia käyttävä RTK (Real-Time Ki-
nematic) sekä teknologiaa hyödyntävä virtuaalinen referenssiverkko VRS (Vir-
tual Reference Station). RTK VRS-verkkoja hyödyntäen voidaan luoda erittäin
tarkkaa tietoa esimerkiksi rakennustyömaan sijainnista ja korkeudesta, sekä
kiinteistöjen rajoista ja topografiasta (Global GPS Systems).

Rakennusalalla voidaan hyödyntää myös muita anturiteknoologiaan perustuvia
paikannusteknologioita. Teknologia voi perustua joko aktiiviseen sensoriin, joka
lähettää signaalia kantaman sisällä vastaanottimelle eli ankkurille tai aktiivispassiiviseen sensoriin, joka saa energiansa lukijan lähettämästä energiapulssista. Tällainen vastaanotin voi olla esimerkiksi RFID-paikannusteknoologiaan (Radio Frequency Identification) tarvittava laite, jota hyödynnetään rakennusalalla esi-
merkiksi käsikäyttöisten työkoneiden paikannuksessa. Passiivisena osapuolena
teknologiassa on paikannettava laite, johon on kiinnitetty esimerkiksi RFID-
tarra. RFID-lukijan ollessa kantaman päässä, paikannusteknologia aktivoituu.
Jatkuvasti aktiivisia paikannussensoreita ovat mm. radiosignaalin kulkuaikaa
perustuva UWB (Ultra-wide Band), beacon-signaaleja lähettävä BLE (Bluetooth
Low Energy) ja internetverkkoon perustuva Wifi-paikannusteknologia (Laakko-
nen, Hirvonen).

6.2 Tietomallipohjainen rakennusmittaus

Rakennusmittauksen digitaalisuus kehittyy jatkuvasti ja tavoitteena on täysin pa-
periton tekeminen. Tietomallin hyödyntäminen mittauksessa vaatii georeferointia,

eli tietomallille on saatava koordinaatit. Käytännössä IFC-malli saadaan yhdistettyä natiivimalliin. Nykypäivän takymetrit osaavat hyödyntää tietomallia, joten mitatut pisteet, linjat ja tasot saadaan suoraan 3D-mallista. Tarkepisteet voidaan puolestaan viedä tietomalliin verraten niitä tavoiteltuihin sijainteihin. Näin huomataan nopeasti, jos mittapisteet poikkeavat suunnitelmista. Kolmiulotteisuuden lisäksi tietomallin hyödyntäminen tekee mittapisteiden ja linjojen määrittelystä suoraviivaisempaa ja helpompaa, sekä lisää ymmärrettävyyttä projektin muille osapuolille (Maanmittauslaitos.; RT 10-11078).

Tietomallin hyödyntäminen rakennusmittauksessa vähentää inhimillisten mittavirheiden sekä virheellisen mittatietojen lukemisen määrää. Mittamies ei ole enää yksin vastuussa mittauspisteiden oikeellisuudesta, vaan tietoja voivat ymmärrettävästi lukea myös hankkeen muut osapuolet, kuten suunnittelijat. Visuaalisuus auttaa hahmottamaan mittapisteiden sijainnit ilman ammatin harjoittamaa silmää tai ymmärrystä mittaamisesta (Lahtinen, 2017).

6.3 Pistepilvi

Pistepilveksi kutsutaan kolmiulotteista aineistoa, joka saadaan koostettua yksittäisistä pisteistä. Nimensä mukaisesti pisteet siis muodostavat kuvatuista rakenteista tiiviin pilven, joka luo kolmiulotteisen tarkan vaikutelman. Esimerkiksi laserkeilaimen tai fotogrammetrian avulla kuvattu pistepilvi voi sisältää miljoonia tai jopa miljardeja pisteitä. Jokaiselle yksittäiselle pisteelle on mitattu omat xyz-koordinaatit. Pistepilvi tuottaakin hyvin tarkan geometrian kuvatusta kohteesta, jopa millimetrien tarkkuudella kuvaustavasta riippuen (Keitaanniemi, 2021). Kolmiulotteisuutensa lisäksi, pisteet voivat kuvaustavasta riippuen sisältää tietoa kohteen intensiteetistä, eli esimerkiksi väreistä, lämmöstä tai kohteen materiaaleista. Pistepilvi on myös mahdollista rekisteröidä haluttuun koordinaatistoon esimerkiksi tähyksiä hyödyntäen (RT 103375. 2021).

Pistepilven laatu vaihtelee kuvaustavasta ja tekniikasta riippuen. Haluttu tarkkuus on usein säädettävissä kuvaushetkellä. Laatuun vaikuttavat pistepilven tiheys, hajonta, intensiteetti ja pisteiden yhdistämistapa. Nykyaikaisella takymetrilla

voidaan myös skannata samankaltaisia pistepilviä, mutta pisteiden määrä rajoittuu muutamista kymmenistä satoihin laitteesta riippuen (RT 103375. 2021).

Pistepilveä voidaan toki hyödyntää sellaisenaan, mutta useimmat sovellukset ja ohjelmistot vaativat pistepilven jatkokäsittelyä. Pistepilven käsittelyyn on tarjolla ohjelmistoja, joissa pistepilveä muokataan pidemmälle lisäämällä siihen tietoa esimerkiksi pintojen muodosta ja etäisyydestä muuhun ympäristöön. Rakennuksen pistepilveä voidaan hyödyntää suunnitteluvaiheesta lähtien, kun pistepilvestä muodostetaan tietomallinnuksessa hyödynnettävä 3D-malli (Kuva 9.; Ilves, 2020).



Kuva 9. Pistepilvestä saadaan luotua tarkka 3D-malli rakennuksesta.

6.4 Laserkeilaus

Laserkeilaus eli 3D-laserskannaus on mittaustapa, jossa kohdetta kuvataan lasersäteiden avulla. Menetelmällä saadaan tuotettua muutaman millimetrin tarkkuudella pisteistä koostuva pistepilvimalli. Tekniikka perustuu lasersäteiden heijastukseen kohteen ja mittaavan laitteen välillä, jonka avulla laite laskee pisteiden sijainnin etäisyyteen perustuen. 3D-skannaus analysoi reaali maailmaa mittaamalla kohteen pinnasta pisteitä ja muodostaa niistä pilven. Yksittäisestä

kuvatusta pisteestä voidaan saada intensiteetti-arvo, joka rikastuttaa pisteen antamaa dataa kertomalla esimerkiksi kohteen materiaalin. Tieto nähdään visuaalisesti erilaisin värein pistepilvimallista. Laserkeilaimet sisältävät lisäksi perinteisiä kameroita, jotka kuvaavat pisteille kohteen luonnolliset värit. Pistepilven dataa tukevan ohjelmiston avulla voidaankin tarkastella kuvattua materiaalia erilaisin kriteerein. Menetelmällä saadaan kerättyä dataa työmaalta nopeasti ja kattavasti. Jo yksi skannaus kattaa ison alueen ja kuvaamalla esimerkiksi rakennusta useasta eri kuvakulmasta, saadaan aikaan massiivinen kolmiulotteinen kokonaiskuva rakennuksen ulkovaipasta (Geotrim.; RT 103133).

Työvaiheittain laserkeilaus tapahtuu kolmessa eri vaiheessa. Ensimmäisenä tehdään itse keilaus, joka on hyvin yksinkertainen ja helposti opeteltava työvaihe. Kun kohde on kuvattu halutuista kuvakulmista, on laserkeilatut aineistot rekisteröitävä yhdeksi pistepilveksi. Kuvattu data siirretään jatkojalostukseen sopivaan ohjelmaan, joka yhdistää pisteet kolmiulotteiseksi pintamalliksi. Vaihtoehtoisesti saatavilla on myös laserkeilaimia, jotka pystyvät rekisteröimään kuvattun materiaalin yhteen aineiston keruuvaiheessa. Laserkeilauksen haasteena on datan suuri määrä, jonka käsittely vaatii kehittyneitä tekniikkaa ja paljon säilytystilaa. Datamäärää ei siis voida sellaisenaan siirtää nykyaikaiseen suunnitteluohjelmistoon, vaan jatkokäsittelyohjelmalla pistepilvi ensin riisutaan turhista pisteistä. Laserkeilaimelle voidaan myös antaa jo lähtötiedoksi eri tarkkuus- ja aluevaatimuksia, jonka avulla pystytään ehkäisemään liian suurta tiedostomäärää. Jatkokäsittelyn jälkeen koneluettava materiaali on valmis siirrettäväksi BIM-ohjelmistoon (Geotrim.; RT 103133).

Pistepilven tuottamasta datasta saadaan tehtyä 3D-malleja ja tarvittaessa myös CAD-piirustuksia. Materiaalia voidaan hyödyntää eri menetelmillä mallinnettujen suunnitelmien. Laserkeilaus takaa lähtötietojen oikeellisuuden, olemassa olevien rakenteiden yhteensopivuuden ja asennettujen rakenteiden mittatarkkuuden.

Skannattu pistepilvi on säilytettävä esimerkiksi ulkoisella kovalevyllä, jotta tietokoneet jaksavat pyörittää dataa ohjelmissa. Pistepilvestä on tärkeää säilyttää kopia, jotta tiedot eivät vahingossa katoa prosessin aikana. Suurien datamäärien

lisäksi, laserkeilauksen ongelmina voidaan pitää laitehankintojen suuria investointeja. Keilatun datan käsittely vaatii asiantuntijuutta erityisesti jatkokäsittelyn osalta. Satsatessa laserkeilattuun materiaaliin, on datan kokonaisvaltainen hyödyntäminen tärkeää. Ohjelmien käytön hallintaan, datan ymmärtämiseen ja käyttökokemukseen on syytä panostaa (Arima 2018).

6.4.1 Skannausmenetelmät

Ilmalaserkeilaus tehdään liikkuvan alustan avulla. Ilmalaserkeilaus onnistuu yksinkertaisimmillaan kädessä pidettävän laitteen avulla, jolloin kuvaus on oivallinen välinen esimerkiksi työmaan dokumentointiin. Rakennustyömailla alustana voidaan käyttää esimerkiksi myös lennokkia eli dronea. Ilmalaserkeilain skannaa ympäristöä luoden siitä UAV-pistepilven. Keilatun datan sijainti paikannetaan tietomalliin joko GNSS-paikantimen, takymetrillä mitattavan sijaintitiedon tai jälkiohjelmoinnin avulla. Keilainta hyödyntäen saadaan helposti ja nopeasti dokumentoitua suuria määriä dataa. Nykyaikaisen ilmalaserkeilauksen pääkomponentteina ovat tehokas kamera, korkean resoluution liDar-skanneri, sekä erilaiset paikannussysteemit (SLAM, IMU, GNSS) ja niiden yhdistelmät (Geotrim.; RT 102275).

Maalaserkeilain on jalustan päältä staattisesti mittaavaa 3D-laserskanneri. Työvaiheena maalaserkeilaus muistuttaakin ulkonäöltään hyvin samannäköisen takymetrin käyttöä, missä keilain skannaa ympäristöään paikallaan. Staattinen laserkeilaus tuottaa tarkimman mahdollisen pistepilven. Staattisessa mittauksessa mittaustapa vaatii, että keilainta siirretään, jotta varjoon jäävät alueet saadaan skannattua. Pistepilvet rekisteröidään koordinaatistoon hyödyntäen esimerkiksi takymetria. Yleisin tapa on hyödyntää taso- tai kolmiulotteisia tähyksiä, joiden avulla skannatut pisteet saadaan yhdistettyä toisiinsa (Heiska, 2010).

6.4.2 Pistepilven hyödyntäminen työmaalla

Pistepilveä voidaan hyödyntää monin eri tavoin rakennushankkeissa. Erityisesti hyöty saadaan irti saneerauskohteissa, joissa alkuperäiset piirustukset ovat

puutteelliset tai kokonaan kadoksissa. Laserkeilaamalla voidaan luoda hyvin tarkat ja luotettavat uudet piirustukset sekä tietomalli kohteen lähtötilanteesta. Kun manuaalinen mittaustarve puuttuu, saadaan säästettyä paljon aikaa ja kustannuksia. Myös asennustyön sujuvuudelle on paremmat edellytykset, kun hankkeen lähtötiedot ovat realistiset eivätkä seuraavat työvaiheet kärsi mittaepätarkkuuksista. Pistepilven visuaalisuutta saadaan hyödynnettyä tarkastelemalla pistepilvimallia ja tietomallia keskenään. Ominaisuutta voidaan hyödyntää esimerkiksi, jos halutaan tarkastella tulevan tekniikan istuvuutta jo olemassa oleviin rakenteisiin, lattioiden ja pystylinjojen suoruutta, rakennuksen laajennuksen istuvuutta ympäristöön jne. Visuaalinen vertailu auttaa myös näkemään mahdolliset päällekkäiset tai muuten ongelmalliset suunnitelmat (Keitaanniemi, 2021).

Pistepilvi mahdollistaa visuaalisten dokumenttien tekemisen projektin eri vaiheista. Piiloon jäävät rakenteet saadaan dokumentoitua esimerkiksi kohdistelulla kuvantamisella tai mobiilikeilauksella nopeasti. Dokumentaatiota voidaan hyödyntää jo rakentamisvaiheessa, kun rakenteiden fyysinen tarkastelu ei enää ole mahdollista. Esimerkiksi tietomalliin tallennettu pohjaviemäreiden ja pumppaamoiden tarkka pistepilvi kertoo luotettavasti ja visuaalisesti rakenteelliset ominaisuudet ja sijainnit senkin jälkeen, kun rakenteet on piilotettu maan alle. Toiseksi esimerkiksi voidaan nostaa alakattorakenteiden ja seinien sisään jäävien talotekniikkaosien sijaintitiedot. Dataa hyödyntämällä saadaan helposti ja nopeasti ratkottua mahdollisia ongelmatilanteita, mutta myös vältettyä niiden syntymistä. Esimerkiksi seinää poratessa voidaan välttyä sähköjohtojen rikkoutumiselta ja niin edelleen. Pistepilvimallien avulla voidaan saada aikaan merkittäviä säästöjä, mikäli rakenteita joudutaan myöhemmin muokkaamaan ja avaamaan. Dokumentoidut rakenteet tuovat hankkeelle myös lisäarvoa, sillä ne ovat erittäin hyödyllisiä tulevaisuudessa rakennushankkeen valmistumisen jälkeen. Pistepilvet saadaan liitettyä alkuperäiseen tietomalliin. Työn edetessä pistepilvet saadaan liitettyä tietomalliin ja näin rikastaa suunnitelmiin perustuva malli realistisella toteutuneella tiedolla (Häyhä, 2018).

