



**TURUN
YLIOPISTO**
Kauppakorkeakoulu

Rakentamisen materiaalilogistiikan tehostaminen

Toimitusketjujen johtamisen
kandidaatin tutkielma

Laatija:
Heta Kojola

Ohjaaja:
KTT Sini Laari

15.12.2024

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidatutkielma

Oppiaine: Toimitusketjujen johtaminen

Tekijä: Heta Kojola

Otsikko: Rakentamisen materiaalilogistiikan tehostaminen

Ohjaaja: KTT Sini Laari

Sivumäärä: 35 sivua

Päivämäärä: 15.12.2024

Tutkielma käsittelee rakentamisen materiaalilogistiikan erityispiirteitä ja haasteita. Rakennustyömaalla 40 % tehdystä työstä on tuottamatonta, mikä voi johtua viivästyneistä materiaalityömaailtoimituksista, materiaalien katoamisesta tai rikkoutumisesta, äkillisistä rakennusaikataulun muutoksista tai heikosta tiedonkulusta logistiikkaketjussa. Materiaalikustannusten osuus rakennusprojektin kokonaiskustannuksista on merkittävä, minkä vuoksi niiden asianmukainen ja mahdollisimman tehokas hallinta on erittäin tärkeää ylimääräisten kustannusten minimoimiseksi.

Tavoitteena tutkielmassa on löytää näihin haasteisiin ratkaisuja, joiden avulla voidaan tehostaa rakentamisen materiaalilogistiikkaa ja samalla kasvattaa rakennustyömaan tuottavuutta minimoiden materiaalien käsittelystä aiheutuvat kustannukset. Tutkielmassa esitellään neljä perinteisempää toimitus- ja varastointiratkaisua ja muita modernimpia teknologioita ja hankkeita. Löydetyt ratkaisut soveltuvat logistiikkaketjun eri portaisiin ja vaikuttavat materiaalilogistiikan toimintoihin eri tavoin. Erilaiset rakennusprojektit vaativat niille sopivat menetelmät, jotta niiden tehokkuus voidaan maksimoida, minkä vuoksi ei voida nimetä tiettyjä kaikkiin projekteihin soveltuvia menetelmiä.

Tutkielman johtopäätöksissä todetaan materiaalilogistiikan haasteiden keskeisimmät yhdistävät tekijät ja perustellaan ne. Lisäksi kuvataan kaikki tutkielmassa esille nostetut tehostuskeinot yhdessä logistiikkaketjussa ja havainnollistetaan niiden vaikutusalueita. Johtopäätöksissä korostuvat rakentamisen materiaalilogistiikan erityispiirteet, tiedonkulun merkitys materiaalilogistiikan tehostamisessa sekä täsmätoimitukset merkittävänä kilpailukeinona rakennusmarkkinoilla yrityksen koosta riippumatta.

Avainsanat: Rakentamisen materiaalilogistiikka, Rakentamisen materiaalinhallinta, Täsmätoimitus

SISÄLLYS

1	Johdanto	6
1.1	Tutkielman tausta	6
1.2	Tutkimuskysymys ja tutkielman tavoitteet	7
1.3	Tutkielman rakenne	7
2	Rakentamisen materiaalilogistiikka	8
2.1	Rakentamisen materiaalilogistiikan erityispiirteet	8
2.2	Rakentamisen materiaalilogistiikan haasteet	9
3	Rakentamisen materiaalilogistiikan tehostaminen	12
3.1	Toimitus- ja varastointiratkaisut	12
3.1.1	Täsmätoimitukset	12
3.1.2	Logistiikkakeskus	13
3.1.3	Asennussarjat	14
3.1.4	Toimittajan hallinnoima varasto	16
3.2	Muita materiaalilogistiikan tehostamisen keinoja	17
3.2.1	Paikannus- ja seurantateknologiat (RFID ja GPS)	17
3.2.2	Materiaalilogistiikan seuranta (BIM ja GIS)	20
3.2.3	Työmaan materiaalilogistiikan hallinnan ulkoistaminen	22
3.2.4	Suomalaisia rakennusmateriaalin ja -logistiikan hallintakeinoja ja palveluntarjoajia	23
4	Yhteenveto ja johtopäätökset	28
	Lähteet	32

KUVIOT

- Kuvio 1. Materiaalien toimitusprosessi asennussarjoina. (Zheng ym., 2020. Muokattu.) 15
- Kuvio 2. Rakentamisen materiaalilogistiikan tehostamiskeinot sijoitettuna ja niiden vaikutusalueet kuvattuna logistiikkaketjussa. 29

TAULUKOT

- Taulukko 1. Rakentamisen materiaalilogistiikan keskeisten haasteiden syy-seuraussuhteet. 11

1 Johdanto

1.1 Tutkielman tausta

Rakennusmateriaalien toimittamiseen ja hallintaan liittyy useita haasteita, joilla on merkittävä vaikutus rakennusprojektin tuottavuuteen (Agapiou ym., 1998). Aikaisempien tutkimusten perusteella rakennusmateriaalien logistiikkakustannusten osuus rautakaupasta työmaalle vaihtelee 10–60 % välillä materiaalien ostohinnasta. Logistiikkakustannukset muodostavat siis suuren osan myös rakennusteollisuuden kokonaiskustannuksista, joten toimitusten tehokas suunnittelu voi sekä parantaa huomattavasti rakennustyömaan tuottavuutta että vähentää projektin kokonaiskustannuksia jopa 20 %. (Sundquist ym., 2018.) Ennenaikaisesti toimitetut rakennusmateriaalit vaativat usein myös paljon varastointikapasiteettia, mitä harvoin on saatavilla työmaalla. Varastot työmailla ovat yleensä tilapäisiä rakennelmia, joissa materiaalit saattavat vahingoittua vaihtelevien sääolosuhteiden ja työmaalla tapahtuvan liikehdinnän seurauksena. (Agapiou ym., 1998.)

Rakennusprojektin materiaalikustannukset muodostavat noin 30–70 % projektin kokonaiskustannuksista, mutta materiaalinhallinnan ymmärtäminen tilauksesta tuotantoon ei ole saanut siitä huolimatta kovinkaan paljon huomiota tutkijoilta (Donyavi & Flanagan, 2009). Monien tutkimusten perusteella myöskään rakentamisen kokoonpanotyön tuottavuutta ja virtausta ei ole onnistuttu tehostamaan samalla tavalla kuin muilla toimialoilla. Tehokkaalla materiaalinhallinnalla on merkittävä osuus kokoonpanotyön tuottavuuden tehostamisessa, koska kokoonpanotyö on riippuvaista oikeiden materiaalien saatavuudesta. (Tetik ym., 2020.) Vaikka logistiikan hallintajärjestelmien on yleisesti todettu parantavan työmaan tuottavuutta, on julkaistu vain muutamia tutkimuksia, joissa käsitellään rakentamisen logistiikan haasteita ja niihin tarjolla olevia hallintamalleja (Almohsen & Ruwanpura, 2013). Suurin osa alan tutkimuksesta on keskittynyt suunnittelu- ja hankintaprosessin hallintaan sekä työmaan tuottavuuden parantamiseen, vaikka oikeiden materiaalien saaminen oikeaan paikkaan oikeaan aikaan on yhtä tärkeää kuin yrityksen kassavirta ja pääoma, joiden avulla voidaan hankkia tarvittavia resursseja (Donyavi & Flanagan, 2009).

Työmailla työntekijät joutuvat usein keskeyttämään työnsä ja muuttamaan työtehtäviään puuttuvien materiaalien vuoksi. Puuttuvien materiaalien lisäksi haasteita liittyy myös materiaalien ylimääräiseen käsittelyyn ja kuljettamiseen työmaalla. (Görsch, 2024.) On havaittu, että rakennustyöntekijät käyttävät 15 % kokonaistyöajastaan materiaalien ja laitteiden siirtämiseen kokoonpanopaikoilla ja että työmailla koneiden käyttöaste on niin alhainen, ettei mikään fyysinen resurssi ole käytössä yli 50

% mahdollisesta työajasta. Lisäksi on tutkittu, että työmailla tehdään niin paljon manuaalista työtä, että käsin kuljettaminen vastaa 43 % työmaiden logistiikkakustannuksista. (Wegelius-Lehtonen, 2001.) Vähintään 20 % rakennusprojektin kokonaismäärästä on jätettä, 30 % rakennustöistä on uudelleen tekemistä, 40 % työmailla tehdystä työstä on tuottamatonta, 40 % projekteista ylittää budjetin ja 90 % projekteista myöhästyy (Forbes & Ahmed, 2010). Näiden edellä mainittujen tehottomuutta osoittavien prosentiosuuksien perusteella rakentamisen materiaalilogistiikan tehostamiseen keskittyvälle tutkimukselle on tarvetta.

1.2 Tutkimuskysymys ja tutkielman tavoitteet

Tämän tutkielman aihepiiri ja tavoitteet voidaan kiteyttää yhden tutkimuskysymyksen alle:

Miten rakentamisen materiaalilogistiikkaa voidaan tehostaa?

Tutkielmassa nostetaan esille rakentamisen materiaalilogistiikan erityispiirteitä ja haasteita ja tavoitteena on löytää keinoja näiden haasteiden ratkaisemiseksi ja sitä kautta rakennustyömaan tuottavuuden tehostamiseksi. Materiaalien toimituksiin liittyen tutkielmassa syvennyttään tarkemmin oikea-aikaisiin toimituksiin, niihin kohdistuviin haasteisiin ja pyritään löytämään mahdollisuuksia niiden kehittämiseksi ja varmistamiseksi. Tutkielmassa esitellään ja arvioidaan sekä perinteisempiä toimitus- ja varastointiratkaisuja että modernimpia teknologioita työmaan materiaalinhallinnan ja logistiikan eri osa-alueisiin liittyvien haasteiden ratkaisemiseksi ja tehokkuuden edistämiseksi.

1.3 Tutkielman rakenne

Tutkielma koostuu neljästä pääluvusta ja niiden alaluvuista. Ensimmäinen luku on johdanto, joka jakautuu kolmeen alalukuun. Johdannossa taustoitetaan aihepiirin valintaa, esitellään tutkimuskysymys ja asetetaan tavoitteet tutkielmalle sekä käydään läpi tutkielman rakenne. Toinen pääluke käsittelee rakentamisen materiaalilogistiikan erityispiirteitä ja haasteita sekä toimitusten että materiaalien varastoinnin ja käsittelyn osalta. Kolmannessa pääluvussa esitellään rakennusteollisuuden sopivia toimitus- ja varastointiratkaisuja, joiden avulla pyritään edistämään rakennusmateriaalien oikea-aikaisia toimituksia, tehostamaan materiaalien varastointia ja minimoimaan niiden tarpeetonta käsittelyä. Lisäksi luvussa tutkitaan ja arvioidaan, miten erilaisia teknologioita voidaan hyödyntää materiaalinhallinnan ja logistiikan eri osa-alueiden haasteisiin vastaamiseksi. Neljännessä pääluvussa eli yhteenvedossa kootaan tutkielman keskeisimmät tulokset ja esitetään johtopäätökset.

2 Rakentamisen materiaalilogistiikka

Donyavin & Flanagan (2009) mukaan rakentamisen materiaalinhallinta voidaan jakaa viiteen osaan: Mittaus ja spesifointi, hankintaprosessi, materiaalin toimittaminen, purkaminen ja varastointi työmaalla, maksuprosessi sekä materiaalien hyödyntäminen ja hukan minimointi työmaalla. Tässä tutkielmassa aihetta tarkastellaan rakennustyömaan näkökulmasta ja tarkoitus on käsitellä nimenomaan työmaan materiaalinhallintaa ja logistiikkaa eli materiaalien toimituksia sekä rakennustyömaalla tapahtuvaa materiaalien varastointia ja käsittelyä. Sundquist ym. (2018) määrittelevät rakennustyömaan materiaalinhallinnan ”toimitusten, varastoinnin, materiaalien käsittelyn, tilojen ja resurssien allokoinniksi työntekijöiden tueksi ja ruuhkasta sekä materiaalien liiallisesta liikuttelusta johtuvan tehottomuuden minimoinniksi”.

