

Jesse Forsell

# TAHTITUOTANNON VIRTAUKSEN MITTAUS ASUNTORAKENTAMISEN SISÄVALMISTUSVAIHEESSA

Diplomityö  
Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Tarkastajat: Professori Arto Saari, väitöskirjatutkija Kimmo Keskiniva  
Toukokuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Jesse Forsell: Tahtituotannon virtauksen mittaus asuntorakentamisen sisävalmistusvaiheessa  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Vastuuohjaaja ja tarkastaja: Professori Arto Saari  
Tarkastaja: Väitöskirjatutkija Kimmo Keskiniva  
Toukokuu 2021

---

Tutkimuksen tavoitteena oli muodostaa digitaalista dataa hyödyntäen kuvaus asuntorakentamisprosessin sisätyövaiheen virtauksesta eli töiden etenemisen vakaudesta. Tutkimus toteutettiin tapaustutkimuksena tahtiaikataulutantoa käyttäneestä rakennuskohteesta käyttäen aineistona rakennusaikana kerättyä Fira Sitedrive -aikatauluohjelmistosta saatua dataa. Analysoidun tiedon validiteetti varmistettiin työmaahenkilöstön haastatteluilla.

Tutkimus koostuu teoriaosuudesta ja empiirisestä osuudesta. Teoriaosuudessa käsitellään lean-filosofian taustaa sekä sen soveltamista rakennusosalalla, tahtiaikataulua ja sen ohjausperiaatteita, sekä virtausta ja sen mittaamiseen käytettäviä työkaluja. Teoriaosuuden aineistona toimivat erityisesti rakennusalan tutkijaryhmien eri julkaisut, sekä teollisuudessa käytetty lean-filosofiaan ja tilastollista laadunhallintaa käsittelevä kirjallisuus. Empiirisessä osuudessa kuvataan tutkimuskohteen sisävalmistusvaiheen prosessi ja työmaahenkilöstön tuotannonohjauksessa käyttämät menetelmät ja työkalut. Prosessikuvausta täydennetään työmaahenkilöstön haastatteluilla. Työmaalta kerätylle datalle suoritetaan data-analyysi, jonka perusteella voidaan kuvata sisävalmistusvaiheen töiden etenemistä kohteessa sekä graafisesti että eri tunnusluvuin. Data-analyyseistä voidaan myös tehdä päätelmiä yksittäisten työvaiheiden kulusta.

Tutkimuksessa havaittiin, että työmaalta kerätty data on tutkimuskohteen tapauksessa käyttökelpoista data-analyyysiin ja analyysin tulokset oli mahdollista varmentaa haastatteluin. Tärkeänä havaintona voidaan pitää, että työmaan keräämässä datassa on runsaasti hyödyntämispotentiaalia, joka jää nykyisellään osin käyttämättä. Tutkimuksessa esitetäänkin kehitysideoita datan mahdollisista käyttökohteista, jotka voisivat hyödyttää sekä projektitason tuotannonohjausta kuin työmaahenkilöstöäkin. Näitä ovat esimerkiksi erilaiset automaattisesti luodut, reaaliaikaiset koon-  
tinäkymät työmaan aikataulutilanteesta ja työvaiheiden, työmaiden tai urakoitsijoiden suorituskyvyn keskinäinen vertailu yhtenäisellä tunnuslukujärjestelmällä.

Sisävalmistusvaiheen prosessia tutkittaessa pystyttiin myös tunnistamaan tutkimuskohteen aikatauluohjaukseen vaikuttaneita tekijöitä, joiden vaikutukset ovat havaittavissa myös data-analyyseistä. Näitä havaintoja ovat muun muassa organisaation kokeman oppimisen ja ennakoivan tehtävänsuunnittelun merkitys, onnistuneet alirakoitsijahankinnat sekä tiedolla johtamisen ja tilannekuvan merkitys työmaan päätöksenteossa. Toimivien digitaalisten tuotannonsuunnittelu- ja ohjaustyökalujen koettiin haastatteluissa tukevan päätöksentekoa ja antavan työnjohdolle paremman käsityksen työmaan kokonaistilanteesta, mitä voidaan pitää oleellisena asiana myös tahtiaikataulutanto onnistumisen kannalta.

Koska tutkimus rajoittuu vain yhteen tutkimuskohteeseen, tulisi jatkotutkimuksena toteuttaa kattavampi data-analyysi esimerkiksi eri työmaiden väliltä, jotta tutkimuksessa käytettyjen menetelmien luotettavuutta voitaisiin arvioida paremmin. Lisäksi tulisi kehittää menetelmä suorituskyvyn ja virtauksen analysoimiseksi reaaliaikaisesti työmaan tilannekuvan parantamiseksi.

Avainsanat: Tahti, tahtituotanto, tahtiaikataulu, lean-rakentaminen, virtaus, data-analyysi, KPI

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Jesse Forsell: Measurement of takt time production flow in interior phase of residential construction

Master of Science Thesis

Tampere University

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Responsible supervisor and examiner: Professor Arto Saari

Examiner: Doctoral Student Kimmo Keskiniva

May 2021

---

The purpose of this study was to form a representation of the process flow of the interior works in an apartment building using digital data gathered during construction. The study was conducted as a case study. The studied construction project was executed using takt time production. The data was gathered from the scheduling and production software Fira Sitedrive, used by site personnel, and its validity was tested and proofed by interviews.

The study is divided into a theoretical and an empirical section. In the theory section, the background of lean philosophy and its applications in construction are introduced alongside takt time production planning theory. The concept of flow in industrial production and ways to measure it are also discussed. The theory sections lie heavily on papers from lean construction research groups and literature considering statistical quality control and flow management in manufacturing industry. In the empirical section, the case subjects' interior workflow along with the methods of management and the digital tools involved in production control of the interior phase are described. This process description is supplemented by interviewing the site personnel. A data analysis was conducted using the digital data gathered from the worksite. From the data analysis it was possible to determine the flow of the interior works both visually and using performance indicators, such as variability and lead time. It was also possible to see the progression of individual work trades and possible disturbances in their work. Finally, the results of the data analysis were used to answer the initial research questions. Various observations and development ideas from the site personnel's interviews were also included in the results.

It was noted that the data studied in the case was of high quality, and the results obtained from the data analysis could be verified with the interviews of site personnel. An important finding is that presently, there exists a lot of unused potential in the digital data gathered during construction. This study presents suggestions for utilizing said data, which could benefit both project level production control and site personnel. These include, for example, various automatically generated, real-time summaries of the project's status regarding schedule, and assessment of different worksites' or subcontractors' performance with a unified and simple method for measurement.

While describing the process for the interior works phase, success factors for the favorable outcome of the project were determined by the interviewees. Some of these observations are also observable from the data analysis. These factors include the significance of the organization's learning, proactive production planning, successful subcontractor procurement, and the importance of knowledge-based management in the decision making of the worksite. In the interviews, reliable digital production planning and control software applications were considered to both support decision making and give better situational awareness to the site personnel. Good situational awareness can also be considered as a key factor when successfully implementing takt time production.

It should be noted that this study is limited to just one case, so further research is strongly recommended in the form of data analyzes considering multiple work sites to assess the validity of the method used in this study. Methods for real-time performance analysis should be developed to further improve situational awareness on the worksite.

Keywords: Takt, takt production, takt time planning, lean construction, flow, data analysis, Key Performance Indicators

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

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö luo katsauksen lean-rakentamiseen, tahtituotantoon sekä myös rakennusalan digitalisaatioon. Työn myötä tietämykseni rakentamisen lean-kehittämisestä ja koko alan kehityssuunnasta kasvoi, mutta opittavaa on kuitenkin vielä valtavasti. Siksi onkin hienoa päästä pian soveltamaan diplomityöstä saatuja oppeja käytännön tasolla.

Haluan kiittää Fira Oy:tä työn mahdollistamisesta, sekä erityisesti Kasper Koivua diplomityön ohjauksesta ja palautteesta. Kiitos kuuluu myös koko Postipuiston tiimille! Haluan lisäksi kiittää Arto Saarta Tampereen yliopistolta työn tarkastajana ja ohjaajana toimimisesta, sekä Kimmo Keskinivaa työn tarkastamisesta ja arvokkaista kommentteista. Lisäksi annan kiitokseni Renelle vertaistukena toimimisesta.

Tämän työn myötä myös opintoni Tampereen yliopistossa ovat lähellä päätöstään. Opiskeluajasta erityisen antoisaa on tehnyt teekkaritoiminnassa aktiivisesti mukana oloinen, joten haluan kiittää kaikkia matkassa mukana olleita. Suuri kiitos kuuluu kaikille TARAKIn ja TRATTAn jäsenille, sekä erityisesti Päätalon kellarin pojille. Parempaa matkaseuraa en olisi voinut toivoa!

Lisäksi haluan kiittää perhettäni ja Siinaa kevään aikana saadusta tuesta ja kannustuksesta.

Tästä on hyvä jatkaa.

Lahdessa, 11.5.2021

Jesse Forsell

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Työn taustaa .....	1
1.2 Tutkimuksen tavoite, tutkimuskysymykset ja hypoteesit .....	2
1.3 Tutkimusmenetelmät ja tutkimusaineisto .....	4
1.4 Tutkimuksen rakenne ja rajaukset .....	4
2. KIRJALLISUUSKATSAUS .....	6
2.2 Lean-filosofian taustaa .....	6
2.3 Virtaus .....	10
2.4 Lean Construction .....	13
2.5 Virtaus rakentamisessa .....	15
2.6 Tahtiaikataulusuunnittelu ja -ohjaus .....	22
2.7 Mittauksen merkitys .....	26
2.8 Tilastollinen laadunhallinta .....	27
2.9 Rakentamisen virtauksen mittaus ja tunnusluvut .....	29
3. EMPIIRINEN TUTKIMUS .....	37
3.1 Tutkimusmenetelmät .....	37
3.2 Tutkimuskohteen kuvaus .....	38
3.3 Data-analyysin lähtötiedot .....	40
3.4 Data-analyysin toteutus .....	41
4. TULOKSET .....	43
4.1 Sisävalmistusvaiheen prosessi ja sen ohjaus .....	43
4.2 Sitedriven toiminnallisuudet ja käyttö työmaalla .....	47
4.3 Data-analyysin visualisoinnit .....	50
4.4 Virtauksen tunnusluvut .....	57
4.5 Kehitysehdotukset .....	62
5. YHTEENVETO JA POHDINTA .....	64
5.1 Tulosten arviointi ja pohdinta .....	64
5.2 Tulosten luotettavuuden arviointi .....	70
5.3 Jatkotutkimusaiheet .....	71
LÄHTEET .....	72
LIITE 1: TEEMAHAASTATELUN KYSYMYSRUNKO .....	78
LIITE 2: SISÄVALMISTUSVAIHEEN TOTEUTUNUT AIKATAULU .....	79
LIITE 3: SISÄVALMISTUSVAIHEEN TYÖVAIHEKOHTAISET TUNNUSLUVUT ....	80

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>Lean-filosofian ja sitä edeltäneiden tuotannonohjausmenetelmien historiaa. (Koskenvesa &amp; Sahlstedt 2011).....</i>	<i>7</i>
<b>Kuva 2.</b>	<i>14 lean-filosofian periaatetta. (Bertelsen et al. 2007, mukailtuna Liker 2004).....</i>	<i>8</i>
<b>Kuva 3.</b>	<i>TPS-talo (Liker 2004). Tässä tutkimuksessa käsitellään erityisesti korostettuja käsitteitä ja aihepiirejä.....</i>	<i>9</i>
<b>Kuva 4.</b>	<i>Tuotantoprosessin arvoketju, jossa valtaosa työstä on arvoa tuottamatonta eli hukkaa. (Liker 2004).....</i>	<i>11</i>
<b>Kuva 5.</b>	<i>Prosessin suorituskyvyn kuvaus Littlen lain mukaisesti. (Pound et al. 2014).....</i>	<i>12</i>
<b>Kuva 6.</b>	<i>Kingmanin kaava visualisoituna. (Frandsen 2019).....</i>	<i>13</i>
<b>Kuva 7.</b>	<i>Tuotantoprosessin osien kuvaus virtaavana prosessina. (mukailtu Henrich et al. 2007).....</i>	<i>16</i>
<b>Kuva 8.</b>	<i>Seuraavan asiakkaan periaate. (mukailtu Ward &amp; McElwee 2007).....</i>	<i>17</i>
<b>Kuva 9.</b>	<i>PPO-malli virtaukselle. (Sacks 2016).....</i>	<i>19</i>
<b>Kuva 10.</b>	<i>Todennäköinen suoritus aika tehtävälle ja puskurin vaikutus suoritus aikojen jakaumaan. (Frandsen 2019).....</i>	<i>20</i>
<b>Kuva 11.</b>	<i>Aikataulutehtävien kohina (noise) ja varianssi (variance) tahtiaikataulussa. (Frandsen et al. 2014).....</i>	<i>21</i>
<b>Kuva 12.</b>	<i>Tahtiaikataulun periaatekuva ja termistöä. (Dlouhy et al. 2019).....</i>	<i>23</i>
<b>Kuva 13.</b>	<i>TPTC-menetelmän aikataulutaset. (Dlouhy et al. 2016).....</i>	<i>25</i>
<b>Kuva 14.</b>	<i>Prosessin muutos hallitsemattomasta vakaaksi ja lopulta jatkuvan parantamisen sykliin siirtyminen. (Voehl et al. 2013).....</i>	<i>28</i>
<b>Kuva 15.</b>	<i>Virtauksen suorituskyvyn mittarit tahtiaikataulussa.....</i>	<i>32</i>
<b>Kuva 16.</b>	<i>Paikka-aikakaavio, jossa on esitetty eri työvaiheiden toteutunut etenemä kerroksittain. (Sacks et al. 2017).....</i>	<i>33</i>
<b>Kuva 17.</b>	<i>Yhdistettyä aikataulu- ja laatu havaintodataa Sitedrive- ja Congrid-sovelluksista. (Alhava et al. 2019).....</i>	<i>34</i>
<b>Kuva 18.</b>	<i>Tahtiaikataulun työpaketin toteuma (punaisella, vihreällä ja sinisellä) verrattuna suunniteltuun aikatauluun (harmaalla). (Keskiniva et al. 2021).....</i>	<i>35</i>
<b>Kuva 19.</b>	<i>Työvaiheiden suunniteltu ja toteutunut etenemä viikoittain. (Laine 2020).....</i>	<i>36</i>
<b>Kuva 20.</b>	<i>Asuinkerroksen pohjakuva ja lohkojako.....</i>	<i>39</i>
<b>Kuva 21.</b>	<i>Sitedrive-aikataulusta haetut tiedot maalaustöistä.....</i>	<i>42</i>
<b>Kuva 22.</b>	<i>Ote Firan sisävalmistusvaiheen prosessikuvauksesta.....</i>	<i>44</i>
<b>Kuva 23.</b>	<i>Ote A-portaan alkuperäisestä Sitedrive-aikataulusta.....</i>	<i>48</i>
<b>Kuva 24.</b>	<i>PPC:n seuranta Sitedrive-ohjelmassa.....</i>	<i>48</i>
<b>Kuva 25.</b>	<i>Suunniteltu tahtiaikataulu.....</i>	<i>50</i>
<b>Kuva 26.</b>	<i>Sisävalmistusvaiheen töiden eteneminen tahtialueittain.....</i>	<i>51</i>
<b>Kuva 27.</b>	<i>Sisävalmistusvaiheen toteutuneet aloitus- ja lopetusajat.....</i>	<i>52</i>
<b>Kuva 28.</b>	<i>Maalaustöiden etenemä ja suunniteltu, optimaalinen virtaus.....</i>	<i>53</i>
<b>Kuva 29.</b>	<i>Laatoitustöiden toteuma ja suunniteltu etenemä.....</i>	<i>54</i>
<b>Kuva 30.</b>	<i>Kylpyhuoneiden laatoitus-, tasoitus ja maalaustöiden etenemät vertailtuna.....</i>	<i>55</i>

# TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1.	<i>Työn rakenne ja kappaleiden sisältö .....</i>	5
Taulukko 2.	<i>Tutkimusta varten haastateltavien henkilöiden roolit työmaaorganisaatiossa. ....</i>	38
Taulukko 3.	<i>Tutkimuskohteen asuntojen kokojakauma ja määrä .....</i>	38
Taulukko 4.	<i>Sitedrive-aikataulutehtävään liitetyt data-analyysissä käytettävät parametrit.....</i>	40
Taulukko 5.	<i>Tutkimuksessa tutkittavat tahtiaikataulun työtehtävät.....</i>	41
Taulukko 6.	<i>Sisävalmistusvaiheen työjono. ....</i>	43
Taulukko 7.	<i>Työmaalla käytetyn tahtiaikataulun ominaisuudet. ....</i>	45
Taulukko 8.	<i>Työvaihe- ja lohkokohtaiset jaksoajat ja muutos päivinä .....</i>	57
Taulukko 9.	<i>Työvaihe- ja lohkokohtaiset läpimenoajat ja A- ja B-lohkojen erotus ....</i>	58
Taulukko 10.	<i>Lohkokohtaiset jaksoaikojen varianssit työtehtävittäin ja muutosprosentti B-lohkosta A-lohkoon.....</i>	59
Taulukko 11.	<i>Työtehtäväkohtaiset jaksoajan varianssit koko kohteen osalta.....</i>	60
Taulukko 12.	<i>Lohkojen sisävalmistusvaiheiden läpimenoajat. ....</i>	61
Taulukko 13.	<i>Tahtialueiden läpimenoajat päivinä. ....</i>	61
Taulukko 14.	<i>Listoituksen ja oviaisennuksen virtauksen tunnusluvut.....</i>	62

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

CPM	Critical Path Method, kriittisen polun menetelmä
IGLC	International Group for Lean Construction, kansainvälinen lean-rakentamisen ryhmä
KPI	Key Performance Indicator, suorituskykymittari
LCI	Lean Construction Institute, lean-rakentamista edistävä organisaatio
LPS	Last Planner® System, rakentamisen aikatauluohjausmenetelmä
PPC	Percent Plan Complete, suunniteltujen töiden toteuma prosentteina
TATE	Talotekniikka, rakennuksen tekniset järjestelmät ja niihin liittyvät työt
TFV	Transformation-flow-value, rakentamisen tuotantoteoria
TPS	Toyota Production System, autovalmistaja Toyotan kehittämä tuotantojärjestelmä
TPTC	Takt Plan and Takt Control, tahtiaikataulusuunnittelu- ja ohjaus
TTP	Takt Time Planning, tahtiaikataulusuunnittelu
VS	Kipsilevyväliseinä
WIP	Work in Progress, aloitettu keskeneräinen työ



# 1. JOHDANTO

## 1.1 Työn taustaa

Rakennusteollisuudessa työn tuottavuus ei ole merkittävästi noussut, siinä missä muilla teollisuuden aloilla on saavutettu merkittävää edistystä tuottavuudessa viimeisen 40 vuoden aikana. Rakennustyön tehokkuuden kehittämisen potentiaali on kuitenkin tunnistettu jo vuosien ajan. (Koskenvesa et al. 2010) Rakennusalan toimintamallit ovat muuttamassa systemaattisempaan ja prosessimaisempaan suuntaan samaan tapaan kuin myös muilla teollisuuden aloilla on tapahtunut. Tämä mahdollistaa tuottavuuden kasvun, laadun parantamisen ja luo myös uusia liiketoimintamahdollisuuksia. Rakennusalan toimintamallien muutoksessa oleellisessa osassa ovat myös digitalisaatio ja sen mahdollistama lisääntynyt tiedonkeruu, joiden nähdään luovan edellytykset tiedolla johtamiselle ja organisaatioiden oppimisen hyödyntämiselle (Laihonen et al. 2013).

Tämä diplomityö on laadittu Fira Oy:n (myöhemmin tässä työssä Fira) toimeksiannosta. Fira on rakennusalan yritys, jonka tavoitteita ovat alan edelläkävijänä toimiminen, rakennusalan digitaalisten työkalujen käyttöönotto ja kehitys, sekä alan vakiintuneiden toimintatapojen muuttaminen. Firan rakennuskohteet toimivat samalla uusien menetelmien ja työkalujen testaus- ja kehityskohteina. Firan tavoitteena onkin edetä kansainvälisille markkinoille tuotteistamalla kehittämiänsä toimintakonsepteja. (Lättilä 2019)

Firalla on aikaisemmin todettu, että rakennus- ja taloteknisten suunnitteluratkaisujen parantamisella, kuten modularisoinnilla, sekä tuotantoratkaisujen kehittämisellä, kuten tahtituotannon käyttöönotolla voidaan saavuttaa 15–30 % parannus asuntorakentamisen valmistusnopeudessa (Mölsä 2019). Nopeampi läpimenoaika rakentamisvaiheessa on resurssien käytön kannalta tehokasta, ja mahdollistaa niin kustannussäästöjä kuin uusia liiketoimintamahdollisuuksia.

Valmistavassa teollisuudessa laajasti sovelletun lean-filosofian ja erityisesti tahtiaikataulun käyttöönotto rakentamisessa on tuottanut merkittäviä aikataulusäästöjä erityisesti paljon toistoa sisältävien työvaiheiden kanssa. Tutkimuksissa onkin havaittu jopa 55–70 % lyhyempiä läpimenoaikoja tahtiaikataulua käytettäessä. (mm. Binninger et al. 2018; Lehtovaara 2019) Aalto-yliopiston tutkijoista ja useista Suomen suurimmista rakennusalan yrityksistä koostuva Building 2030 -konsortio on selvittänyt useiden tutkimushankkeiden avulla keinoja kasvattaa rakennusalan tuottavuutta, ja tärkeänä tutkimusten loppupäätelmänä oli nimenomaisesti tahtiaikataulun implementointi ja siitä saatavat laatu-,

kustannus- ja aikatauluhyödyt. (Lehtovaara et al. 2020) Tahtiaikataulun käyttöönottoa voidaan pitää osana rakennustuotannon kehittämistä prosessimaisemmaksi.

Koska tahtiaikataulusuunnittelu on kuitenkin vielä melko uusi menetelmä rakennusalalla, ja yritykset ovat vasta pilotoimassa sen käyttöä (mm. Ruohomäki 2019; Laine 2020; Sivula 2020; Huhtamäki 2021), tahtiaikataulun seurantaan, ylläpitoon ja ohjaukseen käytetyt työkalut eivät ole vielä täysin kypsiä (Lehtovaara 2020). Fira haluaa kehittää asuntorakentamisensa prosessia jatkuvasti, mikä edellyttää myös uusia työkaluja prosessin suorituskyvyn seurantaan ja ohjaukseen. Teollisuudessa käytetyt tuotannonohjausmenetelmät voivatkin osoittautua hyvin soveltuviksi prosessimaiseen tahtiaikataulua hyödyntävään rakentamiseen, kuitenkin ottaen huomioon rakennusalan erityispiirteet ja niistä aiheutuvat vaatimukset (Heinrich et al. 2007).

Lehtovaara et al. (2021) esittävät, että rakennustyömaan kokonaisvirtauksen, prosessivirtauksen ja töiden virtauksen tutkiminen esimerkiksi case-kohteen kautta olisi hyödyllistä. Ruohomäki (2019) esittää puolestaan tahtituotannon hukkaa mitanneessa diplomityössään jatkotutkimusaiheeksi tahtituotannon vaikutukset työn virtaukseen ja erityisesti virtauksen vaihteluun. Käynnissä olevassa BIM2TWIN-hankkeessa pyritään löytämään myös yhtenäisiä menetelmiä suorituskyvyn mittaukselle. Hanke on osa Euroopan Unionin Horisontti 2020 -puiteohjelmaa. (BIM2TWIN 2021) Rakentamisen ja erityisesti tahtiaikataulun suorituskyvyn mittaumenetelmille on siis selvästi tunnistettu tarve.

Digitalisoitu tuotannonohjaus sekä digitaalisten järjestelmien keräämä data mahdollistavat automatisoidun tiedonkeruun. Oikein kerätty, organisoitu ja koostettu tieto on tärkeässä roolissa matalalla tasolla prosessinohjauksessa ja ylätasolla yrityksen päätöksenteossa. Tiedon avulla on mahdollista muodostaa tilannekuva yrityksen tai sen toiminnon tilasta ja tunnuslukuja muodostamalla laatia suorituskykykymittaristoja. Näin voidaan kehittää prosessia ja siirtyä hiljaiseen tietoon ja kokemuspohjaisuuteen perustuvasta johtamisesta tiedolla johtamiseen. (Laihonen et al. 2013, Fira Smart 2021a).

## **1.2 Tutkimuksen tavoite, tutkimuskysymykset ja hypoteesit**

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia asuntokohteen sisävalmistusvaiheen prosessin virtausta. Valmistuneen rakennuskohteen sisävalmistusvaiheen työn aikana kerätystä datasta saadaan toteumatietoa, jonka perusteella voidaan muodostaa kuva töiden etenemisestä. Tutkimusaineistona käytetään Fira Sitedrive -aikataulunhallintaohjelmasta saatua dataa, jonka validiteetti varmennetaan työmaahenkilöstön haastatteluilla. Tutkimuksen avulla voidaan myös arvioida sisävalmistusvaiheen digitaalisen jalanjäljen, eli

työmaan rakentamisen aikana tuottaman digitaalisen datan luotettavuutta tahtiaikataulun suorituskyvyn ja virtauksen mittaamisessa. Muodostettavat tunnusluvut ja laskentatavat perustuvat teollisuudessa käytettyihin suorituskyvyn mittaamenetelmiin.

Tutkimuksen teoriaosuudessa käydään läpi lean-rakentamisen taustaa ja periaatteita, tahtiaikataulun ja virtauksen käsitteistöä ja teoriaa, sekä teollisessa tuotannossa käytettyjen suorituskyvyn mittaamenetelmien ominaisuuksia ja soveltamista rakentamisen virtauksen tutkimiseen. Tutkimuksen empiirinen osuus soveltaa teoriaosuudessa käsitellyjä asioita työmaalta kerättyyn dataan ja työmaahenkilöstön haastatteluihin. Empiiriosuudessa kuvataan myös data-analyysin suoritus. Data-analyysin avulla pyritään saamaan vastaukset seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

### **1. Millainen oli tutkimuskohteen sisävalmistusvaiheen prosessin virtaus?**

Sisävaiheen prosessi koostuu useista eri työvaiheista. Kunkin työvaiheen sijainti, aloitusajankohta ja kesto on määritelty aikataulunhallintaohjelmalla laaditussa tahtiaikataulussa. Työmaan keräämän datan perusteella voidaan verrata aikataulun toteutumatietoja suunnitelmatietoihin yksittäisen tahtialueen tarkkuustasolla ja siten kuvata eri työvaiheiden virtausta.

### **2. Millä tunnusluvuilla virtausta ja sen ominaisuuksia voidaan mitata?**

Virtausta eli rakentamisprosessin vakautta voidaan arvioida tunnuslukujen avulla. Työmaan muodostamasta datasta voidaan laskea esimerkiksi hajonta eri työvaiheiden valmistumisajan välillä. Tunnuslukujen muodostamisessa hyödynnetään kirjallisuuskatsauksessa läpikäytäviä teollisuudessa käytettyjä mittaustapoja.

### **3. Miten voitaisiin parantaa virtausta edelleen?**

Oletuksena on, että työmaan keräämästä datasta analysoidun tiedon perusteella voidaan määritellä ne työvaiheet, joissa virtaus oli epätasaista. Työmaahenkilöstön haastatteluista tehtäviä havaintoja ja data-analyysin tuloksia yhdistelemällä voidaan esittää kehitysehdotuksia rakentamisprosessin kehittämiseksi.

### **4. Millainen on työmaan aikataulunhallissa muodostetun digitaalisen datan laatu?**

Data-analyysin tuloksia on mahdollista arvioida vertaamalla niitä työmaahenkilöstön haastatteluihin ja siten arvioida työmaan ”digitaalisen jalanjäljen” eli rakennustyön aikana tallennetun toteumatiedon laatua.

### 1.3 Tutkimusmenetelmät ja tutkimusaineisto

Kirjallisuuskatsauksen tärkeimpinä lähteinä toimivat erityisesti lean-rakentamiseen keskittyneet tutkimukset, kuten IGLC:n (The International Group for Lean Construction) sekä Building 2030 -konsortion julkaisemat konferenssipaperit ja loppuraportit. Lisäksi hyödynnetään Aalto-yliopistossa ja Tampereen yliopistossa aiemmin tehtyjä tahtituotantoa käsitelleitä opinnäytetöitä. Lean-filosofiaa ja laadun ja suorituskyvyn mittausta käsitellään myös teollisuuden alan kirjallisuuden ja tutkimusten kautta. Lean-filosofiaa käsitellään erityisesti teosten *The Toyota Way* (Liker 2004) ja *This is Lean* (Modig & Åhlström 2018) näkökulmista. Virtauksen suorituskykymittareiden muodostamisessa hyödynnetään *Factory Physics for Managers* -teosta (Pound et al. 2014), sekä myös *Lean Six Sigma Black Belt Handbook* -kirjaa (Voehl et al. 2013).

Tutkimuksen empiirinen osuus toteutetaan tapaustutkimuksena tutkimuskohteeksi valitusta tahtiaikataulutantoa hyödyntäneestä asuinrakennuskohteesta. Tutkimusaineistona toimivat sekä työmaan keräämä data, jota täydentävät työmaahenkilöstön haastattelut. Empiirisessä osuudessa kuvaillaan työmaan sisävalmistusvaiheen prosessin kulku ja kirjallisuuskatsauksessa määriteltä käsitteistöä sovelletaan kohteen toteuman analysoinnissa. Työmaan keräämälle datalle suoritetaan data-analyysi, ja työmaahenkilöstöstä haastatellaan sisävalmistusvaiheen työnjohtajaa ja työmaan vastaavaa työnjohtajaa. Tutkimus yhdistelee kvantitatiivista data-analyysiä kvalitatiiviseen haastattelututkimukseen.

### 1.4 Tutkimuksen rakenne ja rajaukset

Tutkimuksen 1. luku koostuu johdannosta, jossa esitellään työn taustaa, tutkimuskysymykset, tutkimusmenetelmät sekä tutkimuksen rakenne. Luvussa 2 suoritetaan kirjallisuuskatsaus, jossa käsitellään lean-filosofian taustaa ja sen soveltamista rakentamiseen, virtausta ja tahtituotantoa rakentamisessa, sekä suorituskyvyn mittausten menetelmiä teollisuudessa sekä näiden soveltamista rakentamiseen ja virtauksen mittaukseen. Kirjallisuuskatsauksessa sivutaan myös datan keruun, digitaalisten työkalujen ja tiedolla johtamisen merkitystä.

Luvussa 3 esitellään empiirisen osuuden tutkimusmetodologia, kuvaillaan haastatteluiden toteutus, tutkimuskohde sekä data-analyysin lähtötiedot ja toteutustapa. Luvussa 4 esitellään empiirisen osuuden tuloksia. Tuloksista laaditaan tunnuslukujen ja kuvausten lisäksi graafisia esityksiä. Data-analyysin tulokset yhdistetään työmaahenkilöstön haastatteluihin datan luotettavuuden arvioimiseksi. Luvussa 4 esitetään myös tutkimuksen

pohjalta muodostettuja parannusehdotuksia tutkimuskohteena toimivan yrityksen toiminnan kehittämiseksi.

Lopuksi luvussa 5 esitetään yhteenveto, jossa kirjallisuuskatsauksen ja empiirisen osuuden tulokset yhdistetään, arvioidaan tutkimuksesta saatuja tuloksia ja niiden luotettavuutta, sekä esitetään mahdollisia jatkotutkimusaiheita.

Taulukko 1. *Työn rakenne ja kappaleiden sisältö*

<b>Kappale</b>	<b>Sisältö</b>
1. Johdanto	Tutkimusaiheen taustoitus ja tutkimuskysymysten esittely, tutkimusmenetelmien ja lähteiden kuvaus, tutkimuksen rakenteen kuvaus
2. Kirjallisuuskatsaus	Lean-filosofian ja virtauksen käsitteen taustaa, virtaus rakentamisessa. Lean constructionin periaatteet ja tahtiaikataulusuunnittelu ja -ohjaus rakentamisessa. Suorituskyvyn mittaamenetelmät teollisuudessa ja niiden soveltaminen virtauksen mittaamiseen.
3. Empiirinen tutkimus	Tutkimusmenetelmien kuvailu, tutkimuskohteen esittely, työmaan keräämän datan kuvaus ja analysointimenetelmät.
4. Tulokset	Empiirisen osuuden haastatteluiden ja data-analyysin yhdistely tuloksiksi. Sisävalmistusvaiheen prosessikuvaus sekä työmaalla käytetyt digitaaliset työkalut. Virtauksen kuvaukset visuaalisesti ja tunnusluvuin. Päättelöt ja kehitysehdotukset.
5. Yhteenveto ja pohdinta	Kirjallisuuskatsauksen ja empiirisen osuuden yhteenveto, tulosten synteesi, arviointi, kehitysehdotukset ja jatkotutkimusaiheet

Tämä tutkimus keskittyy nimenomaisesti tutkimuskohteen sisävalmistusvaiheen prosessin virtauksen analysoimiseen. Sisävalmistusvaiheen työtehtävistä tutkitaan vain niitä tehtäviä, jotka suoritettiin tutkimuskohteen asuntokerroksissa osana tahtiaikataulua.

## 2. KIRJALLISUUSKATSAUS

### 2.2 Lean-filosofian taustaa

Lean on erityisesti teollisuudessa käytetty termi, jolla kuvataan alun perin japanilaisen autovalmistaja Toyotan kehittämää johtamisfilosofiaa (Liker 2004). Modig & Åhlström kiteyttävät lean-filosofian ydinajatuksen olevan virtaustehokkuuden maksimoinnissa (Modig & Åhlström 2018).

