



Mikko Hujanen

TAHTITUOTANNON LOGISTIIKKARATKAISUT

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastajat: Professori Arto Saari
Väitöskirjatutkija Kimmo Keskiniva
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Mikko Hujanen: Tahtituotannon logistiikkaratkaisut
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2022

Rakennusteollisuuden tuottavuuden kehitys on ollut heikkoa vuosikymmenien ajan. Valmistavasta teollisuudesta tunnetulla Lean -ajattelulla on kuitenkin havaittu olevan mahdollisia ratkaisuja tuottavuuden parantamiseen. Lean -ajattelu pyrkii lisäämään tuotantoprosessin tehokkuutta poistamalla hukkaa ja lisäämällä virtausta. Rakennusteollisuudessa Lean -ajattelua käytetään tahtituotannolla toteutetussa rakentamisessa. Tahtituotanto on rakentamisen menetelmä, jolla pyritään lisäämään rakentamisen tuottavuutta tunnistamalla työmaalla erilaisia tahtialueita ja tahtistamalla työmaatoiminnot kyseisillä alueilla tahtiajan mukaisesti. Tahtituotanto on rakentamisen menetelmänä suhteellisen tuore, ja sen käyttö on yleistymässä.

Logistiikka on olennaisessa osassa tahtituotannon toteuttamisessa, sillä onnistunut logistiikka on edellytys onnistuneelle tahtituotannolle. Toisin kuin muilla toimialoilla, rakentamisessa suuri osa rahoista kuluu työmaalla olevien materiaalien käsittelyyn, eikä kuljetuksiin projektin ulkopuolella. Tämä tekee työmaalla tapahtuvasta logistiikasta erittäin tärkeän kehittämisalueen. Logistiikka on materiaalien hankintaa, siirtoa ja varastointia sekä niihin liittyviä informaatiovirtojen hallintaa kannattavuuden maksimoimiseksi kustannustehokkaalla tilausten toteuttamisella.

Tässä diplomityössä esitellään Lean -ajattelua, tahtituotantoa ja materiaali- ja informaatiologistiikkaa. Tarkoituksena on analysoida saatavilla olevasta tutkimuskirjallisuudesta tahtituotantoa ja siihen parhaiten soveltuvia logistiikkaratkaisuja. Käytettäessä tahtituotantoa logistiikkaratkaisujen kanssa voidaan havaita, että logistiikka kohottaa tahtituotannolla jo itsessään saavutettuja etuja. Keskitetyt hankitut logistiikkapalvelujen tuottajat vähentävät hukkaa ja kustannuksia. Logistiikkakeskusten käyttö setitetyillä Just In Time -toimituksilla vaikuttaisi tutkimustiedon valossa olevan toimiva ratkaisu tahtituotannon tehokkuuden kasvattamiseksi.

Tiedonkulkua tarkastellessa havaittiin, että tieto on tärkeää paitsi hankkijalle myös kaikille hankkeeseen osallistuville toimittajille ja osapuolille. Rakennusalan hankinnat koskevat tavaroiden ja palveluiden yhdistelmää, joka on määritelty täyttämään tietyt vaatimukset ja standardit. Siksi tieto on kerättävä ja viestittävä tehokkaasti asiaankuuluvien osapuolten välillä rakennusprojektin aikana. Paremmat keinot hallita tiedonkulkua lisäävät projektien tuottavuutta.

Tutkimus toteutetaan konseptuaalisena tutkimuksena, jossa aiheesta pyritään hahmottamaan käsitteellisiä malleja ja rakenteita aiemman tutkimuskirjallisuuden pohjalta. Koska tutkimus toteutetaan konseptuaalisena tutkimuksena ilman empiriikkaa, on tutkimuksen tuloksia testattava erikseen käytännössä. Tutkimuksen ensimmäinen osuus on kirjallisuuskatsaus, jossa lähdetään liikkeelle tahtituotannon ja sen logistiikan kokonaiskuvan ymmärtämisestä. Tutkimuksen toisessa osuudessa tarkastellaan tahtituotannon vaatimuksia logistiikalle ja tiedonkululle. Kolmannessa osuudessa tarkastellaan erilaisten logistiikkaratkaisuiden soveltuvuutta tahtituotantoon ja esitellään kunkin ratkaisun hyviä ja huonoja puolia. Toisen ja kolmannen osuuden pohjalta muodostetaan synteesi, jolla pyritään saavuttamaan tutkimuksen päätavoite. Esiin pyritään tuomaan keskeisimmät tahtituotannon logistiikan ja tiedonkulun teoriaa ja käytäntöä tukevat elementit.

Avainsanat: tahti, lean, rakentaminen, logistiikka, tiedonkulku

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Mikko Hujanen: Logistics Solutions in Takt Production
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree in Civil Engineering
May 2022

Productivity development in the construction industry has been weak for decades. However, Lean thinking, known from the manufacturing industry, has been found to have potential solutions to improve productivity. Lean thinking seeks to increase the efficiency of the production process by eliminating waste and increasing flow. In the construction industry, Lean thinking is used in construction with takt production. Takt production is a construction method that aims to increase the productivity of construction by identifying different takt areas on the site and synchronizing the on-site operations in those areas according to takt time. Takt production as a construction method is relatively recent and its use is becoming more common.

Logistics play an essential role in the implementation of takt production, as successful logistics is a prerequisite for successful takt production. Unlike other industries, in construction, a lot of the money is spent on handling materials on site, rather than in transportation outside the project. This makes on-site logistics a very important area for development. Logistics is the acquisition, transfer and storage of materials and the management of related information flows to maximize profitability through cost-effective order fulfillment.

This thesis introduces Lean thinking, takt production and materials and information logistics. The purpose is to analyze the available research literature for takt production and the most suitable logistics solutions. When using takt production with logistics solutions, it can be seen that logistics enhances the benefits already achieved by takt production itself. Centrally procured logistics service providers reduce waste and costs. The use of logistics centers with Just In Time -deliveries would appear to be a workable solution to increase the efficiency of takt production in the light of research data.

Examining the flow of information, it was found that the information is important not only for the supplier but also for all suppliers and parties involved in the project. Procurement in the construction sector concerns a combination of goods and services defined to meet certain requirements and standards. Therefore, information must be collected and communicated effectively between the relevant parties during the construction project. Better ways to manage the flow of information increase the productivity of projects.

The research is carried out as a conceptual study, in which the aim is to outline conceptual models and structures on the basis of previous research literature. As the research is carried out as a conceptual research without empirics, the results of the research must be tested separately in practice. The first part of the study is a review of the literature, which starts with an understanding of the overall picture of takt production and its logistics. The second part of the study examines the requirements of takt production for logistics and information flow. The third section examines the suitability of different logistics solutions for takt production. On the basis of the second and third sections, a synthesis is formed, which aims to achieve the main goal of the research. The aim is to highlight the main elements supporting the theory and practice of takt production logistics and information flow.

Keywords: takt, lean, construction, logistics, information flow

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen Yliopiston toimeksiannosta.

Haluan kiittää Arto Saarta, Juha-Matti Junnosta ja Kimmo Keskinivaa työn tarkastamisesta ja erinomaisesta ohjauksesta.

Haluan myös osoittaa vilpittömät kiitokset ystäväilleni. Olette hyvin arvokkaita, ja tuotte suunnattoman määrän iloa ja tukea elämän eri vaiheisiin. Kiitos!

Tampereella, 19.5.2019

Mikko Hujanen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen aihe ja tausta.....	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset	4
1.3 Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen suoritus.....	4
2. KIRJALLISUUSKATSAUS	6
2.1 Tuottavuus, Lean ja tahtituotanto	6
2.1.1 Tuottavuus rakentamisessa	6
2.1.2 Lean -ajattelu	7
2.1.3 Lean -filosofia rakentamisessa	11
2.1.4 Tahtituotanto.....	13
2.1.5 Tahtituotanto käytännössä	16
2.2 Logistiikka	21
2.2.1 Logistiikan perusteet	21
2.2.2 Logistiikkakeskus	22
2.2.3 Toimitusketjut.....	24
2.3 Tiedonkulku	26
2.3.1 Tiedonkulun perusteet	26
2.3.2 Tiedonkulku rakentamisessa.....	28
3. TAHTITUOTANNON VAATIMUKSET LOGISTIIKALLE JA TIEDONKULULLE ...	33
3.1 Logistiset vaatimukset.....	33
3.2 Tiedonkululliset vaatimukset	38
4. POHDINTA	41
4.1 Tiedonkulun logistiikkaratkaisut.....	41
4.2 Materiaalilogistiikan ratkaisut	43
4.3 Tutkimustulosten arviointi.....	46
4.4 Tutkimustulosten yleistettävyys	47
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	48
KÄSITTEISTÖ.....	50
LÄHTEET.....	54

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1 Suomen kansallisvarallisuus, %. Tilastokeskus 2018.....</i>	<i>2</i>
<i>Kuva 2 Tuotannon hukkakategoriat Toyotan mukaan. Forbes and Ahmed, 2010</i>	<i>8</i>
<i>Kuva 4: Tahtiaikatalu (Rakennuslehti, 2019).....</i>	<i>16</i>
<i>Kuva 5: Tahtiaikataulu ja tahtijunat, tahtiaikana yksi viikko (Binninger et al. 2017).....</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 6: Kaksi eri ammattiryhmää työskentelemässä samalla tahtialueella. (Kujansuu et al., 2020).....</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 7: Tahtituotantoaikataulu visualisoituna (Rakennuslehti, 2019).....</i>	<i>19</i>
<i>Kuva 8: Visualisointi Kalifornialaisen sairaalahankkeen tahtiajattelusta. Sairaalan kerrokset ovat jaettu alueisiin, joissa jokainen urakoitsija työskentelee viikon. (Rakennuslehti, 2019)</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 9 Vuorovaikutuksen vaikutus informaation kulkuun (Phelps, 2013).....</i>	<i>27</i>

1. JOHDANTO

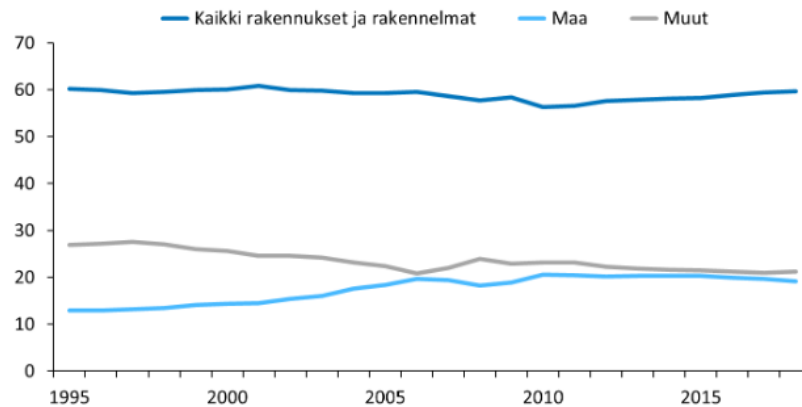
1.1 Tutkimuksen aihe ja tausta

Tutkimus käsittelee tahtituotannon logistiikkaratkaisuja rakennustuotannossa. Tutkimuskohteina ovat tahtituotantoon liittyvä logistiikka, toimitusketjut sekä tiedonkulku.

Rakennusalan tuottavuuden kehitys on heikkoa. Viimeisen kahden vuosikymmenen aikana rakennusalan tuottavuuden kasvu on ollut maailmanlaajuisesti keskimäärin 1 prosentin luokkaa, kun taas maailmantalous on kasvanut keskimäärin 2,8 prosenttia ja esimerkiksi valmistava teollisuus 3,6 prosenttia (Barbosa *et al.*, 2017). Kaupan alalla on siirrytty vuosikymmenien saatossa pienistä perheyriyksistä suuriin jälleenmyyjiin, joilla on käytössä kansainväliset toimitusketjut, digitalisoidut jakelujärjestelmät, aktiivinen asiakastiedon hankinta ja kohdennettu markkinointi. Valmistavassa teollisuudessa puolestaan Lean -ajattelun käyttäminen ja automatisaation voimakas kehitys ovat kohottaneet tuottavuutta valtavasti. Siinä, missä maa-, metsä- ja kalateollisuudessa sekä valmistavassa teollisuudessa tuottavuus on nelinkertaistunut viimeisen viidenkymmenen vuoden aikana, rakennusalalla työn tuottavuus on jäänyt 1970-luvun tasolle (Rakennuslehti, 2017). Verrattaessa rakennusalaan muihin aloihin, voidaan todeta tuottavuuden kehityksen olevan sekä tasoltaan heikkoa, että myös kehitys hidasta.

Tuottavuuden kehitykseen on pyritty kuitenkin vaikuttamaan. Tuomalla rakentamiseen tehdastuotannossa käytettyä Lean -ajattelua on tuottavuudessa havaittu positiivisia muutoksia. Lean -rakennustuotannon parissa huomiota on annettu viime aikoina tahtituotannolle, ja rakennusalalla on melko laajalti pyritty valjastamaan sen käyttöä (Tetik *et al.*, 2019). Tahtituotanto on Lean -ajatteluun perustuva tuotantotapa, jossa työmäärä pilkotaan pienemmiksi kokonaisuuksiksi, jotka tahditetaan rakennusjaksossa. Tahtituotannolla estetään ylituotantoa, lyhennetään läpimenoaikoja ja työprosessit saadaan vakaammiksi. Samalla odotusaikoja työvaiheiden välillä lyhennetään, kuljetus optimoidaan jatkuvalla virtauksella ja tuotantokapasiteettia saadaan nostettua (Haghsheno *et al.*, 2016). Tahtituotanto on ilmiönä vielä suhteellisen tuore (Keskiniva *et al.*, 2020), joten sen hyötyjen maksimoiminen tuotannon tehokkuuden ja tuottavuuden lisäämiseksi vaatii lisää tutkimusta. Perehtymällä tahtituotantoon, ja tuomalla esiin lisää tietoisuutta siitä sekä siihen vaikuttavista logistisista tekijöistä, voidaan parantaa tahtituotannolla toteutettavaa rakentamista Suomessa.

Rakentaminen on iso osa usean maan kansantaloutta. Suomessa rakennusala työllistää noin 260 000 työntekijää, mikä vastaa noin 18 prosenttia yrityssektorin työllisyydestä. Rakennusalan yritykset tuottivat yli 35 miljardia euroa arvonlisää vuonna 2017, mikä vastaa yli 17 prosenttia arvonlisästä Suomessa toimivista yrityksistä. Rakennusalan merkitys kansantaloudessa on kasvanut 2000-luvulla, mutta työn tuottavuus on pysynyt lähes muuttumattomana koko 2000-luvun ajan (ETLA, 2020). Suomen kansallisvarallisuuden 1000 miljardin euron arvosta rakennusten ja rakennelmien arvo on noin kaksi kolmasosaa. Voidaan siis sanoa, että rakennusallalla on suuri kansantaloudellinen merkitys. Alaa koskevat muutokset näkyvät heijastuksina koko yhteiskuntaan. Suurimpia tulevaisuuden ajureita rakennusallalle ovat kaupungistuminen ja elintason noususta johtuva kulutuksen kasvaminen (Ahonen *et al.*, 2020).



Lähde: Tilastokeskus SVT Rahoitustilinpito ja kirjoittajien omat laskelmat. Ajanjakso 1995-2018.

Kuva 1 Suomen kansallisvarallisuus, %. Tilastokeskus 2018

Talonrakentaminen työllistää koko rakennusallalla 43 prosenttia työntekijöistä, ja sen osuus on noussut hieman 2000-luvulla. Rakennustuoteteollisuudessa puolestaan on tapahtunut selvä muutos; vuosituhanen alussa neljänneksen rakennusalan henkilöstöstä työllistänyt alan osuus on laskenut tasaisesti tämän hetken 17 prosenttiin. Rakennusallalla on tapahtunut muutoksia myös eri kokoisten yritysten merkityksessä. Alle 50 työntekijän yritykset vastaavat yhä suurempaa osaa alan työllisyydestä. 2000-luvulla näiden yritysten työllisyys on kasvanut yli 25 000 työntekijällä. Suurimpien yritysten työllisyys on puolestaan vähentynyt, johtuen osittain siitä, että suuremmat yritykset ulkoistavat toimintaansa pienemmille toimijoille. Ulkoistaminen johtaa siihen, että rakennushankkeissa rakennuskustannuksista alihankinnan ja -urakoitsijoiden osuus on 60-80 prosenttia. Tämä aiheuttaa yritysverkostopainotteisuutta alalle. Rakentamisen projektiluonteesta vuoksi yhteistyösuhteet yritysverkostoissa ovat kuitenkin lyhytaikaisia, mikä vaikuttaa sekä toteuttamisen innovatiivisuuteen ja tuotettuun laatuun (Ahonen *et al.*, 2020).

Rakennusalan toiminta jakautuu arvoketjuihin, joissa kytkeytyvät tilaajat, suunnittelijat, teollisuus ja rakennusyrietykset. Rakentamistyön luonteen vuoksi yhteistyöolosuhteet ovat kuitenkin tyypillisesti lyhytaikaisia, millä on vaikutusta sekä rakentamisen innovatiivisuuteen että laatuun. Rakentamisen tuottavuuskasvun ollessa lähes olematonta 2000 -luvun ajan, rakentamisen arvoketjuissa tuottavuus on kuitenkin kasvanut. Tämä selittyy rakennusalan tuottavampien tehtävien siirtymisellä arvoketjun muihin osiin; esimerkiksi aiemmin työmaalla tehdyt rakennusosat ja työvaiheet on siirretty tehtäväksi tehtailla, jolloin valmistavassa teollisuudessa syntyy tuottavuuden kasvua, eikä rakennusosalalla (Ahonen *et al.*, 2020).

Rakennusalan innovaatiotoimintaa voitaisiin todennäköisesti edistää julkisen sektorin toimesta vaatimalla tilaajana uusia ratkaisuja ja innovatiivisuutta. Tilaajan on määriteltävä tavoitteet ja vaatimukset, ja laitettava yritykset kilpailemaan teknisillä ratkaisulla, jotka täyttävät nämä vaatimukset. Edistämällä esimerkiksi digitaalista tietomallinnusta voitaisiin estää suunnittelutyössä ilmenevää päällekkäisyyttä, ja ongelmakohtiin pystyttäisiin puuttumaan aikaisemmassa vaiheessa (Ahonen *et al.*, 2020).

Logistiikan järjestely on oleellinen osa rakentamista. Logistiikkaan kuuluvat sekä työmaan ulkopuoliset että työmaan sisäiset materiaalivirrat (Ghanem *et al.*, 2018). Parantamalla materiaalivirtojen virtaamista ja vähentämällä hukkaa logistiikassa, saavutetaan tehokkuutta ja kustannusten alentamista rakennustuotannossa. Logistiikan sujuvuus on kriittistä tahtituotannossa, sillä tahtituotanto asettaa tiukat vaatimukset tuotannolle. Tahtituotanto edellyttää täsmällisempää materiaali- ja tuotevirtojen hallintaa (Peltokorpi *et al.*, 2019). Tarkastelemalla erilaisten toimitusketjujen sopivuutta tahtituotantoon saadaan oleellista tietoa tuotannon tehostamisesta.

Tiedonkulku vaikuttaa oleellisesti logistiikan sujuvuuteen. Tiedon saatavuuden projektien osapuolten kesken on oltava mahdollisimman sujuvaa ja läpinäkyvää. Rakentaminen on murroksessa digitalisaation ja toimintaympäristön muutoksen, kuten kasvaneen alihankinta-asteen ja työntekijäpulan, johdosta. Digitalisaatio ja informaatiovirtojen reaaliaikainen seuranta ja välitön tiedonvälitys luovat valtavan määrän mahdollisuuksia rakennusalan kehittämiseen. Esimerkiksi Aalto-yliopiston toteuttama iCONS -hankkeen digitaalinen tiedonkeruujärjestelmä osoitti tehokkaasti hukan syntymistä niin työvoiman kuin materiaalivirtojen suhteen (Seppänen *et al.*, 2019). On siis syytä tutkia, mitä keinoja tiedonjakoon käytetään, ja mitkä keinot tuovat eniten arvoa tuotantoon.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tutkimuksen tavoitteena on analysoida tahtituotantoon soveltuvia logistiikkaratkaisuja ja tiedonkulun merkitystä. Tarkoituksena on analysoida aiheesta saatavilla olevaa tutkimuskirjallisuutta, ja soveltaa saatavilla olevaa tietoa tahtituotannon logistiikan kehitysehdotuksiksi. Tavoitteena on havainnollistaa logistiikan ja tiedonkulun käyttöä, sekä vertailla erilaisten toimintamallien soveltuvuutta tahtituotannossa.

Tutkimus pyrkii vastaamaan seuraaviin kysymyksiin: Miten tahtituotannon logistiikka toteutetaan olemassa olevan kirjallisuuden perusteella? Miten eri logistiset toimintamallit soveltuvat tahtituotantoon? Mitkä ovat kehitysehdotuksia tahtituotannon logistiikkaan?

Tutkimus rajataan käsittelemään tahtituotantoa sisävalmistusvaiheessa. Sisävalmistusvaiheessa materiaalia liikutetaan paljon, ja logistiikka on edellytys sujuvalle tuotannolle. Materiaalien on oltava saatavilla oikeaan aikaan ja oikeassa paikassa. Tutkimuskirjallisuutena käytetään sekä suomalaista että kansainvälistä tutkimusta tahtituotannosta.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen suoritus

Tutkimus toteutetaan konseptuaalisena tutkimuksena, jossa aiheesta pyritään hahmottamaan käsitteellisiä malleja ja rakenteita loogisella päättelyllä aiemman tutkimuskirjallisuuden pohjalta. Konseptuaalisessa tutkimusmenetelmää pidetään sopivana tähän tutkimukseen, koska tahtituotantoon liittyvää tutkimuskirjallisuutta on saatavilla rajoitetusti, mutta samantyyppisiä logistisia haasteita on käsitelty rakentamisen yleisessä tutkimuskirjallisuudessa. Koska tutkimuksen tulokset ovat johdettu ilman empiriikkaa, tulosten oikeellisuus täytyy erikseen varmistaa empiirisiin tutkimuksiin.

Tutkimusaineiston keruu toteutetaan Scopus-, Google Scholar- sekä Tampereen Yliopiston Andor -hakupalveluita käyttämällä. Hauissa käytetään sekä suomalaista että englanninkielistä termistöä. Hakutuloksista valitaan parhaiten tutkimukseen sopivat tutkimukset, artikkelit ja dokumentit. Aineistona käytetään myös rakennusalan lehdistöä ja uutisointia. Tutkimuksen teoreettinen osuus, kirjallisuuskatsaus, muodostetaan kerättyyn aineistoon perustuen.

Tutkimuksen ensimmäinen osuus on kirjallisuuskatsaus, jossa lähdetään liikkeelle tahtituotannon ja sen logistiikan kokonaiskuvan ymmärtämisestä. Ensimmäiseksi esitellään Lean -teoriaa, josta johdetaan kytkökset tahtituotantoon. Tahtituotannon perusteet, käyttö ja nykytilanne rakentamisessa esitellään. Tämän jälkeen perehdytään rakennustuotannon logistiikkaan ja esitellään etenkin tahtituotannossa käytössä olevat

toimitusketjut, niiden rakenteet ja toimintamekanismit. Lopuksi esitellään tiedonkulkuun liittyvää teoriaa ja tiedonkulun roolia logistiikassa.

