



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JOONAS JUVONEN
LÄPIMENON MITTAUS JA KEHITTÄMINEN OPERAATIOTIETEEN
KEINOIN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Minna Lanz
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
28. helmikuuta 2018

TIIVISTELMÄ

JOONAS JUVONEN: Läpimenon mittaus ja kehittäminen operaatiotieteen keinoin

Diplomityö, 85 sivua, 2 liitesivua

Toukokuu 2018

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tuotantotekniikka ja Automaatio

Tarkastaja: professori Minna Lanz

Avainsanat: operaatiotiede, tehdasfysiikka, läpimeno, tilastollinen prosessiohjaus, laatutekniikka, mittaustekniikka

Diplomityön tavoitteena oli todentaa kohdeyrityksen tuotannon mittauksen nykytaso, sekä sen sisältämät haasteet ja mahdollisuudet. Mittauksen tarkastelulla ja kehittämisellä pyritään tukemaan kohdeyrityksen tuotannon kapasiteetin mitoittamista, ohjausta ja kehitystoimenpiteiden kohdentamista luomalla totuudenmukainen arviointityökalu operatiivisesta toiminnasta. Tutkimuksessa tarkasteltiin nykyisiä mittausten menetelmiä sekä keskeisiä mittauksen kehityskohteita teoreettisen tutkimuspohjan ohjaamana. Toteutetun mittausanalyysin avulla arvioitiin tuotannon nykyistä toimintaa sekä toimenpiteitä yrityksen mittausjärjestelmän kehittämiseksi tasolle, jossa sitä voidaan hyödyntää operatiivisen kannattavuuden edistämiseksi.

Toteutettua tuotannonkehitysprojektia pohjustettiin teoriapohjan rakentamisella. Operaatiotieteen ja laatutekniikan keskeisten oppien hyödyntäminen mahdollistivat kenttämittauksen toteutuksen. Määrällisiin tutkimusmenetelmiin keskittyvä diplomityö pyrki luomaan objektiivisen kuvan tuotannon mittauksen tasosta käyttäen hyödyksi mittauksista saatuja tuloksia sekä tilastolliseen prosessiohjaukseen perustuvaa analyysia. Tuotantovirtauksen ympärille keskittyvä teoria tuki mittaus tulosten analyysia todentamalla tuotannon keskeisten suorituskykyparametrien välisiä riippuvuussuhteita ja kerrannaisvaikutuksia. Näiden ilmiöiden ymmärrys ja niiden koulutus tuotannon organisaatiolle kuului myös tämän työn tavoitteisiin.

Teoreettisen pohjan ja tuotantotuntemuksen perusteella toteutetut suorituskyky mittaukset pyrkivät todentamaan tuotannon nykyistä toiminnan tasoa, sekä itse mittauksen luotettavuutta. Mittaustarkkuudessa havaittiin useita kehityskohteita. Näihin haasteisiin vastataan diplomityössä sekä projektin toimeenpanon aikana toteutettujen kehitystoimenpiteiden sekä kehityssuunnitelman avulla. Tietojärjestelmät ja toimintamallien kehittäminen ovat keskeisessä roolissa luotettavaa operatiivista tietolähdettä rakennettaessa. Mittaus-tietojen pohjalta tehty ja teorian tukema analyysi edisti mittauksen tarjoamien tuotannon-kehitysmahdollisuuksien kartoitusta ja ymmärrystä. Diplomityön toteutuksen seurauksena kohdeyrityksessä on käynnistetty myös laajempia tuotannonkehitysprojekteja.

ABSTRACT

JOONAS JUVONEN: Measurement and development of throughput by the means of operational science

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 85 pages, 2 Appendix pages

May 2018

Master's Degree Programme in Machine Engineering

Major: Production engineering and automation

Examiner: Associate Professor Minna Lanz

Keywords: operational science, factory physics, throughput, statistical process control, quality science, measurement science

The main goal of this master's thesis was to measure the current level and to develop the production's measurement system of the target company. Master's thesis aimed to increase the understanding of industrial dynamics regarding control and development of production. This success is supported by the understanding of how production systems are operated. The goal of this research was to study the current measurement methods of production and to find out meaningful ways to develop production. Master's thesis carried out field measurements, which led to the evaluation of current operations and to the introduction of improvement ideas for the benefit of the company's operational measurement system and overall profitability.

The thesis project was based on a conclusive theory foundation. Operational science and quality science were the key supporters of successful measurement pilot. The project was based on a quantitative method aimed to create an objective summary from the current level of production data analytics. This aim was supported by the understanding of the theoretical concept and the use of statistical process control analysis. These methods were used to understand the interactions and correlations of different production elements. Education of the theory and the general production dynamics were also in the scope of this master's thesis.

Theoretical assets and production knowledge assisted the execution of capability measurements of the production system. These measurements were aiming to define the current performance level and the reliability of the taken measurements. The analysis concluded from measured production data, that the measurement system has several possibilities for development. With the mandate from measuring research, a few improvement actions were taken in order to improve the production systems capability for real-time performance measurement. Both IT-systems and production development have important role in the measuring development. The support of measurement analysis has increased the understanding of production system dynamics and measurement possibilities in the management of operations. As a result of this thesis, the company has commenced an investment plan in order to achieve an improvement in production performance.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on toteutettu perinteisen metalliteollisuudessa toimivan kohdeyrityksen tarpeisiin. Työn toteutuksessa suureksi avuksi muodostui operatiivisesta johdosta koostuva ohjausryhmä. Ohjausryhmän lisäksi päivittäisessä työskentelyssä suureksi avuksi ovat olleet mahtavat työkaverit. Laatuyksikön vankkumaton tuki ja yrityksen lämmin sekä positiivinen työskentelyilmapiiri ovat kiinnipitämisen arvoisia asioita.

Yrityksen lisäksi työn edistymistä on tukenut työn tarkastaja professori Minna Lanz, joka on auttanut työn ohjauksessa ja kannustanut työn toteutuksessa kokonaisvaltaisen diplomityön rakentamiseen. Työn ammattimainen ohjaus mahdollisti työn tehokkaan toteutuksen ja valmistumisen alle tavoiteajan.

Tampereella, 19.5.2018

Joonas Juvonen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen lähtökohdat.....	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet.....	2
1.3	Tutkimusmenetelmät.....	3
2.	TEOREETTINEN VIITEKEHYS	6
2.1	Operaatiotiede	6
2.1.1	Operaatiotiede osana liiketoimintastrategiaa	6
2.1.2	Tuotantokapasiteetin ja -puskurien mitoitus	9
2.1.3	Tuotannonohjaus	17
2.1.4	Vaihtelu.....	22
2.2	Laatutekniikka.....	26
2.2.1	Laadun kokonaisvaltainen johtaminen.....	27
2.2.2	Laadun kustannukset.....	29
2.2.3	Tilastollinen prosessiohjaus	31
2.3	Muutosjohtaminen.....	38
3.	MITTAUKSEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS.....	41
3.1	Mittauksien toteutus	42
3.2	Tuotannon nykytila	45
3.3	Muutosjohtamisen soveltaminen mittaukseen	46
3.4	Mittauksen tulokset	48
3.5	Mittaustulosten tilastollinen analyysi.....	53
4.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	62
4.1	Mittauksen luotettavuuden analyysi.....	62
4.2	Mittaustulosten analyysi.....	64
5.	TUOTANNON KEHITTÄMINEN	67
5.1	Toimenpide-ehdotukset.....	67
5.1.1	Mittauksen kehittäminen näkyvyyden parantamiseksi	68
5.1.2	Operatiivisen kannattavuuden edistäminen	74
5.2	Tutkimuksen kriittinen arviointi.....	76
	LÄHTEET.....	80

LIITE A: KENTTÄMITTAUKSIEN TOTEUTUKSEEN KÄYTETTY PROSESSIAI-KATAULUKKO

LIITE B: TOIMENPIDE-EHDOTUSTEN VAIHEKOHTAINEN TOTEUTUSUUNNITELMA

KUVALUETTELO

- Kuva 1. Asiakasarvon perusteella valittu tuotantostrategia määrittää yrityksen toimintamallin. Nopea vasteaika, korkea laatu, monipuolinen tuoteportfolio ja alhaiset yksikkökustannukset ovat toistensa kanssa ristiriitaisia tavoitteita (Hopp & Spearman 2011, s. 207). 8*
- Kuva 2. Yrityksen on valittava tuotantopuskurien painotus yhtiön strategian perusteella. Tuotantoprosessin korkealla suorituskyvyllä eli matalan vaihtelun tasolla voidaan parantaa minkä tahansa liiketoimintastrategian kilpailukykyä eli yrityksen kannattavuutta (perustuu lähteeseen Hopp & Spearman 2011, s.208–215). 9*
- Kuva 3. Kriittisen keskeneräisen tuotannon merkitystä havainnollistavassa esimerkissä jaksoaika alkaa kasvaa maksimiläpimenon saavuttamisen jälkeen keskeneräisen tuotannon tason noustessa (perustuu lähteeseen Hopp & Spearman 2011, s. 227-240). 15*
- Kuva 4. Operatiivisen toiminnan tulosten vertailu laskennallisiin maksimiarvoihin nähden kertoo nykyisen tuotannon suorituskyvystä. Sopivana keskeneräisen tuotannon määränä pidetään aluetta, jossa käytännön läpimenon kasvu heikkenee keskeneräisen tuotannon suhteen jaksoajan pysyessä maltillisena (perustuu lähteeseen Pound 2017). 17*
- Kuva 5. Imuohjatut järjestelmät rajoittavat luonnostaan WIP:n määrää, kun taas työntöohjatut järjestelmät ovat riippuvaisia jatkuvasta tilausten hallinnasta (Perustuu lähteisiin: Spearman & Zazanis 1992; Hopp & Spearman 2011, s.155–175, 356-379). 19*
- Kuva 6. CONWIP-ohjaus kykenee optimoimaan taloudellista kannattavuutta laajalla 40-160% alueella. Vastaavasti työntöohjatut tuotantojärjestelmät kykenevät korkeaan kannattavuuteen vain kapealla 90-110% alueella suhteessa optimaaliseen WIP:n määrään (Perustuu lähteeseen Hopp & Spearman 2011, s. 372; Spearman & Zazanis 1992; Jensen 2011)). 21*
- Kuva 7. Variaatiokertoimen tulkinta operaatiotieteessä (Hopp & Spearman 2011, s. 269) 23*
- Kuva 8. Variaatiokertoimella on merkittävä vaikutus tuotannon läpimenoon ja asiakasvasteeseen. Tuotantoprosessin vaihtelun pienentäminen mahdollistaa käyttösuhteen noston (perustuu lähteeseen Hopp & Spearman 2011, s. 280–300) 23*
- Kuva 9. Komponenttien muodostaman systeemin edellyttämiin laatuvaatimuksiin ei voida vastata vain tarkkoja spesifikaatorajoja asettamalla, jos tavoitteena on systeemin todellisen suorituskyvyn saavuttaminen ja optimikannattavuus (Montgomery 2012; Wheeler & Chambers 2010, s. 144-150). 28*

<i>Kuva 10. Puutteellisen tuotelaadun aiheuttamat kustannukset kasvavat rajusti, jos puutetta ei huomata ennen asiakasrajapintaan siirtymistä (Deming 2000).....</i>	<i>30</i>
<i>Kuva 11. Laadun arvioitu vaikutus liikevaihtoon suhteutettuna (ASQ 2018; Deming 2000)</i>	<i>31</i>
<i>Kuva 12. ± 3 Sigman ohjausrajat tuotantoprosessille (Berardinelli 2018)</i>	<i>33</i>
<i>Kuva 13. Tilastollisen prosessiohjuksen ohjausrajat. Yksittäinen erityisyys näkyy ohjattavassa prosessissa piikkinä ja pysyvästi muuttunut erityisyys keskiarvon muutoksena (perustuu lähteeseen Hopp & Spearman 2011, s. 399-424; Wheeler & Chambers 2010; Montgomery 2012)</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 14. Tilastollisessa prosessiohjauksessa yleisesti esiintyviä mittausparametritrendejä. Trendeistä voidaan ennustaa prosessin tulevaa käyttäytymistä ja reagoida sen mukaan, jos prosessin arvot ylittävät ohjausrajat. Trendit tarjoavat myös kriittistä tietoa prosessin suorituskyvystä ja sen muutoksista (Amsden, Butler & Amsden 1998; Butler 2016).....</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 15. Kolmen keskihajonnan ohjausrajoilla määritetty todennäköisyys erilaisille tilastollisille jakaumille. Normaalijakauma on tilastollisista jakaumista yleisin, mutta myös eksponentiaali-jakaumaa esiintyy erityisesti aikapohjaisissa mittauksissa (Wheeler & Chambers 2010, s. 64).....</i>	<i>36</i>
<i>Kuva 16. Ylempi jakauma ja sitä avaava taulukko kertovat kuinka suuri osuus normaalijakautuneista arvoista osuu spesifikaatorajojen sisälle, kun rajat määritellään normaalijakauman keskihajontojen kertalukuina ja jakauma on keskitetty spesifikaatorajojen suhteen keskelle. Alemmassa jakaumassa ja sen tulkitsemiseen lasketussa taulukossa näkyy yleisesti käytetty stardardi poikkeuttaa normaalijakaumia $\pm 1,5$ keskihajontaa spesifikaatorajojen keskikohdasta. Näin saadaan mittausten luonnollista käyttäytymistä paremmin vastaava saantoprosentti, joka kertoo spesifikaatorajojen käyttäytymisestä mitta-arvojen jakauman suhteen (Perustuu lähteeseen Montgomery 2012)</i>	<i>37</i>
<i>Kuva 17. Mittaus toteutettiin osakokoonpanossa, joka on pieniin ja nopeisiin koneikkokokoonpanoihin keskittyvä tuotantosolu. Osakokoonpanolle löytyy runsaasti rinnakkaisia työvaiheita ennen tuotteiden lopullista kokoonpanoa.</i>	<i>43</i>
<i>Kuva 18. Mittausprojektia edeltäneet prosessiajat tuotantosolussa.....</i>	<i>45</i>
<i>Kuva 19. Sähköisen ja käsin mitattujen töiden prosessiajan erotus.....</i>	<i>50</i>
<i>Kuva 20. Sähköisesti mitattu prosessiaika kuvaa sitä käytettävissä olevaa työaikaa mitä kyseinen työ käyttää työvaiheen läpikäymiseen tuotantosolussa.....</i>	<i>51</i>

<i>Kuva 21. Tuotannon läpimeno, sisäänvirtaus ja keskeneräinen tuotanto tarkastelujaksona.....</i>	<i>52</i>
<i>Kuva 22. Mittattujen töiden perusteella voidaan laskea keskiarvo, keskihajonta ja variaatiokerroin.....</i>	<i>53</i>
<i>Kuva 23. Mittaustapojen välistä erotusta mittaava eksponentiaalijakauma suppenee nopeasti kohti nolla, joka kertoo, että merkittävä osa mitta-arvoista saa yhtenevän arvon molemmilla mittaustavoilla.</i>	<i>54</i>
<i>Kuva 24. Töiden prosessiajassa on enemmän hajontaa. Suurempi hajonta kertoo tuotantosolun kokemasta vaihtelevasta työkuormasta.</i>	<i>54</i>
<i>Kuva 25. Mittaustapojen välinen erotus prosessiajassa kertoo selkeästi virheellisen automaattileimauksen aiheuttamista merkittävistä mittausvirheistä.</i>	<i>55</i>
<i>Kuva 26. Erityisyyt heikentävät merkittävästi sähköisen ja käsin toteutetun mittauksen yhdenmukaisuutta. Samalla myös sähköisen mittauksen luotettavuutta on arvioitava kriittisesti.</i>	<i>56</i>
<i>Kuva 27. Yli 90% mitta-arvoista sisältää ohjausrajan alittavan mittausvirheen. Noin kolmasosa kaikista mittausarvoista sisälsi nollavirheen suhteessa käsimittauksiin.....</i>	<i>57</i>
<i>Kuva 28. Prosessiaikaa mitattaessa samat neljä suurta leimausvirhettä nousevat esiin suuresti vääristyneellä prosessiajalla.....</i>	<i>58</i>
<i>Kuva 29. Kun prosessiajan mittauksesta poistetaan automaattileimausvirheet esiin nousevat työt, joiden tekemisessä on esiintynyt erityisyyttä.....</i>	<i>59</i>
<i>Kuva 30. Kun prosessiajan mittaustuloksista suodatetaan suurimmat erityisyyden sisältävät prosessiajat, nähdään selkeämmin, että osakokoonpanon jaksoaika on merkittävältä osin 1-2 työvuoron mittainen.</i>	<i>60</i>
<i>Kuva 31. Mittausprojektin vaikutus tuotantosolun prosessiaikoihin.</i>	<i>65</i>
<i>Kuva 32. Keskeiset vaatimukset luotettavan ja tarkan mittausjärjestelmän rakentamiseksi. Liitteenä B koko mittauksen vaihekohtainen projektijaottelu. Liite B tarjoaa samalla yksityiskohtaisen vaihemallin kolmannen tutkimuskysymyksen keskeisistä virstanpylväistä.....</i>	<i>69</i>
<i>Kuva 33. Toimintaohjeiden mukainen ja tuotannon kokonaisvaltaista mittausta tukeva prosessimalli tuotantosolun työvaiheista mittauksen ja materiaalivirtauksen näkökulmasta. Suorakulmiot edustavat ihmisten tekemiä prosessivaiheita ja lieriöt tietojärjestelmien tekemiä suoritteita.</i>	<i>70</i>
<i>Kuva 34. Mittauksen kehitystoimenpiteiden aikataulu ja kustannusarvio.</i>	<i>73</i>
<i>Kuva 35. Mittauksen kehittäminen toiminnan kannalta riittävälle tasolle mahdollistaa varsinaisten tuotannonkehitystoimenpiteiden käyttöönoton. Mittauksen avulla voidaan kehittää sekä tuotannon kustannustehokkuutta että edistää liikevaihdon hallittua muutosta.</i>	<i>75</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

<i>CONWIP</i>	Constant Work In Progress eli rajoitettu tasainen keskeneräisen tuotannon taso.
<i>CT</i>	Cycle Time eli jaksoaika. Se keskimääräinen aika joka kuluu prosessilta aloittamisesta prosessin vaiheiden loppuun.
<i>DMAIC</i>	Define, Measure, Analyze, Improve, Control eli liiketoiminnan ongelman ratkaisuun tarkoitettu menetelmä, jossa kokonaisvaltaisella analyysillä syvennyttään ongelman syihin ja rajauksen avulla ratkaistaan ongelman keskeiset vaikuttavat tekijät.
<i>DOE</i>	Design of Experiments eli koesuunnittelun ideana on oppia systeemin toiminnasta muuttamalla siihen vaikuttavien syötteiden arvoja. Tällä kokeellisella menetelmällä pyritään tunnistamaan sekä yksittäisen että usean muuttujan keskinäisvaikutuksia systeemin toimintaan.
<i>MRP</i>	Material Resource Planning eli tuotannon materiaalivirtojen hallintaan keskittyvä tietojärjestelmä. Nykyiset toiminnanohjausjärjestelmät sisältävät yleensä oman MRP-moduulin.
<i>MTS</i>	Make To Stock eli tuotantostrategia, missä asiakaskysynnässä aiheutuvaa vaihtelua pyritään tasaamaan valmistamalla tuotteita valmiiksi varastoon. Näin toimimalla yritys voi reagoida nopeasti asiakastilauksiin ja toimittaa tuotteet suoraan varastosta ilman tuotannon vastaajan huomiointia.
<i>ROP</i>	Reorder Point eli uudelleentilauspiste, jonka alle tippuva varastosaldo laukaisee ostohälytyksen osien tai tuotteiden uuden tilauksen toteuttamiseksi.
<i>SPC</i>	Statistical Process Control eli tilastollisiin metodeihin perustuva prosessin ohjaus. SPC:lle tunnusomaista on tilastotiedosta laskettavat ohjausrajat, jotka toimivat mitattavan tiedon ohjaamisen hälytysrajoina ja ilmentävät samalla prosessin kyvykkyyttä.
<i>TCO</i>	Total Cost of Ownership eli tuotannon tekijään tai tuotteeseen liittyvä kokonaiskustannuskäsite. Kokonaiskustannuksia arvioitaessa on tyypillistä, että pelkkä hankintahinta ei kerro vertailtavien toimintatapojen kokonaiskustannuksia. TCO on pyrkinyt palauttamaan liiketoimintaan pidemmän aikavälin toimintamalleja, joissa harkitaan hankintoihin liittyviä ominaisuuksia ja riskejä kokonaisuuksina eikä

vain valita automaattisesti edullisinta tarjousta ilman sen kokonaisvaikutusten arviointia. Kokonaiskustannuksia tarkasteltaessa kehittyneet organisaatiot osaavat huomioida myös kerrannaisvaikutukset, heijastevaikutukset, riskienhallinnan näkökulman ja psykologiset vaikutukset.

<i>TH</i>	Throughput eli läpimeno tai tuotannon volyyymi eli kappalemäärä keskimäärin tiettyä aikayksikkö kohden.
<i>TPS</i>	Toyota Production System eli Toyotan kehittämä kokonaisvaltainen tuotantofilosofia, jonka keskeisinä periaatteina on asiakasarvoon perustuen poistaa tuotantoprosessista kaikki hukka tuotantovirtauksen parantamiseksi. Imuohjatulla tuotantokoneistolla pyritään kohti yksiosaista tuotantovirtausta jota leimaa jatkuva toiminnan kehittäminen nopeutta ja tuotannon joustavuutta unohtamatta. TPS:n toimintatapoja opiskelleet länsimaalaiset oppineet kehittivät mallille myös nimen Lean.
<i>WIP</i>	Work In Progress eli keskeneräisen tuotanto. Suomessa käytetään yleisesti myös lyhennettä KET.
<i>A</i>	Availability eli käytettävyys. Tuotantoprosessin käytettävyyden suhde voidaan määrittää vikaantumisfrekvenssin ja keskimääräisten korjausaikojen avulla.
m_f	Mean time to failure eli keskimääräinen vikaantumistiheys.
m_r	Mean time to repair eli keskimääräinen vian korjausaika.
r_b	Bottleneck Rate eli pullonkaulan keskimääräinen läpimeno aikayksikköä kohden.
T_0	Tuotannon raakaprosessiaika eli työn valmistumiseen tarvittava keskiarvoinen prosessointiaika silloin kun työ ei joudu jonottamaan muiden töiden valmistumista tuotantolinjan missään vaiheessa.
u	Utilization Rate eli käyttösuhte. Käyttösuhteella tarkoitetaan saapuvien töiden nopeutta suhteessa prosessointinopeuteen tai saapumisaajan suhdetta prosessiaikaan.
W_0	Critical Work In Progress eli keskeneräisen tuotannon kriittinen määrä, jonka jälkeen saavutetaan optimiläpimeno minimi jaksoajalla ilman vaihtelun huomiointia.

1. JOHDANTO

Tämä tutkimus toteutettiin raskaassa teollisuudessa toimivan kohdeyrityksen tarpeisiin. Diplomityön tavoitteena on kehittää kohdeyrityksen operatiivisen toiminnan mittausta. Tuotannon mittausta halutaan kehittää, koska sillä on merkittäviä vaikutuksia yrityksen resurssien kohdentamiseen ja operatiivisen toiminnan päätöksiin. Mittauksen kehittäminen mahdollistaa liiketoiminnan rajallisten resurssien tehokkaamman kohdentamisen vaikuttavuuden parantamiseksi. Tuotannon kehittämiseen tähtäävä tutkimus pyrkii parantamaan yrityksen tuotannon toimivuutta. Tutkimus pyrkii teoriaosuuden ja käytännön mittauksien avulla tukemaan luotettavaa tuotannon mittausta ja pitkäjänteistä tuotannon kehitystä.

1.1 Tutkimuksen lähtökohdat

Suomen hyvinvointi ja vauraus ovat jo vuosikymmeniä pohjautuneet valtiomme vahvaan vientiin ja positiiviseen kauppataaseeseen. Suomen viennin kivijalkoja ovat olleet paperi ja selluteollisuus sekä vahva konepajateollisuus (Korkman 2015, s. 125). 2008 alkanut finanssikriisi yhdistettynä euroalueen taloudelliseen ja poliittiseen epävakauteen syöksivät Suomen Euroopan mukana 8 vuotta kestäneeseen taloudelliseen taantumaan. Taloudellinen taantuma vaihtui talouskasvuun vasta vuonna 2016, jolloin Suomen BKT kasvoi 1,9% (Tilastokeskus 2017). Taloudellisen hiljaiselon ja liikevaihdon laskun aikana kansainvälisten yritysten kannattavuus ja omistaja-arvon luonti on perustunut pitkälti kulujen karsimiseen esimerkiksi tuotantokapasiteettia supistamalla (Sjåholm & Foss 2014).

Taloudellisen nousun nopeutuessa 2016 ja 2017 suomalainen teollisuus on useasti uusi-soinut laman aikana pienennetyn kapasiteettinsa olevan jo laajasti käytössä. Asia käy ilmi myös teknologiateollisuuden teettämästä selvityksestä, joka kertoo sekä rekrytointien että investointien kasvaneen vuonna 2017 ennustettua nopeammin (Teknologiateollisuus 2017). Teknologiateollisuuden selvityksestä käy myös ilmi, että Suomen kasvun veturina toimii IMF:n arvioima maailmantalouden vireän 3,6% talouskasvun mukana noussut vientiteollisuus. Selvityksen perinpohjainen tarkastelu vahvistaa myös sen, että Suomen taloudellinen kasvu on alkanut merkittävästi muita kehittyneitä talouksia jäljessä ja on siksi haavoittuvaisempi riittämättömän kapasiteetin ongelmille.

Korkean tilauskannan aiheuttamiin positiivisiin haasteisiin on havahduttu myös tämän diplomityön konepajateollisuudessa toimivassa kohdeyrityksessä. Maailmantalouden reipastunut kasvu on nopeuttanut rakentamista ja investointeja, mikä on heijastunut kohdeyrityksen asiakkaina toimivien kansainvälisten suuryritysten liiketoimintaan kysynnän kasvuna. Kysynnän kasvu ja investointipatoutumien purkautuminen on realisoitunut

kasvaneina laitetoimituksina, mikä on vaikuttanut merkittävältä osin kohdeyrityksen liikevaihdon ja tilauskannan äkilliseen kasvuun. Nopeaa liikevaihdon kasvua on seurannut alihankkijoiden ja oman tuotantokapasiteetin nopea käyttöasteen kasvu. Tämä diplomityö pyrkiikin kehittämään kohdeyrityksen tuotannon läpimenon mittausta ja siten edesauttamaan tuotannon pyrkimyksiä suurempaan läpimenoon ja entistä parempaan toimitusvarmuuteen.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen varsinainen rakenne koostuu neljästä osiosta. Ensimmäisessä kokonaisuudessa käydään läpi tutkimuksen toteutukseen vaikuttavat teoriat. Teorian ymmärrystä hyödynnetään työn soveltavassa vaiheessa, jossa mitataan tuotannon toimintaa. Tuotannon mittaukset suoritetaan sekä käsin täytettävillä lomakkeilla että sähköisellä kuittauksella ERP-järjestelmästä. Näin saatuja mittaustietoja voidaan analysoida työn kolmannessa osuudessa. Analyysin perusteella pyritään ratkaisemaan tutkimuksen alussa esitetyt tutkimuskysymykset ja analyysin toivotaan tarjoavan myös muuta lisäarvoa yrityksen päivittäisessä toiminnassa. Lopuksi tutkimuksessa määritetään toteutetun analyysin perusteella tutkimuksen keskeiset toimenpide-ehdotukset.

Tutkimuksen lähtökohtana voidaan pitää kohdeyrityksen tavoitetta parantaa tuotannon suoritusparametreja siten, että se kykenisi vastaamaan paremmin kasvaneisiin asiakastarpeisiin. Oman haasteensa asiakastarpeisiin vastaamiseen tuo kohdeyrityksen laaja tuoteportfolio, jossa korostuvat korkean teknologian hyödyntäminen ja asiakaskohtainen räätälöinti. Nämä tekijät tekevät tuotannon vaatimusten ennakoimisesta haasteellista ja heikentävät siten mahdollisuutta harjoittaa MTS-tuotantoa (Make To Stock) laajamittaisena tuotantostrategiana. Tällöin toteutuskelpoiseksi vaihtoehdoksi jää tuotannon suorituskyvyn eli läpimenon (Throughput) ja jaksoajan (Cycle Time) kehittäminen. Kohdeyritys on kiinnostunut kehittämään nykyistä toteuman seurantaan tarkemman läpimenon mittaussjärjestelmän.

Huomattavaa on, että kohdeyrityksellä ei ole luotettavaksi arvioitua kokonaisvaltaista tuotannonmittausjärjestelmää, jonka avulla voitaisiin mitata tarkasti tuotannon ohjaus- ja kehitystoimenpiteiden vaikuttavuutta operatiiviseen toimintaan. Mittauksessa on puutteita myös suorituskyvyn mittauksen kannalta, koska tällä hetkellä tuotannon läpimenoa kyetään mittaamaan vain jälkijättöisesti toimitettujen tuotteiden laskennalla. Suorituskyvyn mittausta on siis liian hidasta eikä sen yksityiskohtaisesta luotettavuudesta ole arvioita. Tutkimuksen toteutuksessa tavoitellaan siis sekä nykyisen osittaisen sähköisen mittaussjärjestelmän luotettavuuden arviointia että mittaussjärjestelmän kehitystoimenpiteitä. Nykyisen mittaussjärjestelmän taso on määriteltävä, jotta mittausta ja tuotannonkehitystä kokonaisuutena voidaan edes arvioida.

Nykyinen järjestelmä sisältää useita puutteita käytettävyyden ja luotettavuuden osalta, ja näihin haasteisiin pyritään vastaamaan tällä tutkimuksella. Nykyinen ERP-järjestelmään

pohjautuva mittaus ei ole riittävän tarkka kohdeyrityksen tarpeisin. Tuotannon hienokuorituksen kannalta on oleellista, että mittaustieto on saatavissa vähintään tuntien tarkkuudella ja nykyinen mittaustarkkuus on päivissä. Päivien tarkkuudessa ovat myös töiden suunniteltu tuotanto-ohjelma. Tämä tekee pienien töiden toteutuman vertailun mahdolliseksi suunniteltuun aikaan nähden. Kohdeyrityksessä myös koetaan, että ERP-järjestelmään kirjautuvat prosessiajat eivät aina ole totuudenmukaisia ja tämä saattaa vääristää sähköisen mittauksen tuloksia. Näin ollen, tarkkuus, luotettavuus ja käytettävyys ovat ensisijaisia prioriteetteja mittausjärjestelmää tarkasteltaessa.