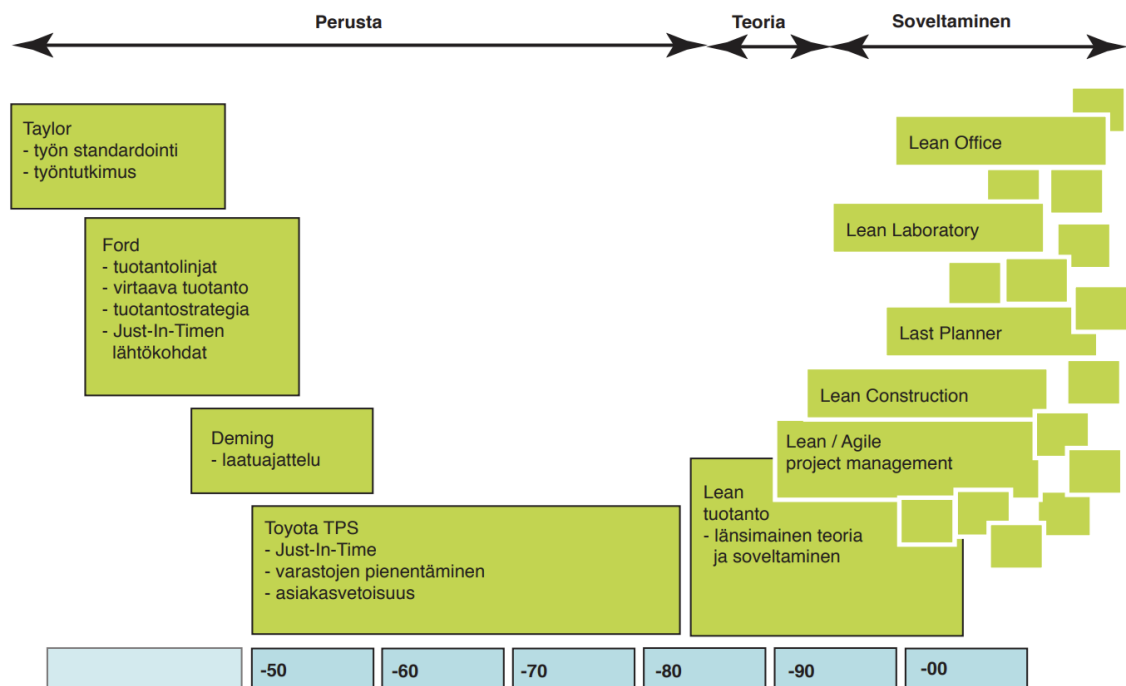
Lean-filosofiaa edelsivät Henry Fordin kehittämä liukuhihnatuotantojärjestelmä (*mass production system*), Frank ja Lillian Gilbrethin sekä Frederick Taylorin kehittämä tieteellinen liikkeenjohto (*scientific management*) ja Walter Shewhartin kehittämä laadunhallinnan ohjauskaavio (*control chart*). Leanin katsotaan yhdistelevän ja jalostavan edelleen näiden teorioiden ajatuksia. (Pound et al. 2014) Toyota nimitti kehittämäänsä tuotantojärjestelmää alun perin nimellä Toyota Production System (TPS). Järjestelmä sai alkunsa Toyotan tutustuessa Fordin autotehtaiden tuotantojärjestelmiin. Toyotalla havaittiin, että järjestelmä tuottaa paljon ylimääräisiä osia ja siihen rakennetut ominaisuudet, kuten jopa henkilöstön palkitsemistavat johtivat toimintaan, jossa tuotantolinjat tuottivat paljon ylimääräisiä osia ja tuotantolaitteisto teki ylimääräistä, eli toisin sanoen tuottamattomia työtä. Virheelliset tuotteet saattoivat jäädä havaitsematta usein viikkojen ajaksi ja työ oli heikosti organisoitua. Toyota kokikin voivansa kehittää paremman järjestelmän Fordin järjestelmään perustuen. (Liker 2004)

Toyotan haasteena Fordin liukuhihnajärjestelmän implementoinnissa oli kuitenkin huomattavasti yhdysvaltalaisia autovalmistajia pienempi tuotantovolyymi, sillä 1940-luvun Japani erosi markkina-alueena huomattavasti Yhdysvalloista. Toyotalla ei ollut käytössään vastaavia resursseja, varastotiloja ja volyymietua kuin Fordilla. Toyotan oli kyettävä valmistamaan pienempiä eriä erilaisia tuotteita, samalla kuitenkin saavuttaen korkean laadun, matalat kustannukset sekä joustavuuden eri tuotteiden valmistuksen välillä. Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi Toyota kehitti oman tuotantojärjestelmänsä, ja samalla havaittiin, että lyhyet läpimenoajat ja tuotantojärjestelmien joustavuus mahdollistivat myös korkeamman laadun, paremman tuottavuuden ja korkeamman tuotantolaitteiston käyttöasteen. (Liker 2004)

Kehitystyön tuloksena Toyota kykeni muodostamaan uudenlaisen toimintatavan, joka toimisi myöhemmin perustana lean-filosofiaksi nimitettävälle mallille. 1960-luvulle tultaessa Toyotan kehittämä tuotantojärjestelmä voitiin pitää jo niin kypsänä, että sitä voitiin

soveltaa autonvalmistuksen lisäksi myös muille teollisuuden aloille. Leanin omaksumiseen laajemmin teollisuudessa vei vielä kuitenkin aikaa. Ensimmäiseksi Toyota esitteli lean-järjestelmää omille alihankkijoilleen. Tämä mahdollisti koko tuotantoketjun hallinnan kokonaisvaltaisesti. Alihankkijoiden osallistamisen voikin nähdä parantaneen tuotantojärjestelmän toimivuutta entisestään, kun ulkoisista tahoista aiheutuvaa vaihtelua pystyttiin hallitsemaan luotettavammin. (Liker 2004)

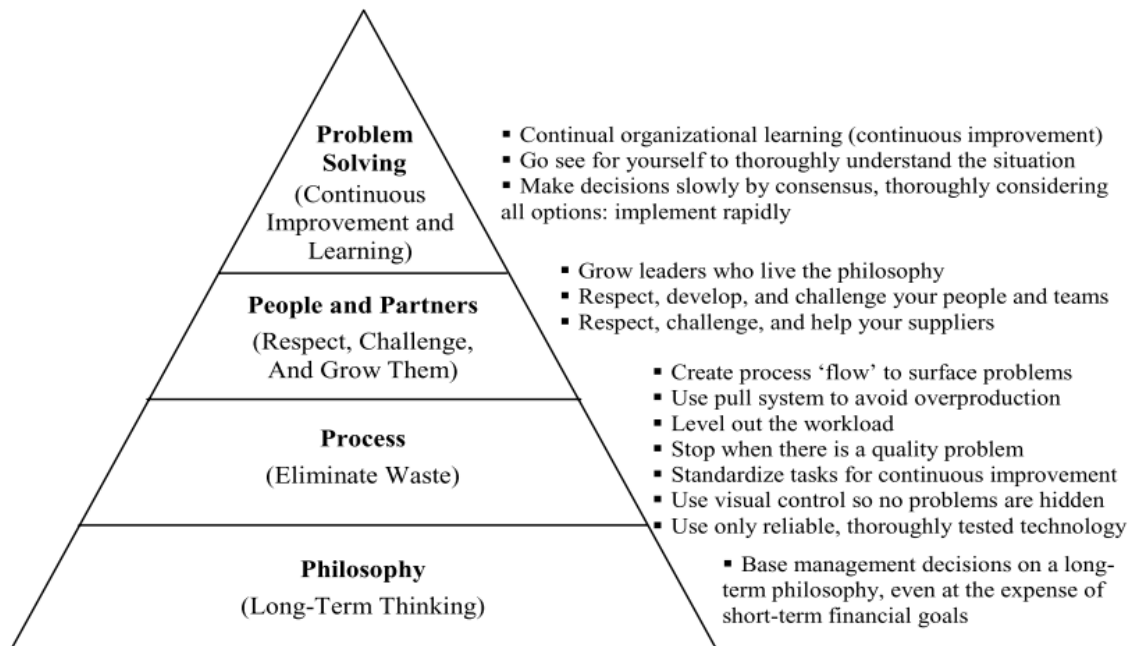
Vuonna 1990 julkaistussa kirjassa *The Machine That Changed the World* (Womack & Jones) lean-filosofian periaatteet tulivat laajasti valmistavan teollisuuden tietoisuuteen, ja lean-termin käyttö levisi yleisempään tietoisuuteen. Kirja perustui MIT:n yliopiston tutkimukseen autonteollisuudesta. Liker (2004) kuvaa teoksen määrittelevän lean-filosofian ydinajatuksen vapaasti suomennettuna seuraavasti: ”Läpimenoajan lyhentäminen hukan vähentämisen avulla prosessin jokaisessa vaiheessa johtaa parhaaseen laatuun ja matalimpiin kustannuksiin, samalla turvallisuutta ja työmoraalia parantaen”. (Liker 2004) Lean-filosofian kehitystä eri vuosikymmenillä on esitelty kuvassa 1.



**Kuva 1.** Lean-filosofian ja sitä edeltäneiden tuotannonohjausmenetelmien historiaa. (Koskenvesa & Sahlstedt 2011)

Lean-filosofian periaatteita on sovellettu laajasti teollisuudessa, usein myös tavoilla, jotka eivät huomioi kaikkia leanin periaatteita. Liker kirjoittaaakin, että lean on nimenomaisesti kokonaisvaltainen järjestelmä työn tuottavuuden kehittämiseen, työntekijöiden ongelmanratkaisutaitojen kehittämiseen ja jatkuvan parantamisen kulttuurin luomiseen,

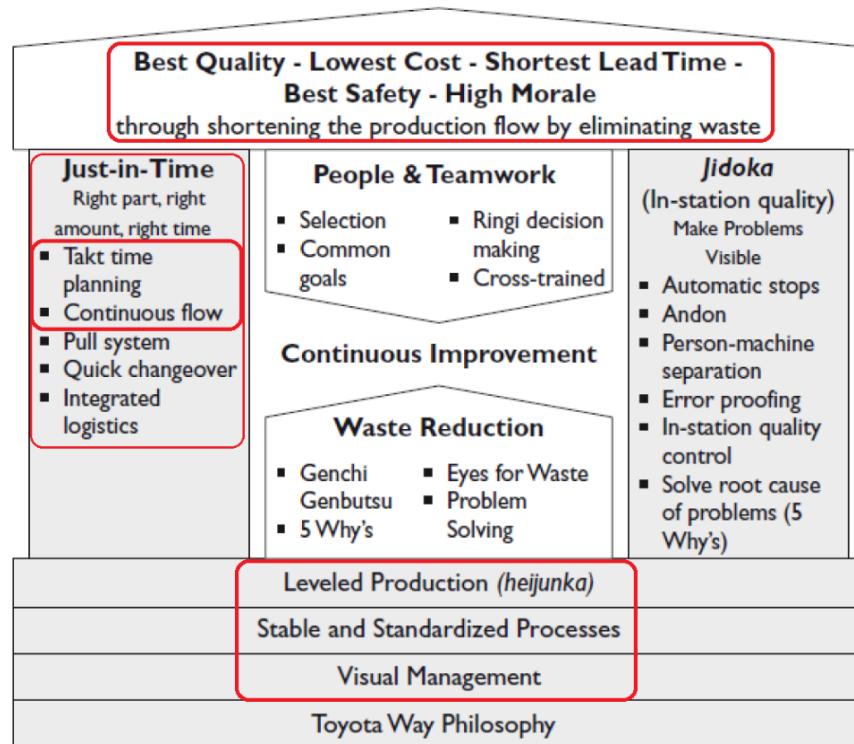
mikä edellyttää onnistuakseen ennen kaikkea henkilöstön sitouttamista uusiin toimintatapoihin. Kuvassa 2 on esitelty lean-filosofian tärkeimmät periaatteet. (Liker 2004)



**Kuva 2.** 14 lean-filosofian periaatetta. (Bertelsen et al. 2007, mukailtuna Liker 2004)

Jo TPS:n olennaisena osana oli tiedon esittäminen myös visuaalisessa muodossa. Koko TPS-järjestelmää kuvaamaan kehitettiin ”Toyota-talo”, joka kuvasi järjestelmän rakennetta. Talon muodolla pyritään havainnollistamaan, että järjestelmä koostuu rakennusosista samaan tapaan kuin talo, ja se ei voi pysyä toiminnallisena tai vakaana ilman kaikkia rakennusosiaan. (Liker 2004) Tässä työssä käsitellään erityisesti kuvassa 3 korostettuja lean-filosofian osa-alueita, eli tahtiaikataulua, jatkuvaa virtausta ja sen mittamista, sekä prosessin vakautusta sekä vakioimista ja visuaalista johtamista.





**Kuva 3.** TPS-talo (Liker 2004). Tässä tutkimuksessa käsitellään erityisesti korostettuja käsitteitä ja aihepiirejä.

Lean-filosofiaan liitetään myös runsaasti termistöä, joiden on tarkoitus kuvata filosofian liittyviä ajatuksia, strategioita ja järjestelmiä. Arvo voidaan puolestaan ymmärtää sekä rahallisena arvona, että asiakasarvona tai esimerkiksi arvon luomisena seuraavalle tuotantovaiheelle. Juuri oikeaan tarpeeseen (*Just-in-Time*, JIT) tarkoittaa materiaalien ja resurssien valmistamista, siirtoa ja kuljetusta vain tarvittaessa. Tarpeen muodostaa kysyntä, jolloin kyse on imuohjauksesta (*pull flow*). JIT:n periaatteisiin kuuluvat myös väli-varastojen, keskeneräisen työn ja virheiden minimointi. (Liker 2004)

Hukka-käsitteellä tarkoitetaan lean-filosofiassa mitä tahansa toimintoa, joka ei tuota arvoa yrityksen liiketoimintaan. Liker (2004) on listannut Toyotan määrittelemät 7 hukkaa, lisäksi näihin vielä 8. hukan lajin. Näitä ovat ylituotanto, odotusaika, ylimääräiset kuljetukset, vääränlainen prosessointi tai yliprosessointi, ylimääräinen varastointi, raaka-aineet tai keskeneräiset työt (*Work in Progress*, WIP), turha liikkuminen, tuotevirheet, puutteet ja niiden korjaaminen sekä hyödyntämätön työntekijöiden luovuus, jota voitaisiin käyttää ongelmanratkaisuun, prosessien kehittämiseen ja laadun parantamiseen. (Liker 2004)

Lean-filosofia ei ole siis yksittäinen tapa toimia, vaan yrityksen kaikkien liiketoimintaan vaikuttava ajattelu- ja johtamistapa. Lean-filosofian ymmärtäminen ja soveltaminen onnistuneesti vaatii kokonaisvaltaista ja pitkäjänteistä lähestymistapaa, eikä pelkkä termien

ymmärtäminen tai yksittäisen lean-periaatteen soveltaminen takaa kaikkien lean-filosofiasta saatavien hyötyjen saavuttamista. Leanin tavoitteena voidaan pitää mahdollisimman korkean laadun tuottamista mahdollisimman lyhyessä läpimenoajassa. (Liker 2004) Prosessin vakaus ja virtaustehokkuus nähdään keinona näiden tavoitteiden saavuttamiseksi (Modig & Åhlström 2018).

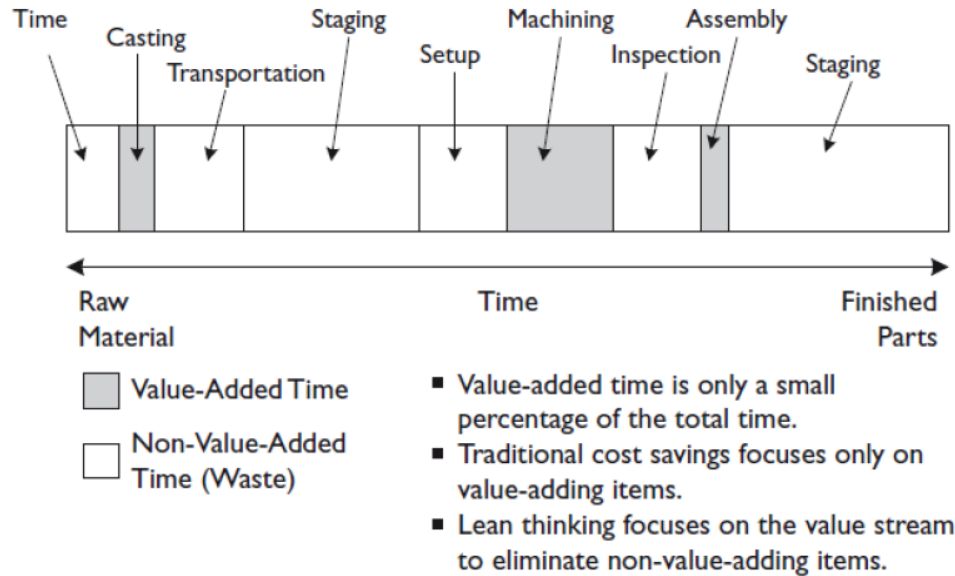
## 2.3 Virtaus

Lean-filosofiassa pyritään tasaiseen ja vakaaseen, toisin sanoen hyvin virtaavaan tuotantoon. Virtauksella tarkoitetaan asioiden, ihmisten ja tiedon siirtymistä määriteltyä arvoketjua pitkin. Modig & Åhlström kuvaavat virtausta virtausyksikön siirtymänä arvoketjussa, jonka muodostavat arvoa tuottavat ja tuottamattomat toimenpiteet. Virtauksen edellytyksenä on myös työskentelyn prosessimaisuus. (Modig & Åhlström 2018)

Fordin käyttämällä liukuhihnajärjestelmällä saavutettu jatkuva virtaus oli yksi tärkeimmistä TPS:n osista. Ideaalitulanteessa tuotantoprosessi saavuttaa yhden kappaleen virtauksen (*one piece flow*), jolla tarkoitetaan jokaisen tuotteen osan siirtymistä työpisteeltä seuraavalle samassa tahdissa. Tässä tilanteessa työpisteille ei muodostu jonoa tai WIP:iä. Yhden kappaleen virtaus onkin Likerin (2004) mukaan paras esimerkki lean-tuotannosta, sillä jokainen Toyotan ja Likerin määrittelemistä hukkan lajeista on onnistuttu poistamaan siinä lähes kokonaan. (Liker 2004) Toisaalta yhden kappaleen virtaus voi myös aiheuttaa häiriötä vaihtelevan prosessin vakaudessa, sillä pienikin häiriö prosessin etenemisessä heijastuu nopeasti koko prosessiin. Virtaus pysyykin vakaana, kun prosessiin on sisällytetty sopivasti joustoa esimerkiksi sallimalla maltillinen määrä WIP:iä. Oikea jouston määrä edellyttää myös vaihtelun määrän mittausta. (Pound et al. 2014)

### Value-Stream Mapping

Virtauksessa prosessissa arvoa tuottavat ja tuottamattomat toimenpiteet muodostavat raaka-aineista ja resursseista valmiita tuotteita. Virtausta voidaan kuvata arvovirtojen mallintamisella eli Value-Stream Mapping -menetelmällä. Arvovirtoja mallintamalla on mahdollista huomata arvoa tuottamattomat toiminnot prosessissa ja siten rajata ja poistaa prosessissa olevaa hukkaa. (Liker 2004, Modig & Åhlström 2018) Hyväksi virtaukseksi mielletään arvovirta, jossa on mahdollisimman paljon arvoa tuottavia (*Value-Added*) toimintoja ja mahdollisimman vähän arvoa tuottamattomia (*Non-Value-Added*) toimintoja eli hukkaa (Modig & Åhlström 2018). Arvoketjua on havainnollistettu kuvassa 4.

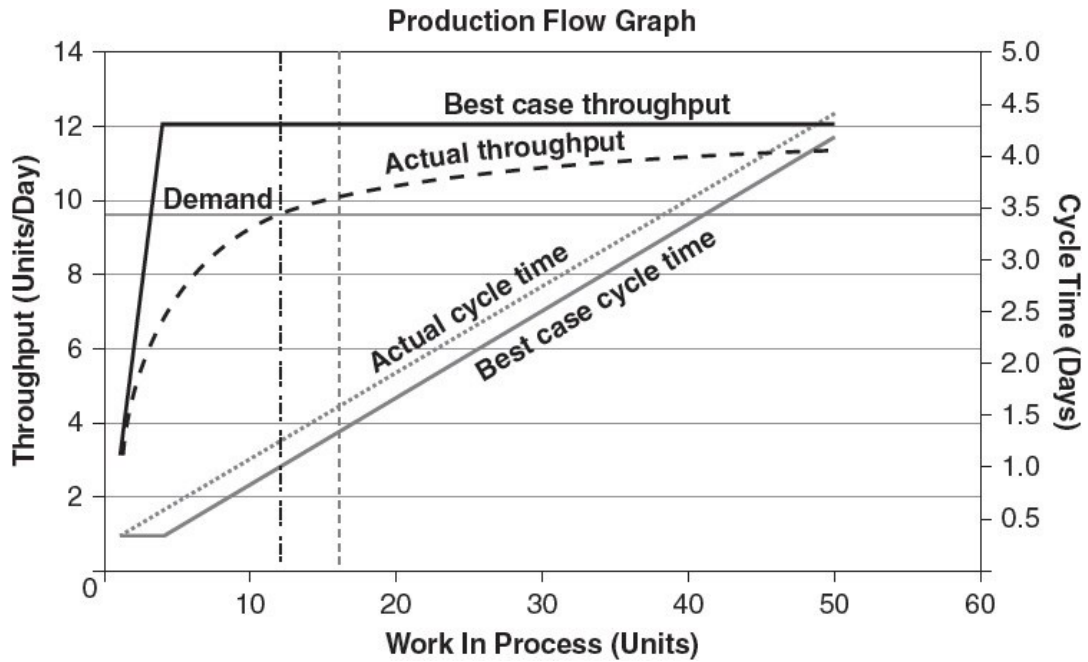


**Kuva 4.** Tuotantoprosessin arvoketju, jossa valtaosa työstä on arvoa tuottamattonta eli hukkaa. (Liker 2004)

Likerin (2004) mukaan oleellista on virtauksen luominen sekä materiaalin että tiedon siirtämiseksi siten, että prosessit ja työntekijät kytkeytyvät toisiinsa. Tämän voi mieltää tarkoittavan sekä jatkuvaa yhteydenpitoa esimerkiksi sähköisin viestintävälinein, kuin myös tiedonkulun luotettavuutta ja välitetyn tiedon oikeellisuutta. Tiedon virtaus mahdollistaa ongelmien havaitsemisen ja niihin puuttumisen ajoissa. (Liker 2004)

### Littlen laki

Virtausta käsittelevässä matemaattisessa teoriassa suorituskykyä voidaan mallintaa Littlen lain (*Little's law*) avulla. Littlen lain mukaan prosessin läpimenoaika on riippuvainen mitattavien virtausyksiköiden, kuten tuotteiden, materiaalien tai informaation määrästä, jaksoajasta (*cycle time*) sekä odottavista virtausyksiköistä. Kaava esitetään nykyään yleisimmin muodossa  $WIP = TH \times CT$ , missä *WIP* on aiemmin esitelty keskeneräinen työ, *TH* läpimeno (*throughput*) ja *CT* jaksoaika. Prosessin teoreettista maksimitehokkuutta voidaan tarkastella laatimalla prosessin muuttujista kuvan 5 mukainen esitys. (Pound et al. 2014, Six Sigma 2021)

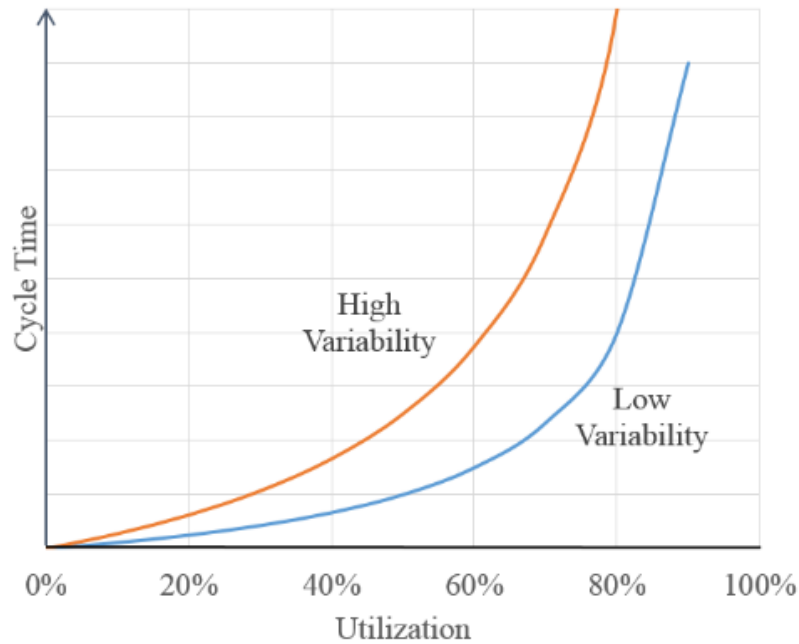


**Kuva 5.** Prosessin suorituskyvyn kuvaus Littlen lain mukaisesti. (Pound et al. 2014)

Kuvasta 5 nähdään, että prosessin todellinen suorituskyky asettuu aina teoreettisesti parhaan mahdollisen jaksoajan ja läpimenon välille. Teoreettisesti parhaat ajat eivät ole käytännössä saavutettavissa prosessin vaihtelusta johtuen. Littlen lain mukaan prosessin läpimeno ja jaksoaika kasvavat keskeneräisen työn määrän kasvaessa. Toisaalta keskeneräisen työn määrän pienentyessä liian alhaiseksi läpimeno vähenee huomattavasti eli prosessi ei enää kykene vastaamaan kysyntään. WIP:in määrää säätelemällä voidaan määrittää sopiva läpimenon ja jaksoajan suhde. (Pound et al. 2014)

### Vaihtelu ja Kingmanin kaava

Myös prosessin vaihtelulla on vaikutusta virtauksen laatuun. Tätä voidaan havainnollistaa jo vuonna 1961 esitellyllä Kingmanin kaavalla (*Kingman formula*), joka kuvaa yhteyttä käyttöasteen (eli laskennallisen resurssitehokkuuden) ja jaksoajan välillä. Kuvassa 6 on esitetty kaksi eri vaihtelun astetta ja niiden vaikutus läpimenoaikoihin. (Modig & Åhlström 2018, Frandson 2019)



**Kuva 6.** Kingmanin kaava visualisoituna. (Fransson 2019)

Kuvasta huomataan, että käyttöasteen nostaminen pidentää läpimenoaikoja (tai jaksoaikoja) eksponentiaalisesti. Eksponentiaalisen nousun alaraja on sitä alempi, mitä korkeampi vaihtelu (*variability*) prosessissa esiintyy. Toisin sanoen suurempi vaihtelu johtaa pidempiin läpimenoaikoihin. (Modig & Åhlström 2018)

## 2.4 Lean Construction

Rakentamisen kontekstissa lean-termillä on usein viitattu asiakasarvon luontiin tehokkaammalla resurssien hyödyntämisellä. Lean Construction -termiä käytetään toiminnasta, jossa leanin periaatteita sovelletaan rakennustuotantoon. (Howell 1999) Tässä tutkimuksessa viitataan Lean Constructioniin lean-rakentamisena. Lean-rakentamisen periaatteiden on tarkoitus tehostaa rakentamista ja työn virtausta, lisätä asiakasarvon tuottamista, minimoida hukkaa, parantaa osallistavuutta ja lisätä turvallisuutta, mutta sen implementointitavoissa on kuitenkin huomattavia eroja eri rakennusalan yritysten välillä. (Bajjou & Chafi 2018) Viime vuosina lean-rakentamisen keinovalikoimaan kuuluvia menetelmiä ja käytäntöjä, kuten tahtiaikataulua ja Last Planner -tuotannonohjausta (*Last Planner System*, LPS) on alettu ottaa laajamittaisemmin käyttöön, mikä käy ilmi myös tämän tutkimuksen tutkimusaineistosta.

### Lean-rakentamisen historia

Tarve lean-filosofian soveltamiselle rakennusallalla on tunnistettu jo kymmenien vuosien ajan. Lean-filosofian periaatteita onkin pyritty tuomaan sekä suunnitteluprosessiin että

tuotannonohjaukseen. Perinteiset rakennusalalla käytetyt projektinhallinta- ja tuotannonohjausmenetelmät eivät huomioi rakentamisen erityispiirteitä tarpeeksi hyvin, eivätkä siten kykene mallintamaan rakennusprosessia realistisella tavalla. Tällöin tuotannonohjaus toimii reaktiivisesti, mikä aiheuttaa työvaihekohtaista osaoptimointia, aikatauluvii västyksiä ja epävarmuutta. (Koskela et al. 2002) Rakentamisessa käytetyt perinteiset tuotannonohjausmenetelmät ottavat usein huomioon vain rakentamisen transformatiivisen luonteen, jossa rakentaminen hahmotetaan syötteistä (*inputs*) ja ulostuloista (*outputs*) koostuvaksi lineaariseksi prosessiksi. Käytäntöön soveltuvampi tapa hahmottaa rakennustuotantoa onkin Koskelan esittämä TFV-teoria (*transformation-flow-value*), joka yhdistää sekä rakentamisprosessin transformaation, TPS:ssä korostetun prosessin virtauksen sekä rakentamisessa luodun asiakasarvon. Teorian mukaan kaikki nämä osat alueet tulee huomioida myös tuotantojärjestelmää suunniteltaessa. (Koskela 2000) TFV-teoria toimii nykyisin yhtenä lean-rakentamisen perustoista ja teoriana, jonka periaatteita sovelletaan usein myös käytännön kehitystyössä (Frandsen 2019).

Lean Construction -termiä on käytetty ainakin vuodesta 1993 lähtien, ja samana vuonna pidettiin myös ensimmäinen IGLC:n (International Group for Lean Construction) kokous. Tämän jälkeen lean-rakentamisen määritelmiä ovat esittäneet ainakin Howell (1999), Koskela (2002), Diekman et al. (2004), Court (2009) sekä Sayer & Anderson (2012). Mossman (2018) käsittelee näitä määritelmiä ja aiheesta käytyä diskurssia IGLC-konferenssijulkaisussaan, sekä esittelee myös uusia määritelmiä. Loppupäätelmänä Mossman esittää, ettei yhtä selvää määritelmää Lean Construction -termille varsinaisesti ole. (Mossman 2018) Vaikka toteutettu tutkimus on suppea ja luonteeltaan lähinnä pohdiskeleva, se luo kuvaa hajanaisesta ja yhä voimakkaasti kehittyvästä alasta. Lean-rakentamista edistävää kansainvälistä Lean Construction Institute -verkostoa Suomessa edustava LCI Finland (myöhemmin LCI) tiivistää internet-sivuillaan lean-filosofian olevan "toimintastrategia, joka pyrkii asiakasarvon maksimointiin parantamalla jatkuvasti prosessien virtaustehokkuutta". Lisäksi LCI painottaa erityisesti tuotannon ja virtauksen vaikutusta tärkeimpänä lean-ajattelun osana. (LCI Finland 2021) Lean-rakentamiseen liittyvää julkaisutoimintaa, konferensseja ja tapahtumia järjestävät nykyisin ainakin IGLC sekä LCI. Yleisesti lean-rakentamisessa pyritään siis ainakin jatkuvaan parantamiseen hukkan minimoinnin ja virtauksen parantamisen kautta. Myöhemmin esiteltäviin tahtiaikataulu- ja Last Planner -tuotannonohjausmenetelmiin kuuluvat olennaisena osana myös osallistavuus, avoimuus ja ongelmanratkaisu yhteistyössä kaikkien hankeosapuolten kanssa.

## Rakentamisen hukat

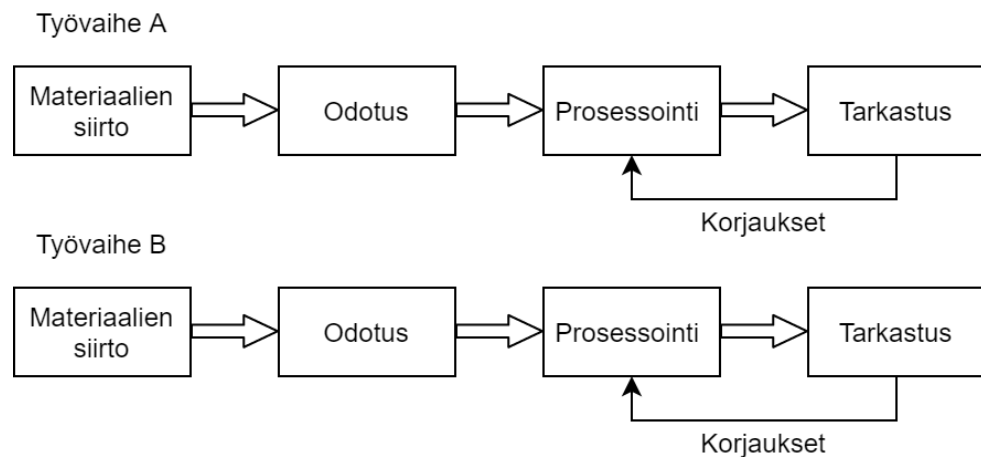
Leanin käsitteistö tulkintoineen ei myöskään ole yksiselitteinen ja lean-rakentamiseen onkin kehitetty rakennusalan tarpeisiin paremmin soveltuvaa termistöä. Kappaleessa 2.1 lueteltujen lean-filosofiassa tunnistettujen hukkien lisäksi lean-rakentamisen kirjallisuudessa on esitetty rakennusosalalle erityisiä hukan lajeja. Näitä ovat esimerkiksi kommunikaation, eli asioiden esille tuomisen ja ihmisten kuuntelun puute (Macomber & Howell 2004). Merkittäväksi hukan lajiksi on esitetty myös ”*making-do*” -hukkaa, jolla tarkoitetaan tehtävien aloitusta ennen aloitusedellytysten täyttymistä. Näin voidaan toimia tuotantokapasiteetin käyttöasteen nostamiseksi, eli odottamisen hukan pienentämiseksi, tai toisaalta aikataulussa näennäisesti pysymiseksi. (Koskela et al. 2004) Making-do mahdollistaa korkeamman resurssitehokkuuden ja vaihtelun pienentämisen, ja sitä voisikin pitää eräänlaisena puskurina, samaan tapaan kuin valmistavan teollisuuden varastokapasiteettia eli tuotteiden ylituotantoa (Koskela et al. 2013). Lisäksi yhdeksi rakentamisen hukaksi on esitetty ”*task diminishment*” -hukkaa, eli tehtävien ja toimenpiteiden tekemättä jättämistä tietoisesti tai tarkoituksellisesti. Joissakin tapauksissa task diminishment voi viitata myös sopimusrikkomuksiin sekä huonosta työmoraalista tai ajan puutteesta aiheutuviin laatuvirheisiin. Mikäli tekemättä jätettyjä toimenpiteitä ei huomata tai niitä ei päätetä korjata, pienentyy asiakkaan rakennustyöstä saama arvo. (Patton 2008)

Koskela et al. (2013) ehdottavat erityisesti making-dota ja task diminishmentiä rakentamisen merkittävimmiksi hukiksi. Molemmat hukat aiheuttavat usein myös muita hukan lajeja, sillä ne edistävät laatuvirheiden syntyä ja rakentamisen alkuvaiheessa tehdyt virheet kertautuvat prosessin edetessä seuraaviin vaiheisiin. (Koskela et al. 2013) Rakentamisessa hukkien tunnistaminen onkin erityisen tärkeää, sillä hukan eri lajien esiintyminen on projekti- ja kohdekohtaista. Lisäksi hukan määritelmiä tulee tarvittaessa voida laajentaa ja määritellä tarkemmin siten, että ne vastaavat tutkittavaa prosessia paremmin. (Koskela et al. 2013) Lean-rakentamisessa oleellista onkin kehittää soveltuvia keinoja näiden hukkien minimoimiseen.

## 2.5 Virtaus rakentamisessa

Koska virtausta voidaan kuvata lähes mille tahansa prosessin ominaisuudelle, on tarpeellista esitellä etenkin lean-rakentamisen kirjallisuudessa käsiteltyjä virtauksia. Henrich et al. (2007) esittävät rakentamisen virtausten jakoa kolmeen eri kategoriaan. Näitä ovat fyysiset, kuten prosessin virtaus ja siihen liittyvät materiaalin virtaukset, koetut virtaukset, kuten asiakasmielikuvat ja henkilöstöresurssien hallinta sekä näihin liittyvät arvovirrat, sekä toiminnalliset virtaukset, kuten työhön tai toimintoihin liittyvät virtaukset. (Henrich et al. 2007) Koskelan (2000) esittää puolestaan väitöskirjassaan 3 virtausta,

jotka ovat sijaintien virtaus (*location flow*), materiaalien virtaus (*material flow*) sekä tuotannon virtaus (*assembly flow*). Koskelan mukaan tuotannon kuvaaminen virtauksena johtaa jakoon arvoa tuottavien ja arvoa tuottamattomien toimintojen välillä ja hyvässä virtauksessa arvoa tuottamattomien toimintojen, kuten tarkastusten, kuljetusten ja odotuksen määrä on minimoitu. (Koskela 2000) Tätä on havainnollistettu kuvassa 7 esitetyllä tuotantoprosessin virtauskaaviolla.