Tutkimuksen toisessa osuudessa tarkastellaan tahtituotannon vaatimuksia logistiikalle ja tiedonkululle. Tavoitteena on selvittää kriittiset logistiikan ja tiedonkulun elementit onnistuneen tahtituotannon saavuttamiseksi. Kolmannessa osuudessa tarkastellaan erilaisten logistiikkaratkaisuiden soveltuvuutta tahtituotantoon. Toisen ja kolmannen osuuden pohjalta muodostetaan synteesi, jolla pyritään saavuttamaan tutkimuksen päätavoite. Esiin pyritään tuomaan keskeisimmät tahtituotannon logistiikan ja tiedonkulun teoriaa ja käytäntöä tukevat elementit.

2. KIRJALLISUUSKATSAUS

Tässä tutkimuksessa tutkitaan tuottavuuden kasvattamista rakentamisessa tuotannonohjauksen ja logistisen suunnittelun näkökulmasta. Kirjallisuuskatsauksen ensimmäisessä osiossa perehdytään tahtituotantoon ja sen taustoihin. Toisessa osiossa esitellään rakentamisen logistiikkaa. Kolmanneksi esitellään tiedonkulkua.

2.1 Tuottavuus, Lean ja tahtituotanto

Tahtituotanto on rakentamismenetelmä, jolla pyritään lisäämään mm. rakentamisen tuottavuutta (Binninger *et al.*, 2018). Tässä luvussa esitellään tahtituotannon konsepti. Jotta tahtituotantoa voidaan ymmärtää paremmin, analysoidaan ensiksi tuottavuutta rakentamisessa ja siihen liittyviä rakentamisalan erikoispiirteitä, sekä Lean -ajattelun taustoja ja käyttöä rakentamisessa. Lean -rakentaminen hyödyntää Lean -tuotannon menetelmiä, jotka ovat muodostettu alun perin valmistavaa teollisuutta varten.

2.1.1 Tuottavuus rakentamisessa

Rakentaminen on hyvin perinteistä liiketoimintaa, jossa noudatetaan lakeja ja määräyksiä. Rakennusyritysten tuotannonohjausjärjestelmät asettuvat vuosien saatossa usein keskenään samankaltaisiin menettelytapoihin. Tämä helpottaa työskentelyä alihankkijoiden kanssa, koska kaikki osapuolet tuntevat yhteiset prosessit. Vakintuneet ja toistuvat toiminnot ovat prosesseissa vahvasti mukana.

Perinteinen tuotannosuunnitteluprosessi alkaa projektin jakamisesta pieniin toimintoihin ja kunkin toiminnon toteuttamiseen tarvittavan ajallisen ja rahallisen määrän arviointiin. Aikataulu laaditaan asettamalla nämä toiminnot järjestykseen, jolloin työn vapauttaminen työryhmältä toiselle jätetään huomiotta. Sopimukset tehdään olemassa olevan tietämyksen pohjalta ja kaupalliset ehdot määrittelevät jokaisen tehtävän. Tämä aiheuttaa työntöä työn aloittamiselle mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, vaikka todellisia edellytyksiä työn valmistumiselle ei vielä olisikaan (Koskela and Howell, 2002).

Projektien hallinta on tyypillisesti löyhää kustannusten ja aikataulujen seuranta, ja toimenpiteisiin ryhdytään harvoin. Aloituspäivät ovat hyvin hallussa, mutta tehtävät kestävät suunniteltua pidempään erinäisten katkosten ja viivästysten vuoksi. Kun yksi alihankkija päätyy töihin samaan sijaintiin toisen kanssa, seuraa yleensä keskeytys. Jos alihankkija joutuu demobilisoimaan työryhmänsä, koska työmaalla ei ole saatavilla töitä,

syntyy valtavasti hukkaa (Seppänen, 2009). Toistuvat keskeytykset ovat laajalti hyväksytyjä ja niitä käsitellään puskurointi aikatauluilla. Aikapuskurit mahdollistavat epätarkan suunnittelun ja siten vielä enemmän vaihtelua ja riskejä projekteissa. Huono tuotannonohjaus tuottaa alhaista luotettavuutta (Koskela, 2000).

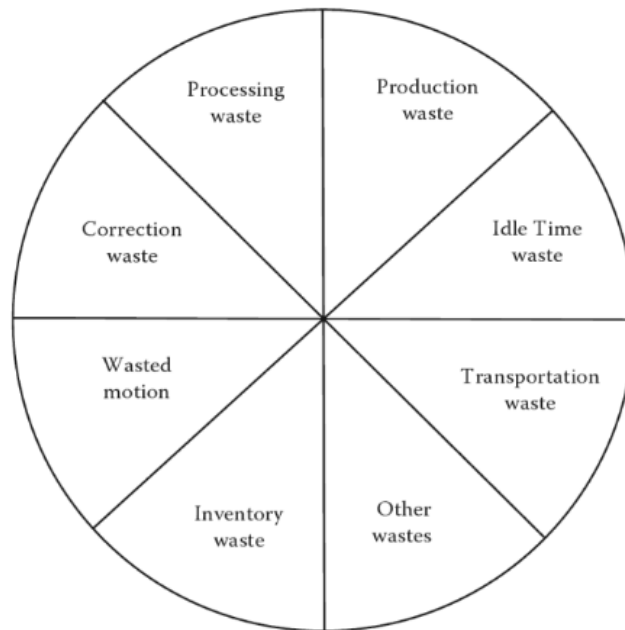
Yksittäisen tehtävän tuottavuutta mitataan usein kustannuksilla, yksikköhinnoilla, ajalla ja kokonaistyötunneilla. Työn tuottavuus on suoraan riippuvaista kustannuksista ja suorituskyvystä, joten työhön valituilla toimenpiteillä on merkitystä. Ongelmana on, että vaatimukset asetetaan usein koko tulokselle, ei asteittaiselle edistymiselle. Tästä johtuen päivittäisen työn suorituskyvyn vaihtelu voi olla suurta, eikä siitä ole seurauksia runsaan aikapuskurin takia. Tuottavuusasteiden suuri vaihtelu on merkki huonosta käytännöstä, mutta se voi johtua myös olosuhteista, suunnitteluvirheistä ja onnettomuuksista (Thomas, 2015).

Tuottavuuskasvulle keskeistä on kuitenkin alan toimijoiden toiminta. Lisäämällä modulaarisuutta ja esivalmistusta, sekä syventämällä alan yritysten yhteistyötä saataisiin kohotettua tuottavuutta. Aikataulujen parempi hallinta ja suunnitelmallisuus voisi vaikuttaa paremman laadun tuottamiseen. Rakennusala ohjaavia sääntelyitä ja säädöksiä muokkaamalla voitaisiin myös uudistaa alaa, esimerkiksi kohdistamalla määrärahyksiä tavoitetasoille tarkasti määriteltyjen teknisten ratkaisujen sijaan (Ahonen *et al.*, 2020). Lauri Koskela (2000) luettelee rakentamistuotannon piirteiksi projektien omalaatuisuuden, työmaatuotannon ja tilapäisten moniorganisaatioiden käytön (Koskela, 2000). Tuotteiden ainutlaatuisuus on yhä tyypillisempää, kun valmistuksessa pyritään räätälöityjen tuotteiden välittömään valmistamiseen. Koskela korostaa rakentamisen ainutlaatuisuutta ja ehdottaa toimia, joilla sen ainutlaatuisuutta voidaan vähentää. Näitä toimia ovat esim. komponenttien standardointi sekä modularisoinnin ja esivalmistuksen hyödyntäminen. (Koskela, 2000)

2.1.2 Lean -ajattelu

Lean -ajattelu on filosofia, joka on lähtöisin toisen maailmansodan jälkeisestä Japanista. Silloiset japanilaiset ajoneuvovalmistajat Toyota ja Ohno huomasivat vierailuillaan Ford Motorin massatuotantolaitoksessa, että vaikka yhdysvaltalainen autoteollisuus oli tuolloin heidän omaansa reippaasti edellä, syntyi yhdysvaltalaisessa autovalmistusprosessissa valtava määrä hukkaa. Hukkaa havaittiin syntyvän muun muassa ylituotannosta, odotusajoista, kuljetuksesta, ylimääräisestä liikkeestä, viallisista tuotteista sekä liikavarastoinnista (Forbes and Ahmed, 2011). Tästä oppineena autoja alettiin tuottaa Japanissa pienemmillä investoinneilla ja varastoinneilla sekä

vähemmällä työvoimalla. Tuolloin havaittiin, että eliminoimalla hukkaa tuotantoprosessista, tuottavuutta ja laatua saatiin nostettua, sekä kuluja vähennettyä, näin kasvattaen japanilaisen autovalmistuksen kansainvälistä kilpailuetua (Bhamu and Singh Sangwan, 2014).



Kuva 2 Tuotannon hukkakategoriat Toyotan mukaan. Forbes and Ahmed, 2010

Nimike "Lean" tuli yleiseen käyttöön Massachusetts Institute of Technologyn tuottaman tutkimuksen (Womack and Jones, 1990) tuloksena. Tutkimuksessa haluttiin selvittää syyt suorituskyvyn eroihin yhdysvaltalaisen ja japanilaisen ajoneuvovalmistuksen välillä. Tutkimuksen tuloksena tuotettu kirja *The Machine That Changed The World* (Womack and Jones, 1990) toi esille Lean -käsitteistön ja popularisoi sen käytön. Lean -konseptin perusta voidaan jäljittää Toyota Production Systemiin (TPS), jonka pioneereina toimivat japanilaisinsinöörit Taichii Ohno ja Shigeo Shingo. Ohno löysi uuden tavan koordinoida osien kulkua päivittäisessä tuotantojärjestelmässä siten, että osia valmistetaan jokaisessa vaiheessa vain seuraavan toiminnan välittömään tarpeeseen. Jokaisella työpisteellä työntekijäryhmät ohjasivat paikallista toimintaansa jatkuvan havainnoinnin perusteella, tiettyjen mittareiden sijaan. Toyotan tehtaan työn kulkua säädeltiin rytmitetystä "tahtiajalla", joka juontuu saksalaismuusikoiden käyttämästä tahtia kuvaavasta sanasta "takt". Tämä rytmi vastasi päivittäistä tuotannon kysyntää (Forbes and Ahmed, 2011). TPS koostuu kahdesta osasta, Just-In-Time -tuotannosta (JIT) ja ihmisarvoa kunnioittavasta järjestelmästä, joiden pääpainoina ovat turhan liikkeen eliminointi ja työntekijöiden aktiivinen osallistaminen (Sugimori *et al.*, 1977). Lean -

käytäntöjen voidaan sanoa olevan useiden sitä edeltävien ideologioiden summa (Bhamu and Singh Sangwan, 2014).

Siinä, missä massatuotanto on ns. työntöohjattu järjestelmä, jossa tuotantomäärä sanellaan markkinaennusteiden perusteella, JIT on imuohjattu järjestelmä, jossa pyritään vastaamaan asiakkaiden todelliseen kysyntään. Työntöohjausjärjestelmien ollessa alttiita yli- tai alituotannolle ennusteiden tarkkuuden perusteella, JIT sitoo vain ne resurssit, jotka tarvitaan todellisten vaatimusten täyttämiseksi. Asiakas toimii tuotannon määrittäjänä. Massatuotannossa pyritään luomaan mahdollisimman suurta tuotantomäärää, koska koneistojen asentaminen ja määrittäminen vie aikaa, mutta JIT pyrkii rakentamaan pienempiä kokonaisuuksia, jotka pystyvät paremmin tarjoamaan vaihtelua asiakkaalle. JIT -järjestelmän käyttö aiheuttaa pienempiä inventaariomääriä niin raaka-aineiden kuin valmisteiden suhteen, vähemmän työmäärää prosessin aikana ja nopeampia läpimenoaikoja. Se myös vähentää yleiskustannuksia. JIT vaatii kuitenkin onnistuakseen raaka-aineiden ja komponenttien saapumista oikeaan aikaan ja oikeaan paikkaan, joten toimittajan ja käyttäjän on tehtävä hyvin tiivistä yhteistyötä (Forbes and Ahmed, 2011).

Lean on muuntunut vuosikymmenien saatossa. Leanilla on monenlaisia kuvauksia ja määritelmiä, eikä yhtä tarkkaa, oikeaksi todettua määritelmää ole muodostettu (Shah and Ward, 2007). Lean -tuotanto voidaan esimerkiksi määritellä systeemiksi, joka käyttää vähemmän panoksia samojen tulosten luomiseen, kuin perinteisellä massatuotannolla pystytään tuottamaan, samalla lisäten valikoimaa loppuasiakkaalle (Womack and Jones, 2003). Lean -tuotanto määritellään myös filosofiana, joka perustuu Toyotan tuotantojärjestelmään ja muihin japanilaisiin johtamiskäytäntöihin, jotka pyrkivät lyhentämään asiakastilauksen ja lopputuotteen toimituksen välistä aikarajaa poistamalla johdonmukaisesti hukkaa (Singh, 1998). Lean voidaan määritellä parhaaksi tavaksi tuottaa asiakkaalle arvoa eliminoimalla hukkaa prosessien ja työvoiman suunnitteluelementtien kautta. Lean -tuotanto on integroitu järjestelmä, joka koostuu laajasti toisiinsa liittyvistä elementeistä ja johtamiskäytännöistä, kuten mm. Just-In-Time -järjestelmästä, laatujohtamisesta, työryhmistä ja soluttaisesta tuotannosta. (Shah and Ward, 2003)

Lean -käytäntöä kuvataan yleensä kahdesta näkökulmasta, joko filosofisesta näkökulmasta, joka liittyy ohjaaviin periaatteisiin sekä yleisiin tavoitteisiin (Womack and Jones, 2003), tai käytännön näkökulmasta, jossa tarkastellaan asetettuja johtamistapoja, työkaluja ja tekniikoita, joita voidaan havainnoida suoraan (Shah and Ward, 2003). On havaittu, että lean -ajattelun erottelu strategiseen ja operatiiviseen tasoon on kriittistä leanin kokonaisvaltaisen ymmärtämisen kannalta. Kokonaisvaltaisen leanin

ymmärryksen myötä oikeita työkaluja ja strategioita voidaan käyttää paremman asiakasarvon tuottamiseksi. Vaikkakin olemassa on valtava määrä variaatiota Leanin määrittämisen suhteen, Lean -käytäntöjen omaksumisen on todettu yksimielisesti olevan hyödyllisiä tuotannossa (Hines *et al.*, 2004).

Leanin voidaan ajatella edustavan ajatusta säilyttää vain prosessin olennaiset osat ja vähentää kaikkea turhaa, niin sanottua hukkaa. Hukan tunnistamiseksi on tutkittava prosessia ja tunnistettava asiakasarvoa luovia muutoksia. Hukka koostuu kolmesta tyyppistä; turhasta työstä, ylikuormituksesta ja epätasaisuudesta tuotannossa. Arvovirtaa luovan työn lisäksi on olemassa myös arvoa lisäämätöntä, mutta tarpeellista työtä, kuten esimerkiksi siivous ja logistiikka. Tämän takia Lean -prosessin määrittelemisen voi olla vaikeaa (Womack and Jones, 2003).

Lean -keskustelussa toistuu kuitenkin samat teemat, joista oleellisimpia on syytä nostaa esiin. Forbesin ja Ahmedin (2011) mukaan seuraavat viisi Lean -periaatetta pätevät jokaiseen Lean -järjestelmään:

1. Arvo (eng. value): On kriittisen tärkeää tunnistaa asiakasarvo ja tarjota sitä. Lean -järjestelmissä pyritään välttämään taipumusta houkutella asiakasta haluamaan tuotetta, jota on helpointa tarjota.
2. Arvovirta (eng. value stream): Arvovirran kartoitus jokaiselle tuotteelle tai palvelulle paljastaa hukkaa ja mahdollistaa sen poiston.
3. Virtaus (eng. flow): Arvoja luovien askeleiden virtauttaminen ilman viivästyksiä, pysäytyksiä tai keskeneräisen tuotteen varastointia on välttämätöntä. Virtaus on riippuvainen mahdollisimman esteettömästä, tehokkaasta arvovirtauksesta.
4. Imu (eng. pull): Lean -tuotannon osapuolten on pyrittävä vakauttamaan imua pysyäkseen asiakastarpeiden mukana.
5. Täydellisyys (eng. perfection): Pyrkimys täydellisyys saavuttamiseen, esimerkiksi tuottamalla toimintaa parantavia ohjeistuksia ja käytäntöjä sekä tarkkailemalla laatua. (Forbes and Ahmed, 2011)

Lean -käytäntöjen omaksumiselle on havaittu useita kvantitatiivisia etuja. Näitä ovat esimerkiksi tuotannon läpimenoajan, käsittelyajan, sykliajan ja asennusajan nopeutuminen, sekä varastoinnin, vikojen käsittelyn ja laitteiden yleisen tehokkuuden paraneminen. Erilaisia kvalitatiivisia etuja ovat parannettu työntekijöiden moraalit, tehokkaampi viestintä, kohonnut työtyytyväisyys sekä onnistuneempi päätöksenteko (Bhamu and Singh Sangwan, 2014).

2.1.3 Lean -filosofia rakentamisessa

Lauri Koskela käsitteli tutkimuksessaan "Application of the new production philosophy to construction" (Koskela, 1992) Lean -tekniikoiden soveltamista rakentamiseen. Koskela etsi rakentamisen uutta suuntaa valmistavasta teollisuudesta. Hän mallinsi uuden tuotantofilosofian TPS:n mukaan. Koskela suositteli rakennusalan alihankintatoimintaan teollistumista esivalmistuksen ja modulaarisuuden kautta, sekä automaatiota, robotiikkaa ja tietotekniikkaa tiedon pirstoutumisen vähentämiseksi. (Koskela, 1992)

Koskela päätteli useista tuottavuuteen perustuvista Yhdysvaltoja koskevista tutkimuksista ja eurooppalaisista tuotantolaitoksista, että kaikista menestyneimmät menetelmät perustuivat JIT-filosofiaan (Koskela, 1992). Tyypillisessä tuotantoprosessissa materiaalia käsitellään useissa erillisissä vaiheissa. Tätä kutsutaan muunnostoiminnaksi (eng. conversion activity). Materiaalia myös tarkastetaan, siirretään operaatiosta toiseen tai laitetaan odottamaan. Tarkastus ja odottaminen katsotaan virtaustoiminnaksi. (Forbes and Ahmed, 2011).

Muunnostoimintojen katsotaan tuovan lisäarvoa, kun taas virtaustoimintojen ei. Koskela visualisoi lean-rakentamisen virtausprosessina yhdistettynä muunnostoimintoihin ja totesi, että vain muunnostoiminnat tuovat lisäarvoa. Tämä oli muunnosarvovirran (eng. transformation-flow-value, TVF) rakentamisen teoria. Tässä teoriassa tuotannon parannuksia voidaan saada eliminoimalla tai vähentämällä virtaustoimintoja ja samalla tehostamalla muunnostoimintoja. Hän viittasi aikaisempiin tutkimuksiin, jotka osoittivat, että vain 3–20 % tyypillisen prosessin vaiheista tuo lisäarvoa ja että niiden osuus syklin kokonaisajasta on vain 0,575 %. (Koskela, 2000)

Koskela piti arvoa tuottamattoman toiminnan kolmena perimmäisenä syynä suunnittelua, tietämättömyyttä ja tuotannon luontaista luonnetta. Suunnittelu johtui tehtävien jaosta; jokainen lisätty osatehtävä lisäsi tarkastamisen, odottamisen ja liikkumisen määrää. Luonnollinen taipumus prosessien kehittymiseen ajan myötä ilman tarkkaa analysointia johtaa tietämättömyyteen niiden luontaisesta tuhlauksesta. Tuotannon luontainen luonne on, että tapahtumat, kuten viat ja onnettomuudet, lisäävät arvoa lisäämättömiä (eng. Non-value-adding, NVA) vaiheita ja aikaa eri muunnostoimintojen välillä. (Koskela, 1992)

Lean -rakentaminen poikkeaa merkittävästi perinteisestä projektinhallintakäytännöstä. Prosesseja ohjataan aktiivisesti, ja mittareita käytetään järjestelmän suorituskyvyn suunnittelussa luotettavan työnkulun varmistamiseksi ja projektin tulosten ennustamiseksi. Lean-menetelmillä suorituskyky optimoidaan projektitasolla, kun taas nykyiset projektinhallintamenetelmät vähentävät kokonaissuorituskykyä yrittämällä

optimoida jokaista toimintaa. Perinteiset rakennusmenetelmät palkitsevat yksittäisen työryhmän suorituskyvyn, jolloin työryhmät voivat keskittyä tehtäviinsä muiden työryhmien kustannuksella. Lean -lähestymistavassa kaikki mukana olevat tieteenalat palkitaan projektin tärkeimpien osien suorittamisesta. Lean -rakentaminen onnistuu, kun optimointi tehdään projektitasolla, toisin kuin yksittäisen alihankkijan paikallisessa optimoinnissa. (Womack and Jones, 2003)

Lean -rakentaminen sisältää paremman lyhyen aikavälin suunnittelun ja hallinnan, joka parantaa työtehtävien oikea-aikaista valmistumista ja vähentää perinteisillä projektinhallintamenetelmillä esiintyvää työn tuotoksen vaihtelua. Se korostaa työskentelyä työryhmissä ilman keskeytyksiä. Tästä johtuen näiden ryhmien välillä on enemmän yhteistyötä ja keskittymistä kokonaisprojektin loppuunsaattamiseen oman edun sijaan.

Koska Leanin toteuttamisessa rakentamisen alalla oli ollut vaikeuksia, lean rakentaminen alkoi poiketa alkuperäisestä valmistuskontekstista. Ballardin ja Howellin (1998) mukaan joidenkin rakenteiden ominaisuudet ovat "Leanoitumattomia", ja niitä tulisi muuttaa vain tarvittaessa. He luokittelivat rakentamisen projektityyppiseksi liiketoiminnaksi, jonka kulku on hyvin sekavaa ja luonteeltaan ainutlaatuista. (Ballard and Howell, 1998) Myöhemmät mielipiteet ovat monipuolisempia; työvaiheet ovat melko toistuvia ja alihankkijoiden näkökulmasta toistuvan tuotannon volyyymi on niin suuri, että heidän työnsä voitaisiin luokitella linjavirtaukseksi. Tuotantovirrat vaihtelevat työvaiheittain, joten haasteena on sovittaa virrat yhteen ja parantaa niiden välisiä rajapintoja. (Sacks, 2016)

Lean -rakentamisen TFV -teorian tavoitteena on maksimoida muunnokset minimoimalla hukan määrää. Arvolla tarkoitetaan asiakkaan tarpeiden täyttämistä ja se määrittelee, mitkä muunnokset ovat arvokkaita. TFV-teorian tärkein panos on tarjota erilaisia näkemyksiä tuotannon mallintamiseen, strukturoimiseen, ohjaamiseen ja parantamiseen sekä tuotannon ideologian siirtämiseen rakentamisen kontekstiin. (Koskela, 2000) Arvon maksimointi ja hukan minimoiminen alkaa siitä, että tutkitaan, mitä asiakas haluaa. Suunnittelun, toimituksen ja kokoonpanon tulisi tukea näitä tavoitteita. (Ballard, 2000)

2.1.4 Tahtituotanto

Rakentamisessa on viime vuosina otettu käyttöön valmistavassa teollisuudessa jo pidempään käytössä ollut tahtituotanto (Frandsen *et al.*, 2013). Tahtituotanto on Lean -konsepti, joka pyrkii mahdollistamaan jatkuvan virtauksen ja lisäämään vakautta tuotantoprosesseissa. Tuotanto etenee rytmitettyllä ajalla, tahtiajalla, ja tuotevirtaus mahdollistetaan ryhmittämällä tehtävät ja tasapainottamalla ne tahtiaikaan (Pattanaik and Sharma, 2009). Sana ”tahti” viittaa valmistavan teollisuuden tahditettuun aikatauluun, jossa tuotannon aktiviteetit pyrittiin saamaan valmiiksi. Tahtiaika on aikayksikkö, jossa tuote täytyy valmistaa, jotta voidaan vastata tuotteen kysynnän tasoon (Hopp and Spearman, 2004). Tahtituotannon käyttö tuo valtavia parannuksia tuotantoon, laatuun ja projektien läpimenoaikoihin, samalla vähentäen keskeneräiseksi jääviä työtehtäviä (Heinonen and Seppänen, 2016). Tahtituotannon on havaittu mahdollistavan jopa 70 prosentin vähennyksen rakentamisen sisätyövaiheiden kestossa (Binninger *et al.*, 2018).