Janné & Fredriksson (2022) mukaan rakentamisen materiaalilogistiikka voidaan jakaa kahteen osaan: logistiikkatoimintojen hallintaan työmaalla sekä resurssien ja materiaalien kuljetukseen työmaalle ja sieltä pois. Agapiou ym. (1998) sen sijaan painottavat logististen toimintojen roolia tavaroiden kuljettamisessa ja varastoinnissa tavoitteena ohjata materiaalit oikeaan paikkaan oikeaan aikaan. Jotta projektin onnistuminen voidaan taata, logistiikan täytyy olla johdonmukaista myös työmaalla, koska tehokasta logistiikkaa voidaan pitää yhtenä päätekijänä työvoiman tuottavuuden kasvussa rakennustyömaalla (Almohsen & Ruwanpura, 2013).

2.1 Rakentamisen materiaalilogistiikan erityispiirteet

Rakennusteollisuudessa on muihin teollisuudenaloihin verrattuna omia erityispiirteitä, jotka vaikuttavat sen materiaalilogistiikkaan (Tanskanen ym., 2009). Rakennusmateriaalit ja työvälineet muodostavat merkittävän osan koko rakennusprojektin budjetista, ja sen vuoksi niiden huolimaton tai tehoton käsittely aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia ja samalla laskee työn tuottavuutta (Almohsen & Ruwanpura, 2013). Rakentamisen materiaalilogistiikan tehokkaalla hallinnalla on siis merkittävä osuus suuren materiaalmäärän hallinnassa ja tiedonkulun edistämässä rakentamisen toimitusketjun toimijoiden välillä (Janné & Fredriksson, 2022).

Rakentamisessa on monia ainutlaatuisia materiaaleja ja komponentteja, joita on seurattava yksilöllisesti ja jotka vaativat ainutlaatuisia käsittely- ja asennustekniikoita (Ergen & Akinci, 2007). Rakennusmateriaalien ominaisuudet ovat vaihtelevia, mikä täytyy huomioida etenkin niiden työmaa-aikaisessa käsittelyssä ja varastointiratkaisuissa. Muita materiaalien käsittelyssä huomioitavia asioita ovat muun muassa materiaalin pakointi, varastointi työmaalla ja kuljettaminen työmaalla tarvittavalle työpisteelle tai vapaana olevalle alueelle. (Agapiou ym., 1998.) Noin 15 %

työntekijöiden työajasta työmaalla kuluu materiaalien ja työvälineiden kuljettamiseen oikealle työpisteelle (Strandberg & Josephson, 2005), joten materiaalien käsittely vaatii kokonaisuudessaan kehittämistä tehokkaamman työmaan saavuttamiseksi, koska heikko materiaalien käsittely vaikuttaa työmaan kokonaisuorituskykyyn projektin kustannusten, ajan, laadun ja tuottavuuden näkökulmasta (Kulkarni ym., 2017). Rakentamisen tuotantoprosessia on haastava verrata esimerkiksi kulutustavaroiden tuotantoprosessiin, koska jokainen rakennusprojekti ja lopputuote on erilainen ja tuotantopaikka vaihtuu aina uuden projektin alkaessa, minkä vuoksi materiaalilogistiikalta vaaditaan erityistä joustavuutta. Näiden lisäksi jokaisessa projektissa on vaihtelua myös suunnittelijoiden, insinöörien ja toimittajien osalta, jotka vaikuttavat materiaalien hankintaan, ja sitä kautta niiden toimitus- ja varastointimahdollisuuksiin. (Tanskanen ym., 2009.)

Rakentamisen materiaalilogistiikan hallinnan laajuus ja toimintatavat vaihtelevat eri kokoisten yritysten välillä (Kulkarni ym., 2017). Suurimman osan rakennusyrittäjästä muodostavat pienet ja mikroyritykset, joilla ei ole resursseja investoida teknologiaan, ja sen vuoksi teknologian mahdollisuuksien saavuttaminen ja eduista nauttiminen jää niille kaukaiseksi (Dainty ym., 2017). Suuret yritykset sen sijaan hyödyntävät enemmän teknologiaa kuten erilaisia materiaalinhallintajärjestelmiä ja niissä on usein enemmän osaamista erilaisten materiaalinhallintatekniikoiden soveltamiseen ja käyttöönottoon työmaalla. (Kulkarni ym., 2017.)

2.2 Rakentamisen materiaalilogistiikan haasteet

Suurimmat haasteet rakennustyömaan materiaalilogistiikassa ovat materiaalien väärä toimitusaika, heikko tiedonkulku logistiikkaketjun toimijoiden välillä, tilanpuute työmaalla, vahingoittuneet tai kadoksissa olevat materiaalit, varastotilan puute ja työntekijöiden ajan kulumisen materiaalien etsimisessä (Donyavi & Flanagan, 2009). Joskus työmaalle toimitettu materiaali on väärä tai ei täytä asetettuja kriteerejä, jolloin se joudutaan palauttamaan. Tällaiset tilanteet aiheuttavat sekä työn keskeytyksiä että viivästyksiä suunniteltuun rakennusaikatauluun. (Agapiou ym., 1998.) Materiaali on rakennusprojektin pääkomponentti, jonka tehon hallinta aiheuttaa kustannuksia. Jos materiaalit hankitaan ja toimitetaan ennen aikaisesti, ylimääräinen varasto sitoo pääomaa ja aiheuttaa korkokustannuksia. (Kulkarni ym., 2017.) Työmaalla materiaalinhallinnan haasteet liittyvät pitkälti järkevän varastoinnin toteuttamiseen sekä materiaalien ylimääräisen käsittelyn ja hukan minimointiin (Kasim, 2008).

Rakennusaikatauluun ja sen suunnitteluun liittyy paljon epävarmuustekijöitä, joihin on haastava varautua. Esimerkiksi työmaaympäristön arvaamattomiin sääolosuhteisiin varautuminen ja sen huomioiminen rakennusaikataulun suunnittelussa on yksi isoista haasteista, joka vaikuttaa koko

rakennusprojektin etenemiseen. (Donyavi & Flanagan, 2009.) Sen lisäksi myös varastoinnin tulisi mukailta rakennusaikataulua ja -järjestystä, jotta työmaa-aikainen materiaalien liikuttaminen olisi mahdollisimman vähäistä. Materiaalien toimitusten aikatauluttaminen yhteensopivaksi rakennusaikataulun ja vapaan varastotilan kanssa on monimutkaista, koska alkuperäinen aikataulu ja toimittajan kanssa tehty sopimus eivät välttämättä ole ajan tasalla ja aikataulussa voi tapahtua merkittäviä muutoksia ennen materiaalien toimitusta. (Agapiou ym., 1998.) Rakennusmateriaalien toimittajien on mukautettava toimintaansa ja resurssejaan suhteessa työmaan aikatauluihin tehtyihin muutoksiin, mikä johtuu riippuvuuksista työmaan ja sen ulkopuolella tapahtuvien toimintojen välillä (Sundquist ym., 2018). Samalla rakennusaikataulun epävarmuus aiheuttaa materiaalikysynnässä ja tarjonnassa suuria heilahteluja, koska materiaalien kysyntä ei ole syklistä tai kausiluonteista ja sitä on vaikea ennustaa, mikä vaikuttaa niiden saatavuuteen ja sitä kautta toimituksiin (Hamzeh ym., 2007).

Rakennusteollisuudessa seurataan aikataulua, jossa jokainen aikataulutettu työvaihe vaatii oikean määrän tiettyjä materiaaleja. Jokaisen työvaiheen aloituksessa ja kestossa saattaa tapahtua muutoksia johtuen työvaiheen laajuuden epävarmasta määrittelystä, työympäristöstä, resurssien allokoinnista, toiminnan rajoituksista, toimintojen järjestyksestä sekä riippuvuudesta ja käytetyistä menetelmistä. (Hamzeh ym., 2007.) Materiaalien toimitusaikataulun täytyy tukea ajantasaista ja yksityiskohtaista kokoonpanoaikataulua, jotta työvaiheet voidaan suorittaa oikeaan aikaan. Tällä tavalla voidaan välttää työvaiheen keskeytyminen sitä edeltävän suorittamattoman kokoonpanotehtävän vuoksi. (Tetik ym., 2020.) Samalla tavalla työvaihe voi keskeytyä materiaalien tai komponenttien vaatimien tarkkojen käsittely- ja asennusohjeiden puutteen takia, koska työntekijät joutuvat kuluttamaan aikaansa materiaaleihin liittyvien tietojen ja ohjeiden etsimiseen (Ergen & Akinci, 2007).

Työmaalla on monta liikkuvaa osaa, jotka yhdessä tekevät sen materiaalilogistiikan hallinnasta monimutkaista ja haastavaa. Esimerkiksi työmaahan liittyvät elementit, kuten työmaan aidat, varastot ja työskentelyalueet muuttuvat jatkuvasti. Rakennustyömaan jatkuva liikkuvuus aiheuttaa samalla muutoksia myös logistiikan suunnittelun kannalta oleellisissa toiminnoissa. (Almohsen & Ruwanpura, 2013.) Rakennustyömaa voidaan Donyavin & Flanagan (2009) mukaan jakaa toiminta-alueisiin, joihin kuuluvat muun muassa sisäänkäynti, laskualue, asennusalue, varastoalue ja jätealue. Näiden lisäksi työmaalla voi olla työmaatoimisto, työntekijöiden tiloja ja muiden työvälineiden varastotiloja. Rakennustyömaa on siis ympäristönä ahdas ja kompleksinen, minkä vuoksi materiaalien liikuttaminen ja niiden varastoiminen siellä täytyy olla hyvin harkittua ja suunniteltua. (Donyavi & Flanagan, 2009.)

Heikko tiedonkulku logistiikkaketjussa	Muutoksiin ei osata varautua ja logistiikan toimintojen hallinta ja rakennusaikataulu kärsii
Viivästyneet tai ennenaikaiset toimitukset	Materiaaleja joudutaan varastoimaan, työ keskeytyy ja rakennusaikataulu viivästyy
Laadukkaan varastotilan puute työmaalla	Lisää materiaalien vahingoittumisen, katoamisen ja varastetuksi tulemisen riskiä
Heikko varastotason seuranta	Yksittäisiä kaupassa käyntejä, turhia tilauksia, ylimääräistä varastointia
Toimitetut materiaalit ovat väärinä tai eivät täytä laatukriteereitä	Materiaalit palautetaan, työ keskeytyy ja rakennusaikataulu viivästyy
Rakentamisaikataulun muutokset ja epävarmuus	Muutoksia koko logistiikkaketjuun sekä heilahteluja materiaalien kysyntään ja tarjontaan
Työvaiheiden keskinäinen riippuvuus	Työ keskeytyy, jos seuraava työvaihe vaatii edeltävän työvaiheen, jota ei voida suorittaa ajallaan
Työmaan liikkuvuus ja ahtaus	Haasteita logistiikan toimintojen suunnitteluun kuten materiaalien turvalliseen liikuttamiseen ja sijoittamiseen

Taulukko 1. Rakentamisen materiaalilogistiikan keskeisten haasteiden syy-seuraussuhteet.

Taulukossa 1. on listattuna esille nostetut rakentamisen materiaalilogistiikan haasteet. Ylimpänä on heikko tiedonkulku logistiikkaketjussa, joka aiheuttaa haasteita kokonaisuudessaan materiaalilogistiikkaan. Sitä voidaan pitää yhtenä merkittävimpänä rakentamisen materiaalilogistiikan haasteena, koska koko toimitusketju aina tilausprosessin alusta materiaalin toimittamiseen työmaalle sisältää monia muuttujia, jotka täytyy ottaa huomioon työmaan logistiikassa. Jos tiedonkulku ei ole sujuvaa, mahdollisiin muutoksiin ei osata varautua ja tuottavuus kärsii. (Almohsen & Ruwanpura, 2013.) Logistiikan toimintojen hallinta vaatii siis yksityiskohtaista suunnittelua, valvontaa ja hyvää koordinaointia, jotta kaikki logistiikkaketjun toimijat pystyvät ennakoimaan ja sopeuttamaan toimintonsa mahdollisten muutosten vaatimalla tavalla.

3 Rakentamisen materiaalilogistiikan tehostaminen

3.1 Toimitus- ja varastointiratkaisut

Materiaalilogistiikan yksityiskohtia kehitetään ja tarkennetaan jatkuvasti, jotta materiaalien ja resurssien liikkeiden hallinnassa saavutetaan optimaalinen tehokkuus (Whitlock ym., 2018). Materiaalien varastointi työmaan ulkopuolella esimerkiksi logistiikkakeskuksessa voi parantaa materiaalinhallintaa vähentämällä sen altistumista ylimääräiselle käsittelylle ja sitä kautta vahingoittumiselle. Samalla se vapauttaa henkilökunnalle työaikaa projektille lisäarvoa tuottavien työvaiheiden edistämiseen. (Janné & Fredriksson, 2022.)