6.5 360-kuvantaminen

360-kuvalla tarkoitetaan kuvamateriaali, jolla on kuvannettu koko ympäristö kaikkiin suuntiin yhdellä kertaa. Kuvaustapa mahdollistaa videoiden ja still-kuvien ottamisen. Still-kuvat voidaan ohjelmoida tallentamaan tilannekuva kohteesta halutuin väliajoin. Katsoja voi seurata kuvaa kääntämällä kuvakulmaa haluamaansa suuntaan ja tarkastella siten koko ympäröivää ympäristöä. Etuna on kuvantamisen edullinen hinta, nopeus, helppokäyttöisyys sekä datan keveys. Kuvamateriaalia voidaan tarkastella työmaatoimistolta käsin ja datan avulla voidaankin vähentää turhien työmaakäyntien määrää. Tiedostoja voidaan välittää pilvipalvelun kautta, joten sitä voidaan helposti hyödyntää myös mobiililaitteilla. Työmaan henkilökunta voi tarkastella tiedostoja esimerkiksi mobiilisovelluksella työmaalta käsin. Kuvantamista voidaan hyödyntää myös reaaliaikaisena videomateriaalina, mikä vaatii tietokoneetta ja raskaampien ohjelmistojen kantokykyä (Matveinen, Hirvonen, 2022.; Turunen, 2019).

Laadukas 360-kuvantaminen vaatii hyvät ja valoisa olosuhteet. Yleensä kuvaus tapahtuu hyödyntäen kahta 180 asteen kalansilmäobjektiveja. Nykyohjelmistot mahdollistavat kuvamateriaalin automaattisen yhdistämisen tuottaen 360-muodossa olevan kuvan. 360-kuvauksen mittatarkkuus on huomattavasti heikompi esimerkiksi pistepilveen verrattuna, joten kuvamateriaalia voidaan hyödyntää luotettavasti mittaustarkoituksiin. 360-kuvantaminen on kuitenkin edullinen ja tehokas dokumentointitapa työmaalle, jolla voidaan seurata työmaaympäristöä (Turunen, 2019).

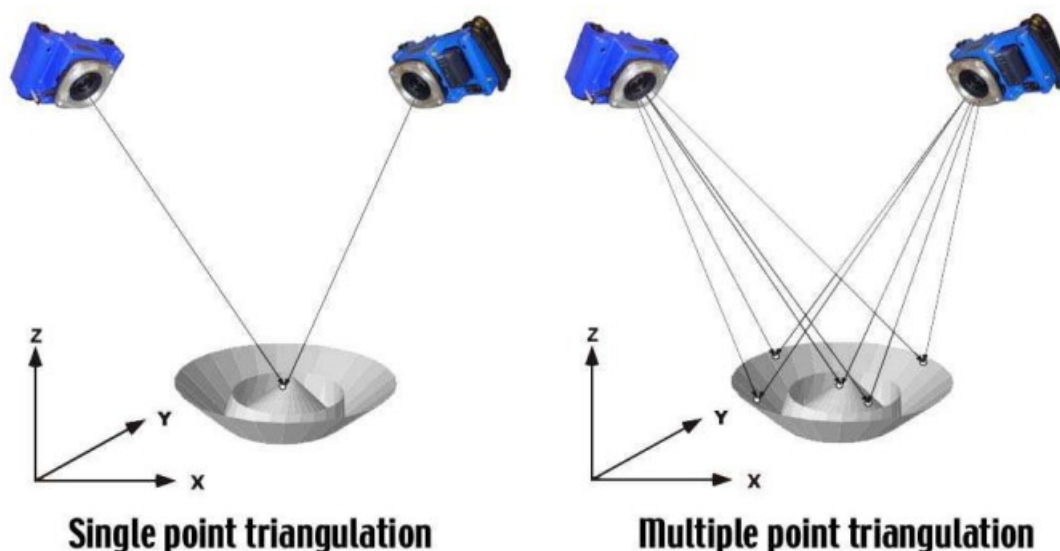
Kuvamateriaalia voidaan hyödyntää monella tapaa luovuutta käyttäen. Työnjohto voi datan avulla tarkastella visuaalisesti työmaan olosuhteita ja edistymistä. Materiaalia voidaan hyödyntää myös yhteydenpidossa hankkeen eri osapuolien kuten suunnittelijoiden, urakoitsijoiden ja tilaajan kanssa. Digitaalinen apuväline mahdollistaa havainnollisen kuvan todellisuudesta ilman turhia työmaakäyntejä. 360-kuvantaminen on erinomainen keino työmaan kattavaan dokumentointiin ja kuvaustapa tuottaakin huomattavasti kokonaisvaltaisemman datan rakennustyömaan todellisesta tilanteesta perinteiseen kuvaukseen verrattuna. 360-

kuvauksella voidaan kuvata esimerkiksi piiloon jääviä rakenteita ja luovutusvaihetta sekä hyödyntää kuvamateriaalia työtaturma- ja vahinkotilanteiden hahmottamisessa jälkikäteen. Kuvamateriaalin visuaalisuutta voidaan hyödyntää myös työmaalle perehdyttämisessä (Matveinen, Hirvonen, 2022).

6.6 Fotogrammetrinen skannaus

Fotogrammetrialla tarkoitetaan valokuvaukseen pohjautuvaa menetelmää, jolla kohteesta saadaan luotua kolmiulotteisia mallinnus- ja mittaustietoja etäisyyksiä mittaamalla. Teknologia muuttaa 2D-kuvat takaisin 3D-muotoon, ja fotogrammetriaa voidaankin pitää valokuvauksen käänteisenä prosessina. Menetelmän avulla saadaan dokumentoitua kohteen geometriset suhteen kuvanottohetkellä. Fotogrammetria vaatii useamman, vähintään kaksi kuvauskertaa eri kuvakulmista, jotta todellisuutta vastaava kolmiulotteinen malli saadaan tehtyä (RT 103132).

Fotogrammetria tarvitsee lähtöpisteen koordinaattien selvittämiseksi. Fotogrammetrisen skannauksen edetessä menetelmä hyödyntää kolmiomittausta saadaksesen kuvamateriaalin samaan 3D-koordinaatistoon lähtöpisteen kanssa. Menetelmässä hyödynnetään tilassa olevia leikkaavia linjoja, joista saadaan kuvaamalla skannattua koordinaattipisteet. 3D-mallinnukseen käytetään SfM- (Structure from Motion) ja Multi-view Stereo Reconstruction -menetelmiä, jotka perustuvat kuvien kalibrointiin (Kuva 10). Mitä enemmän keskinäistä kuvapeittoa valokuvien välillä on ja mitä runsaammin kuvamateriaalia on kerrytetty, sitä paremalla todennäköisyydellä kuvamateriaali saadaan orientoitua keskenään. Fotogrammetrinen ohjelma kykenee käsittelemään prosessissa saadun tiedon automaattisesti liittäen skannauksessa saadun tiedon koordinaatistoon (RT 103132).



Kuva 10. Fotogrammetrisessa 3D-mallintamisessa kuvien kalibroinnilla saadaan taltioitua yhteisiä pisteitä, joilla kuvamateriaali saadaan koordinaatistoon (Gan-cell).

Valokuvaus voidaan suorittaa ilmakuvauksena ja lähifotogrammetriana. Ilmakuvauksessa hyödynnetään yleensä dronea tai vastaavaa laitetta, joka varustetaan riittävän laadukkaalla digitaalisella järjestelmäkameralla. Lähifotogrammetria poikkeaa ilmakuvauksesta vain siten, että valokuvaus suoritetaan käsin tai kolmijalkaa hyödyntäen. Fotogrammetrian luoman aineiston pohjalta saadaan kohteesta luotua pistepilvi. NykYTEknologia mahdollistaa tarkat tietokoneohjelman luomat kuva-aineistojen 3D-mallinnukset yhdistelemällä eri kuvaustapojen pisteaineiston (RT 103132).

Tilat voidaan skannata 3D-malliksi, jossa pystytään liikkumaan hyödyntämällä tietomallia tukevaa ohjelmaa. Tuloksena saadaan todellisen näköistä, melko nopeasti kuvattavaa dataa ja helposti jaettavaa näkymää, jota voidaan hyödyntää työmaalla. Omimmillaan skannausmenetelmä on kuitenkin vanhojen rakennusten ja rakenteiden dokumentoinnissa ennen korjaustöiden suunnittelua (Tietoa).

Haasteena fotogrammetrisessa skannauksessa on tuotetun kuvan epätarkkuus, laatu ja kuvaamisen monimutkaisuus verrattuna muuhun kehittyneempään kuvantamisteknologiaan nähden kuten laserkeilaukseen nähden. Fotogrammetrian

avulla voidaan luoda 3D-mallien lisäksi myös esimerkiksi karttoja ja piirroksia (RT 103132).

6.6.1 Matterport-syvyyskamera

Syvyyskamera Matterport perustuu fotogrammetriaan. Kamera hyödyntää etäisyyksien mittaamiseen infrapunasyvyysmittausta, jonka avulla luodaan 3D-geometria. Matterport-menetelmän avulla saadaan luotua pilvipalvelun kautta toimiva fotorealistinen 3D-pistepilvimalli tilasta liittäen 3D-geometrian päälle valokuvista saadun tekstuurin. Kuvamateriaali antaa hyvin realistisen 3D-kokemuksen kuvasta tilasta, sillä sen sisällä voidaan niin sanotusti kävellä (Kuva 11). Matterport teknologiaa voidaan katsella myös VR-lasien välityksellä (Särkimäki, 2021.; Geotrim).



Kuva 11. Matterport-teknologialla voidaan kuvata fotorealistinen 3D-pistepilvimalli, jonka sisällä voidaan "kävellä".

Työmaalla Matterport-teknologialla kuvattua 3D-mallia voidaan hyötyä käyttää muiden kuvaustapojen tyyliin monipuolisesti. Tekniikka kuvaa realistista

näkymää, joka kerää arvokasta dokumentointia työmaan tilanteesta. Matterport-menetelmä on erinomainen väline, kun halutaan esitellä työmaata hankkeen muille osapuolille, kuten tilaajalle, käyttäjille tai esimerkiksi asunnon ostajille työmaan loppuvaiheessa. 3D-tilaesitys luo todentuntuisen kuvan realistisesta maailmasta. Teknologiaa hyödynnetäänkin usein asuntomyynissä, sillä se antaa katsojalleen mahdollisuuden kuvitella tilat valmiina (Särkimäki, 2021.; Geotrim).

Masterport-tekniikalla kuvattua dataa voidaan hyödyntää myös mittatyökaluna etäisyydestä ja tarkkuustarpeesta riippuen katseluohjelmassa. Kahdeksan metrin matkalla mittaustuloksen tarkkuus on noin 2–4 cm. Tekniikka ei aivan pärjää tarkkuudessaan esimerkiksi edistyneelle laserkeilaukselle, mutta sitä voidaan kuitenkin hyödyntää valtaosaan mittaustarpeista. Tekniikalla tuotettu 3D-malli voidaan hyödyntää ennen rakentamista suunnittelijoiden pöydällä, sillä se on siirrettävissä ja muokattavissa esimerkiksi Revit suunnitteluohjelmaan, mutta sitä voidaan käyttää myös kohteen luovutuksen jälkeen virtuaalisena huoltokirjana. Matterport-kuvaus mahdollistaa myös korkearesoluution pohjapiirroksia (Särkimäki, 2021.; Geotrim).

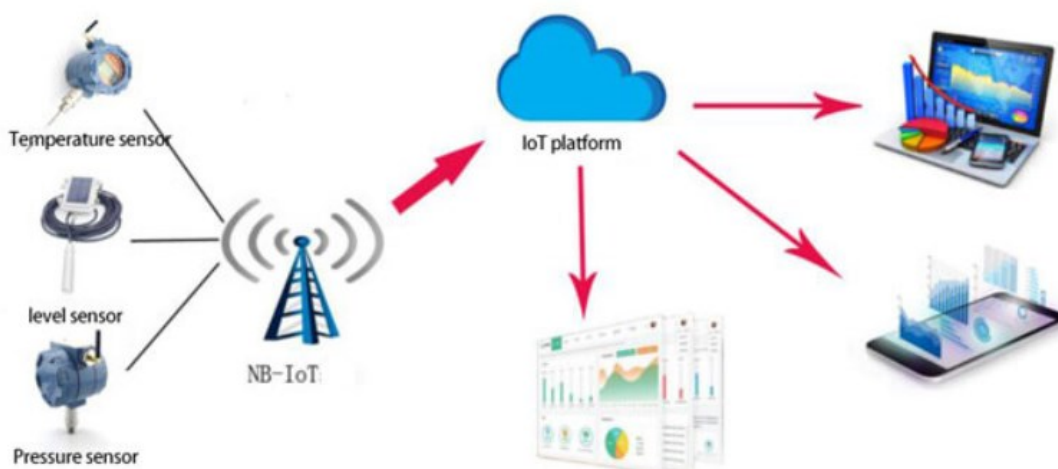
6.7 Autonominen tiedonkeruu

Valtaosa työmailla tapahtuvasta tiedonkeruusta tapahtuu edelleen manuaalisesti. Järjestelmät vaativat ihmisen syöttämään tietoja järjestelmään tai olemaan läsnä laitteistojen ja koneiden ohjauksessa. Rakennusalalla on kuitenkin yleistymässä automaattinen tiedonkeruu, joka mahdollistaa datan keräyksen ilman ihmisoperaattorin apua.

Autonomisen tiedonkeruun avulla pyritään vaikuttamaan työmaan tuottavuuteen. Teknologian avulla voidaan mahdollistaa jatkuva ja väsymätön tasalaatuisen datan keruu, jota saadaan hyödynnettyä tarvittaessa reaaliajassa työmaalla. Materiaalia voidaan hyödyntää esimerkiksi tilannekuvan luomiseen, dokumentointiin ja työturvallisuuteen. Autonomisen tiedonkeruun menetelmän valintaan vaikuttavat käyttökohde, kuvaustarpeen määrä, tarvittava mittatarkkuus ja datan säilytyskapasiteetti.

6.7.1 IoT-sensorit

IoT eli esineiden internet (Internet of Things) on järjestelmä, joka perustuu esineiden, palvelujen, ohjelmistojen sekä järjestelmien yhteen liittämiseen internetin avulla. IoT-sensorien käyttö perustuu paikannusteknologiaan, jossa sensorit lähettävät tietoa kantama-alueen sisällä olevaan vastaanottimeen eli ankkuriin. IoT-sensorit lähettävät dataa sijaintitietoineen automaattisesti ja reaaliajassa etä-seurantajärjestelmään pilvipalvelun avulla (Kuva 12). Pilveen tallennettu data mahdollistaa järjestelmän toimivuuden massiivisesta data- ja käyttäjämäärästä riippumatta. Mittausantureiden automatisaatio säästää aikaa ja vähentää inhimillisten virheiden mahdollisuutta. Mittausmenetelmät ovatkin kehittyneet valtavasti viime vuosien aikana ja kehitys on mahdollistanut entistä luotettavampia ja monipuolisempia järjestelmiä rakennusalan käyttöön (Kuismin, 2018., Shandong Renke, 2023).