Rakentamisessa tahtituotannon tavoitteena on tunnistaa toistuvat prosessit tuotannossa, tasapainottaa ne, ja luoda tuotannolle tasainen virtaus tahditetussa rytmissä läpi koko tuotannon (Dlouhy *et al.*, 2016). Tuotannon virtaus ratkaistaan tahtituotantomallilla, jossa käytetään hyödyksi työsisällön ja työkohteiden keskinäistä toistuvuutta (Frandsen *et al.*, 2013). Tahtituotannon käyttö soveltuukin hyvin kohteisiin, joissa työn toistuvuus on suurta (Haghsheno *et al.*, 2016). Aikataullinen rytmitys ja standardoitu työ ovat kriittisiä tahtituotannon vaikutuksen näkymiselle kokonaisaikataulussa ja tahtituotannon onnistumisessa. Tahtiaikaa määrittäessä otetaan huomioon looginen järjestys, epävarmuustekijät, asiakastarpeen määrittämä etenemisnopeus, realistinen etenemisnopeus, tilojen ominaisuudet sekä detaljien vaikutus laatuun ja kustannuksiin (Frandsen *et al.*, 2013). Tahtituotantoa suunnitellessa tahtiin mietitään alueet tai vyöhykkeet siten, että niihin sisältyy sama määrä työtä. Suunnitellessa tavoitteena on myös se, että työ ei odota työntekijää eikä tekijä joudu odottamaan työtä. Mikäli työntekijät joutuvat odottelemaan töitä, ei heille ole työaluetta, jolloin heidän täytyy siirtyä toiseen tehtävään tai kohteeseen. Odottaminen on kuitenkin ajoittain tarpeen paremman kokonaistyönkulun saavuttamiseksi, ja tällöin työhön suunnitellaankin puskureita (Frandsen, 2019).

Tahti koostuu erilaisista vaiheista, joiden kesto määritellään esimerkiksi tunteina, päivinä tai viikkoina. Tahtituotannon suunnittelu aloitetaan Dlouhyn mallin mukaan tahtialueiden

määrittämisellä (Dlouhy *et al.*, 2016). Tahtialueet määritellään jakamalla työmaa erilaisiin toiminnallisiin alueisiin. Jokainen rakennusvyöhyke, jonka työsisältö on keskenään merkittävästi erilainen, muodostaa oman toiminnallisen alueensa, joka vaatii erillisen tahtisuunnittelun (Binninger *et al.*, 2017).

Tahtiaikasuunnittelun tavoitteena on lisätä tuottavuutta vähentämällä hukkaa. Tämä saavutetaan optimoimalla työpaketit ja tiimikoot halutun tuotantonopeuden mukaan. Tahtiajan suunnittelu on osoittanut vähentävän työryhmien arvoa lisäämätöntä aikaa. Tämä vähennys saa työntekijät tuottamaan enemmän lyhyemmässä ajassa, mikä pienentää rakennuskustannuksia. Käytännössä tahtiaikasuunnittelua suoritettaessa on kuitenkin tehtävä laajat suunnitelmat yhteistyössä alihankkijoiden kanssa, jotta prosessi sujuisi mahdollisimman sujuvasti. Tämä yhdessä rakennusvaiheen suunnitelmien seurantaan käytetyn ajan kanssa vie aikaa ja voi olla kallista (Vatne and Drevland, 2016). Tahtiaikasuunnittelu on siis menetelmä rakentamisen tuotantoaikataulun tahtiajan luomiseen (Frandsen *et al.*, 2013). Tahtiajan suunnittelu (eng. Takt Time Planning, TTP) määritellään seuraavan kuuden vaiheen kautta: tiedon kerääminen, työalueiden määrittely, tehtäväjärjestyksen ymmärtäminen, työnkulun tasapainottaminen, yksittäisten tehtävien kestojen ymmärtäminen ja tuotantosunnitelman laatiminen.

Ensimmäinen vaihe on tiedon kerääminen, jossa tunnistetaan tuotannon jokainen vaihe tutkimalla, mitä työtä on tehtävä ja missä se on tehtävä. Toinen vaihe on työalueiden määrittely. Työalueet ovat alueita, joilla tehtäviä suoritetaan. Tavoitteena on tunnistaa paikat, joissa eri tehtävät voidaan suorittaa samassa ajassa. Kolmas vaihe on tehtäväjärjestyksen ymmärtäminen. Tässä vaiheessa pyritään luomaan yksityiskohtaiset tiedot siitä, ketkä työskentelevät alueella, missä järjestyksessä ja kuinka monen ammattiryhmän täytyy alueella työskennellä. Neljännessä vaiheessa, työnkulun tasapainottamisessa, pyritään luomaan työnkulku, jossa kaikki tehtävät valmistuvat samassa ajassa. Kyseisessä vaiheessa hyödynnetään myös seuraavaa vaihetta, joka on yksittäisten tehtävien kestojen ymmärtäminen. Lopuksi, kun tehtävien kesto ja työnkulku ovat tasapainossa, tuloksena on viimeinen vaihe: tuotantosunnitelman luominen. Tässä vaiheessa tunnistetaan tahtiaika, ja luodaan suunnitelma siitä, milloin ja missä kukin tehtävä on suoritetaan (Frandsen *et al.*, 2013).

Tahtisuunnittelun ja tahtiohjauksen (eng. Takt Planning and Takt Control, TPTC) esittelivät Dlouhy *et al.* (2016). Tässä menetelmässä tahtituotantoa tarkastellaan kolmella tasolla: makrotaso, normitaso ja mikrotaso. Makrotaso analysoi prosessia. Tavoitteena on luoda suunnitelma, jossa määritellään prioriteetit asiakasarvon kannalta. (Dlouhy *et al.*, 2016) Osapuolten yhteistyön tulisi alkaa tältä tasolta tuotannon yhteisen vision saavuttamiseksi. Makrotaso siis määrittelee ja optimoi rakennusvaiheet ja luo

projektille rakenteen. Seuraava taso, normitaso, on tahtisuunnittelua. Tämä taso hyödyntää makrotasolla tehtyä projektirakennetta. Normitasossa tunnistetaan kunkin työpaketin prosessin vaiheet. Tämän jälkeen työtä tasapainotetaan määrittelemällä kuhunkin työpakettiin tarvittava määrä työntekijöitä. Tämän seurauksena normitaso luo suunnitelman, jossa esitetään tasapainotetut työpaketit ja niiden esiintymispaikat. Viimeinen taso on mikrotaso, joka on tahdin säädin. Mikrotaso asettaa normitasolle suunnitellut työpaketit tahtiaikakehykseen. Tämä taso tulisi toteuttaa yhdessä alihankkijoiden kanssa ja rakentamisen johtamisen tulisi tapahtua tahtitilakokouksissa. Tahtitilakokoukset ovat lyhyitä tapaamisia, joissa kaikki työntekijät tapaavat vastaavan työnjohtajan, ja käyvät yhdessä läpi tahtiaikataulua. (Dlouhy *et al.*, 2016)

Jotta erilaiset suunnittelukonseptit toimisivat hyvin tietyn hankkeen kanssa, Bølviken *et al.* (2015) ehdottavat kriteerejä, jotka tahtituotantoprojektin kuuluu täyttää. Ne on jaettu kolmeen kategoriaan: tehtäviin, ajankäyttöön ja tilankäyttöön. Tehtävien pitäisi olla mahdollisimman itsenäisiä, ja kaikki edellytykset niiden toteuttamiseen pitäisi olla tunnistettuna. Ajankäyttöä ajatellen loogisuus ja oikea järjestys on tunnistettava, ja työn keston tulee olla reunaehtojen mukainen. Tilankäytön suhteen hankkeessa tulee olla hyvä vyöhykejako sopivalla rakentamisen ohjauksella, jossa vain yksi ammattikunta kerrallaan työskentelee vyöhykkeellä. Mikäli nämä kolme kriteeriä täyttyvät, voidaan olettaa, että tahtisuunnittelu toimii hyvin. (Bølviken *et al.*, 2015)

Eräs räikeä ongelma rakentamisen tahtituotantoa koskevissa julkaisuissa on se, että nykyinen julkaistu tutkimus perustuu lähes pelkästään vuosittain julkaistaviin konferenssipapereihin. Tahtituotannon suunnittelua koskevat tiedot ovat hajallaan lukuisissa lyhyissä teksteissä, useilta kirjoittajilta. Joissain tapauksissa tiedot ovat myös epämääräisiä. Tämän seurauksena tahtisuunnittelun ymmärtäminen yhtenäisenä menettelynä on haastavaa. Tämä tekee myös synteessin muodostamisesta olemassa olevasta kirjallisuudesta haastavaa. (Keskiniva *et al.*, 2020)

2.1.5 Tahtituotanto käytännössä

Tahtisuunnittelun ja tahtiohjauksen ideana on tuoda arvon luomiseen tarvittavat prosessit yhtenäiseksi ja johdonmukaiseksi virtaukseksi. Käytännössä täydellisen yhtenäisyyden ja johdonmukaisuuden saavuttaminen on mahdotonta, ja sen vuoksi tahtijärjestelmä sovitetaan tahtiajan mukaisesti. Mitä hienojakoisempi tahtiaika valitaan, sitä suurempi yhtenäisyys saavutetaan ja sitä paremmin järjestelmää voidaan ohjata. Valmistavassa teollisuudessa tahtiaika määritetään yleensä sekunneissa tai minuuteissa (Haghsheno *et al.*, 2016), mutta rakennusteollisuudessa käytetään päiviä tai viikkoja. Työmaaympäristössä tahtituotanto toteutuu siis esimerkiksi niin, että tahtiaikana on yksi päivä. Päivän aikana tiimi työskentelee samassa sijainnissa, esimerkiksi kylpyhuoneessa tai huoneistossa. Samat tehtävät toistetaan seuraavana päivänä uudessa sijainnissa. Työpakettien kestäessä keskenään yhtä kauan, saadaan tuotannon virtaus tehokkaaksi, jolloin laatuongelmat paljastuvat välittömästi ja hankkeiden läpimenoaika lyhenee. (Aalto-yliopisto, 2019) Lean -ajattelun näkökulmasta tavoitteena on pienentää läpimenoaikaa (Binninger *et al.*, 2017), ja parhaissa rakennuskohteissa sisävalmistustöiden läpimenoajoista on saatu 30-50 prosenttia poistettua. (Rakennuslehti, 2019)



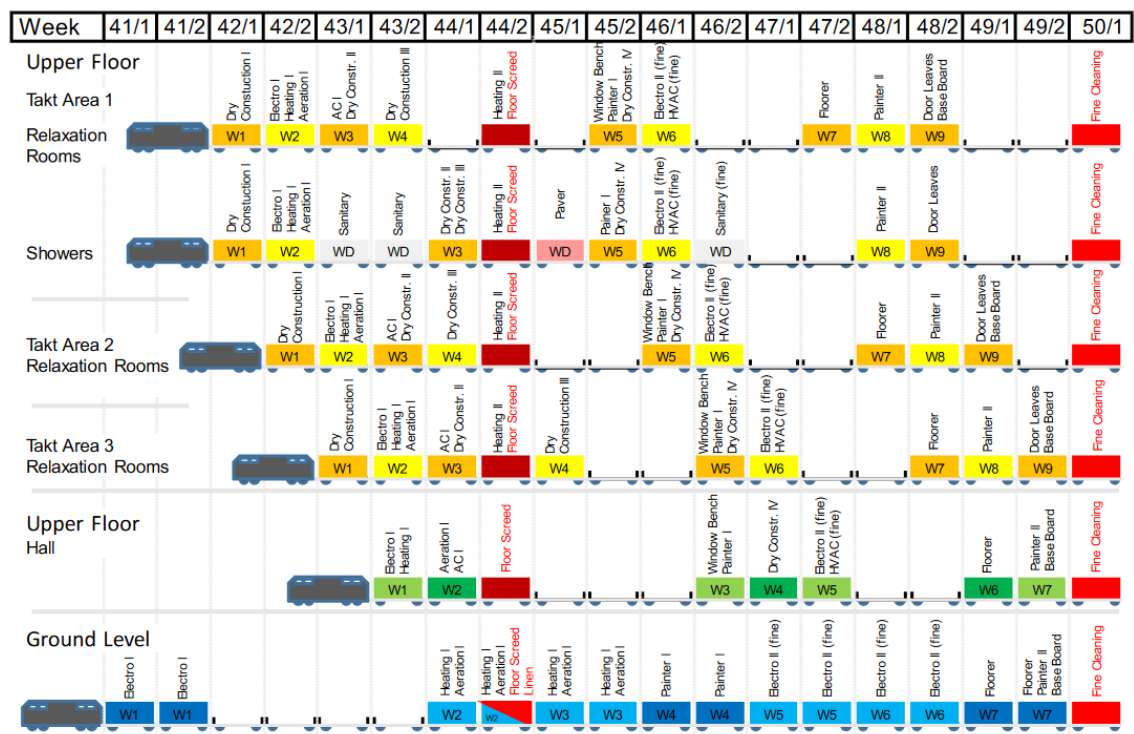
Kuva 3: Tahtiaikataulu (Rakennuslehti, 2019)

Ensisijaisia tahtisuunnittelun parametreja ovat tahtialueet, tahtivaunut, eli työpaketit, jotka voivat sisältää useita toimintoja jopa eri ammattiryhmien välillä, jos ne eivät häiritse toisiaan, ja tahtiaika, jossa työpaketti tulee suorittaa tahtialueella. (Binninger *et al.*, 2017) Prosessia, jossa tahtivaunut kulkevat alueiden läpi samalla kun prosessi etenee alueilla tahtiajan mukaisesti kutsutaan tahtijunaksi (Kuva 5) (Dlouhy *et al.*, 2016). Käyttämällä tahtialueita, tahtivaunuja ja tahtiaikaa suunnitteluparametreina saavutetaan enemmän joustavuutta muihin sijainteihin perustuviin tekniikoihin verrattuna, mikä mahdollistaa vakaamman virtauksen erityisesti ei-toistuvissa olosuhteissa (Tommelein, 2017). Jos

tahtivaunujen lukumäärä, tahtialueet sekä tahtiajan määrä ovat tiedossa, kokonaistuotannon kesto voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Binninger *et al.*, 2018):

$$\text{Kokonaiskesto} = (\text{Tahtivaunujen lukumäärä} + \text{Tahtialueiden määrä} - 1) * \text{Tahtiaika}$$

Kaavasta johtuen voidaan todeta, että rakentamisaika riippuu tahtialueiden, tahtivaunujen ja tahtiajan määrästä, jossa tahtiajalla on huomattavasti suurempi vaikutus rakentamisaikaan kuin tahtialueiden tai tahtivaunujen lukumäärällä. Kun työntekijöiden määrä on vakio, tahtiajan ja tahtialueiden koko ovat suoraan riippuvaisia toisiinsa. Tahtialueiden koot määrittävät myös tahtialueiden määrän. Tästä johtuen tahtiaikaa voidaan lyhentää vähentämällä tahtialueiden kokoa. Pienentämällä tahtialueiden kokoa niiden määrää lisätään. Käytännössä työmailla käytetään vaihtelevia tahtiaikoja. Yleisesti rakentamisessa käytetään tahtiaikana yhtä työviikkoa, mutta esimerkiksi lyhytkestoisissa projekteissa tahtiaikana voidaan käyttää yhtä päivää. (Binninger *et al.*, 2018)



Kuva 4: Tahtiaikataulu ja tahtijunat, tahtiaikana yksi viikko (Binninger *et al.* 2017)

Joustavat suunnitteluparametrit mahdollistavat myös tehokkaat muutokset eräkokoihin. Jos esimerkiksi tahtialueiden määrä kaksinkertaistuu ja samalla tahtiaika puolitetaan, erän koko puolitetaan, ja vaikka tehtävien suorittamiseen kuluva aika ei muutu, kokonaiskesto lyhenee. Lyhentyneen kokonaiskeston lisäksi eräkoon pienentäminen voi

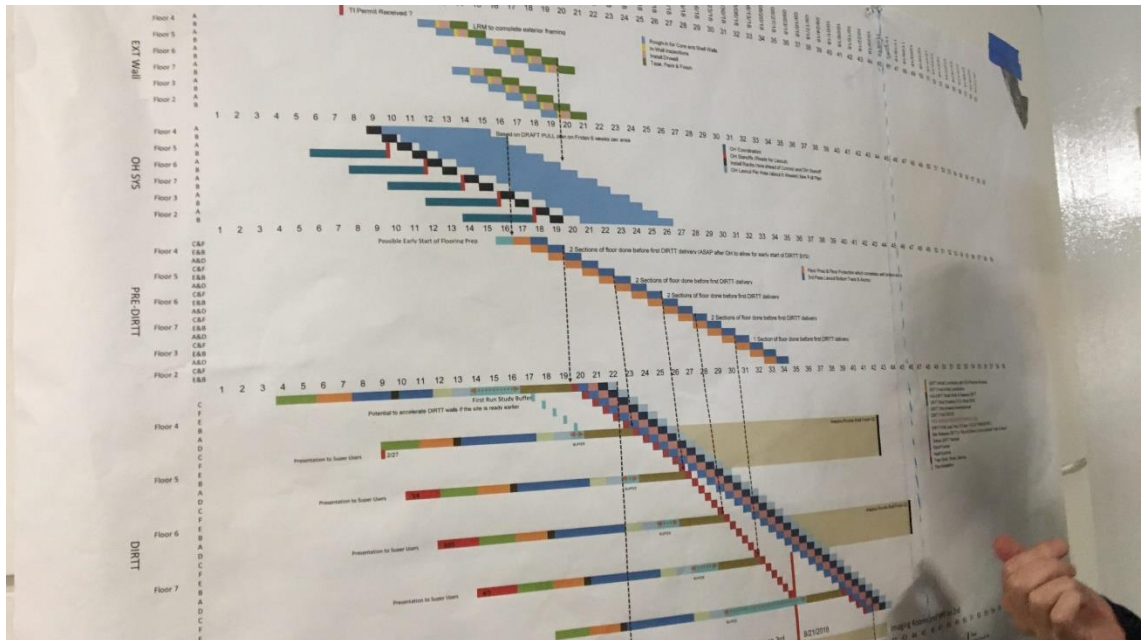
mahdollistaa prosessin paremman hallinnan ja läpinäkyvyyden (Kuva 6). Eräkoon ja puskureiden pienentäminen kuitenkin lisää valvontatyötä ja voi aiheuttaa ongelmia, jos tuotannon vaihtelu on suurta. (Haghsheno *et al.*, 2016) Tahtivaunuja suositellaan alikuormitettavaksi 70–80 %:n kapasiteetille, ja jos työ valmistuu ajallaan, ammattiryhmät voivat käyttää ylikapasiteettiaan työskentelemällä ruuhka-alueilla, varautumalla muutoksiin tai jatkuvaan parantamiseen. (Frandsen *et al.*, 2013) Ylimääräisiä aikapuskureita varataan aikataulun loppuun, ja ne voidaan tarvittaessa sijoittaa tahtivaunujen väliin suojaamaan prosessivirtausta, jos vaihtelun negatiivisia vaikutuksia ei voida torjua muilla puskureilla. (Dlouhy *et al.*, 2016)



***Kuva 5: Kaksi eri ammattiryhmää työskentelemässä samalla tahtialueella.
(Kujansuu *et al.*, 2020)***

Tuotannonohjauksen valmistelu koostuu johtamisroolien ja ohjausmenetelmien määrittämisestä. Suunnitteluvaiheesta ohjausvaiheeseen siirryttäessä työskentelyn edellytyksiä hoidetaan aktiivisesti, jotta tuotanto käynnistyy kunnolla. Tuotannonohjaus

itsessään keskittyy lyhytkestoiseen ohjaukseen päivittäisten tapaamisten kautta, sekä prosessin mittaamiseen, projektin edistymistiedoista oppimiseen ja jatkuvaan parantamiseen tarkkailun kautta. Oleellista on, että tuloksia havainnollistetaan kaikille projektin osapuolille korkealaatuista visualisointia käyttäen (Kuva 7). (Haghsheno *et al.*, 2016)

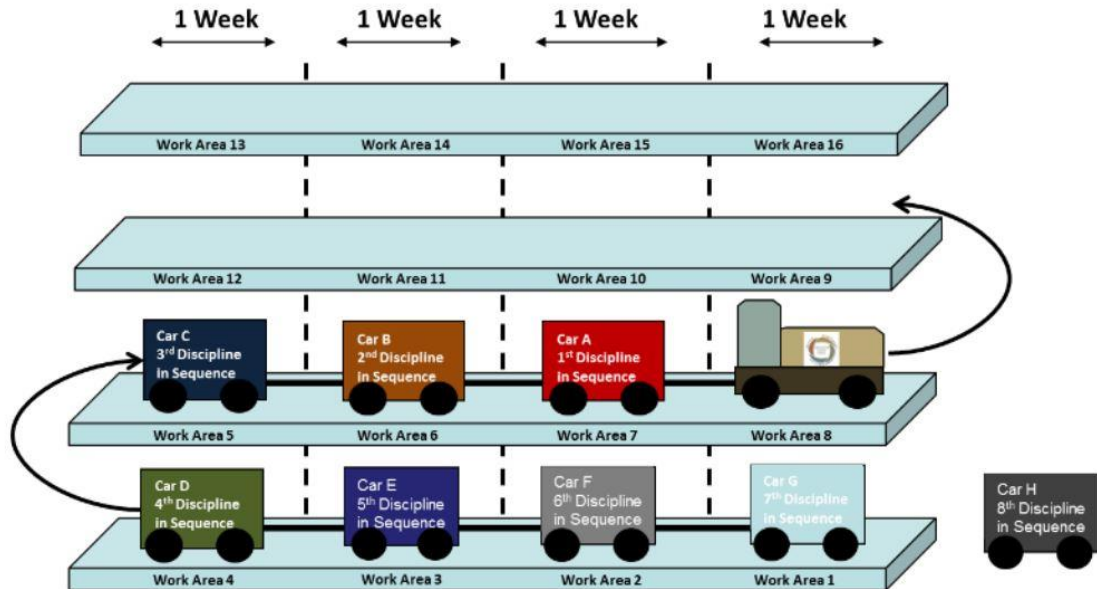


Kuva 6: Tahtituotantoaikataulu visualisoituna (Rakennuslehti, 2019)

Tahtituotannossa päivittäisjohtaminen on korostetussa asemassa, koska kaikki työvaiheet, jotka kulkevat tahdissa, ovat kriittisiä, ja niiden viivästyminen vaikuttaa suoraan niitä seuraaviin tehtäviin. Töiden sujuvien edellytysten luominen on keino tuottavuuden lisäämiseksi. Edellisestä vaiheesta syntyviä esteitä tekemiselle on vältettävä. Aliurakoitsijoiden näkökulmasta tahtituotanto nähdään pääosin positiivisena. Aliurakoitsijoiden halu ja kyky sitoutua sovittuihin aikatauluihin on keskeistä, joten motivointi on toteutettava lisäämällä oppimista ja ymmärrystä tai sopimuksilla. Aliurakoitsijoille on pystyttävä osoittamaan, että koska tahtituotannolla työt sujuvat vähemmällä häiriöllä, he tienaavat paremmin. Kommunikaatio työmaalla on myös helpompaa, sillä yhteisesti tahdistetut työryhmät työskentelevät lähellä toisiaan, ja pystyvät näin kommunikoimaan paremmin keskenään. (Rakennuslehti, 2019)

Tahtituotantoa on käytetty toistaiseksi melko vähän asuntotuotannossa. Tahtituotannon ollaan kuitenkin havaittu soveltuvan monenlaiseen rakentamiseen. Kaliforniassa tuotantomallia on sovellettu sairaalaprosjekteissa (Frandsen and Tommelein, 2016), jotka ovat luonteeltaan haastavia ja joissa toistuvuutta on vähän. Saksassa tahtituotantoa on käytetty autotehtaiden rakentamiseen, jossa tahtituotannon käyttöä perusteltiin matalilla kustannuksilla vaihtoehtoihin verrattuna ja mahdollisimman nopealla tehta

käyttöön otolla investointipäätöksen jälkeen. (Aalto-yliopisto, 2019) Tahtituotantoa ollaan myös käytetty laivahyttien korjausrakentamisessa menestyneesti (Heinonen and Seppänen, 2016).