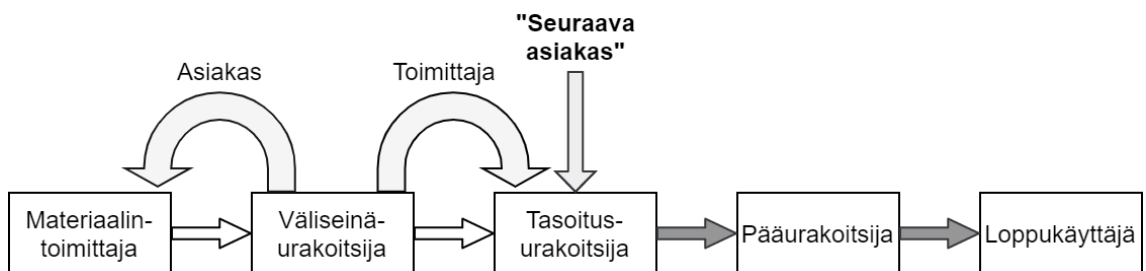
**Kuva 7.** Tuotantoprosessin osien kuvaus virtaavana prosessina. (mukailtu Henrich et al. 2007)

Henrich et al. (2007) mukaan kuvassa ainoa arvoa lisäävä toiminto on tuotteen prosessointi, ja kaikkien muiden toimintojen vähentäminen parantaa siten virtausta, pienentäen samalla läpimenoaikaa ja varianssia sekä parantaen joustavuutta ja läpinäkyvyyttä. Lisäksi tuotantoprosessi yksinkertaistuu. Rakentamisprosessin virtausta mallintaessaan Henrich et al. ovat ottaneet lähtökohdaksi Factory Physics -teoksessa (Hopp & Spearman 2001) esitetyn mallin virtauksesta. Factory Physicsin mallissa tuotantoprosessia voidaan kuvata matemaattisesti ja vaihtelua tulkitaan esiintyvän luontaisesti kaikissa prosessin vaiheissa. (Henrich et al. 2007) Bertelsen et al. (2006) ovat kehittäneet Factory Physicsin virtausmallista Construction Physics -mallin, jossa rakentamisprosessia kuvataan virtauksena, jota ruokkivat useat sivuvirtaukset. Aikaisemmin käytetyt rakentamisen tuotannonohjausmenetelmät eivät ole huomioineet Construction Physicsin kaltaista virtausmallia, mistä johtuen esimerkiksi kriittisen polun menetelmän (*Critical Path Method, CPM*) käyttö tuotannonohjaukseen onkin ongelmallista, koska menetelmästä puuttuvat keinot virtauksen seurantaan ja hallintaan. Myöhemmin Bertelsen et al. (2007) esittivätkin, että luomalla edellytykset kommunikaatiolle työmaaorganisaatiossa ja hallitsemalla rakentamisen virtauksia tehokkaasti siten, että prosessissa kaikki tapahtuisi JIT:n periaatteiden mukaisesti, työmaan hallinta olisi huomattavasti tehokkaampaa. (Bertelsen et al. 2007)



## Rakentamisen virtauksen erityispiirteet

Rakentaminen eroaa tehtaassa tuotantolinjalla tapahtuvasta tuotteiden valmistuksesta erityisesti siksi, että rakentamisessa tuotteet eivät liiku liukuhihnalla työpisteeltä ja työntekijältä toiselle, vaan työryhmät ja näiden mukana työpisteet siirtyvät tuotantoprosessin edetessä seuraavalle valmistettavalle tuotteelle, joka voi rakentamisen kontekstissa tarkoittaa esimerkiksi asuntoa, huonetta tai muuta selkeästi rajattavissa olevaa aluetta. (Henrich et al. 2008, Sacks 2016) Rakentamisessa virtauksen mittaaminen onkin teollisuuden verrattuna haastavampaa, sillä tuotteiden pysyessä paikoillaan ei töiden etenemistä voida seurata yhtä helposti kuin tehdasympäristössä tuotantolinjaa pitkin siirtyvien tuotteiden tapauksessa. Virtausta voidaankin tutkia myös prosessin virtauksena, jossa tarkastellaan varsinaisten tuotteiden virtauksen sijaan prosessin etenemistä työvaiheesta toiseen. (Sacks 2017) Ward & McElwee (2007) kuvaavat aliurakoitsijan arvovirran muodostumista kuvan 8 kaltaisesti ja esittävät, että aliurakoitsijan asiakkaana toimisi seuraava prosessin vaihe, joka on usein toinen aliurakoitsija tai työryhmä. Tätä kutsutaan seuraavan asiakkaan periaatteeksi (*Principle of the Next Customer*). (Ward & McElwee 2007)



**Kuva 8.** Seuraavan asiakkaan periaate. (mukailtu Ward & McElwee 2007)

Kuvan 8 kaltaisessa tilanteessa työryhmä tuottaa arvoa seuraavalle työryhmälle valmiin työpisteen muodossa, ja arvoketjun tärkein osa on tällöin luovutettava valmis mesta eli edellisen työryhmän muodostama tuote. Tällöin arvoketjun virtauksen laatu kuvaa seuraavan työryhmän aloitusedellytyksiä. Lopulta kaikki urakoitsijat tuottavat myös arvoa pääurakoitsijalle, joka puolestaan tuottaa arvoa loppukäyttäjälle.

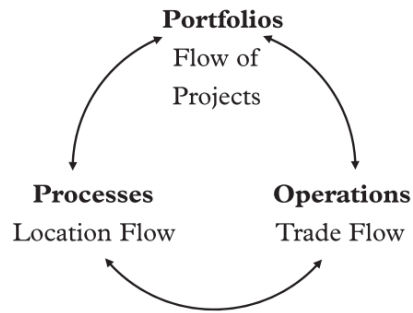
Rakentamisessa tapahtuu myös runsaasti paluuvirtausta (*re-entrant flow*). Teollisuudessa paluuvirtauksella tarkoitetaan tuotteen paluuta takaisin työpisteelle uudelleentyöstöä varten. Koska rakentamisessa tuotteet pysyvät paikallaan, rakentamisen paluuvirtauksessa työryhmä palaa tuotteen luokse eli työpisteelle eri työvaiheessa. Sama työryhmä voi joutua palaamaan työpisteelle useasti, mikä on tyypillistä esimerkiksi taloteknisissä töissä. Tämä luo haasteen myös virtauksen hallinnalle, sillä toistuvasti samassa

työkohteessa käyvien ryhmien resurssit tulee jakaa siten, että aloitusedellytykset seuraaville työvaiheille kuitenkin toteutuvat jatkuvasti. Tämä edellyttää tiivistä aikatauluohjausta. (Sacks 2016)

Soveltumattomat käytännöt tahtiaikataulun ohjaukseen voivatkin johtaa tilanteeseen, jossa viikoittainen ohjaus ei ole riittävän tarkkaa esimerkiksi työpisteiden osalta, ja työryhmät alkavat liikkua vapaasti työpisteeltä toiselle ja sopimaan työnjärjestyksestä keskenään muiden työryhmien kanssa. Tämä heikentää työn tehokkuutta, lisää keskeneräisen työn määrää ja siten tekee virtauksesta epävakaata. (Brodetskaia & Sacks 2007) Ruohomäki esittää diplomityössään (2019), että tahtituotannon avulla voidaan vähentää hukkaa erityisesti tuotteen virtauksesta, ja työn virtaus on puolestaan häiriöherkempi virtauksen laji, jota tulee säännöllisesti hallita esimerkiksi tahtiohjauksella. Riittämätön tahtiohjaus ja varamestojen eli vaihtoehtoisten työkohteiden puute johtaa korkeampaan virtauksen vaihteluun. (Ruohomäki 2019)

### **PPO-malli**

Nykyaikaisessa rakentamisessa pääurakoitsijan rooli on usein projektin johtamiseen ja läpivientiin painottuva, ja varsinaisen työn eli prosessin arvoa tuottavan osan suorittavat pääsääntöisesti aliurakoitsijat. Tiettyyn erityistehtävään erikoistuneilla aliurakoitsijoilla on useimmiten samanaikaisesti käynnissä useita projekteja, mikä on huomioitava rakentamisen virtausta mallintaessa. Sacks (2016) esittää ratkaisuksi PPO-mallia (*portfolios, processes and operations*), jossa huomioidaan virtauksen osalta myös aliurakoitsijan eri projektien välinen virtaus. (Sacks 2016) Fira on huomionnut aliurakoitsijoidensa työportfolion pyrkimällä tasapainottamaan tilauskantaansa siten, että aliurakoitsijat voisivat siirtyä projektin valmistuttua seuraavaan projektiin mahdollisimman pienellä viiveellä, minkä on koettu hyödylliseksi toimintamalliksi sekä Firalle että aliurakoitsijalle. Parhaassa tapauksessa urakoitsija siirtää työryhmänsä seuraavalle työmaalle ilman muutoksia työryhmän kokoonpanoon, jonka on puolestaan todettu nostavan työryhmän suorituskykyä, kun ryhmän kerryttämä organisaation oppiminen ei häviä ryhmän hajotessa. (Korb et al. 2017). Kuvassa 9 on havainnollistettu PPO-mallin eri osien vaikutusta toisiinsa.



**Kuva 9.** PPO-malli virtaukselle. (Sacks 2016).

PPO-malliin perustuen Sacks (2016) määrittelee myös edellytykset hyvälle virtaukselle rakentamisessa:

### 1. Projektivirtauksen edellytykset

Urakoitsijan jaksoaika (*cycle time*) tulee olla mahdollisimman lyhyt. Tämä perustuu aiemmin esiteltyyn Littlen lakiin, joka osoittaa läpimenoaikojen kasvavan suhteessa keskeneräisen työn määrään. Tämä tarkoittaa myös keskeneräisen työn määrän hallitsemista. Lisäksi aliurakoitsijan projektien eräkoon tulisi olla 1, ja projekteissa tapahtuvan virtauksen tulisi tapahtua imuohjauksella, eli esimerkiksi tahtiaikataulun avulla siten, että urakoitsija voi suorittaa työnsä ilman mestan vapautumisen odottamista.

### 2. Prosessivirtauksen edellytykset

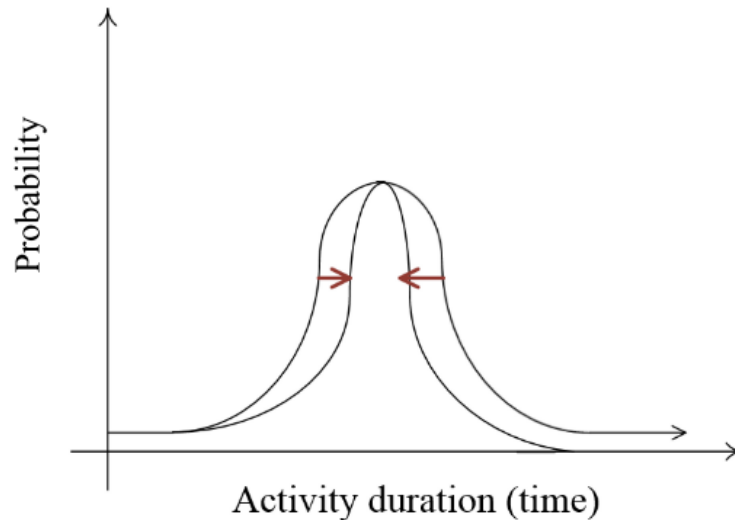
Prosessivirtauksen edellytykset heijastelevat samalla tahtiaikataulun laatua. Työn tulee olla tasapainotettua, ja ideaalilanteessa tahtiaika pysyy mestasta riippumatta samana. Yksittäinen työryhmä työskentelee vain yhdessä kohteessa kerrallaan, ja työn alla olevien kohteiden määrä ei ylitä työryhmien määrää. Toisin sanoen WIP-puskurin on oltava nolla. Työvaiheiden väliset aikapuskurit ovat nolla. Paluuvirtausta ei esiinny. Työryhmien ei tarvitse palata työpisteelle korjaamaan jo tehtyä työtä. Työltä edellytetään myös tasaista virtausta, jolla estetään myös making do -hukan syntyminen. On kuitenkin huomioitava, että käytännössä kaikkia aikapuskureita ei voida eliminoida, sillä kaikissa prosesseissa esiintyy aina vaihtelua, jonka vaikutusta prosessiin voidaan kompensoida aikapuskureita käyttämällä (Pound et al. 2014).

### 3. Työryhmien virtauksen edellytykset

Kuten prosessivirtauksessa, jokaisen työryhmän tuotantonopeus tulee olla tahtiajan mukainen, eli toisin sanoen tuotantonopeuden tahtiajan kannalta merkityksellinen varianssi on minimoitava tuotantoyksikköä kohden. Arvoa tuottamattoman työn määrä on minimoitu kaikille työryhmille.

## Puskurit

Puskurilla tarkoitetaan prosessiin sisäänrakennettua joustoa, jonka avulla voidaan kompensoida työn varianssia eli vaihtelua. Factory Physics for Managers -kirjassa esitetään teollisuudessa käytetyiksi puskureiksi varasto-, aika- ja kapasiteettipuskurit. Puskurien käytön vaikutusta rakentamistehtävän suoritusajkaan on havainnollistettu kuvassa 10.



**Kuva 10.** Todennäköinen suoritusajaksi tehtävälle ja puskurin vaikutus suoritusajojen jakaumaan. (Frandsen 2019)

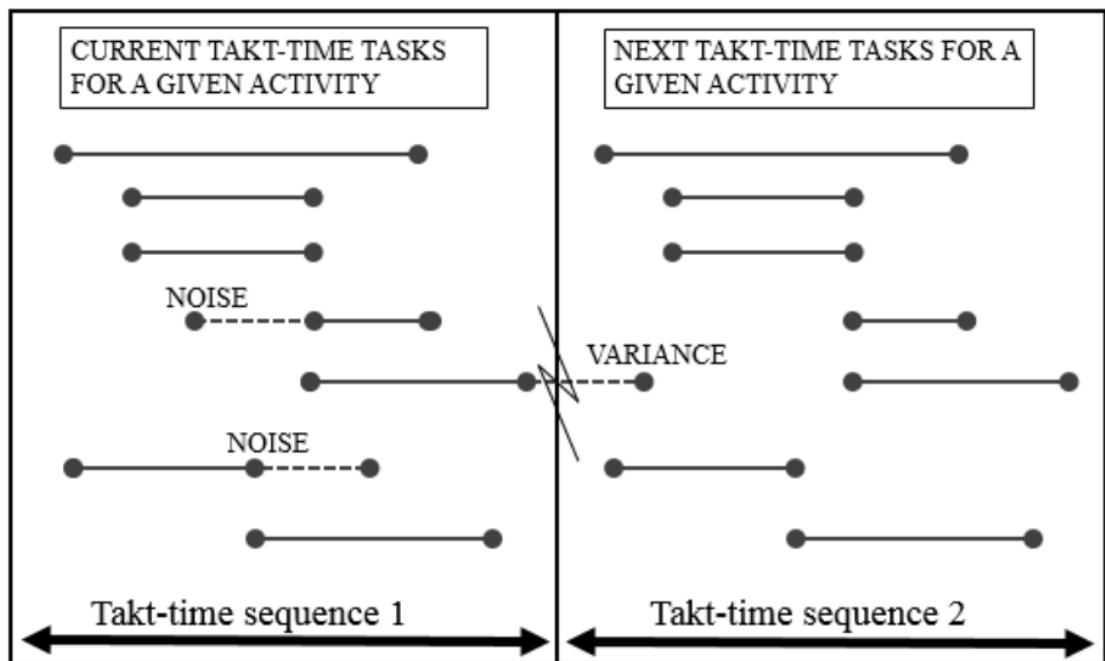
Kuvasta voidaan tulkita, että vaikka puskurit mahdollistavatkin varianssin vähentämisen virtauksessa, ne aiheuttavat myös leanin periaatteiden vastaista hukkan kasvua esimerkiksi odotuksen määrää lisäämällä. Samalla läpimenoajat pitenevät. Kuten on todettu, puskureiden käyttö on kuitenkin välttämätöntä rakennustyössä aina esiintyvän varianssin vuoksi. (Lehtovaara et al. 2021) Puskureita voidaan kuitenkin pienentää prosessin vakautuessa ja varianssin vähentyessä (Frandsen 2019). Rakentamisen tahtituotannossa käytettäviä puskureita esitellään tarkemmin kappaleessa 2.6.

Niin sanottujen palvelutoimintojen puskureina ovat vain aika ja kapasiteetti, sillä palvelutoiminnot tapahtuvat pyynnöstä tarpeen ilmaantuessa. Toisin sanoen niitä ei voi varastoida. (Pound et al. 2014) Rakentamisessa nämä palvelutoiminnot tarkoittavat esimerkiksi tehtäviä, jotka vaativat nopeaa reagoitua, ja joita ei ole mahdollista aikatauluttaa. Näitä ovat esimerkiksi vesivuodot, sään aiheuttamat toimenpiteet tai ylimääräiset siivoukset.

## Varianssi rakentamisessa

Virtauksen vaihtelun mittaa kutsutaan varianssiksi. Kuten aiemmin on todettu, lean-filosofiassa pyritään vähentämään tätä varianssia tasaisen virtauksen takaamiseksi ja läpimenoaikojen lyhentämiseksi. Tahtituotannossa esiintyy Frandsen et al. (2014) mukaan

kahdenlaista varianssia: aikataulun kohinaa (*schedule noise*) ja aikataulun varsinaista varianssia (*schedule variance*). Näiden erottaminen on tärkeää siksi, että varsinaisesta aikatauluvariانسsista seuraa helposti työryhmien välisiä konflikteja työskentelypisteiden käytössä, mikä edellyttää työnjohdon puuttumista tilanteeseen ja siten kuluttaa työorganisaation resursseja tuottaen hukkaa. Erottamalla aikataulun kohina aikatauluvariانسsista voidaan hyväksyä tietyn suuruinen tehtävien sisäinen vaihtelu. Tällöin työnjohdon ei tarvitse puuttua töihin, mikäli aikataulun kohinasta aiheutuvan variانسsin määrä ei ylitä aikatauluvariانسsin kynnysarvoa. Tätä on havainnollistettu kuvassa 11.



**Kuva 11.** Aikataulutehtävien kohina (*noise*) ja varianssi (*variance*) tahtiaikataulussa. (Frandsen et al. 2014)

Kuvasta voidaan havaita, että kahden tahtiajan sisällä tapahtuu huomattavasti tehtävien sisäistä vaihtelua, mutta vaihtelusta ei ole haittaa muille töille, ennen kuin vaihtelun määrä johtaa aikataulukonfliktiin, jossa aiemman tahtiajan tehtävä ”vuotaa” seuraavalle tahtiajalle ja vaihtelu muuttuu mitattavaksi variانسsiksi. Tästä aiheutuu konflikti seuraavan työryhmä siirtyessä edellisen työryhmän keskeneräisen työn alueelle. (Frandsen et al. 2014)

Lyhytaikaisessa tarkastelussa kaikessa rakennustyössä havaitaan aina sisäistä vaihtelua, joka selittyy osittain rakennustyön luonteella, kuten eroissa tilojen muodoissa, osien asennusjärjestyksessä ja eri työvaiheisiin kuuluvien alatehtävien erilaisuudella. (Brodetkaia & Sacks 2007) Frandsen (2019) listaa vaihtelun aiheuttajiksi muun muassa työntekijöiden vaihtelevan ammattitaidon ja kokemuksen, eri työskentelytavat, vaihtelevaa

vat työskentelyolosuhteet, työryhmien koot, työkalujen toiminnallisuuden ja saatavuuden, tehtävän aloitusajan vaihtelun työpäivän aikana, sekä työssä aiheutuvat työvaiheesta riippumattomat lyhyet keskeytykset. (Frandsen 2019) Sisäisestä vaihtelusta ja aikataulukohinasta johtuen virtauksen analysointi prosessin mikrotasolla ei välttämättä tuota luotettavaa dataa koko sisävaiheen prosessin virtauksesta. Lisäksi virtauksen analysointi mikrotasolla on työlästä. Onkin oleellista määritellä oikea tarkastelutaso aikataulun seurannalle, ja muodostaa virtauksen mittaustavat tähän tarkastelutasoon perustuen.

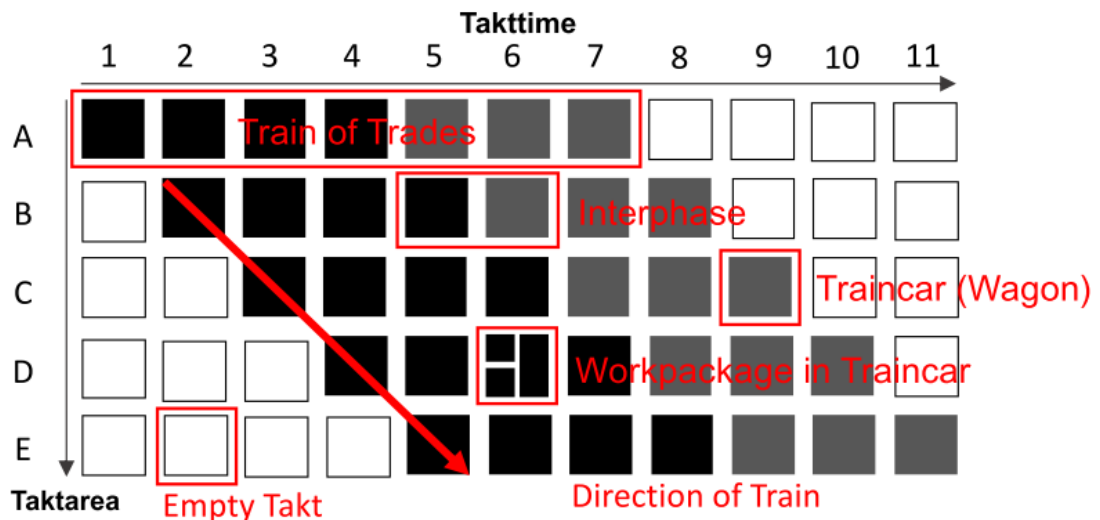
## 2.6 Tahtiaikataulusuunnittelu ja -ohjaus

Tahtiaikataulun käyttö on oleellinen osa lean-filosofiaa, ja alun perin sitä sovellettiin nimenomaisesti liukuhihnatuotantoon, jossa valmistettavat tuotteet ovat toistuvia ja tuotanto voidaan hahmottaa tasaisesti kulkevana prosessina. Tahtiaikataululla on mahdollista luoda edellytykset jatkuvaan prosessivirtaukseen, tasapainotettuun ja standardoituun työhön, visuaaliseen johtamiseen sekä ongelmien aikaiseen havaitsemiseen tuotannossa. (Liker 2004) Rakentamisen yhteydessä puhutaan tahtiaikasuunnittelusta (*Takt Time Planning*, TTP) tai tahtiaikataulusuunnittelusta ja -ohjauksesta, jolloin käytetään termiä *Takt Planning and Takt Control* (TPTC) (Dlouhy et al. 2016, Binninger et al. 2017a).

Perinteisiä rakentamisessa käytettyjä aikataulusuunnittelu- ja ohjausmenetelmiä, kuten kriittisen polun menetelmää on jo pitkään kritisoitu sopimattomiksi päivittäistilanteella tapahtuvaan työohjaukseen, jollaista myös tahtiaikataulusuunnittelu edellyttää. (mm. Brodetskaia & Sacks 2007, Koskela et al. 2014) Projektinhallinnassa yleisesti käytetyn CPM:n puutteena on se, että menetelmä ei tunnista rakentamisessa tapahtuvaa jatkuvaa aikataulun muuttumista. Tämä on tiedostettu jo vuosikymmenten ajan (mm. Koskela 2000), mutta uusien menetelmien omaksuminen rakennusalalla on ollut hidasta. (Koskela et al. 2014)

Tavanomaisessa rakennustuotannossa eri työvaiheet saattavat edetä eri nopeuksilla eri syistä. Tämä aiheuttaa helposti ristiriitoja ja ”pullonkauloja” tuotannossa. Yksittäiselle työvaiheelle saattaa olla mahdollista edetä nopeasti, jolloin työmaan työnjohto saattaa kokea, että antamalla töiden edetä vapaasti myös työmaan läpimenoaika lyhenee samassa suhteessa. Todellisuudessa mestojen eli työpisteiden määrän kasvaessa ja työtahtia nopeuttaessa uusien mestojen tarve kasvaa nopeasti ja työmaa päätyy tilanteeseen, jossa yksittäisten tilojen tai lohkojen läpimenoajat kasvavat ja työmaalla on paljon keskeneräistä työtä. (Brodetskaia & Sacks 2007) Tämä vastaa Littlen laissa esitettyä WIP:in määrän kasvattamisesta aiheutuvaa jaksoajan kasvua.

Tahtiaikataulusuunnittelu vastaa rakentamisen tuotannonhallinnan haasteisiin jakamalla työvaiheet tasakokoisiin osiin ja tahdistamalla työt siten, että kukin työryhmä työskentelee vain määrätyn kokonaisuuden kanssa kerrallaan. Tahtiaikataulusuunnittelussa työalueet jaetaan tahtialueiksi (*takt area*), joilla työt etenevät tahtiajan (*takt time*) mukaisesti. Työvaiheista muodostuvaa kokonaisuutta kutsutaan tuotantojunaksi (*work train, train of trades*), ja yksittäisellä tahtialueella tapahtuvaa työtä vaunuksi (*wagon*). Tahtiaikataulun edetessä tuotanto etenee vaunuittain tahtiajan tahdistamana tahtialueelta toiselle. Tahtiaikataulun rakennetta on esitelty kuvassa 12. Koska töiden sisältö ja resurssikuorma voivat vaihdella työvaiheesta toiseen, on oleellista varmistaa riittävät resurssit kullekin työvaiheelle. (Hagsheno et al. 2016) Tahtiaikatauluun tulee myös sisällyttää riittävästi puskureita (*buffers*), joilla huomioidaan työssä tapahtuvat mahdolliset häiriöt. Puskureita voidaan sisällyttää aikataulun väliin, jolloin aikataulussa voi esiintyä puskurivaunuja (*buffer wagon*), tai aikataulun loppuun (*calculated end buffer*), jolloin puskuri toimii lisäajan tavoin ja antaa joustoa töiden loppuun saattamisessa. Puskureita syntyy myös suunnittelusta riippumatta, esimerkiksi viikonlopuista ja lomapäivistä. (Dlouhy et al. 2019) Ura-koitsijat joutuvat myös mitoittamaan töidensä sisälle puskureita, jotta tahtiajan sisällä tapahtuvat häiriöt eivät aiheuta häiriöitä seuraavalle työvaiheelle. Suositus onkin, että työryhmien kuormitus asetetaan 70–80 % tasolle työryhmän teoreettisesta kapasiteetista. (Frandsen et al. 2015)



**Kuva 12.** Tahtiaikataulun periaatekuva ja termistöä. (Dlouhy et al. 2019)

Jo pelkällä tahtiaikataulun laatimisella ja käyttöönotolla on voitu havaita erityisesti sisävalmistusvaiheen läpimenoajan lyheneminen jopa 20–30 % (mm. Lehtovaara et al. 2020; Lehtovaara 2019; Binninger et al. 2018). Building 2030 -hankkeen yhteydessä tutkituissa kohteissa voitiin saavuttaa 30 % aikataulusäästö jo ensimmäisissä hankkeissa, joissa

miellettiin, että tuotannon henkilöstöä ei ollut edes täysin onnistuttu sitouttamaan tai ylimääräisiä tahtiaikatauluun sisältyneitä puskureita poistamaan. (Lehtovaara et al. 2020) Laivanrakennusteollisuudessa risteilylaivojen hyttisaneerauksiin sovellettaessa tahtiaikataulusuunnittelulla on saavutettu 380 % parannus tuottavuudessa, 99 % lasku WIP:in määrässä, laatuvirheiden pieneneminen 99 %:lla ja koko projektin läpimenoajan lyheneminen 73 %:lla. (Heinonen & Seppänen 2016) Tahtituotannossa nähdään siis perustellusti runsaasti potentiaalia läpimenoaikojen lyhentämiseen, hukan vähentämiseen ja tuottavuuden nostamiseen.

Onnistuneen tahtisuunnittelun takaamiseksi hanke tulisi suunnitella alusta asti tahtiaikataulua käyttäen (Dlouhy et al. 2016). Urakoitsijat tulisi osallistaa tahtiaikataulusuunnitteluun jo sopimusvaiheessa (Örmä 2019). Kesken hankkeen tahtiaikatauluun siirtyminen on todettu erittäin haastavaksi ja jopa laatuvirheiden määrää kasvattavaksi (Babanina 2020).

### **Takt Planning and Takt Control**

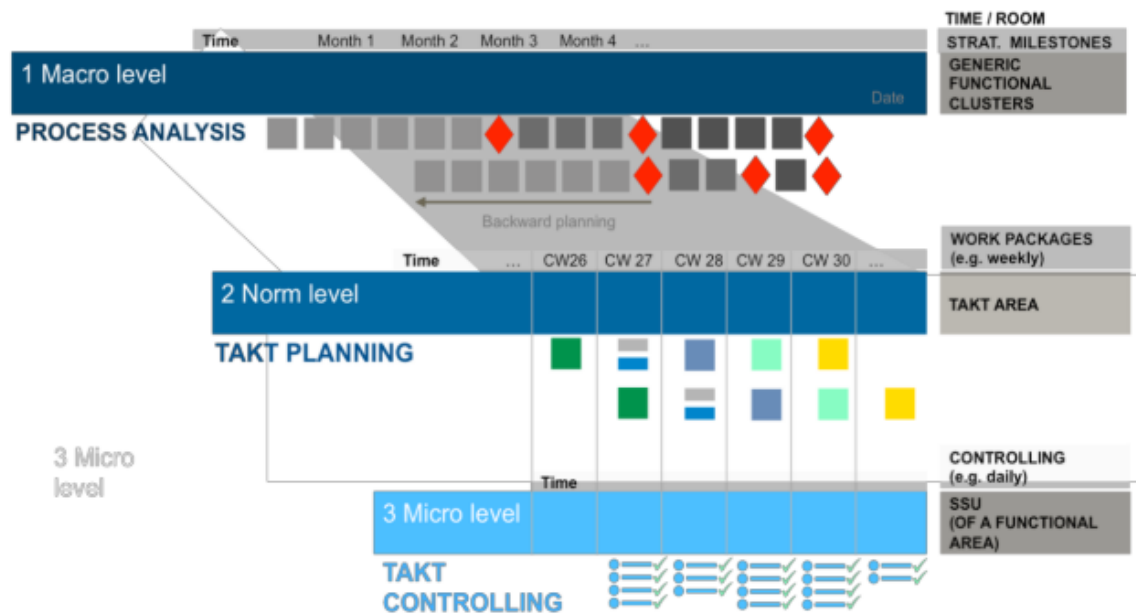
Karlsruhe Institute of Technology (KIT):n tutkimusryhmä on kehittänyt prosessimaisen menetelmän tahtiaikataulun muodostamiseen ja ohjaukseen. Menetelmästä käytetään nimitystä *Takt Planning and Takt Control* (TPTC). Menetelmän esitetään lisäävän rakentamisprosessin vakautta, avoimuutta ja ohjattavuutta, sekä mahdollistavan PDCA-syklin (*plan-do-check-act*) mukaisen jatkuvan parantamisen. (Dlouhy et al. 2016) Nämä ovat myös lean-filosofian mukaisia periaatteita. Menetelmässä tahtiaikataulun muodostaminen on jaettu kolmeen eri aika- ja paikkariippuaiseen tasoon, joita kutsutaan makro-, normi- ja mikrotasoin. (Dlouhy et al. 2016)

Makrotasolla suoritetaan prosessianalyysi, jossa projekti lohkotaan alueisiin aikatauluta-voitteiden perusteella. Makrotaso määrittää reunaehdot projektin suorittamiselle. Normitasolla lohkotut alueet jaetaan vakioituihin, toistuviin alueisiin (*Standard Space Unit*). Tämä on lean-filosofian mukaista työn standardoimista ja muodostettavat alueet vastaavat käytännössä tahtialueita. Menetelmä huomioi myös sen, että alueet voivat olla eri kokoisia. (Dlouhy et al. 2016) Kaikkia projektin osia ei ole välttämättä tarkoituksenmukaista sisällyttää tahtiaikatauluun.

Mikrotasolla tarkoitetaan rakennustyön johtamista ja varsinaista rakennusprosessia, jota ohjataan säännöllisesti järjestettyjen tahtiaikataulukokousten avulla. Kokouksiin osallistuvat käynnissä olevan työvaiheen työntekijät sekä työvaiheista vastaavat työnjohtajat. Dlouhy et al. esittävät kokouksia pidettäväksi päivittäin ja kokousten kestoksi noin 15 minuuttia. Kokousten perusteella tehtävä tahtiohjaus, kuten aikataulumuutokset saate-



taan myös visuaalisesti nähtäville työmaan henkilöstölle. (Dlouhy et al. 2016) TPTC-menetelmän eri tasot ja niille liitetyt tahtiaikataulun suunnitteluperiaatteet on esitelty kuvassa 13.



**Kuva 13.** TPTC-menetelmän aikataulutaset. (Dlouhy et al. 2016)

Fransson (2019) esittää väitöskirjassaan tahtiaikataulun paljastavan aikataulusuunnittelun virheitä, jotka saattaisivat jäädä muuten huomiotta. Tahtiaikataulussa voidaan myös esittää muuten piiloon jäävät työnjohtajien varaamat aikataulupuskurit siten, että koko työmaaorganisaatio tulee niistä tietoiseksi. (Fransson 2019) Lehtovaara et al. (2021) esittävät, että tahtiaikataulu auttaa myös tuomaan esiin häiriöitä tuotannosuunnittelussa ja tuotannonohjauksessa. Yleisesti ottaen tahtiaikataulun esitetään parantavan tuotannon virtausta. (Lehtovaara et al. 2021) Tahtiaikataulun tavoitteena onkin läpimeinoaikojen lyhentäminen arvoa tuottamatonta toimintaa vähentämällä, eli toisin sanoen ylimääräiset puskurit poistamalla (Vatne & Drevland 2016). Jakamalla tehtävät tasakokoisiin alueisiin ja aikataulua aktiivisesti ohjaamalla saadaan prosessista myös vakaampi (Dlouhy et al. 2016).

### Last Planner System

Last Planner System (LPS) on työmaan tuotannonohjaukseen käytetty päivittäisjohtamisen menetelmä. Last Planner on LCI:n rekisteröimä tavaramerkki. LPS:n tarkoituksena on varmistaa edellytykset suunniteltujen tehtävien toteuttamiseen viikkotasolla. LPS:n tarkoitus on parantaa tuotannon virtausta painottamalla tuotannonohjauksessa töiden jatkuvuutta ja aloitusedellytyksiä. Tämä tarkoittaa tehtäväjärjestyksen määräytymistä sekä aloitusedellytykset ja ylitason aikataulu huomioiden. Toimintatapaan kuuluu myös

keskusteleva lähestymistapa, jossa työn varsinainen toteuttaja ja työnjohto sopivat työnjärjestyksestä keskenään. Työn suorittaja kantaa vastuun sovituista työtehtävistä ja siten sitoutuu paremmin noudattamaan aikataulua. (Koskela & Koskenvesa 2003)

Tahtiaikataulusuunnittelulla ja aktiivisella tahtiaikatauluohjauksella esimerkiksi päivittäisillä aikataulupalavereilla tai LPS:ää käyttämällä voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä virtauksen parantamisella ja läpimenoajan lyhenemisellä. Tahtiaikataulua on kokeiltu jo laajasti rakennusalalla, ja tahtiaikataulun käytössä ollaankin siirtymässä testausvaiheesta kohti tahtiaikataulun integroimista osaksi rakennusyritysten prosesseja. Lehtovaara et al. (2020b) esittävät useita eri tahtiaikataulua käyttäneitä kohteita vertaileessa tutkimuksessaan ehdotuksen kypsyyksimallista tahtiaikataulun laadun arvioimiseksi. Ensimmäisellä tasolla projektitason tahtiaikataulusuunnittelun ehdot täyttyvät, tahtiaikataulu ja sen osat, kuten tahtialueet, tahtiaika ja tuotantojunnat ovat määriteltynä ja tahtiaikataulu on esitetty visuaalisessa muodossa. Toisella tasolla sidosryhmät osallistetaan tahtiaikatauluun ja ongelmanratkaisuun, työmaalogistiikka tahdistetaan aikatauluun, suunnitteluprosessi ja tuotantoprosessi ovat keskenään tahdissa, ja työmaan laadunhallinta tapahtuu tahtiaikataulun mukaisesti. Kolmannella ja korkeimmalla tasolla tahtiaikataulun käyttö viedään organisaatiotasolle ja tahtiaikataulua kehitetään jatkuvan parantamisen keinoin. Tahtiaikataulu on integroitu rakentamisprosessiin sopimustasolla, hukkaa vähennetään systemaattisesti, logistiikka- ja materiaalivirtausten hallinta tapahtuu prosessimaisesti esimerkiksi ulkoista logistiikkapalveluntarjoajaa hyödyntäen ja tahtiaikataulun suorituskykyä seurataan aktiivisesti tulevien projektien aikataulusuunnittelua varten. Korkeimmalla tasolla myös tärkeimmät tahtiaikataulun suorituskykymittarit (*key performance indicators*, KPI), kuten esimerkiksi tuotteen läpimenoaika, toimitusaika ja virheiden määrä ovat määriteltynä, säännönmukaisesti mitattuja ja valvottuja, mikä mahdollistaa tietoon perustuvan johtamistavan. (Lehtovaara et al. 2020b) Tämän tutkimuksen tavoitteet tukevatkin pyrkimystä tilastolliseen laadunhallintaan perustuvaan, tunnuslukuja hyödyntävään johtamistapaan.