Kuva 12. IoT-sensorit keräävät tietoa ympäristöstä ja lähettävät dataa pilvipalvelun välityksellä ohjelmistoihin (Shandong Renke).

Esineiden internet hyödyntää erilaisia 3G-, 4G- ja 5G-verkkoja, kuten esimerkiksi koko maan kattavaa LoRaWan (Long Range Wide Area Network) -teknologialla toimivaa verkkoa. LoraWan-teknologia on kehitetty varta vasten IoT-järjestelmälle, ja se mahdollistaa luotettavan kaksisuuntaisen datasiirron langattomasti pitkän kantaman päähän. Ominaisuus mahdollistaa lot-ratkaisujen

monipuolisen, laadukkaan ja luotettavan hyödyntämisen rakennushankkeissa. Käyttökohteita voivat olla esimerkiksi olosuhteiden seuranta, esineiden paikantaminen sekä työmaan turvallisuus ja kulunvalvonta (Shandong Renke, 2023)

IoT-sensoryyppettä on kehitetty monenlaisia, jotta ne soveltuvat eri käyttötarkoituksiin. Sensori voi toimia tunnistuen esimerkiksi lämmön, kosteuden, paineen, kaasun, valon tai läheisyyden. IoT-teknologiaa lukevia sovelluksia kehitellään jatkuvasti rakennusalan käyttöön. Jokainen mittaustapa vaatii sovelluksilta erilaisia ominaisuuksia, jotta ne kykenevät vastaanottamaan sensorien lähettämää dataa. Nykypäivän kehityksen trendinä voidaan nähdä eri ominaisuuksien yhdistäminen saman ohjelmiston alle. Tavoitteena on, että dataa voidaan lukea reaaliajassa sovelluksesta niin mobiililaitteilta kuin tietokoneelta (Shandong Renke, 2021).

6.7.2 Ilmakuvaus

Multikopterilla eli dronella tarkoitetaan pientä miehittämätön kauko-ohjattavaa alusta, jolla pystytään muun muassa kuvantamaan ympäristöä. Dronet ovat varsin suosittuja niin yksityishenkilöiden kuin yritysten käytössä, ja digitalisaation kehitys on tuonut dronet myös rakennustyömaiden yläpuolelle. Dronejen tuottamaa kuvamateriaalia voidaan hyödyntää rakennusallalla monipuolisesti hankkeen eri vaiheissa. Digitalisaation kehitys on mahdollistanut entistä paremman hyödyntämyksen parantamalla nelikoptereiden akkutehoa, tiedonsiirtonopeutta, käyttämällä korkealaatuisia kameroita, sekä helpottamalla ohjattavuutta ja koneen vauriokautta.

5G-verkkojen yleistymisen myötä teknologia kykenee tarjoamaan aiempaa tehokkaamman tiedonsiirron drone-sovelluksille. Nopea, luotettava ja tarkka data palvelee rakennusalan tarpeita ja tarjoaa mahdollisuuden teknologian laajemmalle hyödyntämiselle. 5G-verkko mahdollistaa reaaliaikaista dataa keräävät autonomiset drone-lennot, jotka tekevät navigoinnista tehokasta ja turvallista ilman ihmisoperaattoria (Frąckiewicz, 2023).

Ilmakartoitukseen on saatavilla erilaisia sensoreita, joista tyypillisimpiä rakennus- alalla ovat kamerat ja laserkeilaimet. Nykyteknologia täyttääkin rakennusalan tarpeisiin soveltuvien ilmakehuvaussensorien kriteerit. Tarjolla on korkealuokkaisia kevyitä kameroita, joissa esimerkiksi objektiivin piirtokuvatarkkuus, kuvausgeometrian vakaus ja valovoimaisuus ovat huippuluokkaa. Lennokki voidaan varustaa myös tehokkailla ja kevyillä laserkeilaimilla, jotka sisältävät muun muassa skannausominaisuuden ja georeferointijärjestelmän. Multikopterin käyttö pistepilven luomiselle on kilpailukykyinen perinteisempien kuvausmenetelmien rinnalla (Geotrim.; RT 103132).

Ilmakehuvaus soveltuu erityisesti vaikeakulkuisille laajoille maastoalueille, joten lennokkien käytön koetaan olevan hyödyllisimmillään infra- ja teollisuusrakentamisessa. Suurten alueiden kuvantamiseen on saatavilla myös kiinteäsiipisiä ratkaisuja, jotka soveltuvat erityisesti näköyhteyden ulkopuolella tähtäävään luvanvaraiseen lentämiseen. Lennokkien käytössä on otettava huomioon, etteivät esimerkiksi tiheä ja korkea kasvillisuus häiritse kuvamateriaalin luomista (Geotrim).

Ilmakehuvausta voidaan hyödyntää kuitenkin myös erinomaisesti talonrakennushankkeissa. Ketterä multikopteri soveltuu paremmin rakennustyömaiden ilmakehuvaukseen. Erityisesti suuret rakennushankkeet hyötyvät lennokkien kyvystä kuvata esteettömästi laajoja alueita, joihin ihmisen on vaikea päästä yhtä nopeasti ja vaivattomasti. Korkeiden rakennusten julkisivut ja katot saadaan kuvannettua näppärästi ja turvallisesti ilman, että joudutaan vuokraamaan kalliita nostoapuvälineitä (Geotrim). Droneja voidaan hyödyntää myös esimerkiksi vanhojen rakennusten kuntoarvioinnissa ja rakenteiden dokumentoinnissa. Dronejen hyötykäytölle ei ole rajoja, vaan niiden käytöstä nähdään valtava potentiaali rakennushankkeille. Luovuutta käyttämällä niitä voidaan hyödyntää hyvinkin monipuolisesti rakentamisessa.

Tärkein hyöty ilmakehuvauksen käytössä on nopeus, jolla saadaan reaaliaikainen tieto työmaan tilanteesta. Työnjohtajat saavat hyödynnettyä arvokasta dataa hankkeen läpiviemisen tukena. Dronen keräämää kuvamateriaalia voidaan käyttää työmaan tilannekuvan luomisen apukeinona. Tilannekuvasta luodaan 3D-

malli eli pistepilvi, johon saadaan yhdistettyä valtava määrä valokuvia ja tarkkoja sijaintitietoja. Jokaisesta kuvauskerrasta jää talteen dokumentaatio, jota voidaan hyödyntää vuosien jälkeenkin. Dronen avulla pystytään kuvata asioita, jotka muuten jäisivät helposti dokumentoimatta. Tämä hyödyntää esimerkiksi piiloon jäävien rakenteiden, kuten putkien paikantamista jälkikäteen tarkkoja koordinaattitietoja hyödyntäen (Geotrim.; Frackiewicz, 2023).

6.7.3 Robottikoira

Työmaan tiedonkeruuta on haluttu tehostaa digitalisaation kehittyessä uusilla apuvälineillä. Autonominen tiedonkeruu sisätiloissa luo kuitenkin haasteensa alan kehitykselle. Robottikoira Spot on yksi Aalto-yliopiston Building 2030 -konsortion tutkimushankkeista, jolla halutaan testata tiedonkeruun automatisointia työmaaolosuhteissa.

Huipputeknologiaa edustava robottikoira kerää dataa kuljettamansa laserkeilaimen, 360-kameran ja ohjausyksikön avulla. Robottikoiralle ohjelmoidaan tarkka reitti, jota se osaa kulkea ilman ihmisoperaattorin apua autonomisesti. Laserkeilain skannaa reitin varrelta pistepilven millimetrien tarkkuudella. Keilaamalla saatu data muodostaa keilausmenetelmien tavoin pistepilven eli 3D-mallin, jonka data saadaan taltioitua pilveen (BuildinPoint.; Aalto-Yliopisto.; Skanska 2021).

Autonomisen robotiikan tuominen rakennusalalle vaatii teknologialta huippuunsa vietyä osaamista. Robottikoira osaa kulkea työmaan epätasaisilla alustoilla väistellen esteitä, nousta portaita ja käyttää jopa puheohjattua hissiä (Kuva 13). Robottikoiralle on saatavilla lisävarusteena myös käsi, jolla se osaa avata ovia ja poimia esineitä. Lisävaruste mahdollistaa myös pienten esineiden kuljettamisen (BuildinPoint.; Aalto-Yliopisto.; Skanska 2021).



Kuva 13. Robottikoira Spot osaa käyttää jopa puheohjattua hissiä rakennustyömaalla (Kone).

7 Työmaan tilannekuvan ja laadun hallinta

7.1 Tilannekuvan määritelmä

Työmaan kattavalla ja reaaliaikaisella tilannekuvalla on suuri rooli rakennusprojektin onnistumiselle. Työmaan tilannekuvalla tarkoitetaan tietyllä ajanhetkellä vallitsevaa tietämystä työmaan olosuhteista ja niiden oletetusta kehityksestä verrattuna suunniteltuun tilanteeseen. Rakennusprojekteissa tilannekuvalla pyritään seuraamaan muun muassa aikataulua, laatua, kustannuksia sekä työturvallisuutta. Ajantasaista tilannekuvaa voidaan hyödyntää poikkeamien ennakoimisissa ja korjaavien toimenpiteiden toteuttamisessa. Ennakoitu tieto auttaa viestimään ongelmatilanteista ajoissa, jolloin tilanteet on ehkä mahdollista ratkaista ennen kuin niistä koituu haittaa projektin läpiviennille (Seppänen, Lappalainen ja muut. 2022).

Työmaan läpivienti sisältää paljon päätöksentekoa hankintoihin, aikataulujohtamiseen, logistiikkaan, laadunhallintaan, työturvallisuuteen, olosuhteidenhallintaan sekä resurssihallintaan liittyen. Työvaiheiden ennakointi, työn edistymisen

seuranta ja valvonta vaativat jatkuvaa reaaliaikaista tilannekuvan luomista, jotta oikeita päätöksiä osattaisiin tehdä oikeaan aikaan. Työnjohdon on osattava ottaa samanaikaisesti huomioon laaja kirjo erilaisia työn mahdollistamiseen liittyviä vaikuttimia. Työmaalla on useimmiten samanaikaisesti menossa lukuisia eri työvaiheita, joissa jokaisessa on omat työntekijänsä ja materiaalinsa (Seppänen, Lappalainen ja muut. 2022).

Ajantasaista tilannekuvaa hyödyntäen voidaan varmistaa, että työnvaiheen aloitus sujuu ongelmitta ja työ saadaan suoritettua laadukkaasti ja turvallisesti aikataulun puitteissa. Reaaliaikainen tilannekuva on mainio apuväline rakennusprojektin hukan vähentämiseksi. Sujuvan työn tekemisen edellytyksenä on, että tieto, henkilöresurssit, materiaalit ja työkalut ovat oikeassa paikassa oikeaan aikaan. Työnsuorittamiselle on taattava myös turvalliset ja terveelliset olosuhteet. Tilannekuva auttaa huomioimaan työturvallisuuteen vaikuttavat riskitekijät, jolloin niihin voidaan reagoida välittömästi. Henkilöturvallisuuden lisäksi siisti ja turvallinen työympäristö vaikuttaa myös ajalliseen ja laadulliseen rakentamiseen. Ajantasaista tilannekuvaa hyödyntäen voidaan varmistaa, että työvaihe pääsee alkamaan sujuvasti siivotulla alueella, jossa jo edeltävä työvaihe on saatettu loppuun. Samanaikainen työskentely hidastaa ja hankaloittaa työn suorittamista, jolloin myös työn laatu ja laadunvalvonta helposti kärsivät. Tilannekuvan on oltava kattava, jotta kaikki olennainen tieto on hallussa ja työn suoritukselle on edellytykset. Rakentamisessa on otettava myös materiaali- ja sääolosuhteet huomioon. Monet materiaalit ja työvaiheet vaativatkin olosuhteiden mittausta ja hallintaa, esimerkiksi betonin kosteuden osalta ennen pinnoitusta (Seppänen, Lappalainen ja muut. 2022).

7.2 Digitaalinen tilannekuva

Perinteisesti tilannekuvan luominen perustuu pitkälti havainnointiin, muistiin ja sosiaaliseen tiedonjakamiseen. Tiedonvälitysmenetelminä käytetään pääasiassa kokouksia, sähköpostia, puhelinviestintää ja dokumentointia. Tällä tavalla rakennushankkeiden valtavaa tietomäärää on kuitenkin hyvin vaikea hallita, eikä tieto pääse virtaamaan hankkeen kaikille osapuolille. Myös ihmisten kyky havaita,

omaksua ja hyödyntää tietoa vaihtelee. Havaintoihin perustuvia digitaalisia järjestelmiä on saatavilla ja niiden hyödyntäminen on rakennusalalla yleistä nykypäivänä. Yleisimpinä työkaluina on laadunhallintaan ja työturvallisuuteen kehitetyt mobiilisovellukset sekä aikatauluohjelmistot. Tällaisille digitaalisille työkaluille on ominaista, että ihmisen täytyy syöttää tiedot, kuten teksti- ja kuvadata järjestelmään manuaalisesti. Dokumentaatio ei kuitenkaan yleensä ole koneluettavassa muodossa, joten tietoa saadaan hyödynnettyä ainoastaan projektin sisällä (Seppänen, Lappalainen ja muut. 2022).

Nykypäivänä teknologiaa pyritään kehittämään automatisoitua tilannekuvaa kohti. Erityisesti rakentamisen nykytrendinä toimiva tahtituotanto vaatii uusia keinoja toimiakseen ja tilannekuvaa analysoimalla pyritäänkin keräämään tietoa tahtituotannon kehittämistä varten. Jo nyt on saatavilla digitaalisia apuvälineitä, joissa tilannekuva luodaan erilaisia digitaalisia tiedonkeruumenetelmiä hyödyntäen. Tilannekuvan digitaalisten apuvälineiden kehitystyö on kuitenkin kesken, eikä datan automaattiseen analyysiin kykeneviä sovelluksia ole juuri saatavilla. Kehittyessään digitalinen tilannekuva voi tulevaisuudessa mahdollistaa parhaimmillaan tiedon avoimen virtautuksen läpi koko rakennuksen elinkaaren ja dataa voidaan hyödyntää tulevien projektien suunnittelussa. (Seppänen, Lappalainen ja muut. 2022)

7.2.1 Mobiilisovellukset laadun ja työturvallisuuden hallintaan

Työmaalla laatua ja työturvallisuutta on pyritty parantamaan digitaalisilla työkaluilla ja paperidokumentoinnista on haluttu päästä eroon. Laatu- ja turvallisuushavaintojen tekemistä varten on olemassa useita mobiilisovelluksia, jotka ovat jo laajasti käytössä rakennustyömailla. Datan dokumentointi pilvipalveluun mahdollistaa reaaliaikaisen tiedonkulun projektin sisällä. Laadunhallintaohjelmat auttavat työmaan toimihenkilöitä saamaan ajantasaista tietoa työmaan tilanteesta, jolloin poikkeamiin on helpompi reagoida nopeasti (Peltokorpi, Lehtovaara ja muut, 2022).