Kuva 7: Visualisointi Kalifornialaisen sairaalahankkeen tahtiajattelusta. Sairaalan kerrokset ovat jaettu alueisiin, joissa jokainen urakoitsija työskentelee viikon. (Rakennuslehti, 2019)

Rakennuslehden (2019) mukaan tahtisuunnittelun haasteita ovat aikataulujen tiukkuus ja niissä pysyminen, epäselvä tahtialuejakojen, puskurien ja tahtijunien suunnittelu, suunnitelmapuutteet ja käyttäjämuutokset sekä tahtitiedon vieni työntekijöille asti. Tahtihjauksen haasteina ollaan havaittu oman organisaation ymmärrys tahdistusta, materiaalihankinnat, tahditettujen alueiden luovutuksen ja vastaanoton hankaluus, tuottavuuden seuraaminen, työn tasaisuus ja työtehtävien valmiiksi saaminen tahdissa. Suunnittelun pullonkaulana on havaittu tilaajan ja suunnittelijoiden sitoutumattomuus tahtituotantoon. Kriittisiä ongelmia ovat suunnitelmien puutteet ja suunnitelmamuutokset käyttäjien tekeminä. Suunnitelmien ajantasaisuuden puute aiheuttaa sen, ettei työvaiheitakaan voida toteuttaa. Tilaajan on oleellista ymmärtää, että muutoksia tahtituotannossa muutoksia ei voida tehdä milloin vaan. Merkittävänä haasteena on havaittu myös ulkoisen variaation aiheuttamat ongelmat. Esimerkiksi märästä kesästä johtuva rungon hidas kuivuminen on ollut esteenä tahdin toteutumiselle. (Rakennuslehti, 2019)

2.2 Logistiikka

2.2.1 Logistiikan perusteet

Logistiikka on materiaalien hankintaa, siirtoa ja varastointia sekä niihin liittyviä tietovirtojen hallintaa kannattavuuden maksimoimiseksi kustannustehokkaalla tilausten toteuttamisella (Christopher, 2011). Rakennusalalla edistykselliset logistiikkaratkaisut ovat saamassa suosiota paitsi materiaalivirran optimointiin, myös tuottavuuden ja kokoonpanotoiminnan sujuvuuden parantamiseen paikan päällä (Seppänen and Peltokorpi, 2016). Tutkimukset osoittavat myönteisiä tuloksia erilaisia logistiikkaratkaisuja käytettäessä rakentamisessa, kuten kokoonpanosarjojen käyttö logistiikkakeskuksissa ja toimitus JIT:a käyttäen (Tetik *et al.*, 2019). Myös reaaliaikainen materiaaliseuranta ja paikan päältä ostaminen tuovat myönteisiä tuloksia (Tanskanen *et al.*, 2015). Oikean logistisen ratkaisun ottaminen käyttöön voi lyhentää rakentamisaikaa, pienentää projektin kokonaiskustannuksia, säästää työntekijöiden aikaa työmaalla ja vähentää varastointitarvetta, mikä johtaa säästöihin (Knaack *et al.*, 2011). Logistiikkaresurssien onnistunut käyttö paikan päällä estää työn tehottomuutta ja lisää siten työmaaresurssien käyttöä (Sundquist *et al.*, 2018).

Logistiikka muodostaa suuren osan rakennusprojektin kokonaiskustannuksista. Toisin kuin muilla toimialoilla, suurin osa rahoista kuluu paikan päällä materiaalien käsittelyyn, eikä kuljetuksiin projektin ulkopuolella. Tämä tekee paikan päällä tapahtuvasta logistiikasta erittäin tärkeän kehittämisalueen urakoitsijoille (Seppänen and Peltokorpi, 2016). Logistiikan on tarkoitus palvella työmaan rakennusprosessia. Logistiikan toimivuutta tulee mitata seuraamalla työnvirtausta ja tuottavuutta, ei siis pelkästään materiaaliprosessia. Logistiikka on onnistunutta, jos oikea materiaali on käytössä oikealla hetkellä, siten ettei ylimääräinen materiaali häiritse asennustyötä. On lisäksi vältettävä sitä, että materiaalit siirtyvät työmaalla useaan kertaan. Lisäksi toimitustavoissa on vältettävä materiaalien noutamista, jolloin työntekijöiden työaikaa vapautuu enemmän tuottavaan työhön. Logistiikan kokonaisratkaisun tulee kattaa kaikki tuotetyypit ja sen pitää hyödyntää joustavasti erilaisia toimituskanavia ja kehittyneitä logistiikkamenettelyjä. Logistiikan kokonaisratkaisun tulisi olla liiketoimintayksikkötasolla skaalautuva, ei joka projektissa räätälöintiä vaativa ratkaisu. Lisäksi sen tulisi hyödyntää mahdollisimman paljon olemassa olevaa suunnittelu- ja tuotetietoa (Peltokorpi *et al.*, 2019).

Seppänen & Peltokorpi (2016) mukaan rakentamisen erilaisten logististen ongelmien ratkaisemiseksi on ehdotettu tutkimuskirjallisuudessa monenlaisia ratkaisuja. Yleisimmin

ehdotettu ratkaisu on keskitetyt logistiikkakeskukset, joissa tuotetaan setitys sisäisesti. Tutkimuksissa korostuvat aikataulujen parantamisen tarve ja JIT-toimitusten käyttö. Usein ehdotetaan digitaalisia työkaluja, kuten simulointia tai optimointia, verkkopohjaisia logistiikan järjestelmiä tai rakentamisen tietomallinnukseen perustuvia ratkaisuja. Muita ratkaisuja ovat erillisen logistiikkayrityksen käyttö, standardoinnin tai esivalmisteiden lisääminen sekä menetelmät materiaalivaraston tai turvallisuusvaraston mitoittamiseksi optimaalisesti (Seppänen and Peltokorpi, 2016). JIT -toimituksilla voidaan hankkia ja toimittaa tilaukset varasto-ohjautuvasti lopputuotevarastosta (eng. make-to-stock) sekä tilauksesta suunniteltuna (eng. engineer-to-order).

Varasto-ohjautuvaa tuotantoa käytetään tilanteissa, joissa nimikkeiden menekit ovat suuria ja kohtuullisen hyvin ennustettavia, ja asiakkaan toimitusaikavaatimus on lyhyt. Varasto-ohjautuva tuotanto siis perustuu suunnitelmiin ja ennusteisiin perustuvaan ennakkointiin, ilman varsinaista asiakastilausta. Sen etuina on tuotannon tehostaminen tuotantomääriä tasoittamalla, mutta riski syntyy siitä, että kysyntä ei vastaa ennusteita. Varastointi sitoo pääomaa, tuo kustannuksia ja on riskitekijä. Kysynnän suunnittelu- ja ennusteprosessin on siis oltava toimivaa, ja lopputuotevaraston tehokkaalla ohjauksella vältetään turhan korkeita kustannuksia, pääoman sitoutumista ja minimoidaan esimerkiksi tuotteiden pilaantumista. (Logistiikan Maailma)

Tilauksesta suunniteltaessa tuote valmistetaan asiakkaan tilaukseen pohjautuen, ja tilaukseen liittyy tuotesuunnittelua valmistamisen lisäksi. Lopputuotevarastoa ei käytetä, sen sijaan varastot tuotannossa ovat materiaalia, komponentteja ja osia, sekä keskeneräistä tuotantoa. Tuotanto voi myös hankkia tarvittavat materiaalit asiakastilauksen mukaan, jolloin tuotanto voi toimia materiaalivarastoitta. Tilauksesta suunnittelua käytetään tyypillisesti silloin, kun tarvitaan juuri asiakkaalle valmistettu tuote. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi tilanteet, joissa tuotteisiin vaaditaan räätälöityä toiminnallisuutta, tai jos tarvitaan laitteistoja, joita mitoitetaan tarkan käyttökohteen mukaan. Tilauksesta suunniteltaessa toimitusajat asiakkaalle ovat pidemmät kuin muissa tuotantotavoissa, mutta tarjottu tuote vastaa paremmin asiakkaan tarpeisiin tuotevarianttien määrän ollessa teoreettisesti ääretön. Varastointiin liittyvät kustannukset ja riskit ovat tyypillisesti pienempiä kuin muissa tuotantomuodoissa. (Logistiikan Maailma)

2.2.2 Logistiikkakeskus

Logistiikkakeskus on logistiikkaketjun materiaalivirtojen keskipiste. Siten se tarjoaa pääsyn eri kuljetusmuotoihin, suorittaa laajoja logistisia toimintoja, palvelee laajaa

käyttäjäkuntaa, käyttää tietoteknisiä ratkaisuja ja tarjoaa lisäarvopalveluita. Logistiikkakeskus toimii impulssina liiketoiminnan ja talouden kehitykselle. Koska kaikki yritykset eivät pysty rakentamaan omia logistiikkakeskuksiaan tai hankkimaan uusimpia tukiteknikoita (ohjelmistot, radiotaajuustunnistusjärjestelmät, reaaliaikainen viestintäverkko jne.) ja johtamistaitoja, logistiikkakeskukset tarjoavat näitä palveluita ilman lisäriskejä tai infrastruktuurikustannuksia (Meidutė, 2010).

Rakentamisen logistiikkakeskukset voivat tukea useita logistiikkatoimintoja, kuten varastointia, kuljetusta, jakelua ja varustelua (Hamzeh *et al.*, 2007). Ne mahdollistavat JIT -toimitukset rakennustyömaille ja suojaavat toimintaa alkamispäivien ja kestojen vaihtelua varten (Hamzeh *et al.*, 2007) Logistiikkakeskusten suuri mahdollisuus on mahdollisuus valmistaa paikkakohtaisia toimituspaketteja eli setityksiä, jotka voidaan toimittaa asennuspaikalle tuottavuuden lisäämiseksi (Elfving *ym.* 2010).

Logistiikkakeskukset voidaan konfiguroida tarjoamaan monenlaisia toimintoja. Näitä ovat muiden muassa varastointi, kuljetus, jakelu, kokoonpano, suora lähetys, lastien yhdistäminen, lajittelu, jakeluverkoston hallinta ja ajoneuvojen reititys, toimitus, toimitusten seuranta ja sähköisen kaupankäynnin palvelut (Hamzeh *et al.*, 2007). Yhtä tai useampaa näistä toiminnoista voidaan käyttää logistiikkakeskuksessa tietyn toimitusketjun vaatimusten täyttämiseksi.

Varastointi logistiikkakeskuksessa voi alentaa toimitusketjun kustannuksia varastokustannusten pienenemisen ja ostojen mittakaavaetujen ansiosta. Eri projektien kysynnän vaihtelut yhdistetään yhdeksi varastoksi, jonka kautta pystytään ylläpitämään pienempää varmuusvarastoa variaatioon vastaamiseksi. Näin varastoinventaarioiden kokonaismäärä pienenee niiden koostamisen ja yhdistämisen. (Hamzeh *et al.*, 2007)

Logistiikkakeskuksen sijainnista ja toiminnasta riippuen kuljetuskustannukset voivat olla alhaisemmat tai korkeammat riippuen saapuvien ja lähtevien kuljetuskustannusten välisestä kompromissista. Lyhyempi toimitusaika on myös mahdollinen, mutta se liittyy sijaintiin ja muihin tekijöihin. Jakelussa voidaan soveltaa erilaisia jakelumenetelmiä, kuten suoraa lähetystä tai jakelukuljetuksilla. Logistiikkakeskus voidaan suunnitella käsittelemään ja optimoimaan materiaalin jakelua kohdentamalla ajoneuvoihin materiaalipaketteja ja valitsemalla paras reitti. Logistiikkakeskukseen varastoitu materiaali voidaan toimittaa JIT -toimituksella, mikäli projekti on lähellä. (Hamzeh *et al.*, 2007)

Logistiikkakeskuksilla voi olla kyky toimittaa tilaustuotteita lyhyellä toimitusajalla. Toimitukset voidaan varustaa logistiikkakeskuksissa tilaustuotteina tehtyinä kokoonpanopaketteina eli setityksinä. Lisäksi logistiikkakeskusten avulla voidaan

muuntautua suunnitelmamuutosten myötä tuleviin muutoksiin, mikä vähentää rakentamisessa esiintyvien muutosten haitallisia vaikutuksia. Toisaalta mahdollisesti alennettuun hintaan irtotavarana tilattu materiaali voidaan erottaa logistiikkakeskuksessa, lajitella ja toimittaa sitten määrättyyn projektiin. Myös eri toimittajilta tulevat materiaalit voidaan yhdistää ja lähettää sitten tiettyyn projektiin. Tietojärjestelmien (esim. radiotaajuustunnistus tai RFID) avulla logistiikkakeskus voi seurata materiaalin ja ajoneuvojen tilaa koko toimitusketjussa. Tämä voi lisätä toimitusvarmuutta, kun on kyse materiaalitylityksistä ja JIT -toimituksista. (Hamzeh *et al.*, 2007)

Verkkokauppa tuo lisäarvoa korvaamalla fyysiset paperienkäsittelykäytännöt, kuten tilaukset, sähköisillä käytännöillä, mikä vähentää kustannuksia ja aikaa. Kun logistiikkakeskus on varustettu tarvittavilla tietojärjestelmillä, se voi soveltaa verkkokauppal palveluita, kuten myyjän hallinnoimaa varastoa, lyhentääkseen läpimenoaikoja ja -kustannuksia samalla kun se lisää toimitusketjun luotettavuutta. (Hamzeh *et al.*, 2007) Materiaalien ja palveluiden tarjonnan vaihtelut vaikuttavat rakennusprojektien etenemiseen kapasiteetin, markkinatilanteen, toimitusaikojen, tuotteiden saatavuuden, toimitusten läpimenoajan jne. vaihteluiden vuoksi. Lean-tekniikoiden, kuten Last Planner -järjestelmän, käyttö voi lisätä kysyntäennusteen luotettavuutta. Toimintojen alkamiseen, etenemiseen ja loppuunsaattamiseen vaikuttavat rajoitteet analysoidaan useita viikkoja ennen suunniteltua aloituspäivää niiden tilanteen varmistamiseksi, mikä suojaa rakennustoimintaa vaihteluilta. (Ballard, 1997)

Logistiikkakeskuksen roolin ja vaikutuksen selvittäminen rakentamisen toimitusketjuissa on hyödyllistä rakennusyrittäjille, jotka pyrkivät parantamaan toimitusketjun hallintakäytäntöjään. Rakennusteollisuudelle on ominaista resurssien, kuten materiaalien, laitteiden ja palveluiden, tarjonnan ja kysynnän suuret vaihtelut, mikä asettaa haasteita logistiikkaverkostolle. Epävarmuus heikentää toimitusketjun tehokkuutta ja reagoitokykyä. Se aiheuttaa tarjonnan ja kysynnän epäsuhdan, mikä johtaa pidentyneisiin läpimenoaikoihin, resurssien vajaakäyttöön, lisääntyneisiin toimitusketjun kustannuksiin ja tyytymättömiin asiakkaisiin. (Hamzeh *et al.*, 2007)

2.2.3 Toimitusketjut

Toimitusketju on kokonaisprosessi palveluiden ja tuotteiden toimittamiselle asiakkaille. Toimitusketju on organisoitu toimintojen sarja, joilla hallitaan materiaalien, informaation ja rahan virtausta hankintapaikasta loppukäyttäjille. Toimitusketjuprosessiin kuuluu

hankinta, tuotanto ja jakelu. Toimitusketjussa on siis useita toimijoita, kuten valmistajia, jalostajia, raakamateriaalin toimittajia, kuljetusliikkeitä ja loppukäyttäjiä. Toimitusketju on siis useiden yritysten muodostama kokonaisuus, jota koordinoidaan yhtenä kokonaisuutena (Skjott-Larsen *et al.*, 2007).

Rakennusprojekteissa materiaalilogistiikka eli toimitusketjut koostuvat usein eri toimijoiden tuottamasta koordinoimattomasta ja erillisestä toimitusprosessista. Pääurakoitsijan näkökulmasta tällainen toimintatapa on vaikeasti hallittava ja tehoton. Logistiikan hallinta työmaalla on tärkein osa toimitusketjua pääurakoitsijan näkökulmasta. Kun työmaalogistiikka toteutetaan rakennusprojektissa laadukkaasti, voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä kustannuksissa ja aikataulussa. (Vrijhoef and Koskela, 2000)

Toimitusketjun hallinnalla (TKH) pyritään hallitsemaan toimitusketjuja mahdollisimman tehokkaasti. Vrijhoef & Koskela (2000) mukaan rakentamisen toimitusketjun hallinnassa voidaan tunnistaa neljä pääroolia riippuen siitä, onko painopiste toimitusketjussa, rakennustyömaalla vai molemmissa.

Ensinnäkin painopiste voi olla toimitusketjun vaikutuksissa toimipaikan toimintaan. Tavoitteena on vähentää toiminnan kustannuksia ja kestoja. Tässä tapauksessa ensisijaisena tavoitteena on varmistaa luotettavat materiaali- ja työvoimavirrat työmaalle työnkulun häiriöiden välttämiseksi. Tämä voidaan saavuttaa yksinkertaisesti keskittymällä toimipaikan ja suorien toimittajien väliseen suhteeseen. Urakoitsija, jonka pääasiallinen kiinnostus on työmaatoiminta, on parhaimmassa asemassa omaksuma tämän painopisteen. Toiseksi painopiste voi olla itse toimitusketjussa tavoitteena vähentää kustannuksia, erityisesti logistiikkaan, toimitusaikaan ja varastoon liittyviä kustannuksia. Myös materiaali- ja komponenttitoimittajat voivat omaksua tämän painopisteen. (Vrijhoef and Koskela, 2000)

Kolmanneksi painopiste voi olla toimintojen siirtämisessä toimipaikasta toimitusketjun aikaisempiin vaiheisiin. Tämän syynä voi olla yksinkertaisesti huonojen olosuhteiden välttäminen työmaalla tai laajemman samanaikaisuuden saavuttaminen toimintojen välillä, mikä ei ole mahdollista työmaan rakentamisessa monien teknisten riippuvuuksien kanssa. Tavoitteena on jälleen vähentää kokonaiskustannuksia ja kestoja. Toimittajat tai urakoitsijat voivat omaksua tämän. Neljänneksi painopiste voi olla toimitusketjun ja työmaatuotannon integroidussa hallinnassa ja parantamisessa. Siten paikkatuotanto sisällytetään toimitusketjun hallintaan. Asiakkaat, toimittajat tai urakoitsijat voivat omaksua tämän painopisteen. (Vrijhoef and Koskela, 2000)

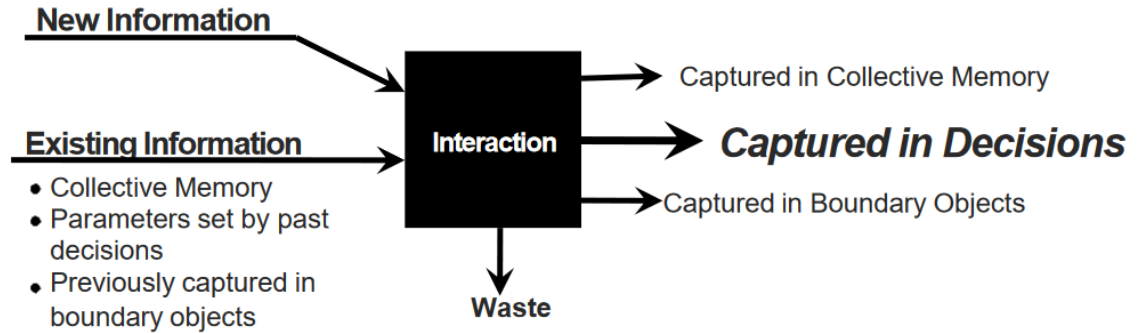
Koskela ja Leikas (1997) havaitsivat tutkimuksessa, jossa käsiteltiin lean-tuotannon toteuttamista rakentamisen komponenttien valmistuksessa, että rakentamisen komponenttitalouksia on taipumus tehdä puutteellisilla suunnittelutiedoilla. Suunnittelutiedon kannalta suunnitteluasiakirjat ovat usein riittämättömiä ja vaikeita asioita ei käsitellä yksityiskohtaisesti. Muutokset johtuvat puutteellisista, myöhästyneistä, vääristä ja epätäydellisistä tiedoista, eikä niistä usein kommunikoida (Vrijhoef and Koskela, 2000).

2.3 Tiedonkulku

2.3.1 Tiedonkulun perusteet

Tiedonkulku vaatii neljä komponenttia: aloituspiste (lähde), päätepiste (vastaanotin), polku (vuorovaikutus) ja liikkeellepaneva voima (relevanssi). On kahdenlaisia olioita, jotka voivat toimia tiedon lähteinä tai vastaanottajina; ihmiset ja rajakohteet eli työkalut, kuten piirustukset, raportit, rakennustietomallit ja muut asiakirjat, jotka mahdollistavat viestinnän ihmisryhmien välillä. (Phelps, 2013) Ihmisroolin tiedonkulussa määrää hänen sopimuksellinen roolinsa, tekninen roolinsa ja sosiaalinen roolinsa projektin sisällä. Nämä roolit määrittävät, minkä tyyppistä tietoa henkilöltä odotetaan, minkä tyyppistä tietoa henkilö voi tarjota, kuinka tiedot jaetaan ja miten ne vastaanotetaan. Rajakohteet vaikuttavat tiedonkulkuun rakenteensa kautta, mikä vaikuttaa tiedon tyyppiin, tiedon rikkauteen sekä tiedon talteenotto- ja käyttöprosessiin. (Phelps, 2013)

Vaikka hankkeessa mukana olevien ihmisten ja esineiden ominaisuudet luovat mahdollisuuden tiedonkulkuun, se ei takaa, että saatavilla oleva tieto todella sisällytetään projektiin. Näiden entiteettien välinen vuorovaikutus päättää tiedon kohtalon. Vuorovaikutustyyppien perusteella tiedot voidaan joko hyväksyä, hylätä tai jättää huomiotta. (Phelps, 2013) Kuvassa [9] on esitetty vuorovaikutuksen vaikutuksia informaation kulkuun. Sillä, muuttuuko tiedosta hukkaa, taltioidaanko se hiljaisena tietona tai eksplisiittisesti, vai otetaanko se osaksi päätöksentekoa, on suuri merkitys projektille. Siksi kuvan [9] "mustan laatikon" sisällä tapahtuvan vuorovaikutuksen ymmärtäminen on ratkaisevan tärkeää tiedonkulun ja monimutkaisten projektien yleisen laadun parantamiseksi.