Kokonaisuuden näkökulmasta tämän tutkimuksen tarkoituksena on toimia alustavana projektina tuotannon kehittämiseksi ja mahdollistaaärkevien kehityskohteiden löytämisen. Suuremmassa mittakaavassa tuotannon mittauksella tavoitellaan tuotannon kokonaisvaltaisempaa optimointia, jossa kohdeyritys kykenee vastaamaan asiakaskysyntään nopeasti ja kustannustehokkaasti. Yllä mainittujen tavoitteiden ja lähtökohtien perusteella on luotu seuraavat tutkimuskysymykset:

1. Voidaanko kohdeyrityksen nykyistä mitattua tuotantotietoa pitää luotettavana?
2. Miten voidaan kehittää läpimenon luotettavaa ja reaaliaikaista mittausta?
3. Miten mittausjärjestelmää voitaisiin kehittää kohti tarkkaa ja kokonaisvaltaista tuotannonmittausta, joka tarjoaa päätöksentekoa tukevaa tietoa toiminnan reaaliaikaisesta tilasta?
4. Miten kohdeyritys kykenee hyödyntämään tutkimuksen kohteena olevaa mittausjärjestelmää operatiivisen kannattavuuden edistämiseksi?

Tutkimuksessa toteutettavassa pilotoinnissa on tarkoitus hahmottaa mittauksen mittaus-tulosten lisäksi käytännön toteutuksen haasteita. Haasteet voivat olla esimerkiksi toimintatapoihin liittyviä tai nykyisiin järjestelmiin liittyviä puutteita. Mittaus tukee näiden haasteiden ratkaisemista todentamalla puutteiden vaikutuksen tuotannon toimintaan sekä löytämällä näin tuottavuuden kasvun mahdollistavia kehityskohteita. Mittauksella voidaan luoda kokonaiskuva tuotannotoiminnasta ja siten hahmottaa esimerkiksi mitkä ovat tuotannon toiminnan pullonkauloja ja miten läpivirtaus toimii kohdeyrityksen toiminnassa. Nämä tavoitteet ovat edellyttävät kuitenkin luotettavaa tuotannonmittausta läpi tuotantojärjestelmän. Tämän vuoksi tässä tutkimuksessa tarkastellaan edellytyksiä kokonaisvaltaisen mittauksen toteutukselle.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Teollisuuden toimeksiantona tehtävä tutkimus toteutetaan sekä kirjallisuuskatsauksen että empiirisen tutkimuksen keinoin. Tutkimuksen strategiana on rakentaa vahva teoreettinen pohja kirjallisuuskatsauksella, minkä perusteella voidaan tarkastella tuotannon mittauksen tarkkuutta ja luotettavuutta sekä ymmärtää mittauksen rakentamisen taloudellisia ajureita. Käytettävät tutkimusmenetelmät ovat kvantitatiivisia eli määrällisiä tutkimusmenetelmiä ja niitä sovelletaan yhteen tuotantosoluun rajatussa tapaustutkimuksessa. Tutkimus

on rajattu yhteen tuotantosoluun, koska jo tutkimuksen toteuttamisella vaikutetaan yrityksen liiketoimintaan. Vaikutus näkyy erityisesti päivittäisessä toiminnassa, johon mittaus vaikuttaa lisäämällä asentajien tekemää paperityötä puolikonstruktoidun mittauslomakkeen muodossa.

Yhden tuotantosolun pilotoinnilla saadaan myös riittävää pohjatietoa mittauksen nykyisestä vaihtelun tasosta ja sen mahdollisista puutteista. Mittauspilotoinnilla varmistetaan myös käytettyjen mittausmenetelmien soveltuvuutta kohdeyrityksen tarpeisiin. Toteutettava kvantitatiivinen tutkimus keskittyy kokeellisten ja vertailevien tutkimusmenetelmien ympärille. Määrällistä dataa hyödynnetään yleisesti käytössä olevien tilastollisten analyysien avulla (Hirsjärvi, Remes & Sajavaara 2009, s. 152-165). Diplomityö pyrkii sekä vertailemaan uutta ja tähän asti kerättyä tietoa, että myös löytämään uusia näkökulmia erilaisilla mittaustekniikoilla.

Diplomityön toteutuksessa hyödynnettiin myös yrityksen aiempia mittaustuloksia sekä tuotekohtaisia kuormituslaskelmia. Yrityksen aiemman prosessitiedon perustella valittiin sopiva pilotointikohde, joka soveltuu tilastollisten menetelmien hyödyntämiseen. Tutkimuksessa hyödynnettiin runsaasti myös operaattoreiden henkilökohtaista ammattitaitoa. Ammattitaitoa hyödynnettiin esimerkiksi haastatteluiden muodossa, joissa käytiin läpi mittaustuloksissa esiintyneiden poikkeamien taustaa ja ratkaisumenetelmiä. Toimintatutkimuksena tutkimuksen alussa toteutetut haastattelut mahdollistivat diplomityön tarkan rajauksen ja tehokkaan aikataulun.

Tutkimuksen toteutuksessa korostui teollisessa tuotannossa toteutettavalle tutkimukselle tyypillinen reaktiivinen toimintatapa. Tutkimuksen edetessä havaittiin puutteita esimerkiksi yrityksen ohjeistuksessa ja toimintatavoissa, tähän reagoitiin lisäämällä henkilökunnan koulutusta ja yhtenäistämällä toimintatapoja. Tämä tutkimusmenetelmien ohjaava mutta dynaaminen toimintatapa kehittyi osaltaan tutkimuksen toteutuksen aikana, mikä on muutostohtamista sisältävissä kehitysprojekteissa tyypillistä (Hirsjärvi et al. 2009, s. 136-139; Mattila 2011). Mukautuvat toimintatavat mahdollistivat tutkimuksen vertailevan luonteen. Vertailevalle tutkimukselle on tyypillistä, että niissä arvioidaan sekä tutkimuksen lähtötilannetta että toteutuksen aikana sopeutettuja toimintatapoja (Alasuutari 1999, s. 87-98).

Tutkimuksen teoriaosuudella tuetaan soveltavassa osuudessa käytettyjä menetelmiä. Kirjallisuuteen ja vertaisarvioituihin tutkimuksiin perustuva teoriakokonaisuus pyrkii tarjoamaan kattavan pohjatiedon tutkimusongelmien ratkaisemiselle ja mittausasetelman kestävälle asettelulle (Bryman & Bell 2007, s. 90-97; Hirsjärvi et al. 2009). Teoriakokonaisuus valittiin kohdeyrityksen laatuorganisaation ammattitaidon perusteella painottaen diplomityön mittauksen lisäksi laatukuluttuurin keskeisiä perusteita ja yrityksen jatkuvan parantamisen toimintamalleja. Työn rajauksessa näkyy myös selkeästi kohdeyrityksen motiivi rakentaa pitkäjänteisesti laatuteknisiä valmiuksia metalliteollisuudessa toimimiseen.

Operatiivisen toiminnan tuloshakuisuuden vuoksi tutkimuksesta saatava tieto on pitkälti suorituskykyparametreihin perustuvaa tilastollista tietoa. Näiden toimeksiannon mukaisen rajausten perusteella määrälliset tutkimusmenetelmät ovat perusteltuja.

Tutkimuksessa kerätään mittausdataa sekä sähköisesti että käsin. Mittaustiedon keräämiseen eri lähteistä päädyttiin, koska se mahdollistaa tietolähteiden monipuolisemman arvioinnin, missä voidaan todentaa ja arvioida mittausapojen luotettavuutta. Aktiivisen tuotannonmittauksen luonteelle tunnusomaista on mittausdatan suuri määrä. Kvantitatiivisen mittauksen numeerisia tuloksia hyödynnetään tilastollisen prosessiohjauksen avulla. Näin pyritään tuottamaan tietoa muuttujien riippuvuussuhteista ja keskeisistä määrällisen tutkimuksen löydöksistä (Heikkilä 2004). Tutkimuksen tarpeet keskittyvät erityisesti tuotannon loppukokoonpanon ympärille, ja siksi myös tämän työn ohjausryhmään valitut henkilöt edustavat vahvasti operatiivista organisaatiota.

Tutkimuksen teoreettinen pohja pyrkii rakentamaan eheän teorian tuotannon suoritusparametrien dynamiikasta, tilastollisesta prosessin ohjauksesta ja mittaustulosten analysoinnista. Tämän lisäksi teoreettinen viitekehys pyrkii pohjustamaan matemaattisten menetelmien käyttöä ja linkittämään operaatiotieteen keskeisiä malleja niiden taustalla vaikuttaviin taloudellisiin ajureihin. Nämä taloudelliset ajurit muodostavat lähtökohdan sekä operaatiotieteiden kehitykselle, että kannattavuuden parantamiselle.

Diplomityön jälkimmäisessä osassa pyritään soveltamaan tätä operaatiotieteen tarjoamaa viitekehystä käytännön mittauksiin ja niiden analysointiin. Mittaukset suoritetaan toiminnanohjausjärjestelmän tarjoaman tuotetiedon tukemana. Samalla tätä sähköistä mittaus tapaa arvioidaan myös lattiatason kokeellisilla mittauksilla.

Käytännön mittauksien lisäksi työssä pyritään määrittämään myös teoreettisen tiedon soveltamiseen edellytettävää materiaali virtauksien tuntemista. Läpimenon mittauksen ja kehittämisen kannalta on oleellista ymmärtää työvaihekohtaisesti liikkuvia materiaali virtoja ja niiden jonoutumista tuotannossa osana loppukokoonpanoa. Työn analysoinnissa käytetään sekä aikaisemmin toteutunutta tuotetietoa että reaaliaikaista loppukokoonpanodataa monipuolisen analyysin toteuttamiseksi.

2. TEOREETTINEN VIITEKEHYS

Tässä osuudessa on tarkoitus tuoda esiin toteutettavan tutkimuksen keskeiset teoriat. Teoreettinen viitekehys keskittyy operaatiotieteen, laatutekniikan ja muutosjohtamisen ympärille. Tutkimuksen teoriaosuuden on tarkoitus tukea soveltavan osuuden toteutusta ja analysointia.

2.1 Operaatiotiede

Operaatiotieteen tarkoituksena on tutkia ja kehittää organisaatioiden liiketoimintaa. Tässä työssä operaatiotiedettä keskitytään tarkastelemaan erityisesti valmistuksen ja kokoonpanon näkökulmasta. Merkittävä osa tutkimuksen taustalla vaikuttavista teorioista kuten Taylorin tieteellinen liikkeenjohto, Fordin massatuotanto ja Shewhartin tilastollinen prosessiohjaus ovat jo vuosisadan vanhoja teorioita operatiivisen suorituskyvyn kehittämistä (Womack, Jones & Roos 2007; Montgomery 2012, s. 21, 184). Näiden periaatteiden päälle rakentava tutkimuksen teoria keskittyy tarkastelemaan operatiivista toimintaa modernien operaatiotieteen julkaisujen valossa.

Työssä käytetyllä termillä ”tehdasfysiikka” tarkoitetaan operaatiotieteen alle sijoitettavaa tuotannon numeerista mallinnusta. Tehdasfysiikalla pyritään siis matemaattisia malleja hyödyntäen mallintamaan tuotannossa tapahtuvia ilmiöitä. Näitä malleja ovat esimerkiksi Littlen (2008) virtausyhtälö, sekä pullonkaula ja käytettävyyyslaskenta (kaavat 1,2,5) (Hopp & Spearman 2011, s. 233, 239, 273). Mallinnuksella tähdätään tuotantojärjestelmän vaikutussuhteiden ymmärtämiseen ja niiden huomioimiseen tuotantoa koskevia päätöksiä tehtäessä. Matemaattisten menetelmien käyttö mahdollistaa operaatiotieteeseen sisältyvien laajempien tuotantofilosofioiden hyödyntämisen. Leaniä tai TPS:n (Toyota Production System) muodostamaa kokonaisuutta käsitellään esimerkkinä laajemmasta tuotantofilosofiasta. Tuotannon matemaattiseen mallinnukseen keskittyvä tehdasfysiikka pyrkiikin tukemaan Leanin toteutusta mallintamalla matemaattisesti tuotannon virtaukseen liittyviä tekijöitä. Numeeriseen dataan perustuva mallinnus tukee Leanin toimeenpanoa ja kehittämistä selittämällä tuotannossa tapahtuvia ilmiöitä lukuarvoin ja kaavoin. Tämä hienokuormitukseen asti toteutettavissa oleva mallinnus tukee Leanin asettamia suuria suuntaviivoja tuotannon kokonaisvaltaisesta optimoinnista.

2.1.1 Operaatiotiede osana liiketoimintastrategiaa

Perinteisesti liiketoiminnan keskeisinä taloudellisina mittareina pidetään kannattavuutta, vakavaraisuutta ja maksuvalmiutta (Suomen tilintarkastajat 2017). Myös operaatiotiede toimii näiden taloudellisten mittareiden ympärillä (Hopp & Spearman 2011, s. 201-221; Pound, Bell & Spearman 2014, s. 169-179).

Operaatiotieteen tavoitteena voidaan ajatella olevan liikevoiton maksimointi optimoimalla tuotannollisten puskureiden mitoittamista ja tuotannon virtausta. Tämä näkyy esimerkiksi yhtiön strategisen painopisteen mukaan valituissa tuotantopuskureissa, joita optimoimalla voidaan parantaa tuotannon ennustettavuutta vaihtelun läsnäollessa (Pound et al. 2014, s. 50-53). Tuotannon kokonaisvaltaisella tarkastelulla voidaan pyrkiä myös parantamaan sijoitetun pääoman tuottoa. Kannattavuuden kehittämistä edistävät niin sitoutuneen pääoman kustannusten pienentäminen pääoman määrä laskemalla kuin myös tuotantokapasiteetin supistaminen (Pound et al. 2014, s. 169-179).

Molemmat edellä mainitut tavat kasvattavat kuitenkin asiakaspalvelulle kriittistä aikapuskuria. Vähentämällä kapasiteettia ja varastoja tuotannon kyky reagoida asiakastarpeisiin heikkenee samalla kun kokonaiskapasiteetti supistuu ja jaksoajat kasvavat (Pound et al. 2014, s. 50-53). Näillä toimilla onkin siis merkittävä vaikutus asiakaspalvelun tasoon, jonka merkitys määräytyy liiketoimintamallin ja asiakasodotusten mukaan. Jo taloudellisen tarkastelun perusteella voidaankin päätellä, että eri puskurien välinen suhde ja niiden heijastamat suorituskykyparametrit ovat yhtiön johdon tekemä päätös, jossa taloudelliset ja operatiiviset komponentit vaikuttavat yrityksen kannattavuuden kehityksen.

Asiaa voidaan käsitellä myös vastakkaisesta näkökulmasta. Tuotannon tekijät ovat kustannusten lisäksi myös liikevaihdon mahdollistajia. Liikevaihto ei voi kasvaa pitkäjänteisesti ilman riittävää kapasiteettia. Jos yrityksen tuotanto ei omaa riittävää varasto ja kapasiteettipuskuria, kasvaa aikapuskuri kohtuuttoman suureksi. Asiakkaalle riittämätön vasteaika estää liikevaihdon kasvua ja yhtiön asiakkaat hakeutuvat muualle oman liiketoimintansa tai tarpeensa turvaamiseksi. Myös tuotannossa kuluvan jaksoajan voidaan ajatella linkittyvän suoraan taloudellisiin mittareihin. Vasteajan kasvun lisäksi jaksoajan piteneminen nostaa kustannuksia kasvattamalla todennäköisyyksiä hävikin kasvuun. Kustannukset kasvavat esimerkiksi tuotteiden vahingoittuessa, niiden vanhentuessa tai asiakastilausten muuttuessa kesken toimitusten. Näin operatiiviset suorituskykyparametrit kuten läpimeno ja jaksoaika vaikuttavat suoraan taloudellisiin tuloksiin. (Hopp & Spearman 2011, s. 201-222.)

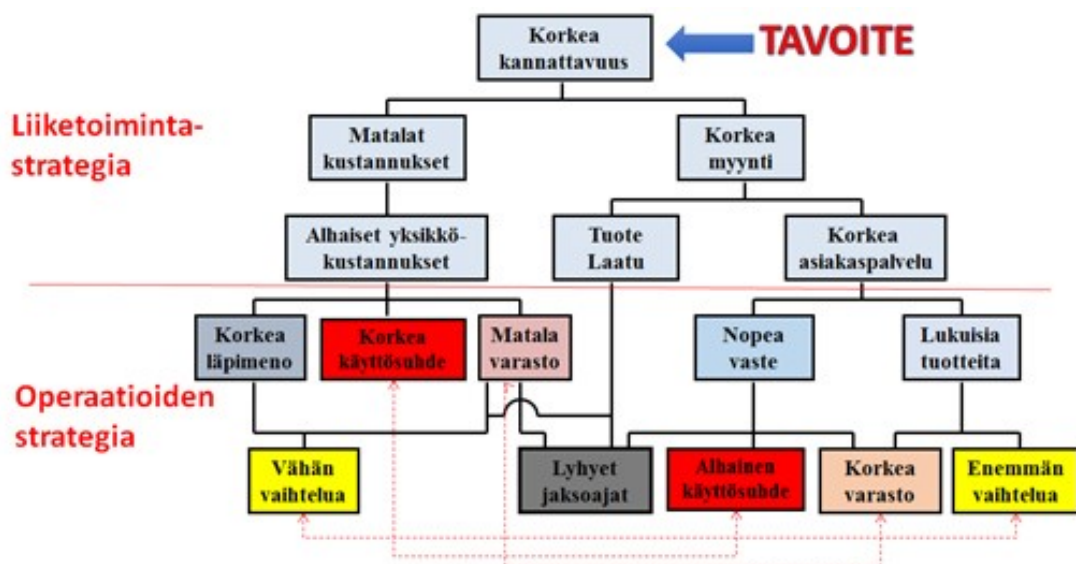
Operaatiotieteen avulla on mahdollista parantaa ymmärrystä tuotannon virtaukseen vaikuttavista tekijöistä. Näitä tekijöitä ovat esimerkiksi systeemissä esiintyvä vaihtelu, valittu tuotannonohjaus ja keskeneräisen tuotannon merkitys. Tuotanto sisältää aina luonnollisia tai järjestettyjä pullonkauloja, jotka rajoittavat tuotannon läpimenoa ja synnyttävät edellä tarkasteltuja puskureita. Pullonkaulojen poistaminen tuotantoa kasvatettaessa on usein järkevää, mutta tuotantokustannuksia tarkasteltaessa tasapainotettu tuotantolinjasto ei usein ole kokonaisuuden kannalta taloudellisesti kannattavin tai edes mahdollinen vaihtoehto. Tämä johtuu yrityksen koneiden, ja henkilökunnan erilaisesta hinnoittelusta, jolloin kalliin investoinnin tekeminen voi olla kokonaiskannattavuuden kannalta huono ratkaisu (Hopp & Spearman 2011, s. 201-221; Shingo 1984) Näin voi esimerkiksi käydä, jos vaihtelun seurauksena kalliiden investointien käyttöaste jää matalaksi ja investointien

perusteena käytetty liikevaihdon kehittyminen ei realisoitu esimerkiksi ulkoisten syiden vaikutuksesta.

Ymmärtämällä tuotannon toimintaa ja keskeneräisen tuotannon roolia läpimenon maksimoinnissa voidaan nostaa pullonkaulojen taloudellista tuottavuutta muuttamatta varsinaisen prosessin käyttöastetta. Matemaattisen virtausmallinnuksen eli tarkoituksena on tarjota matemaattisia malleja operaatioiden kannattavaan johtamiseen ja lisäarvon optimointiin operaatioiden luonnollisen käyttäytymisen kautta. (Pound et al. 2014, s. 169-179)

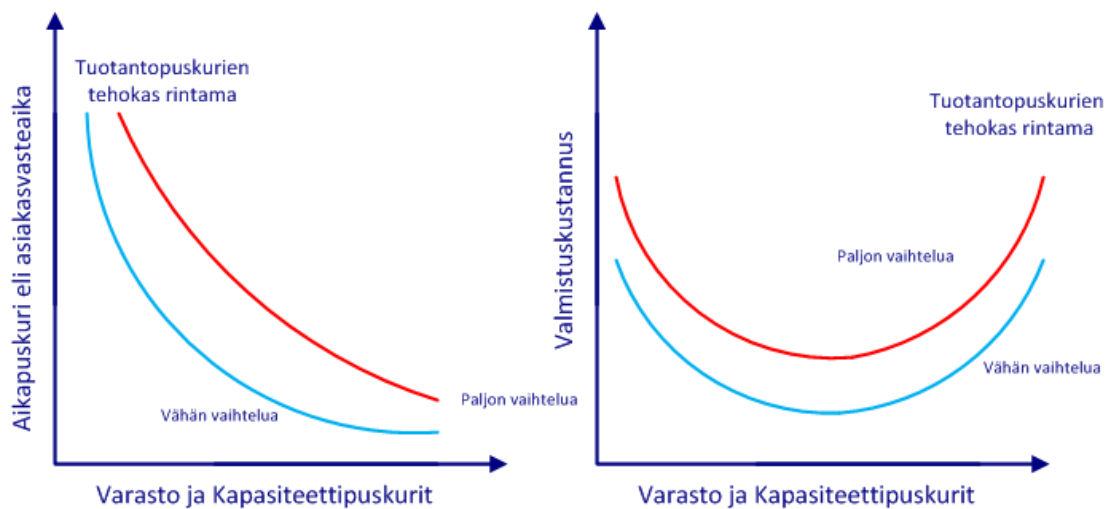
Operatiivista toimintaa ohjaa tunnetusti johdon asettama liiketoimintastrategia, jonka alle määritellään myös yrityksen tuotantostrategia (Stevenson 2007, s. 28, 40-50). Virtausmallinnus tarjoaakin työkaluja asetettujen tuotantostrategisten painopisteiden eli kilpailuedun lähteiden hyödyntämiseen. Tuotannon virtauksen mallinnuksella voidaan edistää sekä operaatioiden toiminnan ymmärrystä että niiden vahvuuksien hyödyntämistä kansainvälisillä markkinoilla toimittaessa. Tuotannon nopealla virtauksella on positiivinen vaikutus myös pääoman tuottoasteeseen (Hopp & Spearman 2011, s. 201-222).

Yrityksen strategiset tavoitteet ovat helppoja sisäistää liiketoimintatasolla. Operatiivista toimintaa tarkasteltaessa on kuitenkin syytä ymmärtää, ettei yritys voi priorisoida sekä korkeaa läpimenoa, nopeaa vastetta että laadukasta ja monipuolista tuoteportfolioa. On yrityksen operatiivisen kannattavuuden kannalta keskeistä, että valitaan eniten asiakasarvoa tuottava toimintastrategia ja mitoitetaan tuotantojärjestelmä vastaamaan ensisijaisesti tähän tarpeeseen. Priorisoinnista huolimatta myös muista suorituskykyparametreista on tärkeä huolehtia, mutta vasta strategian mukaan priorisoidun tavoitteen jälkeen. Eri tuotantostrategioiden ristiriitaisuutta on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Asiakasarvon perusteella valittu tuotantostrategia määrittää yrityksen toimintamallin. Nopea vasteaika, korkea laatu, monipuolinen tuoteportfolio ja alhaiset yksikkökustannukset ovat toistensa kanssa ristiriitaisia tavoitteita (Hopp & Spearman 2011, s. 207).

Strategialla pyritään vastaamaan asiakatarpeeseen niin hyvin, että yritys tyydyttäisi fokuksessa olevien asiakkaidensa tarpeet mahdollisimman hyvin. Tämä asiakastarpeisiin perustuva liiketoimintamalli hakee operatiivisen toiminnan suoritusparametrien muodostamalta tehokkaalta rintamalta sen pisteen, missä yritys voi toimia kaikkein kannattavimmin asiakkaisiinsa nähden. Toisin sanoen, yritys tarjoaa niitä suoritusparametrien arvoja, joista asiakas on valmis maksamaan eniten suhteessa kustannuksiin. Tuo markkinoiden muodostaman tehokkaan rintaman piste määrittää operatiivisen toiminnan rajat ja näin se määrittää myös optimaalisen tuotantopuskurien (kuva2) yhdistelmän, millä yritys toteuttaa yllä mainitun parhaan kannattavuuden. Operaatiotiede ja tuotantoa erityisesti tuotantovirtauksia matemaattisesti mallintava tehdasfysiikka tarjoavat apuvälineitä tuotannon ymmärtämiseen ja siten optimaalisten tuotannontekijöiden mitoittamiseen. (Hopp & Spearman 2011, s. 201-222.)



Kuva 2. Yrityksen on valittava tuotantopuskurien painotus yhtiön strategian perusteella. Tuotantoprosessin korkealla suorituskyvyllä eli matalan vaihtelun tasolla voidaan parantaa minkä tahansa liiketoimintastrategian kilpailukykyä eli yrityksen kannattavuutta (perustuu lähteeseen Hopp & Spearman 2011, s.208–215).

Tuotantojärjestelmät sisältävät aina tuotannontekijäpuskureita, koska prosessien luontainen vaihtelu estää kysynnän ja siihen vastaavan muunnoksen täydellisen synkronoinnin. Jotta tuotanto saadaan mitoitettua asiakaskysyntään vastaamiseen, tarvitaan kaikissa tuotantojärjestelmissä esiintyvää vaihtelua vaimentavia puskuureita. Jos puskuureita ei määritetä ja hallita määrätietoisesti ne muodostuvat itsestään tuotantoa hidastaviksi pullonkauloiksi tai ilmenevät jatkuvina osapuutteina tai liian suurina varastosaldoina. (Hopp & Spearman 2011, s. 201-221).

2.1.2 Tuotantokapasiteetin ja -puskurien mitoitus

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tarkastella kohdeyrityksen tuotannon toimintaa ja siellä suoritettujen mittausten luotettavuutta. Tämän vuoksi työn teoriaosuudessa täytyy käsitellä tuotantokapasiteetin mitoittamista ja tuotantopuskurien käyttäytymistä. Puskurien

toimintaa ymmärtämällä voidaan mallintaa tuotannon virtausta siten, että siihen saadaan huomioitua luvussa 2.1.4 käsiteltävän vaihtelun vaikutus. Tämä mahdollistaa kohdeyrityksen tuotannon virtauksen parantamisen osana Lean tuotantofilosofian jalkauttamista.

Tuotantojärjestelmien kehittämisessä runsaasti käytetty Lean keskittyy tuotannon virtauksen parantamiseen (Yang, Hong & Modi 2011). Toyotan kehittämään toimintafilosofiaan TPS:ään (Toyota Production System) pohjautuva Lean pyrkii parantamaan tuotannon virtausta hukkaa, ylikuormitusta ja epätasaisuutta vähentämällä. Arvoa lisäämättömän ajan eli hukan poistamisella pyritään maksimoimaan arvoa lisäävän työskentelyn osuus tuotteiden valmistuksen kokonaisjaksoajassa. Näin samalla kapasiteetilla voidaan saada aikaan enemmän läpimenoa. Leanin tavoite hukan, epätasaisuuden ja ylikuormituksen poistamiseen on linjassa operaatiotieteen tavoitteen kanssa poistaa vaihtelua. (Liker 2004; Hopp & Spearman 2011.)

Lean on kokonaisvaltainen liiketoimintafilosofia, jonka painopisteet ovat tuotannon lisäksi vahvasti johtamisessa ja organisaation toimintakulttuurin rakentamisessa. Leanissä toiminnan keskiössä ovat asiakasarvon määrittäminen, arvovirran rakentaminen, virtauksen priorisoiminen ja erinomaisuuden tavoittelu. Jatkuvaan parantamiseen ja yksiosaiseen virtaukseen pyrkivän Leanin keskeisiä piirteitä ovat myös tuotannon joustavuuden ja toimintatapojen jatkuva kriittinen uudelleenarviointi. Yksiosaisella virtauksella tarkoitetaan 1 kappaleen erokoissa tehtävää tuotantoa, jossa yhden tuotteen osat tehdään kerrallaan. Tavoitteena on minimoida tuotteen osien arvoa lisäämätön jaksoaika eli toteuttaa tuote aloituksesta valmiiksi minimi jaksoajalla. Leanin yksiosaisella virtauksella tavoitellaan tuotteiden jatkuvaa tasaista ja joustavaa tuotantoa, jossa toiminnan ongelmat tulevat välittömästi, kun varastot, odottelu ja suuret eräkoot eivät piilottele tuotannon ongelmia. (Liker 2004.)

Sekä tuotannon matemaattisen mallinnuksen, että Leanin tavoitteena on priorisoida tuotannon tasaista toimintaa ja tehokasta läpivirtausta. Virtausta pyritään parantamaan esimerkiksi työtä standardoimalla. Standardoinnilla vähennetään yksittäisissä työvaiheissa tapahtuvaa luonnollista vaihtelua. Kuten myöhemmin laskennassa huomaamme, tähän on selkeät matemaattiset perusteet. Lyhyesti tarkasteltuna vaihtelun vähentämisellä pystytään pienentämään tuotannon virtauksen turhaa jonotusta ja siten parantamaan pullonkaulavaiheiden läpimenoa. Leania voidaan ajatella kokonaisvaltaiseksi toimintafilosofiaksi, kun taas muu operaatiotiede keskittyy mallintamaan tuotannon dynamiikkaa.

Matemaattista virtausmallinnusta eli tehdasfysiikkaa voidaan kritisoida sen keskittymisestä tuotannon dynamiikan mallintamiseen. Kaavoihin pohjautuva toiminnan mallintaminen ei aina kykene ottamaan huomioon inhimillisistä tekijöistä aiheutuvia muutoksia. Näitä ovat esimerkiksi ihmisjohtamisen haasteet, työntekijöiden vaihtuvuus ja yksilölliset erikoistarpeet (Hopp & Spearman 2011, s. 390-391). Virtauslaskennan käytännön toteutuksessa myös painoarvoa saa toiminnan johtaminen, mutta suuri osa dynamiikkaan keskittyvistä teorioista ovat suuntautuneet käytännön toteutuksen tarkkaan laskentaan.

Tuotantofilosofiana Lean ottaa huomioon kokonaisvaltaisemmin muutoksen ja toiminnan kehittämisen avainasemassa olevan johdon sitoutumisen, ihmisten johtamisen ja toimintakulttuurin rakentamisen (Shingo 1984; Liker 2004; Liker & Convis 2012). Yhtiön johdon pitkäaikainen sitoutuminen toiminnan kehittämiseen on yksi Leanin kantavia teemoja.

Tuotannon käyttäytymistä voidaan mallintaa matemaattisesti virtauslaskennan avulla. Tehdasfysiikan peruseräiteena olevan Littlen (2008) teorian mukaan läpimeno on yhtä kuin keskeneräinen tuotanto jaettuna jaksoajalla. Tämän yksinkertaisen teorian ymmärtäminen on kriittistä kasvavan kysynnän olosuhteissa, joissa pyritään hillitsemään kasvavia kustannuksia liikevaihdon kasvaessa. Kaavasta 1 nähdään, että pyrittäessä todella kasvattamaan läpimenoa, on myös keskeneräisen tuotannon (Work in Progress) määrän kasvettava tai jaksoajan lyhennyttävä funktion kokonaisarvoa kasvattavasti. (Hopp & Spearman 2011, s. 227-240; Little & Graves 2008; Medhi 2002)

$$WIP = CT * TH \tag{1}$$

Littlen lakia tarkasteltaessa huomataan, että Littlen laki on helppo kohde osaoptimoinnille. Jos keskeneräistä tuotantoa pyritään vähentämään pääomakustannusten ja tilatarpeen vähentämiseksi, niin samalla läpimeno romahtaa. Näin käy, kun yllä olevassa yhtälössä keskeneräisen tuotannon määrä suhteessa jaksoaikaan laskee. Toisaalta kun läpimenoa halutaan nostaa, vaikuttaa se kasvattavasti keskeneräisen tuotannon kautta myös prosessin keskimääräiseen jaksoaikaan, ja tämä saattaa tulla yllätyksenä.