## 2.7 Mittauksen merkitys

Tässä tutkimuksessa tutkittava virtauksen mittaaminen on osa suorituskyvyn mittausta. Mittaamalla saatu data tukee päätöksentekoa ja luo arvoa yritykselle (Laihonen et al. 2013). Mittauksen merkitys nähdään myös tärkeänä laatutekijänä. ISO-9000:2015-standardi määrittelee laadunhallintajärjestelmien periaatteet, ja datan ja informaation analysoimisen ja arvioinnin toimiminen tärkeimpänä lähteenä päätöksenteossa onkin osa hyvin toteutettua laadunhallintajärjestelmää. Standardin määritelmän mukaisesti ”datan ja

informaation analysointiin ja arviointiin perustuvat päätökset tuottavat todennäköisemmin haluttuja tuloksia.” (SFS EN-ISO 9000:2015) Onkin perusteltua käyttää dataa päätöksenteossa, mikä puolestaan korostaa kerättävän datan laatuvaatimuksia ja oikeiden asioiden mittaamisen tärkeyttä.

Vanhamäen (2020) diplomityössään toteuttaman kirjallisuuskatsauksen perusteella rakennusalan datankeruuta koskevaa tutkimusta ei ole vielä laadittu paljoa. (Vanhamäki 2020) Kerättävän ja tuotettavan datan määrä on kuitenkin digitalisoitumisen myötä kasvanut ja siten myös tiedon hyödyntämismahdollisuudet nousseet. Tulevaisuudessa kerättävän datan määrä nousee entisestään, kun uusia tiedonkeruumenetelmiä otetaan käyttöön. Tiedonkeruu myös automatisoituu. Tätä kerättyä dataa kutsutaan tiedonkäsittelyn kontekstissa big dataksi. (Bilal et al. 2016) Firan tiedonkeruujärjestelmissä on aiemmissa tutkimuksissa myös havaittu parannustarpeita datan laadun kehittämiseksi (Vanhamäki 2020).

Kerätystä datasta voidaan mitata periaatteessa mitä tahansa, joten oleellista on myös yrityksen toiminnan kannalta tärkeiden mittareiden määrittely. Hyvän mittarin ominaisuuksia ovat edustavuus, yksinkertaisuus, selkeys, vertailukelpoisuus ja herkkyys eli mittarin reagointikyky muutoksiin. Lisäksi mitattavan datan kerääminen ja prosessointi tulisi olla mahdollisimman yksinkertaista käyttäjälle, ja mittaria on oltava mahdollista päivittää helposti. Nämä ominaisuudet täyttävää, todenmukaisesti prosessia kuvaavaa mittaria kutsutaan usein suorituskykymittariksi (Key Performance Indicator, KPI). Tuotannonohjauksen KPI:tä ovat teollisuudessa esimerkiksi läpimenoaikaan, laatuun ja kustannuksiin liittyvät mittarit. Mittarit mahdollistavat myös prosessin ohjauksen, viestivät prosessin tilasta prosessin sidosryhmille ja luovat edellytykset prosessin kehittämiseksi jatkuvan suorituskyvyn seurannan avulla. (Franceschini et al. 2007)

## 2.8 Tilastollinen laadunhallinta

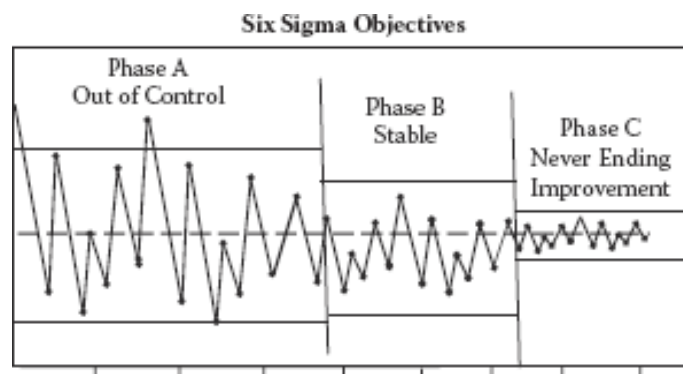
Teollisuudessa laadunhallintaa on kehitetty 1900-luvun alusta asti, ja aiemmin esitellyn Fordin tuotantojärjestelmän pohjalta kehitettiin myöhemmin kokonaisvaltaisen laadunhallinnan (*Total Quality Control, TQC*) menetelmä, joka puolestaan kehittyi 1980-luvulla kokonaisvaltaiseksi laatujohtamiseksi (*Total Quality Management, TQM*). Laatujohtamisten kehitys onkin perustunut pitkälti aiempien innovaatioiden hyödyntämiseen ja harvemmin kokonaan uusien menetelmien keksimiseen. TQM:stä kehittyi elektroniikkavalmistaja Motorolan soveltamana Six Sigma -menetelmä, jossa pyrkimyksenä on varianssin poistaminen prosessin kaikista toiminnoista. Six Sigmassa käytetään DMAIC-lähestymistapaa (*define, measure, analyze, improve, control*) ongelmanratkaisuun. Menetel-

män tavoitteena on parantaa asiakkaan kokemaa laatua. Paras hyöty näistä laadunhallinnan menetelmistä esitetään saatavan, kun järjestelmät integroidaan koko organisaation strategiaan. (Voehl et al. 2013)

### Lean Six Sigma

Six Sigmaan yhdisteltiin myöhemmin lean-filosofian periaatteita, ja tuloksena muodostui Lean Six Sigma -malli, jossa pyritään hukkan minimoimiseen Six Sigman periaatteita hyödyntäen. Lean Six Sigma -menetelmä perustuu prosessin analysoimiseen tilastotieteen menetelmin, ja virheiden eliminoimiseen prosessista siten, että parhaalla mahdollisella tasolla prosessissa esiintyy vain keskimäärin 3,4 virhettä miljoonaa tilaisuutta kohden (*defects per million opportunities*, DPMO). Menetelmässä tehdään kaksi perusoletusta:

1. Mitä enemmän vaihtelua eli varianssia vähennetään prosessista, sitä vähemmän prosessissa on tilaisuuksia virheiden synnylle. Varianssin vähentäminen johtaa prosessin vakautumiseen, eli prosessin kulku on ennakoitavissa. Tätä on havainnollistettu kuvassa 14.



**Kuva 14.** *Prosessin muutos hallitsemattomasta vakaaksi ja lopulta jatkuvan parantamisen sykliin siirtyminen. (Voehl et al. 2013)*

2. Alhaisemmat kustannukset, kiertoaika ja virheiden taso johtavat korkeampiin tuottoihin, markkinaosuuksiin ja asiakastyytyväisyyteen. Toisin sanoen prosessista tulee poistaa hukka ja arvoa tuottamattomat toiminnot. (Voehl et al. 2013)

Varianssilla tarkoitetaan suorituskykyä mitattaessa vaihteluväliä, jolla tuotantoprosessin suorituskykyä kuvaavat arvot voivat vaihdella. Korkea varianssi prosessissa tekee siitä epävakaa ja siten vaikeammin ennustettavan, mikä vaikeuttaa prosessinohjausta ja näyttäytyy kasvaneena kuormana työnjohdolle, laatuvirheinä tai aikataulupoikkeamina. Toisaalta kaiken varianssin poistaminen prosessista ei ole itsetarkoitus (Pound et al. 2014).

## Tilastotieteen käsitteet

Tilastotieteen hyödyntäminen prosessin vaihtelun vähentämiseksi on tehokkaaksi todettu keino laadun parantamiseen ja tukee myös lean-filosofiassa tavoiteltavaa prosessin vakautusta ja hukkan vähentämistä. Kuten aiemmin todettiin, työmaalta kerätyt datamäärät ovat viime vuosina kasvaneet huomattavasti, jolloin tilastollisessa analyysissä hyödynnettävää dataa on myös enemmän. Suurten datamäärien hyödyntäminen tietoon perustuvassa päätöksenteossa edellyttää tuntemusta tilastotieteen termeistä ja tilastomatematiikan perusteista. Muutamia yleisimpiä tilastotieteessä käytettäviä suureita ovat:

1. Otoskeskiarvo:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
2. Otosvarianssi:  $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$
3. Otosmaksimi- ja minimi:  $x_{max} = \max(x_1, \dots, x_n)$ ;  $x_{min} = \min(x_1, \dots, x_n)$
4. Otosvaihteluväli:  $r = x_{max} - x_{min}$
5. Varianssi  $var(\bar{X}) = \frac{\sigma^2}{n}$ .
6. Keskihajonta:  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ . (Ruohonen 2011)

Esitettyjä kaavoja soveltamalla voidaan muodostaa tunnuslukuja prosessin ja sen osien ominaisuuksista, ja niiden perusteella arvioida esimerkiksi prosessin suorituskykyä ja sen muutosta prosessin edetessä.

## 2.9 Rakentamisen virtauksen mittaus ja tunnusluvut

Sovellettaessa teollisuuden käyttämiä laadunvalvonta- ja prosessinohjausmenetelmiä rakentamiseen, tulee ottaa huomioon erot rakennusprojektien ja tehdastuotannon luonteessa. Näitä ovat esimerkiksi mittakaavaerot valmistettavassa tuotteessa ja tuotteiden määrässä, sekä myös rakennusalan omaksumat, pitkään käytössä olleet työskentelytavat. Rakennustyötä ei tyypillisesti tehdä vuorotyönä, ja valmistettavia tuotteita, kuten asuntoja, ei ole määrällisesti yhtä paljon kuin teollisuudessa massatuotantona valmistessa. Siinä missä teollisuuden läpimenoajat voivat olla minuutteja, ovat rakentamisessa käytetyt tahtiajat usein päiviä tai viikkoja (Hagsheno et al. 2016).

Teollisuuden käyttämät mittausmenetelmät eivät välttämättä sovellu sellaisenaan käytettäväksi rakennusalalla, vaan tarkasteltavien suureiden mittakaavat ja hyväksyttävät raja-arvot tulee määritellä rakentamisen tarpeisiin sopivaksi. Esimerkiksi tietyn työvaiheen valmistumista tietyssä asunnossa ei ole tarkoituksenmukaista seurata minuutti-, tai edes tuntitasolla, mutta päivä- ja viikkotasolla tarkastelu on jo mielekästä suorittaa. Myös

havaittujen aikataulu- ja laatu-poikkeamien esiintyvyys poikkeaa valmistavasta teollisuudesta, ja tämä on otettava huomioon laatumittaristoa laatiessa. Seuraavaksi käydään läpi mahdollisia suorituksen mittausmenetelmiä ja tunnuslukuja.

### **PPC**

Käytetyin suorituskyvyn mittari lean-rakentamisessa ja tahtituotannossa on PPC (*Percent Plan Complete*) (Ballard 2000). Suomeksi PPC:stä käytetään joskus lyhennettä TTP (tehtävien toteumaprosentti). PPC mittaa suoritettujen aikataulutehtävien osuutta suunnitelluista tehtävistä esimerkiksi viikkotasolla. PPC:n selvänä haittapuolena on kuitenkin, että se mittaa lähinnä aikataulun luotettavuutta eikä anna siten tietoja projektin kokonaistilanteesta. (Sacks et al. 2017). Rakennusalalla käytetyt tuottavuuden indikaattorit saatavat muissakin tapauksissa kannustaa osaoptimointiin, mikä voi puolestaan heikentää tuotteiden virtausta ja siten vaikuttaa negatiivisesti myös prosessin virtaukseen. (Sacks et al. 2017) Toisaalta PPC:tä voisi hyödyntää viikkoaikatauluseurantaa monipuolisemmin mihin tahansa sitoutumista edellyttävän asian toteutumisen seurantaan, kuten esimerkiksi laadunvalvontaan tai suunnitteluun (Bertelsen et al. 2007).

### **Construction Flow Index**

Sacks et al. (2017) esittämä *Construction Flow Index* (CFI) pyrkii kuvaamaan rakennustuotannon virtausta PPC:tä paremmin. CFI on indeksi useista eri virtausta kuvaavista muuttujista ja sen avulla voidaan vertailla esimerkiksi eri projektien virtausta. CFI:n laskenta pohjautuu Sacksin (2016) teoriaan hyvästä rakentamisen virtauksesta ja sen laskemisessa mitataan muun muassa töiden kestoa, suoritusjärjestystä sekä vakautta. Sacks et al. (2017) esittävät, että yhtenäisen virtauksen mittaustavan puuttuminen rakennusalalta on este myös erilaisten projektinhallintatapojen keskinäiselle vertailulle. (Sacks et al. 2017)

Tässä tutkimuksessa pyritään määrittelemään rakentamisprosessin virtauksen tunnuslukuja ja mittaustapoja samoin periaattein kuin CFI:ssä. CFI ei kuitenkaan sovellu tässä tutkimuksessa käytettävän datan analysoimiseen, joten sitä ei hyödynnetä tässä tutkimuksessa virtauksen laskennassa.

### **Virtauksen mittarit**

Teollisuuden laadunhallintaa käsittelevässä teoksessa *Factory Physics for Managers* (Pound et al. 2014) esitetään matemaattisia menetelmiä tuotannonohjaukseen ja suorituskyvyn mittaukseen. Näitä voidaan hyödyntää myös rakentamisessa tietyin reunaehdoin. Bertelsen et al. (2006) esittivät jo 2006 tarpeen rakentamisen virtauksen hallinnan työkaluille. Siten onkin perusteltua mitata prosessin ominaisuuksia ja niiden varianssia,

jotta voidaan kehittää mittaristo prosessin virtauksen laadun arvioimiseksi. Tässä tutkimuksessa hyödynnetään Factory Physics for Managers -kirjassa esiteltyjä teollisuudessa käytettyjä termejä. Selkeyden vuoksi termit määritellään tässä vielä erikseen:

**Tahtiaika** (*takt time*): Prosessille määritelty aikayksikkö, jossa prosessin tulee valmistaa tuotteita kysyntään vastaamiseksi. Tahtiaikataulut tuotannossa kysynnän muodostavat seuraavat työtehtävät. Tästä seuraa myös, että tahtituotannossa kaikkien työtehtävien tulee toimia keskenään samassa tahtiajassa.

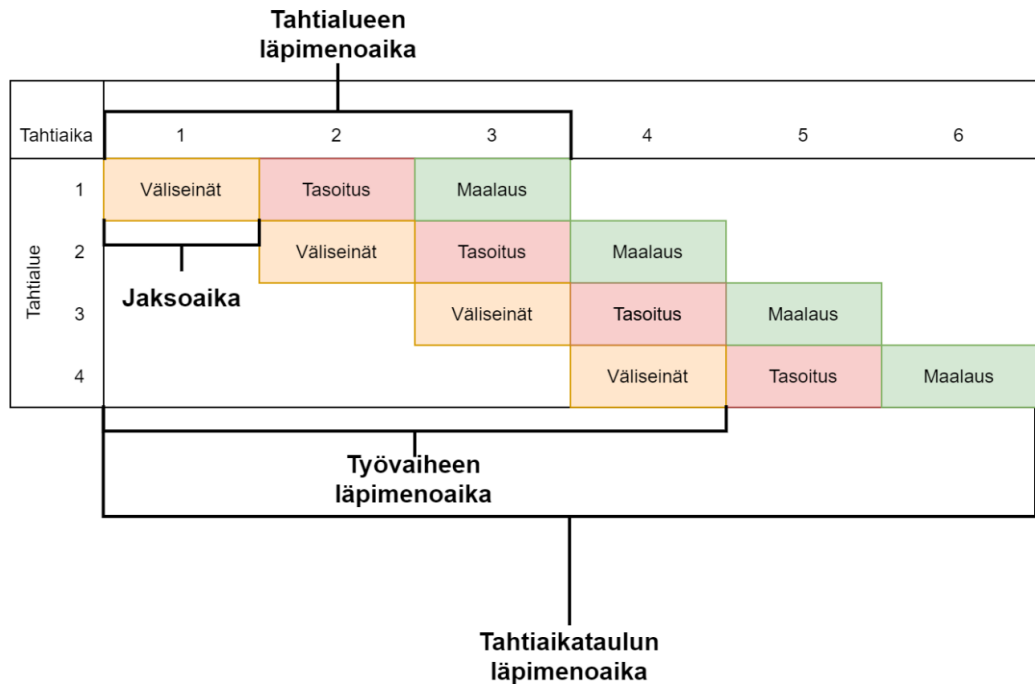
**Jaksoaika** (*cycle time*): Aika, joka kuluu keskimäärin työtehtävän aloittamisesta valmistamiseen. Jaksoaika sisältää myös odotusajan. Jaksoaika lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\text{Jaksoaika} = \frac{\text{Tuotantoaika}}{\text{Tuotetut tuotteet}}$$

Jaksoaikaa voidaan ajatella prosessin läpimenoaikana tietyllä työpisteellä. Tahtiaikataulut tuotannon yhteydessä ideaalinen jaksoaika on sama kuin tahtiaika, koska silloin tuotanto tapahtuu tahdin mukaisesti eli tuotteita tuotetaan juuri prosessin muodostaman kysynnän verran. Tässä tutkimuksessa jaksoaika-termiä käytetään töiden aloitus- ja lopetusajojen välisestä ajasta. Jaksoajan vaihtelua voidaan tarkastella virtauksen vakauden arvioimiseksi.

**Läpimenoaika** (*lead time*), määritelty aika, jossa tuote kulkee koko tuotantoprosessin läpi. Läpimenoaika mittaa siis prosessin kestoa alusta loppuun. Teollisuudessa tämän prosessin katsotaan usein alkavan tuotteen tilaamisesta ja päättyvän toimitukseen, mutta läpimenoaikaa voidaan tarkastella myös tuotantoketjun sisällä. Tässä tutkimuksessa läpimenoajalla viitataan nimenomaisesti kokonaisten työvaiheiden läpimenoaikaan. Koska tutkimuskohteessa valmistettavat tuotteet ovat asuntoja, voidaan tarkastella myös tahtialueiden läpimenoaikaa eli aikaväliä ensimmäisen tahtiaikataulutehtävän alkamisesta viimeisen tahtiaikataulutehtävän päättymiseen. Läpimenoaikaan lasketaan kaikki tuotteen valmistukseen kulunut aika, eli myös odotukseen ja valmistukseen käytetty aika. Pienempi läpimenoaika samalla työmäärällä tarkoittaa tehokkaampaa prosessin arvovirtaa ja siten usein parempaa virtausta. (Pound et al. 2014) Läpimeno-termillä viitataan puolestaan tietyssä aikayksikössä valmistettujen tuotteiden määrään.

Kuvassa 15 on esitelty periaatekuva tahtiaikataulusta, johon on merkattu esitettyjen tunnuslukujen määritelmät.



**Kuva 15.** Virtauksen suorituskyvyn mittarit tahtiaikataulussa.

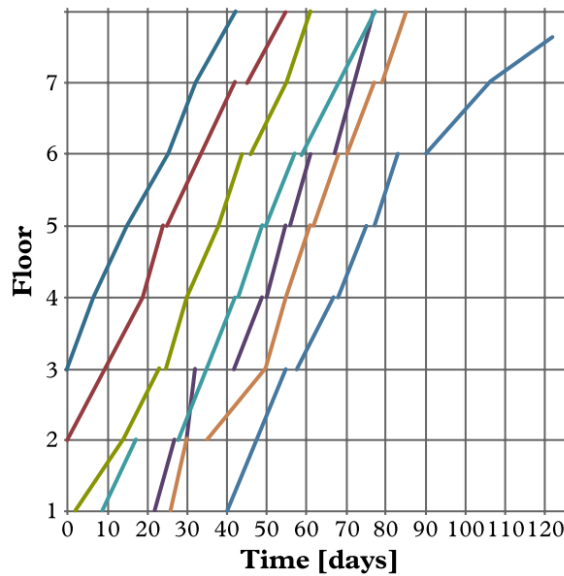
Näitä tunnuslukuja voidaan laskea myös eri työvaiheista ja verrata siten eri työvaiheiden suorituskykyä keskenään. Kuten aiemmin todettiin, seuraamalla tunnuslukuja aktiivisesti voidaan myös mitata tunnuslukujen muutosta ajan myötä ja siten arvioida prosessin virtauksen kehitystä.

### Virtauksen visualisointi aiemmissä tutkimuksissa

Lean-filosofian periaatteisiin kuuluu tiedon saattaminen visuaaliseen muotoon. Suuresta datamäärästä saatavat tunnusluvut saattavat olla haastavia tulkita nopeasti, joten visuaalisella esityksellä voidaan välittää tietoa nopeammin. Rakentamisen tahtituotannosta tehdyt tutkimukset ovat toistaiseksi olleet tapauskohtaisia ja vertaisarvioituja tutkimuksia aiheesta on todella vähän (Keskiniva et al. 2021). Tutkimuksia siitä, kuinka tahtituotanto vaikuttaa tuotantoprosessin virtaukseen ei myöskään ole vielä juurikaan tehty (Lehtovaara et al. 2021). Tuotannon seuranta ja on kuitenkin toteutettu useissa tutkimuksissa, ja näissä tutkimuksissa esiteltyjä menetelmiä voidaan hyödyntää virtauksen visualisoinnissa.

Yleinen tapa kuvata rakentamisprosessin etenemistä on paikka-aika-kaavio (*line-of-balance chart*). Tätä esitystapaa voidaan käyttää myös virtauksen havainnollistamiseen, kuten kuvassa 16 on esitetty.

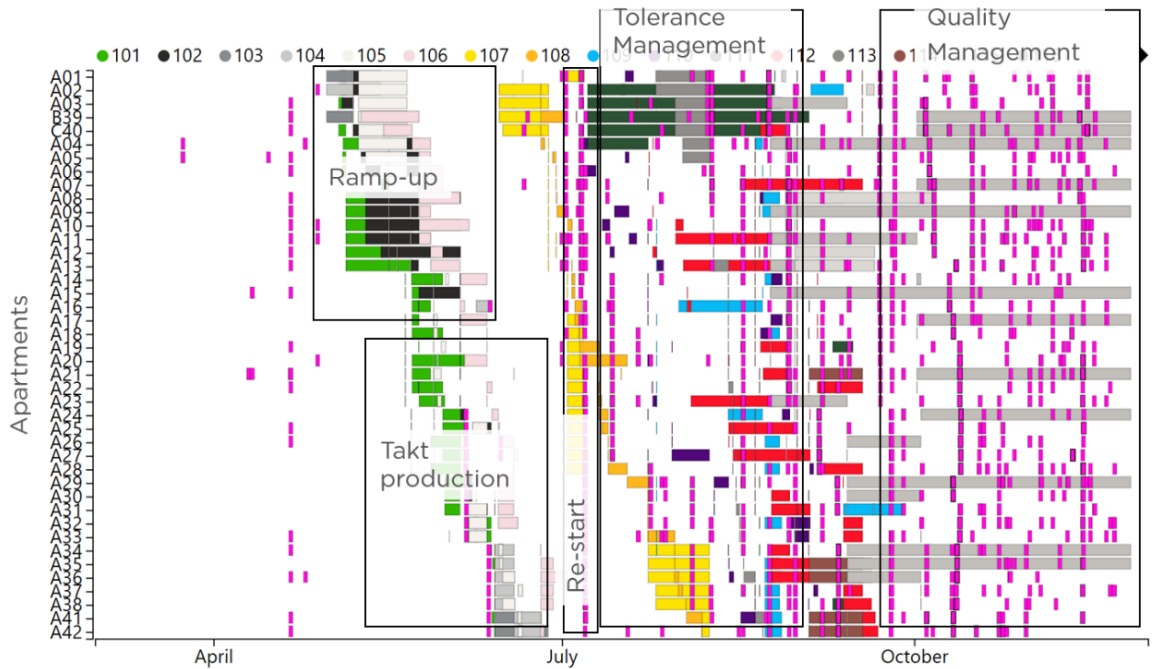




**Kuva 16.** Paikka-aikakaavio, jossa on esitetty eri työvaiheiden toteutunut etenemä kerroksittain. (Sacks et al. 2017)

Sacks et al. (2017) mukaan paikka-aikakaaviota tarkastelemalla kokenut aikataulusuunnittelija voi arvioida työmaan virtausta ja töiden edistymistä. Aiemmin esitellyssä CFI:ssä hyödynnetään paikka-aikakaavion muodostamiseen käytettyä aikatauludataa virtauksen laadun arviointiin.

Alhava et al. (2019) esittivät työmaan tahtiaikataulun toteumatiedon ja Congrid-laadunhallintasovelluksella kohteesta tehdyt laatuhavainnot yhdessä kaaviossa tahtiaikataulun toteumaa analysoineessa tutkimuksessaan. Tällainen aikataulusitys on mahdollista muodostaa, mikäli sekä aikataulu- ja laadunhallintajärjestelmät sisältävät yhtenäiset metatiedot paikasta.



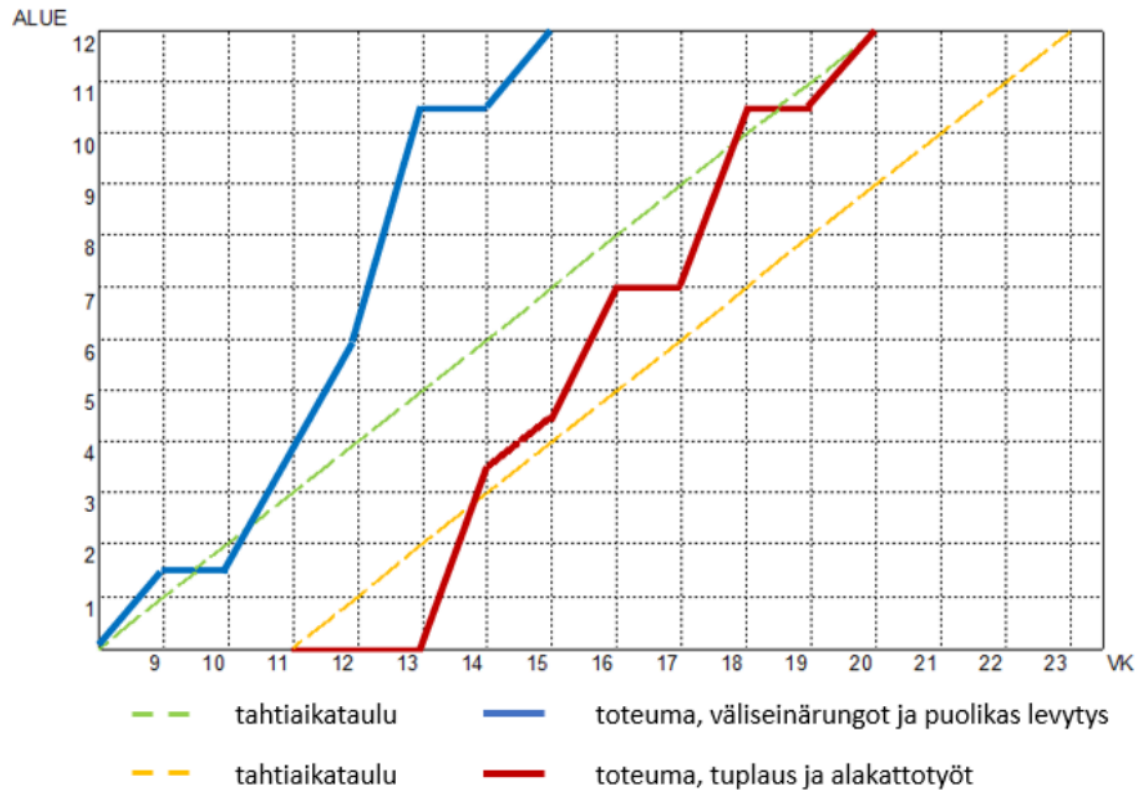
**Kuva 17.** Yhdistettyä aikataulu- ja laatuhavaintodataa Sitedrive- ja Congrid-soveluksista. (Alhava et al. 2019)

Kuvassa 17 on myös korostettu eri rakentamisprosessissa tunnistettuja vaiheita. Visuaalinen esitys ei sellaisenaan olisikaan kovin hyödyllinen, mutta yhdistettäessä se tutkimuksessa esitettyyn kuvaukseen töiden etenemisestä, voidaan havaita, että eri projektin vaiheet ovat nähtävissä esityksestä melko selvärajaisesti. Esitystapa on kuitenkin melko haastava tulkita ilman lisämerkintöjä.

Keskiniva et al. esittävät tutkimuksessaan (2021) menetelmän tahtiaikataulun ohjaukseen asuntokorjauskohteissa digitaalista ohjausta käyttäen. Keskiniva et al. mukaan digitaalisin työkaluin tehostettua tuotannonohjausta tulisi kehittää siten, että se tuottaa mahdollisimman suuren hyödyn työnjohdolle mahdollisimman pienellä vaivalla. Kerättyä digitaalista tietoa tulisi kyetä hyödyntämään tehokkaammin ja uusilla tavoilla. Lean-filosofian mukaisia tapoja esittää tietoa visuaalisesti ja tunnuslukuin tulisi tutkia ja kehittää. Dokumentoitu ja automaattisesti koostettu toteumatieto tarjoaa paremmat mahdollisuudet tahtiaikatauluohjaukseen ja mahdollistaa myös ongelmakohtiin puuttumisen sekä tietoon pohjautuvan päätöksenteon pelkän yksittäisten työnjohtajien muistiin ja havaintoihin nojaavan johtamismenetelmän sijaan. (Keskiniva et al. 2021)

Tutkimuksen tuloksena oli mahdollista muodostaa kuvan 18 mukainen visuaalinen esitys tahtiaikataulusta, joka on edelliseen esitykseen verrattuna huomattavasti yksinkertaisempi. Kuvassa on esitetty paikka-aikakaavio, jossa ruudut kuvaavat tahtiaikataulun tietyn työvaiheen tehtäviä. Harmaat ruudut esittävät suunnitellun etenemän, ja punaiset





**Kuva 19.** Työvaiheiden suunniteltu ja toteutunut etenemä viikoittain. (Laine 2020)

Kuvasta huomataan, että töiden eteneminen on tapahtunut jokseenkin epätasaisesti verrattuna suunniteltuun tahtiaikatauluun, ja työt ovat edenneet reilusti etuajassa. Väliseinien tuplaus- ja alakattotöiden alkua on viivästynyt, mutta työvaihe on valmistunut silti etuajassa. Kuvasta voidaan päätellä, että vaikka töiden läpimenoaika onkin ollut lyhyt, on töiden virtaus ollut epätasainen. Visuaalinen esitys havainnollistaa suunnitelmista poikkeamisen ja työnopeuden vaihtelun selkeästi.

## 3. EMPIIRINEN TUTKIMUS

### 3.1 Tutkimusmenetelmät

Tämän tutkimuksen empiirinen osuus koostuu data-analyysistä ja haastatteluista. Tutkimusstrategiana toimii tapaustutkimus (*case study*), joka soveltuu käytettäväksi, kun tutkittava joukko on rajattavissa ja melko suppea. Tapaustutkimuksella on mahdollista hankkia intensiivistä tietoa tutkimuskohteesta, ja sen käyttö soveltuu etenkin prosessien tutkimiseen eri menetelmiä hyödyntäen. (Hirsjärvi et al. 2009)

Haastattelututkimusta voidaan pitää kvalitatiivisena ja data-analyysiosuutta kvantitatiivisena tutkimuksena. Hirsjärvi et al. (2009) mukaan kvalitatiivinen ja kvantitatiivinen tutkimus täydentävät toisiaan, ja kvalitatiivista tutkimustietoa voidaan hyödyntää myös kvantitatiivisen tiedon arvioimiseen ja tulkitsemiseen. Tämän tutkimuksen empiirisen osuuden tarkoitus on kartoittava tutkimus, jonka tarkoituksena on tutkia ilmiöitä, etsiä uusia tarkastelutapoja ja kehittää näiden pohjalta hypoteeseja. Tutkimuksessa on myös kuvailevia elementtejä, eli ilmiöiden tarkkojen kuvausten esitystä ja dokumentointia. (Hirsjärvi et al. 2009)

Kappaleessa 1.2 esitettyihin tutkimuskysymyksiin on mahdollista vastata analysoimalla tutkimuskohteesta kerättyä dataa ja arvioida datasta tehtävien havaintojen luotettavuutta työmaahenkilöstön haastatteluilla. Työmaahenkilöstön haastatteluita käytetään myös työmaan prosessikuvauksen muodostamisessa.

Sisävalmistusvaiheen prosessin kuvausta varten haastateltiin työmaan sisävalmistusvaiheesta vastuussa ollutta työnjohtajaa sekä työmaan vastaavaa työnjohtajaa teema-haastatteluin. Haastatteluilla on tärkeä rooli prosessin ymmärtämisessä työnmaahenkilöstön eli aikatauluohjauksesta vastuussa olleiden henkilöiden näkökulmasta. Teema-haastattelut mahdollistavat myös haastatteluiden vapaamuotoisemman, keskusteleavan luonteen eivätkä siten rajoita vastauksia pelkästään haastattelukysymyksiin (Hirsjärvi et al. 2009). Teemahaastatteluiden runko on esitetty liitteessä 1. Pääpaino haastatteluissa oli digitaalisten työkalujen käytössä data-analyysin datan arvioimista varten. Haastatteluiden annettiin kuitenkin poiketa kysymysrungosta ja haastatteluiden aikana ilmeni myös useita havaintoja ja kehitysehdotuksia sisävalmistusvaiheen prosessista ja sen ohjauksesta. Nämä havainnot on sisällytetty tuloksiin. Taulukossa 2 on listattu haastateltavat rooleineen.

Taulukko 2. *Tutkimusta varten haastateltavien henkilöiden roolit työmaaorganisaatiossa.*

Haastateltava	Rooli
Haastateltava 1	Vastaava työnjohtaja
Haastateltava 2	Sisävalmistusvaiheen työnjohtaja

Haastatteluihin viitattaessa käytetään termejä ”haastateltava 1” ja ”haastateltava 2”. Molempien työmaatoimihenkilöiden haastattelut järjestettiin yksilöhaastatteluina. Haastattelut toteutettiin etäyhteydellä Microsoft Teamsin välityksellä. Haastattelut kestivät noin tunnin haastattelukertaa kohden. Sisävalmistusvaiheen työnjohtajan haastattelu järjestettiin kahdessa osassa. Kaikki haastattelut on suoritettu maaliskuussa 2021.

Tutkimuskohteen tiedot ja sisävalmistusvaiheen prosessin kulku on koostettu pääosin urakka-asiakirjoista ja muista Firan sisäisessä käytössä olevista projekti-kohtaisista materiaaleista sekä työmaahenkilöstön haastatteluista. Projektimateriaalista koostettuun tietoon ei viitata tekstissä erikseen. Muista lähteistä kerättyihin tietoihin viitataan normaalin viittauskäytännön mukaisesti.