Saatavilla olevat sovellukset ovat toiminnoiltaan hyvin samankaltaisia. Niiden pääperiaatteena on dokumentoida työmaalla tehdyt havainnot, kirjaukset ja korjaukset sekä sisällyttää niihin muun muassa paikka- ja aikatieto. Sovellukseen ladataan työmaan pohjakuvat, detaljit, erilaiset tarkastuspohjat ja mahdollisesti 3D-mallinnus rakennuksesta. Softasta riippuen paikkatiedot voidaan kirjata pohjakuvaan tai lisäksi 3D-mallissa olevaan objektiin, mikä auttaa visuaalisesti hahmottamaan havainnon sijainnin. Tehtyjä havaintoja saadaan suodatettua esimerkiksi huoneisto-, kerros-, ja lohkokohtaisesti. Havaintoihin saadaan liitettyä myös työstä vastaava urakoitsija. Tehdyt kirjaukset saadaan lähetettyä reaaliajassa työmaalta käsin työstä vastaavalle henkilölle suoraan sovelluksesta sähköposti-raporttina. Mobiilisovelluksella tehty dokumentointi säästää aikaa sekä helpottaa havaintojen paikantamista ja raporttien tarkastelua. Mobiilisovellukseen voidaan tehdä erilaisia tarkastuslistoja helpottamaan muun muassa työnjohdon valvontaa. Tarkastuslistoja voidaan tehdä erilaisiin työvaiheisiin ja urakoihin, kuten osakohteentarkastuksiin ja itselleluovutukseen (Peltokorpi, Lehtovaara ja muut, 2022). Työturvallisuushavainnot saadaan kirjattua ylös, jolloin tieto välittyy eteenpäin ja puutteisiin voidaan reagoida nopeasti. TR-mittaukset eli työturvallisuusmittaukset saadaan dokumentoitua pilvipalveluun, ja niistä kertynyttä dataa voidaan tarkastella yritystasolla. Mobiilisovelluksella tehtyä Tr-mittausta voidaan pitää onnistuneena toimintamallina, sillä tiedonkeruutapa on hyvin pitkälle vakioitunut käytäntö rakennusalalla ja koneluettavia mittaustuloksia voidaan hyödyntää koko organisaatiossa (Peltokorpi, Tikka ja muut. 2022.).

Mobiililaitteille suunnatut sovellukset helpottavat reaaliaikaista tietovirtaa, kun ohjelmia voidaan hyödyntää sekä työmaalta ja toimistosta käsin. Mobiilisovelluksista on saatavilla myös selainversio. Jos eri urakoitsijat saadaan käyttämään samaa softaa, on tiedonvaihto sujuvampaa ja toiminnan läpinäkyvyys paranee koko hankkeessa. Jotta kaikki urakoitsijat olisivat valmiita sitoutumaan ohjelmistoon, on hyödyllisyys ja käyttökokemus ensisijaisen tärkeitä alasta riippumatta. Selainpohjaisuus ja mobiililaitteiden sovellusversiot ovat nykypäivän trendejä, jolla pyritään tekemään työskentelystä paikasta riippumatonta. Ohjelmistojen pilvipohjaisuus mahdollistaa tietomallien ja tiedostojen hyödyntämisen kuormittamatta laitteen kapasiteettia (Dalux).

7.2.2 Datapohjainen oppiminen ja laatupankit

Rakennusprojekteissa samat prosessit toistuvat työmaalta toiselle, mutta tieto ei kuitenkaan liiku systemaattisella tavalla uusille hankkeille. Samat oivallukset ja virheet toistuvat yrityksen ja toimialan sisällä, sillä oppiminen jää helposti yksilötasolle ja arvokasta tietoutta jää hyödyntämättä. Rakennusprojektin aikana laatua on tavanomaisesti mitattu ja analysoitu pääasiassa vain luovutusvaiheessa, jolloin valtava määrä tietoa jää hyödyntämättä, sekä rakentamisen, että takuun ajalta. Jotta tieto pääsee virtaamaan koko rakentamisen arvoketjussa, on rakennusalan panostettava tapoihin kerätä, analysoida, tallentaa sekä jakaa dataa (Peltokorpi, Lehtovaara ja muut, 2022).

Digitalisaation yleistymisen myötä kerätyn datan määrä on lisääntynyt valtavasti rakentamisessa, ja esimerkiksi laatuhavaintoja dokumentoidaan runsaasti. Tulevaisuudessa teknologia mahdollistaa datan automaattisen analysoinnin ja laadunvarmistuksen tekoälyn avulla. Tutkimuksen mukaan rakennushankkeissa tulisi hyödyntää datapohjaista kaksikehäistä oppimista, jonka avulla kerättyä dataa voitaisiin hyödyntää paremmin, niin rakennusprojektin sisällä, kuin koko organisaatiossa laatimalla merkittävistä laatuvirheistä juurisyyanalyyssejä. Dataa hyödyntämällä on mahdollista välttää samojen virheiden toisto uusien hankkeiden kanssa (Peltokorpi, Lehtovaara ja muut, 2022).

Tutkimuksen mukaan laatuhavaintoja voitaisiin hyödyntää paremmin kehittämällä laatupankkeja. Laatupankki ei ole rakennusalalla uusi asia, sillä olemassa on jo esimerkiksi FISE:n ylläpitämä rakennusvirhepankki, johon on koottu rakentamisen aikaisia virheitä sekä niiden korjaustapoja. Ongelmana kuitenkin voidaan nähdä datan kapea-alaisuus ja kattavuus, sekä tiedonkeruun ja dokumentoinnin raskas prosessi. Tulevaisuudessa laatupankkeja voidaan kehittää panostamalla digitaalisiin tiedonkeruunmenetelmiin tekemällä datasta koneluettavaa. Avainasemassa ovat datan rakenteiden standardointi sekä havaintojen täsmällisempi luokittelu ja niiden liittäminen työtehtäviin ja rakennusosiin. Tiedonkulusta on tehtävä kaksisuuntaista, jolloin laatuvirheet välittyvät takaisin niin suunnittelijoille kuin rakennustyömaille asti. (Peltokorpi, Lehtovaara ja muut, 2022).

7.3 Tilannetiedon keruutavat 360-kuvantamisen keinoin

360-kuvantaminen voidaan suorittaa siten, että kamera sijoitetaan työmaalle kiinteään sijaintiin. Menetelmällä saadaan työmaa-alueesta yleiskuvaa, jonka avulla voidaan seurata mm. maanrakennus- ja pohjatöitä sekä työmaan logistiikkaa ja nostoja.

360-kuvantamista voidaan hyödyntää myös tarkemman tilannekuvan luonnissa työmaalta käsin kiinnittämällä kamera esimerkiksi kypärään (Kuva 14). Ideana on, että työnjohto kiertää ennalta määritellyn reitin säännöllisesti. 360-kamera kuvaa ympäristöä aktiivisesti tallentaen kattavan datan koko rakennetusta ympäristöstä. Kuvantamisella saatua dataa voidaan hyödyntää monin tavoin rakennusprojektissa. Materiaalin avulla saadaan helposti kattava tilannekuva työmaan tilanteesta. Menetelmää voidaan hyödyntää esimerkiksi laaduntarkkailussa, piiloon jäävien rakenteiden dokumentoinnissa, työturvallisuudessa, perehdyttämisessä ja työmaakokouksissa (Matveinen, M., Hirvonen, R. 2022).



Kuva 14. Työmaakypärään kiinnitetyn 360-kameran avulla voidaan dokumentoida esimerkiksi laatuhavaintoja.

7.4 Olosuhdehallinta

Rakentamisen lainsäädännön, -määräysten ja -ohjeiden mukaiset vaatimukset turvallisuudelle, terveellisyydelle ja rakenteille lisäävät painetta rakentamisen aikaiselle olosuhdeseurannalle. Hyvällä suunnittelulla, toteutuksen hallinnalla ja seurannalla voidaan merkittävästi parantaa työturvallisuutta. Rakennusvaiheessa tehtyjen pienien työnaikaisten asennusvirheiden tai valvonnan puutteellisuus hidastaa tuotannon läpivientiä, ja virheet voivat korostua myöhemmässä vaiheessa merkittävinä ongelmina. Nykyaikana kiinnitetään erityisesti huomiota rakennuksien elinkaaren aikaisen energiatehokkuuden parantamiseen ja rakennusten terveellisyyteen. Hyvällä olosuhdehallinnalla voidaan nopeuttaa hankkeiden läpivientiä ja saada aikaiseksi paras mahdollinen lopputuote käyttäjille (RT S-1236).

Rakennustyömaalla olosuhteiden ja rakenteiden ominaisuuksien monipuolinen tutkiminen ja mittaaminen on kehittynyt digitaalisuuden myötä. Hyvä olosuhdehallinta ja laadunvarmistus edellyttävät työmaan toimihenkilöiltä asiantuntijuutta. Digitaalisuus on mahdollistanut olosuhteiden seuraamisen reaaliajassa paikasta riippumatta. Tehokas ja oikein kohdennettu reaaliaikainen ja etäluettava olosuhteiden mittaus mahdollistaa seurannan hankkeen kaikissa eri vaiheissa. Pilvipalvelun avulla tehtävät olosuhdemittaukset lisäksi vähentävät turhia työmaakäyn- tejä ja niiden aiheuttamia kustannuksia (RT S-1236).

7.4.1 IoT-olosuhdehallinta

Rakentamisen aikaisia olosuhteita voidaan tutkia ja mitata hankkeen aikana monipuolisesti hyödyntäen IoT-teknologiaa. Eri käyttötarkoituksiin soveltuvat sensorit lähettävät reaaliaikaista tietoa vastaanottimiensa välityksellä pilvipalveluun, josta dataa saadaan hyödynnettyä suoraan ohjelmistoihin. Etäseurantajärjestelmän avulla voidaan tarkkailla ja hallita rakennuksen olosuhteita graafisen kuvaa- jan avulla. Markkinoilla on saatavilla järjestelmiä, jotka hälyttävät olosuhteiden häiriötilanteissa (RT 103597.; Polycon.; Digita.; Bitwise).

Digitaalinen olosuhdevalvonta mahdollistaa rakentamisen aikaisten olosuhteiden optimoinnin, jonka hyödyt nähdään myös pitkälle tulevaisuuteen niin taloudellisesti kuin terveydellisesti. Järjestelmien avulla voidaan pienentää mahdollisesti myös jo rakentamisen aikaista hiilijalanjälkeä. Teknologian trendinä voidaan nähdä jatkuva mittaus, jonka tarkoituksena on seurata rakennusta ja sen olosuhteita koko kiinteistön elinkaaren ajan. Tulevaisuuden tavoitteena on, että IoT-tekniologian avulla kerätty data siirtyy automaattisesti tietomalliin (RT 103597.; Polycon.; Digita.; Bitwise).

7.4.2 Lämpötilan seuranta

Rakentamisaikainen lämpötilan hallinta on sidoksissa moniin eri työvaiheisiin. Sen avulla pystytään pitämään rakennuksen lämpötila myös talviaikoina terveellisenä sekä työntekijöille että rakenteille. Sekä liiallinen että liian vähäinen lämpö voi aiheuttaa harmia työmaalle. Monet rakennusmateriaalit, kuten betonit, tasoitteet ja maalit vaativat oikeanlaiset olosuhteet toimiakseen ja kuivuakseen. Lämpötilojen hallintaan on saatavilla digitaalisia apuvälineitä, joilla pystytään tarkastelemaan työmaan lämpötiloja reaaliajassa. IoT-olosuhdeanturien lähettämä data mahdollistaa nopean reagoinnin lämpötilavaihteluihin, ja siten helpottaa työvaiheiden hallintaa. Työnjohto pystyy tekemään tarvittavat korjausliikkeet hyvissä ajoin, ja näin voidaan välttyä myöhemmiltä ongelmilta (RT 103597.; RATU S-1236.; Matolog.; Polycom).

7.4.3 Kosteudenhallinta

Rakenteiden kosteudenhallinta on tärkeässä roolissa koko rakennushankkeen ajallisen-, laadullisen- ja taloudellisen läpiviennin kannalta. Erilaiset kosteusmittaukset, kuten porareikä- ja näytepalamittaukset ovat arkipäivää rakentamisessa. Kosteuden tehokkaampaan hallintaan on kuitenkin nykypäivänä saatavilla digitaalisia apuvälineitä. Työvaiheiden optimointi voidaan mahdollistaa keräämällä mittausantureiden avulla reaaliaikaista dataa ja hyödyntää tietoa kosteusolosuhteiden jatkuvaan hallintaan. Rakennustyömaalla yksi yleinen ja kriittinen työvaihe on betonin kuivuminen. Mittausdataa hyödyntäen voidaan seurata rakenteiden

riittävää kuivumisnopeutta seuraavaa työvaihetta varten, ja siten varmistua aika-
taulun pysyvyydestä. Esimerkiksi ennakoimalla rakenteiden hidas kuivuminen,
osataan hyvissä ajoin lisätä koneellista kuivatusta ja lämmitystä (RT 103597.;
RATU S-1236.; Matolog.; Polycom)

7.4.4 Pölynhallinta

Tavoitteena pölynhallinnassa on saavuttaa turvallinen työympäristö, suojella pö-
lyherkkiä laitteistoja sekä estää pölyn leviäminen työpisteeltä muuhun ympäris-
töön. Digitaalisten apuvälineiden avulla voidaan seurata työmaan pölynhallintaa
reaaliajassa ja siten varmistaa, että tarvittavat pölynhallintatoimet ovat kunnossa.
Hyvin suunniteltu, toteutettu ja valvottu pölynhallinta takaa terveellisen ympäris-
tön työntekijöille rakentamisen aikana ja myös rakennuksen käyttäjille.

Pölynhallintaa voidaan valvoa langattomien anturien välityksellä. Pölytasoa tark-
kaileva anturi lähettää reaaliaikaista dataa, jota voidaan tarkkailla niin tietoko-
neilla kuin mobiililaitteillakin.

Yleinen tapa estää työkohteen pölyn leviämistä on eristää työalue pölynsulkusei-
nällä. Käyttämällä pölynsulkuseiniin kiinnitettävää paine-eroanturia (DP) voidaan
valvoa paineen tasapainoa puhtaiden ja pölyisten alueiden välillä. DP-anturiin
saadaan asetettua haluttu paine-erokynnys, jonka ylittäminen lähettää hälytyk-
sen seurantaohjelmaan (RATU S-1236.; eGate).

7.5 Lämpökuvauksen digitaaliset apuvälineet

Perinteisesti rakennuksen lämpökuvauksella tarkoitetaan rakennuksen ulkovai-
pan sisä- ja ulkopuolista lämpökuvausta. Lämpökameran avulla voidaan selvit-
tää muun muassa rakenteiden ja rakennusmateriaalien lämpötekniisiä ominai-
suuksia, rakennuksen lämpöolosuhteita, lämpö- ja vesivuotoja, sekä paikanta-
maan talotekniisiä vikoja.