Tuotannon puskurien eli asiakasvasteen, varaston arvon ja tuotantokapasiteetin mitoituksen perusideana on luonnollisesti yrityksen tarve vastata kaikkeen asiakaskysyntään. Voidaankin kysyä, onko tämä järkevää vai pitäisikö kapasiteetti mitoittaa vain maksimiliikevoiton mukaan. Kannattamattoman kysynnän ohittaminen voi johtaa myös kannattavien asiakkaiden menettämiseen (Hopp & Spearman 2011). Toisaalta, tuotantopuskurit voidaan mitoittaa myös kiinteiden kustannusten kohdistamisen kautta painottaen lyhyen aikavälin parasta myyntikatetta, ilman että asiakaskysynnän pitkäjänteisyyttä huomioidaan. Tällöin tuotannon puskurit on mitoitettu taloudellisten preferenssien mukaan, mutta ne eivät usein vastaa varsinaiseen tuotannon vaihtelun tarpeeseen ja tuotannon läpimeno sekä jaksoaika kärsivät merkittävästi.

Tämä johtaa asiakastyytyvyyden ja myynnin heikkenemiseen tuotannon sakatessa. Tämä aiheuttaa aikaisempaa varastoarvon optimointitavoitetta vastakkaisen tuloksen taloudellisiin tunnuslukuihin (Sumanth 2000, s. 63-99). Onkin varsin yleistä, että tuotannon puskureita tarkasteltaessa ymmärretään niiden aiheuttamat kustannukset ja pyritään eliminoimaan niiden olemassaolo. Kuitenkin usein tuntemus puskureiden luonnollisesta käyttäytymisessä ja kuvassa 1 korostetusta ristiriitaisuudesta puuttuu kokonaan. (Hopp & Spearman 2011, s. 201-222)

Burman (1995) korostaa kirjassaan täyttöasteen merkitystä liiketoiminnan pitkän aikavälin kannalta. Burmanin mielestä asiakasperusteisen varastopuskurin täyttöasteen laskeminen voi taloudellisesti myös erittäin haitallinen päätös, jos varastoon sitoutuneen pääoman kustannuksen perusteella osaoptimoidaan asiakastarpeen täyttämistä. Tällöin siis tehdään tietoinen valinta kasvattaa asiakkaan aikapuskuria tilauksesta toimitukseen, mikä voi tulla huomattavasti kalliimmaksi kuin alun perin suosituksen varastopuskurin ylläpito. (Burman 1995, s. 202-217)

Varastojen jatkuva optimointi on kallista ja sillä on negatiivinen vaikutus tuotantoprosessin stabiilisuuteen. Stevenson (2007, s. 605-609) kertoo, että aggressiivinen hinnoittelu on hyvä tapa tasata tuotantoprosessiin kohdistuvaa kysyntävaihtelua. Toisaalta, mielestä tämä lisää kokonaisprosessin heilahtelua, kun asiakkaat alkavat ajoittaa hankintoja hinnoittelupisteisiin, ja tällöin luonnollinen kysynnän dynamiikka vääristyy hinnoittelun vaikutuksesta. Tätä ilmiötä kutsutaan myös yliohtaukseksi ja sitä käsitellään tarkemmin osana tilastollista prosessiohtauksia. (Hopp & Spearman 2011, s. 201-222)

Tuotantokapasiteetti voidaan tasoittaa jatkuvasti vaihtelevan kysynnän mukaan. Näin toimitaan, kun sopivia tuotannon tekijöitä on helposti ja nopeasti saatavilla (Stevenson 2007, s. 605-609). Jos näin ei ole, syövät transaktiokustannukset kaikki sopeutuksesta saatavat säästöt ja sopeutustoimet vaikuttavat negatiivisesti yrityksessä työskentelevien työntekijöiden työskentelytehokkuuteen ja sitä kautta kokonaiskannattavuuteen (Hopp & Spearman 2011, s. 160-166)

Shingo (1984, s. 45-51, 79-81) korostaa, ettei tuotannon varastoja voida pienentää ilman että tuotantosysteemiä kehitetään varastojen pienentämisen rinnalla kohti pienempää vaihtelua. Tämä useissa Toyotan toimintatapaa jäljittelevissä yrityksissä yritetty pinnallinen toimintamalli johtaa vain suureen epäjärjestykseen ja läpimenon romahtamiseen. Saman huomionarvoisen päätelmän tekee myös Liker (2004, s. 90), joka korostaa, että järkevä varaston käyttö ongelmia sisältävässä toimintaympäristössä parantaa tuotannon virtausta ja siten tuotannon kannattavuutta, vaikka itse ongelmien poisto ja varastojen pienentäminen onkin Leanin pitkäaikainen tavoite.

Virtausmallinnuksessa esitettyjä puskureita (aika, varasto ja kapasiteetti), joilla pyritään vaimentamaan tuotantojärjestelmän vaihtelua, voidaan suoraan verrata Toyotan tuotantojärjestelmän keskeisiin periaatteisiin. Toyotan tuotantojärjestelmä pyrkii tasaamaan kapasiteetin käyttöastetta välttämällä ”ylikuormitusta” ja vähentämällä ajallista ”hukkaa”. Kapasiteetin kestävä käyttö tarkoittaa riittävän pitkää aikapuskuria asiakkaalle ja tarvittaessa tuotantokapasiteettipuskurin mukauttamista. ”Epätasaisuutta” eli vaihtelua pyritään pienentämään myös Toyotan tuotantojärjestelmässä virtauksen parantamiseksi. Toyota pyrkii minimoimaan tuotantoonsa kohdistuvaa asiakasvaihtelua sekä lyhyen aikavälin kapasiteetin sopeutuksen tarvetta aikataulutamalla tuotteiden valmistusta kuukausien päähän ulottuvilla tuotantoaikatauluksilla. Virtausdynamiikan näkökulmasta tämä tarkoittaa aikapuskurin kasvattamista, jotta Toyotan tuotantojärjestelmä voi minimoida

ulkoisista lähteistä tulevan vaihtelun ja samalla mitoittaa kapasiteetti- ja varastopuskurinsa pitkäjänteisesti. (Hopp & Spearman 2011, s. 166-176, 199-221; Liker 2004, s. 113-127; Shingo 1984, s. 48, 79-82)

Leanissä voidaan myös priorisoida tuotannon virtausta kapasiteettipuskurin avulla. Tämä tarkoittaa, että korkean virtaustehokkuuden edistämiseksi täytyy tuotannossa olla tarvittaessa riittävästi kapasiteettipuskuria. Tarpeen vaatiessa tuotantotavoitteisiin päästään, kun normaalisti kahden työvuoron välissä olevaa tuntien taukoaikaa valjastaa tuotannon viivästysten kirmamiseen. Leanin mukaan rakennetussa tuotannossa voidaan nähdä jopa vain 50% käyttöasteita. Tämä on perusteltua, koska se mahdollistaa virtauksen sujuvan toteutuksen ja siten tuotteiden kustannustehokkaan valmistuksen. (Liker 2004, s. 113-127; Shingo 1984, s. 48, 79-82; Hopp & Spearman 2011, s. 166-176, 199-221)

Tuotantokapasiteetin sopeuttamisen seurauksena menetetään usein arvokkaita työntekijöitä. Tämän lisäksi jäljelle jäävien ja uusien työntekijöiden työskentelymotivaatio ja lojaalisuus yritystä kohtaan heikkenee merkittävästi. Puskurien jatkuva säätö lisää myös merkittävästi prosessin sisäistä heiluntaa (Wheeler 2013). Ihmisten, koneiden ja varastoartikkeleiden vaihtuminen lisää laatuvirheiden määrää ja heikentää siten tuotelaatua ja asiakastyytyväisyyttä. Lisäksi tuotanto on usein verkostoitunut hyvin alihankkijoiden, toimittajien ja asiakkaiden kanssa ja jatkuvat henkilökunnan ja toimintatapojen vaihtuvuus heikentävät operatiivisen suorituskyvyn tasoa ilman, että sitä pystyttäisiin tuotannonohjauksessa ennustamaan. (Hopp & Spearman 2011, s. 201-222)

Kapasiteetin mitoituksella tähdätään asiakaskysyntään vastaamiseen kilpailukykyisin hinnoin. Hinnan ja tarpeen tyydyttävien ominaisuuksien lisäksi asiakkaalle tärkeää on sopiva toimitusaika. Ylimääräisen kapasiteetin mahdollistama jousto voi turvata tärkeitä asiakastilauksia ja siten lisätä liikevoittoa, mutta se aiheuttaa samalla ylimääräisen kustannuslisän kaikille tuotteille. Kilpailustrategian näkökulmasta kapasiteetilla voidaan voittaa myös markkinaosuutta nousevan tilauskannan olosuhteissa. Tuotannon mitoituksen täytyy perustua markkinadynamiikan huomioon ottaen yhtiön strategiaan. Strategian perusteella valitaan kilpailuetuihin perustuva asiakaspalvelutaso, minkä perusteella mitoitetaan tuotanto kokonaiskannattavuutta optimoivaksi. Tässä mitoituksessa tärkeää on huomioida valmistavan yrityksen tuotannollinen kyvykkyys. Kyvykkyyttä ilmentävä tuotannon vaihtelu (luku 2.1.4) korreloi suoraan tarvittavien kapasiteettipuskurien koon kanssa. (Stevenson 2007, s. 186-204)

Pyrittäessä resurssien tehokkaaseen käyttöön unohdetaan usein, että ylitöiden käyttäminen normaalin tekemisen ulkopuolella lisää tuotantokapasiteettia lineaarisesti kustannusten kasvaessa lineaarisena kertalukuna. Ylitöillä lisätään tuotantojärjestelmään enemmän kapasiteettia eli oikeastaan madalletaan todellista kapasiteetin käyttöastetta u . Samalla tuotantoprosessiin lisätään yksikköhinnaltaan erityisen kallista ja siten heikolla tuotos/pa-nossuhteella varustettua kapasiteettia. Tuotantokapasiteetin laajentaminen säännöllisten

ylitöiden avulla heikentää nopeasti myös työntekijöiden tuottavuutta normaalilla työajalla (World Economic Forum 2016; LaJeunesse 2009, s. 124-139).

Ylitöiden tekeminen onkin järkevää kapasiteetin näkökulmasta vain satunnaisissa poikkeustapauksissa, kuten ulkoisten häiriöiden kompensoinnissa tai tuotannon ylösajovaiheessa, jossa pullonkaulana toimivan työvaiheen kapasiteetin kustannustehokas kasvattaminen ei ole mahdollista. Pitkällä tähtäimellä säännölliset ylityöt lyhentävät normaalin työajan työtehoa, kun töitä pyritään venyttämään ylitöiden puolelle paremman kompensoinnin ajamana ja edelliset ylityöt heikentävät jaksamista normaalina työaikana. (Chen et al. 2009; Allen & Bunn 2007; Green 2015)

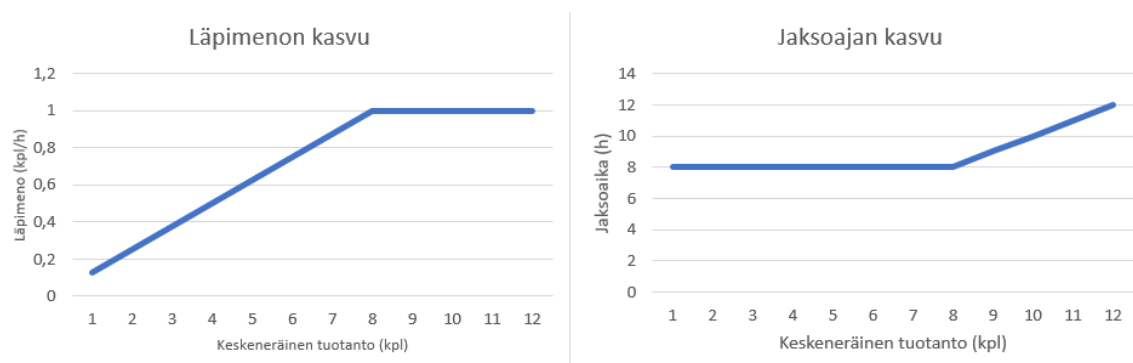
Yllä mainittujen tekijöiden vuoksi Hopp ja Spearman (2011) kannattavat tuotantokapasiteetin alemmaa käyttöastetta. Tällä tavoitellaan suurempaa prosessin stabiilisuutta, jos tavoitteena on rakentaa tuotanto vastaamaan kysyntään mahdollisimman kustannustehokkaasti. Kapasiteetin mukauttaminen pitkäaikaisten trendien mukaan on suositeltavaa, mutta vaikeammin hankittavien tuotantotekijöiden jatkuva optimointi on yleensä tulosta heikentävää toimintaa. Tämä päätelmä perustuu ensisijaisesti pitkän aikavälin taloudellisiin kerrannaisvaikutuksiin, eikä siis edes ota huomioon kapasiteettipuskurien strategisia ulottuvuuksia kuten pyrkimystä markkinaosuuden kasvattamiseen. Operatiivisen toiminnan ulkopuolella realisoituvat kerrannaisvaikutukset heikentävät edelleen aggressiivisen kapasiteetinsopeutuksen kannattavuutta pitkällä aikavälillä (Hopp & Spearman 2011 s. 201-222; Stevenson 2007, s. 186-204)

Yllä mainittuja puskureita mitoitettaessa on syytä kuitenkin muistaa operaatioiden luonnollinen käyttäytyminen. Jos puskureiden kokoa pyritään redusoimaan alle luonnollisen tason alkavat prosessin heilahtelut lisääntyä ja uusia pullonkauloja syntyy ennalta huomiomattomiin kohtiin. Tuotannon mitoituksessa onkin tärkeää ennemminkin hallita pullonkaulojen sijainti kuin pyrkiä poistamaan ne kokonaan tasapainotetulla linjastolla (Amiri & Mohtashami 2011). Pullonkaulojen sijainnin tarkastelu edellyttää koko tuotantoketjun vaihekohtaista mittausta ja tuotantoketjun kokonaisvaltaista ymmärrystä. (Hopp & Spearman 2011, s. 201-222; Rabinovich, Dresner ja Evers 2003; Liker 2004, s. 113-116)

Monivaiheisen tuotantoprosessin rajoittavaa tekijää määritettäessä pullonkaula on se vaihe, minkä läpimeno on alhaisin suhteessa tuotekohtaiseen valmistustarpeeseen. Tällöin käytösuhde saavuttaa kyseisessä työvaiheessa maksimiarvonsa ja puskurin kertyminen prosessivaiheen edelle alkaa. Pullonkaulan käyttäytymistä voidaan mallintaa kaavan 2 avulla. Tällöin keskeneräisen tuotannon määrittämiseen käytetään pullonkaulan läpimenoa r_b ja kaikkien työvaiheiden muodostamaa raakaprosessiainaa T_0 , joka tarkoittaa keskimääräistä tuotantoprosessiketjuun kuluvaan aikaan yhden kappaleen virtauksessa. (Hopp & Spearman 2011, s. 236.)

$$W_0 = r_b * T_0 \tag{2}$$

Tuotantoprosessien toimintaa mallintavasta kaavasta saatu kriittinen keskeneräisen tuotannon taso W_0 on se keskeneräisen tuotannon taso, joka vaaditaan, että järjestelmä saavuttaa maksimiläpimenon r_b nominaali jaksoajalla T_0 vaihtelun ollessa 0 ja keskeneräisen tuotannon tason alle W_0 (Hopp & Spearman 2011, s. 227-240). Kaavaa soveltamalla voidaan huomata, että keskeneräisen tuotannon ollessa alle kriittisen tason, jää läpimenon määrä alle maksimiarvon. Toisaalta jos keskeneräisen tuotannon määrä kasvaa yli kriittisen rajan, alkaa jaksoaika kasvaa läpimenon pysyessä maksimiarvossa. Kuvassa 3 pullonkaulan toimintaa on havainnollistettu yksinkertaisella esimerkillä. Esimerkissä pullonkaulan maksimiläpimeno on 1 ja koko prosessin jaksoaika 8. Näin jaksoaika pysyy vakiona, kunnes läpimeno saavuttaa maksimiarvonsa ja tuotteiden turha jonoutuminen alkaa keskeneräisen tuotannon kasvaessa.



Kuva 3. Kriittisen keskeneräisen tuotannon merkitystä havainnollistavassa esimerkissä jaksoaika alkaa kasvaa maksimiläpimenon saavuttamisen jälkeen keskeneräisen tuotannon tason noustessa (perustuu lähteeseen Hopp & Spearman 2011, s. 227-240).

Voidaankin siis sanoa, että kriittisen keskeneräisen tuotannon määrällä saavutetaan tuotantojärjestelmän pullonkaulan optimi suorituskyky painottaen keskeneräistä tuotantoa yhtiön strategian mukaisesti. Strategian huomioinnilla tarkoitetaan sitä, että jos pullonkaulana toimii kallis tuotantokone, on järkevää pitää WIP:n tasoa yli kriittisen rajan maksimiläpimenon turvaamiseksi. Maksimiläpimenon saavuttamiseksi asetetun WIP:n tason ylittäminen on perusteltua, koska käytännössä tuotantojärjestelmässä on aina vaihtelua, johon varaudutaan pullonkaulan käyttöasteen turvaavalla ylimääräisellä puskurilla. Riittävä ylimääräisen puskurin koko määritetään mittaamalla pullonkaulan kohtaama vaihtelun määrä.

Leanin lähestymistapa pullonkauloihin keskittyy tuotannon virtauksen parantamiseen. Tuotannossa esiintyviin pullonkauloihin pyritään soveltamaan tuotantokapasiteetin tasausta. Tällöin keskimääräiset jaksoajat lyhenevät ja pullonkaulana toimiva työvaihe kohtaa tasaisesti kaikkia tuoteportfolion tuotteita. Leanissa pullonkaulan kuormitusta tarkastellaan myös muita tuotantofilosofioita kriittisemmin, koska Lean pyrkii minimoimaan hukkaa ja tällöin ratkaisu pullonkaulan rajoittavaan kapasiteettiin saattaa löytyä myös ylituotannon vähentämisestä. Tekemällä tuotteita vain tarpeeseen vähennetään hukkaan

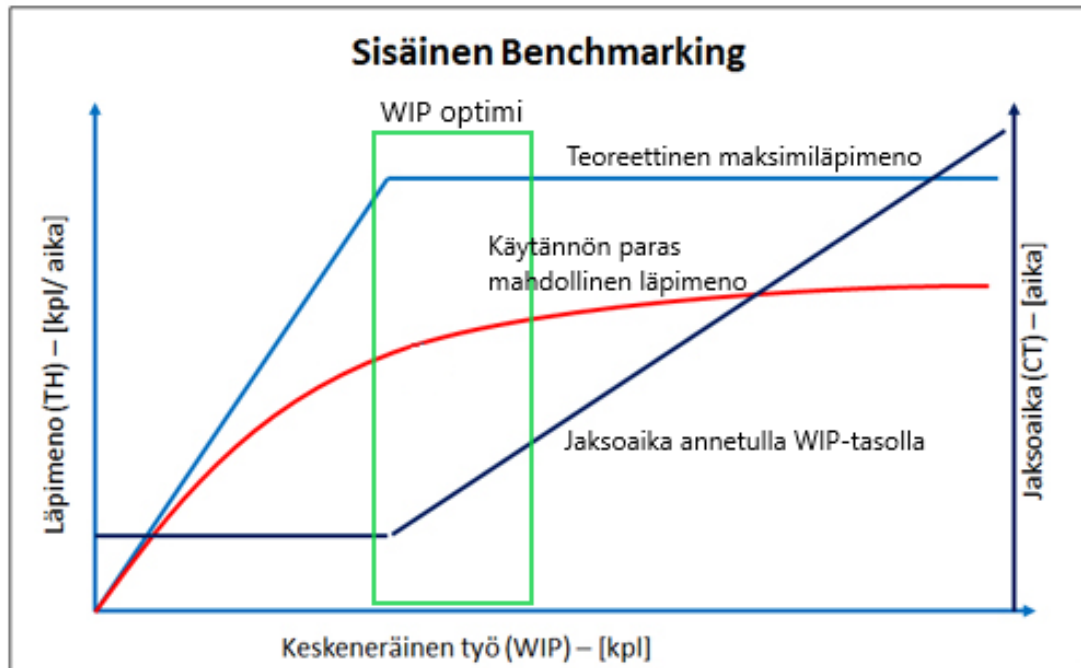
menevien tuotteiden määrää ja tällöin kapasiteetti ei kärsi niin pahasti pullonkaulan rajoituksista. (Liker 2004, s. 37-41, 113-127)

Jos pullonkaulana on esimerkiksi kallis koneistuskeskus, Lean toimintatapaa tavoitteleville organisaatioille on tyypillistä, että työvaiheita standardisoidaan ja valmistellaan mahdollisimman paljon koneistuskeskuksen ympärillä. Tällä parannetaan pullonkaulan resurssitehokkuutta, mutta pullonkauloissa sillä saadaan samalla parannettua koko tuotantolinjan virtaustehokkuutta. Käytännössä tällä tarkoitetaan esimerkiksi valmiita koneistuspaletteja, joita voidaan vaihtaa koneistuskeskukseen kokonaisuuksina osien yksittäisen kiinnittämisen sijaan. Valmistelevalle työllä minimoidaan tuotteiden turha odotus sekä parannetaan pullonkaulan läpivirtausta. (Liker 2004, s. 88-103)

Uuden linjan investoimisen tai rinnakkaisen työaseman lisäksi on olemassa muita keinoja pullonkaulavaiheen tukemiseen. Pullonkaulojen syntymistä voidaan ehkäistä henkilöstön ristiinkoulutuksella niin, että henkilöstön sairastuminen tai konerikot eivät vaikuta kokonaisprosessiin halvaannuttavasti, vaan tuttuja prosessireittejä voidaan uudelleen ohjata. Samoin investointeja tehtäessä on järkevämpää investoida kahteen pieneen rinnakkaiseen laitteeseen yhden suuren sijaan, koska toisen rikkoutuminen tai läpimenon hidastuminen ei välittämättömästi keskeytä koko tuotantovirtausta. (Stevenson 2007, s. 245-263)

Tarkasteltaessa tuotantoa Littlen lain perusteella huomataan myös, että lakia on mahdollista soveltaa suorituskyvyn määrittämiseen eri keskeneräisen tuotannon tasoilla. Soveltamalla teoriaa huomataan, että läpimeno sekä jaksoaika käyttäytyvät kaavan 2 yhteydessä huomattavan dynamiikan mukaan. Kun tuotantojärjestelmä saavuttaa minimiläpimenon maksimijaksoajalla on saavutettu järjestelmän heikoin suorituskky. Käytännön suorituskky voi siis jäädä merkittävästi laskennallisen suorituskkyä heikommaksi.

Alentunutta suorituskkyä voidaan perustella osittain vaihtelulla, mutta valtaosa siitä selittyy todennäköisesti esimerkiksi tuotantosysteemin rakenteellisista ongelmista. Systemin virheellisiä rakenteita voivat olla esimerkiksi virheelliset toimintatavat joihin tietojärjestelmät ohjaavat työntekijöitä. Systemin ongelmia ovat myös vaihtelevat tuotantopuitteet. Tuotantolinjan läpimenoa voidaan parantaa esimerkiksi rakentamalla vaihtelubalansoituja tuotantolinjoja tai rinnakkaisia linjastoja yhden suuren linjaston sijaan. Ongelmaa voidaan lähestyä myös säätämällä WIP:ä niin, etteivät linjan pullonkaulat joudu vajaakäytölle. Käytännön läpimeno heikkenee, jos keskeneräisen tuotannon taso on liian alhainen tai korkea kapasiteettiin nähden (kuva 4). (Hopp & Spearman 2011, s. 220-240)



Kuva 4. Operatiivisen toiminnan tulosten vertailu laskennallisiin maksimiarvoihin nähden kertoo nykyisen tuotannon suorituskyvystä. Sopivana keskenkäynnin tuotannon määränä pidetään aluetta, jossa käytännön läpimenon kasvu heikkenee keskenkäynnin tuotannon suhteen jaksoajan pysyessä maltillisena (perustuu lähteeseen Pound 2017).

Yllä nähtävässä kuvassa 4 huomataan miten jaksoaika ja läpimeno käyttäytyvät reaali-prosesseissa vaihtelun läsnä ollessa. Samalla kuvassa näkyy, miten läpimenon kasvu alkaa hidastua sen saavutettua kriittisen keskenkäynnin tuotannon määrittämän tason. Kuten aikaisemmassa esimerkissä huomattiin usein läpimeno saattaa olla vielä merkittävästi vaihteluhuomioitua arvoa heikompi johtuen tuotantolinjan puutteellisista resursseista ja järjestelmällisistä ongelmista jokapäiväisessä tekemisessä.

2.1.3 Tuotannonohjaus

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on mitata ja analysoida tuotannon suoritusparametreja. Tuotannon läpivirtaavien tuotteiden mittaus edellyttää tuotannon ohjausmetodien tuntemista. Tuotannonohjauksella vaikutetaan esimerkiksi keskenkäynnin tuotannon määrään ja jaksoaikaan. Tämän vuoksi tuotannon mittaus ja mittaustulosten analysointi edellyttää tuotannonohjauksen ymmärrystä.

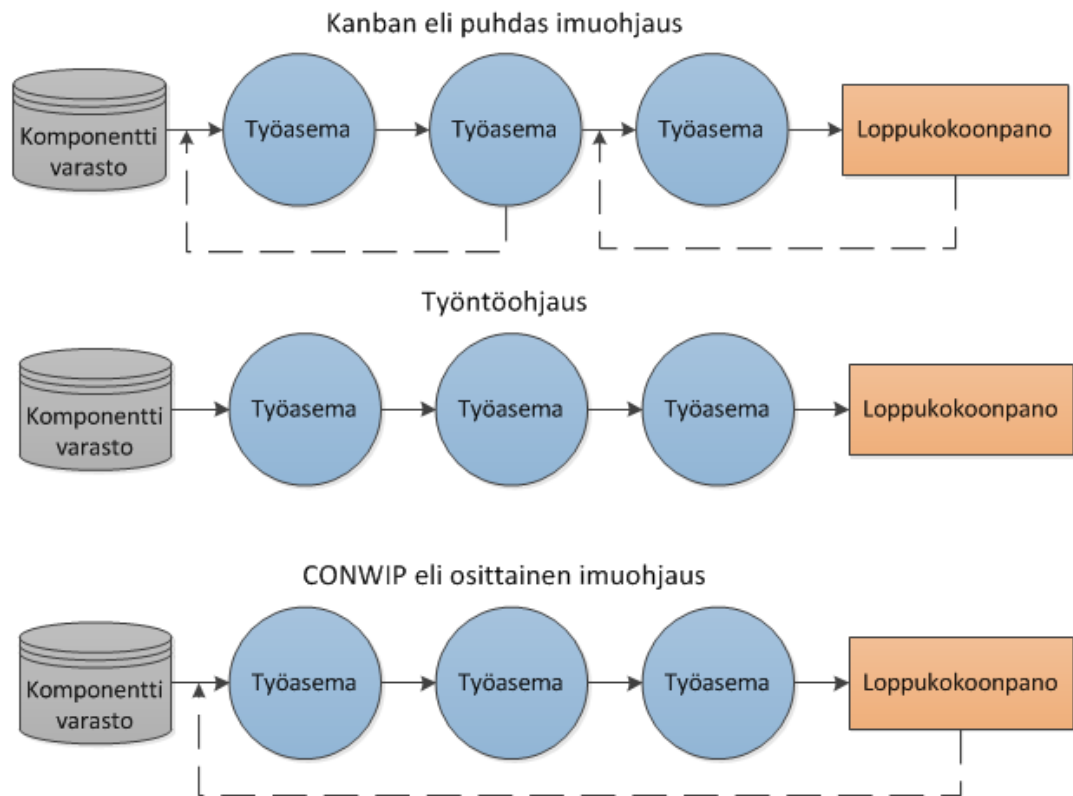
Tuotannonohjaus voidaan jakaa operaatiotieteessä ohjaustavan mukaan joko työntäviin ”Push” tai imeviin ”Pull” menetelmiin. Työntävien ohjausten ideana on työn tekemisen aloittaminen suunnitellun aikataulun mukaan. Työ vapautetaan tuotantoon ja samalla aloitetaan myös materiaalien keräys työn tekemistä varten. Työntöohjauksessa tuotantoprosessia ohjataan toisin sanoen ulkoa eli työn aloituspäivämäärä perustuu mitoitettuun tuotantokapasiteettiin, asiakastilaukseen ja osien tilattuun toimituspäivämäärään ja näiden yhteensovittamiseen muun tuotannon kanssa. (Hopp & Spearman 2011, s. 220-240)

Työntöohjatuista järjestelmistä poiketen imuohjatussa tuotantojärjestelmässä uusien töiden aloittaminen perustuu systeemin lähettämään signaaliin asiakastarpeesta. Työtä ei siis aloiteta ennen kuin sille on ilmennyt tarve esimerkiksi sisäisen asiakkaan suunnalta. Imuohjatut järjestelmät eivät siis aloita tuotantoa ennen kuin niille on ilmennyt tarve. Näin ne kontrolloivat keskeneräisen tuotannon määrää ja tuotannon resurssien kohdentamista. (Shingo 1984)

Imuohjatuista järjestelmistä esiintyy kahta yleistä variaatiota. Leanin keskeisenä työkaluna oleva Kanban-ohjauskortteihin perustuva puhdas imuohjaus hallinnoi WIP:n määrää tuotannossa käytettävillä tuotekorteilla. (Liker 2004, s. 103-112) Jos kaikki ohjauskortit ovat tuotannossa, järjestelmässä on käytössä maksimi keskeneräinen tuotanto. Ohjauskortteja käytetään puhtaissa imuohjauksissa yleensä tuotantoprosessin läpi välivarastojen välillä. Jos tehdas sisältää esimerkiksi suuren maalaamon, voidaan maalaamon sisäistä tuotantoa johtaa maalaamon keskeneräisen tuotannon ohjauskorteilla. Näin varmistetaan, että maalaamoon ei tuoda liikaa keskenräistä tuotantoa, joka haittaisi tuotannon virtausta.