### 3.2 Tutkimuskohteen kuvaus

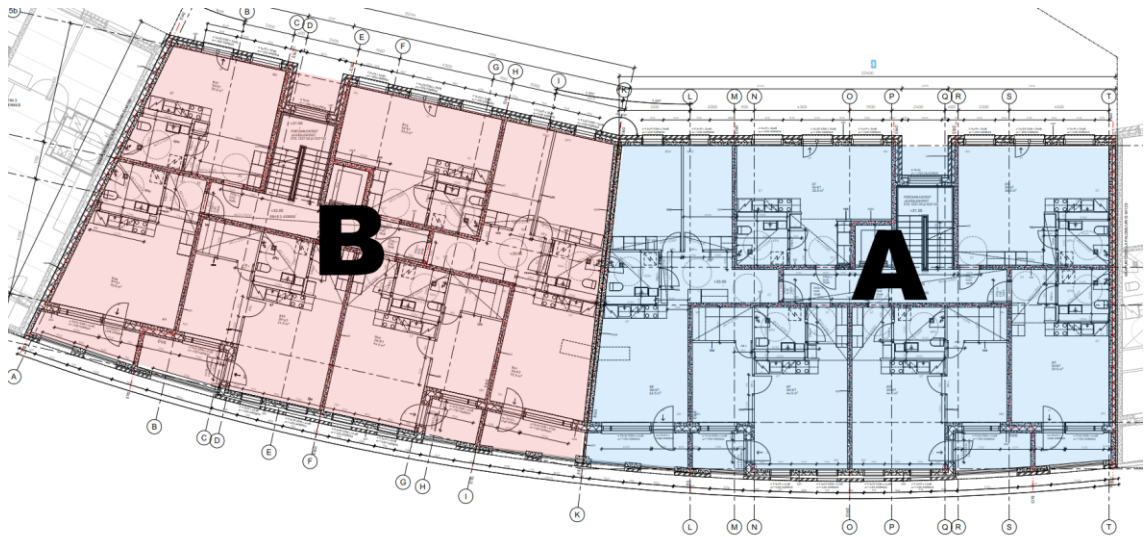
Tutkittava rakennuskohde on Helsingin Pasilan kaupunginosaan rakennettava 60-asuntoinen, 2-portainen ja 6-kerroksinen vuokra-asuntokohde. Rakennuttajana toimii Avara Oy. Kohteen laajuus on 3 829 brm<sup>2</sup>. Kohteen ensimmäisessä kerroksessa on yleisiä tiloja, varastoja, tekniset tilat, liiketila sekä asukkaiden käyttöön tarkoitettu kerhotila ja saunaosasto. Kohde on osa useasta korttelista koostuvaa aluerakentamishanketta, jossa entisen Maaliikennekeskuksen alueelle rakennetaan asuinrakennuksia (Helsingin kaupunki, 2021). Fira on saanut alueelta rakennettavakseen kahden korttelin laajuisen alueen, ja tutkimuskohteen rakennus on ensimmäinen näistä kohteista. Työt kohteessa alkoivat helmikuussa 2020. (Rakennustaito 2021) Fira toimii kohteessa KVR-urakoitsijana, mikä on luonut hyvät edellytykset tahtituotannolle soveltuvien suunnitteluratkaisuiden käyttöön, sillä Fira vastaa sekä kohteen suunnittelun ohjauksesta että toteuttamisesta. Kohteen asuntojen kokojakauma ja määrä on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. *Tutkimuskohteen asuntojen kokojakauma ja määrä*

Asuntotyyppi	Pinta-ala (m <sup>2</sup> )	Kappalemäärä (kpl)
1 h + kt	29,5...36,0	40
2 h + kt	44,5	10
3 h + kt	62,5	10

Kohteen suunnittelussa on hyödynnetty Firan kehittämää asuntokirjastoa, jossa suunnitteluratkaisuja on pyritty vakiomaan mahdollisimman paljon. Erityisenä kohteessa voidaan pitää LVIS-tekniikan nousuhormeja, jotka ovat joka asunnossa samankaltaiset. Teräsbetonelementtirakenteisen tekniikkahormin toisella puolella on kylpyhuone ja toisella puolella keittiö. Tätä toteutustapaa voidaan pitää sekä kustannustehokkaana että turvalisena, sillä vesijohtoja ja viemäreitä ei tarvitse asentaa pitkiä matkoja vaakasuunnassa, vaan tilat, joissa on vesipisteitä tai viemäreitä ovat suorassa yhteydessä nousulinjoihin. Vakioiduissa kylpyhuone- ja keittiöratkaisuissa on myös paljon toistuvuutta, joka luo hyvät edellytykset tahtituotannon edellyttämään työpakettien standardoimiseen.

Tutkimuskohteen asuinkerrokset olivat keskenään lähes identtisiä, etenkin kylpyhuoneiden ja keittiöiden osalta. Asuntopohjissa esiintyi jonkin verran vaihtelua rakennuksen muodosta johtuen. Kuvassa 20 on esitetty rakennuksen peruskerros ja jako porrashuoneisiin.



**Kuva 20.** Asuinkerroksen pohjakuva ja lohkojako.

Kohteen työmaaorganisaation muodostivat vastaava työnjohtaja, työmaainsinööri, sekä kaksi työnjohtajaa, joista toisella oli vastuullaan rakennuksen runko- ja ulkotyöt ja toisella sisävalmistusvaiheen työt. Fira on toteuttanut tahtiaikataulusuunnittelua jo useassa rakennuskohteessa, mutta sisävalmistusvaiheen työnjohtajalla ei ollut vielä aiempaa kokemusta tahtiaikataulun laatimisesta. Kohde oli myös vastaavalle työnjohtajalle ensimmäinen.

Kohteessa erityistä on laajamittainen datan keruu ja datan hyödyntäminen päivittäisjohtamisessa. Fira on pilotoinut useita kehityshankkeita työmaalla. Näitä ovat muun muassa työmaan ohjaamo sekä reaaliaikainen olosuhdeseuranta asunnoissa. Työmaan oh-

jaamo kokoaa työmaan keräämästä datasta yhteenveto- eli niin sanotun *dashboard*-näkyvän. (Rakennustaito 2021) Työmaalta on siis kerätty runsaasti dataa, ja sitä on ollut mahdollista hyödyntää jo reaaliaikaisesti töiden aikana (Rakennustaito 2021). Kohteesta saatuja kokemuksia ja palautetta on käytetty asuntorakentamisen prosessin, työmaan ohjaamon ja Sitedrive-ohjelman kehityksessä, sekä myös Sitedrive-aikatauluohjelman markkinointimateriaalissa (Fira Smart 2021).

### 3.3 Data-analyysin lähtötiedot

Sitedrive-ohjelmasta haettiin projektin päätyttyä analyysia varten tarvittava data sisävalmistusvaiheen ajalta. Työn aikana Sitedriveen syötetty data voitiin ladata suoraan Sitedriven omalla vientitoiminnolla. Datan haku oli mahdollista myös arkistoiduille projekteille ja niiden eri aikatauluversioille. Datan saatavuutta voidaan siis pitää hyvänä.

Sitedrive-ohjelmasta haettiin data-analyysia varten viikkoaikataulun ja yleisaikataulun viimeisimmät versiot xlsx-tiedostoina. Tyypillisesti data-analyysissä käytettävä data edellyttää esikäsittelyä, tietojen täydentämistä tai litterointia (Hirsjärvi et al. 2009). Sitedrivestä saadun datan analysointi oli mahdollista aloittaa sellaisenaan ilman datapisteiden erillistä esikäsittelyä.

Sitedrive-ohjelmassa aikataulutettavia työtoimenpiteitä kutsutaan tehtäviksi (*tasks*). Tehtäviin kohdistetaan aina sijainti (*location*) ja vastuullinen urakoitsija eli työryhmä (*team*). Tehtävät voidaan lohkoa useisiin alatehtäviin, esimerkiksi maalausurakka voidaan jakaa tahtialueittain kohdistettuihin alatehtäviin. Datayksikkönä analyysissä toimivat tahtialuekohtaiset tehtävät. Tehtävät sisältävät suunnitellut aloitus- ja lopetusajankohdat, joita voidaan muokata Sitedrivessä esimerkiksi viikkosuunnitelmaa tarkentaessa. Tehtävät sisältävät myös statustiedon. Työskentelyn alettua tehtävän status muutetaan aloitukseksi ja valmistuttua tehtävä kirjataan valmiiksi. Näiden statusmuutosten ajankohdat kirjautuvat automaattisesti aikataulutiedostoon. Kunkin aikataulutehtävän metatiedoista oli siis mahdollista määrittää ainakin vastuullinen urakoitsija, tehtävän suunniteltu aloitus- ja lopetusajankohta, sekä toteutunut aloitus- ja lopetusajankohta. Taulukossa 4 on esitelty yksittäiseen havaintoyksikköön liitetyt data-analyysissä käytetyt parametrit selityksineen.

Taulukko 4. *Sitedrive-aikataulutehtävään liitetyt data-analyysissä käytettävät parametrit.*

Parametri	Sisältö	Esimerkki
Task Name	Tehtäväkohtainen kuvaus	"Maalaus"
Location ID	Sijaintitiedon tunniste, johon on liitetty nimetty sijainti	"2626232", "B3"
Team ID	Työryhmätiedon tunniste, johon on liitetty nimetty työryhmä tai urakoitsija	"65734" "LTU Asunnot OY"
Start Time	Suunniteltu aloitusajankohta	pp.kk.vvvv, tt:mm:ss



End Time	Suunniteltu valmistumisajankohta	pp.kk.vvvv, tt:mm:ss
Started At	Kirjattu aloitusajankohta	pp.kk.vvvv, tt:mm:ss
Finished At	Kirjattu valmistumisajankohta	pp.kk.vvvv, tt:mm:ss

Taulukon 4 mukaisilla tiedoilla voitiin muodostaa teoriaosuudessa esiteltyjä menetelmiä käyttäen kuvaus eri työvaiheiden etenemisnopeudesta tahtialueittain ja arvioida työmaan virtausta laskennallisesti. Viikkoaikataulussa oli yhteensä 608 tahtiaikataulutehtävää. Lisäksi aikatauluun oli sisällytetty sisävalmistusvaiheeseen kuuluvia tarkastuksia ja toimenpiteitä, joita oli 76 kappaletta. Yhteensä nimettyjä aikataulutehtäviä ja toimenpiteitä oli 684.

Tutkittavaa aikataulua on päivitetty sisävalmistusvaiheen työnjohtajan toimesta noin kuuden kuukauden ajan, mikä käsittää koko sisävalmistus- ja luovutusvaiheen. Aikataulua on päivitetty lähes päivittäin, joskus useita kertoja päivässä, mikä käy ilmi kirjatusta aloitus- ja valmistumisajankohdista. Aikatauluversioita, joihin muutoksia, kuten tehtävien lisäyksiä tai tarkennuksia oli tehty, oli yhteensä 142. Tehtävät on kirjattu valmiiksi mahdollisimman pian valmistumisen jälkeen. Tehtävien suunniteltuja aloitus- ja lopetusaikoja on muutettu viikkoaikataulun paikkansapitävyyden takaamiseksi, mutta tehtävän statusmuutoksia eli toteutuneita tehtävän aloitus- ja lopetusaikoja ei ole muuteltu.

### 3.4 Data-analyysin toteutus

Sitedrive-aikataulun paikkansapitävyyttä ja varianssia aikataulutehtävissä voidaan arvioida tutkimalla eri työvaiheiden suunniteltuja ja toteutuneita aloitus- ja lopetusaikoja sekä vertaamalla näitä keskenään. Analyysissä on tutkittu pääosin viikkoaikataulua. Tahtiaikataulun tehtäväjunistä, kuten "laatoitus" tai "maalaus" käytetään analyysissä nimitystä työvaihe. Yleensä tiedot koostettiin 13 työvaiheesta, jotka on listattu taulukossa 5.

Taulukko 5. *Tutkimuksessa tutkittavat tahtiaikataulun työtehtävät.*

<b>Työvaihe</b>	
1	Väliseinien (VS) työpuoli
2	Asuntojen kaapelointi
3	Väliseinien (VS) tuplaus ja alakatot
4	Laatoitus
5	Tasoitus
6	Maalaus
7	Vesijohdot
8	Kiintokalusteet
9	TATE-kalustus (LV-kalustus, sähkökalustus, IV-kalustus)
10	Laminaattilattia
11	Listoitus ja oviasennus

12	Kodinkoneasennus
13	Lukitus ja heloitus

Sitedrive-viikkoaikataulun aikataulutehtävät järjestettiin työtehtävittäin ja tahtialueittain ja näin saatiin jokaiselle työvaiheelle tahtialuekohtainen kesto sekä ero suunniteltuun keston. Esimerkki muodostetuista tiedoista on esitelty kuvassa 21.

Työvaihe		Maalaus							
Tiimi		LTU Asunnot Oy							
Sijainti	Tahtialue	Sijainti	S1 = S_loppu - S_alku	T1 = T_loppu - T_alku	T1-S1	S_alku - T_alku	S_loppu - T_loppu		
Location Name	Location ID	Location ID	End Time - Start Time	Finished At - Started At	Start Time - Started At		End Time - Finished At		
B2	1	2920209	4,4	10,9	6,6	6,7	0,1	6,6	
B3	2	2920210	3,4	6,9	3,5	2,8	-0,7	3,5	
B4	3	2920211	6,4	11,3	4,9	-0,1	-5,0	4,9	
B5	4	2920212	6,4	3,0	-3,4	-4,4	-1,0	-3,4	
B6	5	2920213	6,4	9,7	3,4	-0,3	-3,7	3,4	
A2	6	2920203	4,4	7,2	2,9	-0,1	-3,0	2,9	
A3	7	2920204	4,4	4,0	-0,4	-0,3	0,0	-0,4	
A4	8	2920205	4,4	4,0	-0,3	-0,2	0,1	-0,3	
A5	9	2920206	4,4	1,0	-3,3	-0,3	3,0	-3,3	
A6	10	2920207	4,4	6,0	1,7	5,7	4,0	1,7	

**Kuva 21.** Sitedrive-aikataulusta haetut tiedot maalaustöistä.

Sarake S1 kuvaa työtehtävän suunniteltua lopetus- ja aloitusajan erotusta ja T1 puolestaan kirjattua valmistumis- ja aloitusaikojen erotusta. Koska aikatauludata sisältää myös tarkan kellonajan tehtävän suoritusajasta, eivät suunnitellut ajat ole kokonaisia vuorokausia. Tämän takia ajat on esitetty vuorokausina yhden desimaalin tarkkuudella. Kuvasta huomataankin, että etenkin B-portaan ensimmäisissä kerroksissa maalaustyöt ovat kestäneet suunniteltua pidempään. Toisaalta kirjauksissa on myös epätarkkuutta, kuten voidaan huomata tahtialueista B5 ja A5, joissa kirjaus töiden alkamisesta on todennäköisesti tehty myöhässä tai työt kirjattu valmistuneeksi etuajassa. Kirjaukset eivät myöskään ota kantaa mahdollisesti viikonloppuna tehtyihin töihin. Kokonaisuutena dataa tarkasteltaessa yksittäisten epätarkkojen kirjausten merkitys kuitenkin vähenee, ja eri työvaiheiden virtauksia voidaan vertailla keskenään.

Datasta muodostettiin visuaalisia esityksiä, sekä laskettiin kappaleessa 2.8 ja 2.9 esitellyjä menetelmiä soveltaen työtehtävä- tai tahtialuekohtaisia tunnuslukuja töiden etenemiselle. Data jaettiin analyysissä A- ja B-lohkoihin, sillä lohkot ovat keskenään lähes identtisiä, joten on mielekästä vertailla eroja virtauksessa A- ja B-lohkojen välillä.

## 4. TULOKSET

### 4.1 Sisävalmistusvaiheen prosessi ja sen ohjaus

Sisävalmistusvaiheella voidaan tarkoittaa asuntorakentamisen kontekstissa kaikkia vesikatton vedenpitäväksi saamisen jälkeisiä rakennuksen sisätiloissa tapahtuvia työvaiheita ja toimintoja. Tässä tutkimuksessa sisävalmistusvaiheeseen lasketaan kuuluvaksi kaikki työvaiheet kevyiden väliseinien pystytyksestä alkaen ja loppusiivoukseen päättyen. Nämä työvaiheet ovat asuntokerrosten osalta sisällytetyjä tahtiaikatauluun, johon sisältyvät sekä asuntojen että porraskäytävän rakennustyöt. Ensimmäisen kerroksen yleiset tilat, tekniset tilat sekä varastot eivät kuuluneet tahtiaikatauluun, vaikka aikatauluja tehtäväsuunnittelu tehtiinkin samassa aikataulutiedostossa selkeyden vuoksi. Myöskään asuntojen parvekkeita ei sisällytetty sisävalmistusvaiheen aikatauluun. Sisävalmistusvaiheen alkaessa kylpyhuoneiden kaatovalut, runkokaapelointi, betonipintojen jälki-työt sekä betonielementtirakenteisten tekniikkahormien asennus ja ilmanvaihtokanavien rungot olivat tehtyjä.

#### Sisävalmistusvaiheen työjono

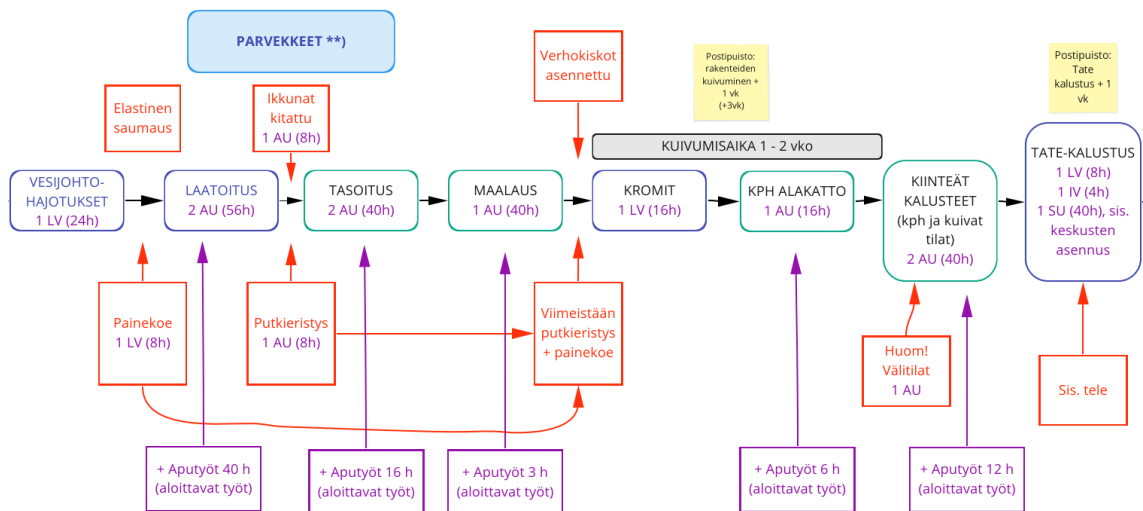
Sisävalmistusvaiheen työt on jaettu toimenpiteiksi työtehtävittäin, ja tarvittaessa saman työnryhmän tai aliurakoitsijan tekemiä työvaiheita on yhdistelty yksittäiseksi aikataulu-tehtäväksi, esimerkiksi *"listoitus ja ovi-asennus"*. Taulukossa 6 on listattu työvaiheet eli työpaketit kronologisessa järjestyksessä. Työvaiheiden tarkempi sisältö on kuvattu sisältö-sarakkeessa.

Taulukko 6. *Sisävalmistusvaiheen työjono.*

	<b>Työtehtävä</b>	<b>Sisältö</b>
1	VS työpuoli	Kipsilevyväliseinärunkojen pystytys, väliseinän toisen puolen levytys
2	Asuntojen kaapelointi	Väliseinien ja alakattojen sisään jäävät kaapeloinnit asunnoissa Kaapelivedot ryhmäkeskukseen
3	VS tuplaus ja alakatot	Kipsilevyväliseinien toisen puolen levytys Kipsilevykoteloinnit ja kipsilevyalakatot kuivissa tiloissa
4	Laatoitus	Märkätilojen (kylpyhuoneiden) seinien ja lattian hienotasoitus, laatoitus ja saumaus, sekä nurkkien silikoni-saumaus
5	Tasointus	Asuntojen sisäpintojen tasointustyöt
6	Maalaus	Asuntojen sisäpintojen maalaustyöt
7	Vesijohdot	Märkätilojen kromatut, pinta-asenteiset vesijohtovedot
8	Paneelialakatot	Märkätilojen puupaneelialakatot
9	Kylpyhuoneiden kalusteet	Märkätilojen kiintokalusteet
10	Verhokiskot	Asuntojen ikkunoiden verhokiskot

11	Kiintokalusteet	Keittiön kiintokalusteet, säilytyskomerot, vaatehuoneen hyllyt
12	LV-kalustus, sähkökalustus, IV-kalustus (TATE-kalustus)	Vesihanojen asennus ja pesukoneliitäntän kytkentä Pintarasioiden asennus, ryhmäkeskuksen viimeistely Ilmanvaihtokanavien päätelaitteiden asennus
13	Laminaattiasennus	Asuntojen laminaattilattiat
14	Listoitus ja oviaasennus	Asuntojen jalkalistat, ovien karmilistat Välioviaasennus
15	Kodinkoneasennus	Keittiön kiinteät kodinkoneet Märkätilojen suihkuseinät
16	Lukitus ja heloitus	Asuntojen ovien lukot Väliovien helat
17	Viimeistely	Keittiön välitilan silikonisaumaus Varusteiden kiinnitys Pienet kolhukorjaukset
19	Loppusiivous	Asuntojen ja käytävien loppusiivous

Osana Firan asuntorakentamisen prosessikehitystä työjonon sisältöä aputöineen on tarkennettu Firan asuntorakentamisen prosessikuvaukseen. Kuvassa 22 on esitelty ote tarkennetusta sisävalmistusvaiheen prosessikuvauksesta. Prosessikuvaus on laadittu työmaan valmistumisen jälkeen.



**Kuva 22.** Ote Firan sisävalmistusvaiheen prosessikuvauksesta.

### Työmaan vastuunjako

Työmaan työnjohtotehtävät oli jaettu siten, että sisävalmistusvaihe asuntojen ontelolaa-  
taston pintabetonoinnista ja kylpyhuoneiden kaatolattiavaluista viimeistely- ja luovutus-  
tehtäviin asti oli yhden työnjohtajan vastuulla. Työnjohtajan vastuulla oli aikataulun suunnittelu ja toteutumisen valvonta, johon sisältyivät aikatauluun liittyvät viikoittaiset tapaa-  
miset, urakoitsijapalaverit, sekä tarvittaessa ylimääräiset tapaamiset ja yhteydenpito.

Työmaan työnjohdon keskeisissä palavereissa varmistettiin edellytykset aikataulun toteutumiselle sekä eri aikataulujen ristiriidattomuus. Työnjohtaja vastasi myös logistiikka-järjestelyistä omalla vastuualueellaan. Työnjohtaja vastasi myös työmaalla järjestettävistä katselmuksista, kuten mestan vastaanotoista, mallikatselmuksista sekä osakohteen tarkastuksista ja työvaiheiden vastaanotoista. Taloteknisten töiden tarkastukset toteutettiin yhdessä TATE-projektipäällikön kanssa. (haastateltava 2)

### Aikataulun muodostus

Työnjohtaja suunnitteli sisävaiheen aikataulun vastaavan työnjohtajan laatiman yleisaikataulun mukaisesti. Muodostettu aikataulu oli asuntokerroksittain tahtialueisiin jaettu TPTC:n periaatteita noudatteleva aikataulu, jonka välitavoitteet vastasivat yleisaikatauluun kirjattuja välitavoitteita. Työnjohtajan vastuulla oli kuitenkin työnjärjestyksen tarkempi määrittely sekä aputöiden aikataulutus. (haastateltavat 1 ja 2) Tahtialueen määrittäminen asuntokerroksen laajuiseksi mahdollisti 5-päiväisen tahtiajan, toisin sanoen tavanomaisen maanantaista perjantaihin kestävän työviikon, mikä miellettiin työmaalla selkeäksi ja riittävän joustavaksi aikatauluohjauksen kannalta. Työviikon pituinen tahtiaika helpotti myös materiaalitoimitusten ja työmaalogistiikan suunnittelua. Logistiikan sujuvuus nähtiin myös yhtenä tärkeimmistä tekijöistä tahtiaikataulun onnistuneessa toteutuksessa. (haastateltava 2) Kaikki rakennustyöt viimeistelytöitä lukuun ottamatta oli toteutettu aliurakoitsijoita käyttäen. Aliurakoitsijoilla on puolestaan omat projektiportfolionsa, eli useita samanaikaisia työkohteita, ja toisaalta rajattu määrä resursseja käytössään. Tämä lisäsi vaihtelua työmaan käytettävissä olevissa resursseissa, joka puolestaan heikensi kapasiteettipuskuria eli työmaan kykyä lisätä nopeasti resursseja aikatauluviiveen kompensoimiseksi. Siksi 5-päiväinen tahtiaika mahdollistikin tarvittaessa joustoa lisäämällä reagointiaikaa mahdollisiin häiriöihin.

Tahtiaikataulu jaettiin porraskerroksiin ja aikataulussa ei eritelty kuiva- ja märkätiloja (eli asuin- ja kylpyhuonetiloja). Tahtiaikataulun ominaisuuksia on esitelty taulukossa 7.

Taulukko 7. *Työmaalla käytetyn tahtiaikataulun ominaisuudet.*

Tahtiaikataulun parametri	Laajuus	Tarkennus
Tahtialue	1 asuntokerros	6 asuntoa per kerros
Tahtialueiden määrä	10 tahtialuetta	5 asuntokerrosta, 2 lohkoa
Tahtiaika	1 työviikko	5 työpäivää
Tahtiaikojen määrä	14–15 tahtia	Lohkojen läpimenoaika 14–15 viikkoa
Työpaketit	19 työpakettia	
Vaunut	13 vaunua	

Tärkeä huomio on, että työmaan tahtiaikataulusuunnittelu ei noudattanut suoraan teoriaosuudessa esitettyä mallia tahtituotannosta. Aikatauluun sisällytettiin myös useita rakennusaputöitä ja valmistelevia työtehtäviä, joita on havainnollistettu myös kuvassa 22 esitellyssä otteessa sisävalmistusvaiheen työjonosta. Joillain tahtialueilla voitiin suorittaa myös työvaiheen ulkopuolisia toimenpiteitä, joiden ei nähty risteävän käynnissä olevan tahdistetun työvaiheen kanssa. Virtaustehokkuuden saavuttaminen aliurakoitsijoille oli ensisijainen tavoite, joten aputöitä jouduttiin tekemään tahtialueilla myös seuraavan aliurakoitsijan aloitusedellytysten takaamiseksi. (haastateltava 2) Data-analyyssissä ei tarkastella näiden lyhytkestoisten aputöiden virtausta.

### **Tahtiaikataulun ohjaus**

Tahdin ensimmäisenä päivänä sisätyövaiheen työnjohtaja kutsui käynnissä olevan työvaiheiden ja erityisesti TATE-aliurakoitsijoiden edustajat alkupäivästä järjestettyyn palaveriin. Tämä käytäntö ja kokouksessa käsitellyt asiat mukailivat LPS:n käytäntöjä. Palaverien tarkoituksena oli ennen kaikkea varmistaa edellytykset kuluvan ja seuraavien viikkojen aikana alkavien töiden toteutukselle. Palaverissa käytiin läpi myös viikkoaikataulun nykytila. (haastateltava 2)

Palaverissa läpikäytiin Sitedrive-ohjelmalla laadittu päivitetty viikkoaikataulu, josta kävi ilmi seuraavan kolmen viikon työt. Aikataulu asetettiin näkyville myös työmaan ilmoitustaululle, joka sijaitsi työmaatoimiston edessä leimauslaitteen vieressä. Näin pyrittiin varmistamaan, että jokainen työmaalla työskentelevä kykenee näkemään visuaalisen esityksen aikataulutilanteesta, josta käy ilmi, mitä töitä työmaalla on käynnissä milläkin sijainneilla sekä työmaalla työskentelevät työryhmät. Työmaalla koettiin, että aikataulun esillä oleminen auttoi työntekijöitä hahmottamaan oman roolinsa, sekä myös kannusti työnjohtoa päivittämään aikataulua aktiivisesti. Urakoitsijat antoivat myös palautetta esillä olleesta aikataulusta. (haastateltava 2)

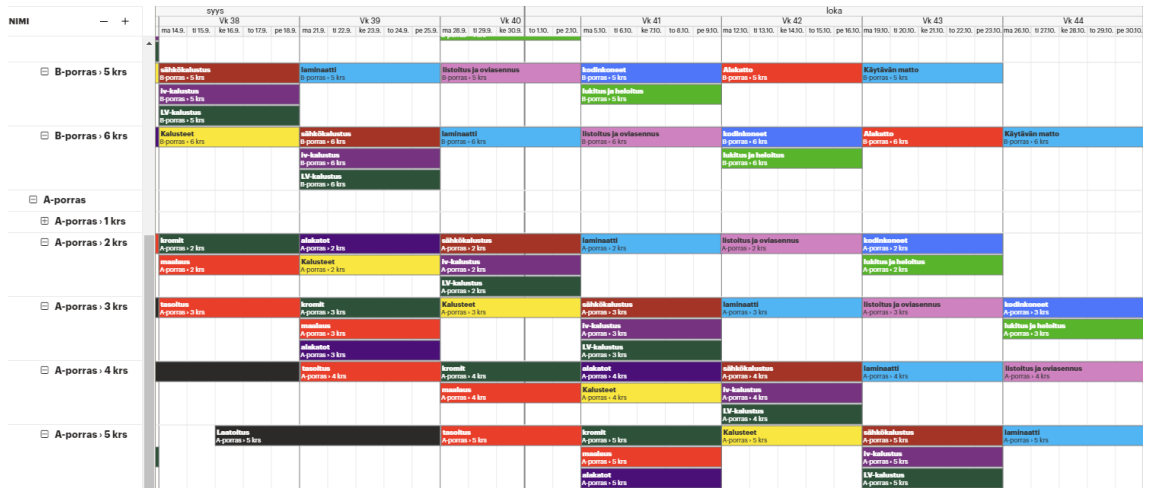
Urakoitsijapalaveri järjestettiin työmaalla viikoittain lähes koko sisävalmistusvaiheen ajan. Palaverin kutsui kokoon vastaava työnjohtaja. Palavereista laadittiin määrämuotoinen pöytäkirja, joka välitettiin osallistujille. Urakoitsijapalaverieihin kutsuttiin aina vähintään TATE-aliurakoitsijat, sillä taloteknisten töiden katsottiin vaativan jatkuvaa ohjausta ja yhteensovitusta. Lisäksi palaverissa käytiin läpi katselmusten aikatauluja. Urakoitsijapalaverissa paikalla olivat nimenomaisesti aliurakoitsijoiden työnjohtajat, siinä missä maanantaisin pidetyssä viikkopalaverissa varmistettiin alkavan viikon työskentelyn edellytykset työntekijöiden kanssa. (haastateltava 1)

Päivittäisjohtamisessa tahtiaikataulua ohjattiin mikrotasolla ja töiden jatkuvuus varmistettiin työmaakäynnein, työntekijöiden ja työnjohdon välisillä keskusteluilla sekä yhteydenpidolla puhelimitse, sähköpostitse ja esimerkiksi WhatsApp-sovellusta käyttäen. WhatsAppin etuja ovat myös viestinnän reaaliaikaisuus sekä tuki multimediasisällölle. Sovellus mahdollisti esimerkiksi tekstin, kuvien ja videoiden lähetyksen. Lähes kaikilla työntekijöillä oli käytössään älypuhelin ja useimmilla WhatsApp jo entuudestaan, joten yhteydenpitotapana se oli työntekijöille luonteva. (haastateltava 2)

Yleisesti ottaen edellytykset tahtituotannon käyttöönottoon ja tahtiaikataulun tehokkaaseen ohjaukseen olivat työmaalla alusta asti hyvät. Hyvien edellytysten luomisen työmaan johtamiselle voidaan olettaa edistävän myös prosessin virtausta. Toisaalta pelkkä kommunikaatio ja tilannekuva eivät voi sellaisenaan ratkaista työn aikana mahdollisesti ilmeneviä haasteita. Työmaa hyödynsi työn aikana myös digitaalisia työkaluja, reaaliaikaista tilannekuvaa sekä pääurakoitsijan ja aliurakoitsijoiden välistä monikanavaista kommunikaatiota työmaan päivittäisjohtamisessa. Työmaan sisävalmistusvaiheen johtaminen tapahtui viikkotasolla systemaattisesti, säännönmukaisia ennalta sovittuja käytäntöjä noudattaen, ja juoksevilla asioilla kommunikointi ja reagointi tapahtui pienellä vastejalla. Yhteensovittua vaativiin työvaiheisiin kiinnitettiin erityistä huomiota ja työmaahenkilöstö koki töiden sujuvan hyvin. Visuaalisuutta hyödynnettiin päivittäisjohtamisessa asettamalla ajantasainen aikataulu työntekijöiden nähtäville.

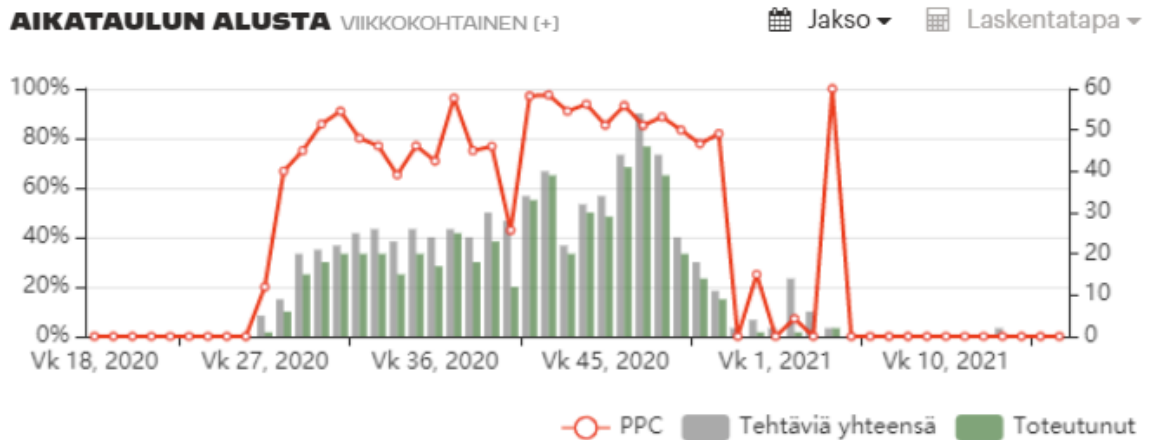
## 4.2 Sitedriven toiminnallisuudet ja käyttö työmaalla

Fira Sitedrive-aikataulunhallintaohjelmaa käytettiin työmaalla aikataulun laatimiseen, seurantaan ja päivittämiseen. Sitedrive on Firan kehittämä (Fira Smart 2021) ja työnjohto oli käyttänyt ohjelmaa jo ennestään. Sitedriveen laadittiin työvaihekohtaiset aikataulut, joita päivitettiin aktiivisesti töiden edetessä. Yleisaikataulua seurattiin viikoittain (haastateltava 1) ja viikkoaikataulua jopa päivätasolla (haastateltava 2). Sisävalmistusvaiheen työnjohtaja kokikin, että aktiivinen aikataulun seuranta ja ylläpito paransi tilannetietoisuutta eri työvaiheista, ja tämä puolestaan kannusti ylläpitämään aikataulua vielä tarkemmin ja hahmottamaan työtilannetta aikataulun kautta. (haastateltava 2) Aikataulutiedostoa muokattiin työn aikana, jotta mahdolliset viivästykset tai muutokset työnjärjestyksessä näkyisivät myös aikataulussa. Näin seurattava aikataulu, joka asetettiin myös työmaan työntekijöiden näkyville, vastasi melko todenmukaisesti ajantasaista töiden tilannetta. Kuvassa 23 on esitetty kuvakaappaus Sitedrive-ohjelman aikatauluesityksestä. Kuvassa aikataulutehtäviin ei ole tullut vielä muutoksia.