Käsi­käyt­ttöistä lämpökameraa voidaan hyödyntää helposti matalien rakennusten ulkovaipan kuvantamiseen. Rakennuksen julkisivujen ja vesikat­tojen digitaalinen lämpökuvaus on mahdollista toteuttaa myös ilmalämpökuvauksena UAV-koneiden eli nelikoptereiden avulla. Käsi­käyt­ttöinen lämpökamerakuvaus vaatii vesikat­tojen ja korkeiden kohteiden kuvantamiseen esimerkiksi nosturin. Lämpökame­rakopterilla kuvattaessa päästään helposti kuvantamaan koko rakennuksen ulko­vaippa (Paloniitty,2020).

Digitalisaatio on tuonut perinteisten lämpökameroiden rinnalle mahdollisuuden yhdistää lämpökameralla saatu data laserkeilatun pistepilven kanssa. Tällä het­kellä saatavilla on lämpökuvaukseen erikoistuneita laserkeilaimia, mutta myös yhteensopivan rinnakkaislaitteen hankkiminen on mahdollista. Lämpökuvaus­ominaisuuden sisältävä laserkeilain on nykypäivänä vielä arvokas investointi, mutta se helpottaa ja nopeuttaa kuvausta sekä datan käsittelyä rinnakkaislaittei­siin verrattuna (Paloniitty,2020.; Häyhä, 2018).

Kuvantamistapa vaatii kaksi eri kuvauskertaa, laserkeilauksen ja lämpökuvaus­en. Erillislaitteita hyödyntäen data saadaan yhdistettyä samaan koordinaatis­toon tähysten avulla. Lämpökuvauksen materiaali tuodaan laserkeilauksen jatko­käsittelyohjelmaan, joka tukee lämpökuvauslaitteiston dataa. Ensin pistepilvi tuo­daan ohjelmaan ja harvennetaan sopivaksi (rekisteröidään koordinaatistoon), jonka jälkeen lämpökuvauksesta saatu data liitetään georeferoimalla keilattuun materiaaliin. Lämpökuvien visuaalista ilmettä saadaan muutettua hyödyntäen vä­rimaailmaa lämpötilaerojen välillä (Häyhä, 2018).

7.6 Tiiveysmittauksen digitaaliset apuvälineet

Rakennuksen tiiveysmittauksella tarkoitetaan painekoetta, jolla selvitetään ra­kennuksen ulkovaipan ilmavuotoluku. Tiiveysmittauksen suorittaa aina puoluee­ton taho. Ilmanvuotoluku on erittäin tärkeä laadun mittari, jolla on suora vaikutus energiankulutukseen ja rakennuksen käyttömukavuuteen. Tiiveysmittauksen avulla voidaan ehkäistä ilmavuotojen aiheuttama vetoisuus ja kosteuden siirtymi­nen rakenteisiin, mutta myös radonin, mikrobien ja pölyn pääsy sisäilmaan.

Kustannustehokkainta on suorittaa tiiveysmittaus heti kun rakennus on saatu ilmatiiviiksi, jotta mahdollisten puutteiden ja virheiden korjauskustannukset jäävät mahdollisimman kohtuullisiksi. Tiiveysmittauksen yhteydessä voidaan löytää piiloon jääneiden rakenteiden vauriokohtat ja työvirheet, ja siten saada ehkäistyä mahdollisia tulevia ongelmia rakenteissa. Tiiveysmittauksen yhteydessä on tehtävä vuotokohtien paikannus hyödyntäen lämpökameraa. Tarvittaessa ilmavuotokohtat voidaan korjata ennen lopullista tiiveysmittausta. Tietokoneohjelma käsittelee mittausdatan ja tulokset saadaan dokumentoitua rakennuksen tietokantaan (Arolab.; Certek).

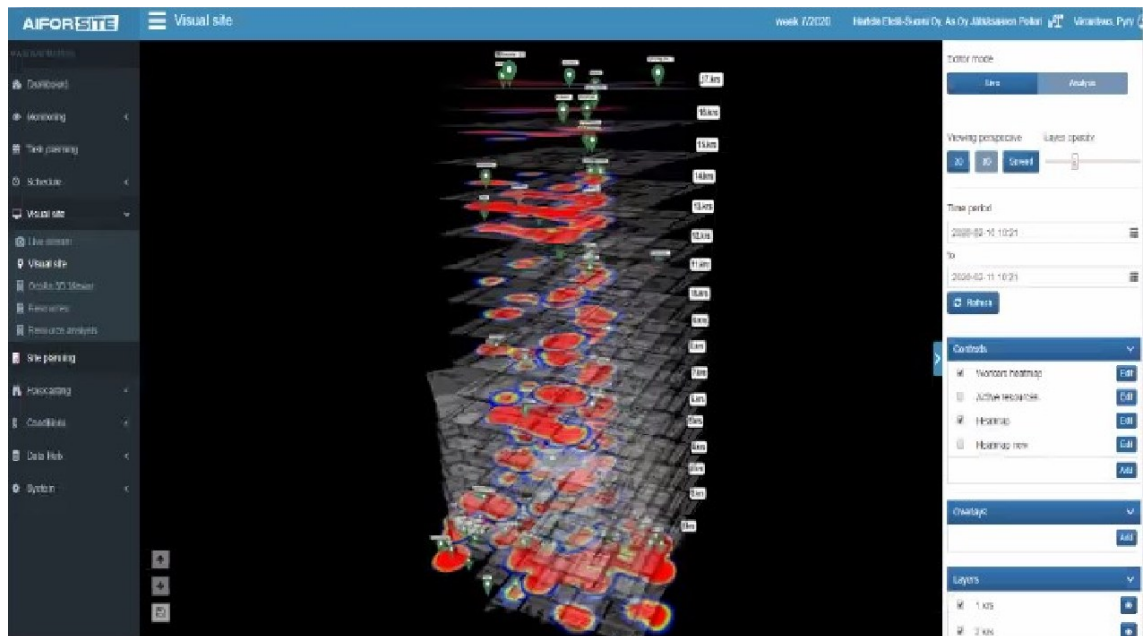
7.7 Resurssipaikannus apuvälineenä rakennustyömaalla

Paikannusteknologiaa voidaan hyödyntää rakennustyömaalla esimerkiksi materiaali- ja henkilöresurssien paikannukseen. Resurssipaikannukseen on tarjolla ohjelmistoja, jotka hyödyntävät paikkatietoja selain- ja pilvipohjaisessa sovelluksessa. Sovellus näyttää halutut resurssit visuaalisesti 3D-mallissa valitulla aikavälillä. Vapaasti valittavien resurssien paikkatietoja saadaan seurattua ja analysoitua automaattisesti reaaliaikaisen datan avulla (Laakkonen, Hirvonen)

Kaluston ja materiaalien etsiminen vie paljon tehokasta työaika rakennustyömaalla, ja jopa vain 25–35 % työntekijöiden työajasta on tehokasta työaika (Sepänen, Zhao ja muut, 2019). Tehokkuuden parantamiseksi on tarjolla erilaisia paikannustunnisteita, jotka voidaan kiinnittää haluttuihin laitteisiin ja materiaaleihin. Materiaalien paikannus tarjoaa mahdollisuuden myös materiaalmäärien seurantaan.

Henkilöresurssit saadaan jaoteltua esimerkiksi urakkakohtaisesti. Sovelluksesta voidaan seurata 3D-mallista visuaalisesti valittua resurssinäkymää (Kuva 15). Paikannustietojen avulla työnjohdolla on jatkuvasti selvä ja reaaliaikainen tilannekuva työmaan tapahtumista. Henkilöturvallisuutta voidaan tehostaa paikantamalla työmaalla toimivat henkilöt ja näin reaaliaikaisesti seurata tarkkaa työntekijämäärää työmaa-alueella. Reaaliaikainen henkilöresurssipaikannus parantaa merkittävästi työmaan turvallisuutta. Erityisesti korkeat ja suurikokoiset työmaat

aiheuttavat suuren turvallisuusriskin hätätilanteissa kuten tulipalon syttyessä. Paikannusteknologian avulla pystytään näkemään henkilöresurssien sijainnit kerrostarkkuudella, ja siten antaa tukea evakuointitilanteissa (Aiforsite.; Laakkonen, Hirvonen).



Kuva 15. Resurssit saadaan paikannettua visuaalisesti 3D-malliin (Aiforsite).

Resurssipaikannus on tärkeä keino tuotannonohjaukseen ja sen avulla pystytään parantamaan rakennushankkeen tuottavuutta. Reaaliaikaisten paikkatietojen avulla pystytään esimerkiksi vertailemaan työsuoritukseen suunniteltujen todellisten läsnäolojen toteumaa, ennakoida tulevien työvaiheiden päällekkäisyyksiä, analysoida poikkeamien syitä sekä reagoida työmaan häiriötilanteisiin nopeasti (RT 103597).

8 Digitaalinen kaksonen

Digitaalisella kaksosella tarkoitetaan fyysisen ja digitaalisen maailman välistä siltaa, jossa digitaalisen mallin ja fyysisen tuotteen kesken jaetaan reaaliaikaista tietoa. Digitaalisen kaksosen määritelmä on vasta vakiintumassa rakennusalalle. Rakennuksesta puhuttaessa digitaalinen kaksonen ymmärretään ennustavan ja

kaksisuuntaiseen vuorovaikutukseen kykenevänä tietomallina, joka on rikastettu fyysisestä todellisuudesta kerätyllä vakioidulla datalla. Digitaalinen kaksonen kykenisi tuottamaan siis automaattisia reaaliaikaisia päätelmiä, joita voitaisiin käyttää ohjaamaan rakentamisen prosessia. Digitaalista kaksosta voitaisiin hyödyntää päätöksenteon ja tuotannonohjauksen tukena. Vuorovaikutusominaisuuden ansiosta se kykenisi myös hälyttämään esimerkiksi olosuhdepoikkeamista. Toimiessaan digitaalinen kaksonen voisi mullistaa koko rakennusprojektin tuotannonhallinnan. Tuotannon digitaalista kaksosta ei kuitenkaan ole vielä saatavilla sellaisessa muodossa, kun sen nykymääritelmä on ja sen rakentamiseksi tarvitaan vielä runsaasti kehitystyötä ja satsauksia (Seppänen, Barazi ja muut 2023).

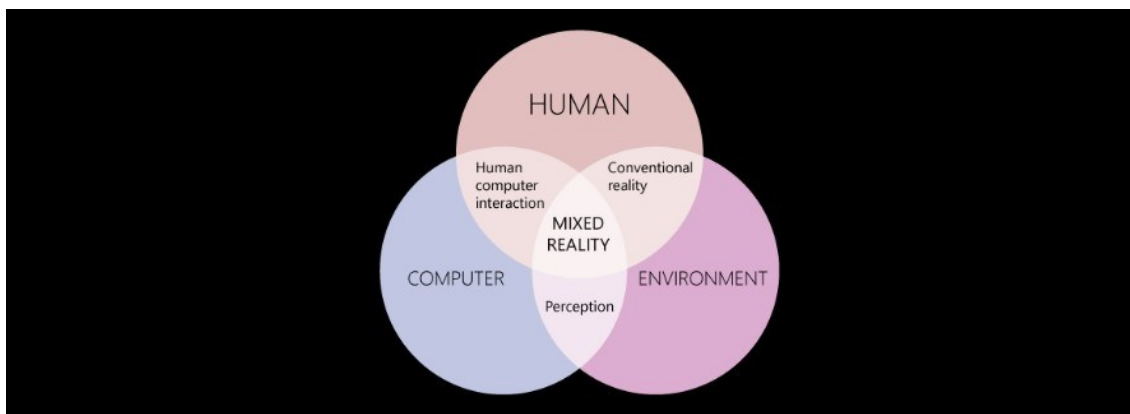
Digitaalisen kaksosen luonnin edellytyksenä on koneluettavan datan vakiointi ja yhdistettävyyys eri järjestelmien tietoihin. Rakennushankkeista ei kuitenkaan ole vielä saatavilla riittävästi oikeanlaista vakiintunutta dataa. Rakennusvaiheen digitaalisen kaksosen ongelmana lisäksi on, että tietomalli antaa hyvinkin tarkan kuvan rakennuksen lopputuloksesta, ei niinkään rakentamisen vaiheista eri aikakunoissa. Rakennusvaiheessa haaste onkin aikaulottuvuuden tarkempi sisällyttäminen digitaaliseen kaksoseen, johon saataisiin lisättyä dataa rikastuttavaa tietoa esimerkiksi materiaalien toimitusketjuista. Aikaan voitaisiin kytkeä myös paikannus-, kuva- ja sensoritietoja. Aikataulujen osumatarkkuus sekä aikataulun ulkopuolisten tehtävien osuus ei ole lähelläkään riittävää tasoa, jotta digitaalisen kaksosen käyttö, sellaisena kun se on ymmärretty, olisi onnistunutta (Seppänen, Barazi ja muut 2023).

Digitaalinen varjo on riisutumpi versio digitaalisesta kaksosesta, joka on mahdollista toteuttaa jo nykyisien käytössä olevien ohjelmistojen avulla. Digitaalista varjoa onkin hyödynnetty jo rakennushankkeissa. Digitaalisia varjoja voivat olla esimerkiksi tilannekuvajärjestelmät, joista puuttuu kuitenkin digitaaliselle kaksoselle ominaiset piirteet, optimointi ja ennustaminen. Myös digitaalinen varjo tarvitsee toimiakseen koneluettavassa ja yhdistettävässä muodossa olevaa dataa (Seppänen, Barazi ja muut 2023).

9 Virtuaalinen ympäristö

9.1.1 MR-todellisuus

Yhdistetty todellisuus, MR, laajentaa AR- ja VR- teknologian luomat mahdollisuudet. Teknologia yhdistää todellisen ympäristön, tietokoneen ja ihmisen yhteen paikkaan (Kuva 16).



Kuva 16. MR-todellisuus mahdollistaa tietokoneiden, ihmisten ja ympäristöjen välisen vuorovaikutuksen.

Kehittynyt MR-teknologia mahdollistaa todellisen ympäristön ja kolmiulotteisen mallin yhtäaikaisen katselun lisäksi myös tietomallin datan hyödyntämisen ja interaktiivisten muutosten tekemisen suoraan tietomalliin. Käytännössä siis ensin AR-todellisuus rikastaa todellisen ympäristön virtuaalisilla objekteilla, jotka se saa tietomallista. MR-todellisuus tuo teknologiaan ihmisen kyvyn hallita näitä käytävissä olevia objekteja ja tietoja (Helsingin yliopisto).

MR-todellisuutta voidaan AR:n tapaan hyödyntää ohjelmistotuottajien lanseeraamien laitteistojen lisäksi älypuhelimilla, tableteilla ja virtuaalitodellisuuden rikastamilla MR-laseilla (Helsingin yliopisto).