Kuva 8 Vuorovaikutuksen vaikutus informaation kulkuun (Phelps, 2013)

Vuorovaikutuksen voidaan nähdä liittyvään neljään toisiinsa liittyvään keskeiseen tekijään: Luottamukseen, sitoutumiseen, oppimiseen ja yhteisymmärrykseen. Nämä tekijät määrittävät, mitä tietoa yksilö jakaa, miten hän jakaa sitä ja miten se vastaanotetaan. Tekijät myös luovat pohjan tulevalle vuorovaikutukselle. Luottamuksella tarkoitetaan positiivisia odotuksia toisen henkilön tulevista toimista, kun yksilö on itse haavoittuvainen kyseisille toimille. Sitoutumisella tarkoitetaan yksilön vahvuutta tiettyyn organisaatioon samaistumisessa ja sen toimintaan osallistumisessa. Yhdessä nämä tekijät vaikuttavat yksilön arvoihin projektiin liittyen, kuten miten hän näkee muut projektitiimin jäsenet, miten hän näkee oman roolinsa projektissa, kuinka paljon työtä he ovat valmiita panostamaan projektiin ja heidän yhteenkuuluvuutensa ja kiinnostuksensa hanketta kohtaan. Oppiminen tapahtuu, kun uuden tiedon käsittely muuttaa yksilön mahdollisten käyttäytymismallien laajuutta. Yhteisymmärrys syntyy epävirallisesta sopimuksesta siitä, mikä on olennaista muille tiimin jäsenille ja projektille yleensä. Oppiminen ja yhteisymmärrys muodostavat yksilön henkisen mallin. Henkinen malli määrittää kuinka henkilö arvioi uutta tietoa, yhdistää uutta tietoa olemassa olevaan tietoonsa ja luokittelee ja hankkii tietoa projektia varten. (Phelps, 2012)

Jotta tieto tuo lisäarvoa projektille, on tiedon käytävä läpi kolme kriittistä vaihetta. Ensinnäkin projektitiimiin kuuluvan henkilön on jaettava tietoa. Toiseksi muiden projektitiimin jäsenten on hyväksyttävä jaettu tieto. Tiedosta, joka jätetään huomiotta tai hylätään, tulee hukkaa ja se katoaa olennaisesti projektista, ellei sitä jaeta uudelleen eri olosuhteissa. Tieto, jonka muut hyväksyvät, vangitaan hiljaisesti projektiryhmän kollektiiviseen muistiin ja voidaan valjastaa eksplisiittisesti rajakohteisiin. Tiedon hyväksyminen ei kuitenkaan itse asiassa lisää projektin arvoa. Vasta silloin, kun tieto otetaan käyttöön päätöksissä, se pystyy lopulta tuomaan lisäarvoa projektille. (Phelps, 2013) Arvo saadaan, kun tiedon avulla ihmiset ja järjestelmät voivat suorittaa toimia ja tehdä päätöksiä tehokkaasti. Siten tiedonhallinnan tarkoituksena on tarjota ja optimoida tarvittavien palveluiden soveltaminen toimitusketjuissa. Hankintaprojekteissa tiedon

hallinta on erityisen arvokasta, koska se antaa reaaliaikaista tietoa toimitusketjun jäsenyritysten päätöksenteossa. Tiedon pohjalta tehdyt päätökset voivat olla hyviä tai huonoja, mutta päätökset perustuvat suurilta osin esitettyyn tietoon. (Titus, 2005)

2.3.2 Tiedonkulku rakentamisessa

Tiedolla on tärkeä rooli rakennettavassa ympäristössä. Tieto on tärkeää paitsi hankkijalle myös kaikille hankkeeseen osallistuville toimittajille ja osapuolille. Rakennusalan hankinnat koskevat tavaroiden ja palveluiden yhdistelmää, joka on määritelty täyttämään tietyt vaatimukset ja standardit. Hankinnan peruste riippuu hankkeen erityistarpeista ja tavoitteista. Hankintaprojektissa osapuolilla on ratkaiseva rooli heille saatavan tai välitetyn tiedon perusteella. Siksi tieto on kerättävä ja viestittävä tehokkaasti asiaankuuluvien osapuolten välillä rakennusprojektin aikana. Paremmat keinot hallita tiedonkulkua lisäävät projektien tuottavuutta. Tietojen käsittelyn tehottomuus ei kuitenkaan riipu pelkästään toimialaprosessista tai käytetyistä teknologioista. (Titus, 2005)

Rakennushankkeen taloudellinen arvo riippuu sen koosta, mukana olevien yksiköiden määrästä ja etäisyyksistä. Rakennushanke voi tapahtua intensiivisessä ympäristössä, tiiviissä yhteistyössä kymmenien eri yritysten, kuten arkkitehtitoimistojen, rakennusyrietysten ja toimittajien kanssa kuukausien tai jopa vuosien ajan. Valtava määrä asiakirjoja teknisistä piirustuksista ja juridisista sopimuksista ostotilauksiin, lupiin, tarjouspyyntöihin ja aikatauluihin tulee osaksi hanketta. Rakennusala on perinteisesti hyvin prosessidonnaista ja paperi-intensiivistä. Projekteja hidastavat usein epätavalliset tai muilta toimialoilta puuttuvat työnkulkuongelmat, kuten rakennusmääräysten noudattaminen, ammattiliitto ja vallitsevat palkkahuolet sekä huono sää. Usein suurten rakennushankkeiden alihankkijat jättävät tarjouksensa riittämättömän tiedon perusteella tehottomien viestintäkanavien vuoksi. Jos ristiriitoja ei saada ratkaistua tarjoushetkellä, saattaa se myöhemmin tuoda lisäkustannuksia tilaajalle muutoksien ja lisäyksien myötä, jotka yleensä hinnoitellaan paljon korkeammaksi kuin tarjousvaiheessa. (Titus, 2005)

Rakennusyrietykselle on tyypillistä projektiluonteinen tuotanto. Lähes jokaista uutta projektia varten perustetaan uusi organisaatio, joka voidaan ymmärtää ainutlaatuisena tuotteena (Turner ja Muller, 2003). Rakennusprojektien asiakastarpeet ovat uniikkeja ja siten jokaisella niitä tarpeita vastaavalla hankkeella on omat erityispiirteensä. Rakennustyöt eivät ole käynnissä projektin ehtojen yli, ja projektia varten koottu tiimi yleensä hajoo valmistuttuaan (Titus, 2005). Hankintaprosessin aikana käsiteltävän

tiedon kokonaismäärä on huomattava, ja se usein haudataan byrokratian alle. Perinteinen lähestymistapa rakentamisen projektinhallintaan on perustunut toimintoihin, joilla seurataan kunkin alihankkijan toimintaa aikataulussa. Valmistavasta teollisuudesta opitut rakennusteollisuudessa käyttöönotetut strategiat ja tekniikat tulee hyväksyä asianmukaisin muutoksin (Ballard and Howell, 1998).

Termejä "rakennushankinta" tai "hankintaprosessi" käytetään tässä kuvaamaan prosessia, joka tarvitaan rakennusprojektin toteuttamiseen tarvittavien laitteiden, materiaalien ja muiden resurssien toimittamiseen. Toisin kuin useimmat hankintamuodot, rakennushankinnat sisältävät yleensä pitkän prosessin suunnittelusta projektin lopulliseen toimitukseen. Tämä prosessi sisältää yleensä aliprosesseja, kuten hankinta, osto, logistiikka, seuranta, laadunvarmistus ja sopimusten hallinta. Hankinnat ovat toimitusketjun avaintoimintoja, jotka liittyvät rakennustöiden suorittamiseen ja ovat kiinteä osa toimitusketjun hallintatoimintoja. Hankinnat ovat olennainen osa rakennushankkeita, ja niitä esiintyy missä tahansa projektisyklin vaiheessa, jossa tarvitaan ulkopuolisia resursseja tarvikkeiden ja palvelujen tarjoamiseen. Kaiken hankintastrategian ensisijaisena näkökohtana nähdään yleensä tarve saada rahalle ja resursseille kokonaisvastinetta laitoksen koko käyttöiän ajan. (Titus, 2005)

Rakentamisen toimitusketjun hallinta käsittelee materiaalien, tiedon ja rahavirtojen hallintaa pääurakoitsijoiden, alihankkijoiden, tavarantoimittajien ja jakelijoiden verkostossa. Näiden virtojen koordinointi ja integrointi yritysten sisällä ja niiden välillä on ratkaisevan tärkeää tehokkaassa toimitusketjun hallinnassa. Tiedon jakaminen on avaintekijä tiiviissä integraatiossa koko ketjun suorituskyvyn optimoimiseksi, ja jakamista onkin helpottanut tietotekniikan kehitys. (Lee and Whang, 2000)

Rakentamisen toimitusketjun osallistujien suuri määrä ja toimitusketjun monimutkaisuus vaikeuttavat tiedon jakamisen helpottamista. Tiedon jakamisen vaikeudet johtuvat rakentamisen luonteesta, jossa jokainen projekti on ainutlaatuinen, tilapäinen ja toimii moniorganisaationa (Koskela, 1992). Näin ollen rakennusprojektin organisointi koostuu yleensä tilapäisesti suunnitelluista ryhmistä ja niiden erilaisista yrityksistä tuottaa ainutlaatuista tuotetta. Koska jokainen tiimin jäsen ei ole välttämättä työskennellyt yhdessä aikaisemmin, on vaikeaa, vaikkakin tarpeellista, perustaa tietokanavia tiedon ja tiedon vaihtoon. Lisäksi hankkeeseen osallistuvien keskenään eriävät tavoitteet voivat toimia esteenä tiedon jakamiselle. Mitä tulee prosessikuvioihin, materiaali- ja tietovirta rakentamisessa on kietoutunut toimitusketjuihin, eikä jokainen prosessin segmentti ole kytketty tiukasti toisiinsa.

Nämä ilmiöt pidentävät tiedon läpimenoaikaa saamalla tiedonkulun pysähtymään joissakin toimitusketjun kohdissa. Toimitusketjun rakenteen monimutkaistuesssa on myös epätodennäköistä, että yksi henkilö pystyisi käsittelemään koko tieto- ja materiaalivirtaa. Rakennusprojektien hallintaan kohdistettujen teknologioiden hyödyt keskittyvät arvon tuottamiseen asiakkaille eri tavoin: ottamalla käyttöön dokumenttienhallintaa, joka mahdollistaa työnjaon arkkitehtitoimistojen, insinöörien, omistajien ja muiden urakoitsijoiden välillä, autetaan tehostamaan tarjouskilpailua ja urakoimista. Tiedon oikea-aikaista jakamista, virheiden ja hukkan vähentämistä, tiedon entistä parempaa uudelleenkäyttöä, elinkaarikustannusten alentamista ja tiedon parempaa talteenottoa ovat helpottaneet tietotekniikkaratkaisuiden käyttö rakennushankinnoissa ja projektinhallinnassa. (Titus, 2005)

Kumppaneiden välisessä tiedonkulussa tehokkuus riippuu vaaditusta käsittelystä ja kussakin kumppaniyhteyksessä tehdystä vaatimukseen tai täyttämiseen liittyvästä päätöksestä. Tehokkuus puolestaan riippuu kumppanin kyvystä tiedon vastaanottajana, päättäjänä ja välittäjänä. Vastaanotetun tiedon luonne, tehty päätös ja välitetyt tiedot liittyvät toisiinsa kunkin kumppaniyhteyksen yhteydessä. Tiedon arvoa voidaan analysoida kolmen hankkijan tavoitteet kattavan taustatekijän mukaan: laatu, aika ja hinta. Vastaanotetun tiedon laatu, sen oikea-aikaisuus ja tiedon hankinnan kustannustehokkuus määrittävät kumppanin tehokkuuden tiedon vastaanottajana. (Titus, 2005)

Tiedon epäselvyys puolestaan heikentää vastaanotetun tiedon laatua ja siten arvoa. Kun yritykset optimoivat laatu-, aika- ja kustannustehokkuustekijät tiedon hankinnassa, saadaan aikaan tehokas päätöksenteko projektikumppanien kesken. Laadukkaan ja oikea-aikaisen tiedon kustannustehokas viestintä lisää projektikumppanin arvoa tiedon välittäjänä projektin sisällä. (Titus, 2005) Organisaatiot pyrkivät kuitenkin minimoimaan tiedon käsittely- ja välittämiskustannukset (Gann, 2000).

Vaikka rakentamisprosessi poikkeaa monella tapaa valmistavan teollisuuden tuotannosta, voidaan tehdä useita johtopäätöksiä sekä toimitusketjun hallinnan teoreettisesta näkökulmasta että tiedon hallinnasta. Rakennusprojektin toimitusketju tunnistaa mukana olevat kumppanit ja heidän roolinsa tiedonkulun käsittelyssä. Hankkeen toteuttaja aloittaa hankkeen, vaatimukset eritellään ja tieto niistä jaetaan osallistuvien kumppanien kesken. Kun tiedonkulkua on harkittu, aika-, kustannus- ja laatutekijät on analysoitava kumppaniyhteyksen päättäjän kyvyn kanssa käsitellä tietoja vaatimusten ja toteuttamisen aiheuttamiseksi. Saadun tiedon laatu, sen vastaanotettavan oikea-aikaisuus ja tiedon hankinnan kustannustehokkuus määrittävät projektikumppanin tehokkuuden (Titus, 2005).

Rakennusteollisuus on perinteisesti jäänyt muista toimialoista teknologian käyttöönotossa. Viime vuosina on kuitenkin ollut paineita parantaa tuottavuutta, alentaa kustannuksia, parantaa turvallisuutta ja lisätä kestävyyttä, ja uusien teknologioiden käyttöönotto rakennusteollisuudessa on kasvanut. Erilaisten teknologioiden kehittyessä yhä useammat tutkijat ovat havainneet, että teknologia voisi olla tehokas ratkaisu rakennusprosessiin (Eliwa *et al.*, 2020). On kuitenkin tiedossa, että rakennusteollisuus epäröi edistyneen teknologian omaksumista. Kaksi pääasiallista syytä haluttomuuteen hyödyntää innovatiivisia teknologioita: epävarmuus uusien teknologioiden käytössä sekä tiedon puute teknologioista ja niiden mahdollisista hyödyistä. (Lu *et al.*, 2015)

Tiedonhallinnan ja integraation kasvava merkitys edellyttää projektien sisäistä kokonaisuutta, joka vastaa sosiaalisesta ja teknisestä integraatiosta. Integraattorin ensisijaisena tehtävänä on luoda ympäristö, joka edesauttaa luottamussuhteita ja oppimissyklejä. Tähän sisältyy yksittäisten panosten arvon korostaminen suhteessa hankkeen tavoitteisiin ja odotusten hallinta ylläpitämällä vastuullisuutta, kurinalaisuutta ja oikeudenmukaisuutta asettamalla selkeitä ja johdonmukaisia tavoitteita. Myös työryhmien jäsenten olemassa olevien henkisten mallien ymmärtäminen ja linkkien luominen niiden ja projektin välille on oleellista. (Phelps, 2013)

Jotta yksilöt voisivat toimia tiedonhallintaan liittyvissä integraattorin tehtävissä, tarvitaan heiltä taitoja ja pätevyyttä, jotka eivät kuulu perinteiseen rakentamisen johtamistaitojen ohjelmistoon. Kehitysalueita ovat Phelps (2013) mukaan:

- Laaja ja syvä tekninen tietämys – integraattorilla on oltava kokonaisvaltainen käsitys integroitavan työn laajuudesta, jotta hän voi keskustella sisällöllisesti kunkin asiantuntijan kanssa, mutta myös kääntää tiedot niin, että ne ovat tärkeitä muille.
- Sosiaalinen tietoisuus ja tunneäly - integraattorin on kyettävä havaitsemaan hienovaraisia merkkejä siitä, miltä tiimin jäsenistä voi tuntua ja ymmärtävätkö he oleellista tietoa, jotta he voivat ryhtyä toimiin nykyisen keskustelun ja ihmisten välisen dynamiikan mukauttamiseksi suotuisamman ympäristön luomiseksi.
- Odotusten hallinta - integraattorin tulee pystyä hallitsemaan tehokkaasti odotuksia luodakseen vakaan psykologisen ympäristön, jota tarvitaan korkeamman tason oppimiseen ja luottamuksen kehittämiseen.
- Työkalujen ja tekniikoiden strateginen käyttö – integraattorin tulee olla tietoinen siitä, miten eri työkalut ja prosessit vaikuttavat luottamuksen ja oppimisen edistämiseen, jotta niitä voidaan käyttää strategisesti.

- Suunnittelu- ja dynaamiset valmiudet - integraattorin tulee kyetä laatimaan yksityiskohtaisia ja kokonaisvaltaisia suunnitelmia, mutta myös pystyä mukauttamaan suunnitelmaansa nopeasti muuttuviin tilanteisiin perustuen. (Pheps, 2013)

3. TAHTITUOTANNON VAATIMUKSET LOGISTIIKALLE JA TIEDONKULULLE

Tahtituotanto tähtää nopeaan ja tasaiseen sujumiseen asiakkaiden tarpeita tyydyttäen. Se koostuu kolmesta pääalueesta – tahtisuunnittelusta, tahtiohjauksesta ja jatkuvasta parantamisesta, joista jokaisella on tietyt ominaispiirteet ja jotka vaativat panostusta. Hyödyntämällä joustavia suunnitteluparametreja ja riittävää eräkokoa sekä suosimalla kapasiteettia ja suunnittelupuskureita, tahtisuunnittelulla pyritään optimaaliseen prosessinkulkuun. Tuotannossa tämä johtaa vähentyneeseen aikapuskureiden käyttöön, keskeneräisen työn vähenemiseen, pienempään vaihteluun tahtiajoissa, vähempiin tarpeettomiin toimintoihin ja lyhyempään projektin kokonaiskestoon. (Lehtovaara *et al.*, 2021)

Tahtiohjauksen tavoitteena on oikea-aikainen, visuaalinen tuotannonohjaus, jossa korostetaan tehokasta laadunvalvontaa ja joustavia aika- ja tilapuskurien käyttöä. Lisäksi tukitoimintoja tuotannosuunnittelun ulkopuolisiin vaatimuksiin on vahvistettava virtauksen lisäämiseksi. Kriittisimmät tukitoiminnot ovat suunnitteluinformaation ja materiaalivirtauksen hallinta, hankkeen osapuolten sosiaalinen sitoutuminen ja hankkeen sidosryhmien sopimuksellinen integraatio. Tahtiohjauksen ja tukitoimintojen riittävä hallinta lisäävät tuotannon virtausta vähentämällä tehtävän työn sekä uudelleen tehtävän työn määrää. (Lehtovaara *et al.*, 2021)

Koska tahtituotanto edistää parempaa läpinäkyvyyttä ja korostunutta kiireellisyyttä esiin nousevien ongelmien ratkaisemiseksi, se mahdollistaa luonteeltaan tehokkaan jatkuvan parantamisen. Menestyäkseen tahtituotannon tulee siis varata riittävästi kapasiteettia ennakoivalle ongelmanratkaisulle, mikä mahdollistaa tehokkaan jatkuvan parantamisen ja oppimisen. (Frandsen *et al.*, 2013)

3.1 Logistiset vaatimukset

Tahtituotanto eroaa muista tuotantomenetelmistä erityisesti siinä, että tahtituotannossa jokaisen ammattiryhmän tulee saada työnsä valmiiksi tietyssä työkohteessa tahtiajan puitteissa. Tuotannon tasaisen etenemisen varmistamiseksi kaikki mahdolliset satunnaiset tapahtumat, jotka voivat aiheuttaa varianssia tuotantonopeudessa, pyritään eliminoidaan tahtisuunnittelulla. Esimerkiksi toisistaan poikkeavat työmaat tai epäselvä tuotantosuunnittelu voivat aiheuttaa varianssia. Mikäli varianssia ilmenee, ammattiryhmät alikuormitetaan, eli niille osoitetaan vähemmän työtä kuin mitä he voivat

tehdä. Alikuormituksen tarkoituksena on varmistaa, että odotettua pidempään kestävät työt eivät hidasta tuotantoa. (Keskiniva *et al.*, 2020)

On havaittu, että tahtituotanto on tuotantosysteeminä haavoittuvainen, mikäli prosessiin kuuluu variaatiota (Seppänen, 2014). Materiaalilogistiikka tuottaa suuren määrän variaatiota, koska materiaalien saatavuus vaikuttaa tehtävien toimeenpanoon, ja kompleksisuus nousee mikäli materiaalien toimitusajoissa on vaihtelua. Materiaalitoimitusten onnistuminen on hyvä esimerkki ulkoisesta variaatiosta. Ulkoinen variaatio viittaa tekijöihin, jotka eivät ole täysin säännöllisiä tai ennustettavissa, ja jotka täten tuovat tuotantoon variaatiota. Epäsäännöllinen kysyntä, tehtävien keskeytys, resurssimuutokset, konerikot, tilausten joudutukset, kuljetusten epäonnistumiset ja toimittajiin liittyvät ongelmat ovat muiden muassa ulkoisen variaation ilmentymiä (Hopp and Spearman, 2004). Ulkoista variaatiota on pyrittävä vähentämään, kun käytetään yhden kappaleen virtausta. Mikäli virtauksen tehokkuutta nostetaan ilman variaation vähennystä, resurssien on kasvettava eksponentiaalisesti, mikä puolestaan on hankala varmistaa käytännössä (Tetik *et al.*, 2019).

Materiaalivirtauksen ongelmat ovat merkittäviä rakennustoiminnan ulkoisen variaation lähteitä. Kysynnän ja tarjonnan variaatio vaikuttaa suoraan projektin suorituskykyyn, heikentää laatua ja turvallisuutta samalla lisäten projektin kustannuksia ja kestoja. Etenkin tahtituotannossa materiaalivirtauksen ongelmat voivat synnyttää haasteita, kuten kommunikaatio tuotantosuunnitelman suhteen ja projektikumppaneiden sekä materiaalitoimittajien sitoutuminen tahtiaikatauluun (Frandsen *et al.*, 2013). Syinä tahtituotannon työpakettien viivästymiseen on havaittu esimerkiksi epäonnistuneet materiaalitoimitukset rakennustyömaalle (Vatne and Drevland, 2016). Materiaalin saatavuus voi siis vaikuttaa projektin keston ja toimintojen sujuvuuteen, kun tahtituotantoa käytetään. Toisaalta työmaalla olevat materiaalivarastot vaikuttavat käytettävissä olevaan tilaan ja voivat näin häiritä projektin tuottavuutta (Seppänen and Peltokorpi, 2016). Ilman materiaalin toimituksessa ja käsittelyssä käytettävää JIT-tekniikkaa työntekijöiden tuottavuus voi laskea johtuen ruuhkautuneiden materiaalien odottamisesta tai lajittelusta paikan päällä (Ghanem *et al.*, 2018).