Kanban-ohjauksessa vaihekohtaiset kortit ovat yleensä tuotevariaatiokohtaisia ja ne sisältävät myös kyseisen tuotteen tiedot. Ohjauskorteilla hallitaan osien virtausta, ja jos tuotteissa esiintyy runsaasti variaatiota, on sillä merkittävä vaikutus tuotannossa liikkuvien ohjauskorttien määrään. Ohjauskorttien runsaan lukumäärän vuoksi ne eivät toimi hyvin suurta vaihtelua sisältävässä tuoteportfoliossa. Suuren ohjauskorttikannan hallinta ja käyttö on stressaavaa myös työntekijöiden näkökulmasta. (Hopp & Spearman 2011, s. 168-171)

Toisena imujärjestelmien tyyppinä on paljon yksinkertaisempi CONWIP (Constant Work In Progress) eli vakioitu keskeneräisen tuotannon imuohjaus. CONWIP:n ideana on rajata ohjauskortteihin perustuvan Toyotan kehittämän Kanbanin tavoin keskeneräisen tuotannon määrää. CONWIP on puhtaaseen työvaihekohtaiseen imuohjaukseen verrattuna paljon yksinkertaisempi ja sen toimintaa suhteessa muihin ohjauksiin on havainnollistettu kuvassa 5. Rajoittamalla WIP:ä vain tuotantolinjakohtaisesti johdon toimesta saavutetaan merkittävästi osin Kanbanin edut ilman korttijärjestelmän työlästä implementointia tuotantoon (Ip, et al. 2007). Tieteellisten tutkimusten mukaan korkean laatutason omaavissa tuotantojärjestelmissä pystytään yleisesti saavuttamaan korkeampi läpimeno valitulla keskeneräisen tuotannon tasolla käyttäen CONWIP-ohjauksen sijasta Kanban-järjestelmää (Kohjasteh-Ghamari 2007). Kanbanin toteuttaminen vaatii kuitenkin jo lähtökohtaisesti organisaatiolta enemmän ja tällöin sen tuottama hyöty suhteessa yksinkertaiseen CONWIP-järjestelmään voi peittyä implementoinnin kustannusten alle. (Hopp & Spearman 2011, s.220-240)



Kuva 5. Imuohjatut järjestelmät rajoittavat luonnostaan WIP:n määrää, kun taas työntöohjatut järjestelmät ovat riippuvaisia jatkuvasta tilausten hallinnasta (Perustuu lähteisiin: Spearman & Zazanis 1992; Hopp & Spearman 2011, s.155–175, 356-379).

Työntö- ja imuohjauksen toiminnan merkittävät erot näkyvät erityisesti arjen ongelmiin reagoitaessa. Työntöohjauksen tapauksessa linjassa ilmenevät ongelmat kuten osapuute, riittämätön kapasiteetti tai tilanpuute, puurouttavat helposti tuotantoa. Tuotanto alkaa kasaautua, kun keskeneräistä tuotantoa vapautetaan sovitun tuotantoaikataulun mukaan, vaikka nykyiset työt ovat vielä kesken. Töiden viivästyminen voi johtua esimerkiksi riittämättömästä työvoimasta, osapuutteista tai laatuongelmista. Kun tällaisia ongelmia ilmenee, joutuu johto reagoimaan työntöohjauksessa kohdentamalla tuotantolinjaan ylittöitä, uudelleenaikataulutusta, osien siirtoa ja toimituksien viivästyksiä.

Hoppsin ja Spearmanin (2011 s. 201-222, 356-379), Juranin (2016) ja Demingin (2000, s. 19-96) mukaan nämä hetkittäistä ”tulipaloa” sammuttavat ohjaustoimet ja uudelleen aikataulutusta aiheuttavat pitkällä aikavälillä vaihtelun kasvua eli ne lisäävät laatuutteita, työntekijöiden turhautumista, osapuutteita ja siten menetettyä läpimenoa. Tämä tarkoittaa, että tuotannon mitoittaminen niin, että ulkoisista tai tuotantoprosessin sisäisestä toiminnasta kumpuava vaihtelu pääsee luomaan tuotannon uudelleenaikataulutusta, on erittäin haitallista. Haitallista se on liiketoiminnan näkökulmasta, koska puutteellinen mitoitus lisää itsessään tuotannon vaihtelun tasoa joka korreloi negatiivisesti operatiivisen kannattavuuden kanssa. Kun mitoituksessa huomioidaan normaalisti toiminnassa esiintyvät ongelmat käytettävyyden avulla, voidaan järjestelmä stabilisoida. Tällä toimella

saavutetaan jo merkittäviä kerrannaisvaikutuksia operatiiviseen suorituskäyttöön (Deming 2000, s. 19-96.)

Imuohjauksen tapauksessa tuotantokatkot eivät kasaa tuotantoa, koska keskeneräisen tuotannon määrää on rajoitettu. Toyotalla tätä lähestymistapaa on perusteltu erityisesti sillä, että tuotantokatkot rajoitetun WIP:n järjestelmistä asettavat painetta johdolle kehittää osien saatavuutta ja kapasiteetin tarkkaa ennustamista ja siten tuotannon toimivuutta. Perinteinen työntöohjaus hautaa tehokkaasti osapuute- ja resurssiongelmia alleen, kun se puurouttaa tuotantoa ja tekee työaseman kiireellisemmän näköiseksi. Tällä ei kuitenkaan ole reaalista vaikutusta prosessin läpimenoon, jos prosessia puskuroidaan järkevästi. (Hopp & Spearman 2011, s.155–175)

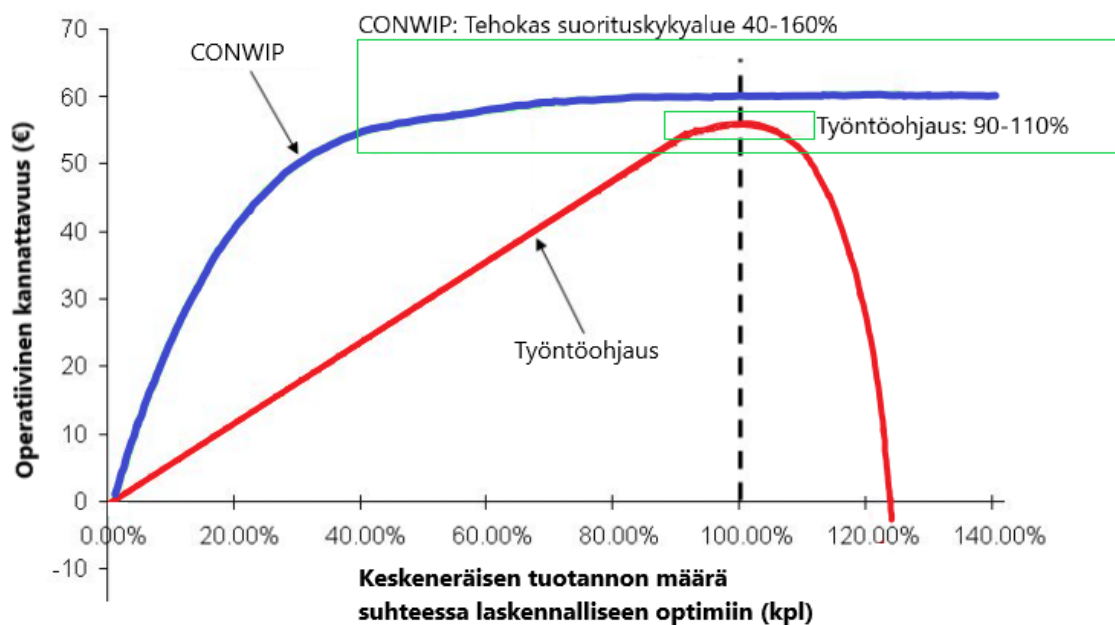
Imuohjauksen hyötynä verrattuna työntöohjaukseen on esimerkiksi sen automaattinen kyky reagoida tuotannon katkoksiin ilman uudelleenjärjestelytarvetta. Jos tuotantolinja kohtaa osapuutteita tai konerikkoja kärsii läpimeno joka tapauksessa, mutta aikataulutuksen siirtäminen ja koordinointi ei imuohjauksen tapauksessa syö johdon rajallisia resursseja. Imuohjatuissa järjestelmissä on myös yleisesti vähemmän hukkaa aiheuttavaa vaihtelua jatkuvasti ohjatusta WIP:n tasosta johtuen (Hopp ja Roof 1998). Imujärjestelmät sitovat myös vähemmän pääomaa keskeneräiseen tuotantoon ja niiden vasteaika on matalammasta keskeneräisestä tuotannosta johtuen nopeampi (Chen et al. 2007) Nopeammasta jaksoajasta pääseekin näin hyötymään ensisijaisesti asiakas, jonka toimitusvarmuus ja toimitusaika on merkittävästi lyhempiä imuohjatuissa tuotantojärjestelmissä. Sekvenssityyppiset imuohjatut järjestelmät ovat myös joustavampia tuotteiden muutoksille asiakaskohtaisille priorisoinneille.

Vaikka imuohjausta pidetään yhtenä Leanin keskeisenä periaatteena, on myös tapauksia joihin se ei sovellu. Työntöohjattuja järjestelmiä voidaan käyttää esimerkiksi pitkän välimatkan logistiikassa ja uustuoteprojektien toteutuksessa (Liker 2004, s. 110-111). Etukäteen sovittu aikataulutus mahdollistaa laajojen sidosryhmien hallinnan ja tukee esimerkiksi tuotannon ylösajoja ja uustuoteprojektien lanseerausta. Leanin mukaan tuotantoon pyritään valitsemaan toimivin ohjaustapa, ja tällöin esimerkiksi CONWIP-ohjaus voi olla tehokas hybridimuoto tuotannon kehittyessä kohti tehokkaampaa tuotantovirtausta.

Laadun näkökulmasta imuohjaukseen pohjautuvat järjestelmät ovat nopeammin reagoivia (Gong, Yang & Wang 2014). Jos tuotelaadussa esiintyy puutteita, on virheellisiin osiin reagointi nopeampaa, koska keskeneräistä tuotantoa on kesken vähemmän. Yllä avatun jonoutumisen vuoksi virheellisten osien logistiikka ja korvaus on helpompi toteuttaa matalamman WIP:n ympäristössä. Matala WIP mahdollistaa myös toimittajalaadun kattavamman valvonnan, kun töiden aloittaminen tapahtuu myöhemmin samalla mahdollistaen suuremman aikaikkunan toimittajalaadun mittaukselle. Kuten osapuutteiden kohdalla jo käsiteltiin, työntöohjaukseen verrattuna tuotantolinjassa esiintyvät puutteet näkyvät nopeammin ja rajummin, vaikka niiden vaikutus läpimenoon on yhtä suuri. Tämä luo enemmän kiinnostusta laadun parantamiseen ja hukan vähentämiseen. Laadun

kustannuksia tulisikin arvioida viiallisen osan lisäksi huomioimalla myös menetetty tuotantokapasiteetti, viivästynyt asiakastoimitus ja reklamaatioihin käytetty työpanos. Näin yksittäisen virheellisen osan kustannus ylittää usein monin verroin osan hankinta-arvon.

CONWIP-ohjauksen tärkein etu suhteessa työntöohjauksiin verrattuna on niiden kyky toimia taloudellisesti kannattavammin kaikilla valituilla WIP:n tasoilla. (Spearman & Zazanis 1992) Tämä tarkoittaa erityisesti sitä, että valitusta keskeneräisen tuotannon tasosta huolimatta CONWIP-ohjaus tuottaa taloudellisesti parempia tuloksia aikaisemmin mainituista matalammista laatu-, muutos- ja pääomakustannuksista johtuen. Tätä kestäväen kannattavuuden eli ”Law of CONWIP Robustness” -käsitettä on havainnollistettu alla olevassa kuvassa 6. Sen kantavana ideana on, että CONWIP-järjestelmällä saavutetaan parempi taloudellinen kannattavuus kaikilla keskeneräisen tuotannon tasoilla.



Kuva 6. CONWIP-ohjaus kykenee optimoimaan taloudellista kannattavuutta laajalla 40-160% alueella. Vastaavasti työntöohjatut tuotantojärjestelmät kykenevät korkeaan kannattavuuteen vain kapealla 90-110% alueella suhteessa optimaaliseen WIP:n määrään (Perustuu lähteeseen Hopp & Spearman 2011, s. 372; Spearman & Zazanis 1992; Jensen 2011).

Toyota on pyrkinyt vähentämään laatupuutteiden aiheuttamaa voimakasta vaihtelua panostamalla erityisesti toimittajien komponenttien laadukkuuteen. ”Just In Time”-metodin tuomat edut perustuvat tehokkaaseen logistiikan ja tuotannon ohjaukseen, jossa seuraavassa luvussa käsiteltävä vaihtelu on pyritty minimoimaan. Tuotannonohjauksen näkökulmasta JIT on vaikea toteuttaa ja ylläpitää ilman korkeaa laatutasoa sekä Kanban-ohjausta. JIT:n generoimia hyötyjä kuten nopeampaa reagoitua, kevyempää pääoman tarvetta ja parempaa asiakasvastetta pystytään kuitenkin kopioimaan tehokkaasti myös CONWIP-ohjauksella. Itse CONWIP-ohjauksia voidaan toteuttaa hallitusti esimerkiksi tilastollisella läpimeno-ohjauksella (Hopp & Roof 1998). Tilastollisia ohjausmetodeja käsitellään tarkemmin luvussa 2.2.3.

Imu ja työntöohjauksien etua vertailtaessa on tärkeää ymmärtää, että CONWIP-ohjauksien etu on sitä merkittävämpi mitä epästabiliimpi nykyinen tuotantoympäristö on. Hopp ja Spearman (2011, s. 356-379) korostavat, että tuotantoprosessin toiminnan kannalta kriittistä on sen toimintaympäristö. Jos vertaillaan kahta tuotantojärjestelmää, joissa molemmissa on erinomainen osasaatavuus, komponenttien laatutaso ja kapasiteetin riittävä mitoitus huomataan, että imuohjauksien hyöty suhteessa työntöohjauksiin jää melko vähäiseksi. Keskeistä on, että tuotantokapasiteetti ja toimittajien komponenttien toimitusajakadistribuuutio on mitoitettu oikein tilausten aikataulutusten suhteen myös työntöohjauksilla toimivissa tuotantojärjestelmissä. Jos nämä ehdot eivät täyty, ovat CONWIP-ohjatut tuotantojärjestelmät selkeästi työntöohjattuja järjestelmiä tehokkaampia niin läpimenolla kuin jaksoajallakin mittana. (Hopp & Spearman 2011, s. 356-379)

Työntö- ja imuohjauksen keskeinen ero voidaan tiivistää sopivaan loppukaneettiin: Imuohjaus ohjaa keskeneräistä tuotantoa ja mittaa läpimenoa, kun taas työntöohjaus ohjaa läpimenoa ja mittaa keskeneräistä tuotantoa. Sekä työntö- että imuohjaukset vastaavat asiakaskysyntään minimivasteajalla, mutta imuohjaukset asettavat työt tuotantolinjan läpi kulkevaan jonoon vastepriorisoinnin mukaan, kun taas työntöohjaus pyrkii sovittamaan priorisoidun tilausaikataulun yhteen käytännön tuotantokapasiteetin kanssa. (Hopp & Spearman 2011, s. 356-379.)

2.1.4 Vaihtelu

Vaihtelu voidaan määritellä mitattavien arvojen yhdenmukaisuudeksi yli tarkastelujakson (Hopp & Spearman 2011, 264-306). Vaihtelua esiintyy kaikkialla. Tämän tutkimuksen osalta tuotannon mittaus sisältää valtavasti vaihtelua joka on peräisin sekä järjestelmän sisäisistä tekijöistä mutta myös kohdeyrityksen toimittajakentän tuotantoprosesseista.

Vaihtelu voi olla sekä satunnaista että ei-satunnaista. Usein ei-satunnaista vaihtelua käsitellään satunnaisena, koska puutteellisten tietojen takia ei ymmärretä sen muodostumisen syitä. Tuotantoprosessia tarkasteltaessa vaihtelu koostuu suurelta osin 5 komponentista: luonnollinen vaihtelu, laadullinen vaihtelu, satunnaiset katkokset, huolto ja asetusajat sekä operaattorin käytettävyys.

Vaihtelun suuruutta voidaan arvioida määrittämällä niin sanottu variaatiokerroin c (Coefficient of Variation). Variaatiokerroin voidaan määrittää mittausprosessista jakamalla mittausarvon keskihajonta σ sen keskiarvolla t (kaava 4). Mitattavan arvon keskihajonta kuvastaa keskimääräistä poikkeamaa keskiarvosta ja se voidaan laskea summaamalla mittausjoukon E kaikkien arvojen μ erotus saman joukon keskiarvosta x ja korottamalla tämä arvo neliöön (kaava 3). Saatavan varianssin arvon neliöjuuri on keskimääräistä poikkeamaa keskiarvosta ilmentävä keskihajonta.

$$\sigma^2 = E(x - \mu)^2 \quad (3)$$

$$c = \frac{\sigma}{t} \quad (4)$$

Tarkastelemalla mittausarvoja variaatiokertoimen c mukaan voidaan mittaustietoja luokitella matalan, keskimääräisen tai korkean vaihtelun jakaumiin (kuva 7). Hopp & Spearman ovat luokitelleet tuotantoparametrejä koskevan vaihtelun alla olevan kuvan mukaan (2011, s. 264-306).

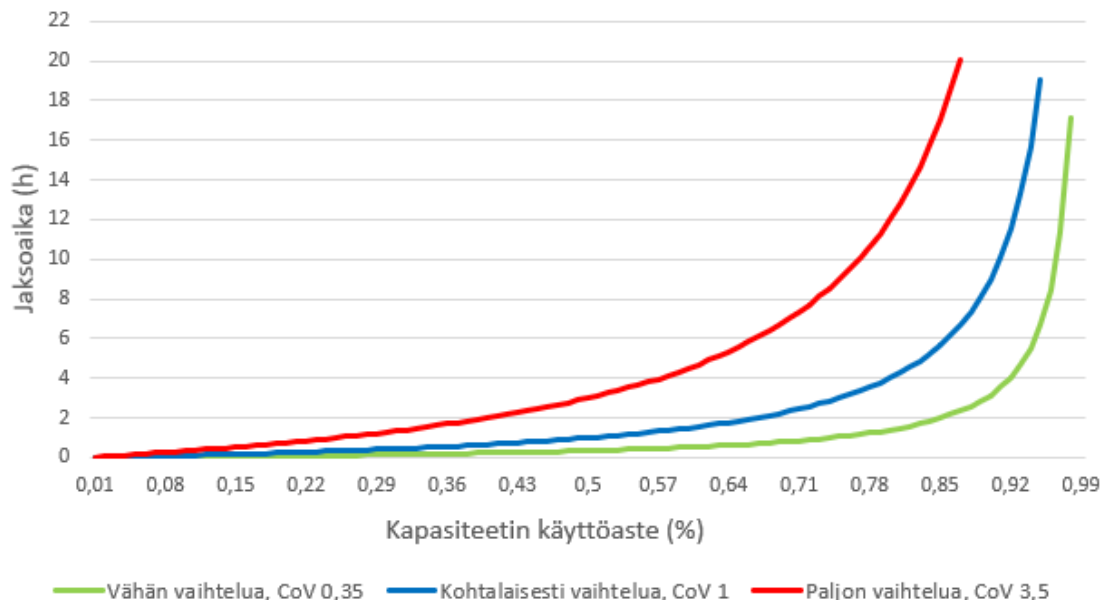
Variaatiokertoimen suorituskykykorrelaatio



Kuva 7. Variaatiokertoimen tulkinta operatiotieteessä (Hopp & Spearman 2011, s. 269)

Kuvassa 8 nähdään hyvin, miten eri vaihtelun lähteistä summautuva tuotannon kokonaisvaihtelu vaikuttaa merkittävästi tuotannon jaksoaikaan käyttösuhdetta nostettaessa. Matala vaihtelun taso mahdollistaa korkeamman resurssitehokkuuden ja käyttöasteen ilman jaksoajan radikaalia kasvua. Toisin sanoen, vaihtelu heikentää kysynnän ja siihen vastaavan tuotoksen yhdenmukaisuutta ja lisää siten tuotantojärjestelmän hukkaa eli menetettyä liikevaihtoa.

Vaihtelun vaikutus tuotantovirtaukseen



Kuva 8. Variaatiokertoimella on merkittävä vaikutus tuotannon läpimenoon ja asiakasvasteeseen. Tuotantoprosessin vaihtelun pienentäminen mahdollistaa käyttösuhteen noston (perustuu lähteeseen Hopp & Spearman 2011, s. 280–300)

Myös Leanin näkökulmasta vaihtelu edustaa keskeistä ongelmaa yksiosaiselle tuotantovirtaukselle. Leanin määritelmän mukainen ”epätasaisuus” aiheuttaa merkittävästi sekä varsinaisen tuotantokapasiteetin että henkisten resurssien hukkaa. Vaihtelua pyritään Leanin näkökulmasta pienentämään esimerkiksi tuotantovirtauksen tasapainotuksella. Tuoteportfolion tasainen ajallinen hajautus vähentää tuotannossa esiintyvää kuormitusvaihtelua. Vaihtelua vähentää myös Leanissa painotettu työvaiheiden standardointi. Standardoinnilla tähdätään korkeamman laadun lisäksi tasaisen virtauksen edistämiseen työvaihetasolla. Vaihtelun pienentäminen edistää kappaleessa 2.1.3 käsiteltyjen varastojen pienempää kokoa ja tuotantokapasiteetin maltillisempaa mitoittamista. Jos esimerkiksi asiakaskysyntää kyetään tasaamaan tuotantoprosesseissa helpottaa se tuotantojärjestelmän tasaista kuormitusta ja se edesauttaa tuotantokustannusten hillitsemistä. (Liker 2004, 113-127)

Vaihtelun syntyminen voidaan jakaa karkeasti viiteen lähteeseen (Hopp & Spearman 2011, s. 280-300). Ensimmäinen viidestä yleisimmästä vaihtelun lähteestä: luonnollinen vaihtelu, johtuu esimerkiksi materiaalissa olevista eroista, ammattitaidollisista vaihtelevuudesta, työvälineiden kulumisesta ja näistä tekijöistä summautuvista pienistä eroista prosessointiajassa. Se ei sisällä asetusaikojen vaihtelua tai ulkoisia tekijöitä kuten häiriöitä.

Toisena vaihtelun lähteenä oleva laadullinen vaihtelu (rework) johtuu myös materiaali ja ammattitaitokohtaisista eroista, mutta sillä tarkoitetaan uudelleen tehtävää työtä, kun jo käytetyn prosessiajan tulokset tarvitsevat lisätyöstöä puutteellisen laadun vuoksi. (Hopp & Spearman 2011, s. 275-278.) Laadulliset vaihtelut aiheuttavat siten oman vaihtelukertoimensa prosessiaikaan. Laadun osuus tuotantoprosessin kokonaiskustannuksiin voidaan määrittää esimerkiksi laskemalla tuotteiden puutteellisen laadun korjaukseen käytettyä aikaa ja huomioimalla samalla kapasiteetin käytöstä aiheutuva menetetty liikevaihto. Laadullista vaihtelua voidaan mallintaa myös laskemalla sille oma käytettävyysskerroin. Toisena vaihteluna on verrata nykyistä suorituskykyä ja liikevoittoa samoilla resursseilla saavutettavaan laskennalliseen optimisuorituskykyyn vaihtelu huomioituna. (Hopp & Spearman 2011, s. 280-300)

Tuotantokatkokset voidaan jakaa ennalta tiedettyihin ja satunnaisiin. Kun työntekijä vaihtaa työstökoneeseen uuden teräpalan, kyseessä on ennalta tiedetty katkos. Kun työstökone rikkoutuu äkisti sähkömoottorin elinkaaren loppuessa, kyseessä on satunnainen ennustamaton katkos. Aivan kuten satunnaisten ja tunnettujen vaihtelun lähteiden tapauksessa, useimmat satunnaiset ennustamattomat katkokset ovat kuitenkin todellisuudessa ennustettavissa riittävän pitkällä aikajänteellä tarkasteltuna. Kaikille kriittisille tuotantojärjestelmän toimilaitteille voidaan määrittää elinkaari ja vikatiheys. Näiden perusteella voidaan suunnitella järkevä kustannuksia pitkällä aikavälillä optimoiva huolto-ohjelma, minkä avulla ennustamattomat tuotantokatkokset saadaan minimoitua (Hopp & Spearman 2011, s. 265-277; Zhou et al. 2017.)

Jos tuotannossa esiintyviä satunnaisia katkoksia mitataan säännöllisesti esimerkiksi laatu-
taulukujen avulla, voidaan mittausdataa hyödyntää laskemalla tuotantokatkosten vaiku-
tusta keskeisiin suorituskykyparametreihin kuten läpimenoon tai keskeneräisen tuotan-
non määrään. Katkosten keston ja niiden korjaamiseksi tehtyjen toimenpiteiden keski-
määräisestä kestopista voidaan laskea niin sanottu käytettävyyssaste A (kaava 5). Käytettä-
vyys on teollisuudessa käytetty suorituskykymittari, millä mitataan esimerkiksi rikkoutu-
misesta aiheutuvaa liikevaihdon menetystä ja rakennetaan tuotantojärjestelmän suoritus-
kyvyn kestävyyttä. Käytettävyys lasketaan jakamalla keskimääräinen vikaantumisaika
 m_f keskimääräisen vikaantumisaajan ja keskimääräisen vian korjausajan m_r summalla
(Hopp & Spearman 2011, s. 271-275.)

$$A = \frac{m_f}{m_f + m_r} \quad (5)$$

Neljäntenä vaihtelutekijänä ovat tuotantokatkokset ja asetusajat. Tämä vaihtelutekijä ai-
heutuu normaalista kulumisesta, kun toiminnan ylläpitämiseksi tuotantoa pysäytetään tar-
koituksella osien asetuksen ja huollon vuoksi. Katkoksista voidaan määrittää vaihteluker-
toimet, jotka ottavat huomioon asetusajan ja sen vaihtelun osana kokonaisvaihtelua. Yllä
selitetty ennakoivien huolto-ohjelmien implementointi tuo useimmat satunnaiskatkokset
suunniteltujen katkosten piiriin. Merkittävimpänä etuna tällä on huoltojen järkevä ajoitus
ja resursointi. Hallitulla ajoituksella varmistetaan riittävä työvoiman, huoltohenkilöstön
ja varaosien saatavuus. Suuret teollisuuslaitokset käyttävät usein laajoja ennakoivia
huolto-ohjelmia esimerkiksi lomakausien aikana. Näillä minimoidaan hukattu henkilöka-
pasiteetti ja varmistetaan tuotantoprosessin yhtämittainen toiminta kiireellisen tuotanto-
kauden aikana. (Hopp & Spearman 2011, s. 265-277)

Viidentenä yleisenä vaihtelua aiheuttavana tekijänä on operaattorin käytettävyys. Sitä ar-
vioitaessa on syytä huomioida mikä on tuotantoprosessin toteuttamiseen tarvittavan työn-
tekijän luonnollinen käytettävyys. Tällä tarkoitetaan tuottavaan työhön käytettävissä ole-
vaa työaikaa, jonka operaattori on työpisteellään valmiina työskentelemään. Operaattorin
käytettävyttä voidaan parantaa kehittämällä tuotantosysteemiä niin, että työskentelyolo-
suhteet aiheuttavat vähemmän vaihtelua, ja siten nominaalisen ja luonnollisen proses-
siajan erotus on pienempi. (Wheeler 2000.)

Vaihtelua torjuvan kapasiteettiteorian mukaan läpimeno ja matalan keskeneräisen tuo-
tannon saavuttamiseksi on kolme keskeistä tekijää. Ensimmäisenä tekijänä on mitoittaa
tuotantolinja niin, että jokaisen linjan vaiheen tuotantokapasiteetti on edellistä vaihetta
asteen suurempi. Vaihtelun vaikuttaessa prosessiin, on lähtevien prosessiaikojen oltava
keskimäärin nopeampia kuin saapuvien, muuten tuotantolinjan vaihe kerää keskeneräistä
tuotantoa. Kasautuvan tuotannon purkamiseen tarvitaan ylikapasiteettia esimerkiksi yli-
töiden muodossa, mikä omalta osaltaan lisää tuotantojärjestelmässä esiintyvää vaihtelua
eli yli ajan menetettävää liikevaihtoa. Tyypillisesti tämä lainalaisuus ilmenee tuotanto-
prosessien loppupäässä esimerkiksi tuotetestauksessa, jonka riittämätöntä kapasiteettia

pyritään kompensoimaan jatkuvilla ylitöillä. (Hopp & Spearman 2011, s. 264-306.) Ylitöiden säännöllistä käyttöä osana kapasiteetin kestävästä mitoitus käsiteltiin kappaleessa 2.1.2.

2.2 Laatu tekniikka

Tässä tutkimuksessa mitataan tuotannon virtausta. Kappaleessa 2.1.4 käsiteltiin vaihtelun vaikutusta ja sen huomioimista osana tuotantojärjestelmää. Tämän vuoksi on tärkeää ymmärtää, miten vaihtelu näkyy käytännössä heikentyneenä laatuun sekä prosesseissa että tuotteissa. Vaihtelu tuote ja prosessilaadussa näkyy suoraan tuotantovirtauksen mittauksissa, kun puutteelliset osat viivästyttävät tuotteiden valmistumista ja kasvattavat keskenäisen tuotannon määrää. Laadullisilla haasteilla on selkeä kytkös myös kappaleessa 2.1.2 käsitelyyn Leaniin. Hukan, epätasaisuuden ja ylikuormituksen poistaminen edesauttavat laatu puutteiden korjaamista ja puutteiden vähenemisen vaikuttaa suoraan tuotannon virtaukseen ja yrityksen taloudelliseen kannattavuuteen. (Liker 2004, s. 72-101; Deming 2000, s. 19-96)

Leanin näkökulmasta laatu on ehdoton vaatimus varastojen pienentämiselle ja juuri oikeaan aikaan paikalle tulevalle tuotantovirtaukselle. Mitä sulavampaan yksiosaiseen tuotantovirtaukseen tuotantojärjestelmä kykenee, sen nopeammin tuotantojärjestelmän laatuongelmat tulevat esille käytännön toiminnassa. Toyotan tuotantojärjestelmässä on keskeistä myös se, että menetetty liikevaihto on toisarvoista suhteessa esiintyvien laatuongelmien korjaukseen. Tämä periaate on saanut vahvoja vaikutteita Demingin laatuopeista. (Liker 2004, s. 128-139; Deming 2000)

Laadun tarkoitus on vastata jatkuvasti muuttuviin ja erilaisiin arvofunktioiden pohjalta koostuviin asiakastarpeisiin. Laatu voidaankin siis määrittellä yksinkertaistaen kyvyksi tyydyttää asiakastarve (Juran 2016). Samalla laatu voidaan määrittellä myös kokonaisvaltaiseksi tavaksi johtaa organisaatiota niin, että se kykenee toimimaan mahdollisimman kannattavasti erityisesti pitkällä aikavälillä. (Deming 2000, s. 19-96) Nämä tavoitteet eivät ole ristiriidassa keskenään vaan ne ovat oikeastaan sama asia. Kun organisaatio tuottaa kaiken sen mistä asiakas on valmis maksamaan, ollaan samalla pisteessä, jossa kiteytyy liiketoiminnan kannattavuuden optimi (Montgomery 2012).