9.2 Laajennettu todellisuus

Laajennettu todellisuus, *XR*, *Extended Reality* on kattotermi kaikille todelliseen ja virtuaaliseen ympäristöön yhdistetyille teknologioille. Se sisältää

virtuaalitodellisuuden (Virtual Reality, VR), lisätyn todellisuuden (Augmented Reality, AR) ja yhdistetyn todellisuuden (Mixed Reality, MR), sekä niiden yhdistelmät. Suuri osa ihmisistä käyttää laajennetun todellisuuden alla olevaa teknologiaa jokapäiväisessä elämässä. Esimerkiksi älypuhelimet ovat jo pitkään hyödyntäneet AR- ja MR-teknologiaa sosiaalisen median sovelluksissa ja peleissä. Nykypäivän pelikonsolit käyttävät peleissään virtuaalitodellisuutta sekä hyödyntävät myös todellisuuksien yhdistelmiä. Teknologia laajennetun todellisuuden ympärillä onkin kehittynyt valtavasti viime vuosina, ja se näkyy vahvasti myös rakennuslalle kehitetyissä tuotteissa ja palveluissa (Koukka, 2018.; Kinnunen, 2020).

Eri todellisuuksien ja niiden tuomien ominaisuuksien merkitykset kehittyvät jatkuvasti, sillä teknologinen kehitys on vielä murroksessa. Kaikilla kolmella todellisuuksella on päällekkäisiä piirteitä ja toisinaan niiden välisiä eroavaisuuksia on vaikea hahmottaa. Taustalla on kuitenkin jokaiselle todellisuukselle omat tarkoituksensa ja teknologiansa, joiden piirteet on hyvä ymmärtää. Teknologioiden perimmäinen yhteinen tarkoitus on rikastuttaa todellinen ympäristö visuaalisella tiedolla. Rakentamisessa laajennettu todellisuus tuo yhteen todellisen rakennetun ympäristön, tietokoneen prosessointikyvyn, tietomallien sisältämän datan, sekä ihmisten sosiaalisuuden ja fyysisyyden. Kaikkea tätä on mahdollista hyödyntää sekä täysin virtuaalisessa maailmassa esimerkiksi toimistoympäristössä, että fyysisesti työmaalta käsin (Koukka, 2018.; Kinnunen, 2020.; Trimble).

9.2.1 VR-todellisuus

VR-todellisuus on digitaalisesti luotu vuorovaikutteinen ja reaaliaikainen ympäristö, jolla voidaan helposti simuloida tuotteita, ympäristöjä ja tilanteita. Yleisimmin virtuaalitodellisuudessa hyödynnetty väline on virtuaalitodellisuuslasit (head-mounted display eli HDM), mutta katselu onnistuu lasien puuttuessa myös esimerkiksi tietokoneen näytöltä. Yksinään VR-todellisuus mahdollistaa vain muotojen geometrisen tarkastelun. Virtuaalitodellisuuden etuna on, että teknologian hyödyntäminen ei ole sidoksissa paikkaan.

Itsessään virtuaalitodellisuus on vanha teknologia, joka on mahdollistanut rakennusten 3D-mallien katselun ihmisperspektiivistä jo pitkään. VR-todellisuus ei alkujaan saanut suosiota rakennusalalla, ja voidaankin todeta, että teknologiaa yritettiin hyödyntää liian varhain. Tämän hetken teknologia on kuitenkin huomattavasti kehittyneempää, ja virtuaalitodellisuutta osataan hyödyntää laajemmin. Teknologian kehitys on myös laskenut VR-lasien hintaa ja lisännyt käyttömukavuutta. Valmiita alustoja on olemassa paljon, minkä avulla tekniikan käyttö on entistä edullisempää ja helpompaa.

9.2.2 AR-todellisuus

AR-todellisuus eli lisätty todellisuus tarkoittaa teknologiaa, jonka avulla tarkastellaan virtuaalisilla objekteilla rikastettua todellista ympäristöä. Teknologia toimii siis laitteen kameran ja siihen asennettavan ohjelman yhteistyöllä, joka on sidottu paikalliseen koordinaatistoon. Toisin kuin VR, lisätty todellisuus vaatii tarkasteluun käyttäjän fyysistä läsnäoloa. Rakennushankkeissa tämä tarkoittaa, että käytettävän laitteen näytöltä nähdään siis samanaikaisesti kameran kuvantama todellinen reaaliaikainen työmaaympäristö yhdistettynä tietomallista saataviin kolmiulotteisiin suunnitelmiin (Hirvonen, 2022.; Anttila).

AR-teknologiaa voidaan käyttää tavallisilla mobiililaitteilla, eli älypuhelimilla ja tableteilla, mutta saatavilla on myös teknologiaan erikoistuneita laitteita. Kun AR-tekniikkaan lisätään virtuaalinen todellisuus, voidaan malleja tarkastella työmaalla myös AR-laseilla. Lasit saadaan yhdistettyä työturvallisuusmääräykset täyttävään rakennuskypärään, joten lasien käyttö työmaalla on turvallista (Hirvonen, 2022.; Anttila).

9.2.3 Todellisuuksien hyödyntäminen rakennushankkeissa

Teknologian pilvipohjaisuus ja 5G:n tiedonsiirtonopeus ovat mahdollistaneet teknologian siirtymisen mobiililaitteille. Älypuhelimien käyttö on vapauttanut AR- ja MR-teknologian käytön toimistoista työmaalle ja mahdollistanut sen hyödyntämisen koskemaan kaikkia hankkeen osapuolia.

AR- ja MR-todellisuuteen perustuvat tekniikat ovat yleistyneet erityisesti työmailla, ja teknologiaa voidaan hyödyntää monipuolisesti rakentamisessa. Tietomallin ja reaaliaikaisen toteuman tarkastelu voidaan tehdä yhtäaikaaisesti, mikä nopeuttaa ja helpottaa kohteen vertailua. Teknologiat tarjoavat erinomaisia apuvälineitä rakennushankkeiden visualisointiin. Suunnitelmat, kuten kaivannot, kaivot ja putkilinjat, saadaan näkymään laitteen näytöltä paikannustavasta riippuen hyvinkin tarkasti, jopa senttimetrin tarkkuudella. Ominaisuutta voidaan hyödyntää projektin ja työkokonaisuuksien hahmottamisessa jo ennen töiden aloitusta. Teknologia mahdollistaa myös piiloon jäävien rakenteiden tarkastelun myöhemässä vaiheessa. Visuaalisuutta voidaan hyödyntää myös esimerkiksi työmaakokouksissa ja työmaakerroksilla. Työmaalla ominaisuutta voivat hyödyntää työnjohton lisäksi myös suunnittelijat ja valvojat. AR- ja MR-tekniikoilla saadaankin parannettua suunnittelun ja rakentamisen yhteistyötä (Niskanen, 2022; Helsingin yliopisto)

AR- ja MR-näkymiä saadaan rikastettua tarvittaessa lähes rajattomasti ja niihin voidaan lisätä esimerkiksi työohjeita, videoita ja mittatietoja. (Kuva 17). Ohjelmistot kuten VisualLive ja Revit kykenevät lisäämään halutut objektit näkymään esimerkiksi läpinäkyvinä, jonka avulla voidaan havainnollistaa haluttuja suunnitelmia todellisuuteen. Rakennuksen tietomallia voidaan tarkastella virtuaalikipärän välityksellä kaikissa eri rakennusvaiheissa. Suunnittelijan päivittäessä tietomallia, näkyvät muutokset reaaliaikaisesti myös VR-lasien läpi. Virtuaalitodellisuutta voivat hyödyntää kaikki hankkeen osapuolet suunnittelijoista käyttäjiin. Virtuaalitodellisuuden tuomasta kolmiulotteisuudesta on hyötyä erityisesti ihmisille, jotka eivät ole tottuneet lukemaan 3D-suunnitelmia. Suunnitelmien tarkastelua voidaan hyödyntää niin rakentamisessa kuin hankkeen esittelyssä. Tarkastelulla voidaan varmistaa, että työntekijät ymmärtävät suunnitelmat yksiselitteisesti ennen työhön ryhtymistä. Myös suunnitelmien mukainen asennustyö sekä mahdollisten poikkeamien huomioiminen helpottuu. Suunnitelmien visuaalisesta tarkastelusta on hyötyä etenkin haastavien hankkeiden osalta jo ennen rakentamista. Tarkastelua voidaan hyödyntää myös kriittisissä työvaiheissa. Virtuaalitodellisuus mahdollistaa myös sosiaalisen kanssakäynnin mikrofonien välityksellä (Niskanen, 2022; Helsingin yliopisto).



Kuva 17. Virtuaalitekniologia mahdollistaa visuaalisuuden lisäksi rakennuksen tietojen tarkastelun MR-lasien avulla (VisualLive).

10 Rakennushankkeen luovutuksen digitaalinen materiaali

10.1 Digitaalinen luovutusaineisto

Rakennushankkeen luovutusmateriaalit koostuvat tilaajalle luovutettavista rakennuksen dokumenteista, jotka pitävät sisällään materiaalitiedot sekä niiden käyttöohjeet ja sijaintitiedot rakennuksessa, listat tavarantoimittajista ja urakoitsijoista, sekä takuu- ja huolto-ohjeet. Huolellinen ja ajallaan tehty luovutus on tärkeä vaihe onnistuneelle toteutukselle. Luovutusaineiston dokumentaatio luovutetaan tilaajalle kohteen luovutuksen yhteydessä (Huhtalo, 2018). Rakennusalan digitalisaation yleistymisen myötä luovutusaineisto on nykyään pääosin sähköisessä muodossa, vaikka sitä ei vielä virallisesti vaadita. Myös rakennuttaja saattaa edelleen vaatia luovutusaineistoa myös paperisena versiona.

Vuonna 2025 voimaan astuvan uuden rakentamislain myötä vaaditaan, että rakennukselle tehdään konekielellisesti luettava tietomalli tai koneluettavaan dataan perustuva sähköinen käyttö- ja huoltokirja. Tällainen digitaalinen huoltokirja on laadittava uudiskohteiden lisäksi myös rakennuksen korjaus- ja

muutoshankkeista (Kukkonen, 2022). Sähköisen huoltokirjan palvelen riittävästi taloyhtiöiden ja takuukorjauksien tarpeita, mutta tietoja halutaan yhtenäistää ja hyötykäyttösuhdetta laajentaa tiedon virtautuksen avulla. Tällainen niin sanottu virtaava huoltokirja mahdollistetaan tietorakenteiden vakioinnilla. Kehitystyö tukee elinkaariajattelun periaatetta ja voi onnistuessaan tuoda lisäarvoa kaikille osapuolille rakennuksen käytön aikana (KiraHub, 2021).

10.2 Digitaalinen ylläpitomalli

Ylläpitomallilla tarkoitetaan rakennuksen yhdistelmämallia, johon on lisätty eri käytön ja ylläpidon aikaiset huolto- ja kunnossapitoa vaativat tiedot. Ilman kone-luettavaa virtaavaa dataa ja autonomista tiedonkeruuta, ylläpitomalli toimii vain passiivisena tietovarastona ja tuo visuaalisuutta 3D-muodossa verrattuna aikaisempiin tasopiirustuksiin. Visualisointi helpottaa hahmottamista ja sitä kautta korjausten ja käyttömuutosten suunnittelua (Halmetoja, 2016).

Ylläpitomallin vaatimia tietoja ei kuitenkaan ole normaalisti saatavilla toteutuksen tietomallista. Esimerkiksi materiaalien käyttöiät ja hoitajaksot eivät sisälly itsessään tietomalliin, vaan ne joudutaan lisätä ylläpitomallia varten erikseen. Tietomallin muuntuminen koko rakennuksen elinkaaren mittaiseksi aineistoksi vaatii myös tietomallilta erityistä laadukkuutta. Puutteellinen tai epäluotettava tietomalli ylläpitovaiheessa voidaan kokea arvottomaksi, mikä on omiaan aiheuttamaan ongelmia urakoitsijalle jälkikäteen. Tärkeää on huolehtia, että rakentamisen aikaiset suunnitelmien muutokset on tehty myös tietomalliin ja mallia ylläpidetään myös käytön aikana (Halmetoja, 2016; RT 10-11078).

Digitalisaation kehittyessä ylläpitomallista voidaan tehdä vuorovaikutteinen ja ennustava. Tietomallin suunnitelmien lisäksi ylläpitomalliin saadaan lisättyä IoT-tekniologiaa ja automaatiojärjestelmiä, sekä käyttäjien lisäämää tietoa. Sijaintitiedon ja pilvipalvelun avulla rakennuksesta voidaan seurata sen olosuhteita kerros- ja tilakohtaisesti. Olosuhteiden visualisointia helpottamaan on kehitetty muuttuvat värikoodit, jotka reagoivat esimerkiksi lämpötila- ja kosteusmuutoksiin.

Tällaisesta ylläpitomallista voidaan jo puhua eräänlaisena digitaalisena kakso-
sena ja digitaalinen kaksonen on jo saatavilla nykypäivänä (Granlund).

11 Pohdintaa

Suomessa rakennusalan digitalisaation mahdollisuudet ovat hyvin laajat, ja ny-
kypäivän tietomallintamisen osaaminen on jo maailman huipputasoa. Rakenta-
miseen suunnattuja digitaalisia apuvälineitä on saatavilla runsas kirjo, mutta alan
kehitys on vielä murroksessa. Jotta digitalisaation hyödyntämisessä päästäisiin
kansallisiin tavoitteisiin, on yritysten panostettava avoimuuteen ja yhteistyöhön.

Digitaalisen kehityksen suurena suuntaviivana voidaan pitää täydellisen digitaalisen
kakso-
sena-
kaksonen kehittämiseen tähtäävää teknologiaa. Rakennukset pyritään ra-
kentamaan ensin täydelliseen muotoonsa digitaalisesti, ennen kuin ensimmäis-
täkään kiveä rakennustyömaalla on käännetty. Yli ohjelmistorajojen kulkeva täy-
dellinen koneluettava tietomalli luo parhaimmillaan rajattomat käyttömahdollisuu-
det, johon vain mielikuvitus luo raamit.

Digitaalisten apuvälineiden hyödyntäminen ei kuitenkaan vaadi kaikilta hankkeen
osapuolilta teknologian kärkihankkeiden kokonaisvaltaista ymmärrystä, vaan
hyödyllisyys tulee arkisemmista toiminnoista. Digitaalisia apuvälineitä on ennen
kaikkea tehty helpottamaan ja nopeuttamaan tuotannonvirtausta jokapäiväisessä
rakentamisessa. Hyvän digitaalisen työkalun peruspilareita ovatkin käyttömuka-
vuus ja hyödyllisyys.