Materiaalilogistiikassa materiaalitoimitustavat voidaan nähdä riippumattomina toimitettavasta materiaalista. Kuljetustapa, toimitusaika, purku, varastointi, suojaus ja siirrot suunnitellaan kuitenkin tapauskohtaisesti. Toimituskohtaisella riskienarvioinnilla voidaan panostaa aikatauluun, työmaajärjestelyihin ja suunnitelmiin, joilla voidaan välttää ongelmia ja valita edullisin vaihtoehto työmaan toimivuuden kannalta. Esimerkiksi kerrostalotyömaan kipsilevyjä toimitettaessa on arvioitava, onko kannattavaa tilata levyt kohteeseen täysin nippuina välivarastoitavaksi vai vajaina nippuina kerroskohtaisesti

toimitettuina. Materiaalitoimittajien tilauskanta, kuljetustapa, tehtaan sijainti, tuotekauppaan kuuluva suunnittelu, suunnitelmien valmiusaste ja tuotekohtaiset tyyppihyväksynöt vaikuttavat toimitusaikaan. Materiaalitilaus voidaan tehdä kuljetettuna, jolloin materiaalitoimittaja järjestää kuljetuksen tai erilliskuljetuksella tilattuna. Kuljetuskalusto valitaan materiaalin mukaan ja purku- ja nostoapuvälineet pyydetään tarvittaessa toimittajalta. Työmaalla tapahtuvat sisäiset siirrot toteutetaan aluesuunnitelmassa tehtyjä ratkaisuja mukailten. Materiaalista ja työmaasta riippuen tuotteet varastoidaan työmaalla tai välivarastoissa tai ne toimitetaan tehtaalta suoraan asennettaviksi. Välivarastointia tai työmaan läheisyydessä olevaa odotuspaikkaa käytetään toimituksissa, joilla on erityisen tarkka toimitusaika, ja työmaalla on liikaa liikennettä tai liian ahdasta aiempaa toimitusta varten. (Koski *et al.*, 2009)

Työnjohto varmistaa toimituksen vastaanoton valmistelussa kuorman purkupaikan, varastopaikan ja mestan kunnon sekä nosto-, siirto- ja suojauskaluston käyttövalmiuden. Toimituksen tilanne voidaan myös varmistaa kuljetusliikkeeltä tai tuotetoimittajalta. Nosto- ja siirtokalusto tilataan aluesuunnitelmassa määritettyyn purkupaikkaan valmiiksi ja työmaakaluston ja kuljetuskaluston yhteensopivuus tarkistetaan. Siirrot, nostot ja varastoinnit suoritetaan pakkausten mukana tulleiden tai valmistajalta saatujen ohjeistusten mukaisesti. Ennen tuotetoimituksen saapumista ja siirtotöiden aloitusta on perehdytykselle varattava riittävästi aikaa, mikäli käytetään ulkopuolista työvoimaa. (Koski *et al.*, 2009)

Toimitusten vastaanotossa työmaahenkilöstö valvoo ja ohjaa kuljetusliikkeen toimintaa. Tämä on erityisen tärkeää, kun toimitukseen kuuluu hankalasti siirrettäviä, paljon varastointitilaa tarvitsevia tai suojattavia tuotteita. Valvonnalla ja ohjeistamisella estetään kuorman purku väärään paikkaan, mikä voisi hankaloittaa työntekoa ja johtaa ylimääräisiin siirtoihin. Toimituksen ohjauksen voidaan katsoa olevan onnistunut, kun sovittu toimituserä on työmaalla oikeaan aikaan, varastointipaikka ja suojaukset on valmisteltu, tarvittavat dokumentit ja käyttöohjeet ovat työmaalla, työntekijät ovat perehdytettyjä ja valmiina kuorman purkuun ja toimituksen sisältö on tarkastettu ja kirjattu kuormakirjaan. (Koski *et al.*, 2009)

Kaikkien tarvittavien materiaalien toimittaminen oikeaan aikaan ja oikeaan paikkaan voi olla ratkaisu toiminnan sujuvuuden ja tuottavuuden varmistamiseksi. Onnistunut tahdin toteutus ja jatkuva virtaus perustuvat huolelliseen suunnitteluun ja tuotannon päivittäiseen valvontaan (Tommelein, 2017). Tuottavuuden lisääminen on mahdollista, kun rakennusprosessi suunnitellaan logistiikan näkökulmasta materiaalivirran hallintaan yhdistämällä tahtituotantoa ja teollisuuslogistiikkaa. Keskitetyn logistiikan hallinnan ja tahtituotannon avulla voidaan ratkaista materiaali- ja tiedonkäsittelyongelmista

aiheutuvat hukat (Agapiou *et al.*, 1998). Kenttä- ja kirjallisuustutkimukset ovat osoittaneet, että materiaalien käsittely ja hallinta ovat useimmissa tapauksissa epätydyttävällä tasolla, mikä aiheuttaa materiaalihukkaa, kustannusten kasvamista ja projektien viivästymistä. Toimitusten hallintaa on pyrittävä lisäämään, sillä materiaalit voivat vastata suurta osaa rakentamisen kustannuksista. Ostotapahtumien, tilausten toteutumisten valmiusasteen ja tiedon välittymisen seuranta tuottajalta työmaalle asti ovat avainasemassa. (Sundström *et al.*, 2009)

Työmaakohtaiset ongelmat voivat usein kuitenkin vaikeuttaa toimintaa, vaikka materiaalien toimitukset olisi hoidettu hyvin. Sopimattomista varastointiolosuhteista, jatkuvista siirroista, materiaalien hukkumisesta ja varkauksista syntyy materiaalihukkaa. Erityisesti kaupunkirakentamisessa ilmenevään varastointitilan puutteellisuuteen pyritään vastaamaan JIT -toimituksilla, mutta JIT -toimitusten ongelmana on aikataulumuutoksien aiheuttamat ongelmat ja häiriöherkkyys toimitusten myöhästymisessä. JIT -toimitusten käyttö vaatii johtamistaitoa ja resursseja. Tyypillinen suurien työmaiden ongelma on myös reaaliaikaisen varastokirjanpidon puuttuminen. Kun tiedot materiaalien sijoituspaikoista eivät ole ajan tasalla, voidaan päätyä tekemään lisätilauksia, jotka aiheuttavat ylijäämää ja hukkaa. (Sundström *et al.*, 2009) Reaaliaikaisella varastokirjanpidolla, hyvillä varastointiolosuhteilla ja toimitusten johtamisella voidaan siis lisätä tuottavuutta.

Rakennustyömaan ongelmien ratkaiseminen on sosiaalinen prosessi, jossa tarvitaan tiimityötä ja riittävästi resursseja. Ratkaisuja etsiessä on löydettävä menetelmät, joilla saadaan maksimoitua hyödyt minimoimalla panostukset. Pyritään siis löytämään menetelmät, joilla on mahdollisimman suuri vipuvoima. Vipuvoimaa tuottavia menetelmiä ovat Blockleyn ja Godfreyn (2000) mukaan tiimityö, resurssit, ymmärrys ja todisteet. Tiimityöllä saavutetaan hyvää johtajuutta, keskinäistä kunnioitusta, motivaatiota, yhteistä visiota, yhteishenkeä, korkeaa etiikkaa ja hyväksytyjä rooleja prosessissa. Resurssit on asetettava tarkoituksenmukaisesti prosessiin niin, että henkilöresurssit, kuten henkilökohtaiset taidot, ovat kohdistettuna oikein, siinä missä budjetitkin. Ymmärrystä lisätään pohtimalla ilmiöiden fyysisiä ja sosiaalisia malleja pyrkimällä yhteisymmärrykseen. Workshopeissa testataan puutteita ymmärryksessä ja sen aiheuttamia riskejä. Todisteet otetaan osaksi päätöksentekoa, prosessien hallinnassa ja epävarmuuksien käsittelyssä vankkaan todellisuudentajuun kytkettynä. Tarkastellessa prosesseja on oltava olemassa riippumattomat tavat tulkata, asettaa ja hankkia todisteita. (Blockley and Godfrey, 2000)

Sosiaalisen integraation ja perusteellisten sopimusten yhdistelmä muodostavat perustan tahtituotantoon liittyvien toimijoiden sitoutumisen tehokkaalle varmistamiselle.

Ammattiryhmät tulisi ottaa mukaan varhaisessa tahtisuunnittelun vaiheessa, jotta he voivat kokea osallisuutta suunnitelmiin sekä saavat tarvittavat työkalut toteutusvaiheeseen. (Frandsen, 2019) Lean -kulttuurin korostaminen, yhteistyö, simulointi ja tahtituotannon koulutus läpi projektin ovat sopivia tapoja saada projektin uudet osallistujat osaksi tahtituotantoa. Lehtovaara et al. (2021) tutkimus on osoittanut, että sosiaalisen integraation lisäksi ammattiryhmien sopimusten pitäisi ottaa huomioon myös kaksi muuta näkökulmaa. Ensinnäkin sopimuksissa tulisi ottaa huomioon mahdolliset taloudelliset tappiot, jotka johtuvat lisääntyneestä kapasiteetista ja puskurihallintatoimista. Toiseksi sopimusten tulisi ohjata ja kannustaa suunnitelman noudattamista esimerkiksi sitomalla maksut tahtivaunuihin ja raportoituun edistymiseen. Alkupään tahtituotannon toteutukset eivät välttämättä houkuttele ammattiryhmiä, jos projektiympäristö ei ole luotettava tai taloudellisesti kannattava, sillä tahtituotanto vaikuttaa operaatiovirtaan eri tavalla riippuen ammattiryhmien asemasta arvovirrassa. Sisävaiheen virtauksen alkupään tahtivaunuissa, kuten kipsilevytystyössä, työskentelevät ammattiryhmät saattavat aluksi kokea laskevaa tuottavuutta, kun taas virtauksen loppupään tahtivaunuissa ammattiryhmien tuottavuus lisääntyy (Linnik et al., 2013). Kaiken kaikkiaan perinteisessä tuotannossa käytetyt resurssitehokkuutta suosivat sopimukset aika- ja tilapuskureineen eivät vaikuta riittävästi tahtituotantoon (Lehtovaara et al., 2021).

Logistiikkaprosessi kulkee yrityksissä monen vastuualueen kautta, sisältäen paljon ihmisten välistä kommunikaatiota. Logistinen prosessi koskee rakennusteollisuudessa pääurakoitsijan lisäksi muitakin rakennushankkeeseen osallistuvia. Toimiessaan logistinen prosessi tuo hyötyä kaikille osapuolille. Rakennusprojekteille tyypillinen jatkuva osapuolten vaihtuminen, muutokset ja projektien yksilöllinen luonne tuovat haasteita logistiikan hallitsemiseen. (Sundström et al., 2009) Kattavan tehtävälisan tekeminen on hyödyllistä logistiikkasuunnittelussa. Tehtävälisan tekeminen ohjaa esimiehiä tutustumaan kohteeseen ja sen suunnitelmiin ja asiakirjoihin hyvissä ajoin ennen tuotantoa. Kattavan tehtävälisan tekeminen paljastaa asioita, jotka ovat epäselviä tuotannon toteuttamisen suhteen jo ennen sen alkua. Tehtävien kartoituksessa huomioidaan myös kuivumista vaativien materiaalien kuivumisajat, sillä hallitsemattomat kuivumisajat voivat helposti muodostua pullonkaulaksi, joka vaikeuttaa tahtituotannon kulkua. (Keskiniva et al., 2020)

3.2 Tiedonkululliset vaatimukset

Rakennusalalla urakoitsijoiden on kerättävä paljon ulkoista ja sisäistä tietoa tiedonsyötöksi laadunhallintaan. Ulkoinen tieto sisältää asiakkaan laatuvaatimukset, hankkeen valvojat, asiaankuuluvat laatustandardit, alihankkijat sekä materiaalin toimittajat ja myyjät. Sisäiset tiedot sisältävät organisaatorakenteen, laadunhallintajärjestelmän, laadunhallintasuunnitelman, rakennustekniikan tiedot, tiedot rakennustarvikkeista ja tiedot työntekijöistä. Syötetyt tiedot on käsiteltävä ja hyödynnettävä tehokkaasti, jotta niistä saadaan laadunhallintaa edistäviä. (Zeng *et al.*, 2007)

Rakennusprojektien muuttuessa entistä monimutkaisemmiksi tiedon tehokas hallinta ja integrointi on keskeistä rakennusprojektien ja koko teollisuuden menestyksen kannalta. Tehokas integrointi on välttämätöntä tutkimuksen ja innovaatioiden sisällyttämiseksi hankkeisiin ja toimialan muodostavien ihmisten arvokkaan kokemuksellisen tiedon hyödyntämiseen. Tiedon tehokas integraatio on katalysaattori, jonka avulla rakennusala voi samanaikaisesti erikoistua ja luoda rakennettuja ympäristöjä, jotka tukevat innovatiivisuutta ja jatkuvaa kehitystä. (Phelps, 2012)

Tehokas tuotannonhallintajärjestelmä perustuu tarkan ja oikea-aikaisen tiedon saatavuuteen. On olemassa monia tietovirtoja, joita on hallittava tehokkaan tuotannonhallintajärjestelmän luomiseksi. Tietovirrat direktiiveistä, kriteereistä, edellytyksistä, saatavuuteen sitoutumisesta ja resursseista ovat olennaisia tuotannonohjauksen ja työn jäsentämisen kannalta. Pirstoutuneessa ja dynaamisessa ympäristössä, kuten rakentamisessa, organisaation eri tietojärjestelmien ja lähteiden välinen tiedon integrointi ja vaihto on ratkaisevan tärkeää tehokkaan prosessinhallinnan kannalta. (Soibelman and Kim, 2002)

Perinteinen lähestymistapa yksittäisten sovellusten integrointiin vaatii merkittävää kehitystyötä, ja aika- ja kustannussyistä johtuen sitä syntyy harvoin. Suuret ERP-järjestelmien toteutukset eivät ole kyenneet ratkaisemaan tiedon integroinnin ongelmaa eivätkä useimmissa tapauksissa ulotu työmaaprosesseihin. Useimmissa projekteissa on käytettävä manuaalisia prosesseja ja perinteisiä viestintämenetelmiä, kuten puheluita ja sähköposteja tiedon saavuttamiseksi. Vaikka tästä ongelmasta on keskusteltu laajasti viimeisen kahden vuosikymmenen aikana, ongelma on edelleen jossain määrin ratkaisematta tietojärjestelmien pirstaleisuuden vuoksi. (Dave *et al.*, 2014)

Tiedonkulun hallinta tuotannonhallinnassa on yksi koko projektin tehokkuuteen vaikuttavista kriittisistä näkökohdista. Useimmat organisaatiot eivät ole tyytyväisiä nykyiseen tietojen integroinnin ja yhteentoimivuuteen muiden kumppanien ja

järjestelmien kanssa. Viestintäinfrastruktuurit ja sovellukset suunnitellaan usein toimialue- tai toimittajakohtaisesti, mikä vaikeuttaa yhteistoimintaa organisaation sisällä ja ulkopuolella. Nykyään on tosiasia, että ilman asianmukaista viestintäprotokollaa tuotannonhallintajärjestelmän perustana organisaatiot eivät pysty kehittymään vastaamaan uusia liiketoiminnan tarpeita. Viestintäjärjestelmän tärkeimpänä tavoitteena on tiedonkulun paraneminen ilman työntekijöille aiheutuvaa lisätaakkaa tietojen päivittämisessä. (Dave *et al.*, 2014) Tahtituotannossa tiedonkulkua lisätään esimerkiksi korkealaatuisella visualisoinnilla. (Frandsen and Tommelein, 2016)

Tiedonkulun sujuvuudella eri toimijoiden välillä on suuri merkitys. Tehtaan tuotantosuunnittelu, suunnittelijat, pääurakoitsija ja asentajat tarvitsevat tietoja kohteen elementeistä ja niiden mitoista sekä suunnitellusta ja toteutuneesta ajoituksesta. Työmaaympäristössä tapahtuvia tiedonkulun ongelmia ovat tiedonkatkokset, joita on luokiteltu kolmeen tasoon. Ensimmäiseksi on havaittu, että lähtötietoja ei toimiteta ajallaan tilaajan, rakennuttajan, suunnittelijan tai yrityksen keskijohdon toimesta. Tätä ongelmaa on havaittu lähes jokaisella työmailla. Suunnitelmien saatavuus ajallaan on tehokkaalle työnteolle oleellista. Tähän ongelmaan ei ole löydetty ratkaisua, joka toimii säännönmukaisesti. Toisena katkoksenä on havaittu tiedon sisällön puutteet. Vaikeita liittymäkohtia joudutaan suunnittelemaan työmaalla, mikäli detaljipiirustukset ollaan tehty vain rakenteen yksinkertaisimmista kohdista. Mittojen ja korkeusmittojen puutteita ilmenee myös. Kolmantena ongelmana on havaittu paperisten piirustusten ja suunnitelmien osoitteissa olevat virheet. Työmaalle toimitettavaksi tarkoitetut asiakirjat voivat päätyä toimistolle, jolloin ne ovat väärässä paikassa, josta niitä ei osata heti ohjata oikeaan paikkaan. Asiakirjojen lähettäjä olettaa asioiden olevan kunnossa samalla kun työmaajohto olettaa suunnittelun olevan vielä kesken. (Sundström *et al.*, 2009)

Last Planner -tuotannon suunnitteluprosessissa työmaatiimi tarvitsee tarkkaa resurssitietoa rakennustehtävistä voidakseen toteuttaa tehokkaasti ennakoitua ja viikoittaisia suunnittelutoimia (Ballard, 2000). Tämä tieto on kuitenkin usein erilaisissa järjestelmissä, jotka eivät aina ole työpaikan tiimin käytettävissä tai edes yhteentoimivia toistensa kanssa. Tämä vaikuttaa suunnitteluprosessin luotettavuuteen ja sitä kautta koko tuotannonohjausjärjestelmän tehokkuuteen. Lean -rakentamisessa toimitusjärjestelmien olennaisena vaatimuksena korostuu imuohjatut tietojärjestelmät, jotka luovuttavat tietoa järjestelmän tilan perusteella ja jotka voidaan automatisoida. (Dave *et al.*, 2014)

Kun useiden eri alojen on toimittava yhdessä, työn koordinointi toimialojen välillä on välttämätöntä. (Keskiniva *et al.*, 2020) Tuotannonhallinnan tärkeimpiä puutteita informaationhallinnan näkökulmasta ovat:

- Projektissa on mukana useita organisaatioita, joiden eri sidosryhmät käyttävät usein omia tietojärjestelmiään, ja projektitietoja ei synkronoida. (Dave *et al.*, 2014)
- Monilla rakennusyrityksillä on tapana painottaa projektitavoitteisiin ja sopimusten täyttämiseen liittyvää valvontaa tuotannonohjauksen sijaan. Tässä yhteydessä tuotantojärjestelmän ongelmien havaitseminen ja korjaavien toimintojen määrittäminen tulee usein ongelmalliseksi (Ballard and Howell, 1998).
- Perinteisesti tietojärjestelmät toteutetaan eristyksissä, joissa niitä ei ole integroitu muihin sisäisiin tai ulkoisiin järjestelmiin. (Phelps, 2013)
- Järjestelmällisen tuotantotiedon synkronoinnin puutteesta johtuen useimmat urakoitsijat luottavat omaan kokemukseensa ja intuitioonsa päätöksenteossa. mikä lisää epävarmuutta. (Dave *et al.*, 2014)

Tahtituotannossa tiedonkulkua on tehostettava jatkuvan parantamisen periaatteisiin liittyen. Tahtituotannon ohjaus keskittyy lyhyen syklin ohjaukseen päivittäisten palaverien, projektin edistymisen seuraamisen ja jatkuvaan parantamiseen pyrkimisen kautta. Työn toteutusehtoja tarkkaillaan jatkuvasti, jotta työt voivat alkaa sujuvasti. Työnteon ja päivittäispalaverien aikana käytetään visualisointia, jonka tarkoituksena on varmistaa tarvittavan tiedon läpinäkyvyys kaikille projektin osallisille. (Frandsen and Tommelein, 2016)

Tahtituotannossa pyritään minimoimaan tahtiaikojen välistä variaatiota. Tämän vuoksi esimerkiksi vaihtelut materiaalitoimituksien saatavuudessa voivat hidastaa tuotannon virtausta merkittävästi, koska työvaiheet jäävät tekemättä ja työntekijät voivat joutua odottamaan. Koska tahtituotanto perustuu yksityiskohtaiseen suunnitteluun ja toistuviin työvaiheisiin, tahtituotannon suunnitteluvaiheessa voidaan havaita materiaali- ja tiedonkulun ongelmia jo ennen toteutusta. Kiinnittämällä enemmän huomiota suunnitteluvaiheeseen, ja varmistamalla työnteon edellytykset, voidaan välttää esimerkiksi materiaalitoimituksista syntyviä ongelmia. (Lehtovaara *et al.*, 2021)

Tahtituotannon haasteiksi on kuvattu ihmisten kanssa toimiminen, yhteistoiminta, suunnitelmien saattaminen toteutuskelpoiseksi, variaation hallinta ja logistiikka. Ihmisten välinen vuorovaikutus ja yhteistoiminta ovat näistä haastavimpia. Tahtituotanto vaatii toimiakseen ihmisjohtamista ja vuorovaikutusta. (Building 2030, 2019)

4. POHDINTA

Tässä osiossa pohditaan, miten rakentamisessa ehdotetut logistiset ratkaisut sopivat työmaatoimintoihin tahtituotannon kanssa. Logistiikan on todettu olevan keskeisessä roolissa tahtituotannon suunnittelussa asuinrakentamisessa (Vatne and Drevland, 2016). Useiden lean-konseptien, kuten setityksen, JIT-toimituksen ja tahtituotannon toteuttaminen yhdessä johtaa parannuksiin. Huolimatta oikean logistisen ratkaisun roolista tahtituotannon haitallisten ulkoisten variaatioiden vähentämisessä, mikään raportoiduista tahtituotannon empiirisistä tutkimuksista ei käsittele syvällisesti logistiikan ja ulkoisten variaatioiden roolia. (Tetik *et al.*, 2019) Myöskään konseptuaalisia tutkimuksia ei aiheesta ole saatavilla. Siten tarvitaan käytännön tietoa logististen ratkaisujen roolista ja vaikutuksista tahtituotannon soveltamisessa rakennusprojekteissa.

4.1 Tiedonkulun logistiikkaratkaisut

Tiedonkulkuun, yhteistyöhön, urakkarajoihin ja henkilöiden vastuisiin liittyvät kysymykset ollaan havaittu haastavimmiksi teemoiksi yleisen työmaalogistiikan hallinnassa. Ratkaisuja tulisi siis yleisellä tasolla etsiä viestintämenetelmistä, viestinnän sisällön tarkastelusta, kokouskäytännöistä ja erilaisista toimintaohjeista. Rakentamisen yleisen tutkimuskirjallisuuden mukaan tiedonkulkuun voidaan vaikuttaa säännöllisillä palaverikäytännöillä, selkeyttämällä eri osapuolille jaettua tietoa, esimerkiksi viikkoaikatauluilla, ja käyttämällä modernia tietotekniikkaa, kuten esimerkiksi projektipankkia tai intranetiä. Yhteistyöllä tehty työmaan kehittäminen työmaan keskeisten toimijoiden toimesta on hedelmällistä. Esimerkiksi kumppanuussopimuksilla voidaan edesauttaa tällaista yhteistyötä. (Sundström *et al.*, 2009) Eri työmaiden tahtituotantomenetelmiä tutkiessa on havaittu, että työryhmien päivittäiset tapaamiset lisäsivät kommunikaatiota ammattiryhmien välillä, näin lisäten tehokkuutta yhteisissä ongelmanratkaisutilanteissa. (Lehtovaara *et al.*, 2021) Tiedonkulun haastavuuteen liittyviin ongelmiin on tahtituotannon käytön myötä siis jo löytynyt osittainen ratkaisu. Viestintämenetelmät tulevat sitä tehokkaammaksi, mitä enemmän viestitään, ja päivittäiset kokouskäytännöt mahdollistavat viestinnän määrän kasvun, vaikuttaen tiedonjaon tehokkuuden kasvuun.