Materiaalivirran hallinta, laadun ja määrän varmistaminen, varastotilan varaaminen, tilaaminen ja eri osapuolten tiedottaminen ovat avainasemassa rakentamisen materiaalilogistiikan hallinnassa (Almohsen & Ruwanpura, 2013). Toimitusten ja varastoinnin välille tulisi löytää tasapaino, koska aina, kun toimitus saapuu, työ on keskeytettävä toimituksen vastaanottamiseksi. Toisaalta, jos toimituksia on harvemmin, täytyy työmaalla varastoida materiaaleja paljon enemmän, mikä lisää työmaalla tapahtuvaa logistiikkaa sekä materiaaleihin kohdistuvia varkauksia ja rikkoutumisia. (Janné & Fredriksson, 2022.) Seuraavaksi esitellään ja arvioidaan neljä toimitus- ja varastointiratkaisua, jotka ovat rakennusteollisuudessa työmaan materiaalilogistiikan tehostamiseksi käytettyjä ratkaisuja.

3.1.1 Täsmätoimitukset

Täsmätoimituksilla (engl. just-in-time-delivery) pyritään varmistamaan, että materiaalit toimitetaan oikeaan aikaan suoraan niille osoitettuun työvaiheeseen samalla saavuttaen mahdollisimman pienen varastotason (Akintoye, 1995). Se onkin tunnettu ja yleisesti käytetty menettely rakennuslogistiikan hallinnassa (Whitlock ym., 2018). Tehokkailla JIT-toimituksilla ja -materiaalinhallinnalla on mahdollista saavuttaa merkittävää kilpailuetua rakennusmarkkinoilla, koska rakennusyritysten on panostettava strategioihin, joilla voidaan minimoida ylimääräisen varaston ylläpito rakennustyömaalla ja samalla vähentää huomattavasti tuotantokustannuksia (Akintoye, 1995).

JIT-toimitukset rakentuvat kuudesta peruspilarista, joita ovat: vetoperusteisuus, hukan eliminoiminen, työn sujuvuus, laadunhallinta, toimittajasuhteet ja ylimmän johdon sitoutuminen. Vetoperusteisuudella tarkoitetaan materiaalien toimittamista kysynnän perusteella, jotta voidaan välttyä korkeilta varastotasoilta ja toimittaa materiaalit juuri siihen aikaan, kun niille osoitettu työvaihe sitä vaatii. (Hussein & Zayed, 2021.) Kun toimitus suoritetaan suoraan toimittajalta oikealle

työpisteelle, voidaan samalla minimoida materiaalien ylimääräistä liikuttelua työmaalla. Täsmätoimituksilla pyritään nopeaan varastonkiertoon, jotta voidaan saavuttaa mahdollisimman matala varastotaso tai jopa nollavarasto. Siten voidaan ansaita kustannussäästöjä ja samalla minimoida hukkaa kuten ylituotantoa, odottamista, kuljetusta, käsittelyä ja varastointia. (Akintoye, 1995.) Muita etuja ovat muun muassa sekä rakennusmateriaalien ja -laitteiden vahingoittumisen ja häviämisen riskin että työmaan ruuhkien ja turvallisuusriskien vähentyminen (Whitlock ym., 2018).

Työn sujuvuudella viitataan keskeytymättömään työnkulkuun, joka vaatii onnistuakseen materiaalien vaaditun laadun ja määrän varmistamisen. Jotta edellä mainitut peruspilarit täyttyvät, ovat sitoutuneet ja pitkäaikaiset toimittajasuhteet merkityksellisiä. JIT-toimitusten etujen saavuttamiseksi tarvitaan sekä ylimmän johdon sitoutuneisuutta että työntekijöiden osallistumista. (Hussein & Zayed, 2021.) JIT-toimitusten toteutuminen vaatii JIT-ajattelua ja toimintaa koko toimitusketjulta aina tuotannon suunnittelusta ja toimittajasuhteista materiaalien hankintaan. Joskus toimittajien valinta saattaa perustua edullisimpiin hintoihin, mutta JIT-toimituksiin pyrkiessä tärkeämpää on toimittajien sitoutuneisuus JIT-toimitusten toteuttamiseen ja pitkäaikaiseen kumppanuuteen. (Akintoye, 1995.)

3.1.2 Logistiikkakeskus

Logistiikkakeskus on logistiikkaketjun materiaalivirtojen keskus, joka mahdollistaa monien kuljetusmuotojen käytön, välivarastointia ja muita lisäarvopalveluja kuten tavaran uudelleen pakkausta (Hamzeh ym., 2007). Esimerkiksi JIT-toimitusten tehokkuutta ja tuottavuutta voidaan edelleen parantaa ottamalla käyttöön rakennusmateriaalien ja -laitteiden toimituksia varten logistiikkakeskus (Whitlock ym., 2018). Logistiikkakeskuksen toiminnot voidaan jakaa neljään osaan: (1) suora toimitus työmaalle, (2) toimitus logistiikkakeskukselle, (3) lisäarvopalvelut logistiikkakeskuksessa ja (4) kuljetus logistiikkakeskuksesta työmaalle (Janné & Fredriksson, 2022). Näistä voidaan hyödyntää yhtä tai useampaa palvelua tietyn projektin toimitusketjun vaatimusten mukaisesti (Hamzeh ym., 2007).

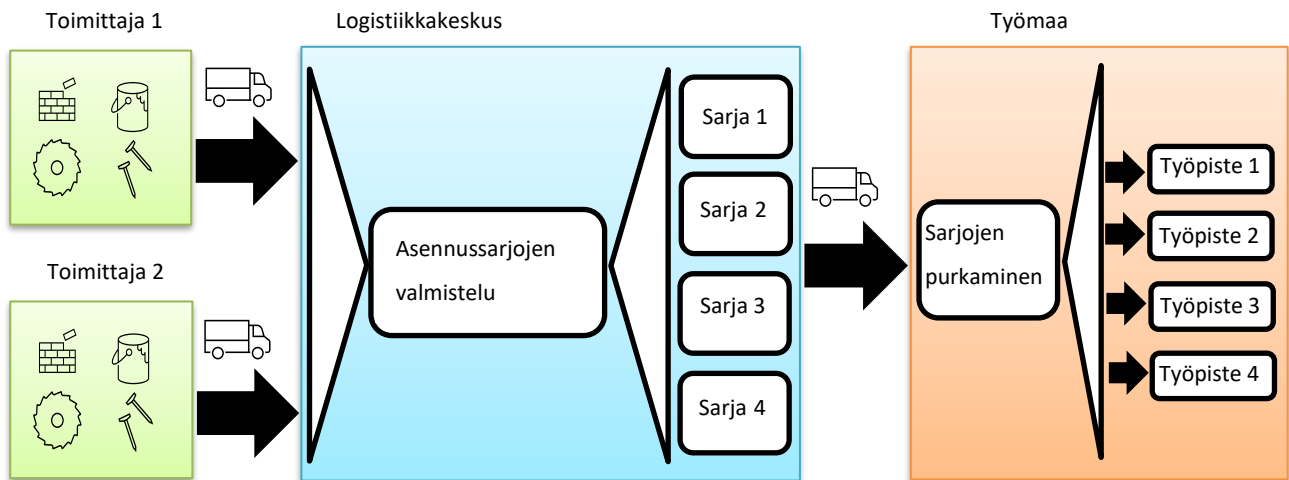
Suoria kuljetuksia käytetään toimituksissa, joissa saavutetaan jo valmiiksi korkea täyttöaste tai ne ovat ominaisuuksiltaan sellaisia, joissa yhdistäminen ei ole tarpeellista, esim. teräs, betoni ja suurikokoiset elementit. Jos materiaalit kuljetetaan ensin logistiikkakeskukseen, materiaalit vastaanotetaan, rekisteröidään, yhdistetään ja siirretään tarvittaessa varastoon. Kun materiaalit lähtevät logistiikkakeskuksesta työmaalle, eri toimittajien materiaalit poimitaan, pakataan ja kuljetetaan yhtenä toimituksena. (Janné & Fredriksson, 2022.) Suoraan toimitukseen verrattuna nämä lisäarvopalvelut pidentävät toimitusaikaa sekä lisäävät toimituskustannuksia (Janné, 2020).

Logistiikkakeskuksen varastointi -palvelulla voidaan vähentää työmaalla tapahtuvaa varastointia ja esimerkiksi yhdistää eri projektien varastoja (Hamzeh ym., 2007). Siten logistiikkakeskuksen varastoinnin avulla voidaan ylläpitää riittävää varmuusvarastoa, jota ei kuitenkaan tarvitse toteuttaa työmaalla. Siitä aiheutuvia lisäkustannuksia voidaan kompensoida harvemmillä toimituksilla työmaalle, mikä samalla vähentää työn keskeytyksiä. (Janné, 2020.) Logistiikkakeskuksessa varastoitu materiaali voidaan toimittaa helpommin oikeaan aikaan riippuen keskuksen sijainnista työmaahan nähden (Hamzeh ym., 2007). Suurissa kaupungeissa, joissa liikenne on vilkasta, logistiikkakeskus tarjoaa mahdollisuuden välttää täysin kaupungin keskustaan saapuvan rahtiliikenteen, koska logistiikkakeskukset sijaitsevat yleensä reuna-alueilla, jolloin rahtiliikenne työmaalle vähenee jopa 70% (Whitlock ym., 2018). Työmaa pysyy myös siistimpänä ja järjestelmällisempänä, kun materiaalit toimitetaan yhdenmukaisina toimituksina niitä tarvittavaan työvaiheeseen oikeaan aikaan (Janné, 2020).

Logistiikkakeskusten hyödyntäminen on yhä yleisempää rakennusteollisuudessa, koska urakoitsijat ovat ymmärtäneet toimitusketjun hallinnan merkityksen rakentamisessa (Sundquist ym., 2018). Siitä huolimatta logistiikkakeskuksen ongelmana saattaa olla ylimääräinen solmu toimitusketjussa, jonka hallinta vaatii panosta myös toimittajilta ja urakoitsijoilta, jotka eivät välttämättä ole tottuneet työskentelemään logistiikkakeskuksen parissa. Pahimmassa tapauksessa se saattaa vaikuttaa myös negatiivisesti projektin tehokkuuteen ja lisätä kustannuksia, jos sen hallinta ja toiminnot eivät ole riittävän sujuvia. (Janné, 2020.)

3.1.3 Asennussarjat

Asennussarjoilla tarkoitetaan tiettyjen tuotteiden tai komponenttien järjestämistä, pakkaamista ja toimittamista yhtenä pakettina kokoonpanopaikalle (Zheng ym., 2020). Logistiikkakeskuksessa kerätään tiettyyn kokoonpanotehtävään kuuluvat materiaalit yhdeksi asennussarjaksi esimerkiksi laatikkoon, jossa ne toimitetaan työpisteelle JIT-toimituksena. Kun asennussarjat toimitetaan JIT-toimituksena työmaalle, ne voidaan asentaa välittömästi ilman työmaalla tapahtuvaa varastointia. (Tetik ym., 2020.) Asennussarjat voidaan toimittaa lähelle asennuspaikkaa ja siten vähentää tarvittavien materiaalien siirtelyyn tai etsimiseen kuluva aikaa työntekijöiltä (Zheng ym., 2020). Ratkaisu sopii etenkin paljon pieniä tarvikkeita tai materiaaleja vaativiin tehtäviin, koska suuret materiaalit toimitetaan yleensä yhtenä kuljetuksena suoraan työmaalle. Asennussarjoilla voidaan varmistaa materiaalien täyttävän laatukriteerit, kun materiaalit lajitellaan asennussarjoihin, joista voidaan erotella vialliset tai vahingoittuneet materiaalit. Tällä tavalla työmaalle ei päädy tarpeettomia tai vahingoittuneita materiaaleja. (Tetik ym., 2020.)



Kuvio 1. Materiaalien toimitusprosessi asennussarjoina. (Zheng ym., 2020. Muokattu.)