Pitkäjänteisen liiketoiminnan luominen edellyttää asiakastarpeiden tyydyttämistä pitkällä aikavälillä. Jos tavoitteena on kehittää yrityksestä suuri ja kansainvälinen tai pitää yllä sen nykyistä asemaa, on yrityksen fokuksen keskityttävä aina asiakastarpeiden täyttämiseen. Useimmat toimialat ovat luonteeltaan monimutkaisia ja niissä vaihdettavat hyödykkeet ovat monimutkaisia ja hitaita innovoida. Tämän vuoksi liiketoiminnan keskittyessä usean vuoden ajan tuotteiden ja toistuvien asiakassuhteiden ympäristöön, ovat kvartaalitulokset heikko indikaattori yhtiön liiketaloudellisesta osaamisesta ja niiden painotus johtaa pitkän aikavälin kannattavuuden heikkenemiseen (Nelson 2013, s. 56-87; Tsurumi 1983). Nelsonin mielestä yritysten liiketaloudellinen osaaminen kiteytyy johdon kykyyn

ymmärtää vaihtelua ja sen luonnetta kaikissa liiketoiminnan prosesseissa (Deming 2000, s. 19-96). Nelson myös korostaa tieteellisten teorioiden hyödyntämistä. Liiketoiminnan päätösten pitää Nelsonin mielestä aina pohjautua mielipiteiden ja oletusten sijaan todistettuihin teorioihin ja sen tukemaan käytännön kokemukseen.

2.2.1 Laadun kokonaisvaltainen johtaminen

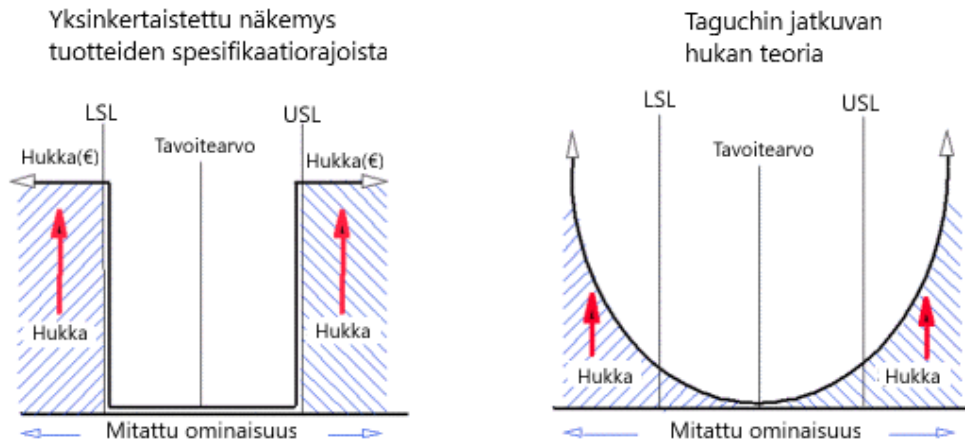
Laadun rakentamisen kulmakivenä pidetään pitkäaikaista tarvetta kehittää tuotteita ja toimintakulttuuria kilpailukyvyn varmistamiseksi. Avoimilla markkinoilla toimivat yritykset ovat alttiina jatkuvalla toimintaympäristön muutokselle, jonka vuoksi yrityksen on syytä ylläpitää jatkuvaa kehityskulttuuria. Laatu ei voida rakentaa tuotteisiin tarkastamalla niitä massoittain. Laatu on kustannustehokkaampaa rakentaa osaksi systeemiä standardoimalla työtapoja, parantamalla työvälineitä ja harjoittamalla aktiivista henkilöstön koulutuspolitiikkaa. (Deming 2000, s. 97-148)

Panostamalla näihin tekijöihin voidaan laajentaa kustannusnäkökulmaa valmistuskustannuksista tuotteiden kokonaiskustannusten optimointiin ja siten todellisen kannattavuuden pitkäaikaiseen kehittymiseen. On asiakastytyväisyyden kannalta huomattavasti tehokkaampaa ja halvempaa rakentaa laatu tuotantosysteemiin kuin yrittää pakottaa laatua lopputarkastuksilla. Mitä aikaisemmin laaturvirheet poistetaan tuotannosta ja palautetaan niiden lähteelle havainnoitavaksi, sitä vähemmän turhaa työtä viallisten tuotteiden kanssa joudutaan tekemään (Deming 2000, s. 19-96; Montgomery 2012).

Keskeisenä tekijänä vaihtelun vähentämisessä ja kannattavuuden parantamisessa ovat myös keskeisten toimittajasuhteiden kehittäminen ja laatutyöskentelyn ulottaminen osaksi toimittajakenttää (Summers 2010, s. 215-239). Pitkän aikavälin taloudelliset tulokset ovat parempia, kun hintapriorisoidusta hankinnasta siirrytään kokonaiskustannuksia painottavaan hankintaan (Deming 2000, s. 97-148; Juran 2016). Stabilisoimalla toimittajakenttää saavutetaan merkittäviä kustannushyötyjä tuotannon puolella, kun vaihtuvat toimittajat ja komponentt ominaisuudet, eivät pääse lisäämään haitallista vaihtelua tuotantoprosessiin.

Deming (2000) painottaa kirjassaan esimerkkien kautta, miten komponenttihankinnalle asetetut spesifikaatiot eivät yleensä vastaa lopputuotteen muodostaman systeemin komponenttikohtaisia vaatimuksia. Onkin siis yleistä, että komponentti voi vastata asetettuihin toimittajavaatimuksiin, mutta se ei sovi ilman sovitustyötä käytettäväksi tuotannossa. Näin käy esimerkiksi, kun tiiviste osuu sovittujen rajojen alarajalle ja tiivisteeseen käyttökohteena oleva putki on valmistettu toleranssien ylärajalle. Tällöin tiivisteen kyky sulkea järjestelmä on heikompi ja järjestelmä pettää nopeammin kuin optimaalisen mitoituksen tapauksessa. Vastaavasti hukkaa syntyy myös ajallisten rajojen sisällä, kun helposti ruostuva maalaamaton teräsrunko toimitetaan asiakkaalle 3 viikkoa ennen tarvepäivämäärää ja asiakas joutuu hiomaan rungon uudestaan ennen käyttöönottoa, koska runko on ruostunut pihalla odottaessaan maalauskelvottomaksi. Tämä komponentin ja ajan

lisäkoordinointi kuluttaa kalliita toimihenkilöresursseja ja samalla se nostaa kapasiteetin käyttöastetta, jolla on negatiivinen vaikutus tuotannon virtaukseen ja kapasiteetin mitoitukseen. Ominaisuuksien poikkeama tavoitearvosta ja tämän poikkeuman vaikutusta kustannuksiin voidaan mallintaa Genichi Taguchin (Wheeler & Chambers 2010, s. 144-150) heikkenevän arvofunktion mallilla (kuva 9).



Kuva 9. Komponenttien muodostaman systeemin edellyttämiin laatuvaatimuksiin ei voida vastata vain tarkkoja spesifikaatorajoja asettamalla, jos tavoitteena on systeemin todellisen suorituskyvyn saavuttaminen ja optimikannattavuus (Montgomery 2012; Wheeler & Chambers 2010, s. 144-150).

Hankinnalla on merkittävä vaikutus tuotannon virtauksen sujuvuuteen ja siinä esiintyviin laatupuutteisiin. Hankinnan ohjaavana tekijänä käytettävä reklamaatio, rework, ja toimitusvarmuuspohjaiset kokonaiskustannukset ovat kustannustehokkaampia pitkällä aikavälillä kuin hankintahintaa priorisoivat strategiat (Economic Institute of Japan 1982). TCO kustannuksia optimoiva lähestymistapa ottaa huomioon myös säännöllisesti tehtävien suunnittelumuutosten ja dynaamisten tilausmuutosten aiheuttamat ja tyypillisesti realisoituvat kustannukset. Näin varmistetaan, että hankintakilpailua ei voiteta jättämällä kaikki pyynnön ulkopuoliset palvelut kaupan ulkopuolelle ja veloittamalla näistä lisäpalveluista korkea hinta todellisen hankintahinnan heikon kannattavuuden korvaamiseksi. (Salmi 1990, s. 119-128, 140-151)

Merkittävää vaihtelua tuotantojärjestelmään aiheuttaa myös jatkuva työntekijöiden vaihtuvuus. Laskentatoimen keinoin on helppoa laskea kokeneiden työntekijöiden aiheuttamia kustannuksia suhteessa halvempaan työvoimaan. On kuitenkin aivan yhtä tärkeää ymmärtää, miten uusien työntekijöiden tuominen tuotantojärjestelmään heikentää järjestelmän suorituskykyä ja ennen kaikkea lisää vaihtelua, joka aiheuttaa laatupuutteita, viivästyksiä ja taas kerran menetettyä liikevaihtoa. Tämän vuoksi kaikkien työntekijöiden jatkuvasta koulutuksesta on järkevää pitää kiinni. Kouluttaminen parantaa työskentelymoraalia, yhtenäistää työskentelytapoja ja vähentää tuotantojärjestelmän kehittämisen kokemaa muutosvastarintaa. Koulutus myös vähentää sekä johtajien että työntekijöiden vaihtuvuutta, mikä parantaa yrityksen suorituskykyä vaihtelua vähentämällä. Koulutuksesta keskusteltaessa on tärkeää ymmärtää, että vain nykyisen tason ylläpitämiseksi

tarvitaan jatkuvaa koulutusta. Jos organisaation toimintatapoja halutaan kehittää eteenpäin, on investointeja yrityksen tärkeimpään pääomaan eli henkilökunnan osaamiseen lisättävä. (Deming 2000, s. 97–148)

Johdon tehtävänä on auttaa hyvin resursoituja työntekijöitä saavuttamaan parempia tuloksia. On kriittisen tärkeää, että yrityksen johto kouluttaa itseään ymmärtämään paremmin laatua ja osallistuu sen jälkeen laadun rakentamiseen osaksi yrityksen jokapäiväistä toimintaa. Laadun korkea taso vaatii johdolta jatkuvaa panostusta ja johdon pitkäaikaista työskentelyä. Laadun rakentamisen hedelmät näkyvät asiakastyytyväisyyden ja -uskollisuuden nousuna, reklamaatioiden vähentymisenä ja markkinaosuuden positiivisena kehityksenä. On tuotteiden laadun ja kannattavuuden kannalta kriittistä, että esimerkiksi tuotanto ja suunnittelu tekevät mahdollisimman paljon yhteistyötä ja tuntevat toistensa toimintaa mahdollisimman hyvin. Näin vältetään esimerkiksi epärealistisilta odotuksilta tai tilannekuvan vääristymiltä. (Deming 2000, s. 97-148)

Kehitystoiminnan tärkeimpiä ajureita on johdon vahva osallistuminen ja tuki. Näiden tekijöiden avulla laatuorganisaatio voi lisätä tietoisuuden tasoa organisaatiossa. Tietoisuus eli henkilökunnan koulutus ja informaation avoin jakaminen parantavat keskeisten laatuvaikutusten ymmärrystä ja ne toimivat siten keskeisenä edellytyksenä organisaation kehitysmotivaation kasvulle. Koulutuksen lisäämä ymmärrys ja motivaatio toimivat pohjana henkilökunnan ammattitaidon kehittämiseksi. Kun ammattitaitoa viedään eteenpäin laatuorganisaation ja johdon tukemana, on työntekijöiden mahdollista hyödyntää kehittyntä ammattitaitoaan ja motivaatiota tuottamalla tarkoituksenmukaisia tuotteita eli laatua. Kun laatu rakennetaan tuotteisiin työntekijälähtöisesti johdon vahvalla tuella, realisoituu tämä muutos tuottavuuden kasvuna. Tällöin toiminnan kokonaisvaltainen laadun kehittyminen painaa alas kustannuksia, jaksoaikoja ja esiintyvien ongelmien vaikuttavuutta. (Deming 2000, s. 97-148)

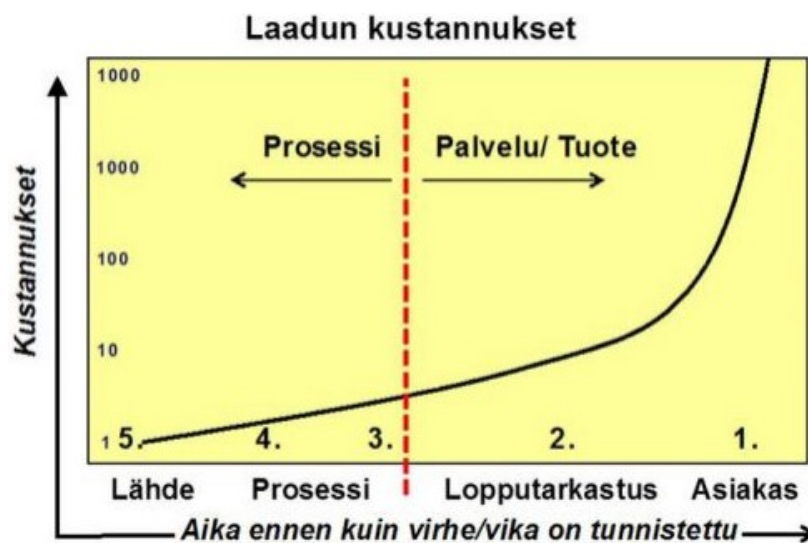
2.2.2 Laadun kustannukset

Laadun tärkeimpänä tavoitteena oleva kannattavuuden optimointi perustuu asiakasarvon tuottamisesta perustuviin empiirisiin tutkimuksiin. Tuotteiden kustannuksia arvioitaessa on yhtiön liiketoiminnalle keskeistä arvioida tuotteiden valmistuksen tai hankittujen resurssien elinkaaren kokonaiskustannuksia eli TCO (Total Cost of Ownership). Kokonaiskustannukset edustavat asiakkaille merkittävintä kustannuserää (American Society of Quality Control 1980; Deming 2000, s. 19-96).

Feigenbaumin (1977) tutkimusten mukaan 20-40% tuotannon kustannuksista syntyy vaihtelun aiheuttamasta puutteellisesta tuotelaadusta. Tämän lisäksi laadun todellisia kustannuksia tulisi arvioida menetettyjen sopimusten, liikevaihdon ja huonontuneen brändin ja sen uudelleen rakentamisen kustannusten kautta. Tuotelaadun aiheuttamat positiiviset ja negatiiviset henkilökohtaiset kokemukset voivat vaikuttaa merkittävästi johdon tai

ostohenkilökunnan liiketoiminnassa tekemiin päätöksiin (Cretu & Brodie 2005; Tekin et al. 2016; Faridah, et al. 2016.)

Jo tämän suuntaisten tutkimustulosten ja normaalin kuluttajakäyttäytymisen perusteella voidaan arvioida laadun kerrannaisvaikutuskustannusten suuruusluokkaa merkittäväksi. Kokonaiskannattavuuden kannalta on tärkeää myös ymmärtää, että laadun aiheuttamien kerrannaisvaikutusten, kuten menetetyn liikevaihdon, asiakasmenetysten, brändivahingon ja asiakkaiden kokeman vahingon vuoksi, laskentatoimen kustannusoptimointiin tähtäävät mallit eivät realisoitu positiivisesti yritysten pitkän aikavälin kannattavuuteen (Deming 2000, s. 19-96; Reynolds 1983; Juran 2016; Summers 2005). Tuotelaadussa esiintyvien haasteiden kustannusvaikutusta pystytään kuitenkin hillitsemään puutteiden nopealla havaitsemisella (kuva 10).



Kuva 10. Puutteellisen tuotelaadun aiheuttamat kustannukset kasvavat rajusti, jos puutetta ei huomata ennen asiakasrajapintaan siirtymistä (Deming 2000)

Laadun kustannukset voidaan vaikutuksen perusteella jakaa kolmeen tyyppiin. Näkyvät kustannukset kuten laatupuutteiden korjauksesta aiheutuvat palkat, tuotannon hävikki, takuukulut ja tarkastuskustannukset on helppoa laskea. Näiden mittaukseen voidaan käyttää suoria kustannusmittareita kuten rahaa tai aikaa. Toisena laadukustannusten tyyppinä ovat vaikeasti havaittavat kustannukset. Huono laatu johtaa usein ongelmien kiertämiseen esimerkiksi suurentamalla varastokapasiteettia, aloittamalla työt aikaisemmin ja varaamalla lisää kapasiteettia. Näiden resurssien pienentäminen kariutuu heikkoon laatuun, joka realisoituu esimerkiksi osapuutteina, toimitusvarmuuden heikkenemisenä ja asiakasyytyväisyyden laskuna. Kuvassa 13 visualisoituja vaikeasti havaittavia laatupuutteita voidaan seurata välillisesti esimerkiksi varaston arvon, odotusaikojen, hävikin ja tuotannon virtauksen käyttösuhteen avulla. (Salomäki 2003, s. 72-90)



Kuva 11. Laadun arvioitu vaikutus liikevaihtoon suhteutettuna (ASQ 2018; Deming 2000)

Viimeisenä laatukustannusten muotona ovat näkymättömät laatukustannukset, mitkä ovat ennen kaikkia menetettyjä liiketoimintamahdollisuuksia. Laadulliset ongelmat tuotteiden toimituksissa, imagossa, asiakaspalvelussa ja erityisesti tuoteongelmissa, mitkä aiheuttavat menetyksiä asiakkaan liiketoiminnalle aiheuttavat näkymättömiä lisäkustannuksia. Nämä laatukustannukset realisoituvat asiakkaiden menetyksenä, uusien asiakkaiden hankkimisen kustannuksina ja ennalta menetettynä liikevaihtona. Laatukustannukset realisoituvat myös työntekijöiden tehokkuuden heikkenemisenä, työmorailin heikkenemisenä, työhyvinvoinnin laskuna, arvokkaiden uusien lahjakkuuksien menetyksinä ja yhteistyömahdollisuuksien vaikeuksina. Näitä laatukustannuksia voidaan vertailla vain pitkällä aikavälillä välillisillä mittareilla kuten markkinaosuuden kehittymisenä tai asiakas tyytyväisyytenä. (Salomäki 2003, s. 72-90.)

Yhteenvedonä kustannuksista voidaan sanoa, että puutteellisen laadun kokonaiskustannukset sijoittuvat suuruusluokaltaan 20-40% osuuteen liikevaihdosta, kun taas korkean laadullisen suorituskyvyn omaavat organisaatiot käyttävät kokonaislaatuun vain 10-15% liikevaihdosta (American Society of Quality 2018).

2.2.3 Tilastollinen prosessiohjaus

Tuotantoa mitattaessa tuotetietoa kertyy helposti paljon. Rungas tietomäärä on suositeltavaa koska mittausten suurella lukumäärällä parannetaan mittauksen luotettavuutta ja pienennetään virhemarginaalin kokoa (Salomäki 2003, s. 72-90). Samalla suuri määrä tuotetietoa on kuitenkin työlästä analysoida yksitellen. Tämän vuoksi tilastolliset menetelmät ovat oleellisia tämän tutkimuksen toteutuksen kannalta.

Tilastollinen prosessiohjaus eli SPC (Statistical Process Control) mahdollistaa mitattavien parametrien käyttäytymisen arvioinnin hyödyntäen todennäköisyysjakaumia. Todennäköisyysjakaumiin perustuvien tilastollisten menetelmien avulla mitattuja parametreja voidaan analysoida ja suodattaa. SPC:llä pyritään luotettavan tuotantodatan keräykseen ja tuotannon parempaan ennustettavuuteen. Ennustettavuutta kehitetään mittaamalla tuotannon keskeisiä suorituskykyparametreja, mitkä ovat peräisin usein asiakasvaatimuksista. SPC:n avulla voidaan määrittää tarkasteltavien prosessien suorituskyky ja siinä ilmenevä vaihtelu. Suorituskyvyn systemaattinen mittaus helpottaa vaihtelua aiheuttavien tekijöiden löytämistä ja siten suorituskyvyn kehittämistä (Wheeler 2000). Tilastollisen prosessiohjauksen strategisena tavoitteena onkin rakentaa tuotantojärjestelmän laadun- tuottokyky sellaiselle tasolle, missä huonon tuotteen syntyminen prosessista on tilastollisesti hyvin epätodennäköistä (Salomäki 2003, s.165-230).

Tilastollinen prosessiohjaus on kehittynyt yritysten jatkuvaan tarpeeseen parantaa tuotelaatua, kustannustehokkuutta ja asiakasarvon luomista. Tähän SPC:llä pyritään tuotantoprosessin totuudenmukaisella mittauksella. Mittauksen jälkeen voidaan poistaa prosessia poikkeuttavat erityisyyt. Jäljelle jäävän normaalin vaihtelun aiheuttamaa poikkeamaa voidaan pienentää kohdistamalla tuotantoprosessiin jatkuvan parantamisen kehitysprojekteja. Näiden projektien konkreettiset tulokset näkyvät prosessimittauksissa normaalin vaihtelutason laskuna ja siten ohjausrajojen suppenemisella. (Wheeler 2000)

Vaihtelutason lasku parantaakin prosessin todellista ja laskennallista suorituskykyä, mikä voidaan todentaa rakennetulla mittaristolla (Hopp & Spearman 2011, s. 399-428). Näillä toimilla tähdätään prosessilaadun korkeaan tasoon, missä ulkoiset tai satunnaiset tekijät eivät uhkaa tuotantoprosessin suorituskykyä. Tuotantoprosessin voidaan ajatella olevan vakaa, kun sen pitkän aikavälin keskiarvo ja vaihtelu pysyy lähes muuttumattomana (Wheeler & Chambers 2010). Kun erityisyyt saadaan poistettua mittauksen ja ohjausrajojen avustamana voidaan tuotantoprosessi saada hallintaan. Vakaan tuotantoprosessin hallinta mahdollistaa tilastollisen ohjauksen käytön, jonka avulla voidaan erottaa tuotantoprosessin luonnollinen vaihtelu prosessia poikkeuttavista erityisyyistä. Erityisyyden poisto stabilisoi prosessia luonnollisen vaihtelun tasolle (Sharma & Kharub 2014). Samalla rakennettu prosessiohjaus kykenee havaitsemaan hitaasti prosessiin vaikuttavat tekijät ennen kuin ne aiheuttavat tuotteiden laatuutteiden syntymisen. (Salomäki 2003, s. 165-230.)

Myös vaihtelun vähentämiseen tähtäävä ”Six Sigma”-menetelmä tukee merkittävästi tilastollista prosessiohjausta. Six Sigmalla tarkoitetaan tilastotieteeseen perustuvaa laatujohtamisen työkalua, jolla pyritään mittaamaan ja poistamaan prosesseissa esiintyviä virheitä. Ilmenevää satunnaisuutta erotteleva Six Sigma pyrkii tunnistamaan tuotantoprosessin vaihtelun lähteet ja pienentämään vaihtelua prosessin lopputuloksissa. Six Sigma onkin siis ennen kaikkea mitattavan parametrin suorituskyvyn parantamismenetelmä. Siinä missä läpi teoriaosuuden käsitelty Lean keskittyy lisäarvoa tuottavan tuotantovirtauksen

kehittämiseen, keskittyy Six Sigma yksittäisten tuotantoprosessien vaihtelun minimoimiseen. (Hopp & Spearman 2011, s. 412-414; Liker 2004, s. 295-297.)

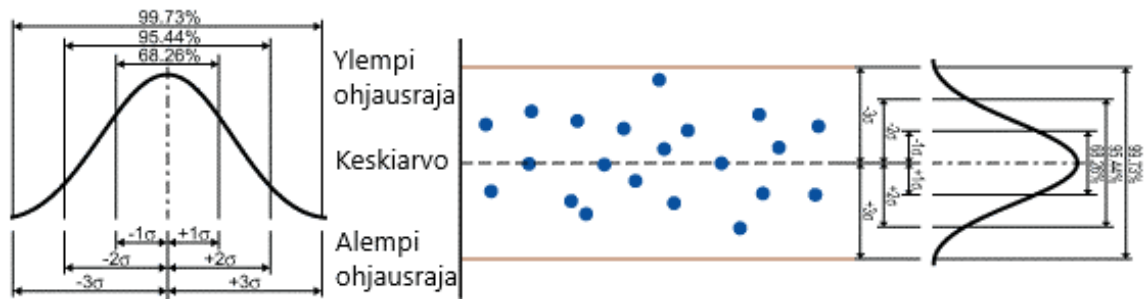
Six Sigman keskeisinä työkaluina ovat DMAIC-menetelmä (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) ja DOE (Design of Experiments) eli koesuunnittelu. DMAIC keskittyy ongelman juurisyiden analyysiin ja se pyrkii ratkaisemaan ne tilastollisia keinoja hyödyntämällä (Uluskan 2015; Schroeder et al. 2007). Koesuunnittelu pyrkii kokeellisesti todentamaan yksittäisten tai usean parametrin vaikutusta systeemin toimintaan (Geng 2015). Molemmat työkalut keskittyvät siis hyödyntämään matemaattisia teorioita ja faktaperusteista tietoa perinteisesti intuitiolla käsiteltävien ongelmien ratkaisuun (Hopp & Spearman 2011, s. 412-414.)

Jos prosessia aletaan säätää väärillä ohjausrajoilla, eivät säätötoimet johda tavoiteltuihin tuloksiin. Jos säädetään liian tiukkojen ohjausrajojen perusteella saattavat luonnollisen vaihtelun huiput näyttää erityisyyiltä, ja tällöin säädetään kohinan perusteella joka johtaa prosessissa esiintyneen vaihtelun kasvuun (Wheeler 2000). Tätä prosessin yliohjausta kutsutaan myös I-lajin virheeksi. Mikäli ohjausrajat ovat taas liian leveät, niin osa kehitysprojektin tarvitsevista erityisyyistä voidaan tulkita ohjausrajojen sisällä jääväksi luonnolliseksi kohinaksi, jolloin nämä erityisyyt jatkavat prosessin poikkeuttamista luonnollisesta stabiilista tasosta. Tätä kutsutaan II-lajin virheeksi eli aliohjaukseksi. (Deming 2000.)

Samalla prosessissa voi tapahtua erityisyyyn johdosta myös keskiarvollisia siirtymiä, joita ei huomata liian leveistä ohjausrajoista johtuen. Tilastollisen prosessiohjauksen ohjausrajat (kuva 12) voidaan laskea alla olevilla kaavoilla 7-8, joissa μ on mittauspisteiden keskiarvo, σ niiden keskiahajonta ja n mittauspisteiden lukumäärä. (Deming 2000, s. 309-370; Montgomery 2012; Wheeler & Chambers 2010, s. 64; Salomäki 2003, s. 207.)

$$LCL = \mu - 3\sigma \quad (6)$$

$$UCL = \mu + 3\sigma \quad (7)$$



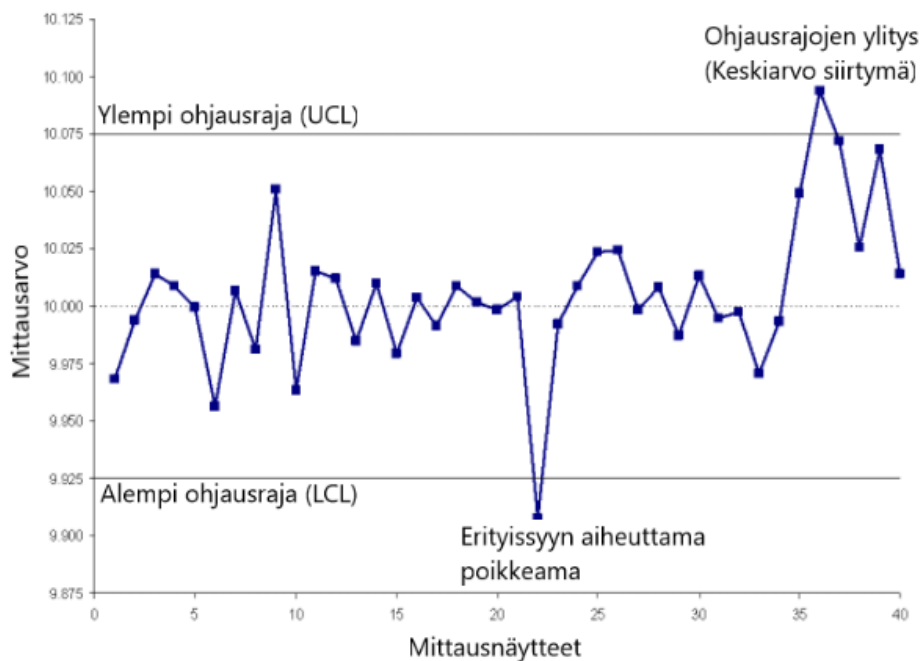
Kuva 12. ± 3 Sigman ohjausrajat tuotantoprosessille (Berardinelli 2018)

SPC:n apuna usein käytettävän koesuunnittelun (Design of Experiments) tarkoituksena on kokeellisten menetelmien avulla tunnistaa prosessin suoritusparametrien välisiä

riippuvuussuhteita. Osana Six Sigman kehitystyökaluja DOE:ssa vaihdetaan systeemiin vaikuttavien parametrien arvoja ja pyritään täten minimikoemäärällä tunnistamaan systeemissä esiintyviä keskinäisvaikutuksia.

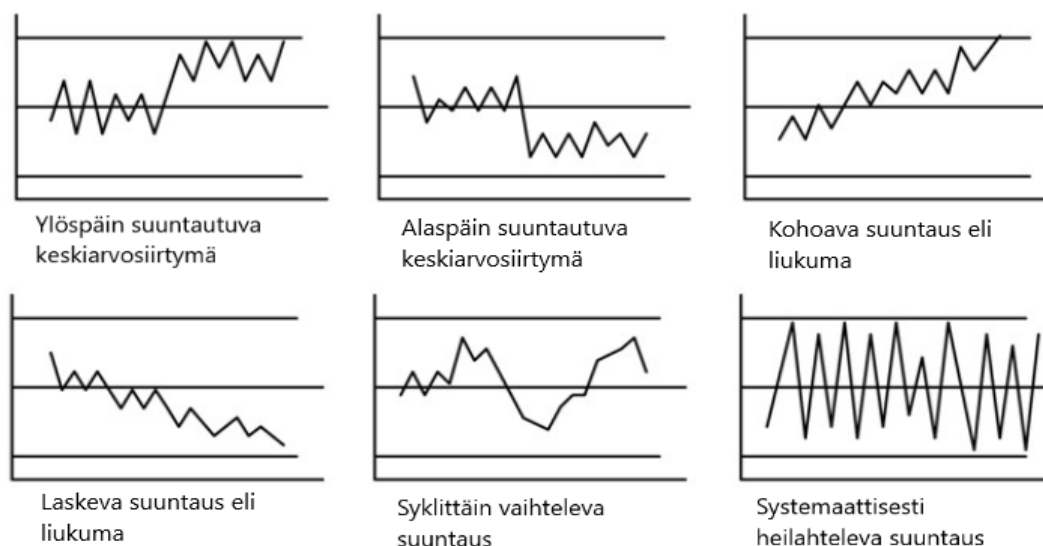
Systeemiin kohdistuvat erityisyyt voivat olla esimerkiksi olosuhteiden muutoksia. Tuotteiden valmistukseen käytettävien koneiden rikkoutuminen voi esimerkiksi merkittävästi pidentää tuotteiden prosessiaikaa. Kyseessä on systeemistä poistettava erityisyys, jonka näkymistä ohjauskortissa on havainnollistettu kuvassa 13. Valmistavien laitteiden analysointi ja kehitys edustaa taas luonnollisen vaihtelun pienentämiseen tähtäävää toimintaa. Prosessissa tapahtuva muutos kuten kokoonpanolaitteiston vaihto saattaa realisoitua prosessiohjauksessa keskiarvomutoksena (kuva 13). Jos keskiarvomuuotos johtuu tarkoituksellisesta muutoksesta, on tarpeellista laskea prosessin ohjausrajat uudelle heilahtelun tasolle. Jos kyseessä on taas aito muutos olosuhteissa tai tekemisessä, tulee erityisyys poistaa prosessin stabiloimiseksi. Ohjattavan prosessin vaihteluväli ja ohjausrajat kertovat prosessin nykyhetken suorituskyvystä.