Ratkaisuksi rakennusalan sirpaloituneelle tuotantoprosessille onkin ehdotettu tiimityöskentelyä. Sen avulla synnytetään eri tiimien ja ammattiryhmien välille tehokkaampaa yhteistyötä. Tutkimusten mukaan yhteistyön sujuvuus on paljolti kiinni

siitä, kuinka hankinta on toteutettu. (Sundström *et al.*, 2009) Tiimityöskentelyssä vuorovaikutuksen päätarkoitus on jakaa tietoa ja tehdä päätöksiä. Havaittavien tulosten, kuten päätöksien, toimintasuunnitelmien ja tarkistettujen asiakirjojen lisäksi on olemassa näkymättömiä tuloksia, jotka ovat ratkaisevassa asemassa myöhempien vuorovaikutusten tehokkuuden määrittämisessä. Nämä näkymättömät tulokset liittyvät siihen, kuinka ihmiset arvostivat kokemustaan, eli miltä heistä tuntui, ja miten he arvostivat tietoa, eli mitä he oppivat. Nämä arvostukset puolestaan vaikuttavat myöhemmissä vuorovaikutuksissa jaetun tiedon määrään, tyyppiin ja laatuun, tiimin jäsenten väliseen vuorovaikutukseen sekä yksilöiden halukkuuteen jakaa ja hyväksyä tietoa. (Phelps, 2013) Useat menestyvät yritykset käyttävät ammattiryhmiä, jotka omaavat erikoisosaamista, ja jotka toimivat organisaatioon asetettujen rajojen mukaisesti. Menestyneillä työmailla työryhmät toimivat yhteistyössä eri ammattiryhmien kesken ja vuorovaikutus ylittää ammattirajat. (Sundström *et al.*, 2009) Rakennusprojektin aikana tapahtuu jatkuvasti vuorovaikutusta. Tästä johtuen vuorovaikutuksen tehokkuudesta tulee yksi tärkeimmistä tekijöistä projektin tuloksen määrittämisessä. Tahtituotannolle tyypillinen päivittäinen palaverikäytäntö ja projektin visualisointi hankkeen osallisille on erinomainen vuorovaikutuksen tehokkuutta lisäävä käytäntö. Tuotannon havainnointi helpottuu, ja palaverikäytäntöön liittyvästä tottumuksesta syntyvä luottamus muihin toimijoihin helpottaa tiedonjakoa ja kommunikaatiota. Kun hankkeen toteutukseen liittyvät tahot tuntevat olevansa jatkuvasti mukana vuorovaikutuksessa, kasvaa heidän arvostus omia kokemuksiaan kohtaan, näin lisäten halua tiedon jakamiseen ja hyväksymiseen. Kehitysehdotuksena näkisin tahtituotannossa syntyvän vuorovaikutuksen tutkimisen.

Suurimmat ongelmat tiedonkulkuun liittyvissä logistiikkaratkaisuihin liittyvät suunnitteluun ja suunnitteluprosesseihin. Logistiikkapalvelun perustamiseen tarvitaan yksityiskohtaista suunnittelutietoa. Rakennusalalla ei kuitenkaan ole vielä saavutettu suunnittelun vaadittua kypsyyssastetta. Verrattaessa valmistavaan teollisuuteen, jossa yksi tärkeimmistä syistä suunnittelumallin luomiseen on tarkka tuoteluettelo, joka palvelee logistisia prosesseja, rakennusalalla päätavoitteena on laskea hankkeen kustannukset, vaikka tarkkoja määriä paikkakohtaisesti ei ole saatavilla. Näin ollen rakennusprojektit kärsivät siitä, että usein ei ole luotu yksityiskohtaista tuoteluetteloa hankinta- ja materiaalitoimitussuunnitelmaa varten. Nämä asiat vaativat lisätutkimuksia. Täsmällisellä työnsuunnitelman teolla on havaittu olevan moninaista hyötyä. Suunnitteleminen etukäteen lisää myös työturvallisuutta, sillä usean työtapaturman taustavaikuttajana on havaittu työvaiheiden suunnittelun puute. Puutteellinen suunnittelu näkyy työmaalla esimerkiksi siten, että käytössä ei ole työhön vaadittavia työkaluja tai

turvavarusteita, työtasot eivät ole asennettuja työn edellyttämällä tavalla tai edelliset työvaiheet ovat jääneet tekemättä tai tarkastamatta. (Sundström *et al.*, 2009) Yhtenä ratkaisuna työsuunnitteluun on Last Planner -menetelmä, jossa keskitytään lyhyen aikavälin suunnitteluun, ja pyrkimyksenä on, että aloitettaessa jokaista eri tehtävää, on kaikki sen edellytykset olemassa häiriöttömän ja suunnitelmanmukaisen suorittamisen kannalta. Osana Last Planner -menetelmää seurataan aktiivisesti viikkosuunnitelman tehtävien toteutumistasetta, ja selvitetään syyt toteuttamattomiksi jääneille tehtäville. (Koskela, 2000) Last Planner -menetelmässä keskitytään tutkimustiedolla osoitettuihin merkittävimpiin häiriöitä aiheuttaviin tekijöihin asennustyössä. Last Plannerilla pyritään siis varmistamaan häiriöttömän asennustyön edellytykset. Materiaalien, piirustusten, kaluston, työntekijöiden saatavuus ja edeltävien työvaiheiden, mestan ja olosuhteiden riittävä valmius ovat näitä edellytyksiä. Materiaalivirran työmaalle voidaan olettaa olevan häiriötöntä ja tehokasta, mikäli nämä edellytykset ovat varmistettu työmaalla etukäteen. Logistiikan tehokkuutta voidaan varmistaa myös pitämällä aliurakoiden aloituspalavereita. Palaverien tarkoituksena on varmistaa samoja asioita kuin Last Planner -menetelmällä, mutta pidemmällä aikajänteellä. Siinä, missä Last Planner -menetelmällä keskitytään lyhyen aikavälin töiden edellytyksiin, aloituspalavereilla varmistetaan toteuttamisen edellytykset koko työvaiheen ajalta. Aikajänne voi tällöin vaihdella viikoista muutamiin kuukausiin. Aloituspalaverien tarkoituksena on myös vastuukysymysten selkeyttäminen ja tiedonkulun tehostaminen. (Sundström *et al.*, 2009)

Tahtituotanto ja Last Planner -menetelmä täydentävät toisiaan monin tavoin. Tahtiaikasuunnittelulla tuodaan Last Planner -menetelmään lisää virtausta ja standardisoidumpia työvaiheita ohjattavaksi, jolloin työnteosta saadaan poistettua tehokkaammin häiriötekijöitä. Last Planner -menetelmä puolestaan tarjoaa tahtituotannolle parempaa tuotannosuunnittelua tahtialueille, sillä se sitouttaa työn parempaan suunnitteluun, kannustaen älykkäisiin käytäntöihin ja huonojen suunnitelmien hylkäämiseen. Last Planner -menetelmällä vältetään myös tahtituotannolle haitallisen ulkoisen variaation syntyä, sillä tehtävien toteutumisen aktiivisella seurannalla voidaan välttää esimerkiksi kysynnän vaihteluiden, resurssimuutosten, toimittajien ongelmien ja konerikkojen aiheuttamia ulkoisia variaatioita.

4.2 Materiaalilogistiikan ratkaisut

Logistisia ratkaisuja laiminlyödään rakennusalalla projektibudjettiongelmiensa vuoksi, vaikka ne parantavat tuottavuutta (Sullivan *et al.*, 2011). Rakennusteollisuudessa käytetään monia logistiikkaratkaisuja materiaalinkäsittelyn ja aikataulun parantamiseksi.

Setitys, eli tuotteiden ja komponenttien järjestäminen, pakkaaminen ja toimittaminen yhtenä pakettina, on yksi logistiikkaratkaisusta, joita voidaan soveltaa rakennustoiminnassa. Ajatuksena on, että aluekohtaiset tai työkohtaiset tuotteet ja materiaalit kootaan yhteen logistiikkakeskuksessa ja toimitetaan suoraan työmaalle tarpeen mukaan. Tutkimus setityksen soveltuvuudesta ja vaikutuksista tahtituotannolla toteutettavaan korjausrakentamiseen ovat paljastaneet lupaavia tuloksia. (Tetik *et al.*, 2019) Tuotantoprosessi on synkronoitava paikan päällä tapahtuvan rakentamisen kanssa, jotta tilauskohtaiset osat voidaan toimittaa JIT -toimituksella. Jotta osat toimitetaan vaaditussa ajassa, tahtituotantojaksojen tulisi olla hyvin kommunikoitavissa jokaisen sidosryhmän kanssa ja sidosryhmien tulee olla sitoutuneena tahtiaikatauluun, mikä ei välttämättä ole täysin mahdollista käytännössä. Keskitetty hankinta ja JIT -toimitus voivat siis olla ratkaisu, jolla varmistetaan, että tarvittavat materiaalit ovat saatavilla oikealla hetkellä. (Dallasega, 2013)

Just-In-Time -toimitus on Lean -konsepti, millä tarkoitetaan materiaalien asennusta työmaalle välittömästi toimituksen yhteydessä, ilman varastointia. Tämän tyyppinen toimitus voi osittain vähentää työmaalla olevan varastotilan tarvetta ja lisätä laatua ja tehokkuutta. Hukkaa vähennetään toimittamalla tarvittavat materiaalit juuri silloin, kun niitä tarvitaan. (Tetik *et al.*, 2019) JIT -toimitukset ja setitykset voidaan yhdistää logistiikkakeskuksiin. Logistiikkakeskukset ovat logistiikkaratkaisuja, joissa keskukset säilyttävät materiaaleja jonkin aikaa, kunnes materiaalit ja tuotteet toimitetaan logistiikkatyöntekijöiden toimesta työmaille JIT -pohjaisesti. (Sullivan *et al.*, 2011) Logistiikkaratkaisuja, kuten logistiikkakeskuksia, voidaan hyödyntää tehokkaasti laajentamalla niiden toiminnan mittakaavaa. Logistiikkakeskukset voidaan konfiguroida käytettäviksi esimerkiksi kokoonpanoon ja varusteluun sekä suurien eräkokojen yhdistämiseen, lajitteluun ja erottelemiseen. (Hamzeh *et al.*, 2007)

Edistyneissä logistiikkaratkaisuissa yksi tyypillinen vaatimus on, että hankintatoiminta järjestetään keskitetysti eikä urakoitsijoiden toimesta. Keskitetyllä hankinnalla voidaan vahvistaa logistiikkaratkaisuja hankkimalla materiaalit keskitetysti ja toimittamalla ne logistiikkakeskukseen. Valvontatoimia tehostetaan keskitetyillä hankinnoilla. Keskitetyssä logistiikassa voidaan soveltaa kolmannen osapuolen logistiikkaa. Kolmannen osapuolen logistiikassa (eng. 3rd Party Logistics, 3PL) yritys ulkoistaa toimitusketjun kokonaispalveluita logistiikkapalveluiden tarjoajille. 3PL-palveluntarjoaja siis hallinnoi ja ohjaa asiakasyrityksensä materiaalivirtoja niihin kuuluvine toimintoineen. 3PL:n käyttö vähentää materiaalilogistiikkakustannuksia rakennusprojekteissa (Tetik *et al.*, 2019).

Useiden lean-konseptien, kuten setityksen, JIT -toimituksen ja tahtituotannon toteuttaminen yhdessä johtaa parannuksiin. Rakentamisessa on yritetty käyttää tahtituotantostrategiaa materiaali- ja informaationsuunnitteluun. Linnik et al (2013) raportoimassa hankkeessa setityssuunnitelmat ja JIT -toimitusten suunnittelu tehtiin tahtiaikaa mukaillen, josta havaittiin, että ammattiryhmät olivat paljon motivoituneempia setitysten ja JIT -toimitusten käyttöön, samalla kohottaen tuotannon tehokkuutta. (Linnik et al., 2013) Tuotantoprosessi on synkronoitava työmaalla tapahtuvan rakentamisen kanssa, jotta tilauksesta suunnitellut osat voidaan toimittaa JIT -toimituksella. Jotta osat toimitetaan vaaditussa ajassa, tahtituotantojaksojen tulee olla hyvin kommunikoitavissa jokaisen sidosryhmän kanssa ja sidosryhmien tulee olla sitoutuneena tahtiaikatauluun, mikä ei välttämättä käytännössä ole täysin mahdollista. Keskitetty hankinta ja JIT -toimitus voivat siis olla ratkaisu, jolla varmistetaan, että tarvittavat materiaalit ovat saatavilla oikealla hetkellä. (Dallasega, 2013)

Tetik et al. (2018) päätyivät tutkimuksessaan samaan tulokseen. Setityksellä vähennetään aikaa, jota on varattu tarvittavien osien etsimiseen kokoonpanoa varten. Settien toimittaminen suoraan sinne, missä osia käytetään, lisää työntekijöiden tuottavuutta, sillä työntekijät voivat keskittyä suoraan itse tehtävään, osien ja materiaalien etsimisen sijaan. Tutkimuksessa havaittiin, että kyseistä logistiikkaratkaisua käytettäessä tahtituotannossa työmaan käyttöaste oli korkeampi, kuin työmaalla, jossa tätä logistiikkaratkaisua ei käytetty. (Tetik et al., 2018) Täten voidaan todeta, että logistiikkaratkaisua, joka koostuu keskitetystä hankinnasta, setityksestä ja JIT -toimituksesta, voidaan käyttää tuottavuuden ja laadun parantamiseen.

Logistiikkayritysten tarjoamien logistiikkaratkaisujen käyttö tahtituotantoa soveltaessa siis johtaa parannuksiin rakennusprojekteissa. Hankinnan laatu paranee, materiaalihukka vähenee ja tahtiaikataulua pystytään noudattamaan, kun logistiikkaratkaisuna käytetään setitystä logistiikkakeskuksissa ja toimitusta JIT -toimituksilla, hankinnan ollessa keskitettyä. Kyseistä logistiikkaratkaisua käytettäessä tuotantoprosessi toteutetaan yhden kappaleen virtauksella, tuotantoprosessin hallinta helpottuu, hankinnan keskittäminen johtaa materiaalikustannussäästöihin ja ulkoisen variaation hallinnan avulla lyhennetään läpimenoaikoja. Näin ollen eduiksi nousevat tuotannon parantaminen työmaalla, materiaalihukan ja materiaalien kokonaiskustannusten väheneminen sekä virtaustehokkuuden parantaminen pienemmillä läpimenoajoilla.

4.3 Tutkimustulosten arviointi

Tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää tahtituotannon logistiikan toteutusta, sekä tuoda ilmi logistisia toimintamalleja, jotka parhaiten soveltuvat tahtituotantoon. Päätavoite saavutettiin tutkimuksen myötä, joskin tahtituotantoon liittyvän tutkimuskirjallisuuden suhteellisen vähäisyyden vuoksi aineistoa ei ollut valtavasti saatavilla. Logistiikkaa tutkittiin ei pelkästään tahtituotannon, vaan yleisen rakentamislogistiikan näkökulmasta teoreettisena tutkimuksena. Täten tutkimuksen tuloksia on oletettu loogisen päättelyn kautta päteväksi tahtituotantoon, vaikka tahtituotantoon liittyvää tutkimuskirjallisuutta ei aina riittävästi ole ollut saatavilla.

Tutkimuksessa esiteltiin onnistuneesti tyypillisiä logistisia toimintamalleja niin materiaalilogistiikan kuin tiedonkulunkin suhteen, sekä esiteltiin tahtituotantoa. Kirjallisuuskatsauksessa lähdettiin liikkeelle Lean -ajattelusta, tahtituotannosta ja logistiikan toteutusmalleista, ja päädyttiin tutkimaan rakennusalaalla käytännössä sovellettavia logistisia malleja tutkimus- ja artikkelilähteisiin perustuen. Kirjallisuuslähteet tarjosivat tutkimukselle oleellisesti tärkeää käsitteistöä, tietoa rakentamisen yleisistä toimintamalleista sekä tahtituotantoon liittyvää, spesifimpää tietoa.

Tutkimuksessa esiteltiin myös onnistuneesti tahtituotantoon liittyvien tutkimusten vahvistamana toimintamalli, joka soveltuu parhaiten tahtituotantoon. Keskitetyllä hankinnalla, logistiikkakeskuksessa setitettynä ja Just In Time -toimituksella hankinta osoittautui tutkimusten valossa tahtituotannon tuottavuutta parhaiten tehostavaksi logistiseksi vaihtoehdoksi. Tahtituotannolle yleinen päivittäinen palaverikäytäntö, työn edistymisen visualisointi ja tarkkailu, sekä tuotannon läpinäkyvyys havaittiin tiedonkulun logistiikkaa parantaviksi tekijöiksi.

Tutkimuksen esittämiä suosituksia ja havaintoja ei ole monilta osin testattu käytännössä, joten tutkimustulosten voidaan sanoa olevan suuntaa-antavia. Tutkimustuloksena esitelty logistiikkamalli perustuu tahtituotannon tutkimustietoon, mutta esimerkiksi tiedonkulkuun liittyvät päätelmät ovat vahvasti teorisoituja rakentamisen yleiseen tutkimuskirjallisuuteen pohjautuen, sillä tutkimusta tiedonkulusta ole saatavilla tahtituotannon suhteen. Jatkotutkimuksen aiheeksi näkisin tahtituotannon päivittäispalaverien vaikutuksen ammattiryhmien välisen tiedonkulun tehokkuuteen. Käytännön tutkimuksilla voitaisiin synnyttää keskustelua tiedonkulun, ihmisjohtamisen ja yhteistyön merkityksestä tahtituotannolla rakentamisessa.

4.4 Tutkimustulosten yleistettävyys

Tutkimus on tehty teoreettisena tutkimuksena, jossa empiriikan kautta ei tuoteta uutta aineistoa, vaan asioille pyritään löytämään selityksiä aiempaan tutkimuskirjallisuuteen nojautuen. Tutkimusaineistoa on kerätty pääosin länsimaisesta tutkimuskirjallisuudesta. Tahtituotannon käyttö ei ole vielä maailmanlaajuisesti yleistynyt, joten tutkimuksessa käytetty tutkimuskirjallisuuskin keskittyy Suomessa, Yhdysvalloissa ja Saksassa tehtyihin havaintoihin tahtituotannon saralla. Tuloksia voitaneen siis yleistää länsimaiseen rakennusteollisuuteen sopiviksi.

Tutkimuksessa tehdyt yleistyksiset perustuvat tutkimuskirjallisuudesta tehtyihin tulkintoihin. Tahtituotannon suhteellisen tuoreuden vuoksi siitä saatavilla oleva tutkimustieto on verrattain vähäistä, eikä yleistettävyuden suhteen tarkoituksenmukaisen aineiston kokoaminen ole välttämättä vielä mahdollista.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Käytettäessä tahtituotantoa logistiikkaratkaisujen kanssa voidaan havaita, että logistiikka kohottaa tahtituotannolla jo itsessään saavutettuja etuja. Keskitetysti hankitut logistiikkapalvelujen tuottajat vähentävät hukkaa ja kustannuksia. Logistiikkakeskuksien käyttö setitetyillä JIT -toimituksilla vaikuttaisi tutkimustiedon valossa olevan toimiva ratkaisu tahtituotannon tehokkuuden kasvattamiseksi.

Logistiikkakeskuksilla on suuri potentiaali rakennusalan toiminnassa. Logistiikkakeskuksissa tehtävä esikokoonpano ja paketointi vähentää työmaalla tarvittavien erikoistuneiden työntekijöiden tarvetta. Tämä vähentää kustannuksia pääurakoitsijalle, koska rakennusaika lyhenee entisestään ja erikoistuneet työntekijät ovat kalliita. Setityksellä vähennetään aikaa, jota on varattu tarvittavien osien etsimiseen kokoonpanoa varten. Settien toimittaminen suoraan sinne, missä osia käytetään, lisää työntekijöiden tuottavuutta, sillä työntekijät voivat keskittyä suoraan itse tehtävään, osien ja materiaalien etsimisen sijaan. Tutkimukset osoittavat, että logistiikkaratkaisua käytettäessä tahtituotannossa työmaan käyttöaste oli korkeampi, kuin työmaalla, jossa logistiikkaratkaisua ei käytetty. Täten voidaan todeta, että logistiikkaratkaisua, joka koostuu keskitetystä hankinnasta, setityksestä ja JIT -toimituksesta, voidaan käyttää tuottavuuden ja laadun parantamiseen.

Tahtituotannolle haitallista ulkoista vaihtelua voidaan siis vähentää spesifisellä logistiikkaratkaisulla, jossa materiaalin keräily ja setitys tapahtuu logistiikkakeskuksessa. Tahti- ja logistiikkaratkaisujen toteutus kulkevat käsi kädessä, ja siksi rakennusteollisuus voisi oppia esimerkiksi telakkateollisuudesta kehittäessään logistisia käytäntöjä tahtituotannon tukemiseksi. Logistiikka on tärkeä tahdin mahdollistaja, koska materiaalien saatavuus voidaan varmistaa laadukkaalla logistiikan ja hankinnan hallinnan avulla. Lisäksi myös yksityiskohtainen suunnittelu vahvistaa tahtiaikataulua. Tulevaisuuden tutkimuksessa tulisi selvittää logistiikan vaikutusta tahtituotantoon hyödyntämällä tapaustutkimuksia.

Logistiikkaratkaisun hyödyntäminen tahdin toteutuksessa tehostaa myös tahtijärjestystä ja aikataulua. Tällöin on nimittäin noudatettava ennalta määrättyä aikataulua ja paikan päällä ei ole saatavilla materiaalia ennen sen suunniteltua käyttöajankohtaa eikä työmaalla ole suunnittelemattomia, tahtiaikataulun ulkopuolisia aktiviteetteja. Tämä vähentää suunnittelemattomien toimintojen aiheuttamaa uusintatyötä, jolloin tuotantoprosessin hallinnan taso paranee.

Tahtituotannon ohjaus lisää vakautta ja luotettavuutta, parantaa ongelmanratkaisukykyä ja lisää läpinäkyvyyttä, mikä parantaa toimintojen sujuvuutta. Informaatiovirtauksen ja tehokkaan tiedonkulun toteutus vaatii tehokasta päivittäisjohtamista. Ihmisten kanssa toimiminen, vuorovaikutus ja yhteistoiminta vaatii ihmisjohtamista ja yhteisymmärryksen luomista. Yhteisymmärrys on tulosta työryhmien jäsenten sitouttamisesta yhteiseen tarkoitukseen. Tahtiaikasuunnittelu antaa mahdollisuuden koko tuotantotiimille, asentajista esimiehiin, kehittää yhteisymmärrystään kokonaistuotantostrategiasta. Työhön asetettu tahtiaika auttaa kehittämään päivittaiset tavoitteet työntekijöille. Tämä mahdollistaa päivittäisen tuotannon pysymisen suunnitelmien mukaisena, koska tahtiajan suunnitteluprosessissa tuotantojärjestelmä on suunniteltu tasaisin väliajoin vapautuvien työosuuksien ympärille. Tahditettu tavoiteaika palvelee päivittäisen tavoitteen lisäksi myös työntekijän merkitystä lisäävänä tehtävänä ja tarjoaa selkeyttä siitä, missä työntekijät työskentelevät seuraavaksi.