Asennussarjojen kustannuksia on tutkittu suhteellisen vähän (El Moussaoui ym., 2021). Menetelmän kokonaiskustannukset muodostuvat karkeasti varastovuokrasta, materiaalien keräämisestä ja pakkaamisesta, toimitusten aikataulutuksesta, kuljetuksista työmaalle ja työmaan sisällä sekä hallintokuluista. Samaan aikaan ratkaisu vapauttaa työmaalla työaikaa ja työvoimaa, vähentää varastointikustannuksia, paperityötä ja tilauskustannuksia. (Tetik ym., 2020.) Lisäksi se vapauttaa työskentely tilaa työmaalla, koska materiaaleja säilötään työmaan sijaan logistiikkakeskuksessa (Bozer & McGinnis, 1992).

Koordinoidut materiaalitoimitukset helpottavat rakennusaikataulussa pysymistä ja työvaiheiden johdonmukaista suorittamista, mutta materiaalitoimitusten hallinta on ongelmallista, koska rakennusprojektit vaativat laajan skaalan materiaaleja eri työvaiheisiin, joista ovat vastuussa eri toimijat, jotka tilaavat ja käsittelevät materiaalit itse. Siten keskitetysti hankittujen materiaalien sarjoittamisella voitaisiin tehostaa materiaalitoimituksia. (Tetik ym., 2020.) Samalla se antaa mahdollisuuden komponenttien huolellisempaan hallintaan, mikä tulee kyseeseen erityisesti kalliimpien ja varoivaisempaa käsittelyä vaativien tuotteiden kohdalla (Bozer & McGinnis, 1992).

Työvaiheiden suorittaminen on riippuvaista materiaalien saatavuudesta sekä pitkällä että lyhyellä aikavälillä. Ylimääräisiltä toiminnoilta, kuten materiaalien käsittelyltä voidaan välttyä, jos vain tarvittavat materiaalit ovat saatavilla oikeaan aikaan. (Tetik ym., 2020.) Logistiikan näkökulmasta tarkasteltuna asennussarjojen odotetaan helpottavan toimintojen organisointia työmaalla ja luovan perustan täsmätoimitusten toteuttamiselle, kun tavoitteena on toimittaa oikea määrä materiaaleja oikeaan paikkaan (El Moussaoui ym., 2021). Asennussarjojen hyödyntämisestä saadut tulokset ovat yhtenevät olemassa olevan tutkimuksen kanssa, mikä viittaa siihen, että materiaalihallintaan liittyvät tekijät voivat vaikuttaa työn tuottavuuteen. Asennussarjoilla voidaan saavuttaa työn tuottavuusetuja

tietyin edellytyksin, kuten ajantasaisen rakennusaikataulun ja tehtäväkohtaisen materiaaliluettelon toteutuessa. (Tetik ym., 2020.)

3.1.4 Toimittajan hallinnoima varasto

Toimittajan hallinnoima varasto (engl. vendor-managed-inventory) on rakennustyömaalla sijaitseva pienmyymälä, jota voidaan hyödyntää erityisesti rakennusalan pientavaralogistiikan tehostamisessa (Tanskanen ym., 2009). Sitä käytetään tilapäisenä varastointialueena kulutustarvikkeille, kiinnikkeille ja pienille työkaluille, joita käytetään laajasti ja jaetaan useiden eri urakoitsijoiden kesken työmaalla (Whitlock ym., 2018). Toimittaja pystyy seuraamaan ja ylläpitämään reaaliaikaisesti sopivaa varastotasoa ja sen kanssa voidaan sopia asianmukaisista varastokäytännöistä näiden tasojen ylläpitämiseksi (Sari, 2007). Rakennusyhtiön rakennuttama ja kalustama myymälä voidaan siirtää rakennusprojektilta toiseen, joten se on kestävä ratkaisu ja sopii hyvin rakennusalan tuotantopaikkojen vaihtuvuuteen. Projektin päätyttyä se tyhjennetään ja täytetään seuraavan projektin tarpeisiin sopivaksi uudella työmaalla. (Tanskanen ym., 2009.)

Toimittajan hallinnoima varasto on pienmyymälä, jossa asioiminen toimii itsepalveluperiaatteella. Toimittaja voi asettaa tiettyjä palvelutaso- ja hyllytilavaatimuksia, jotka tulee ottaa huomioon myymälän suunnittelussa. (Sari, 2007.) Hyllyt suunnitellaan pientavaroille sopiviksi ja tuotteet merkitään viivakoodein, jotta henkilöstö pystyy viivakoodinlukijan avulla rekisteröidä materiaalit, joiden perusteella toimittaja laskuttaa rakennusyhtiötä. Samalla hakija voi nimetä oston käyttötarkoituksen, jotta kustannukset voidaan kirjanpidossa kohdistaa oikealle projektille ja työvaiheelle. Myymälän oikea-aikainen täydentäminen varmistuu VMI-täydennysjärjestelmän avulla, joka ilmoittaa toimittajalle täydennystarpeesta varastotason laskiessa uudelleentilauuspisteeseen. (Tanskanen ym., 2009.)

VMI-ratkaisulla voidaan vähentää materiaalin etsimiseen, vastaanottoon sekä käsittelyyn kuluva aikaa työmaalla, koska materiaalit ovat selkeässä järjestyksessä myymälässä ja toimittaja huolehtii niiden saatavuudesta. Työmaan henkilökunnan ei myöskään tarvitse käyttää aikaa varaston järjestelyyn tai siivoamiseen. (Sari, 2007.) Merkittävää on, että VMI-ratkaisun avulla voidaan vähentää huomattavasti henkilöstön yksittäisiä rautakaupassa käyntejä ja siten päästä eroon niistä aiheutuvista kustannuksista ja työn keskeytyksistä. Pienten yksittäisten laskujen poistumisen myötä niiden käsittelyyn kuluva aikaa sekä työmaalla että taloushallinnossa voidaan vähentää jopa 90 %. Sen sijaan aikaa kuuluu ostojen rekisteröintiin, mikä on tutkimusten mukaan 40 % pidempi aika kuin vastaavan materiaalin tilaaminen varastoon. (Tanskanen ym., 2009.)

Täydennysjärjestelmä pitää huolen varastotason pysymisestä kohtuullisena, minkä ansiosta voidaan välttää materiaalien saatavuusongelmat työmaalla (Sari, 2007). Se mahdollistaa tehokkaan resurssien käytön ja pienentää myös jäljelle jäävän varaston arvoa. Mitä pienempi varaston arvo on projektin valmistuessa, sitä vähemmän sen siirtäminen ja varastoiminen ehjänä tuottaa kustannuksia. Varastotason jatkuva ylläpitäminen vähentää myös kiireellisiä tilauksia, joista toimittajat lisäveloittavat toimituksissaan. (Tanskanen ym., 2009.) VMI:n avulla voidaan siis luoda kilpailuetua parantamalla materiaalien saatavuutta sekä vähentämällä varastotason seurantaan kuluvaa aikaa ja tilauskustannuksia (Sari, 2007).

3.2 Muita materiaalilogistiikan tehostamisen keinoja

Rakennusteollisuuteen sopivien toimitus- ja varastointiratkaisujen lisäksi rakennusyriyten on yhä tärkeämpää hyödyntää erilaista teknologiaa materiaalinhallinnassa ja logistiikan toimintojen tehostamisessa pitääkseen toimintansa kilpailukykyisenä. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään muita rakentamisen materiaalilogistiikan tehostamiseen sopivia keinoja ja teknologioita sekä arvioidaan niiden soveltuvuutta logistiikkaketjun eri portaisiin.

3.2.1 Paikannus- ja seurantateknologiat (RFID ja GPS)

Rakennustyömaat ovat erittäin dynaamisia, sillä materiaalitoimituksia puretaan päivittäin vaihteleville purkualueille ja niiden paikkaa voidaan vaihtaa työmaan sisällä useita kertoja ennen kuin ne asennetaan lopulliselle paikalleen (Ergen & Akinci, 2007). Automaattiset paikannus- ja seurantateknologiat helpottavat materiaalitoimitusten organisointia ottaen huomioon niiden oikea-aikaisuuden, laadun ja määrän samalla minimoiden varastointia ja siitä aiheutuvia kustannuksia (Donyavi & Flanagan, 2009). Toisin kuin tehtaot, rakennustyömaa on hallitsematon ympäristö, jossa koneet ja laitteet eivät aina noudata ennalta suunniteltuja reittejä liikkeessaan ja tuotannon suorittaminen ulkoilmassa johtaa ankarista sääolosuhteista selviytymiseen, mikä vaikuttaa teknologioiden soveltumiseen työmaaympäristöön. Kuitenkin manuaalisilla menetelmillä datan kerääminen on tehotonta eikä sitä voida pitää luotettavana, koska se riippuu tiedonkeruutehtävään määrättyjen henkilöiden, eli työmaan työntekijöiden motivaatiosta ja taidoista. (Ergen & Akinci, 2007.)

Rakennusteollisuudessa pitkään käytettyjä paikannus- ja seurantateknologioita ovat radiofrekvenssitunnistus (RFID) ja globaali paikannusjärjestelmä (GPS). Radiotaajuuteen perustuvat teknologiat kuten GPS ja RFID-tunnisteet voivat tukea materiaalien paikannusta, seuranta ja automatisoitua tiedonkeruuta rakentamisessa. (Donyavi & Flanagan, 2009.) Nämä

paikannusjärjestelmät voidaan jakaa kahteen kategoriaan, joista ensimmäisessä on GPS, joka mittaa järjestelmien välistä etäisyyttä ja/tai kulmia määrittääkseen sijaintinsa. Toisessa kategoriassa on RFID, jonka toiminta perustuu lähetinverkostoon, joka paikantaa käyttäjiä, kun ne havaitaan tietyn lähettimen alueella. (Lu ym., 2007.) RFID on teknologia, joka käyttää eri radiotaajuuksia esineiden tunnistamiseen (W. Lu ym., 2011). Aikaisemmissa tutkimuksissa on tutkittu RFID-teknologian mahdollisuuksia reaaliaikaisen tiedon saamiseksi rakennusresurssien, kuten materiaalien, työkalujen, laitteiden ja henkilöstön sijainnista työmaan turvallisuuden ja tuottavuuden parantamiseksi (Cai ym., 2014). Tietojen lukemisen lisäksi niissä on mahdollisuus tietojen kirjoittamiseen RFID-tunnisteeseen, mikä lisää vuorovaikutusta materiaalien, järjestelmän ja työntekijöiden välillä (W. Lu ym., 2011). Luku- ja kirjoitustunnisteet mahdollistavat tunnisteseen tallennettujen tietojen päivittämisen, jotta esimerkiksi komponenttien asennustiedot pysyvät ajantasalla (Ergen & Akinci, 2007).

Järjestelmä muodostuu RFID-lukijasta, mikrosirun muotoisesta RFID-tunnisteesta, joka tallentaa tietoja, sekä integroidusta antennista, joka toimii lähettimenä (W. Lu ym., 2011). RFID-tunnisteen sisäinen tallennuskapasiteetti mahdollistaa komponenttiin tai materiaaliin liittyvän tiedon saattamisen helposti niitä käsittelevien henkilöiden saataville (Ergen & Akinci, 2007). RFID-tunnisteet voidaan luokitella aktiivisiin, jotka ovat akkukäyttöisiä sekä passiivisiin, jotka saavat virran radioaaltojen kautta lukijalta (W. Lu ym., 2011). Kuitenkin passiivisten tunnisteen luku- ja kirjoitusetäisyys on suhteellisen lyhyt, noin 4 metriä (Goodrum ym., 2006), mikä rajoittaa erityisesti rakennustyömaan ympäristössä niiden käyttöä (W. Lu ym., 2011). Se on kuitenkin paljon verrattuna käsilukijaan, jonka lukuetaisyys on yleensä alle 16 cm. Lisäksi passiivisia tunnisteen ei voida lukea minkään metallipinnan läpi, koska niissä ei ole riittävää tehoa. (Goodrum ym., 2006.)

Vaikka rakentamisessa käytettävät viivakooditunnisteet ovat vakiintunut ja edullinen tekniikka, ne kärsivät lyhyen lukuetaisyyden ja kestävyysongelmista, sillä viivakoodit vaativat esteettömän näköyhteyden ja muuttuvat käyttökelvottomiksi, jos ne naarmuuntuvat tai likaantuvat (Goodrum ym., 2006). Sisäisen akun antaman lisätehon ansiosta (Goodrum ym., 2006) aktiivisen RFID-lukijan ja tunnistetun esineen välillä ei tarvita suoraa kontaktia ja lukuetaisyys voi olla jopa 15-25 metriä (W. Lu ym., 2011). Tunnisteen kyky lukea metallin läpi on erityisen houkuttelevaa työkalujen ja materiaalien seurannan kannalta rakennusympäristössä (Goodrum ym., 2006). Kaikki nämä edut mahdollistavat paremman reaaliaikaisen tiedon näkyvyyden ja jäljitettävyyden (W. Lu ym., 2011). Siten RFID-tunnisteet ovat kestävämpiä ja soveltuvat paremmin rakennustyömaan ympäristöön kuin yleisesti materiaalien seurantaan käytetyt viivakooditunnisteet, koska ne ovat uudelleen käytettäviä ja mahdollistavat etä- ja automaattisen lukemisen (M. Lu ym., 2007).