**Kuva 23.** Ote A-portaan alkuperäisestä Sitedrive-aikataulusta.

Sitedrive tarjoaa aikataulukohtaisessa dashboard-näkymässä tunnuslukuja, kuten aika-  
taulun laadun, aktiivisuustason sekä aikataulun viikkotason PPC:n. SiteDrive muodostaa  
PPC:n laskemalla viikkoaikataulun toteutuneiden työtehtävien osuuden kaikista toteutu-  
viksi suunnitelluista työtehtävistä. PPC:tä seurattiin työmaalla viikoittain (haastateltava  
1). Kuvassa 24 on kuvakaappaus Sitedrive-ohjelman PPC:n seurannasta sisävalmistus-  
vaiheen ajalta.



**Kuva 24.** PPC:n seuranta Sitedrive-ohjelmassa.

Sitedriven yhtenä toiminnallisuutena on myös työntekijöiden osallistaminen aikataulukir-  
jauksiin, joiden tarkoitus on helpottaa työmaan päivittäisjohtamista ja työmaan hallintaa  
delegoimalla aikatauluseurantaan työnjohtolta työntekijöille. Työntekijät voivat kirjata Si-  
tedriveen myös esteen aikataulutehtävän suorittamiselle. (Fira Smart 2021) Työntekijöi-  
den osallistaminen kirjausten tekemiseen on usein kuitenkin osoittautunut haasteel-  
liseksi, ja kirjausten määrä on jäänyt vähäiseksi tai kirjauksia ei ole tehty ollenkaan (Van-  
hamäki 2020, Alhava et al. 2019, Örmä 2019). Tämän on koettu johtuvan muun muassa  
siitä, että aliurakoitsijat eivät koe saavansa lisäarvoa Sitedriven käytöstä (Vanhamäki



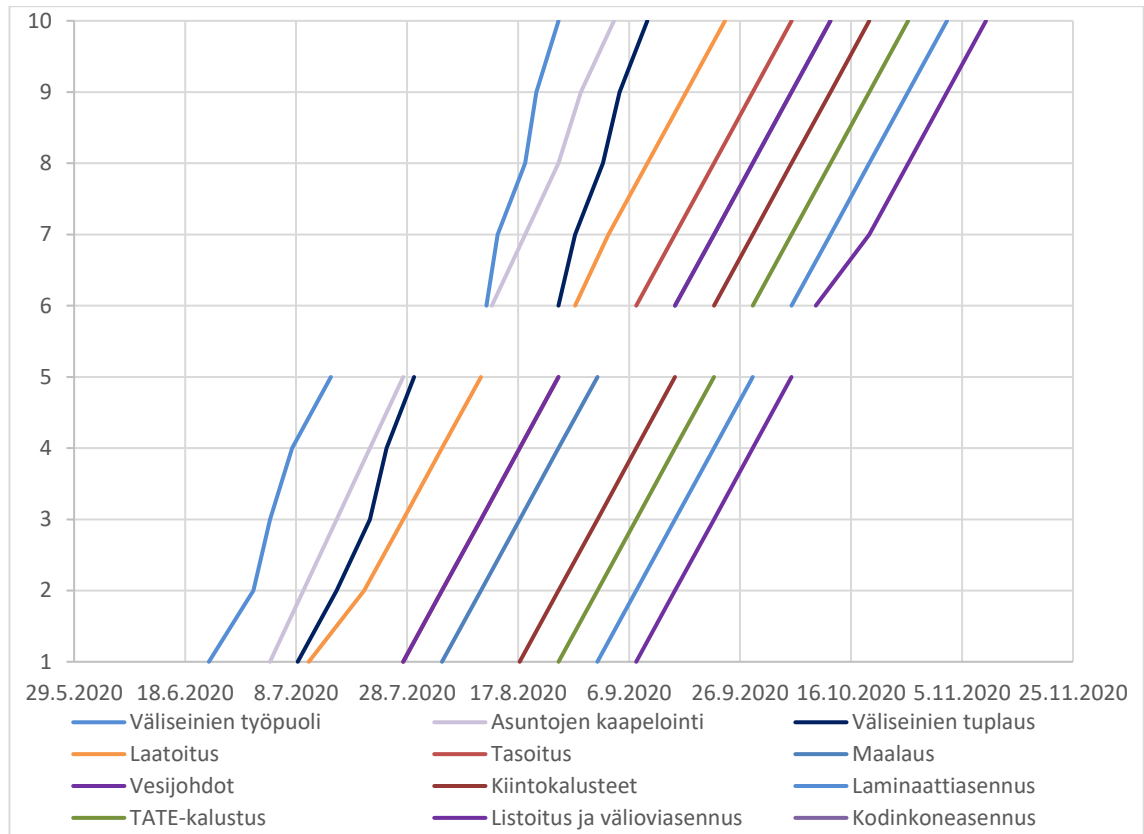
2020). Toisaalta kyse voi olla muutosvastarinnasta ja haluttomuudesta muuttaa totuttuja työtapoja. Jo pelkästään Sitedrive-sovelluksen lataaminen saatetaan kokea kynnyskynnyksenä. Näistä syistä johtuen tutkimuskohteessa ei otettu työntekijöiden tekemiä kirjauksia käyttöön. (haastateltava 2)

Käytettävissä olevassa datassa esiintyy viiveellä tapahtuneista kirjauksista johtuvaa epätarkkuutta. Tämä tuli ilmi myös haastatteluissa: Vastaava työnjohtaja kirjasi tehtävien etenemän yleisaikatauluun ja sisävalmistusvaiheen työnjohtaja sisävalmistusvaiheen aikatauluun, ja vastaava työnjohtaja sai tiedon työvaiheen valmistumisesta joko itse havainnoimalla, työnjohtajan ilmoituksesta tai suoraan kysymällä (haastateltava 1). Aikataulutiedostoa ei ole kuitenkaan voitu ylläpitää täysin reaaliaikaisesti, ja joskus kirjauksissa oli usean päivän viiveitä (haastateltava 1). Samankaltainen rajoite on todettu myös aiemmin Sitedriven käyttöä ja siitä saatavaa dataa käsitellessä tutkimuksissa (Örmä 2019, Vanhamäki 2020). Sama haaste toistuu myös muita aikataulunseurantamenetelmiä käytettäessä, (mm. Keskiniva et al. 2021, Laine 2020) Aikataulukirjausten tekeminen minuutti- tai edes tuntitasolla ei kuitenkaan ole tarkoituksenmukaista, sillä tutkimuskohteen tahtiaikataulua ohjattiin viikkotasolla, jolloin jo päivätasolla suoritettu datan kirjaus muodostaa riittävän luotettavan tarkkuustason koko prosessin virtauksen analysointia varten. Lyhytkestoiset työsuoritteet, kuten ovi-asennus ja kodinkonekytkentä kirjattiin valmistuneiksi lähes välittömästi tehtävän alkamisen jälkeen, jolloin tehtävän kestoksi voidaan todeta yksi työvuoro. (haastateltava 2) Siten näissä tehtävissä ei esiinny juurikaan datasta havaittavaa varianssia, mikä toisaalta pitää paikkansa valitulla tarkastelutasolla. Tehtävissä esiintyi kuitenkin sisäistä varianssia, jonka mittaus on mahdollista toteuttaa esimerkiksi kameraseurannalla.

Työmaalla käytettiin aktiivisesti myös Firan kehittämää työmaan ohjaamo, joka on kehitysvaiheessa oleva dashboard-näkymä työmaan tilanteesta. Työmaan ohjaamo yhdisti Sitedrivestä, Congrid-laadunhallintasovelluksesta ja Site Manager -hallinnointisovelluksesta sekä työmaalle asennetusta olosuhdeseurantalaitteistosta saadun datan. Näkymä oli toteutettu PowerBI-alustalla. Näkymä esitettiin työmaatoimiston taukuhuoneeseen asetetuilla näytöillä, ja se päivittyi noin minuutin välein. Haastattelujen perusteella näkymä koettiin hyödylliseksi (haastateltavat 1 ja 2). Näkymää myös kehitettiin ja päivitettiin työmaan edetessä. Eri datalähteitä yhdistelmällä näkymän avulla oli mahdollista seurata eri työvaiheiden etenemistä, laatutarkastusten ja -havaintojen määrää sekä PPC:tä useamman viikon ajalta. Fira onkin jo aiemmin todennut reaaliaikaisesta tilannekuvasta olevan merkittävää hyötyä työnjohdolle. (Alhava et al. 2019)

### 4.3 Data-analyysin visualisoinnit

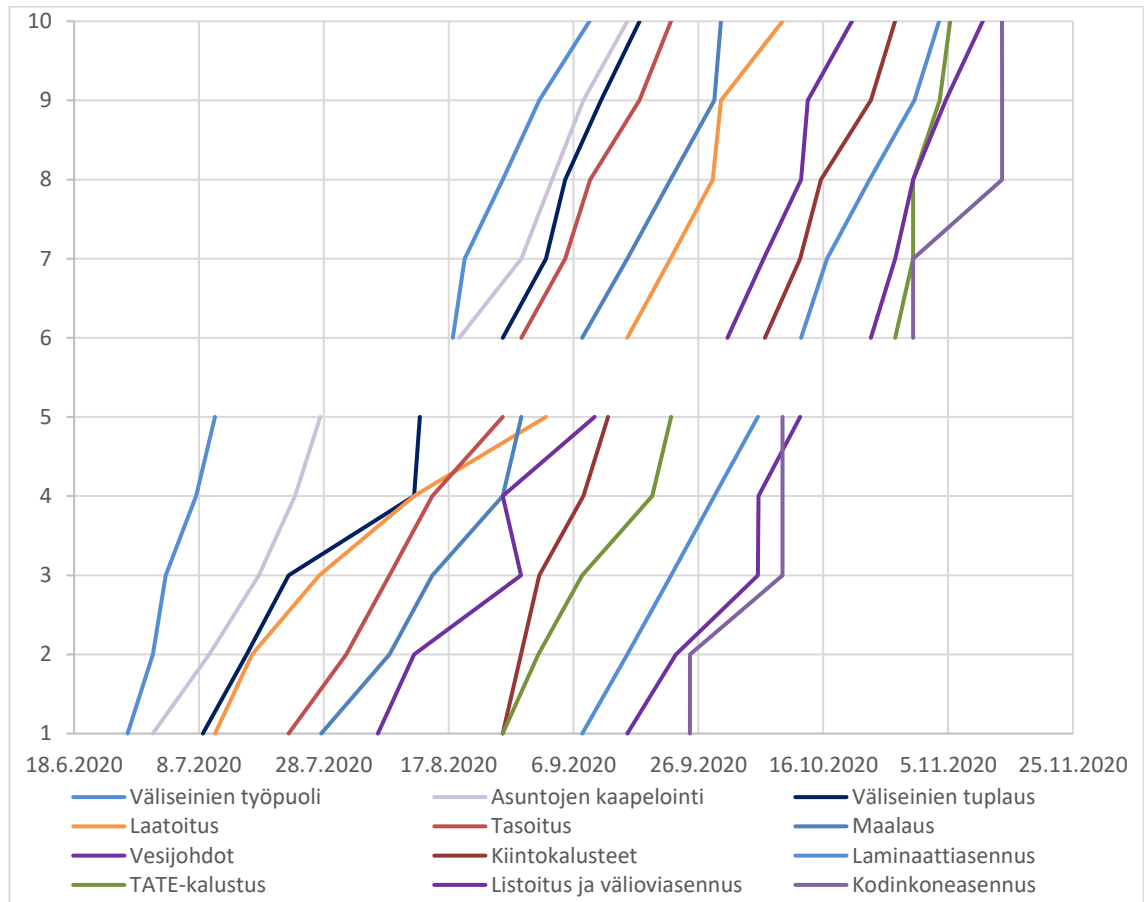
Tässä kappaleessa käydään läpi aikatauludatasta saadut tulokset ja datasta laaditut visuaaliset esitykset. Tulokset esitellään kuvina ja niihin yhdistellään haastatteluista saatuja tietoja tulosten luotettavuuden arvioimiseksi. Aikatauludatasta saatavat tiedot tehtävien aloitus- ja lopetusajoista voidaan kuvata paikka-aikakaaviossa. Tarkastellaan ensin aikataulun tilannetta tahtiaikataulun alussa, joka on esitetty kuvassa 25.



**Kuva 25.** Suunniteltu tahtiaikataulu.

Kuvassa on esitetty aikataulutehtävien alku paikka-aikakaaviossa. Tahtialueet 1–5 käsittävät kohteen B-rapun eli 1. lohkon 2.–5. kerrokset, ja vastaavasti tahtialueet 6–10 A-rapun eli 2. lohkon 2.–5. kerrokset. Väliseinätyössä suunnitelmaa on tarkennettu väliseinäurakoitsijan kanssa päivätasolle, minkä vuoksi väliseinätyön etenemä ei näytä suorilta. Loput työvaiheet etenevät kulmakertoimeltaan suorina kuvaajina, eli siirtyen tahtiajan mukaisesti uudelle tahtialueelle aina viikon alussa. Töitä on porrastettu B-lohkosta A-lohkoon siirtyessä. Huomattavaa on myös, että joillekin tahtialueille on sallittu päällekkäisiä töitä, sillä esimerkiksi pintavesijohtojen asennus kylpyhuoneissa on mahdollista toteuttaa muiden töiden ollessa käynnissä. Mikrotasolla aikataulussa esiintyykin paljon tällaista ohjausta töiden jatkuvuuden takaamiseksi (haastateltava 2). Toisaalta märkätiloille ei ole laadittu omaa aikataulua, koska esimerkiksi laatoitustyöt vaativat kerroksesta tilaa myös kylpyhuoneiden ulkopuolelta.

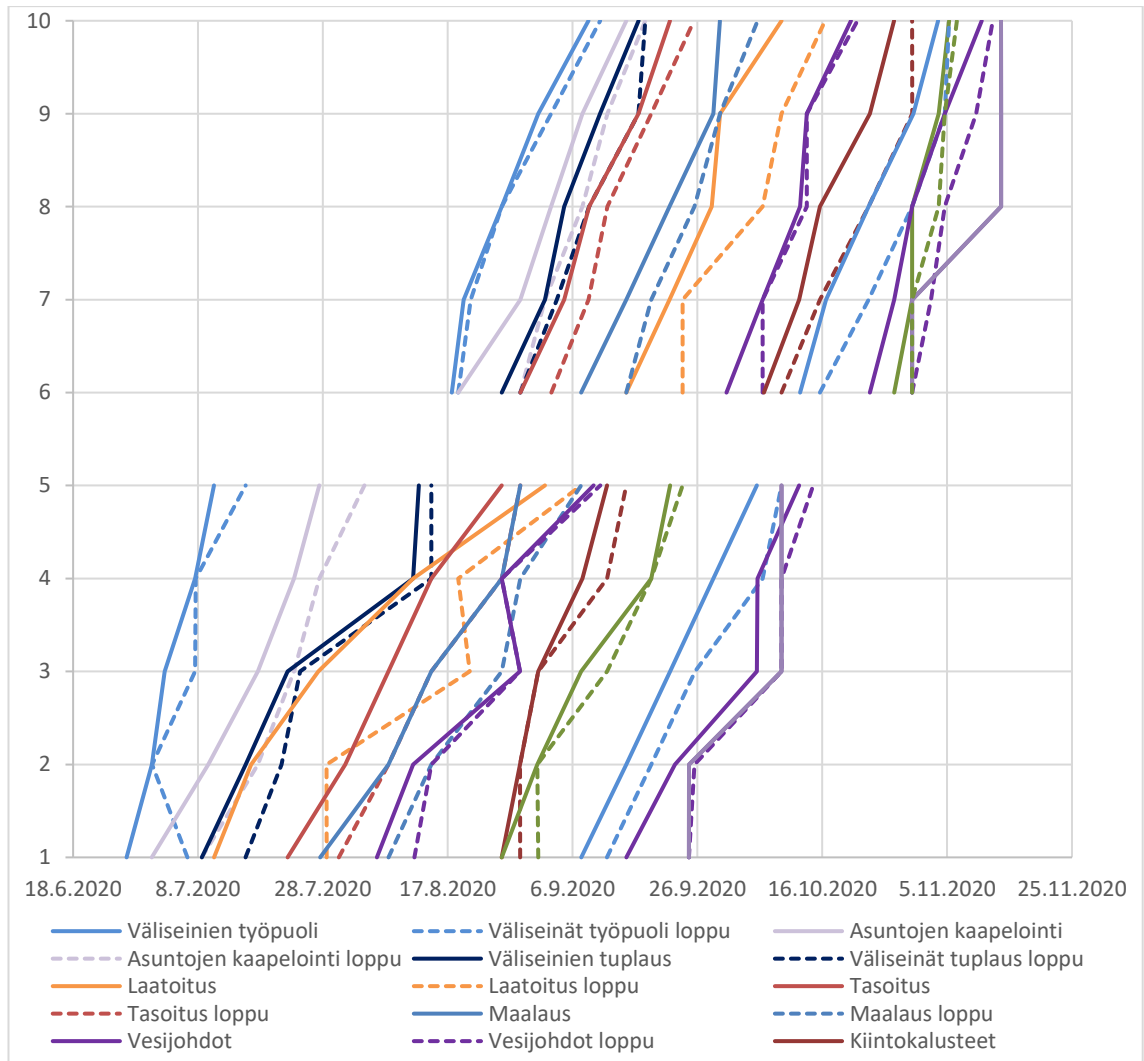
Tarkastellaan seuraavaksi viimeisestä Sitedrive-aikatauluversiosta saatua toteumatietoa. Koska sisävalmistusvaiheen työnjohtaja on kirjannut aktiivisesti töitä aloitetuksi ja valmistuneeksi Sitedriveen, kuvaajat kuvaavat sisävalmistusvaiheen prosessin edistymistä melko tarkasti. Kuvaus toteutuneista töistä on esitetty kuvassa 26.



**Kuva 26.** Sisävalmistusvaiheen töiden eteneminen tahtialueittain.

Ideaalitilanteessa viivakuvaajat olisivat täysin suoria (kuten kuvassa 25) ja viivojen välit pysyisivät saman levyisinä. Tällöin töissä ei esiintyisi ollenkaan varianssia. Nyt kuitenkin huomataan, että työt on kirjattu alkaneeksi (ja myös valmistuneeksi) huomattavasti alkuperäisestä suunnitelmasta poikkeavina aikoina. Työmaahenkilöstön haastatteluiden perusteella ja myös kuvaa katsomalla voidaan kuitenkin todeta, että tahtialueilla 6–10 etenemät ovat jo vakautuneet. Toisaalta etenemäviivojen kulmakertoimet myös jyrkkenevät tahtialueilla 6–10.

Aloitusaikojen lisäksi varianssin vaihtelua määritellessä on kiinnostavaa tietää myös tehtävien tahtialuekohtaiset valmistumisajat. Lisäämällä lopetusajat edelliseen kuvaajaan saadaan kuvan 27 mukainen esitys. Tehtävien valmistumisajat on esitetty kuvassa 27. Suurempikokoinen tuloste kuvasta 27 on esitetty liitteessä 2.

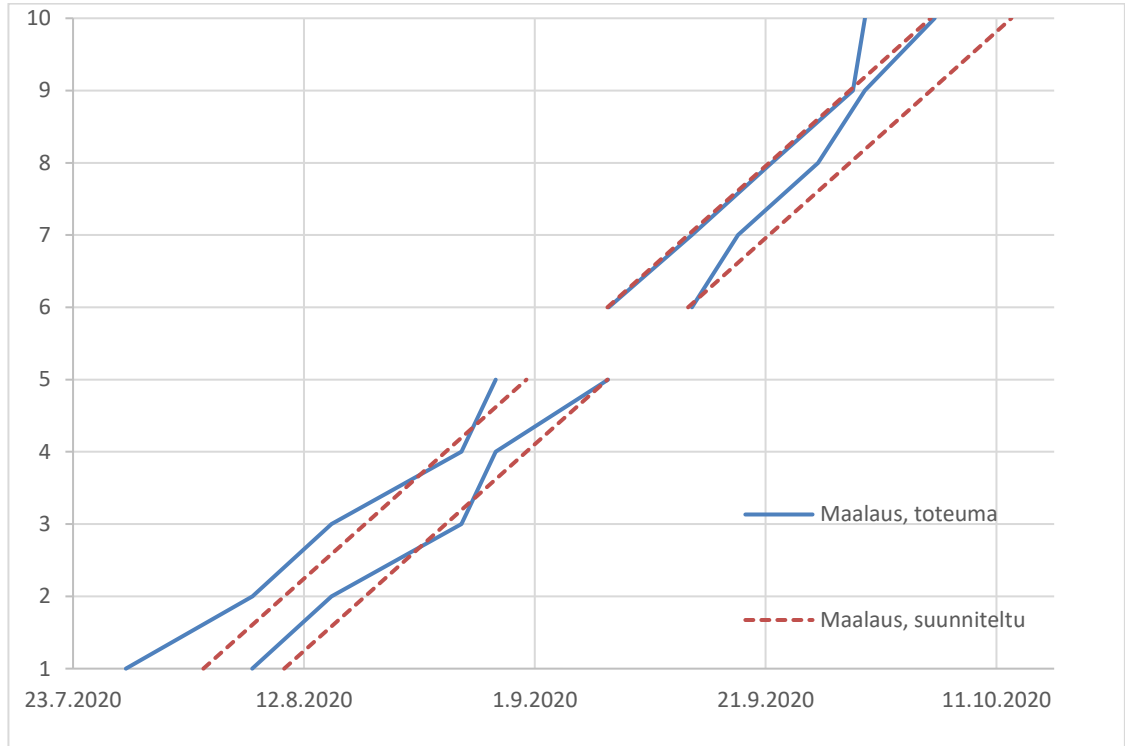


**Kuva 27.** Sisävalmistusvaiheen toteutuneet aloitus- ja lopetusajat.

Nyt huomataan, että tehtävien aloitus- ja valmistumisaikojen välillä, eli tehtävien tahtialuekohtaisissa jaksoajoissa esiintyy paikoin huomattavasti vaihtelua. Joissakin työtehtävissä seuraavan alueen työt on aloitettu ennen edellisen alueen valmistumista, mikä lisää myös keskeneräisen työn määrää. Aikataulukirjausten epätarkkuudella on varmasti vaikutusta vaihtelun määrään, mutta esimerkiksi laatoitustöiden etenemässä on havaittavissa huomattavaa eroa, etenkin verratessa A- ja B-lohkoja.

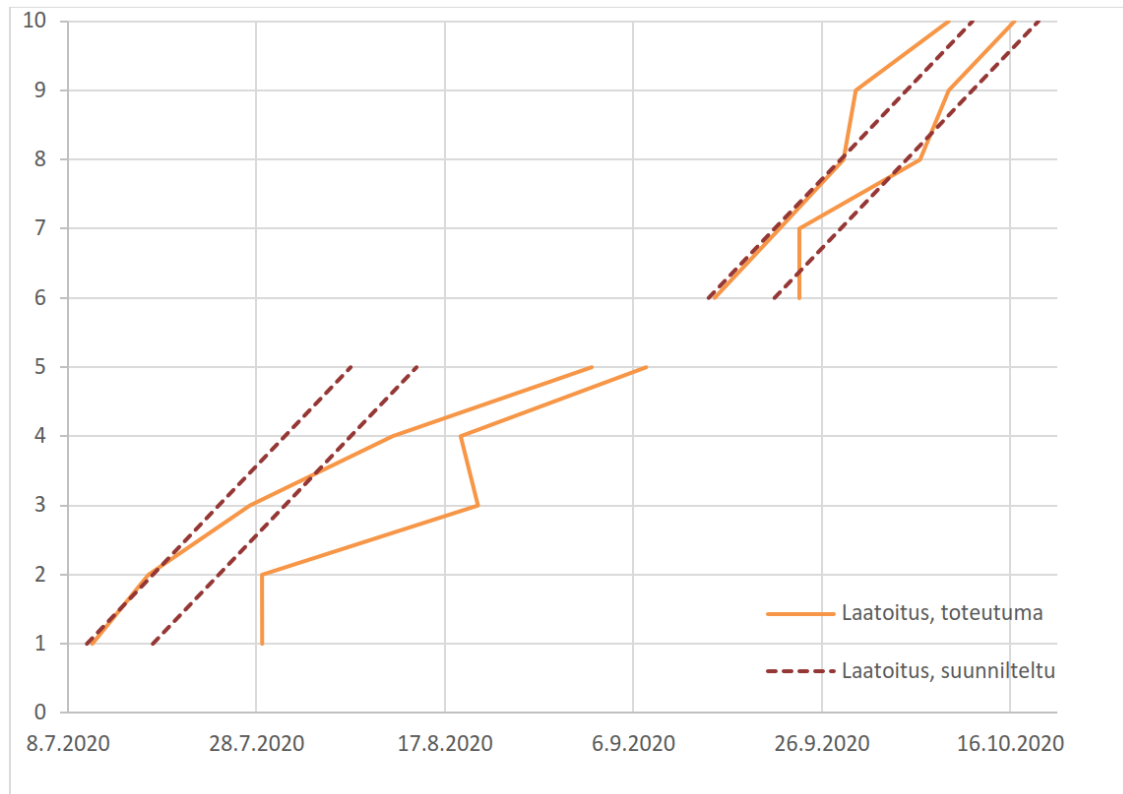
Graafisen esityksen selkeyden kannalta kaikkien työvaiheiden tarkastelu kerralla ei kuitenkaan anna kovin selkeää kuvaa prosessin virtauksesta tai ongelmakohtista. Jos prosessi olisi monimutkaisempi tai tahtialueita olisi enemmän, kuvan 27 kaltainen graafinen esitys voisi olla jo erittäin haastava tulkita. Siksi onkin mielekkäämpää tarkastella rajattua osaa datasta.

Tarkastellaan seuraavaksi yksittäisiä työvaiheita, jotta voidaan saada tarkempaa tietoa prosessin kulusta. Kuvassa 28 on verrattu maalaustöiden suunniteltua aloitus- ja loppuspäivää toteutuneeseen aikatauluun. Tämä esitystapa on verrattavissa myös kirjallisuuskatsauksen kuvien 18 ja 19 esitystapoihin.



**Kuva 28.** *Maalaustöiden etenemä ja suunniteltu, optimaalinen virtaus.*

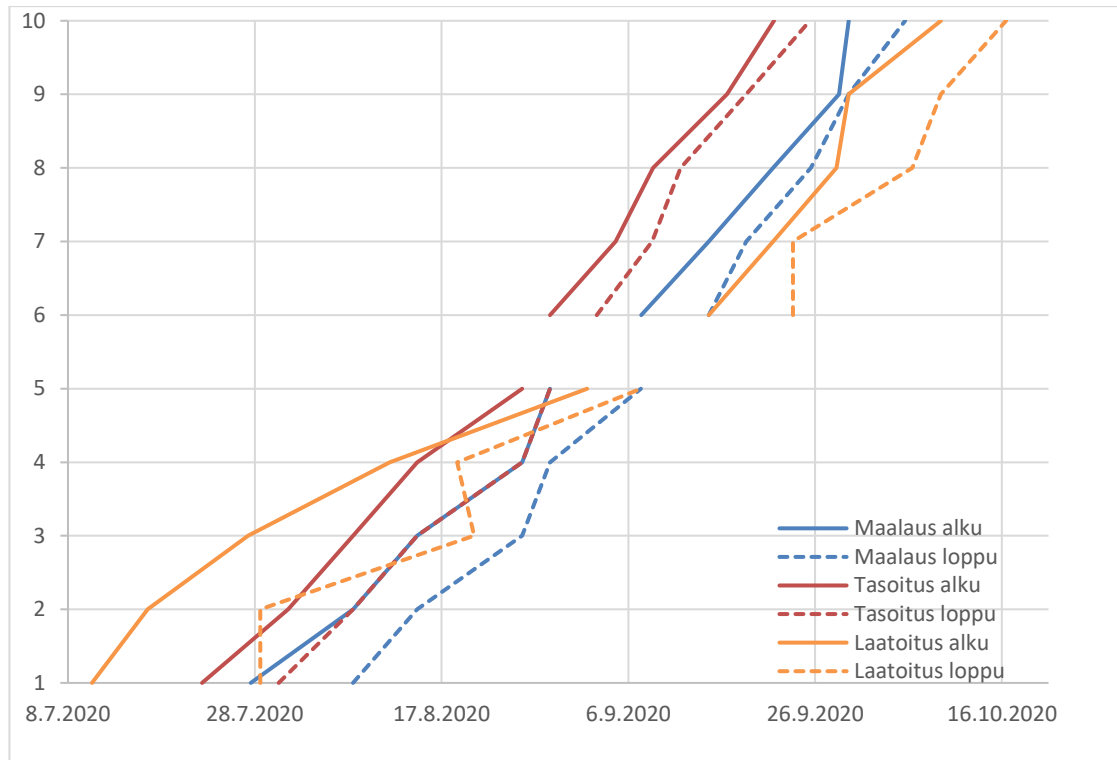
Suunniteltu aikataulu on esitetty katkoviivalla ja toteuma yhtenäisellä viivalla. Kuvasta voidaan huomata maalaustöiden edenneen melko vakaasti molemmissa lohkoissa. A-lohkoissa voidaan huomata työtahdin nopeutuneen ja edenneen jopa suunniteltua nopeammin. Haastatteluista kävikin ilmi, että A-lohkoon siirryttäessä aikataulua voitiin jopa kiristää alkuperäisestä (haastateltava 2). Maalaustöiden virtaus on ollut melko vakaa, vaikka vaihtelua onkin havaittavissa. Tahtialueilla 8–10 voitaneen myös havaita aikataulukirjausten viiveistä aiheutuvaa vaihtelua datan tarkkuudessa, sillä työvaiheiden keskeksi on kirjattu vain 3 päivää. Tarkastellaan seuraavaksi vastaavan kaltaista esitystä laatoitustöiden etenemästä.



**Kuva 29.** Laatoitustöiden toteuma ja suunniteltu etenemä.

Kuvasta 29 huomataan, että laatoitustöiden etenemässä on ollut merkittäviä häiriöitä tahtialueilla 1–5, eli B-lohkon 2.–5. kerroksissa. Laatoitustyöt alkoivat myöhässä aikataulusta, mutta esityksen selkeyden vuoksi suunniteltu etenemä on suhteutettu töiden aloituspäivään. Kuvasta voidaankin huomata, että tahtialueilla 1–5 töiden eteneminen on selvästi ollut epävakaampaa, sillä viivaparien välit vaihtelevat huomattavan paljon. Töiden aloitukset ovat myöhästyneet huomattavasti ja keskeneräisen työn määrän voidaan huomata kasvavan, kun seuraavan tahtialueen työt aloitetaan ennen edellisen lohkon valmistumista. A-lohkoon (tahtialueet 6–10) siirryttäessä laatoitustyöt ovat vakautuneet huomattavasti ja aikataulun kirjausepätarkkuudet huomioiden virtausta voidaan pitää jo melko vakaana. Epävakaas virtauksessa ja läpimenoajoissa ovat selkeästi havaittavissa kuvasta.

Aikatauludata mahdollistaa myös eri työvaiheiden keskinäisen vertailun. Tarkastellaan esimerkkinä esitystä kylpyhuonelaatoitusten, tasoituksen ja maalaustöiden etenemisestä, joka on esitetty kuvassa 30. Selkeyden vuoksi tästä esityksestä on jätetty pois suunniteltu töiden etenemä. Tehtävän aloitusaika on ilmaistu yhtenäisellä ja lopetusaika katkoviivalla.



**Kuva 30.** *Kylpyhuoneiden laatoitus-, tasoitus ja maalaustöiden etenemät vertailtuna.*

Aiemmin huomattiin, että laatoitustyöt alkoivat myöhässä ja laatoitustyössä esiintyi paljon varianssia. Nyt nähdään, että laatoitustyöt myös risteävät B-lohkossa tasoitustöiden kanssa. Tämä tarkoittaa käytännössä tilannetta, jossa laatoitus- ja tasoitustöitä oli käynnissä samanaikaisesti samoilla tahtialueella.

Vaikka laatoitustyö tapahtuukin kylpyhuoneissa, laatoittaja liikkuu työskennellessään eri kylpyhuoneiden välillä. Laatoitustyö koostuu useista vaiheista, joita ovat pohjatasoitus, laastin levitys, laatoitus ja saumaus. Saneerauslaastin ja tasoitteen sekoittamiseen tarvitaan vettä, ja työnaikainen vesipiste sekä tasoitetarvikkeet olivat sijoitettu porraskäytävään. Kylpyhuoneiden pohjatasoitus suoritetaan ensin kaikille kylpyhuoneille, jotta saneerauslaastin kuivumista ei tarvitsisi odotella. Näin ollen vaikka varsinainen laatoitustyö suoritetaan kylpyhuoneessa, joka ei varsinaisesti ole tasoitustyöryhmän työaluetta, tapahtuu laatoitustyön tekijän työstä huomattava osuus silti kylpyhuoneiden ulkopuolella. On siis perusteltua varata koko kerros laatoitustyölle. Kuivien tilojen seinien tasoitustyössä käytetään puolestaan ruiskutuskalustoa, jonka siirtely vaatii runsaasti tilaa, ja lisäksi tasoitustyöryhmä liikkuu melko nopeasti asunnosta toiseen, sillä tasoitus tehdään asuntoihin kaksi kertaa. Työvaiheiden risteäminen aiheuttaa sen, että molempien työryhmien työskentely häiriintyy. Työnjohdon tulee tällöin puuttua tilanteeseen, ja järjestää esimerkiksi vaihtomestaa toiselle työryhmälle, jotta toisen työryhmän työt voisivat edetä normaalisti. Kuvasta 30 havaitaan myös, että tasoitustyöryhmän työssä esiintyy melko

vähän vaihtelua, eli läpimenoaika pysyy tasaisena, siinä missä laatoitustöissä läpimenoajan pituus vaihtelee voimakkaasti.

Tasoius- ja maalaustyöt toteuttivat sama urakoitsija, joten B-lohkossa voidaan myös havaita päällekkäisyyttä tasoitustöiden lopetusajassa ja maalaustöiden aloitusajassa. Tämä tarkoittaa, että työvaiheiden välinen puskuri on käytännössä minimissään ja työvaiheet on kirjattu alkaneeksi käytännössä heti edellisen työvaiheen päätyttyä. Virtaus maalauksen ja tasoituksen osalta on siis ollut hyvä. (haastateltava 2)

Tarkasteltaessa kuvassa 30 esitettyä töiden etenemää A-lohkossa (tahtialueet 6–10), voidaan havaita, että:

1. Töiden läpimenoajan vaihtelu on pienentynyt huomattavasti B-lohkosta (tahtialueet 1–5). Laatoitustyön varianssi on pienentynyt 84 %. Samalla myös lohkokohmainen työvaiheen läpimenoaika on lyhentynyt 59 päivästä 32 päivään eli noin 54 %. Myös tasoius- ja maalaustöiden varianssi on pienentynyt. Tasoitustöillä varianssi pieneni 86 % ja maalaustöillä 54 %.
2. Työjonoa on muutettu A-lohkossa, joten laatoitustyöllä ei enää ole kiire valmistua ennen tasoitustöiden aloittamista. Määrittelemättömästä syystä tasoitustöiden loppumiselle ja maalaustöiden alkamiselle on muodostunut väliin puskuri, mutta toisaalta laatoitustyöt on kirjattu alkaneeksi heti maalaustöiden valmistumisen jälkeen.
3. Yksikään kolmesta tarkastellusta työvaiheesta ei enää risteä. Yksittäisellä tahtialueella ei siis ole käynnissä kahta eri työvaihetta eikä konflikteja synny. Työn virtaus on siis parantunut huomattavasti, mikä lisää työskentelyn ennakoitavuutta ja vapauttaa sekä työnjohdon että aliurakoitsijoiden resursseja. Toisaalta on selvää, että työvaiheissa esiintyy yhä sisäistä vaihtelua.