KÄSITTEISTÖ

Hukka

Hukalla tarkoitetaan toimintoja yrityksen prosesseissa, joilla ei tuoteta asiakkaalle lisäarvoa. Lean -periaatteiden mukaan yrityksen toimintoja voidaan jakaa kolmeen osalueseen: arvoa tuottaviin, arvoa tuottamattomiin välttämättömiin toimintoihin ja arvoa tuottamattomiin toimintoihin. Arvoa tuottamattomia toimintoja eli hukkaa ovat tarpeeton kuljettaminen, liiallinen varastointi, odottaminen, turha liike, ylituotanto, ylijalostus ja puutteet (Hill, 2018). Lean -rakentaminen pyrkii vähentämään tai eliminoimaan rakennustoiminnan hukkaa. Yksittäisten toimintojen tehostaminen ei välttämättä paranna kokonaisprosessin tehokkuutta. Hukkaa voi syntyä siirrettäessä toiminnosta toiseen viivästyksinä, korjattavina vikoina ja niin edelleen. Leania lisätään vähentämällä tai eliminoimalla prosessin kokonaistehokkuuden lisäämisen toimintojen välillä syntyvää hukkaa (Forbes and Ahmed, 2011).

Arvo

Arvo määritellään loppuasiakkaan kokemuksena tarjotusta palvelusta tai tuotteesta. Arvo voidaan määritellä prosessina tai tuotteena, josta asiakas saa oikeassa paikassa ja oikeaan aikaan prosessilta tai tuotteelta vaaditut ominaisuudet. Arvon päätekijöitä ovat laatu, kustannukset, palvelu ja läpimenoaika. Pyrkimällä maksimoimaan näiden muuttujien lopputuloksen voidaan saavuttaa mahdollisimman suurta arvoa (Naylor *et al.*, 1999). Arvo syntyy asiakkaan päämäärien ja keinojen välisen neuvotteluprosessin kautta. Suunnittelijan ensimmäinen rooli on tehdä asiakkaille selväksi heidän toiveidensa seuraukset, minkä jälkeen asiakkaat voivat halutessaan muokata päämääriään. Asiakkaat voivat ja heidän tulee määritellä liiketoimintansa tarve ja antaa tämä määritelmä panokseksi suunnitteluprosessiin. Tällaiset liiketoiminnan tarpeiden määritelmät tekevät kuitenkin poikkeuksetta oletuksia prosessiin käytettävistä keinoista, kuten esimerkiksi sen, että tarve voidaan täyttää tietyssä ajassa ja tietyllä hinnalla. (Ballard and Howell, 1998)

Arvovirta

Arvovirta edustaa tuotteen tai palvelun luomiseen tarvittavia toimia sen saattamiseksi raaka-aineesta asiakkaalle valmiissa muodossa päätyvään lopputuotteeseen. Arvovirrat sisältävät sekä lisäarvoa että arvoa tuottamatonta toimintaa. Arvovirtakartat havainnollistavat prosesseja, tunnistavat hukkalähteet ja erottavat toisistaan niitä

lisääarvoa tuottavista toiminnoista, jotka ovat kriittisiä asiakkaiden tarpeiden kannalta. (Forbes and Ahmed, 2011)

Arvovirran kartoitus

Arvovirran kartoitus (eng. value stream mapping, VSM) osoittaa materiaali- ja tietovirrat, joita tarvitaan tuotosten tuottamiseen. Kartoitus auttaa käyttäjiä ymmärtämään prosessia ja tunnistamaan hukkalähteet erottamalla arvoa tuottamattomat ja arvoa tuottavat toiminnot. VSM edellyttää prosessin jokaisen vaiheen tunnistamista, painottaen sen tunnistamista, missä toiminta tapahtuu. Kartoituksessa on kerätään tietoja sellaisista tekijöistä kuin sykli-aika, vaihto-aika, työ-aika, romumäärät ja tuotantoerän koot. Valmistunut arvovirtakartoitus paljastaa alueita, joita voidaan parantaa. Yleensä kartoitusta tutkii tiimi, joka ymmärtää prosessia ja voi tehdä kartoitukseen muutoksia suositeltujen parannusten mukaan. Kartoituksen tarkoituksena on luoda tilakartta, jossa prosessit on parannettu maksimoimalla lisäarvoa tuottava aika ja minimoimalla hukka. (Forbes and Ahmed, 2011)

Virtaus

Lean-ajattelun tavoitteena on tuotteen jatkuva kulku prosessin toiminnosta toiseen ilman viivästyksiä, pysähdyksiä tai keskeneräisen tuotteen varastoimista. Tätä kutsutaan yksiosaiseksi virtaukseksi. Esimerkkejä virtaustyypeistä ovat liiketoiminnan virtaus, joka liittyy projektin tietojen virtaamiseen (sopimukset, suunnitelmat jne.), työmaavirtaus, joka sisältää toiminnot ja tavan, jolla toiminnot on suoritettava, sekä tarjontavirtaus, jolla tarkoitetaan projektissa käytettävien materiaalien virtausta. (Forbes and Ahmed, 2011) Yksiosainen virtaus ei sovi jokaiseen paikkaan, vaan silloin käytetään puskurivarastoja. Virtauttamisella tarkoitetaan prosessien eri vaiheiden toteuttamista niin, että toiminta etenee hallitusti, keskeneräinen toiminta on mahdollisimman vähäistä sekä resurssikuormitus tasaista. (Saari, 2018)

Just-In-Time (JIT)

Just-In-Time on Lean -konsepti, jolla tarkoitetaan toimintatapaa, jossa materiaalitoimitukset toimitetaan työmaalle asennettavaksi välittömästi, ilman väli-varastointia. Hukkaa vähennetään toimittamalla tarvittavat materiaalit juuri silloin, kun niitä tarvitaan. JIT -toimitukset voidaan yhdistää setityksiin. (Tetik *et al.*, 2019)

Imuohjaus

JIT-filosofian mukaan tuotantoa imee järjestelmästä asiakkaan kysyntä. Tämä on suuriin eräkokoihin perustuvan massatuotannon, työntöohjauksen, vastakohta (Forbes and Ahmed, 2011). Imuohjaus perustuu siis asiakastarpeeseen, jolloin tuotanto käsittelee

materiaaleja vain, jos ne pystytään käsittelemään välittömästi. Imuohjaus pyrkii varmistamaan työn aloittamisen estävien esteiden poiston ennen työn aloittamista. (Ghanem *et al.*, 2018)

Odotusaika

Tämä on kaikkien vaiheiden summa järjestelmässä, jossa tuote tai palvelu odottaa muutosta. Mitä pidempi odotusaika, sitä huonompi tehokkuus, koska odotusaika ei tuota lisäarvoa. Odotusaikaan vaikuttavat suoraan sellaiset asiat, kuten laitteiden seisokit, materiaalipula ja epävarmuus tuotantolinjaston tasapainossa. Odotusaika on yleensä pisin vaihe useimmissa järjestelmissä, eli täten myös suurin arvoa tuottamatonta toimintaa (Forbes and Ahmed, 2011).

Setitys, asennussarja, asennuspaketti (eng. Kitting)

Setityksellä, asennussarjoilla tai asennuspaketeilla tarkoitetaan tuotteiden tai komponenttien järjestämistä, pakkaamista ja toimittamista yhtenä pakettina. Ajatuksena on, että sarja valmistetaan logistiikkakeskuksessa ja toimitetaan valmiina käytettäväksi työmaalle. (Kujansuu *et al.*, 2020)

Asennusaika

Prosessiin valmistaudutaan säätämällä laitteita, materiaaleja, menettelytapoja ja niin edelleen käsittelytoimia ennakkoiden. Arvoa ei lisätä tässä vaiheessa (Forbes and Ahmed, 2011).

Käsittelyaika

Tämä on ainoa lisäarvovaihe. Käsittelyaika on aika, jolloin laitteet ja/tai käyttäjät muuttavat tuotetta. Se on kaikkien käsittelytoimintojen summa (Forbes and Ahmed, 2011).

Kiertoaika

Kiertoaika on aika, joka kuluu alusta loppuun tehtävän suorittamiseen, tuotteen luomiseen tai palvelun tarjoamiseen.

Arvonluontiaika

Arvonluontiaika on prosessiaika, joka kuluu raaka-aineiden, osien tai komponenttien ja tietojen muuntamiseen asiakkaan haluamaksi käyttökelpoiseksi tuotteeksi tai palveluksi.

Läpimenoaika

Läpimenoaika on aika, joka kuluu yhden tapahtuman siirtämiseen koko prosessin läpi – ennen kuin toinen tapahtuma voi alkaa.

Tahtituotanto

Tuotantomalli, jossa rakennuskohde jaetaan tasaisesti eteneviin tahtialueisiin. Tahtialueiden tehtävät jaetaan työpaketteihin ja tuotanto tapahtuu tahtiajan puitteissa (Saari, 2018).

Tahtiaika

Tahtiaika edustaa nopeutta, jolla asiakas haluaa tai kuluttaa tuotetta. Tahtiaika on käytettävissä oleva tuotantoaika jaettuna asiakkaan kysynnällä. Tahtiajan tarkoitus on sovittaa tuotanto tarkasti kysyntään. Ihannetapauksessa prosessin tulisi perustua tahtiaikaan, jotta voidaan tuottaa tai olla tahdissa asiakkaiden kysynnän kanssa (Forbes and Ahmed, 2011).

Tuotannon tehokkuus: Tuotettu yksikkö / Tahtiaika.

LÄHTEET

Aalto-yliopisto (2019) *Kun rakentamisen pulssi on vakaa, tulokset yllättävät* | Aalto-yliopisto. Available at: <https://www.aalto.fi/fi/uutiset/kun-rakentamisen-pulssi-on-vakaa-tulokset-yllattavat> (Accessed: 13 May 2022).

Agapiou, A. *et al.* (1998) 'The role of logistics in the materials flow control process', *Construction Management and Economics*, 16(2), pp. 131–137. doi:10.1080/014461998372420.

Ahonen, A. *et al.* (2020) 'Rakennusalan kilpailukyky ja rakentamisen laatu Suomessa', p. 212.

Ballard, G. (1997) 'Lookahead Planning: The Missing Link in Production Control', *Proceedings of the 5th Annual Conference of the International Group for Lean Construction* [Preprint].

Ballard, H. and Howell, G. (1998) 'What Kind of Production Is Construction?', p. 8.

Ballard, H.G. (2000) 'THE LAST PLANNER SYSTEM OF PRODUCTION CONTROL', p. 192.

Barbosa, F., Woetzel, J. and Mischke, J. (2017) 'Reinventing construction: A route of higher productivity. McKinsey Global Institute.' McKinsey Global Institute. Available at: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/operations/our%20insights/reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/mgi-reinventing-construction-executive-summary.pdf>.

Ben Naylor, J., Naim, M.M. and Berry, D. (1999) 'Leagility: Integrating the lean and agile manufacturing paradigms in the total supply chain', *International Journal of Production Economics*, 62(1–2), pp. 107–118. doi:10.1016/S0925-5273(98)00223-0.

Bhamu, J. and Singh Sangwan, K. (2014) 'Lean manufacturing: literature review and research issues', *International Journal of Operations & Production Management*, 34(7), pp. 876–940. doi:10.1108/IJOPM-08-2012-0315.

Binninger, M. *et al.* (2018) 'Short Takt Time in Construction – a Practical Study', in. *26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Chennai, India, pp. 1133–1143. doi:10.24928/2018/0472.

Binninger, M., Dlouhy, J. and Haghsheno, S. (2017) 'Technical Takt Planning and Takt Control in Construction.', in. *25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Heraklion, Greece, pp. 605–612. doi:10.24928/2017/0297.

Blockley, D.I. and Godfrey, P. (2000) *Doing it differently: Systems for rethinking construction*. Thomas Telford.

Bølviken, T., Aslesen, S. and Koskela, L. (2015) 'WHAT IS A GOOD PLAN?', p. 11.

Building 2030 (2019) 'Building 2030: Tahti suunnittelussa ja tuotannossa, loppuraportti'.

Christopher, M. (2011) *Logistics & supply chain management*. 4. ed. Harlow: Financial Times, Prentice Hall.

Dallasega, P. (2013) 'Value Stream Engineering – A case study of process optimization for the supply chain of window installation', p. 17.

- Dave, B. *et al.* (2014) 'ADDRESSING INFORMATION FLOW IN LEAN PRODUCTION MANAGEMENT AND CONTROL IN CONSTRUCTION', p. 13.
- Dlouhy, J. *et al.* (2016) 'THREE-LEVEL METHOD OF TAKT PLANNING AND TAKT CONTROL – A NEW APPROACH FOR DESIGNING PRODUCTION SYSTEMS IN CONSTRUCTION', p. 10.
- Eliwa, H. *et al.* (2020) 'Information Technology Applications in Construction Organizations: A Systematic Review', in *Proceedings of the 6th New Zealand Built Environment Research Symposium, Auckland, New Zealand*.
- ETLA (2020) *Rakennusalalla on merkittävä rooli Suomen kansantaloudessa, mutta alan tuottavuus polkee paikallaan, Etila*. Available at: <https://www.etla.fi/ajankohtaista/rakennusalalla-on-merkittava-rooli-suomen-kansantaloudessa-mutta-alan-tuottavuus-polkee-paikallaan/> (Accessed: 12 April 2022).
- Forbes, L.H. and Ahmed, S.M. (2011) *Modern construction: lean project delivery and integrated practices*. Boca Raton, FL: CRC Press (Industrial innovation series).
- Frandsen, A. (2019) 'TAKT TIME PLANNING AS A WORK STRUCTURING METHOD TO IMPROVE CONSTRUCTION WORK FLOW', p. 229.
- Frandsen, A., Berghede, K. and Tommelein, I.D. (2013) 'TAKT TIME PLANNING FOR CONSTRUCTION OF EXTERIOR CLADDING', p. 11.
- Frandsen, A.G. and Tommelein, I.D. (2016) 'TAKT TIME PLANNING OF INTERIORS ON A PRE-CAST HOSPITAL PROJECT', *Production Planning and Control*, p. 10.
- Ghanem, M. *et al.* (2018) 'A New Perspective of Construction Logistics and Production Control: An Exploratory Study', in. *26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Chennai, India, pp. 992–1001. doi:10.24928/2018/0540.
- Haghsheno, S. *et al.* (2016) 'HISTORY AND THEORETICAL FOUNDATIONS OF TAKT PLANNING AND TAKT CONTROL', p. 10.
- Hamzeh, F.R. *et al.* (2007) 'Logistics Centers to Support Project-Based Production in the Construction Industry'. doi:10.13140/RG.2.1.4328.6563.
- Heinonen, A. and Seppänen, O. (2016) 'TAKT TIME PLANNING IN CRUISE SHIP CABIN REFURBISHMENT: LESSONS FOR LEAN CONSTRUCTION', in.
- Hines, P., Holweg, M. and Rich, N. (2004) 'Learning to evolve: A review of contemporary lean thinking', *International Journal of Operations & Production Management*, 24(10), pp. 994–1011. doi:10.1108/01443570410558049.
- Hopp, W.J. and Spearman, M.L. (2004) 'To Pull or Not to Pull: What Is the Question?', *Manufacturing & Service Operations Management*, 6(2), pp. 133–148. doi:10.1287/msom.1030.0028.
- Keskiniva, K., Saari, A. and Junnonen, J.-M. (2020) 'Takt Planning in Apartment Building Renovation Projects', *Buildings*, 10(12), p. 226. doi:10.3390/buildings10120226.
- Knaack, U., Chung-Klatte, S. and Hasselbach, R. (2011) *Prefabricated Systems: Principles of Construction*. DE GRUYTER. doi:10.1515/9783034611404.
- Koskela, L. (1992) 'Application of the new production philosophy to construction', *CIFE Technical Report*, (#72), pp. 15–17, 24.
- Koskela, L. (2000) *An exploration towards a production theory and its application to construction*. Espoo: Technical Research Centre of Finland (VTT-publications, 408).

Koskela, L. and Howell, G. (2002) 'THE THEORY OF PROJECT MANAGEMENT: EXPLANATION TO NOVEL METHODS', p. 11.

Koski, H. *et al.* (2009) *Rakennustyömaan toimitusten ohjaus*.

Kujansuu, P. *et al.* (2020) 'How Does Takt Production Contribute to Trade Flow in Construction?', in *28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, Berkeley, California, USA, pp. 445–454. doi:10.24928/2020/0069.

Lee, H.L. and Whang, S. (2000) 'Information sharing in a supply chain', *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 1(1), p. 79. doi:10.1504/IJMTM.2000.001329.

Lehtovaara, J. *et al.* (2021) 'How takt production contributes to construction production flow: a theoretical model', *Construction Management and Economics*, 39(1), pp. 73–95. doi:10.1080/01446193.2020.1824295.

Linnik, M., Berghede, K. and Ballard, G. (2013) 'An experiment in takt time planning applied to non-repetitive work', in *21st annual conference of the international group for lean construction*, pp. 31–2.

Logistiikan Maailma (2014a) 'Tilauksesta suunnittelu (ETO) – Logistiikan Maailma'. Available at: <https://www.logistiikanmaailma.fi/tuotanto/tilauksen-kohdennuspiste-opp/tilauksesta-suunnittelu-eto/> (Accessed: 12 May 2022).

Logistiikan Maailma (2014b) 'Varasto-ohjautuva tuotanto (MTS) – Logistiikan Maailma'. Available at: <https://www.logistiikanmaailma.fi/tuotanto/tilauksen-kohdennuspiste-opp/varasto-ohjautuva-tuotanto-mts/> (Accessed: 12 May 2022).

Lu, Y. *et al.* (2015) 'Information and Communication Technology Applications in Architecture, Engineering, and Construction Organizations: A 15-Year Review', *Journal of Management in Engineering*, 31(1). doi:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000319.

Meidutė, I. (2010) 'COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEFINITIONS OF LOGISTICS CENTRES', p. 7.

Pattanaik, L.N. and Sharma, B.P. (2009) 'Implementing lean manufacturing with cellular layout: a case study', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42(7–8), pp. 772–779. doi:10.1007/s00170-008-1629-8.

Peltokorpi, A., Lavikka, R. and Tetik, M. (2019) 'Rakentamisen logistiikkaratkaisut', p. 14.

Phelps, A.F. (2012) *The Collective Potential: A Holistic Approach to Managing Information Flow in Collaborative Design and Construction Environments*. Turning Point Press. Available at: <https://books.google.fi/books?id=XpimuAAACAAJ>.

Phelps, A.F. (2013) 'Managing Information Flow on Complex Projects', p. 4.

Rakennuslehti (2017) *Rakennusalalla työn tuottavuus ei ole kasvanut 40 vuodessa - onko allianssista tai leanista apua?*, *Rakennuslehti*. Available at: <https://www.rakennuslehti.fi/2017/09/rakennusalalla-tyon-tuottavuus-ei-ole-kasvanut-40-vuodessa-onko-allianssista-tai-leanista-apua/> (Accessed: 31 March 2022).

Rakennuslehti (2019) *Onko tahtituotanto työmaalle riski? - 25 mestarin kokemukset kertovat joustavuudesta ja laadun paranemisesta*, *Rakennuslehti*. Available at: <https://www.rakennuslehti.fi/2019/11/onko-tahtituotanto-joustamaton-riskikokeilu-building-2030-testasi-asian-pilottiprojekteissa/> (Accessed: 13 May 2022).

Saari, A. (2018) *Virtauttaminen*. Arto Saari. Available at: <https://docplayer.fi/111525514-Virtauttaminen-arto-saari.html> (Accessed: 31 March 2022).

- Seppänen, O. (2009) *Empirical Research on the Success of Production Control in Building Construction Projects*.
- Seppänen, O. (2014) 'A COMPARISON OF TAKT TIME AND LBMS PLANNING METHODS', *Production Planning and Control*, p. 12.
- Seppänen, O. et al. (2019) 'Intelligent Construction Site (ICONS) Project Final Report', p. 50.
- Seppänen, O. and Peltokorpi, A. (2016) 'A NEW MODEL FOR CONSTRUCTION MATERIAL LOGISTICS: FROM LOCAL OPTIMIZATION OF LOGISTICS TOWARDS GLOBAL OPTIMIZATION OF ON-SITE PRODUCTION SYSTEM', p. 10.
- Shah, R. and Ward, P.T. (2003) 'Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance', *Journal of Operations Management*, 21(2), pp. 129–149. doi:10.1016/S0272-6963(02)00108-0.
- Shah, R. and Ward, P.T. (2007) 'Defining and developing measures of lean production', *Journal of Operations Management*, 25(4), pp. 785–805. doi:10.1016/j.jom.2007.01.019.
- Singh, R. (1998) 'Lean manufacturing: changing paradigms in product manufacturing, design & supply'.
- Skjott-Larsen, T. et al. (2007) *Managing the Global Supply Chain*. Copenhagen Business School Press DK.
- Soibelman, L. and Kim, H. (2002) 'Data Preparation Process for Construction Knowledge Generation through Knowledge Discovery in Databases', *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16(1), pp. 39–48. doi:10.1061/(ASCE)0887-3801(2002)16:1(39).
- Sugimori, Y. et al. (1977) 'Toyota production system and Kanban system Materialization of just-in-time and respect-for-human system', *International Journal of Production Research*, 15(6), pp. 553–564. doi:10.1080/00207547708943149.
- Sullivan, G., Barthorpe, S. and Robbins, S. (2011) *Managing construction logistics*. John Wiley & Sons.
- Sundquist, V., Gadde, L.-E. and Hulthén, K. (2018) 'Reorganizing construction logistics for improved performance', *Construction Management and Economics*, 36(1), pp. 49–65. doi:10.1080/01446193.2017.1356931.
- Sundström, K. et al. (2009) *Rakennustyömaan toimitusten ohjaus ja materiaalinhallinta. Rakennusteollisuus (Rakennusteollisuuden KETJU-projektin raportteja)*.
- Tanskanen, K., Holmström, J. and Öhman, M. (2015) 'Generative Mechanisms of the Adoption of Logistics Innovation: The Case of On-site Shops in Construction Supply Chains', *Journal of Business Logistics*, 36(2), pp. 139–159. doi:10.1111/jbl.12089.
- Tetik, M. et al. (2018) 'Impacts of an assembly kit logistic solution in renovation projects: a multiple case study with camera-based measurement', in *EurOMA proceedings*. European Operations Management Association (EurOMA). Available at: <http://euroma2018.org/>.
- Tetik, M. et al. (2019) 'Combining Takt Production With Industrialized Logistics in Construction', in. *27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, Dublin, Ireland, pp. 299–310. doi:10.24928/2019/0156.
- Thomas, H.R. (2015) 'Benchmarking Construction Labor Productivity', *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 20(4), p. 04014048. doi:10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000141.
- Titus, S. (2005) 'Managing information flow in construction supply chains', p. 12.

Tommelein, I.D. (2017) 'Collaborative Takt Time Planning of Non-Repetitive Work', in. *25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Heraklion, Greece, pp. 745–752. doi:10.24928/2017/0271.

Vatne, M.E. and Drevland, F. (2016) 'PRACTICAL BENEFITS OF USING TAKT TIME PLANNING: A CASE STUDY', *Production Planning and Control*, p. 10.

Vrijhoef, R. and Koskela, L. (2000) 'The four roles of supply chain management in construction', *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 6(3–4), pp. 169–178. doi:10.1016/S0969-7012(00)00013-7.

Womack, J.P. and Jones, D.T. (1990) *The Machine That Changed The World*.

Womack, J.P. and Jones, D.T. (2003) 'Lean Thinking—Banish Waste and Create Wealth in your Corporation', *Journal of the Operational Research Society*, 48(11), pp. 1148–1148. doi:10.1057/palgrave.jors.2600967.

Zeng, S.X., Lou, G.X. and Tam, V.W.Y. (2007) 'Managing information flows for quality improvement of projects', *Measuring Business Excellence*, 11(3), pp. 30–40. doi:10.1108/13683040710820737.