Materiaalitiedot tallennetaan materiaaleihin kiinnitettyihin RFID-tunnisteisiin. Tiedot kuten koko, paino, käsittelyohjeet ja kokoonpanomenetelmät ovat näkyvissä ja saatavilla reaaliaikaisesti työntekijöille. Materiaalien sijaintia voidaan seurata tehokkaasti yhdistämällä teknologia globaaliin paikannusjärjestelmään (GPS) ja paikkatietojärjestelmään (GIS). (W. Lu ym., 2011.) Paikkatietojärjestelmää käsitellään luvussa 3.2.2. GPS-laitteet ovat edullisia ja helppoja asentaa ja niiden tiedetään toimivan myös ilman muun teknologian asennusta työmaalle toimittaakseen reaaliaikaista sijaintitietoa (Pradhananga & Teizer, 2013). Kuitenkin globaaliin paikannusjärjestelmään integroitu RFID mahdollistaa yksilöllisen materiaalien tunnistamisen sekä jäljittämisen ja paikantamisen ilman vaatimuksia työntekijöiden panoksesta (Ergen ym., 2007). RFID-lukija taltioi ympärillä olevien merkattujen materiaalien lähettämät tunnisteet, kun taas GPS-vastaanotin määrittelee samanaikaisesti omat koordinaattinsa (Grau ym., 2009). Song (2006) kehitti RFID:n ja GPS:n yhdistävän lähestymistavan rakennustyömaalla hajallaan olevien materiaalien paikallistamiseksi. Tämä lähestymistapa hyödyntää merkittyjen materiaalien automaattista lukemista materiaalinkäsittelylaitteiden toimesta, jotka ovat varustettu RFID-lukijalla ja GPS-vastaanottimella (Ergen & Akinci, 2007).

RFID-teknologialla voidaan tehostaa myös varaston (W. Lu ym., 2011) ja työmaan koneiden hallintaa (M. Lu ym., 2007). Varastoalueelle asennetaan RFID-lukijat, ja kun toimitetut materiaalit puretaan, lukijat lukevat materiaalien tunnisteet ja päivittävät varastotietokannan automaattisesti. Kun materiaalit otetaan käyttöön, järjestelmä toimii päinvastoin, jolloin käytetty varasto vähennetään tietokannasta. RFID-tekniikka voi parantaa tuottavuutta lukemalla kaikki tiedot kerralla ja päivittämällä ne automaattisesti. Työmaalla työntekijöiden on myös helpompi löytää oikeat materiaalit jäljittämällä materiaaleihin liitetyt tiedot. (W. Lu ym., 2011.) Koneiden reaaliaikainen näkyvyys ja jäljitettävyyden korostuu, kun työmaa on suuri ja koneiden järkevä sijoittaminen alueella tulee kriittisemmäksi. Etenkin suurien koneiden kohdalla, niiden asianmukainen hallinta ja ajantasainen paikantaminen on tärkeää työn sujuvoittamiseksi työmaalla. Koneiden paikantaminen GPS:n avulla voi olla haasteellista, jos työmaa sijaitsee tiheällä kaupunkialueella, koska tällöin GPS:n suorituskyky heikkenee huomattavasti, mikä vähentää sen luotettavuutta. (M. Lu ym., 2007.)

RFID-tunnisteiden kustannukset ovat suhteellisesti korkeampia verrattuna esimerkiksi perinteisiin viivakooditunnisteisiin (M. Lu ym., 2007). Passiiviset tunnisteet edustavat RFID-markkinoiden halvempia vaihtoehtoja. Suurin osa hintaerosta johtuu siitä, että tunniste vastaanottaa virtaa datan lähettämiseen lukijalta, eikä sisäinen akku ole tarpeen. Passiiviset tunnisteet ovat yleensä myös kooltaan pienempiä kuin aktiiviset ja niissä on myös melko pienet tiedontallennusmahdollisuudet, mikä laskee sirun ja tunnisteiden kustannuksia. (Goodrum ym., 2006.) Lisäksi sekä passiivisten että

aktiivisten RFID-tunnisteiden ja lukijoiden välinen lukuetaisyys voi lyhentyä merkittävästi, jos lähellä on teräksisiä esineitä tai kosteutta, mikä on tavallista rakennustyömailla (M. Lu ym., 2007). Suuri haaste RFID-tekniikan käytössä rakennustyömaan resurssien paikantamisessa on se, että RFID-lukija pystyy havaitsemaan tunnisteen vain tunnistusalueellaan. Lukijan tunnistusalue vaihtelee ja lukijan ja tunnisteen välinen etäisyys on tuntematon. RFID-seurantajärjestelmien tarkkuuden parantaminen on edelleen aktiivinen tutkimusalue. (Cai ym., 2014.) Etenkin suurien rakennusmateriaalien ja komponenttien kohdalla lukijoiden lukualue ja tunnisteen tietojen tarkkuus tulevat kriittiseksi (W. Lu ym., 2011).

3.2.2 Materiaalilogistiikan seuranta (BIM ja GIS)

Rakentamisen logistiikkaketjun toimijoiden välinen heikko tiedonkulku hankaloittaa merkittävästi sekä rakentamisen suunnittelua että aikatauluttamista (Almohsen & Ruwanpura, 2013). Tehostamalla tiedonkulkua toimijat pystyvät helpommin analysoimaan logistiikkaprosessien tilannetta ja organisoimaan varastoinnin ja materiaalien käsittelyn toimintoja (Sundquist ym., 2018). Tiedonkulkua voidaan tehostaa kolmelta osa-alueelta tarkasteltuna: (1) informaation saatavuuden parantaminen, (2) toimijoiden osallistaminen ja (3) integraatio ja yhteistyö. Tietojen saavutettavuus mahdollistaa toimijoille reaaliaikaisen vaikuttamisen logistiikkaprosesseihin, helpottaa raskaiden työvälineiden ja koneiden aikatauluttamista työmaalla sekä antaa mahdollisuuden aikataulujen hallintaan ja muutoksien pyytämiseen eri osapuolille. (Almohsen & Ruwanpura, 2013.) Tietojen saavutettavuutta voidaan edistää teknologioiden avulla, jotka vähentävät toimitusketjun toimintojen välillä olevia tiedonkulun esteitä ja lisäävät niiden välistä viestintää (Donyavi & Flanagan, 2009). Toimijoiden osallistamisella tarkoitetaan esimerkiksi alihankkijoiden ja toimittajien merkitystä logistiikkaprosessin hallinnassa, koska työvälineiden ja materiaalien toimitusten aikatauluttamisen, tilaamisen ja vastaanottamisen hallinta on oleellinen osa työmaan materiaalilogistiikan tehostamista (Almohsen & Ruwanpura, 2013).

Integraatiolla ja yhteistyöllä pyritään esihenkilöiden ja työntekijöiden väliseen reaaliaikaiseen vuorovaikutukseen, jotta prosessien suunnittelu ja aikataulutus olisi tehokasta ja vältyttäisiin esimerkiksi päällekkäisiltä toiminnoilta (Almohsen & Ruwanpura, 2013). Tehokkailla logistiikan hallintajärjestelmillä voidaan edistää eri urakoitsijoiden, alihankkijoiden ja toimittajien koordinaatiota ja siten kasvattaa työmaan tuottavuutta (Janné & Fredriksson, 2022). Lisäksi niiden avulla nähdään toimituksen tarkka toimitusaika ja toimituksen tila, mikä auttaa työntekijöitä valmistautumaan lähetyksen vastaanottamiseen. Siten voidaan lyhentää lähetyksen vastaanoton valmistelu-aikaa ja

edistää sen nopeampaa purkamista ja materiaalien kuljettamista työmaan sisällä. (Almohsen & Ruwanpura, 2013.)

Building Information Model (BIM) on järjestelmä työmaan mallintamiseen ja koordinointiin, virheiden ja puutteiden välttämiseen, tuottavuuden parantamiseen sekä rakennusprojektien aikataulutuksen, turvallisuuden ja laadunhallinnan tukemiseen. Projektin sidosryhmät voivat tehdä tietoisempia päätöksiä avoimemman viestinnän ja tiedonvaihdon ansiosta, kun suunnitteluvaatimukset on helppo todentaa ja suorituskykyä voidaan analysoida tietomallin avulla. (Chen & Luo, 2014.) 3D-alustojen hyödyntäminen mahdollistaa monimutkaisten logististen strategioiden viestimisen nopeasti ja selkeästi sekä työmaasuunnitelmien visuaalisen esittämisen. Kun työmaalla on rajallisesti tilaa, tämä mahdollistaa käytettävissä olevan alueen hyödyntämisen tehokkaimmalla mahdollisella tavalla. (Whitlock ym., 2018.) BIM:n käyttö rakennusteollisuudessa rajoittuu enimmäkseen suurempiin yrityksiin, koska ne hyötyvät enemmän paremmasta tietoisuudesta ja valmiudesta suunnitella toteutusta. Lähes kolme neljäsosaa pk-yrityksistä ei ole koskaan käyttänyt BIM-teknologiaa, koska sen käyttöönotto edellyttäisi selkeää strategiaa, mitä todellisuudessa harvat pk-yritykset pystyvät kehittämään. (Dainty ym., 2017.)

Geographic Information System (GIS) on paikkatietojärjestelmä maantieteellisten tietojen hakemiseen, näyttämiseen ja analysoimiseen (Bansal & Pal, 2006). Järjestelmän toimintoja käyttämällä voidaan esimerkiksi selvittää toimituksen nykyinen sijainti ja arvioida, milloin materiaalit saapuvat ennalta määrätyle rakennustyömaalle. Tämä on erittäin hyödyllistä projekteissa, joissa materiaalin varastotila rakennustyömaalla on rajallinen. (Li ym., 2005.) Materiaalien ja toimitusten sijaintitietojen näyttämiseen GIS:n kautta on hyödynnetty erilaisia seurantateknologioita, kuten viivakoodi-, RFID- ja GPS-teknologiaa (Irizarry ym., 2013).

Integroitu BIM-GIS-järjestelmä mahdollistaa toimitusketjun prosessin läpinäkyvyyden, logistiikan tehostamisen ja materiaalien todellisen tilan seurannan visuaalisesti toimitusketjussa (Irizarry ym., 2013). BIM muodostaa kolmiulotteisen mallin kaikista rakennuksen elementeistä, jotta voidaan mallintaa toimijoiden ja prosessien väliset suhteet sekä niiden looginen järjestys toimitusketjussa (Chen & Luo, 2014). Rakennustietojen ohella GIS mahdollistaa koko toimitusketjun prosessin kartoituksen ja tarjoaa optimaalisen logistiikkakustannuksia minimoivan ratkaisun, jossa yhdistyvät tilausten, varastoinnin ja kuljetuksen kustannukset. Toinen merkittävä GIS:n ja BIM:n integroinnilla saavutettu tulos on, että materiaalien päivitetty tila toimitusketjussa voidaan osoittaa mallissa elävästi. Tämän menetelmän avulla johto voi helposti tunnistaa, mitkä ovat perimmäiset syyt viivästyneisiin materiaalitoimituksiin ja missä näitä materiaaleja käytetään. Vielä kuitenkin tarvitaan parannuksia

BIM:n ja GIS:n yhdistämisessä, jotta tietojen integrointi, teknologioiden yhteentoimivuus ja siten tiedonsiirto olisi sujuvampaa ja luotettavampaa BIM:n ja GIS:n välillä. (Irizarry ym., 2013.)