SPC Ohjauskortti



Kuva 13. Tilastollisen prosessiohjauksen ohjausrajat. Yksittäinen erityisyys näkyy ohjattavassa prosessissa piikkinä ja pysyvästi muuttunut erityisyys keskiarvon muutoksena (perustuu lähteeseen Hopp & Spearman 2011, s. 399-424; Wheeler & Chambers 2010; Montgomery 2012)

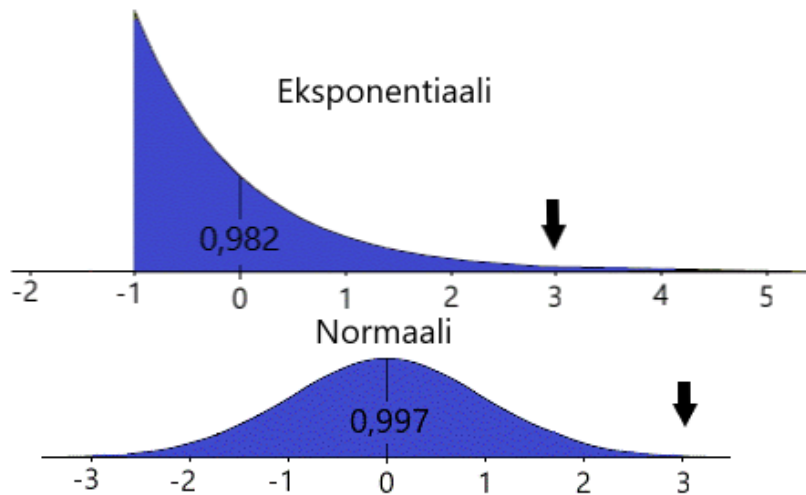
Prosessin suorituskykyä voidaan parantaa kohdistamalla normaaliin vaihteluun parannusprojekteja, joissa selvitetään normaalin vaihtelun lähteitä ja kohdennetaan näihin kehitystoimenpiteitä. Tämä laskee prosessin yleistä stabiilia vaihtelutasoa ja parantaa siten enustettavuutta. (Deming 2000, s. 309-370.)



Kuva 14. Tilastollisessa prosessiohjauksessa yleisesti esiintyviä mittausparametritrendejä. Trendeistä voidaan ennustaa prosessin tulevaa käyttäytymistä ja reagoida sen mukaan, jos prosessin arvot ylittävät ohjausrajat. Trendit tarjoavat myös kriittistä tietoa prosessin suorituskyvystä ja sen muutoksista (Amsden, Butler & Amsden 1998; Butler 2016).

Tilastollisten metodien hyödyntämiseen kuuluu kattava tiedonkeruu ennen tiedon hyödyntämistä päätöksenteon tukena (DeFeo & Juran 2014, s. 205–207). Mittausdataa kerätessä on tärkeää muistaa, että kaikki kerätty tieto muodostaa suurena määränä omanlaisensa jakauman (kuva 17). Yleisimpiä jakaumia ovat normaalijakauma, eksponentiaali-jakauman, binomijakauma ja Poisson-jakauma. Normaalijakauma on käytetyin näistä jakaumista, koska se mallintaa tarkasti prosessien luonnollista käyttäytymistä ja satunnaista hajontaa tarkastelujoukon yli. Eksponentiaali-jakauman on tyypillinen erityisesti aikasarjoja ja kuluva-aikaa tarkasteltaessa. Binomijakaumalla voidaan mallintaa esimerkiksi raja-arvojen ylittämistä. Jos tarkastellaan, kuinka moni tuote läpäisee laatutestin, tuloksena on kahden vaihtoehdon binomijakauma läpäisseiden ja hylättyjen tuotteiden kesken. Toisaalta, tarkasteltaessa tarkkaan rajattuja lukuarvoja, kuten kokonaisia työpäiviä, on jakauman muotona diskreetti Poisson-jakauma. (Wheeler 2000.)

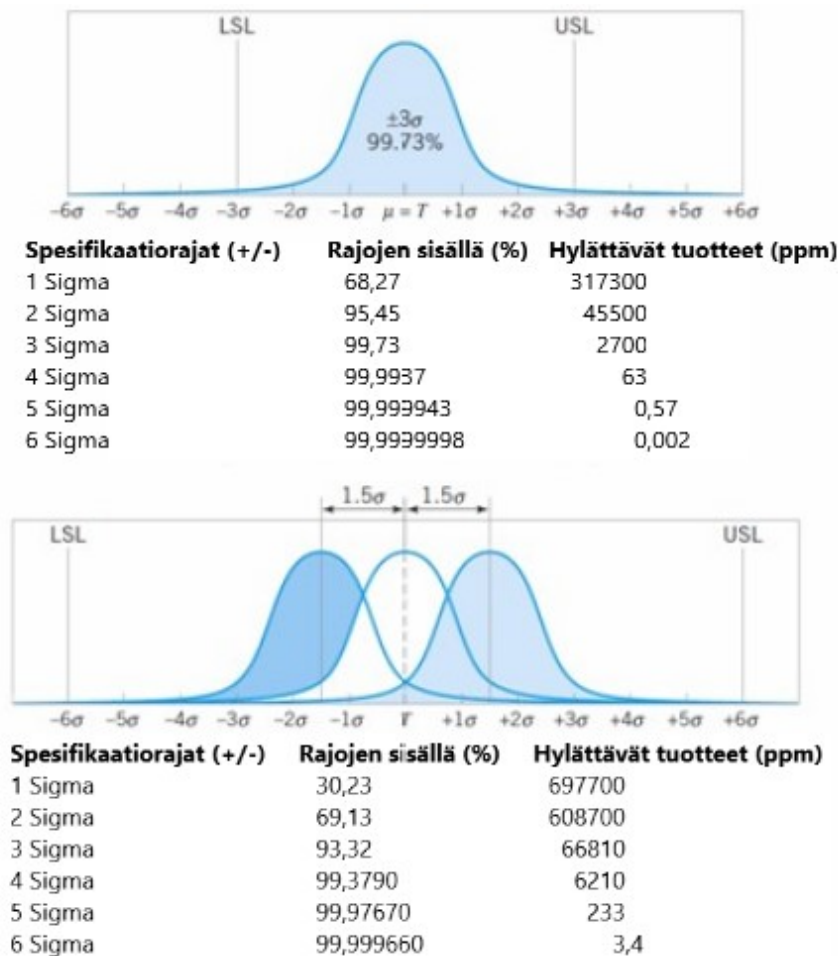
Tilastollisen prosessiohjauksen tarvitsema data voidaan kerätä tuotannosta esimerkiksi lomakkeisiin, ohjauskortteihin tai tarkastuspöytäkirjoihin. Ohjauskorttien käyttö mahdollistaa tuotantoprosessin lähes reaaliaikaisen proaktiivisen valvonnan. Tuotannosta mitattavien suorituskykyarvojen hallintaan käytetään omia ohjauskorttejaan, jotka ottavat huomioon kuvan 15 mukaisen jakaumien tyyppikohtaisen todennäköisyyskertymän (Wheeler & Chambers 2010; Berardinelli 2018).



Kuva 15. Kolmen keskihajonnan ohjausrajoilla määritetty todennäköisyys erilaisille tilastollisille jakaumille. Normaalijakauma on tilastollisista jakaumista yleisin, mutta myös eksponentiaali-jakaumaa esiintyy erityisesti aikapohjaisissa mittauksissa (Wheeler & Chambers 2010, s. 64).

Yleisimpiä ohjauskorteista ovat yhdistelmäkortti I-MR-kortti ja yhtä muuttujaa mittaava I-kortti (kuva 13). Tilastollisen prosessiohjauksen kannalta tärkeä I-MR-kortti (Individual Moving Range) on yhdistelmäkortti, jonka avulla mitataan sekä keskiarvon että varianssin muuttumista ajan suhteen. I-kortteja käytetään yleisesti SPC:ssä esimerkiksi prosessi-aikeiden mittaukseen (Wheeler 2000, s. 33-44; Martz 2013).

Useimmat prosessit käyttäytyvät jakaumaltaan normaalijakauman mukaisesti, ja sen vuoksi niihin voidaan soveltaa myös normaalijakauman kanssa yleisesti käytettyä todennäköisyysrajausta (Montgomery 2012, s. 86). Tuotantoprosessin laatua tarkastellaan usein vakiintuneella käytännöllä poikkeuttaa mittausdatan muodostamaa normaalijakaumaa 1,5 keskihajontaa keskiarvosta (kuva 16). Tällä tavoin nähdään, kuinka hyvin spesifikaatorajoihin kulminoituva laatuvaatimus kestää ääriarvoja.



Kuva 16. Ylempi jakauma ja sitä avaava taulukko kertovat kuinka suuri osuus normaalijakautuneista arvoista osuu spesifikaatorajojen sisälle, kun rajat määritellään normaalijakauman keskihajontojen kertalukuina ja jakauma on keskitetty spesifikaatorajojen suhteen keskelle. Alemmassa jakaumassa ja sen tulkitsemiseen laskutussa taulukossa näkyy yleisesti käytetty standardi poikkeuttaa normaalijakaumia +/-1,5 keskihajontaa spesifikaatorajojen keskikohdasta. Näin saadaan mittausten luonnollista käyttäytymistä paremmin vastaava saantoprosentti, joka kertoo spesifikaatorajojen käyttäytymisestä mitta-arvojen jakauman suhteen (Perustuu lähteeseen Montgomery 2012)

Tilastollisen prosessiohjauksen avulla mitattu tuotantoprosessi voidaan myös menettää hallinnasta. Näin voi käydä, kun tuotantoprosessiin ilmenee prosessin luonnollista vaihtelu kasvattavia erityisyyttä. Jollei näitä erityisyyttä poisteta, niin prosessin vaihtelun taso kasvaa ja tämä johtaa myös ohjausrajoiden laajenemiseen. Ohjausrajoiden kasvu mahdollistaa rajojen sisäpuolelle jäävän kohinan lisääntymisen. Jos prosesseja säädetään ohjausrajoiden sisäpuolelle jäävien vaihtelulähteiden perusteella, syyllistyy tuotantoprosessin yliohtaukseen. Yliohtauksessa muutetaan prosessin toimintaa, vaikka ilmenevät arvot eivät vielä ylittäisi ohjausrajoiden määrittämää reagoitirajaa. Tämä yliohtaus aiheuttaa tuotantoprosessin vaihtelun kasvun ja se on todistettu Monte Carlon suppilokokeissa. (Nelson 2013; Prevette 2018.)

Tilastollisesta ohjauksesta on syytä ymmärtää, ettei tuotteelle asetettujen spesifikaatorajojen ja tuotteen käyttäytymisestä laskettavien ohjausrajoiden tarvitse olla yhteneviä.

Ohjausrajat kertovat prosessin tämänhetkisestä suorituskyvystä. Spesifikaatorajat taas kertovat tuotantoprosessilta oletetusta suorituskyvystä. Toivo ja vaatimukset eivät kuitenkaan nosta tuotantoprosessin suorituskyyä vaan sen tekevät erityisyyden poistaminen joka samalla mahdollistaa luonnollisen vaihtelun pienentämiseen tähtäävät Six Sigma-kehitysprojektit (Juran 2016; Salminen 1990, s. 119-128, 140-151). Vaikka ohjausrajojen laskenta perustuukin todennäköisyyslaskentaan ja normaalijakauman perusteella mallinnettuihin suppilokokeisiin ei ohjausrajoja voi käyttää tarkkoina todennäköisyysrajoina. Tämä johtuu siitä, etteivät todelliset prosessit saa yleensä riittävästi koearvoja, jotta niiden todennäköisyysjakauma vastaisi täysin teoreettista ja täysin symmetristä todennäköisyysjakaumaa. Todennäköisyyksien täsmällisyys paraneekin luonnollisesti näytekkoon kasvaessa. (Deming 2000, s. 307-370.)

Aina tuotantoprosessi ei kykene vastaamaan spesifikaatiovaatimuksiin, vaikka se olisikin hallinnassa. Tällöin on syytä tarkastella vaihtelun tasoa ohjausrajoihin nähden. Jos vaihtelun taso on liian korkea, on vaihtoehtona tarkistaa tuotteen spesifikaatorajojen perusteet. Jos spesifikaatorajat ovat ehdottomat, voidaan prosessin suorituskyyä pyrkiä parantamaan muuttamalla prosessivaiheita. Muutokset prosessien kehittämiseksi ovat yleensä kalliita, mutta niillä voidaan ohittaa vanhojen toimintatapojen jumiuttamia ongelmia. Jos investointi ei ole mahdollista yksinkertainen toimintatapojen muutos voi parantaa prosessin suorituskyyä lähemmäs hyväksyttävää suorituskyyä. Jollei tarvittavaa suorituskyyä saavuteta tuotantoprosessissa, on tuotantoprosessin lopettaminen tuotannon kokonaislaadun kannalta myös mahdollinen vaihtoehto (Sharma & Kharub 2014).

Tilastollisen prosessiohjauksen keskeisiä hyötyjä voidaan vielä kiteyttää neljään pääteki- jään: ennustettavuus, ohjattavuus, kapasiteettipuskurit ja asiakasarvo. Tilastollisella prosessiohjauksella voidaan erottaa prosessin erityisyyt ja luonnollinen vaihtelu toisistaan. Tämän seurauksena saadaan erotettua prosessin luonnollinen käyttäytyminen ja tuotanto- prosessin ennustettavuus ja ohjattavuus parantuu. Toisaalta myös kustannusten ennakoitavuus tarkentuu, mikä vähentää korjaavien toimenpiteiden ja niihin varattavien resurs- sien määrää ja tämä realisoituu suoraan osa ja kapasiteettipuskurien laskuna. Positiivisesti SPC vaikuttaa myös tuotannon ulostulon laatuun, määrään ja sen vaihteluun. Prosessioh- jauksella voidaankin maksimoida tuottavuus valitulla kustannustasolla tai optimoida tuot- tavuus valituilla minimikustannuksilla. Tilastollinen ohjaus parantaa myös toimittajien komponenttien ennustettavuutta ja laatua. Kaikkia näitä järjestelmässä tapahtuvia muu- toksia voidaan myös seurata lähes reaaliaikaisesti tilastollisen prosessiohjauksen avulla. (Deming 2000, s. 307-370)

2.3 Muutosjohtaminen

Ihmisten työtehtävät muuttuvat jatkuvasti. Usein tämä muutos on hidasta ja etenee pienin askelin esimerkiksi nykyisiä toimintatapoja tehostamalla. Joskus organisaation on muu- tuttava nopeasti ja tällöin tärkeänä osana muutosprosessia on muutosjohtaminen. Muu- tosjohtamisella tarkoitetaan nykyisten voimavarojen kohdentamista muuttuvien

tavoitteiden saavuttamiseksi (Mattila 2011). Muutosjohtaminen on määrätietoinen prosessi, joka toteutetaan tarkkaan kohdennettujen toimenpiteiden avulla. Tässä tutkimuksessa muutosjohtamisella tavoitellaan organisaation hallittua muutosta kohti tarkempaa tuotannon mittausta ja siten kohti faktaperusteisempää päätöksentekoa operatiivisessa toiminnassa.

Muutoksen hallinta vaatii tarkkaa ymmärrystä organisaation dynamiikasta sekä toteutettavien muutosten vaikutuksista. Iso osa muutosjohtamisesta koostuu myös ihmisten luontaisen käyttäytymisen tunnistamisesta. Luontainen käyttäytyminen ja sen jalostaminen muutoksen aikaansaamiseksi ovat muutosjohtamisen tärkeimpiä taitoja. Ihmisen motivaation ja omistautuneisuuden tukemiseksi, on muutoksien toteutuksen oltava hyvin perusteltavissa tämän vuoksi merkittäviä muutoksia tulisi toteuttaa vai kunnollisen suunnittelun ja harkinnan päätteeksi. Osaltaan on tärkeää myös kuunnella henkilöstön kohtaamia haasteita ja tuntemuksia. Näiden pohjalta reagoitaessa eheytetään operaattoreiden kykyä vaikuttaa muuttuvaan kokonaisuuteen, ja samalla voimaannutetaan yksilöiden kykyä toimia muutoksen edistäjinä. (Fernandez & Rainey 2006, s.168-173.)

Johtamisessa merkittävät haasteet liittyvät usein ihmisten tarpeiden, tapojen, asenteiden ja sidosryhmien ymmärtämiseen. Onnistuneen muutoksen aikaansaamiseksi on kriittistä, että muutosjohtamisella on johdon vankka tuki. Johdon lisäksi muutoksen jalkauttavien toimihenkilöiden kuten esimiesten riittävä osaaminen, koulutus ja resurssointi on kriittistä projektin läpiviennin kannalta. Positiivinen työskentelykulttuuri on keskeisessä asemassa muutoksen edistämässä. (Kotter 1996, s.129-137). Muutosjohtamisessa tärkeää on myös pitkän aikavälin tavoitteiden eli muutosajurien ymmärrys. Onnistuneen muutoksen kannalta on tärkeää, että muutosta johtavien resurssien toiminta ja sanoma ovat johdonmukaisia ja johto osallistuu aktiivisesti käytännössä muutoksen toteuttamiseen aktiivisesti. (Fernandez & Rainey 2006, s.168-173.)

Johdon lisäksi käytännön toimintaa läheltä seuraava esimies on kriittinen onnistuneen muutoksen toteuttamisen kannalta (Luomala 2008, s.15). Esimiehen tai muutoksesta vastaavan asiantuntijan hartioille jää usein johtamisen keskeiset tehtävät. Näitä ovat: jatkuva ja tavoitetta edistävä viestintä, työolosuhteiden ja rakenteiden tavoitetta tukeva organisointi, henkilöstön riittävien resurssien turvaaminen muutoksen aikaansaamiseksi, tietojärjestelmien järjestäminen muutoksen tueksi sekä toiminnan suuntaviivojen yhtenäistäminen muiden esimiesten ja muutosagenttien kanssa. (Kotter 1996, s.87, 97-99.)

Muutosjohtamisen tärkeänä elementtinä pidetään myös muutosten huolellista toteutusta (Luomala 2008; Mattila 2011). Hyvä muutosjohtaja suojaa tarpeen tullen muutoksen kohteena olevaa yksikköä muiden yksikköjen kohdistamalta paineelta ja ohjailulta. Näin tehtävät muutokset toteutettua suunnitelman mukaan ja samalla vältetään turhautumista ja ärtymistä muutosta toteuttavassa yksikössä. Muutostilanteessa on myös tärkeää luoda tilaa ryhmän luovalle työskentelylle, missä toteutettava muutos saattaa saada arvokkaita kehitysehdokkaita työntekijöiden monipuolista kokemusta hyödyntämällä. Armernakis ja

Bedeian (1999, s. 293-313) korostavat myös muutosjohtamisen prosessimaisuutta ja huolellista suunnittelua.

Ihmisten luonnollista käyttäytymistä edustaa myös tietynlainen varautuneisuus toimintatapojen muutokseen, läpivirtauksen mittaukseen ja toimenkuvan muutoksien suhteen. Tämän normaalin käyttäytymisen vuoksi esiintyy ristiriitatilanteita, joissa organisaation etu ei välttämättä ole linjassa työntekijän oman mielipiteen kanssa. Tällöin voi syntyä tahallisia mittausvirheitä, johtuen yleisen johtamisen heikosti asetetuista tavoitteista, jotka ohjaavat työntekijöitä toimimaan organisaation edun vastaisesti (Manka 2007, s.37-42). Tätä ilmiötä voidaan lieventää, kun muutoksen toteutuksesta saatavista positiivisista tuloksista muistetaan viestiä kannustavasti. Näin voidaan todentaa tehtyjen muutosten tarpeellisuus ja hyöty, joilla on suuri merkitys työntekijöiden työmoraaalin edistämässä ja tulevien muutosten toteuttamisessa. (Appelbaum et al. 2012, s.764-778.)

Organisaatioissa ja toimenkuvissa tapahtuva muutos voi myös epäonnistua. Haasteet muutosprosessin läpiviennissä aiheutuvat usein puutteellisesta johtamisesta. Johtamisen pitää kyetä tukemaan organisaation toimintaa esimerkiksi tottumusten tuetulla muuttamisella, työpaikkojen turvaamisella, kattavalla tiedottamisella, selkeällä yhtenäisellä johdon linjauksella, työntekijöiden sisäisellä motivoinnilla ja etujen turvaamisella. Näin varmistetaan, ettei toteutettava muutos kohtaa toiminnanhaasteiden lisäksi merkittäviä määriä ihmisten henkilökohtaisesta motivoinnista kumpuvia esteitä. Muutokseen kannustaminen esimerkiksi tulospalkkioiden järkevällä kohdentamisella voidaan edistää merkittävästi muutosten jalkauttamista ja uusien toimintamallien käyttöönottoa. (Mattila 2011.)

3. MITTAUKSEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Tutkimuksen teoriaosuudessa käytiin läpi työn toteutuksen kannalta tarvittava pohjatieto, jonka avulla voidaan käsitellä tuotantojärjestelmän toimintaa ja rakentaa tuotantovirtauksen mittaristo. Katsauksella liiketoimintastrategian ja operaatiotieteen yhteistyöhön oli tarkoitus rakentaa alustava ymmärrys kohdeyrityksen liiketoiminnasta ja tuotantojärjestelmän roolista osana kansainvälistä liiketoimintaa. Tuotantojärjestelmien mitoittamiseen ja ohjaukseen keskityttiin, koska niiden toiminnan ymmärtäminen auttaa soveltavien mittauksien toteuttamisessa ja analysoinnissa.

Teoriaosuudessa käsitelty vaihtelu on läsnä kaikessa toiminnassa, ja sen huomioiminen tuotantojärjestelmää arvioitaessa antaa realistisemmän kokonaiskuvan yrityksen toiminnasta ja toiminnan haasteiden juurisyistä. Tuotantodatan tulkintaa tukee myös tilastollisen prosessiohjauksen kokonaisuus, jota hyödynnetään mittaustulosten analysoinnissa ja johdopäätösten muodostamisessa. Muutosjohtamisen teorian tarkoituksena on huomioida ihmisten tekijöiden vaikutuksen tuotantojärjestelmän toiminnassa.

Tässä osuudessa keskitytään tuotantojärjestelmän mittaukseen. Mittauksen kohteena on yhteistyöyrityksen tuotantolinjan yksi tuotantosolu. Mittauskohteeksi valittiin kyseinen osakokoonpano, koska tämä tuotantosolu sisältää runsaasti pieniä työkokonaisuuksia. Pienien kokonaisuuksien ripeä läpivirtaus mahdollisti riittävän otannan kuukauden kestäneessä pilotoinnissa. Kyseinen tuotantosolu valittiin myös sen takia, että kyseinen solu ja sen rinnakkaiset tuotantosolut käyttävät merkittävän osan tuotteiden jaksoaikaan kuluva ajasta. Näin tuotantosolu muodostaa potentiaalisen mittaushaasteen kohdeyritykselle, koska mahdolliset kehitysprojektit omaavat merkittävää potentiaalia lyhentää tuotteiden kokonaisjaksoaika.

Mittauksen tarkoitus on verrata sähköisen mittauksen luotettavuutta käsin toteutettaviin operaattorimittauksiin. Tällä tavoitellaan erityisesti korrelaationsuhdetta operaattorien toiminnassa sähköisen ja manuaalisen mittauksen välillä. Mittauksella pyritään siis todentamaan, tuotannon sähköisen mittausdatan luotettavuus. Jos tuotannonmittausdatassa esiintyy heikkouksia, niin samalla pyritään analysoimaan tutkimuksen teorian ja mittaustulosten pohjalta, miten mittauksen luotettavuutta voitaisiin parantaa.

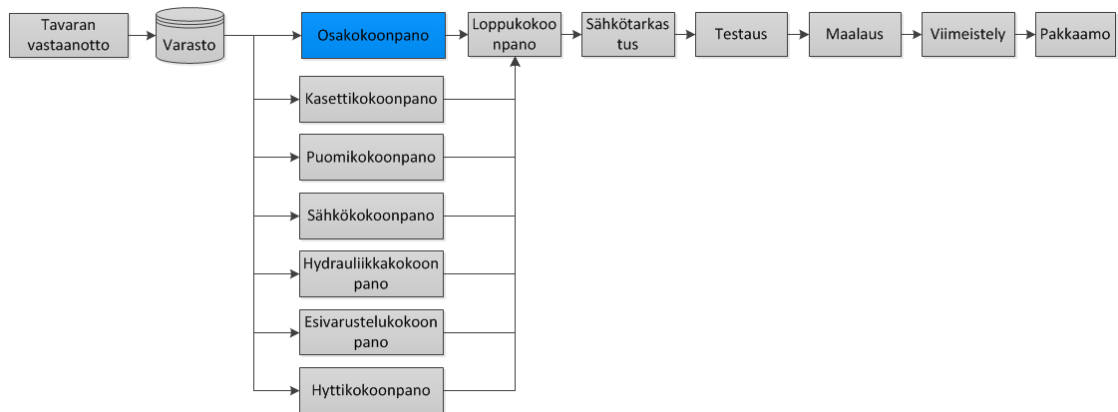
Mittauksen toinen tarkoitus on havainnoida itse tuotannon tekemisen tasoa. Kohdeyrityksen kiinnostuksen kohteena on laajentaa nyt yhdessä tuotantosolussa toteutettavaa mitausta. Tämän vuoksi täytyy mittauksella selvittää luotettavuuden lisäksi sopivat toimintatavat ja mittauksen toteutukseen liittyvät haasteet, jos mitausta halutaan laajentaa muihin tuotantosoluihin. Tuotantolinjojen mittaukseen kohdeyritystä motivoi tuotantojärjestelmän matemaattinen mallinnus, jolla voidaan tukea teoriaosuuden luvussa 2.1 käsitellyjä tuotannonohjausta, -kehitystä ja kapasiteetin mitoittamista.

3.1 Mittauksien toteutus

Tutkimuksen mittausosuus keskittyy yrityksen töiden prosessiajan mittaukseen yhdessä tuotantosolussa. Mittausta aloitettaessa tuotantovirtaa mitataan materiaalivirtausten avulla toiminnanohjausjärjestelmän tukemana. ERP-järjestelmän leimaukset perustuvat asentajien sähköisesti tekemiin kuittauksiin. Kuittaukset toteutetaan, kun asentaja aloittaa tai lopettaa tuotantosolun työlistassa olevan työn. Työvaiheiden, materiaalivirran ja logistiikan kuittaukset toteutetaan päätelaitteiden avulla, ja niihin kirjautuu materiaalivirran lisäksi myös kuittauksen tekijä ja aikaleima.

Tuotantojärjestelmän mittaus toteutettiin mittaamalla sekä sähköisesti että käsin asentajien toteuttamia leimauksia. Sähköinen mittaus toteutettiin keräämällä asentajien merkityt aikaleimat ERP-järjestelmästä. Sekä sähköiset että käsin merkityt leimat kerättiin samoista tuotantosolun läpi virtaavista töistä. Mitatuista töistä kerättiin siis aloitus ja lopetusleima. Leimojen perusteella laskettiin työn tekemiseen käytetty prosessiaika. Töitä mitattiin kuukauden ajan. Tämä kvantitatiivinen mittaus toteutettiin kahdella tavalla, koska mittaustiedon keräämisen lisäksi halutaan arvioida nykyisen mittaustavan luotettavuutta ja sen käyttökelpoisuutta osana laajempaa mittausjärjestelmän implementointia.

Käsin mittaus toteutettiin paperiselle lomakkeelle. Käsin asentajien toteuttamat kuittaukset kerättiin tuotannosta ja ne siirrettiin sähköiseen taulukkolaskentaohjelmistoon analysoinnin helpottamiseksi. Mittausdatan siirron toteutus tarkastettiin kahdesti, siirtovirheiden välttämiseksi. Kenttämittaus toteutettiin käyttäen puolikonstruoitua lomaketta (liite A), johon täytettiin kyseessä olevan työn tunnus sekä aloitus- että lopetusaika. Aikaleimojen kronologinen aloitusjärjestys tarkastettiin lomakkeiden keräyksen yhteydessä virheellisten käsileimojen löytämiseksi. Aikaleimojen lisäksi lomakkeeseen kirjattiin myös työssä ilmenneet erityisyyt tai poikkeamat. Yksinkertaisen lomakkeen ideana oli minimoida tuotannon asentajien ylimääräinen kuormitus. Tämä mittausjakso arvioitiin riittävän laajaksi käyttökelpoisen kokonaiskuvan muodostuksen kannalta. Mitattu tuotantosolu edustaa myös keskeistä tukevaa työvaihetta ennen laitteiden loppukokoonpanoa. Tuotannon prosessimaista virtausta on havainnollistettu kuvan 17 prosessikaaviolla.



Kuva 17. Mittaus toteutettiin osakokoonpanossa, joka on pieniin ja nopeisiin koneikkokokoonpanoihin keskittyvä tuotantosolu. Osakokoonpanolle löytyy runsaasti rinnakkaisia työvaiheita ennen tuotteiden lopullista kokoonpanoa.

Tässä tutkimuksessa mitattavaksi tuotannon suorituskykyparametriksi on valittu prosessiaika (Effective Process Time). Prosessiajalla tarkoitetaan sitä aikaa, jonka tuotantosolu pitää kyseistä työtä hallussaan. Aika siis alkaa, kun työ tuodaan tuotantosoluun ja se päättyy, kun tuotantosolu saa työn valmiiksi ja se viedään pois seuraavaan työvaiheeseen. Tämä aika sisältää siis sekä arvoa lisäävän että arvoa tuottamattoman ajan, jonka työ käyttää kuormitusryhmässä. Kuluvaan aikaan mitataan kohdeyrityksen työvuorojen kalenteriajan mukaan. Tämä tarkoittaa, että kahdessa työvuorossa toimiva tuotantosolu kerryttää kalenteripäivässä 16 tuntia prosessiaikaa.

Tutkimuksen tavoitteena oli määrittää tehokas tapa mitata tuotannon virtausta eli kappalemääräistä läpimenoa aikayksikköä kohden. Luvussa 2.1.1 käsitellyssä kaavassa 1 eli Littlen (2008) laissa käytiin läpi, että läpimeno on yhtä kuin keskeneräisen tuotannon ja jaksoajan osamäärä. Tämän vuoksi jaksoajan ja keskeneräisen tuotannon mittaaminen mahdollistaa läpimenon laskennan. Tuotteiden jaksoaika rakentuu rinnakkaisista ja peräkkäisistä työn vaihemallin mukaisista prosessiajoista. Kun logistiikan ja työvaiheiden käyttämä prosessiaika lasketaan yhteen, saadaan tuotteen kokonaisjaksoaika. Tuotantoketjun mittaaminen työvaihekohtaisesti aloitus ja lopetusleimojen kautta mahdollistaa työvaihekohtaisen prosessiajan laskennan. Jaksoaikojen käyttäytymistä voidaan mittauksen avulla tarkastella työvaihekohtaisesti, joka mahdollistaa aiempaa merkittävästi tarkemman analysoinnin ja ongelmiin reagoinnin.