Datasta ei voida löytää juurisyytä töiden myöhästymiseen ainakaan ilman yhdistelyä esimerkiksi työmaan keräämään laatuun, mutta toisaalta työnjohtajalla on usein käsitys myöhästymisen syistä, joita voivat olla esimerkiksi aliurakoitsijan resurssivaje, ongelmat materiaalitoimituksissa tai puutteet tiedonkulussa työnjohdon ja työntekijöiden välillä (haastateltava 2). Aikatauludataa voidaan silti käyttää ongelmallisten työvaiheiden havaitsemiseen ja kokonaiskuvan muodostamiseen töiden etenemisestä, sillä työmaan päivittäisjohtamisessa rakentamisprosessia tarkastellaan lähietäisyydeltä, mikä saattaa tehdä kokonaisuuden hahmottamisesta haastavaa (haastateltavat 1 ja 2).



## 4.4 Virtauksen tunnusluvut

Edellisessä luvussa esitettyjen visualisointien etuna on, että monimutkaiset ilmiöt voivat olla helpompia sisäistää graafisen esityksen kautta, mutta toisaalta huomattavan suuria tietomääriä voi olla haastava esittää visuaalisessa muodossa. Lisäksi visuaaliset esitykset eivät ole kovin tarkkoja esimerkiksi vertailuissa, joten on tarpeellista arvioida työmaan virtausta myös laskennallisesti. Tässä luvussa tarkastellaan Sitedrive-datasta laskettuja tunnuslukuja. Luvut on laskettu Sitedrive-aikataulutehtävistä hyödyntäen kappaleessa 2.9 esiteltyjä laskentamenetelmiä. Tulokset on pyöristetty yhden desimaalin tarkkuuteen.

### Työvaihekohtaiset jaksoajat lohkoittain

Jaksoaika on merkittävä mittari prosessin suorituskyvyn ja virtaustehokkuuden arvioimisessa. Teoriaosuudessa määriteltiin jaksoajaksi keskimääräinen töiden suoritus aika tahtialuetta kohden. Laskemalla jaksoajat lohkoittain voidaan arvioida eroja A- ja B-lohkojen virtauksen välillä. Jaksoikalaskelmat on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Työvaihe- ja lohkoittaiset jaksoajat ja muutos päivinä

Työvaihe	Jaksoaika, B (päivää)	Jaksoaika, A (päivää)	Muutos (päivää)
VS työpuoli	3,8	4,8	0,9
Asuntojen kaapelointi	6,8	6,0	-0,8
VS tuplaus ja alakatot	7,4	4,6	-2,8
Laatoitus	11,8	6,4	-5,4
Tasoitus	7,5	5,6	-1,9
Maalaus	8,4	5,6	-2,7
Vesijohdot	7,2	4,2	-3,0
Kalusteet	4,0	4,8	0,8
TATE-kalustus	5,8	2,0	-3,8
Laminaatti	6,4	4,8	-1,6
Listoitus ja oviaasennus	6,0	3,9	-2,0
Kodinkonekytkentä	3,0	2,8	-0,1
Lukitus ja heloitus	1,6	3,2	1,6
Keskiarvo	6,1	4,5	-1,6

Taulukosta huomataan, että jaksoajat ovat pääosin lyhentyneet A-lohkossa. Jaksoajan ollessa pidempi kuin tahtiaika (5 päivää), todennäköisyydet virtauksen ongelmille kasvavat. Toisaalta jaksoaika voidaan myös suunnitella tahtiaikaa pidemmäksi, mikäli tämä ei synnytä ristiriitoja. Taulukon 8 keskiarvo-riviä tarkastelemalla voidaankin todeta, että keskimäärin jaksoajat ovat lyhentyneet A-lohkossa 1,6 päivää ja keskimääräinen jaksoaika 4,5 päivää vastaa jo hyvin tarkasti tahtiaikataulussa tavoiteltua 5 päivän jaksoaikaa. B-lohkossa jaksoaikojen vaihtelu on myös huomattavasti voimakkaampaa, sillä

jaksoajan arvot eri työvaiheissa vaihtelevat 1,6...11,8 päivän välillä, siinä missä A-lohkossa vaihteluväli on 2,0...6,4 päivää. Myös kirjausepätkä tarkkuuksilla on merkitystä etenkin alle yhden päivän

### Työvaihekohtainen läpimenoaika lohkoittain

Seuraavaksi laskettiin työtehtäväkohtaiset läpimenoajat lohkoittain. Mikäli työtehtävässä esiintyy paljon vaihtelua, sen tulisi näkyä myös läpimenoaikojen pidentymisenä. Taulukossa 9 on esitetty saadut tulokset.

Taulukko 9. Työvaihe- ja lohko-kohtaiset läpimenoajat ja A- ja B-lohkojen erotus

Työvaihe	Läpimenoaika, B (päivää)	Läpimenoaika, A (päivää)	Muutos (päivää)
VS työpuoli	19,1	23,8	4,7
Asuntojen kaapelointi	29,9	30,0	0,0
VS tuplaus ja alakatot	36,8	23,0	-13,8
Laatoitus	56,0	31,8	-24,1
Tasoitus	37,3	27,8	-9,4
Maalaus	41,8	28,2	-13,5
Vesijohdot	35,8	21,0	-14,8
Kalusteet	20,0	23,8	3,8
TATE-Kalustus	29,0	10,1	-18,9
Laminaatti	32,1	23,9	-8,2
Listoitus ja oviasennus	29,9	19,7	-10,2
Kodinkonekytkentä	14,8	14,2	-0,6
Lukitus ja heloitus	7,9	15,9	8,0
Keskiarvo	30,0	22,6	-7,5

Työvaiheiden läpimenoajat ovat siis enimmäkseen lyhentyneet A-lohkossa. Väliseinien työpuolten, kalusteiden sekä lukituksen ja heloituksen läpimenoajat ovat kuitenkin pidentyneet, mutta näiden työvaiheiden tapauksessa työt ovat saaneet edetä B-lohkossa tahtiaikataulua nopeammin. A-lohkossa työt on saatu tahdistettua paremmin, ja töiden läpimenoaika on lähempänä lohkon keskimääräistä läpimenoaikaa. Siten työvaiheiden voidaan katsoa vakautuneen A-lohkossa. Laatoituksessa ja maalauksessa läpimenoajat ovat lyhentyneet huomattavasti. Keskimäärin työvaiheiden kestot lyhenivät A-lohkossa 7,5 päivää. Ideaalitalanteessa laskennallisten työvaihe- ja lohko-kohtaisten läpimenoaikojen keskiarvojen tulisi vastata 5-päiväisellä tahtiajalla ja viidellä tahtialueella 25 työpäivää. Taulukon 9 laskennassa on kuitenkin huomioitu viikonloput läpimenoajassa, ja lisäksi haastatteluissa kävi ilmi, että aikataulua oli myös kiristetty loppua kohden (haastattava 2). Prosessin vakautta voidaan kuitenkin arvioida läpimenoaikojen vaihtelua eli varianssia arvioimalla, kuten myöhemmin esitetään.

## Työvaihekohtainen jaksoajan varianssi lohkoittain

Aikaisemmin voitiin havaita graafisista esityksistä tiettyjen työvaiheiden virtauksen vaakaantuneen töiden edetessä. Koska rakennuksen A- ja B-portaasiin jaetut lohkot ovat keskenään lähes täysin identtiset, voidaan eri lohkojen välistä virtausta verrata keskenään laskemalla viikkoaikataulusta työtehtäväkohtaiset varianssit eli vaihteluvälit työvaiheiden jaksoajoissa. Tarkastellaan seuraavaksi lohkojen A ja B työvaihekohtaista jaksoajan vaihtelua, joka on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. *Lohkokohtaiset jaksoaikojen varianssit työtehtävittäin ja muutosprosentti B-lohkosta A-lohkoon.*

Työvaihe	Varianssi, B (päivää)	Varianssi, A (päivää)	Muutos (%)
VS työpuoli	13,2	0,5	-95,9
Asuntojen kaapelointi	0,5	2,0	318,7
VS tuplaus ja alakatot	4,2	3,1	-25,7
Laatoitus	47,3	7,4	-84,3
Tasoitus	7,1	1,0	-86,0
Maalaus	9,7	4,5	-54,1
Vesijohdot	5,2	4,7	-9,9
Kalusteet	2,8	4,5	62,0
TATE-kalustus	5,3	2,3	-57,3
Laminaatti	2,4	4,1	76,0
Listoitus ja oviasennus	7,6	2,9	-61,8
Kodinkonekytkentä	0,0	0,0	0,0
Lukitus ja heloitus	0,3	0,0	-100,0
<b>Keskiarvo</b>	<b>7,5</b>	<b>2,6</b>	<b>-64,9</b>

Taulukosta huomataan, että useimpien työvaiheiden varianssi on pienentynyt B-portaasta A-portaaseen siirryttäessä huomattavasti. Erityisesti varianssin huippuarvot ovat pudonneet huomattavasti. Toisaalta muutamissa työtehtävissä varianssi on myös kasvanut. Prosentuaalista muutosta arvioidessa vaihtelut jo valmiiksi pienten varianssien arvoissa korostuvat. Keskiarvo-riviltä huomataan, että töiden varianssi pieneni A-portaassa 64,9 % B-portaaseen verrattuna.

## Työvaihekohtainen jaksoajan varianssi eri aikatauluissa

Vertailun vuoksi voidaan tarkastella eri työtehtävien aloitus- ja lopetusaikojen erotusten vaihteluväliä sisävalmistusvaiheen työnjohtajan ylläpitämässä viikkoaikataulussa ja vastaavan työnjohtajan ylläpitämässä yleisaikataulussa. Laskemalla varianssi viikko- ja yleisaikataulusta ja saatiin näin taulukon 11 mukaiset tulokset.

Taulukko 11. *Työtehtäväkohtaiset jaksoajan varianssit koko kohteen osalta.*

<b>Työvaihe</b>	<b>Varianssi viikkoaikataulussa (päivää)</b>	<b>Varianssi yleisaikataulussa (päivää)</b>
<b>Kylpyhuoneiden laatoitus</b>	37,1	41,0
<b>Maalaus</b>	10,9	3,1
<b>Tasoitus</b>	7,5	11,4
<b>VS työpuoli</b>	8,8	1,1
<b>Kiintokalusteet</b>	5,5	3,1
<b>Listoitus ja välioviasen- nus</b>	5,3	0,2
<b>VS tuplaus ja alakatot</b>	3,8	4,4
<b>LV-kalustus</b>	3,9	0,8
<b>Laminaattilattia</b>	3,2	0,0
<b>Loppusiivous</b>	2,1	0,5
<b>Kylpyhuoneiden alakatot</b>	1,4	1,7
<b>Lukitus ja heloitus</b>	0,3	0,4
<b>Kodinkonekytkentä</b>	0,0	0,2

Työnjohtajan laatimaan viikkoaikatauluun kirjatut tiedot työtehtävien osalta olivat huomattavasti tarkempia kuin yleisaikataulussa olleet tiedot. Taulukosta 11 huomataan, että aikataulujen välillä oli huomattaviakin eroja varianssissa. Lähes päivittäin ylläpidettyä viikkoaikataulua voitaneen pitää luotettavampana, siinä missä viikkotasolla päivitetystä yleisaikataulusta lasketut varianssit vastaavat vain karkeasti viikkoaikataulusta lasketuja variansseja. Sisävalmistusvaiheen työnjohtaja myös muutti viikkoaikataulun tehtävien suunniteltua kestoa ja aloitus- ja lopetusaikoja, kun taas yleisaikatauluun muutoksia ei tehty. Työvaihekohtainen varianssi on laskettu kuitenkin aina toteumatiedosta. (haastateltavat 1 ja 2)

Jotkut työvaiheet ovat kestäneet vain yhden päivän tahtialuetta kohden ja ne on siten kirjattu valmiiksi lähes heti töiden alkamisen jälkeen. Tämän kirjaustavan takia joidenkin työvaiheiden varianssiksi muodostuu 0, sillä aloitus- ja lopetusaikojen hajonta on alle yksi vuorokausi. Toisaalta on myös huomioitava, että pidempään kestävässä työvaiheissa esiintyy tarkastelutasosta riippuen käytännössä aina varianssia.

### **Sisävalmistusvaiheen läpimenoajat**

Kuten kirjallisuuskatsauksessa todettiin, varianssin pienentymisen tulisi heijastua myös koko sisävalmistusvaiheen läpimenoajan pienentymiseksi prosessin vakautuessa. Työmaahenkilöstön haastattelussa todettiin, että A-portaan sisävalmistusvaihe saatiin lyhenemään noin kahdella viikolla, ja yksittäisten työvaiheiden kestoa kyettiin lyhentämään B-portaaseen verrattuna (haastateltava 2). A- ja B-portaiden läpimenoajat on mahdollista laskea myös datasta laskemalla molempien lohkojen viimeisen työtehtävän lopetusajan

ja ensimmäisen työtehtävän aloitusajan erotus. Lohkojen sisävalmistusvaiheiden aloitus- ja lopetusajat on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. *Lohkojen sisävalmistusvaiheiden läpimenoajat.*

Lohko	Ensimmäisen työtehtävän aloitusaika	Viimeisen työtehtävän valmistumisaika	Läpimenoaika yhteensä
B-porras	26.6.2020	14.10.2020	110 päivää
A-porras	17.8.2020	16.11.2020	91 päivää

Aikavälit on pyöristetty vuorokauden tarkkuudelle, mitä voidaan pitää riittävänä tarkkuustasona huomioiden sen, että työvaiheen kesto on laskettu kalenteripäivinä, eikä ota huomioon varsinaisia tehtyjä työpäiviä, lomapäiviä tai arkipyhiä. A-portaan sisävalmistusvaihe valmistui 19 päivää nopeammin, toisin sanoen 17,3 % lyhyemmässä ajassa kuin B-porras, mitä voidaan pitää huomattavana parannuksena. Noin 2,5 viikolla lyhentynyt aikataulu vastaa myös työnjohdon haastatteluista saatua kuvausta.

### Tahtialueiden läpimenoajat

Yksittäisten työvaiheiden lyhentyessä ero huomataan myös tahtialueiden läpimenoaikaa tarkasteltaessa. Laskemalla ensimmäisen tahtiaikataulutehtävän aloitusajan ja viimeisen tehtävän lopetusajan välisen erotuksen, saadaan taulukon 13 mukaiset läpimenoajat tahtialueille.

Taulukko 13. *Tahtialueiden läpimenoajat päivinä.*

Tahtialue	Läpimenoaika (päivää)	Lohkon keskiarvo (päivää)
B2	102	
B3	98	
B4	104	
B5	99	
B6	96	100
A2	79	
A3	77	
A4	85	
A5	79	
A6	73	79
<b>Keskiarvo</b>	89	

Taulukosta huomataan, että läpimenoajat ovat lyhentyneet myös tahtialuekohtaisesti. Ensimmäisen ja viimeisen tahtialueen läpimenoajassa voidaan havaita 28,4 % ero. Toisaalta tahtialuekohtaiset läpimenoajat vaihtelevat A-lohkossa enemmän.

## Työvaihekohtainen suorituskyky

Jaksoaikoja ja läpimenoaikojen vaihtelua voidaan tarkastella myös työvaiheittain, jolloin voidaan arvioida työvaiheita suorittaneiden työryhmien eli aliurakoitsijoiden työn virtausta. Tätä voidaan hyödyntää aliurakoitsijan suorituskyvyn arvioinnissa. Taulukossa 14 on esitelty esimerkkinä lasketut tunnusluvut listoituksesta ja oviaasennuksesta. Kaikkien tutkittujen työvaiheiden tunnusluvut on esitetty liitteessä 3. Kaikkien tunnuslukujen yksikkö on päivä.

Taulukko 14. *Listoituksen ja oviaasennuksen virtauksen tunnusluvut.*

<b>Listoitus ja oviaasennus</b>			
Jaksoaika B	6,0	Jaksoajan vaihtelu B	7,6
Jaksoaika A	3,9	Jaksoajan vaihtelu A	2,9
Muutos B-A	-51,8 %	Muutos B-A	-162,0 %
Keskiarvo	5,0	Keskiarvo	5,3

Taulukosta 14 voidaan huomata, että jaksoaika on lyhentynyt A-lohkossa 51,8 %. Keskimäärin jaksoaika vastaa työmaalla käytettyä 5-päiväistä tahtiaikaa. Jaksoajan vaihtelu on ollut B-lohkossa todella huomattavaa, mutta A-lohkossa vaihtelu on jo saatu pienentymään huomattavasti.

Data-analyysin perusteella voidaan esittää, että tehtävien vaihtelu on kytköksissä sekä korkeaan jaksoaikaan, että koko työvaiheen läpimenoaikaan. Tätä tukevat myös haastatteluissa tehdyt havainnot: A-lohkossa varianssi ja läpimenoaika ovat molemmat pienentyneet ja haastatteluiden perusteella aikatauluohjaus onnistui B-lohkoa paremmin (haastateltava 2). Esitellyillä tunnusluvuilla voidaan siis arvioida prosessin etenemistä ja vakautta.

Vaikka alkuperäisestä tahtiaikataulusta poikettiin ja työt eivät edenneet aina aikataulussa, virtaus loppua kohden parani huomattavasti, ja siten läpimenoaikaa saatiin lyhennettyä jopa alkuperäistä tahtiaikataulua lyhyemmäksi. Aktiivinen aikatauluohjaus mahdollisti aikataulun kiristämisen siten, että prosessin virtaus vakautui samalla jatkuvasti.

## 4.5 Kehitysehdotukset

Työmaalta saatava data voidaan tutkimuskohteen tapauksessa pitää melko laadukkaana, sillä aikataulutiedostoja on ylläpidetty aktiivisesti koko sisävalmistusvaiheen ajan. Jotta datan hyödyntämismahdollisuuksia voitaisiin kehittää jatkossakin, tulisi aikataulutiedostojen ylläpidon tapahtua aktiivisesti kaikilla työmailla. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi tulisi luoda tarkempi ohjeistus aikatauluohjelmiston käytöstä ja pyrkiä yhteistä käyttämiä käytännöt koko asuntorakentamisen linjalla, tai vähintäänkin tahtiaikataulua

käyttävillä työmailla. Tätä voisi pitää myös osana Firan asuntorakentamisen prosessin kehittämistä. Sitedriven käytön edistämiseksi myös Sitedrive-ohjelmaa tulisi kehittää edelleen yhä paremmin työmaahenkilöstön tarpeita palvelevaksi.

SiteDrive-ohjelmisto kerää käytössä runsaasti dataa, mutta SiteDriven dashboard-näky-  
mässä työnjohdolle ja käyttäjälle näkyvät aikataulumittarit koskevat lähinnä aikataulun  
laatua ja PPC:tä. Ohjelmiston toiminnallisuuksiin tai ohjelmiston keräämistä tiedoista joh-  
dettuihin PowerBI-raportteihin voisikin olla tarpeellista lisätä uusia työmaan suoritusky-  
kyä kuvaavia mittareita, joita olisi jo nykyisellään mahdollista muodostaa SiteDrivestä  
saatavan, työnjohdon syöttämän datan perusteella. Näin työnjohdolle ja työmaatoimi-  
henkilöille voisi muodostua parempi tilannekuva työmaan suorituskyvystä ja toisaalta  
esimerkiksi koko asuntorakentamisen linjan suorituskykyä olisi mahdollista seurata ja  
vertailla. Mikäli usealta työmaalta saataisiin yhdenmukaisesti kerättyä, laadukasta aika-  
tauludataa, voitaisiin eri työmaiden, työvaiheiden ja esimerkiksi jopa yksittäisten urakoit-  
sijoiden suorituskykyä arvioida tunnusluvuin. Tämä voisi auttaa päätöksenteon viemistä  
tietoon perustuvaksi. Tilannekuvan esittäminen visuaalisessa ja helposti luettavassa  
muodossa eli kerätyn datan työstäminen tietotuotteeksi voisi helpottaa päätöksentekoa  
ja siten tuottaa arvoa yritykselle.

## 5. YHTEENVETO JA POHDINTA

### 5.1 Tulosten arviointi ja pohdinta

Tämän tutkimuksen tavoite oli määritellä asuntorakentamisen sisävalmistusvaiheen prosessin virtaus, luoda menetelmä virtauksen laadun arvioimiseen, koostaa työmaan keräämästä digitaalisesta aikatauludatasta aineisto, sekä laatia aineiston pohjalta data-analyysi, jolla vastattiin seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

#### 1. Millainen oli tutkimuskohteen sisävalmistusvaiheen prosessin virtaus?

Tutkimuskohteen sisävalmistusvaiheen aikataulu oli tahtiaikataulusuunnittelun periaatteita hyödyntävä aikataulu, jota päivitettiin aktiivisesti. Aikataulusuunnittelua tehtiin myös töiden edetessä. Etenkin töiden alussa alkuperäisestä tahtiaikataulusuunnitelmasta poikettiin ja prosessissa oli runsaasti epävakautta ja häiriöitä. Aikataulu kuitenkin vakautui töiden edetessä. Tahtiaikataulu onkin todettu herkäksi häiriöille jo aikaisemmin Firan tutkimuksissa (Alhava et al. 2019). A-lohkossa keskimääräiset jaksoajat vastasivat jo tahtiaikataulun 5 päivän jaksoaikaa ja koko lohkon läpimenoaika oli jopa alkuperäistä tahtiaikataulua nopeampi. Aktiivisella aikatauluohjauksella työvaiheet pysyivät työnjohdon hallinnassa, ja prosessin virtaus parani prosessin edetessä.

Koko sisävalmistusvaiheen ja myös eri työtehtävien virtausta voitiin analysoida aineistosta, joskin viikko- ja yleisaikatauluseurannassa oli havaittavissa eroja kirjausten tarkkuudessa ja siten luotettavaa tietoa työvaiheiden virtauksesta oli tiettyjen työvaiheiden osalta vaikea saada pelkän datan perusteella. Toisaalta etenkin runsaasti häiriöitä sisältäneet työvaiheet voitiin havaita datasta, ja data tuki haastatteluissa esille tulleita havaintoja työn virtauksesta.

Kaikessa työssä on tarpeeksi pienellä tarkastelutasolla havaittavissa sisäistä vaihtelua. Tätä voidaan kutsua myös aikataulun kohinaksi (Fransson et al. 2014). Datasta huomattiin, että etenkin lyhytkestoisissa työtehtävissä jaksoajan varianssiksi muodostui joissain tapauksissa 0. Tällöin työt ovat tulleet suoritetuksi ja kirjatuksi esimerkiksi yhden työpäivän aikana, eikä työn sisäinen kohina näy vaihteluna aikatauluseurannassa. Toisaalta aikatauludatasta saatava tieto ei kerro, onko työssä esiintynyt haasteita tai esteitä, joten työn sisäisen varianssin tarkempi tutkiminen voisi olla tarpeellista. Sisäistä varianssia tutkimalla voitaisiin kuvata myös paremmin tehtävän arvovirtaa.



Kuten aiemmin todettiin, tahtiaikana toimi 5-päiväinen maanantaista perjantaihin kestävä työviikko. Tämä on mielletty rakennusalalla toimivaksi menettelytavaksi, sillä työsuunnittelua ja töiden rytmitystä on totuttu tekemään viikkotasolla. Tahdin viidettä työpäivää on mahdollista hyödyntää myös puskurina, sekä tarkistuspäivänä seuraavan työvaiheen mestan luovutusta varten. (Frandsen and Tommelein 2016, Haghsheno et al. 2016). 5-päiväinen tahtiaikataulu helpottaa myös materiaalityösuunnittelua ja työmaalogistiikan järjestelyä (Lehtovaara et al. 2021). Lyhyempi tahtiaika voisi mahdollistaa teoriassa paremman virtauksen aikataulupuskureiden vähentymisestä johtuen, mutta toisaalta sen ohjaus vaatii enemmän resursseja ja voi lisätä haasteita, mikäli työvaiheissa esiintyy paljon varianssia (Lehtovaara et al. 2021) Pienemmällä tahtialueilla ja lyhyemmällä tahtiajalla saavutettavat hyödyt voivatkin jäädä käytännössä vähäiseksi, mikäli virtauksen vaihtelua ei kyetä hallitsemaan ja minimoimaan.

Virtauksen hallinta eli tahtiaikatauluohjaus tapahtui sisävalmistusvaiheessa LPS:n käytäntöjä mukailien, ja toimintatavalla varmistettiin aliurakoitsijoiden tietoisuus aikataulun nykytilasta ja aloitusedellytykset alkaville töille. Vastaava työnjohtaja hyödynsi työmaalla pilotoituja infonäkymiä eli työmaan ohjamaa aktiivisesti töiden edistymisen valvomiseen, kun taas sisävalmistusvaiheen työnjohtaja muodosti tilannekuvansa työmaalta pitkälti Sitedrive-aikataulua seuraamalla ja ylläpitämällä. Merkittävä osa kommunikaatiosta aliurakoitsijoiden kanssa tapahtui myös keskusteluiden, puheluiden ja sähköpostien välityksellä. Päivittäiset nopeat ja epämuodolliset kokoukset ovat tutkitusti toimivaksi todettu tapa ohjata tahtiaikataulua (Lehtovaara 2021). Työmaan käyttämät päivittäisjohtamisen menetelmät muistuttavat paljolti Örmän (2019) diplomityössään muodostamaa mallia aliurakoitajan työn ohjauksesta. Örmän havainnoista poiketen erityisesti tiedonkulussa ja Sitedriven käytössä ilmentyviltä ongelmilta on haastatteluiden perusteella onnistuttu välttymään tutkimuskohteen työmaalla. Toisaalta Örmän esittämiä haasteita aliurakoitsijoiden sisäisessä työn organisoinnissa oli kuitenkin havaittavissa myös tutkimuskohteessa, mutta sekä sisävalmistusvaiheen työnjohtaja ja vastaava työnjohtaja kokivat, että yhteistyö aliurakoitsijoiden kanssa toimi pääsääntöisesti hyvin (haastateltavat 1 ja 2).

Sisävalmistusvaiheen virtaus parani loppua kohden, mikä kävi ilmi sekä haastatteluista että datasta. Toisen lohkon viimeisissä tahtialueissa prosessi oli jo erittäin vakaa verrattuna työmaan alkuaan. Työmaahenkilöstön haastatteluiden perusteella työmaaorganisaatiossa tapahtunut oppiminen mahdollisti työmaan lopussa jopa aikataulun kiristämisen (haastateltavat 1 ja 2). Aliurakoitsijoiden sitoutuminen tahtiin rakentamisprosessin aikana on tunnustettu myös tahtiaikataulutuohtantoa käsitelleissä tutkimuksissa (mm. Binninger et al. 2017b, Lehtovaara et al. 2019), ja joustavamman aikataulun käyttöä alussa (*soft start*) suositellaankin käytettäväksi TPTC-mallissa (Dlouhy et al. 2016).

Työssä tapahtui myös aikatauluviivästyksiä. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin esimerkkinä laatoitustöiden viivästyistä ja siitä aiheutunutta konfliktia tasoitustöiden kanssa. Frandson (2019) esittää kuvatun kaltaiseen tilanteeseen kaksi ratkaisutapaa: urakoitsijat voivat sopia päällekkäisyyksistä ja esimerkiksi työskennellä samoilla tahtialueilla (*soft conflict*), tai työnjohdon on puututtava tilanteeseen ja järjestettävä aliurakoitsijalle vaihtoehtoinen työpiste ja jopa aikataulutettava tehtäviä uudestaan (*hard conflict*) (Frandson 2019). Haastatteluiden mukaan töiden yhteentörmäyksestä seurasikin tehtäväjärjestyksen muuttaminen (haastateltava 2).

Tahtialueiden väliset konfliktit ovat tunnistettu haaste tuotannonohjauksessa. Haastatte- luissa kävi ilmi, että jopa työmaasähköistyksen kapasiteetti tai työkalujen ja materiaalien välivarastointi aiheuttivat konfliktiriskin (haastateltava 2). Joissain työvaiheissa esiintyvä korkea jaksoaikojen vaihtelu tarkoittaa, että tehtävien suoritusaikaa ei voida ennakoita ja töiden ohjaus kuormittaa työjohtoa enemmän lisääntyneen seurantarpeen takia. Lisäksi seuraavien työvaiheiden täytyy väistää myöhässä olevia työvaiheita. Jos työvai- heet etenevät liian nopeasti, urakoitsijan työntekijät saattavat jäädä toimeettomiksi tah- tialueen valmistuttua etuajassa. Tällöin työnjohdon on järjestettävä varamestaa odotta- ville työntekijöille. Mikäli varamestaa ei ole, aliurakoitsijan työjohto saattaa sijoittaa työntekijän toiselle työmaalle. Sacksin (2017) PPO-malli kuvaa tätä ilmiötä aliurakoitsi- joiden projektien välisenä virtauksena, ja se aiheuttaa työmaan kapasiteetin vaihtelua ja siten voi pahentaa varianssia entisestään. Näistä syistä onkin äärimmäisen tärkeää pyr- kiä pitämään prosessi mahdollisimman vakaana ja täten myös tavoitella vaihtelun pie- nentämissä prosessissa. Laadukas virtaus tulee nähdä sekä pääurakoitsijan että aliura- koitsijan etuna, kuten myös seuraavan asiakkaan periaatteessa (Ward & McElwee 2007) esitetään. Ennakoitavissa oleva prosessi auttaa myös aliurakoitsijoita omassa työnsuun- nittelussaan. (Sacks 2016)

## **2. Millä tunnusluvuilla virtausta ja sen ominaisuuksia voidaan mitata?**

Tutkimuksen perusteella rakentamisen virtauksen mittaukseen voidaan soveltaa saman- kaltaisia mittareita kuin valmistavassakin teollisuudessa käytetään. Toisaalta rakentami- sen virtauksen erityispiirteet vaativat soveltamista ja täsmällisiä määritelmiä rakentamis- prosessin eri osille. Tämän tutkimuksen perusteella virtausta voidaan mitata ainakin seu- raavilla tunnusluvuilla:

Työvaihe- tai urakoitsijakohtainen jaksoaika, jolla voidaan arvioida prosessin virtausta ja myös yksittäisen urakoitsijan tai työryhmän suorituskykyä.

Läpimenoaika, eli kokonaisen työvaiheen, lohkon tai työjonon valmistamisaika, jolla voi- daan arvioida prosessin suorituskykyä yleisellä tasolla sekä myös vertailla prosessia

muihin prosesseihin. Tutkimuskohteen lohkot olivat samankokoisia, mutta mikäli lohkoissa olisi esimerkiksi eri määrä asuntoja, tulisi läpimenoaikojen vertailua varten läpimenoajat laskea samankokoista yksikköä, esimerkiksi asuntoa kohden.

Myös keskeneräisen työn (WIP) säätely osoittautui kirjallisuuskatsauksessa oleelliseksi keinoksi jaksoajan ja läpimennon hallitsemiseen. Tässä tutkimuksessa ei suoritettu erikseen laskentaa WIP:in määrästä, mutta työnjohto kykeni hallitsemaan WIP:iä tarjoamalla urakoitsijoille lisää työpisteitä eli mestaa. Tämä saattoi näkyä myös töiden etenemisen nopeutumisenä A-lohkossa.

Esitettyjen tunnuslukujen vaihteluväliä ja muutosta laskemalla voidaan johtaa tunnuslukuja suorituskyvyn kehittymisen seurantaan varten. Tutkimus onnistui osoittamaan, että tunnuslukujen arvoja voidaan laskea suoraan työmaan keräämästä aikatauludatasta. Datan osoittamat tulokset oli mahdollista varmistaa työnmaahenkilöstön haastatteluilla. Virtauksen laatua voidaan kuvata tunnuslukujen lisäksi myös graafisesti. Tunnusluvut voitiin laskea lähes jokaisesta tarkasteltavaksi valitusta työvaiheesta. Esitettyjä mittareita reaaliaikaisesti seuraamalla voitaisiin muodostaa parempi tilannekuva työmaan tilanteesta.

Nykytilassa aikatauluseurantaa toteutetaan manuaalisesti, ja viikkotason tunnuslukuna tarkastellaan lähinnä PPC:tä. PPC:n selvänä ongelmana on kuitenkin, että se mittaa vain aikataulun toteutumista, eli toisin sanoen aikataulusuunnittelun luotettavuutta. Kuten aiemmin todettiin, suoranaista korrelaatiota PPC:n ja työmaan virtauksen välillä on vaikeaa osoittaa. (Sacks et al. 2017) Sisävalmistusvaiheen työnjohtaja ylläpiti viikkoaikataulua aktiivisesti, joten PPC saattoi pysyä korkeana, vaikka työnjärjestystä olisikin muutettu alkuperäisestä esimerkiksi häiriöiden takia. Tässä tutkimuksessa esitetyillä mittaus-tavoilla voitaisiinkin kuvata monipuolisemmin työmaan suorituskykyä.

### **3. Miten voitaisiin parantaa virtausta edelleen?**

Kirjallisuuskatsauksessa painotettiin varianssin minimoimista virtaustehokkuuden lisäämiseksi. Pienempi varianssi johtaa ennakoitavampaan prosessiin ja siten parempaan virtaukseen. Ennakoitavuus myös helpottaa tuotannonohjausta. Toisaalta varianssin eliminointi kokonaan ei ole välttämättä tarkoituksenmukaista, sillä varianssia esiintyy prosessissa aina (Pound et al. 2014). Vaikka työt eivät edenneetkään täysin tahtiaikataulussa, tutkimustulokset osoittavat prosessin vakautuneen ja läpimenoaikojen varianssin pienentyneen loppua kohden.

Nykyaikaisen rakentamisen toimintamalleille tyypillisestä pääurakoitsijan projektinjohto-organisaatiosta sekä useiden aliurakoitsijoiden työntekijöistä koostuva työmaaorgani-

saatio kehittyi projektin loppua kohden tehokkaammaksi ja prosessi saatiin huomattavasti vakaammaksi verrattuna alkuvaiheeseen. Rakentamisen projektiluontoisuuden takia tämä sopimussuhteella toisiinsa liitetty organisaatio kuitenkin lakkaa olemasta projektin valmistuessa, ja seuraavaa projektia varten projektiorganisaatio tai sen osia joudutaan kasaamaan uudestaan. Haastatteluiden perusteella työmaatoimihenkilöstö kykenee vaikuttamaan organisaatorakenteeseen rajatusti, minkä vuoksi organisaation kokemuksen oppimisen koetaan jopa menevän hukkaan, kun prosessin opettelu tulee aloittaa uudestaan uudella organisaatiolla seuraavan projektin alkaessa. Tätä voisi kärjistäen verrata siihen, että teollinen tuotantolaitos puretaan ja työntekijät irtisanotaan juuri, kun tuotteen valmistusprosessi on saatu vakaaksi (Sacks et al. 2017). Organisaation oppiminen on myös oleellinen osa lean-filosofiaa, joten projektiorganisaatioiden menetetty aineeton pääoma voitaisiin nähdä hukkana. Organisaatioiden oppimisen hyödyntäminen tulisi nähdä myös kilpailukykyä nostavana tekijänä (Laihonen et al. 2013).