3.2.3 Työmaan materiaalilogistiikan hallinnan ulkoistaminen

Rakennustyömaan materiaalilogistiikan tehostamisessa voidaan hyödyntää myös ulkopuolista toimijaa, kuten logistiikka-asiantuntijaa tai alan yritystä, jolle ulkoistetaan logistiikan toimintojen koordinointi ja tiedonkulun sujuvuuden varmistaminen (Sundquist ym., 2018). Duboisin ym., (2019) mukaan esimerkiksi kipsilevyjen materiaalinkäsittelyaika voidaan vähentää jopa 42 % hyödyntämällä logistiikan asiantuntijaa. Logistiikan asiantuntija pystyy tehostamaan työmaan toimintoja, lisäämään työmaan resurssien käyttöä ja vähentämään materiaalinkäsittelyn negatiivisia vaikutuksia rakentamiseen. Materiaalinkäsittely voidaan aikatauluttaa rakennusaikataulun ulkopuolelle, jotta voidaan välttää rakentamiseen liittyvät häiriöt ja keskeytykset. (Sundquist ym., 2018.) Tämä vapauttaa rakentajat materiaalien käsittelystä ja mahdollistaa keskittymisen tuotannon toimintoihin (Dubois ym., 2019). Ulkopuolisen toimijan hyödyntäminen materiaalilogistiikan suorituskyvyn tehostamisessa voi antaa uusia näkökulmia, koska ulkopuolisella toimijalla on kokemusta erilaisten urakoitsijoiden ja rakennusprojektien kanssa työskentelystä eikä osaaminen rajoitu tiettyyn yritykseen tai projektiin (Sundquist ym., 2018).

Logistiikan koordinoinnin sujuvoittamiseksi suunnitellut työmaasuunnitelmat, jotka määrittelevät toimitusten purkualueet ja varastot, mahdollistavat tehokkaat logistiikan toiminnot työmaalla (Janné & Fredriksson, 2022). Työmaasuunnitelmat ja -asettelu vaikuttavat lisäksi työturvallisuuteen, rakennusprojektin tuottavuuteen, kestoon ja lopulta kustannuksiin (Sundquist ym., 2018). Työmaalogistiikkaan erikoistunut logistiikan asiantuntija vastaa tyypillisesti työmaasuunnittelusta (esim. nostureiden, hissien, kuljetusreittien ja varastoalueiden osalta), toimitusten koordinoinnista ja materiaalinkäsittelytoiminnoista (Dubois ym., 2019) ja näitä voidaan soveltaa sekä erilaisiin projekteihin että työvaiheisiin sopiviksi (Sundquist ym., 2018). Työmaalla koordinoitu lähestymistapa soveltuu erityisesti monimutkaisille ja tilan puutteesta kärsiville projekteille, joissa tarvitaan tiukkaa logistiikan koordinointia ja logistiikkaketjun mukauttamista (Dubois ym., 2019).

Rakentamiseen sisältyy lukuisia toimintoja, joita toteuttavat lukuisat toimijat ja jotka perustuvat valtaviin resursseihin (Sundquist ym., 2018). Ennen projektin aloitusta tehdään usein resurssi- ja materiaalivirta-analyysi, ja logistiikan asiantuntija hoitaa koko projektin ajan työmaan logistiikan toimintojen koordinointia (Dubois ym., 2019). Logistiikka-asiantuntija on erikoistunut erityisesti työmaan materiaalinkäsittelyyn (Sundquist ym., 2018), jossa materiaalit toimitetaan suoraan kokoonpanoalueelle, mikä vähentää niiden vahingoittumisen riskiä ja hukan syntymistä (Dubois ym.,

2019). Tämä vähentää työmaa-aikaista varastointia sekä vapauttaa käyttöön lisää resursseja kuten trukkeja ja nostureita, koska tarvitaan vähemmän resursseja materiaalien siirtelyyn työmaan sisällä. Esimerkiksi, jos ikkunat toimitetaan asennettaviksi erillisiin huoneistoihin, ne voidaan kuljettaa suoraan asennuspisteelle erikseen omille laivoille pakattuna. Tämä vapauttaa aikaa ja resursseja työmaalla, mutta toisaalta erilliset kuormat vaativat enemmän lavoja, koska koko lavan kapasiteettia ei käytetä. (Dubois ym., 2019.)

Logistiikkaketjun toimijoiden, kuten jakelijoiden ja toimittajien, on pyrittävä noudattamaan työmaan logistiikkavaatimuksia, mikä voi aiheuttaa ylimääräistä työtä ja lisäkustannuksia pienempiin eriin pakkaamisessa ja varastoinnissa sekä lisätä kuljetuksia työmaalle. Työvaihekohtaisesti pakatut materiaalit oikea-aikaisesti toimitettuna voivat lisätä kuljetuksia työmaalle ja siten vaatia materiaalien varastoimista työmaan lähellä, jotta oikea-aikaiset toimitukset voidaan toteuttaa. (Dubois ym., 2019.) Materiaalien työvaihekohtaisten toimitusten käsittelystä aiheutuvat kustannukset riippuvat esimerkiksi tavaroiden koosta ja määrästä sekä siitä, saapuvatko materiaalit lavoilla vai asetetaanko ne telineille (Sundquist ym., 2018). Materiaalien yksittäiset työvaihekohtaisesti pakattujen lavojen toimitukset lisäävät kustannuksia, minkä vuoksi ne pyritään pitämään mahdollisimman vähäisinä, mikä toisaalta vaatii yhä enemmän ennakkointia työvaiheiden aikataulujen suunnittelussa. Pienille tai kokemattomille yrityksille tai urakoitsijoille nämä kustannukset saattavat tulla yllätyksenä, koska ne eivät välttämättä osaa varautua niihin tai huomioida niitä. (Dubois ym., 2019.)

3.2.4 Suomalaisia rakennusmateriaalin ja -logistiikan hallintakeinoja ja palveluntarjoajia

3.2.4.1 *Intelligent Construction Site*

Erilaisten rakentamisen tuotannonohjaukseen keskittyneiden järjestelmien käyttö on ollut pitkään kasvussa, mutta siitä huolimatta tietoa materiaalien, laitteiden ja työvoiman käytöstä kerätään manuaalisesti (Olivieri ym., 2017). Intelligent Construction Site (iCONS) on Aalto-yliopiston rakennustekniikan laitoksen kehittämä reaaliaikaisen tuotannonhallinnan mahdollistava järjestelmä. Se on kehitetty ratkaisemaan rakennusteollisuuden kasvavan huolen tuotannon tilanteen ja työvaiheiden reaaliaikaisten tietojen saatavuudesta. Järjestelmää on tässä vaiheessa tutkittu työvoiman, materiaalien ja laitteiden seurantaan sisätilarakennusvaiheessa. (Seppänen ym., 2019.)

Materiaaleihin ja laitteisiin kiinnitetään tarramaiset laitteet ja työntekijöillä on mukanaan avainrenkaan kokoiset lähettimet (Aalto University, 2019). Työmaalle asennetut vastaanottimet skannaavat ja keräävät jatkuvasti lähettimien lähettämiä signaaleja ympäristöstään, minkä jälkeen ne siirtävät tiedot verkkoon (Seppänen ym., 2019). Lähettimet käyttävät bluetooth-teknologiaa

(Seppänen ym., 2019), jota käytetään yleisesti rakennusteollisuudessa langattomaan tiedonsiirtoon lyhyillä etäisyyksillä kiinteiden ja liikkuvien laitteiden välillä (Donyavi & Flanagan, 2009). Niiden lähetysteho on mahdollista säätää, millä voidaan pidentää lähetysväliä, mutta samalla se lyhentää akun kestoja. Lähetystehon lisäksi lähetysvälin tiheys on toinen tekijä, joka vaikuttaa akun keston, sillä tiheämmin tapahtuva lähetys lyhentää akun kestoja. (Seppänen ym., 2019.)

Mobiilisovellus integroi eri tietolähteistä lähetetyt resurssien seurantatiedot ja tuottaa reaaliaikaista tilannetietoa päätöksentekijöille. Työmaan työntekijät näkevät sekä reaaliaikaisen sijainnin että päivitettyt tiedot kaikista seurattavista materiaaleista. (Olivieri ym., 2017.) Käyttäjät voivat etsiä myös muita resursseja nimen tai bluetooth-tunnisteen perusteella, nähdä sijaintitiedot ja tarkistaa yksityiskohtaiset historiatiedot niiden liikehdinnästä. Käyttäjä voi esimerkiksi etsiä laitetta A, rajata tietyn aikavälin ja nähdä, missä paikoissa A tänä aikana oli ja kuinka pitkään. (Seppänen ym., 2019.) Toisena esimerkkinä voidaan analysoida, missä tietty työntekijä vietti työaikansa ja kuinka paljon aikaa hänellä kului eri paikoissa työmaalla. Työntekijöiden sijaintia seuraamalla voidaan selvittää myös tarkat tilannetiedot sijaintien työ- ja kokoonpanovaiheiden etenemisestä. (Olivieri ym., 2017.)

Projektin toimijoiden tietoisuuden ylläpitäminen toimitusten tilasta on tärkeää, jotta sekä työmaan ulkoinen että sisäinen logistiikka, kuten toimitusalueet pystytään koordinoimaan aikataulun puitteissa. Järjestelmän kautta voidaan selvittää reaaliaikaisesti myös materiaalien toimitusprosessin tilanne aina valmistuksesta niiden kuljettamiseen saakka. (Olivieri ym., 2017.) Kuitenkin pelkästään työntekijöiden ja materiaalipakettien erillisten sijaintitietojen perusteella on vaikea saada relevanttia tietoa työntekijää ja materiaalipakettia yhdistävän työvaiheen kestosta työmaalla. Järjestelmää kehittämällä, materiaalien ja työntekijöiden seurannan yhdistämisestä saatua dataa analysoimalla voitaisiin tarkastella, miten työntekijät käyttävät materiaaleja sekä arvioida materiaalien käsittelyaikoja. (Seppänen ym., 2019.)

3.2.4.2 Digitalizing Construction Workflows

Rakennusteollisuudessa hyödynnetään monipuolisesti erilaisia järjestelmiä niin resurssien paikantamiseen, rakennustietojen mallintamiseen ja toiminnanohjaukseen ja tietoa työvaiheista hankitaan usein eri tietolähteistä ja eri sidosryhmiltä, jotka työskentelevät omissa rakennusalan erikoisaloissaan käyttäen eri järjestelmiä ja ohjelmistoja. Ongelma on, että ne ovat yksittäisiä ratkaisuja, jotka eivät yksinään pysty tarjoamaan kokonaisvaltaista tilannekuvaa rakennusprosessista. (Seppänen ym., 2021.) Yksi mahdollinen ratkaisu tähän ongelmaan on rakennusprojektien käsitteiden ja termien ontologian kehittäminen siten, että on olemassa yhteinen joukko yksiselitteisiä määritelmiä, ja jotta informaatio voidaan integroida yhtenäiseksi kokonaisuudeksi (Anumba ym.,

2008). Siten teknologiaa hyödyntämällä voidaan yksinkertaistaa logistiikkaprosessien tietojen saavutettavuutta, jotta jokainen osapuoli voi mistä tahansa ja mihin aikaan tahansa saavuttaa tarvitsemansa informaation (Almohsen & Ruwanpura, 2013).

Aalto-yliopiston Digitalizing Construction Workflows (DiCtion) -tutkimusprojektin yhdessä osassa tutkimuskohteena on engineer-to-order (ETO) -tuotteiden toimitusprosessin digitaalisen tiedon tuottaminen reaaliajassa ja siitä saatavat hyödyt (Seppänen ym., 2021). Projektissa kehitettiin digitaalinen rakennusontologia, jonka tarkoituksena on toimia tiedon mallina integroimalla tehokkaasti erilaista tietoa tarjoamalla yhtenäisiä ja yksiselitteisiä käsitteiden ja suhteiden terminologioita, jotka perustuvat alan tietämykseen (Anumba ym., 2008). Siten se toimii viitteenä tietojen integroimisessa monista erilaisista järjestelmistä, jotta rakennusprosessin kokonaistilannekuva voidaan rakentaa. Linkitettyjen rakennustietojen tarjoajia on GraphMatrix Yhdysvalloissa ja Platform of Trust Suomessa, jotka tukevat erilaisista järjestelmistä peräisin olevan yhteensopimattoman tiedon integrointia, yhdistämistä ja hyödyntämistä. (Seppänen ym., 2021.) Platform of Trust soveltaa tietyn ontologian avulla tietojen vaikutusta kaikkiin merkityksellisiin käyttötapauksiin tekemällä tiedoista yhteensopivia eri liiketoiminta-alueiden välillä ilman rajoittavaa standardia (Platform of Trust, 2024).