Prosessiaika on siis helposti aikaleimoista laskettava suorituskykyparametri, josta voidaan suoraan johtaa tämän tutkimuksen kiinnostuksen kohteena ollut läpimenon laskenta työn vaiheperustaisesti. Prosessiaika on suoraa läpimenon mittausta hyödyllisempi, koska sillä voidaan verrata suoraan työvaihekohtaista kestoja, joka kertoo kyseisen tuotannon kuormitusryhmän mitoitettua kapasiteettia ja tuotannon tämän hetken todellisesta tilasta. Mittaamalla usean työvaiheen prosessiaikaa osana tuotantolinjan virtausta nähdään,

miten esimerkiksi 10 päivän valmistusaika käytetään eri työvaiheiden kesken. Samalla voidaan arvioida, miten tätä voisi lyhentää paremman asiakasvasteen saavuttamiseksi.

Myös työvaiheissa ilmenevät haasteet näkyvät selkeämmin prosessiaikaa tarkasteltaessa. Jos tuotannossa tarkastellaan kuukausittaista tai viikoittaista läpimenoa tarvitaan mittarin päivittämiseen mittauksen aikayksikköä vastaava väli. Kun taas mitataan työvaihekohtaista tehollista prosessiaikaa, näkyy työvaiheessa ilmenevä virhe heti suoraan kyseisen työn prosessiajan kasvuna ja tämän viivästyksen vaikutuksia voidaan heti arvioida seuraavissa työvaiheissa ja tuotteen toimitusaikataulussa. Tämä mahdollistaa myös luvussa 2.2 käsiteltyjen laatuongelmien vaikuttavuuden arvioinnin. Laatuongelmien vaikuttavuutta voidaan arvioida esimerkiksi luvussa 2.1.4 käsitellyn käytettävyyden (kaava 5) avulla. Tämä mahdollistaa tuotannossa esiintyvien ongelmien kustannusten tarkemman määrittämisen, ja tällä on suuri vaikutus johdon sitoutumiseen tuotantokyvykkyyden kehittämisessä. Näiden syiden vuoksi tässä tutkimuksessa mitataan prosessiaikaa eikä suoraan läpimenoa.

Samalla prosessiaika ja saapuvien töiden taajuus tarjoavat riittävän lähtötiedot myös operaatiotieteen laajempien virtauslaskentamallien tueksi. Vaihtelun ja virtauksen mallinnus kuten pullonkaulalaskenta (kaava 2) sekä variaatiokertoimen laskenta (kaava 4) ovat laajemman tuotantomittauksen perusteella mahdollisia sovelluskohteita. Luvuissa 2.1 ja 2.2 esitetyt kokonaisuudet tähtäävät yhdessä yrityksen taloudellisten suorituskykyparametrien optimointiin eli operatiivisen suorituskyvyn parhaaseen mahdolliseen kannattavuuteen. Mittaustietojen turvin voidaan laskea esimerkiksi tuotantolaitteiden rikkoutumisen, laatupuutteiden ja keskeneräisen tuotannon vaikutusta liikevaihtoon ja kustannuksiin.

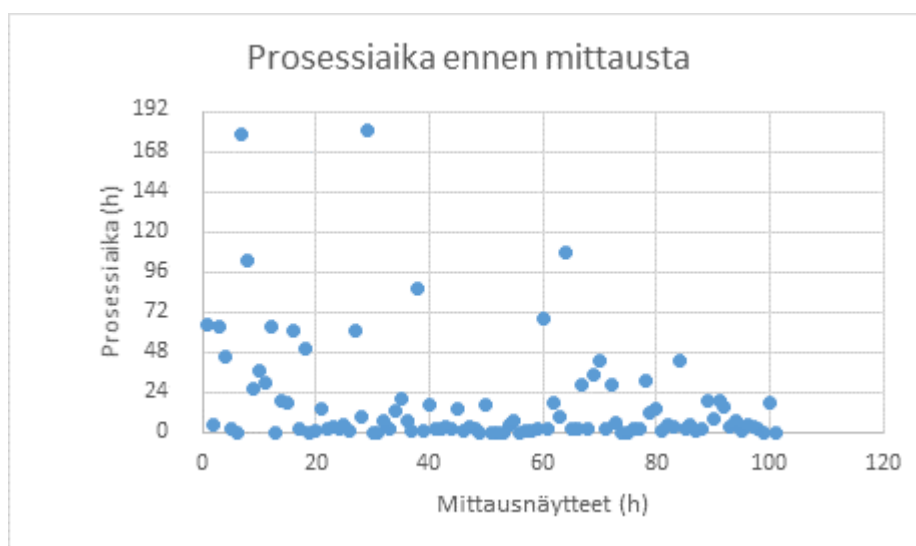
Diplomityön tavoitteena oli arvioida mittauksen tämän hetkistä luotettavuutta. Luotettavuus on tuotannon toiminnan kannalta oleellista, koska suuri mittausepävarmuus ja sen huomioimatta jättäminen voi johtaa väärin kehityskohteiden valintaan ja perusteettomaan laaduntarkastukseen. Yleisenä mittauksista koskevana nyrkkisääntönä voidaan sanoa, että luotettavan mittausprosessin mittauspohjainen vaihtelu on korkeintaan 1/10 mittauksien toleranssialueesta (Salomäki 2003, s. 106-144).

Tätä mittauksista tarkasteltaessa prosessiajan toleranssialueena käytetään sitä aikaa, joka työlle on tuotantosuunnitelmassa määritelty. Tuotannon aikataulutuksessa yhden päivän töiksi oli tuotantosuunnitelmassa merkitty 90% mitatuista töistä. Tuotantosuunnitelman tarkkuus on yksi työpäivä eli 16 tuntia prosessiaikaa. Se että mittauksissa esiintyi myös muutamia usean päivän töitä ei haittaa toleranssialueen valintaa, koska nyt mittausepävarmuuden kriittiseen tarkasteluun on valittu näiden poikkeavien arvojen toleranssialueesta tiukempi toleranssi. Joten jos mittauksien tulokset ovat tämän toleranssialueen sisällä ovat ne luotettavia myös usean päivän mittauksessa, jossa työvaihekohtainen toleranssiraja on laajempi. Yhden kalenteripäivän toleranssialueella sallittavaksi mittausvirheeksi muodostuu Salomäen (2003, s. 106-144) sääntöjen mukaan 10% toleranssialueesta eli 1,6 tuntia.

3.2 Tuotannon nykytila

Tällä hetkellä kohdeyrityksen tuotantoa mitataan karkealla kuukausitasolla. Kuukausittaisen läpimenon lisäksi tuotantoa voidaan tarkastella viikkotasolla ja pohtia, miksi toisena viikkona mittauksen kohteena oleva osakokoonpano läpäisee esimerkiksi 20 tuotetta ja toisella viikolla 40. Mittauksen kehittämiseksi pyritään saavuttamaan työvaihekohtainen mittausjärjestelmä, joka antaa paljon tarkemman tilannekuvan tuotannossa ilmenevistä ongelmista ja niiden vaikutuksesta tuotantoketjun seuraaviin työvaiheisiin. Työvaiheiden seuranta ja mittaus mahdollistavat ongelmien aiempaa tarkemman luokittelun ja korjaavien ja ennaltaehkäisevien toimien priorisoinnin.

Tuotannon sähköinen mittaus toteutettiin nykyisen toiminnanohjausjärjestelmän avulla. ERP-järjestelmän käyttö mahdollisti vaihekohtaisen tuotannon aloitus- ja lopetusaikojen seurannan. Sähköisen mittauksen painopiste oli käsimittauksien tapaan tuotannon yhdessä tuotantosolussa: osakokoonpanossa. ERP-järjestelmä mahdollisti tuotannon seuraamisen tuotantosolukohtaisesti mikä edesauttoi osakokoonpanon läpivirtaavan tuotannon seulontaa ja analysointia. Kuvassa 18 nähdään, miten osakokoonpanossa tehtävät työt mitattiin ennen tässä tutkimuksessa toteutettua mittausprojektia. Kuvan 18 mitatut arvot on siis otettu ERP-järjestelmästä tarkastelemalla tuotantosolun läpi virranneen tuotannon aloitus ja lopetusaikoja. Näistä ajoista on laskettu leimojen välinen prosessiaika.



Kuva 18. Mittausprojektia edeltäneet prosessiajat tuotantosolussa.

On huomion arvoista, että kuvassa 18 käytetty prosessiajan laskenta koneellisesti rakennettiin ennen mittauksen aloittamista, jotta sekä mittausta edeltävien että itse mittauksen kohteena olevien töiden prosessiajan tarkastelu oli mahdollista. Lopetus- ja aloitusleimoihin perustuva prosessiaikalaskenta ottaa huomioon tuotantosolukohtaisen työaika kalenterin ja huomioi kuluvan kalenteriajan vain niiltä osin, missä asentajia on läsnä tuotantosolussa ja töiden edistyminen on mahdollista. Tällaista resurssikalenteriin pohjaavaa mittausta ei ole toteutettu kohdeyrityksessä ennen tätä diplomityötä.

Tuotannon nykytilasta on myös huomioitava, että ennen mittauksen aloittamista tuotantoon perehtymisen yhteydessä kävi ilmi, että tuotannossa esiintyy systemaattisia toimintatapoja, jotka aiheuttavat mittausvirhettä. Näitä ovat esimerkiksi massoittain tehtävät työnjohtajien työkuittaukset, joissa puuttuvia aikaleimoja korjataan ERP-järjestelmään kuittaamalla työt myöhässä valmiiksi sen hetkisellä aikaleimalla. Tuotannossa esiintyi myös leimauksien puuttumisia ja työnjohtajan tekemiä leimauksia, jotka olisi pitänyt kuitata toimintaohjeiden mukaan työntekijöiden toimesta. Nämä toimet käytiin läpi myös mitatussa tuotantosolussa ja havaittiin, ettei näitä systemaattisia ongelmia esiintynyt juuri mittauksen kohteessa olevassa tuotantosolussa.

Sähköisiä mittauksia varten tuotannossa toteutettiin ERP-järjestelmien käsittelymuutos ennen mittauksien aloittamista. Tässä ohjeistuksen muutoksessa siirryttiin kuittaamaan tuotannon työt puhtaasti materiaaalivirtauksen pohjalta entisen työaikaseurannan sijaan. Kuittaustavan muutoksella pyrittiin parantamaan mittauksen tarkkuutta.

Käytännön mittausta pohjustettiin kertomalla mittauksesta työntekijöille ja opastamalla paperilomakkeen käyttöön. Ennen mittauksen aloittamista tuotannossa esiintyi useita eri tapoja kuitata töitä ERP-järjestelmästä. Kohdeyrityksen tuotannossa esiintyi myös tapauksia, joissa työkohtaiset aikaleimat kuitattiin etänä työnjohtajan toimesta ja näin leimat eivät vastanneet tuotannon työvaiheiden tai materiaaalivirtauksen todellista etenemää. Näihin epäkohtiin puututtiin ennen varsinaisen mittauksen aloittamista, koska yhtenäiset toimintatavat ja stabiili toimintaympäristö helpottavat mittaustulosten analysointia. Puutteisiin puututtiin henkilöstön koulutuksella ja toimintatapojen yhtenäistämällä.

3.3 Muutosjohtamisen soveltaminen mittaukseen

Kappaleessa 2.3 käsitellyt muutosjohtamisen keskeiset elementit on helppo löytää myös tästä tutkimuksesta. Mittausjärjestelmän rakentaminen ja muutoksen toteuttaminen vaatii kattavaa tiedottamista tuotannossa ja yrityksen johdon parissa (Fernandez & Rainey 2006, s. 168-173). Muutoksista tiedotettiin sekä päivittäisillä tuotantokierroksilla sekä tuotannolle pidettävissä aamupalavereissa. Näiden lisäksi tiedottamista tuettiin rakentamalla työohje mittaustavan muutoksesta. Rakenteellista tukea mittauksen pilotointi sai mittaustaulun järjestämisestä pilotoitavan työaseman viereen. Esimiesten perehdyttämällä varmistettiin sekä esimiestyöskentelyn tuki, että riittävä aikaresurssi mittauksen toteuttamiselle. Samalla tuotannon työnjohtajan tuki mahdollisti helposti lähestyttävän tiedotuskanavan suoraan asentajien aamupalavereihin.

Kohdeyrityksen työntekijät omaavat kattavan ammattitaidon sekä omistautumisen työleen. Tämän itseohjautuvuuden perusteella mittauksen koulutus toteutettiin keskustelulla, työohjeella ja haastatteluilla. Koulutuksen lisäksi mittauksen toteutusta tuettiin päivittäin tuotantosolussa tapahtuneilla keskusteluilla. On liiketoiminnan tuottavuuden kannalta oleellista, ettei asentajan työajasta kuluisi merkittäviä osia työkohtaiseen kirjoittamiseen, vaan itse kokoonpanotyön toteuttamiseen. Mittauksen ajan asentajien merkitsemistyö

kuitenkin lisääntyi, koska he kuittasivat työn valmiiksi sekä paperilla että sähköisesti. Tätä työkuormaa pyritään helpottamaan tulevaisuudessa sähköiseen kuittaukseen toteuttavalla tietojärjestelmäinvestoinnilla, missä automatisoidaan tehollisen prosessiajan mittaus. Tämä mahdollistaa sähköisen automaattisen mittariston rakentamisen, jota käsitellään tarkemmin toimenpide-ehdotuksissa.

Ihmiselementti edustaa tässä työssä merkittävää sekä toteutuksen onnistumiseen että mitaustarkkuuteen vaikuttavaa tekijää. Mittauksen toteutuksessa on syytä tiedostaa, että työntekijän raportointiin liittyy tietynlaisia viiveitä. Työ voidaan esimerkiksi lopettaa vasta tauon jälkeen, tai vasta kun seuraavan työn osat on selvitetty. Hajontaa kuittaukseen aiheuttaa myös työn satunnainen hyväksyttäminen esimiehellä tai kollegalla ennen kuitausta. Tällaisia minuuttitasolla esiintyviä luonnollisen vaihtelun lähteitä ei ole taloudellisesti kannattavaa mallintaa prosessiajan mittauksessa, mutta niiden olomassaolo on syytä muistaa mitaustuloksia tulkittaessa.

Mittauksen toteutuksessa havaittiin, että työn kuittaukset molemmilla tavoilla tapahtuvat lähes poikkeuksetta peräkkäin, järjestyksen vaihdelta. Tämän vuoksi voidaan arvioida, että tässä tuotantosolussa ihmisen luonne kuitata valmistuvia töitä ei aiheuta kokonaisuuksien ja tämän hetken operatiivisen suorituskyvyn kannalta merkittävää vaihtelutekijää.

Osana diplomityötä ja mittausjärjestelmän rakentamista järjestettiin myös tuotannon kehitystä tukevia työpajoja. Työpajojen ideana oli parantaa luvussa 2 esitettyjen teorioiden ymmärrystä ja pohtia yhdessä tuotannon johdon kanssa, mitä tutkimuksessa esitetyt teoriat tarkoittavat kohdeyrityksen toiminnassa. Samalla pohdittiin, miten tuotannon mittauksella voidaan tukea tuotannon organisaation päivittäistä työskentelyä. Laatuteknikan, tuotannon mitoituksen ja vaihtelun ymmärryksen ympärille keskittyvät työpajat ovat erinomainen tapa tuoda ajankohtaisia asioita yhteiseen pöytään, missä voidaan rakentaa teorian ja käytännön realiteettien pohjalta järkeviä kehityssuunnitelmia.

Tutkimuksen tarkoituksena oli parantaa ymmärrystä tehdasympäristön mittauksesta ja mittauksen hyödyntämisestä tuotannon läpimenon kasvattamiseksi. Tämän vuoksi tuotanto-organisaation laajamittainen tuki ja ymmärrys helpottavat mittauspilotoinnin toteuttamista. Samalla ne luovat pohjan pilotoinnin pohjalta jatkettaviin kehitysprojekteihin ja saatujen mitaustulosten hyödyntämiseen.

Tutkimuksessa toteutetut työpajat keskittyivät tutkimusten keskeisten teorioiden käsitteilyyn yhdessä yrityksen operatiivisen johdon kanssa. Työpajoissa laskettiin esimerkiksi keskeneräisen tuotannon vaikutusta jaksoaikaan sekä läpimenoon (Little 2008; Hopp & Spearman 2011, s.264-306). Samalla mietittiin vaihtelun vaikutusta tuotannon virtaukseen sekä käyttösuhteen merkitystä osana nopeata asiakasvastetta. Näiden asioiden tarkastelu on keskeistä mittauksen toteutuksen ymmärtämisen kannalta, ja oikein valjastettuna operaatiotieteen teoriat tarjoavat konkreettisia työkaluja yrityksen operatiivisen johdon käyttöön.

Työpajojen toteutus sujui kokonaisuutena hyvin. Työpajoja varten oli valmistelu kompakti teoriakertaus keskeisistä työn teorioista. Näiden teorioiden käsittelyn jälkeen paneuduttiin teorioiden soveltamiseen yrityksen tuotannon näkökulmasta. Soveltavassa osuudessa laskettiin yrityksen tuotteiden virtausta teorioiden avulla. Tämä herätti runsaasti keskustelua ja käytännön esimerkkejä siitä, miten teoriassa käsitellyt ilmiöt näkyivät kohdeyrityksen päivittäisessä tekemisessä. Työpajojen vastaanotto oli positiivinen ja ne tarjosivat 1-2 tunnin kompakteja informaatiopaketteja työn keskeisistä komponenteista.

Työpajojen lisäksi pilotoinnin toteuttamiselle tärkeää on henkilökunnan yleinen koulutus. Koulutuksella parannetaan aina toteutettavien mittausten ja niiden aikaansaamiseksi tarvittavien muutosten jalkauttamista. Samalla koulutuksella parannetaan myös organisaation ymmärrystä ja edistetään uusien toimintatapojen omaksumista (Lawrence 1969). Tutkimukseen liittyvä koulutus voidaan jakaa kahteen osa-alueeseen. Ensin toteutettu työnjohtajien koulutus sisälsi mittauksien toteuttamiseen ja hyödyntämiseen liittyvien perusasioiden läpikäynnin niin, että tuotannon organisaatio kykenee ymmärtämään mittauksien tarkoituksen ja siten tukemaan sen päivittäistä toteuttamista.

Toisena komponenttina on työntekijöiden koulutus. Käytännön mittauksien tärkeänä osana on mitata tuotannon läpimenoa sekä ERP-järjestelmän kautta sähköisesti että myös lattiamittauksien kautta. ERP-mittaukset toteutettiin tuotantotilausten seurannan avulla ja niiden rekisteröinti tapahtui osana normaalia töiden aloitusta ja lopetusta kuittauksia. Työntekijöille koulutettiin sekä käsin täytettävän lomakkeen että ERP-järjestelmäpohjaisen kuittauksen tekeminen.

3.4 Mittauksen tulokset

Kuukauden kestäneen pilotoinnin aikana osakokoonpanon läpäisi 195 työtä. Näistä 157 kelpuutettiin mukaan mittaustulosten käsittelyyn. Tämä 80,5% saantoprosentti johtuu tuotannolle tyypillisestä dynaamisesta toiminnasta. Osa mitatussa tuotantosolussa tehdyistä töistä oli merkitty tehtäväksi viereisessä tuotantosolussa, mutta ne olivat tuotannon sujuvuuden perusteella siirretty mitatun tuotantosolun työlistaan. Kyseisiä töitä ei sisällytetty mittauksen niiden sähköisen kuittauksen puutteen vuoksi. Myös korjausta tai muutostöitä vaatineet työt jätettiin ulos mittauksen pilotoinnista, koska niiden mittaus ei olisi vastannut töiden täysimääräistä työmäärää Mittausjakson aikana esiintyi myös kourallinen töitä, joissa asentaja oli palannut vuosilomalta eikä tämän vuoksi ollut vielä saanut ohjeistusta mittauksen toteutuksesta. Kokonaisuudessaan asentajien aktiivisuus ja oma-aloitteisuus oli kuitenkin kiitettävällä tasolla.

Sekä sähköiset että käsin toteutetut mittaukset sujuivat hyvin. Mittauksissa esiintyi kuitenkin muutamia yllättäviä tekijöitä, joita ratkottiin reaktiivisesti projektin edetessä. Sähköisten mittauksien yhteydessä huomattiin esimerkiksi, että nykyisessä ERP-järjestelmässä ei ollut tarvittavia moduuleita prosessiajan laskennalle. Ongelma ratkaistiin

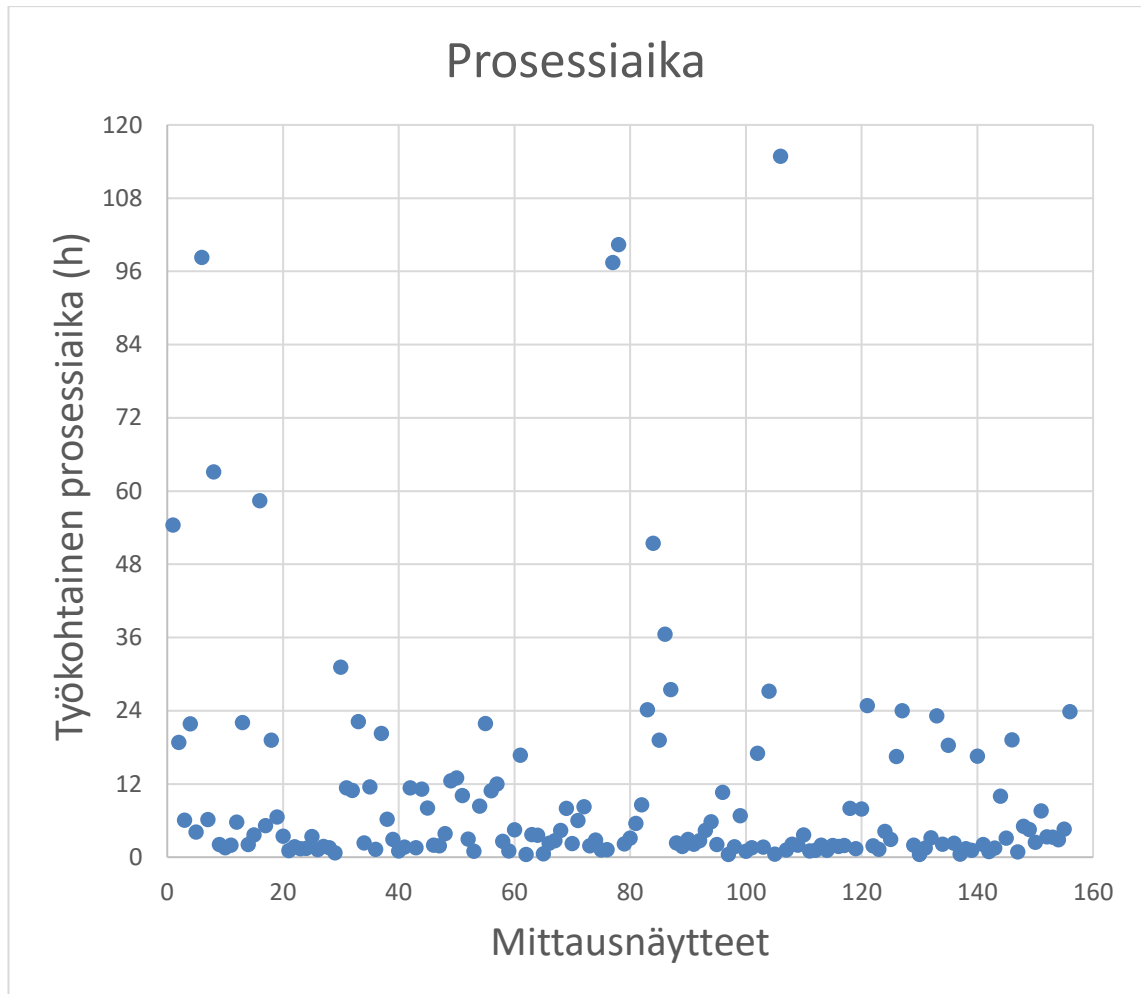
tilaamalla ERP-järjestelmän toimittajalta järjestelmämuutos, jossa tarvittava mittaustieto rakennettiin osaksi ERP-järjestelmää. Tämä mahdollisti sähköisen mittauksen järkevän rekisteröinnin. Samalla investoinnilla mahdollistetaan tuotannon jaksoajan aiempaa tarkempi analyysi. Prosessiajan mittaus ja sen pohjalta rakennettava mittaristo helpottaa ongelmien havaitsemista. Havaitseminen helpottuu, jos prosessiajan perusteella lasketaan tuotteiden työvaiheille ohjausrajat ja prosessiajan venyessä työvaiheen mittari hälyttää prosessista olevasta erityisyydestä, jonka vuoksi työvaihekohtainen prosessiaika on venynyt poikkeuksellisen pitkäksi.

Toisena sähköisen mittauksen huomiona oli asentajien kuittauksen yhtenäistäminen. Mittauksen alussa koulutusten yhteydessä havaittiin, että asentajilla oli useita eri tapoja kuitata töitä ERP-järjestelmään. Erilaista kuittautapaa esiintyi 4 kertaa mittausjakson aikana, vaikka yhtenäisiä toimintatapoja koulutettiin ennen mittauksen aloittamista. Tämä aiheutti erilaisia sähköisiä aikaleimoja. Tähän toistuneeseen ongelmaan pureuduttiin kouluttamalla asentajille uudestaan yhtenäinen toimintatapa, jolla kuitatut leimat välittyivät oikealla tavalla myös muiden tuotannon osastojen nähtäväksi.

Töiden oikeanlainen leimaus oli oleellista myös siksi, että sähköisen mittauksen yhteydessä havaittiin, että jos leimausta ei toteuteta sille tarkoitetulla tavalla, niin tällöin yrityksen varastosaldot eivät päivitty automaattisesti kuittauksien johdosta. Varastosaldot päivittyvät väärin merkattujen leimojen osalta vasta työn jälkeisen työnjohdon kuittauksen perusteella, mikä aiheuttaa töihin kuuluvien varastoartikkelien osalta useiden päivien saldovirheitä. Tämä mittausvirheen aiheuttama saldovirhe saattaa myöhästyttää hankinnan ostotilausten lähettämistä, kun uudelleen tilauspiste eli ROP (Reorder Point) saavutetaan useiden päivien viiveellä. Tästä seuraa tarvittavien osien myöhästymisen. Jos myöhässä tilatut osat saapuvat oletetulla vasteajalla, ovat ne jo valmiiksi myöhässä tilauksen virheellisestä ajoituksesta johtuen. Tähän haasteeseen reagoiva uudelleenaikataulus toimittajan kanssa syö sekä oston resursseja että kustantaa todennäköisesti enemmän nopeutetun toimituksen vuoksi. Kuittautavan koulutuksella ongelma saatiin korjattua ja tällä tavoin mittaus tuotti hyötyä jo mittausvaiheessa.

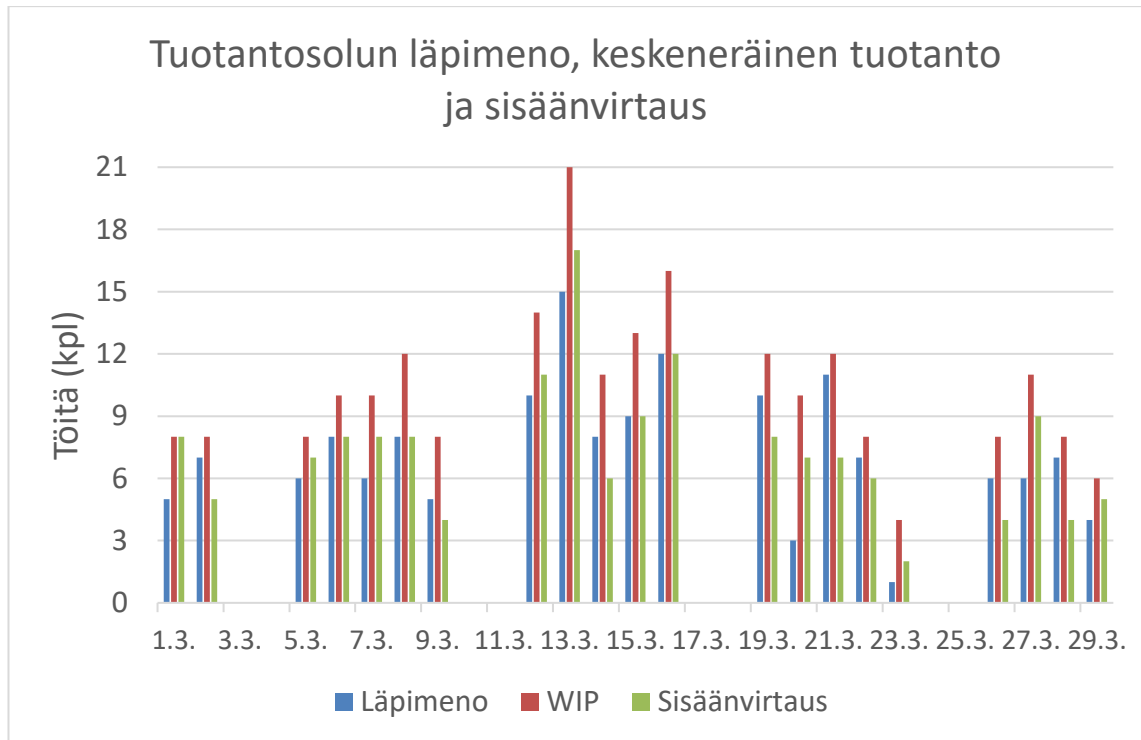
Käsin kuitatut mittaukset saavuttivat myös hyvän kattavuuden. Mittausten lopussa tehdyssä vertailussa havaittiin, että sähköisten ja käsin tehtyjen mittausten ristikkäissaanto oli yli 80%. Saantoa voidaan pitää onnistuneena varsinkin, kun mittausjakso ajoittui päällekkäin lomakauden kanssa, joka lisäsi mitatun osakokoonpanon henkilökunnan vaihtuvuutta. Tähän haasteeseen reagoitiin päivittäisellä mittauksen ohjeistamisella ja aktiivisella osallistumisella osakokoonpanon päivittäiseen työskentelyyn. Asentajilla esiintyi satunnaisia kysymyksiä mittauksen toteuttamisesta, näihin vastattiin koulutuksella ja tarvittavien resurssien kohdentamisella.