Digitaalisista apuvälineistä saadaan paras hyötysuhde, kun mahdollisimman
moni hankkeen osapuoli hyödyntää samaa ohjelmistokokonaisuutta. Erityisesti
tuotannonohjauksessa ohjelmistokehityksen suuntana on toiminnallisten ominai-
suuksien yhdistäminen yhdelle softalle. Jos käytössä on useita eri ohjelmistoja,
niiden yhtäaikainen hallinta voi olla hankalaa eikä tieto pääse kulkemaan kaikille
osapuolille reaaliajassa.

Ohjelmakehityksen trendinä on käytettävyyden ulottaminen toimiston ulkopuolelle. Ohjelmista kehitetään selainpohjaisia versioita ja pilvipalvelun hyödyntäminen mahdollistaa myös kevyempien mobiiliversioiden kehittämisen. Nykypäivänä tietomallia voidaankin hyödyntää hyvin laajasti työmaalta käsin.

Ennakoasenteet uusia toimintatapoja kohtaan saattavat usein kummuta osaamisen ja ymmärryksen puutteesta. Digitalisaation hyödyllisyyttä ei osata ehkä täysin hahmottaa, sillä vuosien rakentaminen on vakiinnuttanut toimintatavat ja digitaalisten työkalujen käyttöönotto saattaa tuntua hankalalta. Kokonaisvaltaisempi hyödyntäminen vaatii resurssien laittoja koulutukseen, mutta myös käytön aikaiseen tukeen on satsattava. Koulutuksen täytyy olla tehokasta heti projektin alusta lähtien, jotta hankkeessa opitaan toimimaan uusien toimintatapojen edellyttämällä tavalla.

Digitalisaatioon panostaminen on suuri investointi, jonka tuottavuus ja hyöty on nähtävissä usein vasta jälkikäteen. Kehitykseen ja koulutukseen panostaminen tuo yritykselle kuitenkin lisäarvoa.

12 Yhteenveto

Koko rakennusalan toimintaympäristö on valtavassa digitaalisessa murroksessa. Uudet teknologiat, lainsäädännöt ja alan suhdannetilanne vaativat merkittäviä toimia rakennusosalalle ja muutokset halutaan saada koskemaan koko rakennuksen elinkaarta. Digitalisaatiosta etsitään keinoa rakennusalan tuottavuusongelmien ratkaisemiseksi ja laadun parantamiseksi, hyödyntämällä teknologian huippuosaamista, ohjelmistojen ja muiden digitaalisten apuvälineiden avulla.

Rakentamisen toimintamalleja pyritään tehostamaan Lean-ajattelun periaatteella ja tahtituotanto on vallannut alaa viime vuosina. Tuotannon virtautuksen avulla voidaan vähentää merkittävästi hankkeen läpimenoaikaa. Tahtituotanto vaatii kuitenkin uusia digitaalisia menetelmiä toimiakseen saumattomammin ja tieto on saatava virtaamaan avoimesti koko rakentamisen arvoketjun läpi. Tiedon virtautus vaatii standardoitujen tuotetietojen vakiointia rakenteelliseen koneluettavaan

muotoon, jotta niitä voidaan hyödyntää jo hankekehitysvaiheesta lähtien. Vakioitu tuotetieto saadaan palvelemaan prosessin kaikkia osapuolia myös rakentamisen aikana, sillä tiedon virtaus mahdollistaa myös työ- ja materiaalivirtojen hallinnan ja yhteensopivuuden suunnitelmien kanssa.

Digitalisaation tuomia menetelmiä voidaan hyödyntää varsin kattavasti läpi rakennushankkeen. Saatavilla on runsaasti apuvälineitä tuotannonohjaukseen, tilannekuvan hallintaan ja tiedonkeruuseen. Ohjelmistokehittäjät tekevät parhailaan kehitystyötä nykyteknologiaa paremmin tukevien projektinhallintatyökalujen eteen pyrkimällä muun muassa yhdistämään eri lähteistä saadut datamassat samaan ohjelmistoon. Tiedon keskittäminen auttaa hyödyntämään hankkeiden valtavaa tietomäärää ja tukemaan koko rakennusprojektin läpivientiä. Nykypäivän digitaaliset tiedonkeruunmenetelmät dokumentoivat dataa paikannusteknologiaa hyödyntäen muun muassa erilaisilla kuvantamisen menetelmillä, olosuhdeantureilla ja resurssipaikannuksella.

Tietomallia on hyödynnetty työmaalla erityisesti visuaalisena apuvälineenä ja yksittäisten rakenteiden tarkasteluissa. Tietomallintamisessa nähdään kuitenkin olevan paljon käyttämätöntä potentiaalia. Nykypäivän teknologiakehitys panostaa erityisesti tietomallin rikastuttamiseen tietojen vakioinnilla ja koneluettavuudella. Pidemmän ajan kehitystyön tavoitteena on, että tietomalli olisi täydellinen vastakappale todellisesta rakennuksesta. Kehitystyön lopputuotteesta puhutaan digitaalisena kaksosena, joka luo sillan fyysisen ja digitaalisen maailman välille. Digitaalisen kaksosen toivotaan pystyvän hallitsemaan kaikkea rakennuksessa olevaa tietoa reaaliaikaisesti ja toimimaan kaksisuuntaisena ja ennustavana vuorovaikutuksen välineenä koko rakennuksen elinkaaren ajan.

Lähteet

Aalto-yliopisto. Building 2030 Tests the Spot Robot on Construction Sites. Uutinen. Saatavilla: <https://www.aalto.fi/en/news/building-2030-tests-the-spot-robot-on-construction-sites>

Anttila, T. Lisätty ja yhdistetty todellisuus rakennustyömaalla – Enemmän kuin hienoa teknologiaa. BuildingPoint Finland. Mainos. Rakennuslehti. <https://www.rakennuslehti.fi/mainos/lisatty-ja-yhdistetty-todellisuus-rakennus-tyomaalla-%E2%94%80-enemman-kuin-hienoa-teknologiaa/>

Arima, I. 2018. Laserkeilausprosessi uudisrakennuskohteen toteutumamallia varten. Insinööriyö. Metropolian ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Arolab. Tiiviysmittaukset ja ilmapuotopaikannukset. Palvelut. Arolab Oy. Saatavissa: https://www.arolab.fi/tiiviysmittaukset/?gad=1&gclid=CjwKCAjw-KipBhBtEiwAWjgwrLVzdz5FfJnLfysw8WBuDFtSwoZ-ZxIWhKr9MK7ZFBE4pOgaeH6mpTRoCDsgQAvD_BwE

Bashonin, Ivan. 2023. Dalux-sovelluksen hyödyntäminen rakennusurakoitsijan suunnitteluohjauksessa. Opinnäytetyö. Metropolian ammattikorkeakoulu. Insinööriyö. Luettu 5.5.2023. Theseus-tietokanta.

Bitwise. 2020. Automaatiota ja joustavia pilvipalveluja: Näin etävalvontajärjestelmä palvelee rakentamista ja olosuhdehallintaa. eGate. Luettu: 28.8.2023. Saatavilla: <https://bitwise.fi/ajankohtaista/2020/automaatiota-ja-joustavia-pilvipalveluja-nain-etavalvontajarjestelma-palvelee-rakentamista-ja-olosuhdehallintaa/>

BuildinPoint. Spot-laserkeilausrobotti: Integroitu laserkeilausrobotti uskomattoman ketterään ja nopeaan tiedonkeruuseen. Saatavilla: <https://buildingpointfinland.fi/tuotteet/laitteet/robottikoira-spot/>

BuildinSMART. What is openBIM. BuildingSmart Internatiol. Luettu 15.3.2023. Saatavilla: <https://www.buildingsmart.org/about/openbim/openbim-definition/>

Certek. Rakennuksen tiiveysmittaus ammattilaiselta. Palvelut. Luettu 13.4.2023. Saatavilla: https://www.certek.fi/palvelumme/tiiveysmittaus?gclid=CjwKCAjw-KipBhBtEiwAWjgwrOr-eKkBBahO2_302tY5Cy-IOlmi3w_o5uWThA3UKa0pmh9v4WblsuRoCnxwQAvD_BwE

Dahlgren, K., 2017. 4D-mallinnus talotekniikan tuotannonohjauksen työkaluna. Opinnäytetyö. Luettu 7.4.2023. Arcada. Theseus-tietokanta.

Dalux. Käyttäjätavallinen, mobiili BIM-ohjelmisto rakentamiseen ja kiinteistönhallintaan. Saatavilla: <https://www.dalux.com/fi/>

Dalux. Dalux Field Basic. Ilmainen merkintätyökalu piirustuksilla ja malleilla. Digitalisoi havaintojen kirjaus työmaalla. Saatavilla: <https://www.dalux.com/fi/field-basic/>

Digita. 2020. Wiiste Oy hyödyntää Digitan IoT-verkkoa rakennusteollisuuden ratkaisuisaan. Verkkajulkaisu. Luettu 28.8.2023. Saatavilla: <https://www.digita.fi/ajankohtaista/wiiste-oy-hyodyntaa-digitan-iot-verkkoa-rakennusteollisuuden-ratkaisuissaan/#/>

eGate. Remote Monitoring of Construction Site Conditions Enters the Mainstream: eGate DUST Monitoring. Sovelluskuvaukset. Luettu 27.4.2023. Saatavilla: <https://www.e-gate.io/artikkelit/remote-monitoring-of-dust-at-construction-job-site/>

Frackiewicz, M. 2023. Dronet ja 5G: UAV-yhteyksien täyden potentiaalinen vapauttaminen. TS2 Space Sp. Luettu 8.9.2023. Saatavilla: <https://ts2.space/fi/dronet-ja-5g-uav-yhteyksien-tayden-potentiaalinen-vapauttaminen/>

Fugas, K. 2022. What can IFC4 bring to the industry? BIM Corner. Saatavissa: <https://bimcorner.com/what-can-ifc4-bring-to-the-industry/>

Gancell. Photogrammetry. Saatavilla: http://www.gancell.com/reports/Final_Basics_Photogrammetry.pdf

Geotrim. Tilojen 3d-virtuaalimalli tukee päätöksentekoa ja säästää kaikkien aikaa: Mikä on Matterport? Geotrim. Matterport reseller. Luettu 3.9.2023. Saatavilla: http://www.maankaytto.fi/arkisto/mmp/2019/saaski_timo.pdf

Geotrim. UAS-kartoitus: Ratkaisuja kartoittamiseen ilmasta käsin. Tuotteet. Luettu 15.8.2023. Saatavilla: <https://geotrim.fi/tuotteet/uas/>

Global GPS Systems. Verkkoaineisto. GNSS: Understanding RTK VRS Networks. Luettu 23.3.2023. Saatavilla: <https://globalgpsystems.com/gnss/understanding-rtk-vrs-networks/>

Granlund, 4D-suunnittelu. Miksi 4D-suunnittelu kannattaa rakennushankkeessa? Luettu 14.3.2023. Saatavilla: <https://www.granlund.fi/palvelut/4d-aikataulutuspalvelut/>

Granlund, Digital twin. Palvelut. Luettu 9.10.2023. Saatavilla: <https://www.granlund.fi/palvelut/digital-twin/>

Halmetoja, E., 2016. Tietomallit ylläpidossa. Selvitystyö. Senaatti-Kiinteistöt. Luettu: 9.10.2023. Saatavilla: https://www.senaatti.fi/app/uploads/2017/05/6099-Tietomallit_yllapidossa.pdf

Helsingin yliopisto. Mitä yhdistetty todellisuus (Mixed Reality, MR) on ja mitä eri teknologioita se kattaa? Teknologiateollisuus: Opas yhdistetyn todellisuuden teknologioiden hyödyntämiseen teknologiateollisuudessa. Mixed reality hub. Luettu 18.4.2023. Saatavilla: <https://www.helsinki.fi/fi/tutkimusryhmat/mixed-reality-hub/teknologiateollisuus>

Hirvonen, R. 2022. Lisätty todellisuus tuo uusia mahdollisuuksia rakentamiseen. Karelia-ammattikorkeakoulu. Luettu 17.4.2023. Saatavilla: <https://www.karelia.fi/2022/04/lisatty-todellisuus-tuo-uusia-mahdollisuuksia-rakentamiseen/>

Huhtalo, J. 2018. Luovutusmateriaalin kokoaminen ja luovutus. Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu. Luettu 8.10.2023. Saatavilla: Theseus-tietokanta.

Huitti, N. 2016. Rakennustyömaan tietomallipohjainen aluesuunnittelu. Diplomi-työ. Aalto-yliopisto. Luettu 23.3.2023. Saatavilla: https://aalto-doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/20904/master_Huitti_Niklas_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Huomo, E. 2023. Työmaan 3D-aluesuunnitelma. Insinööri-työ. Metropolian ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Häyhä, O. 2018. Laserkeilausten ja lämpökuvauksen hyödyntäminen rakenteiden mittauksissa. Insinööri-työ. Metropolian ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Ilves, N. 2020. Pistepilven prosessointi 3D-malliksi Catia V6 -ohjelmistoon. Opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Jones, R. 2023. Why Connected Is Key with Common Data Environments. Trimble Construction.