Etenkin ETO-tuotteiden toimitusprosessissa, jossa tuotteen suunnittelu ja valmistus alkaa tilauksen vastaanotettua, digitaalinen tilannetieto mahdollistaa kaikille toimitusprosessin osapuolille ajantasaisen tiedon tuotteen sekä työmaan tilanteesta ja antaa mahdollisuuden ennakointiin ja muutoksiin tulevissa toiminnoissa (Seppänen ym., 2021). Merkittävin ETO-tuotteiden ongelma rakentamisessa on niiden pitkä läpimenoaika, sillä toimitusaika vaikuttaa suuresti projektin toteutukseen, koska projektin valmistuminen riippuu usein materiaalien oikea-aikaisesta saatavuudesta (Pandit & Zhu, 2007). Valmistaja tarvitsee työmaalta rakennus- ja asennusaikataulut hallitakseen tuotantoa ja optimoidakseen elementtien suunnittelu- ja tuotantoaikataulut. Tällöin valmistaja voi myös paremmin suunnitella elementtien lähettämistä ja kuljettamista, ja työmaalla voidaan varmistaa riittävä kuljetuskapasiteetti aikataulussa pysymiseksi. (Seppänen ym., 2021.) Erityisesti elementtien suunnittelun alkuvaiheessa projektin toimijoiden välinen tiedonkulku on merkittävää, jotta toimitettu elementti täyttää projektin vaatimukset (Pandit & Zhu, 2007). Samoin työmaalla, reaaliaikainen tieto tuotteen tilasta on kriittinen tuotannosuunnittelun ja aikataulun kannalta. Näiden etujen saavuttamiseksi tarvitaan tietojen, kuten tuotteen tunnistenumeron, asennuserien, aikataulujen ja kuljetustietojen jakamista digitaalisessa muodossa. (Seppänen ym., 2021.)

Toisessa kohteessa arvioitiin digitaalisen tilannetiedon hyötyjä asennussarjojen toimituksessa. Asennussarjoja käsiteltiin aiemmin luvussa 3.1.2. Asennussarjan toimittamiseen sisältyy pakkaaminen logistiikkakeskuksessa, kuljettaminen työmaalle, purkaminen työmaalla ja jakelu työpisteille, ja sen tavoitteena on ulkoistaa logistiikkatoiminnot asentajilta, jotta materiaalit voidaan asentaa ennalta määrättyllä pisteellä ilman ylimääräistä käsittelyä (Tetik ym., 2020). Rakennuksen, elementtien ja tilojen digitaaliset suunnitelmat ovat välttämättömiä, koska niiden perusteella määritetään eri työvaiheiden materiaalilistat kussakin sijainnissa (Seppänen ym., 2021). Näiden materiaalilistojen tiedot integroituna digitaalisen rakennussuunnitelman työvaiheisiin mahdollistaa asennussarjojen, niiden materiaalien, aikataulutuksen ja sijainnin määrittämisen. Siten projektin ja toimittajan välisten tietojen integrointi on välttämätöntä asennussarjojen logististen toimintojen optimoimiseksi. (Zheng ym., 2020.)

Asennuksen suoritettua, sen digitaalinen rekisteröinti ja jakaminen tärkeää, koska se voi määrittää seuraavien sarjojen valmistus-, kuljetus- ja kokoonpanosuunnitelmat samassa tai muissa rakennuksen sijainneissa (Seppänen ym., 2021). Tietojen jakaminen toistuvista asennussarjoista ja niihin liittyvästä ylimääräisestä materiaalista mahdollistaa tarkkojen materiaalilistausten oppimisen projektin sisällä (Seppänen ym., 2021), minkä ansiosta voidaan saavuttaa asennussarjojen tavoitteet ansaita kustannussäästöjä ja vähentää jätteen muodostumista (Zheng ym., 2020). Kerätty data mahdollistaa oppimisen projektista toiseen myös asennussarjan määrittelyssä, valmistuksessa ja optimaalisen toimitusajan suunnittelussa. (Seppänen ym., 2021.)

3.2.4.3 Carinafour

Carinafour on alunperin meriteollisuuden keskittynyt yritys, joka tarjoaa nykyään myös rakennus- ja tuoteteollisuudelle toimitusketju-, logistiikka- ja tuotantoratkaisuja (Carinafour, 2024). ICONS-hankkeeseen osallistuttuaan ja digitaalisen ja reaaliaikaisen tiedonkeruun hyödyt havaittuaan Carinafour aloitti tarjoamaan palveluita myös rakennusteollisuudelle (Seppänen ym., 2019). Yrityksen palvelutarjonta on laaja, koska se tarjoaa lisäksi esimerkiksi toimitusketjun analytiikkapalveluja, materiaalien suunnittelua ja kehittämispalveluja, kuten työnsuunnitteluprosessien toteuttamista ja datan ja analytiikan hyödyntämistä. Carinafourin nettisivuilta käy ilmi, että esimerkiksi yhteistyöyritys Piikkiö Works on Carinafourin mahdollistamana kuusinkertaistanut virtaustehokkuutta sekä nostanut tuottavuutta 30 %. (Carinafour, 2024.)

Carinafour on kehittänyt digitaalisen CALS-järjestelmän, joka mahdollistaa materiaalivirran hallinnan ja tietovirran sujuvuuden varmistukseksi materiaalien saatavuuden työmaalla, jotta myös

työvaihekohtaiset materiaalipaketit ovat toimitettuna asentajalle oikeaan aikaan ja oikeaan paikkaan. Järjestelmä on modulaarinen materiaalien ja resurssien suunnittelu-, tilaus- ja hallinta-alusta, johon voi liittää eri toimijoita myös yli yritysrajojen. Alusta mahdollistaa yrityksille myös laajan verkoston tavarantoimittajia, koska Carinafourin nettisivujen mukaan Fira:n materiaalien saatavuus on parantunut 98 % yhteistyön jälkeen. Lisäksi sen avulla voidaan hallita työmaata digitaalisesti, alusta linkittyy muihin järjestelmiin sekä toimittaa rakentamisen toimitusketjun tilannekuvan reaaliaikaisesti. (CALs, 2024.)

Yrityksen asiakaskunta on tällä hetkellä keskittynyt suuriin rakennus- sekä teollisuusyrityksiin, kuten YIT:seen ja Meyeriin (Carinafour, 2024). Pienille yrityksille on harvinaisempaa tehdä yksityiskohtaista materiaalilogistiikan tai materiaalinhallinnan suunnittelua henkilöstön, osaamisen ja rahoituksen puutteen vuoksi. Markkinoiden laajentaminen myös pienemmille yrityksille olisi tärkeää, koska kysyntää olisi niiden liiketoiminnalle sopivalle teknologialle, joka tukisi materiaalien hallintaa tilausprosessista työmaalle asti. (Donyavi & Flanagan, 2009.) Siten CALs:n tyyliset alustat voisivat olla keino pienempien rakennusyritysten ja esimerkiksi remonttiprojektien materiaalilogistiikan tehostamisen mahdollistamiseksi.

4 Yhteenveto ja johtopäätökset

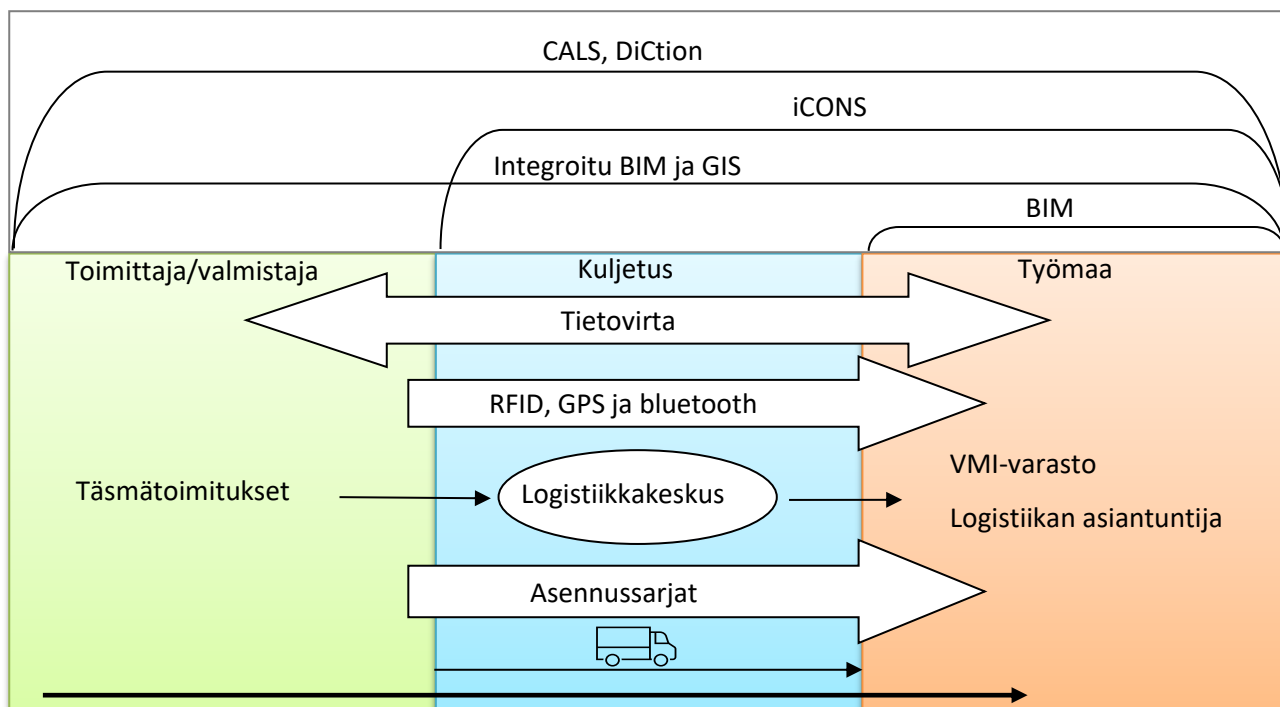
Tässä tutkielmassa käsiteltiin rakentamisen materiaalilogistiikan erityispiirteitä ja haasteita ja tavoitteena oli löytää näihin haasteisiin ratkaisuja, joilla voitaisiin tehostaa rakentamisen materiaalilogistiikkaa työmaan tuottavuuden parantamiseksi ja ylimääräisten kustannusten minimoimiseksi. Tutkielmassa esiteltiin ja arvioitiin sekä perinteisempien rakentamisen materiaalilogistiikan ja materiaalinhallinnan tehostamisessa hyödynnettyjen toimitus- ja varastointiratkaisujen että modernimpien teknologioiden, hankkeiden ja palveluntarjoajien mahdollisuuksia. Tutkielman tutkimuskysymys oli:

Miten rakentamisen materiaalilogistiikkaa voidaan tehostaa?

Rakentamisen materiaalilogistiikan haasteet liittyvät logistiikkaketjun eri vaiheisiin, mutta monet niistä ovat seurausta toinen toisistaan. Haasteista voidaan havaita kolme keskeistä yhdistävää tekijää, joista ensimmäinen on negatiivinen vaikutus lopputuotteeseen. Jokainen haaste, jota ei voida tehokkaasti ratkaista, vaikuttaa projektin lopputulokseen. Haasteiden aiheuttamat vaikutukset logistiikkaketjussa sen sijaan voivat vaihdella, mutta lopulta ne aiheuttavat valmiin projektin viivästymisen ja ylimääräiset kustannukset. Toinen yhteinen tekijä on toimittajavalintojen vaikutus. Onnistuneiden täsmätoimitusten toteuttaminen lähtee toimittajavalinnasta, koska toimittajan/valmistajan tapa toimia ja sitoutua JIT-ajatteluun luo pohjan onnistuneelle täsmätoimituksen logistiikkaketjulle (Akintoye, 1995). Jos toimittajat eivät kykene toimimaan omalta osaltaan täsmätoimitusten vaatimusten mukaisesti, materiaalit ovat myöhässä (tai etuajassa) heti logistiikkaketjun alussa, mikä tulee aiheuttamaan haasteita seuraavissa toiminnoissa.