Ratkaisuna voisi olla luotettavana pidettyjen aliurakoitsijoiden valitseminen myös seuraavaan kohteeseen ja työmaaorganisaation huomioiminen jo projektin alkuvaiheen hankinnoissa. Urakoitsijan kyky sitoutua tahtiaikatauluun ja pääurakoitsijan prosessiin tulisi nähdä kriteerinä hankintapäätöksessä siinä missä tarjoushinta. (haastateltava 1) Luotettavuuden ja sitoutumisen mukaan ottaminen hankintaprosessin päätöksentekoon olisi myös mielenkiintoinen aihe jatkotutkimuksille. Toisaalta aliurakoitsijoiden sitouttamista ja perehdyttämistä tahtiaikataulutuotantoon ja pääurakoitsijan toimintatapoihin tulisi kehittää siten, että kokemattomuus tahtiaikataulutuotannosta ei olisi esteenä hyvän virtauksen saavuttamiseksi. Aliurakoitsijoille voitaisiin asettaa myös taloudellisia kannusteita tahtiaikatauluun sitoutumisesta ja esimerkiksi tasaisen läpimenoajan saavuttamisesta. Säännölliset, prosessimaiset toimintatavat myös eri työmaiden välillä ovat edellytys tämän saavuttamiseksi. Aliurakoitsijoiden ja alihankintaketjujen sitouttaminen pääurakoitsijan toimintatapaan on myös lean-filosofian periaatteiden mukaista (mm. Liker 2004)

Aiemmin tahtiaikataulun ohjausta tutkittaessa on todettu, että vaikka projekti ei etenisiäkään alkuperäisen aikataulusuunnitelman mukaisesti, on tuotantoprosessi silti paremmin hallittavissa hyvän tilannekuvan ja laadukkaiden digitaalisten työkalujen avulla (Alhava et al. 2019). Myös tässä tutkimuksessa tilannekuvaa pidettiin haastatteluiden perusteella tärkeänä päivittäisjohtamisen ja tahtiaikataulun ohjauksen työkaluna. Kuten tutkimuksessa havainnollistettiin, virtauksen visualisointi ja mittaus on mahdollista jo nyt olemassa olevasta datasta. Tätä dataa tulisikin hyödyntää työmaan ohjaamon kehityksessä, jotta työmaahenkilöstö voisi käyttää työmaan tilanne kuvaa entistäkin tehokkaammin työn ohjauksessa. Selkeillä ja vertailukelpoisilla virtauksen KPI:lla voitaisiin myös ohjata virtausta paremmaksi.

#### **4. Millainen on työmaan aikataulunhallissa muodostetun digitaalisen datan laatu?**

Aikaisemmin toteutetut tapaustutkimukset tahti-aikataulun suorituskyvystä ja virtauksesta ovat hyödyntäneet manuaalista aikatauluseurantaa esimerkiksi taulukkolaskentaohjelmaa tai tutkimusprojektia varten toteutettua ad hoc -sovellusratkaisua käyttäen. (mm. Ruohomäki 2019, Laine 2020, Keskiniva et al. 2021) Näistä tutkimuksista poiketen tässä tutkimuksessa käytettyä aikatauludataa ei työn aikana valmisteltu erityisesti tutkimusta varten käytettäväksi, vaikkakin tutkimuskohteessa pilotoidut kehityshankkeet ohjasivat ylläpitämään aikataulua aktiivisesti, mikä kävi ilmi myös haastatteluista (haastateltavat 1 ja 2). Etenkin töiden edistyessä aikataulusta poikkeavasti aikataulun korjaaminen ajan tasalle voi aiheuttaa ylimääräistä työtä työnjohdolle tai laskea aikataulun laatua (Örmä 2019). Örmän (2019) ja Vanhamäen (2020) diplomitöissään havaitsemaa Sitedrive-aikataulun päivittämisestä aiheutuvaa kuormitusta ei kuitenkaan ollut havaittavissa, vaan työnjohto päivitti aikataulua oma-aloitteisesti ja aktiivisesti. Aikataulun koettiin myös parantavan tilannekuvaa töistä (haastateltava 2).

Datan avulla voitiin vastata kaikkiin aiemmin esitettyihin tutkimuskysymyksiin, ja haastatteluiden perusteella dataa on päivitetty ja ylläpidetty aktiivisesti. Datan laatua voidaan pitää nykytasolla hyvänä, mutta entistäkin systemaattisemmalla aikatauluohjelmiston käytöllä voitaisiin parantaa datan laatua entisestään. Aikataulujen erilaiset laatimistavat tekivät yleis- ja viikkoaikataulun vertailusta haastavaa. Kaikki läpimenoaikoja ja virtausta koskeva aikatauludata on kuitenkin kerätty sellaisenaan työmaan järjestelmistä. Vaikka datasta ei sellaisenaan kyetäkään havaitsemaan juurisyitä töiden myöhästymiseen, voidaan kuitenkin selkeästi havaita ne työvaiheet, joissa ongelmia on esiintynyt.

Data-analyysillä saadut tulokset virtauksen laadusta eivät sellaisenaan tarjoa keinoja työmaan prosessin vakautukseen tai anna selitystä sille, miksi työt viivästyvät. Toisaalta datan avulla voidaan visuaalisesti selkeällä tavalla osoittaa työvaiheen epävakaus, ja tunnusluvuilla voidaan arvioida työmaan suorituskykyä ja sen muutosta. Tätä tietoa voitaisiin hyödyntää työmaan tilanteen havainnollistamisessa sekä työmaaorganisaation ulkopuoliselle tarkkailijalle kuin myös työmaahenkilöstölle. Sacks et al. (2017) esittävät, että yhtenäisen mittaustavan käyttäminen mahdollistaa myös erilaisten tuotantojärjestelmien vertailun, joten keräämällä ja analysoimalla aikatauludataa tehokkaammin voisi olla mahdollista tunnistaa parhaat toimintatavat ja viedä ne osaksi asuntorakentamisen prosessia. Keskiniva et al. (2021) suosittelivat myös kirjausten tekemistä työmaakierrosten ohella esimerkiksi mobiilisovellusta käyttäen, jotta etenemätietoa saataisiin kerättyä

mahdollisimman tarkasti. Myös tilannekuvan luomista automaattisesti muodostettuja aikataulunäkymiä käyttäen suositellaan päätöksenteon parantamiseksi (Keskiniva et al. 2021).

Työmaan käyttämät ohjausmenetelmät, kuten LPS:n viikkopalaverit sekä aikataulun jakaminen työntekijöille koettiin haastatteluissa hyödyllisinä keinoina yhteisten tavoitteiden määrittämisessä sekä viikko- ja projektitasolla (haastateltava 2). Aikataulun visualisointi on tahtituotannossa sekä lean-filosofiassa tärkeä keino informaation välitykseen (mm. Frandson and Tommelein 2016, Haghsheeno et al. 2016). Haastatteluiden perusteella ajantasaisen aikataulun jakaminen työntekijöille sitoutti työntekijöitä paremmin aikatauluun ja lisäsi työntekijöiden kiinnostusta aikataulua kohtaan. Sama ilmiö on havaittavissa esimerkiksi Pokelan (2019) diplomityössä. Huomionarvioista on, että Örmän (2019) mukaan Sitedrive-ohjelman aikaisemmissa versioissa aikataulutiedoston tulostustoiminto ei ole tuottanut kuvattua kaltaista riittävän selkeää esitystä aikataulusta, ja siten aikataulun asettaminen työntekijöiden nähtäväksi on koettu joillain työmaille liian työlääksi, sillä aikatauluesitykset tulisi laatia manuaalisesti (Örmä 2019). Kuten aikaisemminkin on todettu, digitaalisten työkalujen tuleekin palvella käyttäjiänsä. Sitedriven kehittäminen käyttäjälähtöisesti on erittäin tarpeellista ja ohjelmiston toiminnallisuuksissa onkin selvästi tapahtunut kehitystä.

## 5.2 Tulosten luotettavuuden arviointi

Tutkimustulosten reliabiliteetin arvioinnilla tarkoitetaan tutkimuksen luotettavuuden arviointia toistettavuuden näkökulmasta. Tutkimustuloksen validiutta arvioidaan puolestaan mittaustulosten oikeellisuutta arvioimalla, eli tarkastelemalla ovatko tutkimuksessa käytetyt mittarit tarkoituksenmukaisia mittaamaan tutkittavaa asiaa. (Hirsjärvi et al. 2009)

Tutkimuskohteesta kerätty digitaalinen aikatauludata oli useimpien työvaiheiden osalta riittävän laadukasta virtauksen arviointiin. Vaikka datasta tehdyt havainnot voitiinkin vahvistaa työmaahenkilöstön haastatteluilla, aiheuttavat aikataulukirjauksissa esiintyvät epätarkkuudet kuitenkin haasteita etenkin tutkiessa dataa tarkemmin. Kaikkien työvaiheiden virtausta ei voitu laskea, eikä tiettyjä kirjallisuuskatsauksessa esitettyjä virtauksen lajeja, kuten paluuvirtausta voitu nähdä datasta. Datasta ei myöskään saada tietoa mahdollisesta työn laadusta, laatuvirheistä tai ylitöistä. Tutkimuskohteesta saatua dataa voidaan pitää kuitenkin käyttökelpoisena prosessin virtauksen arvioimiseen koko prosessin tasolla. Data on työnjohdon syöttämää ja keräämää, joten on oletettava, että työnjohto on tehnyt kirjaukset myös mahdollisimman todenmukaisesti. Tutkimuksen toistettavuudessa tulisi huomioida työnjohtajien erilaiset käyttötavat Sitedrive-aikataulujen ylläpi-

dossa. Työmaiden väliltä ei välttämättä nykytilassa ole edes mahdollista saada vertailukelpoista dataa, mikäli käytännöt aikatauluohjelman käytössä eivät ole yhtenäiset. Haastatteluista kävi ilmi, että aikataulujen ylläpitotavoissa esiintyy jopa työmaan sisäisiä eroja, jotka saattavat vaikuttaa tulosten luotettavuuteen.

Lisäksi datan tarkkuustaso on riippuvainen tahtiaikataulun parametreista, kuten tahtiajasta ja tahtialueiden koosta. Huonekohtaiset tahtialueet ja lyhyt, esimerkiksi yhden työpäivän mittainen tahtiaika saattaisivat tuottaa suurempaa näkyvää vaihtelua prosessissa tai vaihtoehtoisesti lisätä ohjauksen tarvetta. Haastattelujen perusteella työmaahenkilöstö on käyttänyt Sitedriveä erittäin aktiivisesti, mutta on vaikea arvioida, olisivatko erilainen tahtiaika tai tahtialuejako vaikuttaneet Sitedriven käyttötapoihin. Haastateltavien näkökulmat koskevat vain yksittäistä työmaata, joten haastatteluista saadut havainnot ja kehitysehdotukset eivät välttämättä ole sellaisenaan yleistettävissä. On myös huomioitava, että haastattelut suoritettiin tutkimuskohteen rakennustöiden valmistumisen jälkeen, joten haastateltavat saattavat hahmottaa prosessin kulun eri tavoin kuin töiden ollessa käynnissä, millä voi olla vaikutusta myös haastatteluissa saatuihin vastauksiin.

### **5.3 Jatkotutkimusaiheet**

Tässä tutkimuksessa esiteltyjä menetelmiä virtauksen laskentaan tulisi kehittää edelleen, ja menetelmien toimivuutta tulisi arvioida myös muista projekteista kerätystä datasta. Olisi myös tarpeellista vertailla virtausta eri projektien ja työvaiheiden välillä tai esimerkiksi tarkastella virtausta urakoitsijoittain. Virtauksen vakauden yhteyttä esimerkiksi työmaan laatuvirheisiin tulisi tutkia.

Koska tutkimuksessa käytetty data on kerätty suoraan digitaalisista järjestelmistä, olisi järkevää tutkia myös data-analyysin automatisoinnin edellytyksiä ja toteutus- ja esitystapoja reaaliaikaiseen tuotannon suorituskyvyn seurantaan, sekä näiden integrointia työmaan ohjaamon näkymiin.

Myös digitaalisten aikataulu- ja laadunhallintatyökalujen hyödyntämistä ja käyttötapoja tulisi tutkia laajemmin etenkin käyttäjänäkökulmasta, jotta työkaluja olisi mahdollista kehittää siten, että ne palvelevat paremmin työmaahenkilöstöä ja siten kannustavat käyttäjiään käyttämään työkaluja aktiivisesti. Korkeampi käyttöaste parantaisi kerättävän datan laatua, joka puolestaan nostaisi digitaalisista työkaluista saatavia hyötyjä.

## LÄHTEET

- Alhava, O., Rinne, V., Laine, E., & Koskela, L. (2019). Can a Takt Plan Ever Survive Beyond the First Contact With the Trades On-Site?. Proceedings of the 27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (pp. 453–464). (Proceedings of the Annual Conference of the International Group for Lean Construction). Saatavissa: IGLC.net
- Babanina, D. (2020). Improving Construction Takt Production Efficiency by Using Digitalization. Diplomityö. Insinööritieteiden korkeakoulu, Real Estate Economics. Espoo. 69 s.
- Bajjou, M. & Chafi, A. (2018). The potential effectiveness of lean construction principles in reducing construction process waste: An input-output model. Journal of Mechanical Engineering and Sciences. 12. 4141–4160. 10.15282/jmes.12.4.2018.12.0358.
- Bertelsen, S., Henrich, G., Koskela, L. & Rooke, J. (2007). Construction Physics. Pasquire, C.L, C. L. & Tzortzopoulos, P., 15th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. East Lansing, Michigan, USA, 18-20 Jul 2007. s. 13–26.
- Bilal, M., Oyedele, L.O., Qadir, J., Munir, K., Ajayi, S., Akinade, O., Owolabi, H., Alaka, H. & Pasha, M. (2016). Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends. Advanced Engineering Informatics, vol 30, no. 3, s. 500–521.
- BIM2TWIN. (26.4.2021). Finland demo site – BIM2TWIN. Verkkosivu. Saatavissa: <https://bim2twin.eu/2021/02/24/finland-demo-site/>
- Binninger, M., Dlouhy, J., & Haghsheno, S. (2017a). Technical Takt Planning and Takt Control in Construction. LC3 2017 Volume II – Proceedings of the 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC), Walsh, K., Sacks, R., Brilakis, I. (eds.), Heraklion, Greece. s. 605–612.
- Binninger, M., Dlouhy, J., Steuer, D. & Haghsheno, S. (2017b). Adjustment Mechanisms for Demand Oriented Optimisation in Takt Planning and Takt Control. 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Heraklion, Greece, 9-12 Jul 2017. s. 613-620. Saatavissa: IGLC.net
- Binninger, M., Dlouhy, J., Müller, M., Schattmann, M. & Haghsheno, S. (2018). Short Takt Time in Construction – a Practical Study. 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Chennai, India, 18–20 Jul 2018. s. 1133–1143. Saatavissa: IGLC.net
- Brodetskaia, I., & Sacks, R. (2007). Understanding Flow and Micro-Variability in Construction: Theory and Practice. Pasquire, C.L, C. L. & Tzortzopoulos, P., 15th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. East Lansing, Michigan, USA, 18–20 Jul 2007. s. 488–497.
- Congrid. (10.4.2021). Congrid – Löydä uusi tapa hallita rakennusprojekteja. Verkkosivu. Saatavissa: <https://www.congrid.fi>



Dlouhy, J., Binninger, M., Oprach, S. & Haghsheno, S. (2016). Three-level Method of Takt Planning and Takt Control – A New Approach For Designing Production System in Construction. Proc. 24th Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction, Boston, MA, USA. sect.2 s. 13–22. Saatavissa: IGLC.net

Douhy, J., Binninger, M. & Haghsheno, S. (2019). Buffer Management in Takt planning – An overview of Buffers in Takt Systems. Proc. 27th Annual Conference of the International. Group for Lean Construction (IGLC), Pasquire C. and Hamzeh F.R. (ed.), Dublin, Ireland. s. 429–440. DOI: <https://doi.org/10.24928/2019/0226>. Saatavissa: IGLC.net

Fira Smart. (10.4.2021). Aikataulujohtamista yhdessä – Fira Smart. Verkkosivu. Saatavissa: <https://firasmart.com/fi/sitedrive/>

Fira Smart. (10.4.2021). Tiedolla johdettu työmaa. Verkkosivu. Saatavissa: <https://firasmart.com/fi/reference/tiedolla-johdettu-tyomaa/>

Franceschini, F., Galetto, M., Maisano. (2007). Management by measurement: Designing key indicators and performance measurement systems. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Science & Business Media. 242 s.

Frandsen, A., Berghede, K. & Tommelein, I. (2014). Takt-Time Planning and the Last Planner. Kalsaas, B. T., Koskela, L. & Saurin, T. A., 22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Oslo, Norway, 25-27 Jun 2014. pp 571-580

Frandsen, A., Seppänen, O. & Tommelein, I. (2015). Comparison between location based management and Takt Time Planning. Proc. 23rd Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction, 28-31 July, Perth, Australia. s. 3-12. Saatavissa: IGLC.net

Frandsen, A. & Tommelein, I., (2016). Takt Time Planning of Interiors on a Pre-cast Hospital Project. Proc. 24th Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction, Boston, MA, USA. sect.6 s. 143–152. Saatavissa: IGLC.net

Frandsen, A. (2019). Takt time planning as a work structuring method to improve construction work flow. Väitöskirja. UC Berkeley, Civil and environmental Engineering. ProQuest ID: Frandsen\_berkeley\_0028E\_19099. Merritt ID: ark:/13030/m5tf5436. Saatavissa: <https://escholarship.org/uc/item/6dp4n4fz>

Haghsheno, S., Binninger, M., Dlouhy, J. & Sterlike, S. (2016). History and Theoretical Foundations of Takt Planning and Takt Control. In: Proc. 24th Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction, Boston, MA, USA, sect.1 s. 53–62. Saatavissa: IGLC.net

Howell, G. (1999). What is Lean construction - 1999. 7th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Berkeley, California, USA, 26-28 Jul 1999.

Henrich, G., Bertelsen, S., Koskela, L. & Kraemer, K., Rooke, J. & Owen, R. (2008). Construction Physics –Understanding the flows in a construction process. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/228398960\\_CONSTRUCTION\\_PHYSICS-UNDERSTANDING\\_THE\\_FLOWS\\_IN\\_A\\_CONSTRUCTION\\_PROCESS](https://www.researchgate.net/publication/228398960_CONSTRUCTION_PHYSICS-UNDERSTANDING_THE_FLOWS_IN_A_CONSTRUCTION_PROCESS)

Hirsjärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. (2009). Tutki ja kirjoita (15. painos). Hämeenlinna: Kariston Kirjapaino Oy.

Heinonen, A. & Seppänen, O. (2016). Takt Time Planning: Lessons for Construction Industry from a Cruise Ship Cabin Refurbishment Case Study. Proc. 24th Ann. Conf. of

- the Int'l. Group for Lean Construction, Boston, MA, USA. Sect.2 s. 23–32. Saatavissa: IGLC.net
- Helsingin kaupunginkanslia. (5.4.2021). Pohjois-Pasila. Verkkosivu. Saatavissa: <https://www.uuttahelsinki.fi/fi/pasila/rakentaminen/pohjois-pasila>
- Huhtamäki, M. (2021). Tahtituotannon käyttöönotto asuntorakennustyömaalla. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta. Tampere. 82 s.
- Kalsaas, B., Gundersen, M., Berge, T., Koskela, L. & Saurin, T.A. (2014). To measure workflow and waste. A concept for continuous improvement. 22nd Annual Conference of the IGLC, Oslo, Norway, 835–846. Saatavissa: IGLC.net
- Keskiniva, K., Saari, A., Junnonen, J.-M. (2020). Takt Planning in Apartment Building Renovation Projects. *Buildings* 2020, 10, 226. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/buildings10120226>
- Keskiniva, K., Saari, A., Junnonen, J.-M. (2021). Takt Production Monitoring and Control in Apartment Renovation Projects. *Buildings* 2021, 11, 92. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/buildings11030092>
- Korb, S., Sacks, R. & Alhava, O. (2017). A Portfolio/Process/Operations (PPO) Analysis of a Meta-Project Production System in Renovation Projects. 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Heraklion, Greece, 9-12 Jul 2017. s. 161–168. Saatavissa: IGLC.net
- Koskela, L. (2000). An exploration towards a production theory and its application to construction. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 408. Espoo: Otamedia Oy. 296 s.
- Koskela, L., Ballard, G., Howell, G. & Tommelein, I. (2002). The foundations of lean construction - Chapter 14. Design and construction: building in value. Oxford: Butterworth Heinemann. s. 211-226.
- Koskela, L. (2004). Making-Do — the Eighth Category of Waste. Bertelsen, S. & Formoso, C. T., 12th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Helsingør, Denmark, 3–5 Aug 2004. Saatavissa: IGLC.net
- Koskela, L., Howell, G., Pikas, E., & Dave, B. (2014). If CPM is so bad, why have we been using it so long?. Understanding and Improving Project Based Production: 22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Oslo, Norway, 25–27 July 2014.
- Koskela, L. & Koskenvesa, A. (2003). Last Planner -tuotannonohjaus rakennustyömaalla. VTT Tiedotteita – Research Notes 2197. Espoo: VTT. 82 s.
- Koskenvesa, A., Koskela, L., Tolonen, T. & Sahlstedt, S. (2010). Waste and Labor Productivity in Production Planning Case Finnish Construction Industry. Walsh, K. & Alves, T., 18th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Haifa, Israel, 14–16 Jul 2010. s. 477–486. Saatavissa: IGLC.net
- Koskenvesa, A. & Sahlstedt, S. (2011). Rakennushankkeen ajallinen suunnittelu ja ohjaus 2017, Ratu KI-6031. Helsinki: Talonrakennusteollisuus ry ja Rakennustietosäätiö RTS. 144 s.

Laihonen, H., Hannula, M., Helander, N., Ilvonen, I., Jussila, J., Kukko, M. ... Yliniemi, T. (2013). Tietojohdaminen. Tampereen teknillinen yliopisto, Tietojohdamisen tutkimuskeskus Novi. Tampere. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/116695>

Laine, E. (2020) Asuinrakennuskohteen suunnitellun tahtituotannon toteutuminen ja sen vaikutus tuotannon laatuun. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta. Tampere. 66 s.

LCI Finland ry. (20.4.2021). Mitä on lean? – LCI Finland. Verkkosivu. Saatavissa: <http://lci.fi/mita-on-lean-rakentaminen/>

Lehtovaara, J., Mustonen, I., Peuronen, P., Seppänen, O., & Peltokorpi, A. (2019). Implementing takt planning and takt control into residential construction. Proc. 27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC), Pasquiere C. and Hamzeh F.R. (ed.), Dublin, Ireland, s. 417–428. DOI: <https://doi.org/10.24928/2019/0118>. Saatavissa: IGLC.net

Lehtovaara, J., Seppänen, O., Heinonen, A. (2020a). Building 2030 - Tahti suunnittelussa ja tuotannossa loppuraportti. Saatavissa: <https://www.aalto.fi/fi/building-2030>.

Lehtovaara, J., Heinonen, A., Lavikka, R., Ronkainen, M., Kujansuu, P., Ruohomäki, A., Örmä, M., Seppänen, O. & Peltokorpi, A. (2020b). Takt Maturity Model: From Individual Successes Towards Systemic Change in Finland. Tommelein, I.D. and Daniel, E. (eds.). Proc. 28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC28), Berkeley, California, USA, doi.org/10.24928/2020/0017. Saatavissa: IGLC.net

Lehtovaara, J., Seppänen, O., Peltokorpi, A., Kujansuu, P. & Grönvall, M. (2021). How takt production contributes to construction production flow: a theoretical model. Construction Management and Economics, 39:1, 73–95, DOI: 10.1080/01446193.2020.1824295

Liker, J. (2004). Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer. McGraw-Hill Education: New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto. Saatavissa: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071392310>

Lättilä, H. (2019). Fira pyrkii ulkomaille tahtiajalla ja modulaarisella rakentamisella. Rakennuslehti. Saatavissa: <https://www.rakennuslehti.fi/2019/06/fira-pyrkii-ulkomaille-tah-tiajalla-ja-modulaarisella-rakentamisella/>

Macomber, H. & Howell, G. (2004). The Two Great Wastes in Organizations. Bertelsen, S. & Formoso, C. T., 12th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Helsingør, Denmark, 3–5 Aug 2004. Saatavissa: IGLC.net

Modig, N. & Åhlström, P. (2018). This is Lean: Resolving the Efficiency Paradox (suom. Maarit Tillman). Tukholma: Rheologica Publishing. 167 s.

Mossman, A. (2018). What is lean construction: another look. Proc. 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC), Chennai, India, s. 1240–1250.

Mölsä, S. (2019). Asuntorakentamisen sisätyöt nopeutuivat kolmanneksella autoteollisuuden opeilla. Rakennuslehti. Saatavissa: <https://www.rakennuslehti.fi/2019/01/asuntorakentamisen-sisatyot-nopeutuivat-kolmanneksella-autoteollisuuden-opeilla/>

Patton, J. (2008). Task Diminishment: Construction value loss through sub-optimal task execution. Proceedings of the 2008 IAJC-IJME International Conference ISBN 978-I-60643-379-9.

Pokela, L. (2019) Tahtituotantoon sopivat alihankintasopimukset ja alihankintojen päivittäisohjaus. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta. Tampere. 73 s.

Pound, E., Bell, J. & Spearman, M. (2014). Factory Physics for Managers: How Leaders Improve Performance in a Post-Lean Six Sigma World. New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill Education.

Rakennustaito (2021). Postipuisto rakentuu työkoneilla ja datalla. Verkkosivu. Saatavissa: <https://rakennustaito.fi/postipuisto-rakentuu-tyokoneilla-ja-datalla/>

Ruohomäki, A. (2019). Hukan mittaaminen tahtituotannossa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Building Technology. Espoo. 68 s.

Ruohonen, K. (2011). Tilastomatematiikka. Opintomoniste. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 87 s.

Sacks, R. (2016). What constitutes good production flow in construction?. Construction Management and Economics. 34:9, 641–656, DOI: 10.1080/01446193.2016.1200733

Sacks, R., Seppänen O., Priven V. & Savosnick J. (2017). Construction flow index: a metric of production flow quality in construction. Construction Management and Economics, 35:1–2, s. 45–63.

Seppänen, O., Lehtovaara J., Uusitalo P., Lappalainen E. (2020). Building 2030 - Hukan mittaaminen suunnittelussa ja tuotannossa loppuraportti. Saatavissa: [https://www.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2020-06/Hukka-suunnittelussa-ja-tuotannossa-loppuraportti-22-06-2020\\_0.pdf](https://www.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2020-06/Hukka-suunnittelussa-ja-tuotannossa-loppuraportti-22-06-2020_0.pdf)

SFS-EN ISO 9000:2015. (2015). Laadunhallintajärjestelmät. Perusteet ja sanasto.

Sivula, J. (2020). Tahtiaikatuotannon hyödyntäminen rakennustyömaalla. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta. Tampere. 85 s.

Six Sigma (11.5.2021). Littlen laki. Verkkosivu. Saatavissa: <http://www.sixsigma.fi/index.php/fi/lean/littlen-laki/>

Vanhamäki, S. (2020). Putkiremonttien viivästymisten syiden tutkiminen tilastollisella data-analyysillä - Case: Fira Group Oy Pro. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta. Tampere. 53 s.

Vatne, E.M. & Drevland, F. (2016). Practical Benefits of Using Takt Time Planning: a Case Study. Proc. 24th Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction, Boston, MA, USA, sect.6 s. 173–182. Saatavissa: IGLC.net

Voehl, F., Harrington, J., Mignosa, C., Charron, R. (2013). The Lean Six Sigma Black Belt Handbook. Boca Raton, FL: CRC Press. 558 s.

Ward, S. & McElwee, W. (2007). Application of the Principle of Batch Size Reduction in Construction. Pasquire, C.L, C. L. & Tzortzopoulos, P., 15th Annual Conference of the

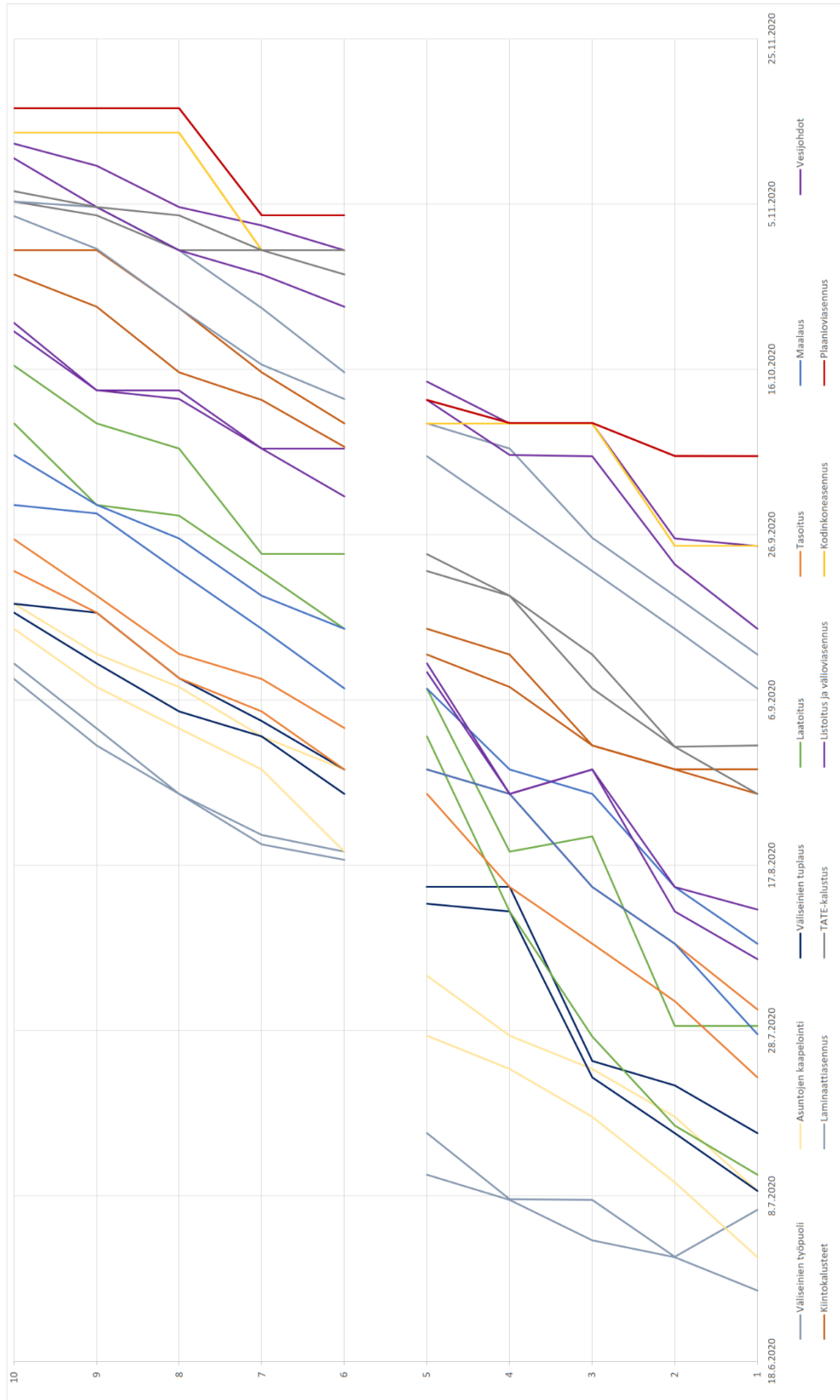
International Group for Lean Construction. East Lansing, Michigan, USA, 18–20 Jul 2007. s. 539–548. Saatavissa: IGLC.net

Örmä, M. (2019). Improving takt production's management of subcontracted labour through the methods of knowledge management. Diplomityö. Tampereen yliopisto, Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta. Tampere. 67 s.

## LIITE 1: TEEMAHAASTATELUN KYSYMYSRUNKO

1. Mitkä tekijät edistivät kohteen sisävalmistusvaiheen onnistumista?
2. Kuvaile, mitä digitaalisia työkaluja oli käytössäsi työmaalla
  - Miten käytit työkaluja?
  - Toimivatko työkalut hyvin keskenään?
  - Ketkä kaikki käyttivät työkaluja?
3. Miten aikatauluseurantaa toteutettiin viikkotasolla?
  - Miten valvoit aikataulussa pysymistä?
  - Seurasitko oman aikataulusi PPC:tä?
  - Miten kirjasit töiden edistymistä?
  - Kuinka usein päivitit vastuullasi olevaa aikataulua?
  - Miten sait tietää jonkun työvaiheen valmistuneen?
  - Kirjasitko arvioimalla?
  - Mikä motivoi tekemään kirjauksia?
  - Koitko, että Sitedriven aikatauluesitys oli selkeä?
4. Oliko digitaalisilla työkaluilla millainen osuus työmaan onnistumisessa?
5. Oliko työmaaohjaamosta hyötyä seurannassa?
6. Mitä digitaalisia työkaluja toivoisit seuraavalle työmaalle?

# LIITE 2: SISÄVALMISTUSVAIHEEN TOTEUTUNUT AIKATAULU



## LIITE 3: SISÄVALMISTUSVAIHEEN TYÖVAIHEKOHTAISET TUNNUSLUVUT

<b>VS työpuoli + tuplaus ja alakatot</b>			
Jaksoaika B	4,0	Jaksoajan vaihtelu B	13,2
Jaksoaika A	3,6	Jaksoajan vaihtelu A	0,5
Muutos B-A	-9,1 %	Muutos B-A	-2358,4 %
Keskiarvo	3,8	Keskiarvo	6,9

<b>Asuntojen kaapelointi</b>			
Jaksoaika B	6,8	Jaksoajan vaihtelu B	2,3
Jaksoaika A	6,0	Jaksoajan vaihtelu A	6,0
Muutos B-A	-13,6 %	Muutos B-A	62,0 %
Keskiarvo	6,4	Keskiarvo	4,2

<b>Laatoitus</b>			
Jaksoaika B	11,8	Jaksoajan vaihtelu B	43,9
Jaksoaika A	6,4	Jaksoajan vaihtelu A	8,3
Muutos B-A	-84,6 %	Muutos B-A	-430,4 %
Keskiarvo	9,1	Keskiarvo	26,1

<b>Tasoitus + maalaus</b>			
Jaksoaika B	7,9	Jaksoajan vaihtelu B	8,4
Jaksoaika A	5,6	Jaksoajan vaihtelu A	2,7
Muutos B-A	-40,9 %	Muutos B-A	-208,7 %
Keskiarvo	6,8	Keskiarvo	5,6

<b>Vesijohdot</b>			
Jaksoaika B	7,2	Jaksoajan vaihtelu B	5,2
Jaksoaika A	4,2	Jaksoajan vaihtelu A	4,7
Muutos B-A	-70,3 %	Muutos B-A	-11,0 %
Keskiarvo	5,7	Keskiarvo	4,9

<b>Kalusteet</b>			
Jaksoaika B	4,0	Jaksoajan vaihtelu B	2,8
Jaksoaika A	4,8	Jaksoajan vaihtelu A	4,5
Muutos B-A	16,0 %	Muutos B-A	38,3 %
Keskiarvo	4,4	Keskiarvo	3,6

<b>TATE-kalustus</b>			
Jaksoaika B	5,8	Jaksoajan vaihtelu B	5,3
Jaksoaika A	2,0	Jaksoajan vaihtelu A	2,3
Muutos B-A	-188,1 %	Muutos B-A	-134,0 %
Keskiarvo	3,9	Keskiarvo	3,8



**Laminaatti**

Jaksoaika B	6,4	Jaksoajan vaihtelu B	2,4
Jaksoaika A	4,8	Jaksoajan vaihtelu A	4,1
Muutos B-A	-34,3 %	Muutos B-A	43,2 %
Keskiarvo	5,6	Keskiarvo	3,2

**Listoitus ja oviasennus**

Jaksoaika B	6,0	Jaksoajan vaihtelu B	7,6
Jaksoaika A	3,9	Jaksoajan vaihtelu A	2,9
Muutos B-A	-51,8 %	Muutos B-A	-162,0 %
Keskiarvo	5,0	Keskiarvo	5,3

**Kodinkonekytkentä**

Jaksoaika B	3,0	Jaksoajan vaihtelu B	0,0
Jaksoaika A	2,8	Jaksoajan vaihtelu A	0,0
Muutos B-A	-4,3 %	Muutos B-A	0,0 %
Keskiarvo	2,9	Keskiarvo	0,0

**Lukitus ja heloitus**

Jaksoaika B	1,6	Jaksoajan vaihtelu B	0,3
Jaksoaika A	3,2	Jaksoajan vaihtelu A	0,0
Muutos B-A	50,2 %	Muutos B-A	0,0 %
Keskiarvo	2,4	Keskiarvo	0,2