Jääskeläinen, T. 2021. Tietomallien hyödyntäminen rakentamisessa ja ympäristönä digitaaliselle dokumentaatiolle. Opinnäytetyö. Metropolian ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Keitaanniemi, A. 2021. Mikä on pistepilvi ja mihin sitä käytetään talonrakentamisessa? BuildingPoint Finland. Luettu 30.3.2023. Saatavilla: <https://buildingpoint-finland.fi/mika-on-pistepilvi-ja-mihin-sita-kaytettaan-talonrakentamisessa/>

Kinnunen, J. 2020. Laajennettu todellisuus osaksi teollisuuden ja rakennusalan arkea: Kysely yrityksille! CoreLab. Tampereen yliopisto. Saatavilla:

<https://sites.tuni.fi/corelab/uutiset/laajennettu-todellisuus-on-jo-osa-arkielamaa-tutkimushanke-selvittaa-teknologian-tuntemusta-rakennusalan-pk-yrityksissa/>

KiraHub. 2021. Huoltokirjadata virtaamaan. Kira-digi kokeiluhanke. RYHTI-hanke. Luettu 9.10.2023. Saatavilla: <https://kirahub.org/huoltokirjadata-virtaamaan/>

Kirby, M. 2022. What Is a Common Data Environment and How Is It Used In Construction? Trimble Construction. Luettu 28.3.2023. Saatavilla:

Kone. Voisiko robotiikka olla ratkaisu rakennusalan tehottomuuteen? Verkkojulkaisu. Luettu 18.8.2023. Saatavilla: <https://www.kone.fi/referenssit-ja-tarinat/artikkelit/voisiko-robotiikka-olla-ratkaisu-rakennusalan-tehottomuuteen.aspx>

Koskenvesa, A. & Soila, J.-P. 2018. Rakennushankkeen kustannushallinta. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Kuismin, M. 2018. IoT-anturijärjestelmien mahdollisuudet rakennustyömaalla. Mestarityö. Metropolian ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Kukkonen, J., 2022. Maankäyttö- ja rakennuslaki uudistuu – 3 merkittävintä muutosta rakentamiseen. Kiinteistölakimies. Luettu 9.10.2023. Saatavilla: <https://kiinteistolakimies.fi/artikkelit/uusi-maankaytto-ja-rakennuslaki/>

Koukka, H. 2018. AR, VR, MR: Mitä ihmettä? Tieto- ja viestintäteknikka. Lahden ammattikorkeakoulu. Luettu 15.3.2023. Saatavilla: https://lab.fi/sites/default/files/2018-10/AR-VR-MR-Mita-ihmetta_Henri-Koukka_digimatch-I_13-2-2018.pdf

Kuusiniemi, H. Sisätilanavigointi. Maanmittauslaitos. Luettu 25.4.2023. Saatavilla: <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematieto/sisatilanavigointi>

Laakkonen, O., Hirvonen, R. Paikannusteknologiat ovat tulossa myös rakennustyömaille. Karelia ammattikorkeakoulu. Luettu 25.3.2023. Saatavilla: <https://www.karelia.fi/2022/04/paikannusteknologiat-ovat-tulossa-myos-rakennustyomaille/>

Lahtinen, J. 2017. Tietomallinnuksen hyödyntäminen rakennusmittauksessa. Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Latvala, J. 2012. Tietomallinnuksen hyödyntäminen työmaatoiminnassa. Fira oy. Aalto University Professional Development. Aalto PRO. Luettu 15.3.2023. Saatavilla: http://aaltopro2.aalto.fi/lomakkeet/tilaukset/Rakentaminen/r34/LatvalaJyrki_Tietomallinnuksen_hyodyntaminen_tyomaatoiminnassa.pdf

Leica Geosystems Oy. 2017. Siirtyminen digitaaliseen rakentamiseen. Verkkojulkaisu. Viitattu: 5.3.2023

Lehtoviita, T., Rautiainen, J. 2019. Tietomallit rakennusten turvallisuuden varmistamisessa: Tietomallien tarkasteluohjelmien vertailu. Raportti. Saimaan ammattikorkeakoulu. Luettu: 2.3.2023. Saatavilla: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/225722/Tietomallien%20tarkasteluohjelmien%20vertailu.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Maanmittauslaitos. Maanmittauslaitoksen paikkatietoaineistojen formaatit. Luettu 19.3.2023. Saatavilla: <https://www.maanmittauslaitos.fi/paikkatietoaineistojen-formaatit>

Magicad. BIM: Building Information Modelling. Luettu 15.3.2023. Saatavilla: <https://www.magicad.com/fi/bim/#what-are-the-benefits-of-bim>

Matolog. Miten anturiteknologiamme toimii? Tuote-esittely. Luettu: 12.5.2023. Saatavilla: <https://matolog.fi/>

Matveinen, M., Hirvonen, R. 2022. 360-kuvauksen hyödyntämisen mahdollisuudet työmaatuotannossa. Karelia-ammattikorkeakoulu. Saatavilla: <https://www.karelia.fi/2022/12/360-kuvauksen-hyodyntamisen-mahdollisuudet-tyomaatuotannossa/>

Mölsä, Seppo. 2019. Mistä puhumme, kun puhumme tahtituotannosta? Rakennuslehti. Luettu 12.3.2023. Saatavilla: <https://www.rakennuslehti.fi/2019/12/mista-puhumme-kun-puhumme-tahtituotannosta/>

Palonen, J. 2020. Tietomallien hyödyntäminen kustannus- ja määrälaskennassa. Opinnäytetyö. LAB-ammattikorkeakoulu. Luettu 21.3.2023. Saatavilla: Theseus-tietokanta.

Paloniitty, S. 2020. Rakennusten lämpökuvaus miehittämättömällä ilma-aluksella (UAV). Opinnäytetyö. Rakennusterveysasiantuntija. RATEKO. Luettu 24.4.2023. Saatavilla: <https://www.paloniitty.fi/wp-content/uploads/tutkimusraportti.pdf>

Pehkuri, T. 2011. Rakennustyömaan visuaalinen johtaminen. Mestarityö. Metropolia ammattikorkeakoulu. Luettu 3.9.2023. Saatavilla: Theseus-tietokanta.

Peltokorpi, A., Lavikka, R., Chauhan, K. 2019. Esivalmistuksen vaikutusten arviointi. Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Building 2030 Esivalmistuksen pilotointi -osahankkeen loppuraportti 9/2018–8/2019. Luettu Luettu 4.8.2023. Saatavilla: https://www.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2019-10/loppuraportti_esivalmistuksen_vaikutusten_arviointi_23.10.2019.pdf

Peltokorpi, A., Lavikka, R., Tetik, M. 2019. Rakentamisen logistiikkaratkaisut. Building 2030 Rakentamisen logistiikkaratkaisut -osahankkeen loppuraportti 9/2018–8/2019. Luettu 10.8.2023 Saatavilla: https://www.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2019-10/loppuraportti_rakentamisen_logistiikkaratkaisut_23.10.2019.pdf

Peltokorpi, A., Lehtovaara, J., Prisching, D., Ahonen, T., Kerttula, J., 2022. Building 2030: Dataan pohjautuva organisaatioiden oppiminen. Aaltoyliopisto, Rakennustekniikan laitos. Loppuraportti. Luettu 13.8.2023. Saatavilla: https://www.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2022-02/Building2030-Dataan-pohjautuva-oppiminen-loppuraportti-2022-01-24_0.pdf

Peltokorpi, A., Tikka, T., Lehtovaara, J., Heinonen, H., Hänninen, O. 2022. Uusien toimintamallien jalkauttaminen rakentamisessa. Building 2030 osahankkeen loppuraportti. Aalto-yliopisto. Luettu 26.9.2023. Saatavilla: https://www.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2022-02/Building2030-Toimintatapojen-muutos-loppuraportti-2022-02-03_0.pdf

Polycon. IoT-olosuhdeseuranta. Palvelut. Luettu 28.8.2023. Saatavilla: <https://www.polygongroup.com/fi-FI/palvelut/olosuhdehallinta/iot-olosuhdeseuranta/>

Polycom. Lämmityspalvelu. Olosuhdehallinta. Palvelut. Luettu. 22.4.2023. Saatavilla: <https://www.polygongroup.com/fi-FI/palvelut/olosuhdehallinta/lammityspalvelut/>

Pöytäkivi, Olli. 2019. Mittausaineiston tuottaminen tietomallista. Insinööriyö. Metropolian ammattikorkeakoulu. Luettu: 5.5.2023. Saatavilla: Theseus-tietokanta.

QR-infoa. Staattiset ja dynaamiset koodit. Luettu: 12.5.2023. Saatavilla: <https://www.qr-koodi.net/staattiset-ja-dynaamiset-qr-koodit.html>

Rakennustieto. Rakennustiedon Tuotetieto - Ratkaisu elinkaaren aikaiseen tuotetiedon hallintaan. Palvelut. Luettu 2.9.2023. Saatavilla: <https://www.rakennustieto.fi/palvelut/tuotetieto>

RATU KI-6031. Rakennushankkeen ajallinen suunnittelu ja ohjaus. Talonrakennusteollisuus ry. Rakennustieto Oy

RATU S-1236. 2021. Olosuhteiden hallinta rakentamisessa. Suunnitteluohje. Rakennustieto Oy.

RATU C-0454. 2017. Rakennustyömaan aluesuunnittelu. Suunnitteluohje. Rakennustieto Oy.

RT 103132. 2019. Fotogrammetrian käyttö rakennushankkeessa. Ohjekortti. Rakennustieto Oy.

RT 103133. 2019. Rakennuksen laserkeilaus. Ohjekortti. Rakennustie Oy.

RT 103207. 2020. Rakennusten digitaalinen turvallisuus: Suunnittelijan ohje. Ohjekortti. Rakennustieto Oy.

RT 103375. 2021. Pistepilviaineisto suunnittelun lähtötietona ja inventointimalintaminen. Ohjekortti. Rakennustieto Oy.

RT 103597. 2023. Digitaaliset työkalut tilannekuvan ja tuottavuuden parantamiseen. Aiforsite Oy. Tuotetieto. Rakennustieto Oy.

RT 10-11072. 2012. Yleiset tietomallivaatimukset 2012. Osa 7. Määrälaskenta (Versio 1.0, 2012). Ohjeet. Rakennustieto Oy.

RT 10-11078. 2012. Yleiset tietomallivaatimukset 2012. Osa 13. Tietomallien hyödyntäminen rakentamisessa (Versio 1.0, 2012). Ohjeet. Rakennustieto Oy.

RT 10-11078. 2012. Yleiset tietomallivaatimukset 2012. Osa 13. Tietomallien hyödyntäminen rakentamisessa. Ohjeet. Rakennustieto Oy.

Salminen, J. 2020. Rakennushankkeen uusiutuvat toteutusmuodot (2. uudistettu painos). Helsinki: Rakennustieto Oy.

Salo, R. 2018. QR-koodien hyödyntäminen rakennuksen dokumenttien ja tietomallin tarkastelussa. Insinööriyö. Metropolian ammattikorkeakoulu. Luettu 7.5.2023. Saatavilla: Theseus-tietokanta.

Seppänen, O., Zhao, J., Badihi, B., Noreikis, M., Xiao, Y., Jäntti, R., Singh, V., Peltokorpi, A. 2019. Intelligent Construction Site (ICONS) Project Final Report. AaltoYliopisto. Loppuraportti. Luettu 2.9.2023. Saatavissa: https://www.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2019-02/icons_final_report.pdf

Seppänen, O., Barazi, A., Lappalainen, E., Görsch, C., Zheng, Y., Ibrahim, H., Laine, J. & Huovinen, A. 2023. Building 2030: Tuotantoprosessin digitaalinen kaksonen. AaltoYliopisto. Loppuraportti. Luettu 25.9.2023. Saatavissa: <https://www.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2023-03/Building-2030-digitaalinen-kaksonen-loppuraportti.pdf>

Seppänen, O., Lappalainen, E., Lehtovaara, J., Reinbold, A., Aikala, A., Zheng, Y., Kajander, J., Maliniemi, E., Hänninen, A. 2022. Building 2030: Visuaalinen johtaminen ja tilannekuvan käyttö. Aaltoyliopisto. Loppuraportti. Luettu 2.9.2023. Saatavilla: https://www.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2022-04/Building2030-visuaalinen-johtaminen-ja-tilannekuvan-kaytto_0.pdf

Shandong Renke. 2023. LoRa Technology: Its Difference With LoRaWAN. Luettu 30.8.2023. Saatavilla: <https://www.renkeer.com/lora-technology/>

Shandong Renke, 2021. What Is IoT? Top 16 IoT Sensors And Applications. Luettu 30.8.2023. Saatavilla: <https://www.renkeer.com/iot-sensors-applications/>

Silventoinen, J., Huusko, M. 2021. Granon SokoPro ja Congrid yhteistyöhön – integraatio mahdollistaa sujuvan ja tehokkaan tuotannonhallinnan. SokoPro. Luettu 4.4.2023. Saatavilla: <https://www.sokopro.com/granon-sokopro-ja-congrid-yhteistyohon-integraatio-mahdollistaa-sujuvan-ja-tehokkaan-tuotannonhallinnan/>

Skanska. 2021. Spot-robottikoira kartoitti työmaata ja suoritti millimetrin tarkkaa laserkeilausta – esimakua tulevaisuudesta. Luettu 18.8.2023. Saatavilla: <https://www.skanska.fi/tietoa-skanskasta/media/artikkelit/spot-robottikoira-kartoitti-tyomaata-ja-suoritti-millimetrin-tarkkaa-laserkeilausta-esimakua-tulevaisuudesta/>

Trimble. SketchUp Pro: Our full-featured desktop modeler, built to make anything your imagination can create. Saatavilla: <https://www.sketchup.com/products/sketchup-pro>

SokoPro. 2019. Suomen johtava projektipankki: Pääkäyttäjän opas. Sokopro. Gnano. Saatavilla: https://www.sokopro.com/wp-content/uploads/2019/02/Sokopro_paakayttajan_opas.pdf

Sokopro, Congrid. 2021. Granon SokoPro ja Congrid yhteistyöhön – integraatio mahdollistaa sujuvan ja tehokkaan tuotannonhallinnan. Palvelut. Saatavilla: <https://www.sokopro.com/granon-sokopro-ja-congrid-yhteistyohon-integraatio-mahdollistaa-sujuvan-ja-tehokkaan-tuotannonhallinnan/>

Sweco. 4D-aikataulut. Swecon digitaaliset ratkaisut. Luettu: 2.10.2023. Saatavilla: <https://www.sweco.fi/digitaaliset-ratkaisut/4d-aikataulut/>

Sweco. Smart drawings: Suunnitelmat helposti ymmärrettävään muotoon. Saatavilla: <https://www.sweco.fi/digitaaliset-ratkaisut/smartdrawings/>

Tietoa. Fotogrammetrian avulla tuotetaan luotettavia lähtötietoja: Fotogrammetria mittausmenetelmänä perustuu tuhansiin valokuviin. Palvelut. Luettu 23.4.2023. Saatavilla: <https://tietoa.fi/palvelut/luotettavat-lahtotiedot/fotogrammetria/>

Tirunagari, H., Kone, V. 2019. Simulation of Construction Sequence using BIM 4d Techniques. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences Publication. Saatavilla: <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v7i6c2/F11620476C219.pdf>

Trimble. Trimble SiteVision. Tuotteet. Saatavilla: <https://upa.trimble.com/fi-fi/tuotteet/sitevision-verkkoyhtiaille>

Tocoman. Projektinhallintaratkaisu. Saatavilla: <https://www.tocoman.fi/rakennusalan-ohjelmistot-kokonaisratkaisu>

Tocoman. Tempo: Työmaa aikataulussa. Hukka minimissä. Luettu: 3.10.2023
Saatavilla: <https://www.tocoman.fi/tempo>

Turunen, J. 2019. 360-videon ja LiveSYNC:in hyödyntäminen rakennusosalalla. Mestarityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

United BIM. What are BIM Dimensions – 3D, 4D, 5D, 6D, and 7D BIM Explained | Definition & Benefits. Luettu 16.3.2023. Saatavilla: <https://www.united-bim.com/what-are-bim-dimensions-3d-4d-5d-6d-7d-bim-explained-definition-benefits/>

VisualLive. Bring the power of BIM onto the jobsite. Lisätty 4.4.2023. Saatavilla: <https://unity.com/products/visuallive>

Ympäristöministeriö, 2022. Yleiset tietomallivaatimukset: Tietomallien hyödyntäminen rakennusvalvonnassa. Versio 0.8 | 2.2.2022. Tutkimusraportti. Saatavilla: https://kirahub.org/wp-content/uploads/2022/02/YTV2020-RAVA-ver-0_8-1.p