Kolmas tekijä on tiedonkulku. Koko rakennusprojektin toimitusketjun toimijoiden välisen aktiivisen ja ajantasaisen tiedonkulun merkitys tulee kyseeseen jokaisen haasteen kohdalla. Reaaliaikainen tiedonkulku auttaa reagoimaan ajoissa jokaisessa toimitusketjun portaassa, jotta seuraavat toiminnot tai työvaiheet voidaan järjestää niin, että yksi poikkeama ketjussa ei sekoita koko prosessia (Almohsen & Ruwanpura, 2013). Informaation ja viestinnän sujuvuuden varmistaminen nousee esille myös nykyaikaisissa järjestelmissä ja tutkimushankkeissa, joissa korostetaan toimitusketjun kokonaisvaltaista tiedonkulkua sen molempiin suuntiin. Kuviosta 2. voidaan huomata, että esimerkiksi asennussarjojen kokoamistyö tapahtuu logistiikkakeskuksessa, mutta vaatii johdonmukaista toimintaa läpi koko logistiikkaketjun. Asennussarjojen ja etenkin ETO-tuotteiden toteuttamisen kohdalla tiedonkulun tulee olla sujuvaa ja läpinäkyvää aina toimittajalta/valmistajalta

työmaalle ja toisinpäin, koska niiden oikea-aikainen toimitus vaatii jo tuotannosuunnittelussa reaaliaikaista tilannetietoa työmaalta esimerkiksi kokoonpanoaikataulusta (Seppänen ym., 2021).



Kuvio 2. Rakentamisen materiaalilogistiikan tehostamiskeinot sijoitettuna ja niiden vaikutusalueet kuvattuna logistiikkaketjussa.

Kuviosta 2. voidaan tunnistaa materiaalilogistiikan tehostamiskeinojen laajuus ja soveltuvuus logistiikkaketjun eri portaisiin, mistä voidaan päätellä, ettei mikään keino yksinään riitä materiaalilogistiikan tehokkuuden maksimointiin. Kukin tehostamiskeino on ainutlaatuinen ja ottaa huomioon tietyt rakentamisen materiaalilogistiikan erityispiirteet. Sen erityispiirteet aiheuttavat sen, että rakentamisen tuotantoprosessia on vaikea verrata muihin teollisuudenaloihin, kuten kulutustuotteiden tuotantoprosessiin, ensinnäkin ulkoilmassa olevan tuotantoympäristön ja joka kerta uniikin lopputuotteen vuoksi (Tanskanen ym., 2009). Jokainen projekti, sen toteutuksen takana oleva strategia, työmaa ja henkilöstö ovat erilaisia ja vaativat logistiikkaketjun eri portaissa erilaista tukea, minkä vuoksi on haastava nimetä tiettyä tai tiettyjä tehostuskeinoja, jotka soveltuisivat kaikkien rakennusprojektien materiaalilogistiikan tehostamisen maksimointiin.

Jos materiaalit onnistutaan toimittamaan täsmätoimituksina suoraan asennettavaksi, voidaan pitää varastotasot matalina ja välttää varastoinnista ja materiaalien käsittelystä aiheutuvia kustannuksia (Akintoye, 1995). Toisaalta täsmätoimitukset lisäävät yksittäisiä kuljetuksia työmaalle, mikä aiheuttaa työn keskeytyksiä toimitusten vastaanottamisen vuoksi (Janné & Fredriksson, 2022). Tästä voidaan päätellä, että täsmätoimitusten toteuttaminen tulisi olla tarkkaan suunniteltua ja riittävän

kustannustehokasta, jotta niiden hyödyntäminen on kannattavaa yksittäisten toimitusten ja niistä aiheutuvien kustannusten ohella. Täsmätoimitukset ovat merkittävä kilpailukeino rakennusmarkkinoilla (Akintoye, 1995), minkä vuoksi niiden toteuttaminen ja varmistaminen on suotavaa kaiken kokoisilta rakennusyrittäjiltä kilpailukyvyn ylläpitämiseksi ja kehittämiseksi. Tämän tutkielman perusteella suurinta osaa materiaalilogistiikan tehostamiseen käytetyistä ratkaisuista on joko testattu vähän tai on testattu ja on käytössä vain suurissa yrityksissä. Tällä hetkellä on vain vähän tutkimusta pienten yritysten materiaalinhallinnan ja logistiikan tehostamiseen soveltuvista keinoista, vaikka pienten yritysten materiaalilogistiikan tehostamiseen soveltuvien ratkaisujen löytämiseen keskittyvä tutkimus voisi olla merkittävää pienten yritysten kilpailukyvyn edistämiseksi.

Lähteet

- Aalto University, (2019). iCONS: Boosting construction productivity with indoor positioning. <https://www.aalto.fi/en/news/icons-boosting-construction-productivity-with-indoor-positioning>, haettu 5.12.2024.
- Agapiou, A., Clausen, L. E., Flanagan, R., Norman, G. & Notman, D. (1998). The role of logistics in the materials flow control process. *Construction Management and Economics*, 16(2), 131–137. <https://doi.org/10.1080/014461998372420>
- Akintoye, A. (1995). Just-in-Time application and implementation for building material management. *Construction Management and Economics*, 13(2), 105–113. <https://doi.org/10.1080/01446199500000013>
- Almohsen, A. & Ruwanpura, J. (2013). Logistics management in the construction industry. *Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*, 4.
- Anumba, C. J., Issa, R. R., Pan, J. & Mutis, I. (2008). Ontology-based information and knowledge management in construction. *Construction Innovation*, 8(3), 218–239. <https://doi.org/10.1108/14714170810888976>
- Bansal, V. & Pal, M. (2006). GIS based projects information system for construction management. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 7(2), 115-124.
- Bozer, Y. A. & McGinnis, L. F. (1992). Kitting versus line stocking: A conceptual framework and a descriptive model. *International Journal of Production Economics*, 28(1), 1–19. [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(92\)90109-K](https://doi.org/10.1016/0925-5273(92)90109-K)
- Cai, H., Andoh, A. R., Su, X. & Li, S. (2014). A boundary condition based algorithm for locating construction site objects using RFID and GPS. *Advanced Engineering Informatics*, 28(4), 455–468. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.07.002>
- CALS, (2024). Oikeat materiaalit oikeaan paikkaan oikeaan aikaan. Helposti. <https://cals.fi/>, haettu 5.12.2024.
- Carinafour, (2024). Carinafour. <https://c4.fi/>, haettu 5.12.2024.
- Chen, L. & Luo, H. (2014). A BIM-based construction quality management model and its applications. *Automation in Construction*, 46, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.009>
- Dainty, A., Leiringer, R., Fernie, S. & Harty, C. (2017). BIM and the small construction firm: A critical perspective. *Building Research & Information*, 45(6), 696–709. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1293940>

- Donyavi, S. & Flanagan, R. (2009). The impact of effective material management on construction site performance for small and medium sized construction enterprises. *Proceedings of the 25th Annual ARCOM Conference*, Nottingham, UK, 11-20.
- Dubois, A., Hulthén, K. & Sundquist, V. (2019). Organising logistics and transport activities in construction. *The International Journal of Logistics Management*, 30(2), 620–640. <https://doi.org/10.1108/IJLM-12-2017-0325>
- El Moussaoui, S., Lafhaj, Z., Leite, F., Fléchar, J. & Linéatte, B. (2021). Construction Logistics Centres Proposing Kitting Service: Organization Analysis and Cost Mapping. *Buildings*, 11(3), 105. <https://doi.org/10.3390/buildings11030105>
- Ergen, E. & Akinci, B. (2007). An Overview of Approaches for Utilizing RFID in Construction Industry. *2007 1st Annual RFID Eurasia*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/RFIDEURASIA.2007.4368087>
- Ergen, E., Akinci, B. & Sacks, R. (2007). Tracking and locating components in a precast storage yard utilizing radio frequency identification technology and GPS. *Automation in Construction*, 16(3), 354–367. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.07.004>
- Forbes, L. H., & Ahmed, S. M. (2010). *Modern Construction: Lean Project Delivery and Integrated Practices*. CRC Press.
- Goodrum, P. M., McLaren, M. A. & Durfee, A. (2006). The application of active radio frequency identification technology for tool tracking on construction job sites. *Automation in Construction*, 15(3), 292–302. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2005.06.004>
- Grau, D., Caldas, C. H., Haas, C. T., Goodrum, P. M. & Gong, J. (2009). Assessing the impact of materials tracking technologies on construction craft productivity. *Automation in Construction*, 18(7), 903–911. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.04.001>
- Hamzeh, F., Tommelein, I., Ballard, G., & Kaminsky, P. M. (2007). Logistics Centers to Support Project-Based Production in the Construction Industry. *Proceedings of the 15th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Michigan, USA.
- Hussein, M. & Zayed, T. (2021). Critical factors for successful implementation of just-in-time concept in modular integrated construction: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124716. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124716>
- Irizarry, J., Karan, E. P. & Jalaei, F. (2013). Integrating BIM and GIS to improve the visual monitoring of construction supply chain management. *Automation in Construction*, 31, 241–254. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.005>
- Janné, M. (2020). *Construction Logistics in a City Development Setting*. *Linköping Studies in Science and Technology Dissertation No. 2091*. <https://doi.org/10.3384/diss.diva-170231>

- Janné, M. & Fredriksson, A. (2022). Construction logistics in urban development projects – learning from, or repeating, past mistakes of city logistics? *The International Journal of Logistics Management*, 33(5), 49–68. <https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2020-0128>
- Kasim, N. B. (2008). Improving materials management on construction projects. *Loughborough University*.
- Kulkarni, V., Sharma, R. & Hote, M. (2017). Factors Affecting Material Management on Construction Site. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 04(01).
- Li, H., Chen, Z., Yong, L., Kong, S. C.W. (2005). Application of integrated GPS and GIS technology for reducing construction waste and improving construction efficiency. *Automation in Construction*, 14(3), 323–331. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.08.007>
- Lu, M., Chen, W., Shen, X., Lam, H.-C. & Liu, J. (2007). Positioning and tracking construction vehicles in highly dense urban areas and building construction sites. *Automation in Construction*, 16(5), 647–656. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.11.001>
- Lu, W., Huang, G. Q., & Li, H. (2011). Scenarios for applying RFID technology in construction project management. *Automation in Construction*, 20(2), 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.007>
- Olivieri, H., Seppänen, O. & Peltokorpi, A. (2017). Real-time tracking of production control: Requirements and solutions. *Proceedings of the 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 671–678.
- Pandit, A. & Zhu, Y. (2007). An ontology-based approach to support decision-making for the design of ETO (Engineer-To-Order) products. *Automation in Construction*, 16(6), 759–770. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.02.003>
- Platform of Trust, (2024). For applicability, Universal Ontology and Harmonizer tool. <https://www.platformoftrust.net/data-interoperability>, haettu 5.12.2024.
- Pradhananga, N. & Teizer, J. (2013). Automatic spatio-temporal analysis of construction site equipment operations using GPS data. *Automation in Construction*, 29, 107–122. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.004>
- Sari, K. (2007). Exploring the benefits of vendor managed inventory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37(7), 529–545. <https://doi.org/10.1108/09600030710776464>
- Seppänen, O., Peltokorpi, A., Zheng, Y., Masood, M. K., Aikala, A., Lehtovaara, J., Kiviniemi, M., Lavikka, R. & Lahdenperä, P. (2021). Digitalizing Construction Workflows (DiCtion) Final Report. *Aalto University*.

- Seppänen, O., Zhao, J., Badihi, B., Noreikis, M., Xiao, Y., Jäntti, R., Singh, V. & Peltokorpi, A. (2019). Intelligent Construction Site (ICONS) Project Final Report. *Aalto University*.
- Strandberg, J. & Josephson, P.-E. (2005). What do Construction Workers do? Direct Observations in Housing Projects. *Building Economics and Management, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden*, 184–193.
- Sundquist, V., Gadde, L.-E. & Hulthén, K. (2018). Reorganizing construction logistics for improved performance. *Construction Management and Economics*, 36(1), 49–65. <https://doi.org/10.1080/01446193.2017.1356931>
- Tanskanen, K., Holmström, J., Elfving, J. & Talvitie, U. (2009). Vendor-managed-inventory (VMI) in construction. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 58(1), 29–40. <https://doi.org/10.1108/17410400910921065>
- Tetik, M., Peltokorpi, A., Seppänen, O., Leväniemi, M. & Holmström, J. (2020). Kitting Logistics Solution for Improving On-Site Work Performance in Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001921](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001921)
- Whitlock, K., Abanda, F. H., Manjia, M. B., Pettang, C. & Nkeng, G. E. (2018). BIM for Construction Site Logistics Management. *Journal of Engineering*, 8(1), 47–55.
- Zheng, Y., Tetik, M., Törmä, S., Peltokorpi, A. & Seppänen, O. (2020). A Shared Ontology for Logistics Information Management in the Construction Industry. *37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. <https://doi.org/10.22260/ISARC2020/0175>