Yrityksen operatiivisessa toiminnassa toteutetuissa mittauksissa mainitun kaltaiset yllätykset ovat erittäin todennäköisiä ja kokonaisuutena voidaan sanoa, että mittausten toteutus onnistui hyvin. Tätä väitettä voidaan perustella esimerkiksi sillä, että mittauksen



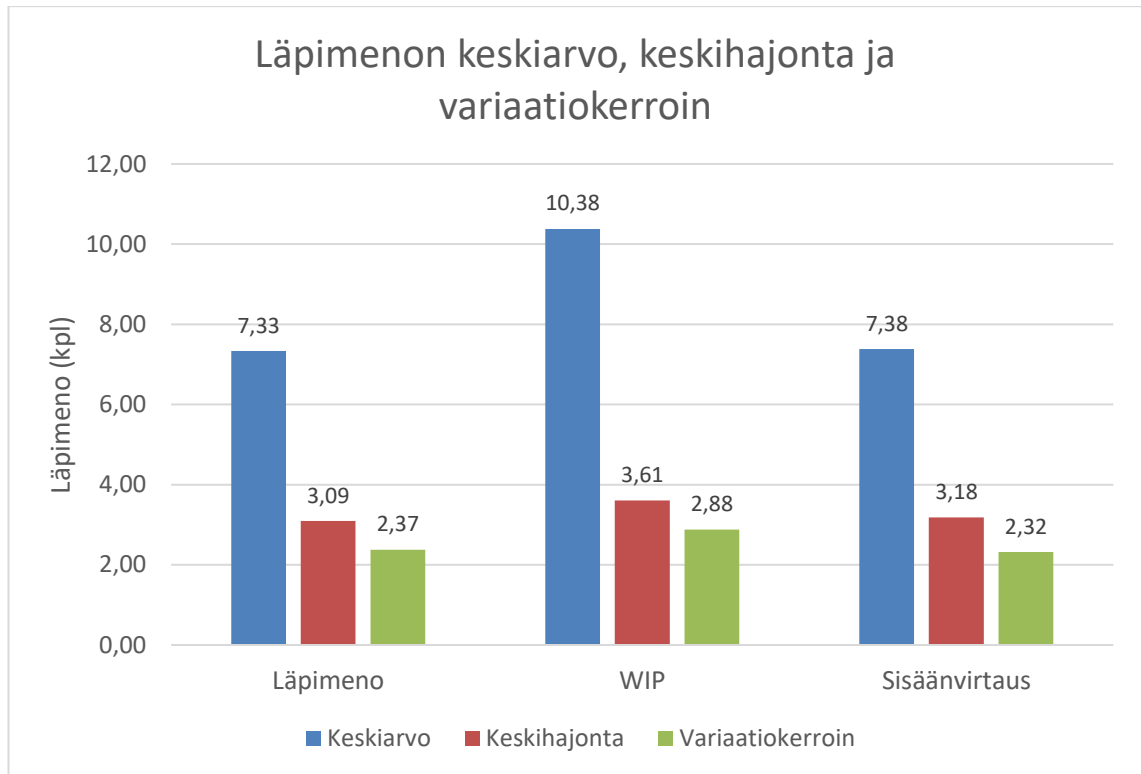
Kuva 20. Sähköisesti mitattu prosessiaika kuvaa sitä käytettävissä olevaa työaikaa mitä kyseinen työ käyttää työvaiheen läpikäymiseen tuotantosolussa.

Kuvasta 21 nähdään, kuinka paljon mitatussa tuotantosolussa oli keskeneräistä tuotantoa mittausjakson aikana. Samalla nähdään myös, miten töitä aloitettiin ja miten niitä valmistui mitatusta tuotantosolusta mittausjakson aikana. Kaikissa kolmessa suorituskykyparametrissa havaittiin mittausjakson aikana merkittävää vaihtelua.



Kuva 21. Tuotannon läpimeno, sisäänvirtaus ja keskeneräinen tuotanto tarkastelujaksolla.

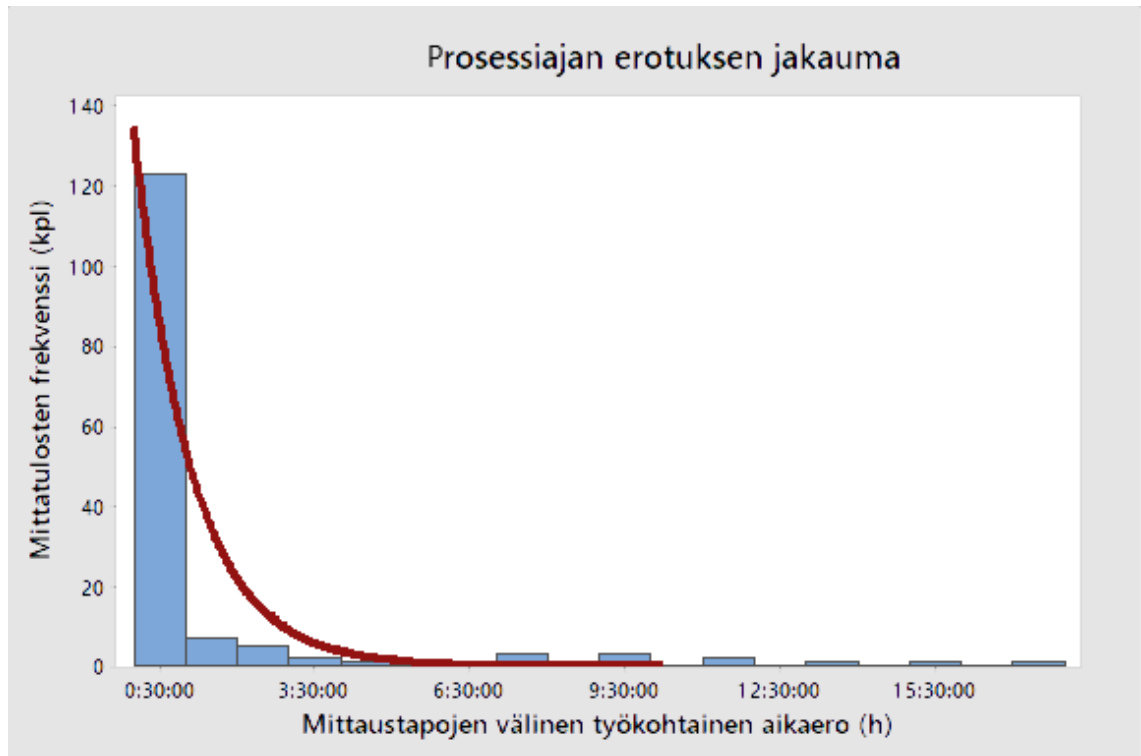
Töiden mittausta tarkasteltaessa voidaan laskea, että tuotantosolun läpäisi keskiarvoisesti noin 7 työtä päivässä (kuva 22). Läpimeno vaihtelu oli keskihajonnan muodossa laskettuna noin 3,09. Näiden tulosten perusteella laskettu variaatiokerroin (kaavat 3 ja 4) oli 2,37. Töiden sisään virtauksen arvot olivat hyvin samankaltaisia läpimenoon nähden. Keskeneräisen tuotannon keskiarvo oli 10,38 ja sen keskihajonta oli 3,61 variaatiokertoimen ollessa 2,88.



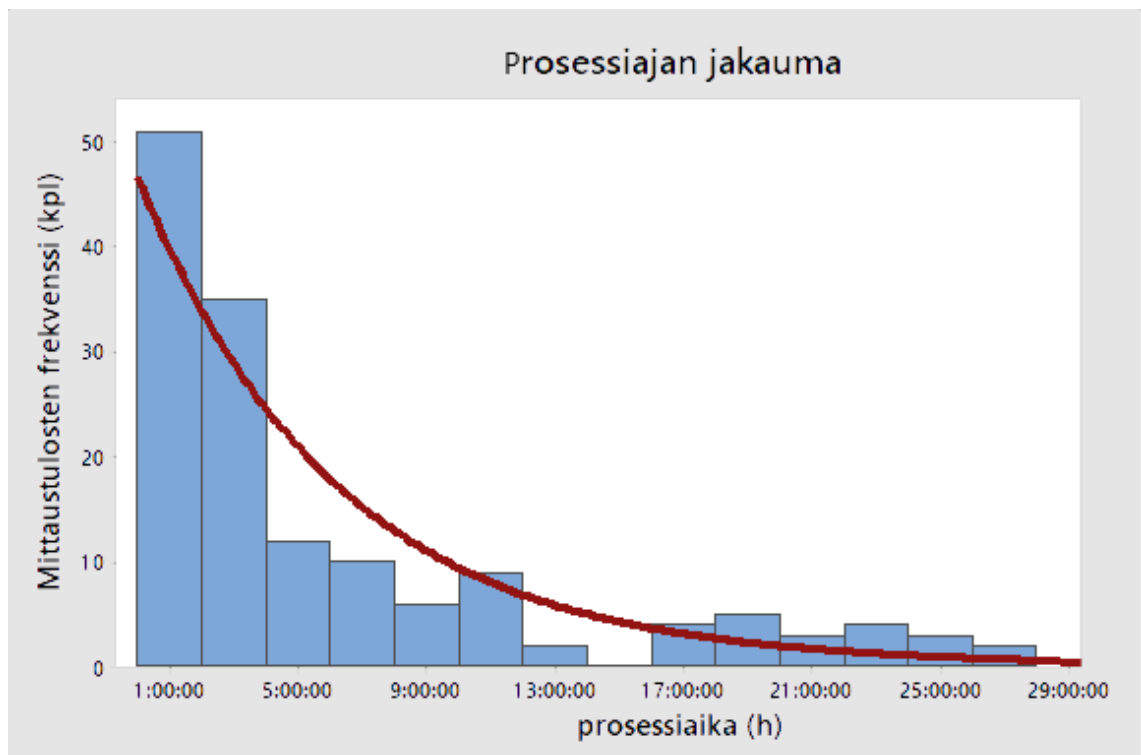
Kuva 22. Mitattujen töiden perusteella voidaan laskea keskiarvo, keskihajonta ja variaatiokerroin.

3.5 Mittaustulosten tilastollinen analyysi

Luvussa 3.4 esitettyjä mittaustuloksia voidaan analysoida luvussa 2.2.3 esitetyn tilastollisen prosessiohjauksen avulla. Kuvista 23 ja 24 nähdään selkeästi, että tässä työssä mitattu prosessiaika muodostaa eksponentiaalisen jakauman. Mittauksen luotettavuus paranee otannan kasvaessa, koska suuremmalla mittausdatalla histogrammin palkit alkavat lähentyä eksponentiaalista sovitetta. Tällä on merkitystä mittauksen luotettavuuteen, koska tilastollisen prosessiohjauksen ohjausrajat perustuvat todennäköisyysjakaumaan, joka on tässä tapauksessa eksponentiaalisen jakauman muotoinen. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kun mittaustulokset lähestyvät kuvissa 23 ja 24 nähtäviä sovitteita, samalla parantuu myös SPC:n käyttämien ohjausrajojen kyky rajata pois luvussa 2.2.3 käsitellyjä prosessin erityisyyttä. Erityisyyden löytämisellä tilastollinen prosessiohjaus kykenee tasapainottamaan tuotantoprosesseissa ilmenevää vaihtelua.



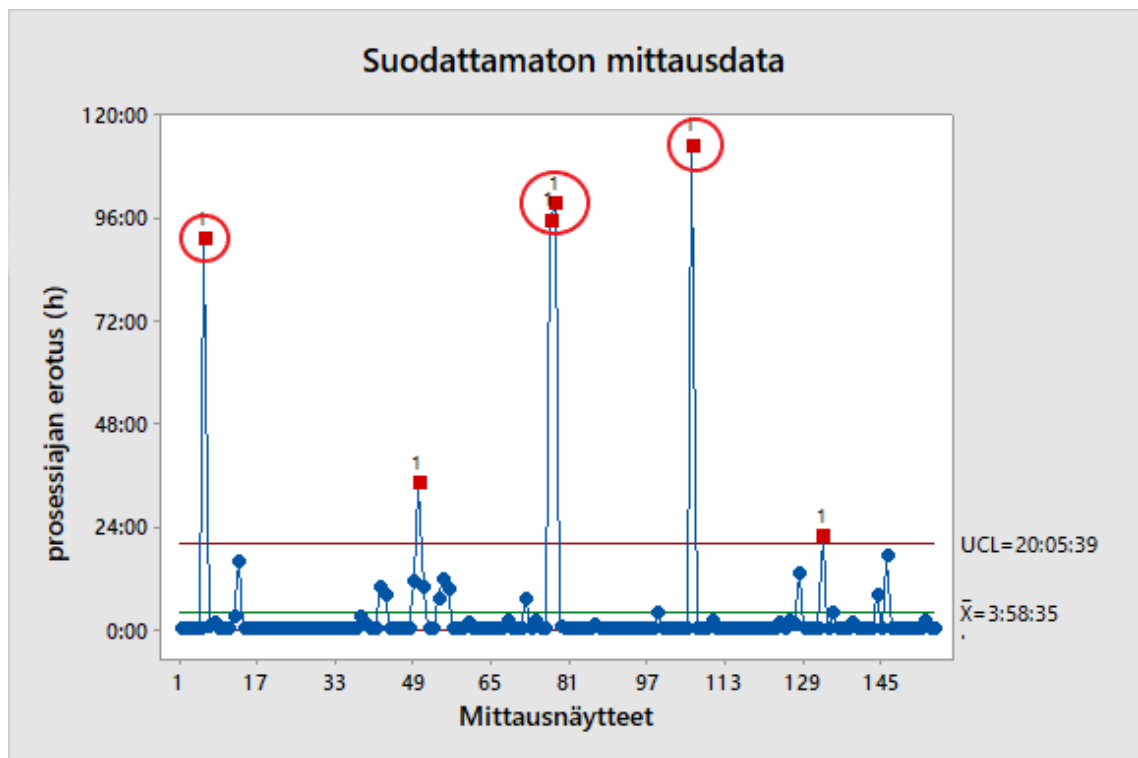
Kuva 23. Mittaustapojen välistä erotusta mittaava eksponentiaalijakauma suppenee nopeasti kohti nolla, joka kertoo, että merkittävä osa mitta-arvoista saa yhtenevän arvon molemmilla mittaustavoilla.



Kuva 24. Töiden prosessiajassa on enemmän hajontaa. Suurempi hajonta kertoo tuotantosolun kokemasta vaihtelevasta työkuormasta.

Alla näkyvässä kuvassa tutkimuksen mittaustulokset on tuotu tilastollisen prosessiohjauksen mukaiseen jatkuvan aikadatan ohjauskorttiin, jossa mittaustuloksille on laskettu ohjausrajat luvun 2.2.3 teorian mukaisesti. Ohjausrajat on laskettu mittaustuloksista kuvaavan tilastollisen jakauman eli kuvien 23 ja 24 perusteella eksponentiaalijakauman mukaisiin 3 keskihajonnan ohjausrajiin. Ohjausraja lasketaan kaavan 7 mukaan. Mittausdatan keskiarvo (kuva 24) on 3:58. Tähän arvoon lisätään 3 kertaa keskihajonta, joka on kaavan 4 mukaan laskettuna 5:26. Näin yläohjausrajaksi saadaan 20:05. Aikaa mitattaessa aliohjausrajaa ei tässä tapauksessa huomioda, koska ohjausraja olisi ajan suhteen negatiivinen.

Tilastollisen menetelmien perusteella mittaustuloksille voidaan määrittää aikadataa mitaava ohjauskortti. Kuvassa 25 nähtävästä ohjauskortista huomataan, miten mittausjaksolla esiintyi koulutuksesta huolimatta vielä 4 tapausta, joissa mittausa ei kuitattu sovitulla toimintatavalla. Näiden töiden aikaleimat vääristyivät useita päiviä, ja ne ylittivät ohjauskortin ohjausrajan (UCL). Tällä voidaan arvioida olevan merkittäviä vaikutuksia varastosaldojen reaaliaikaisuuteen, ja siten toimittajien kykyyn reagoida ostotilauksiin kohdeyrityksen tuotantoa tyydyttävällä vasteajalla.

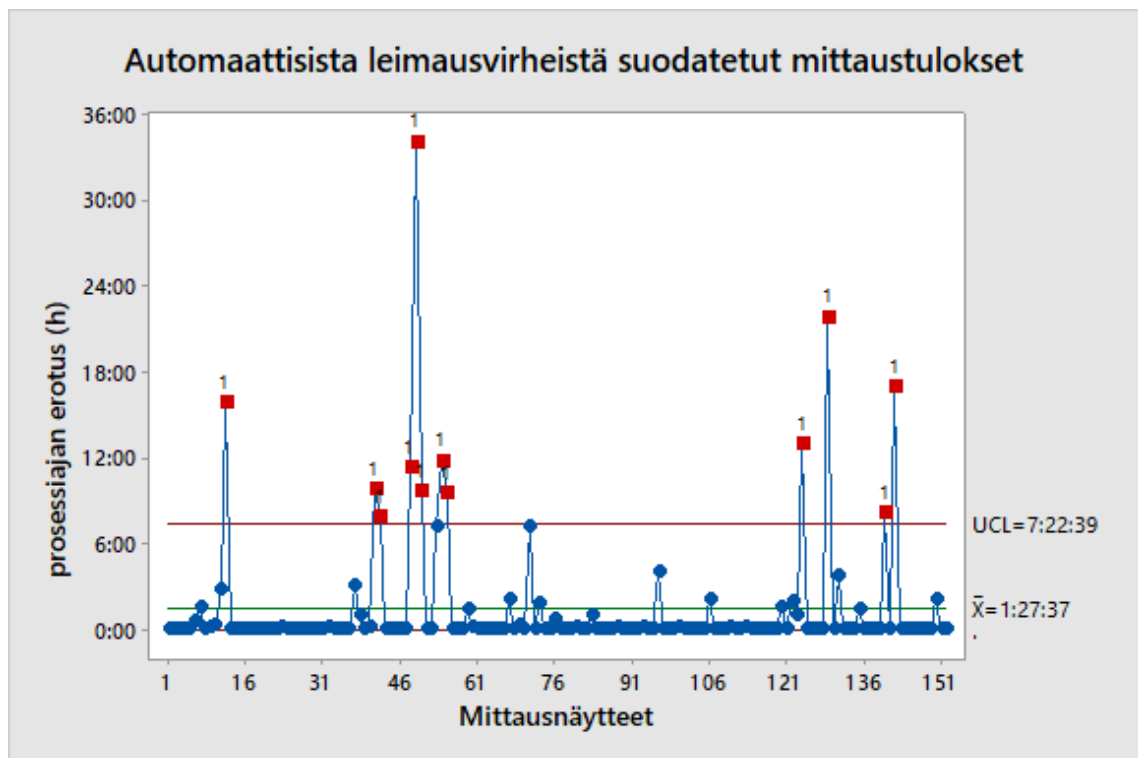


Kuva 25. Mittaustapojen välinen erotus prosessiajassa kertoo selkeästi virheellisen automaattileimauksen aiheuttamista merkittävistä mittausrvirheistä.

Kun tarkastellaan sähköisen ja käsin mitatun prosessiajan erotuksen tuloksia ilman automaattileimausvirheitä, niin huomataan, että mittausrvirheen keskiarvo laskee merkittävästi. Jäljelle jäävät 153 mittaustulosta muodostavat keskenään kuvan 26 mukaisen jakauman. Uuden ohjausrajan yläpuolelle jää 12 mitta-arvoa, joiden yksityiskohtainen tarkastelu lisää tuotantoprosessin ymmärrystä. Näiden poikkeamiksi muodostuvien arvojen

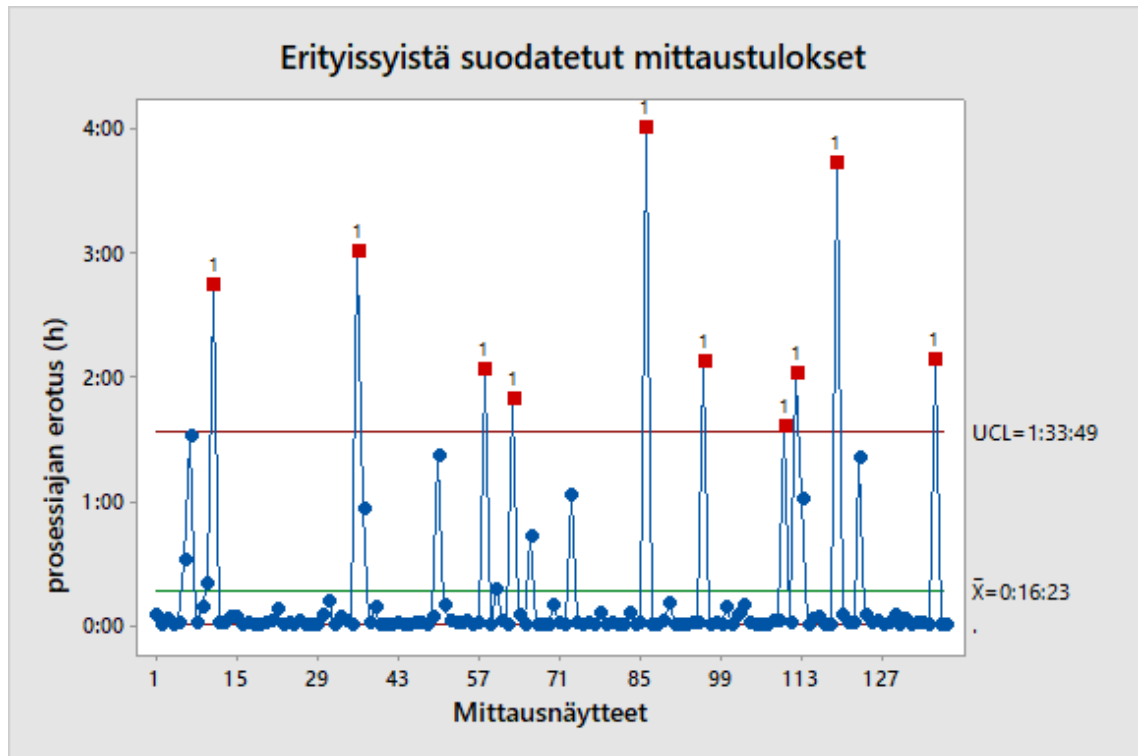
taustalta paljastuu tuotannolle tyypillisiä erityisyyttä. Näiden töiden toteutusta tarkasteltaessa huomattiin, että työt sisälsivät yllättäviä keskeytyksiä kuten viallisia komponentteja, kesken työtä toteutettuja maalauksia ja osaluettelovirheitä. Ohjausrajan ylittävien 12 mitta-arvon lisäksi myös 2 ohjausrajan tuntumassa olevaa arvoa paljastuivat työkohtaisessa tarkastelussa erityisyyden sisältäväksi. Erityisyyden työkohtainen tarkastelu oli mahdollista, koska tuotannossa toteutetussa mittauksessa kerättiin ylös työkohtaisesti myös kaikki toiminnassa ilmenneet poikkeumat. Pilotoinnilla pystyttiin siis havaitsemaan yksittäisiä erityisyyttä ja kohdentamaan näihin syihin korjaavia toimenpiteitä, mutta systemaattiseen laadun rakentamiseen tarvitaan kokonaisvaltaisempaa mittausta.

14 virheellisen mittaustuloksen joukossa on myös 5 mitattua arvoa, joissa työn käsin tehty kuittaus on tapahtunut vuoronvaihdon yhteydessä, mutta sähköisesti työ on kuitattu vasta seuraavana aamuna. Näiden kuittauksien ajoituksen ja asentajien kanssa käydyn keskustelun perusteella voidaan sanoa, että virheet ovat inhimillisiä mutta vältettävissä. Sama päätelmä koskee kaikkia 14 erityisyyden sisältävää mittaustulosta. Erityisyyden käsittely laatujärjestelmän vikailmoitusten ja haastattelujen kanssa paljastaa, että kuvaajassa 26 esiintyvät ohjausrajan ylittävät mittausvirheet johtuvat järjestelmässä tapahtuneista poikkeustapauksista. Kuittausten unohtumisen lisäksi mittausvirheet syntyivät aikataulutuksen muutoksista ja puutteellisesta suunnittelu- ja tuotelaadusta. Mittausvirheet syntyvät siis osittain tuotantojärjestelmän korkeasta vaihtelun tasosta, jota vähentämällä pystytään parantamaan sekä mittauksen tarkkuutta että lyhentämään prosessiajan kesto.



Kuva 26. Erityisyyt heikentävät merkittävästi sähköisen ja käsin toteutetun mittauksen yhdenmukaisuutta. Samalla myös sähköisen mittauksen luotettavuutta on arvioitava kriittisesti.

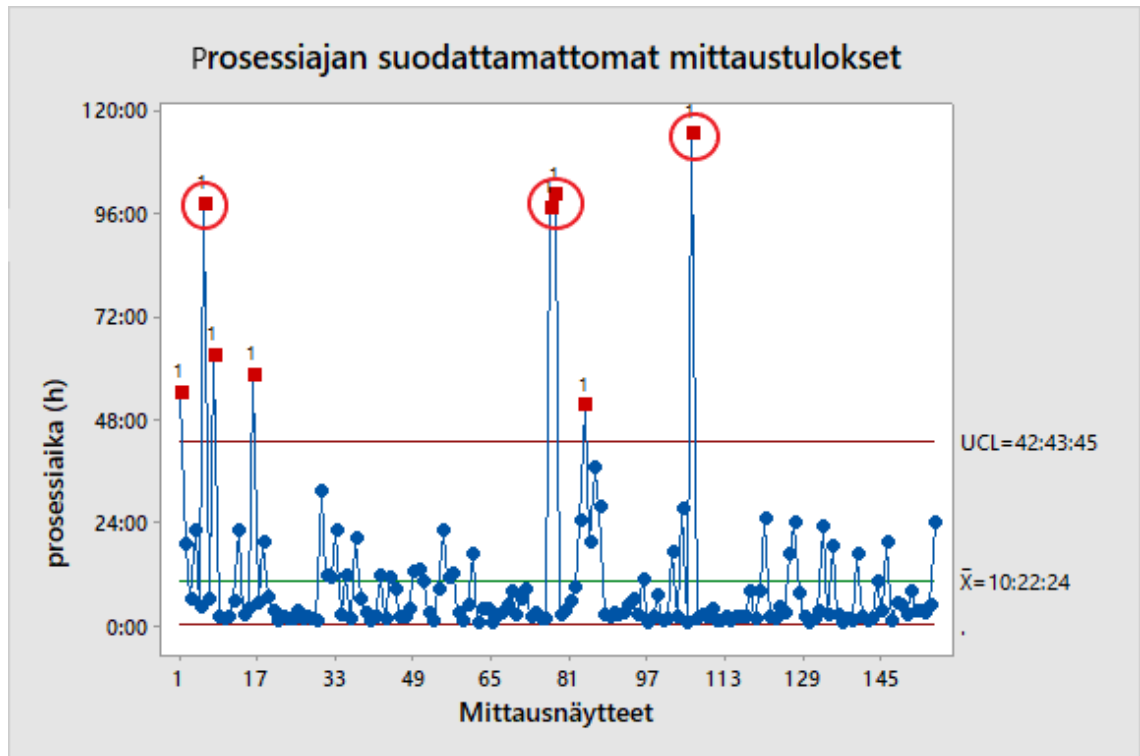
Jäljelle jäävät mittaustulokset tarkentuvat erityisyyden poiston jälkeen. Kuvasta 27 havaitaan, että yli 85% kaikista mittausarvoista eli 135 kpl sisälsivät alle 2 tunnin mittausvirheen. Tämän lisäksi lähes kolmasosa kaikista mittauksista saavutti nollavirhetuloksen suhteessa käsin mitattuihin prosessiaikoihin. Nollavirhe tulosta ei kuitenkaan voida pitää tieteellisesti tavoiteltavana tässä tutkimuksessa, koska itse käsin mittaukseen liittyvät mittausepävarmuustekijöitä, joita arvioidaan tarkemmin luvuissa 4.1 ja 5.2.



Kuva 27. Yli 90% mitta-arvoista sisältää ohjausrajan alittavan mittausvirheen. Noin kolmasosa kaikista mittausarvoista sisälsi nollavirheen suhteessa käsimitauksiin.

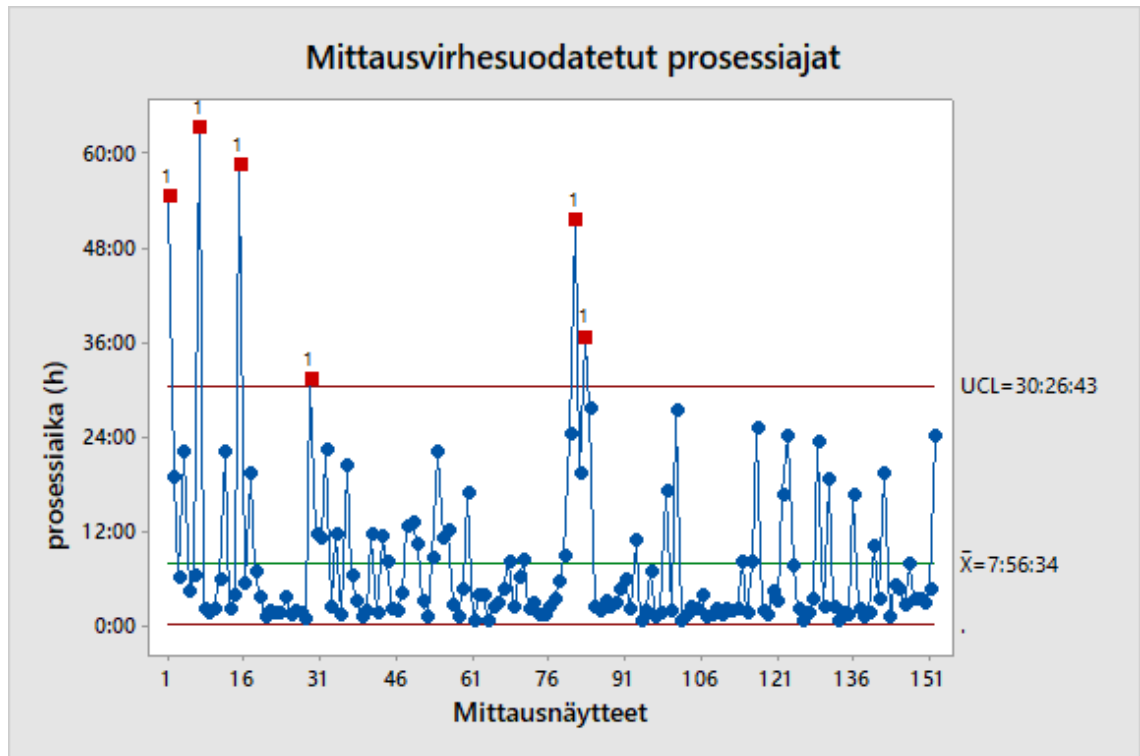
Vertailevien mittausmenetelmien perusteella suodatettua dataa tarkasteltaessa (kuva 27) huomataan, että näiden kahden mittauksen erotus alittaa pääosin luvussa 3.2 käsitellyn mittausvirheen 10% maksimiarvon suhteessa mittauksen toleranssialueeseen. Suodatetussa mittatodassa esiintyy myös arvoja, jotka ylittävät tämän mittausvirherajan, ja nämä kertovat mittauksen sisältämistä heikkouksista.

Mittausvirheiden vaikutusta pystytään ymmärtämään paremmin tarkastelemalla varsinaisia mitattuja prosessiaikoja. Kuvassa 28 nähdään, miten samat neljä automaattista leimausvirhettä nostavat keskimääräistä prosessiaikaa merkittävästi. Tämän vuoksi tutkimuksessa toteutettu mittausapojen välinen vertailu on oleellista mittauksen luotettavuuden arvioimiseksi. Ilman mittauksen luotettavuuden tarkastelua, ei voida luotettavasti hyödyntää mitattavaa prosessiaikaa.



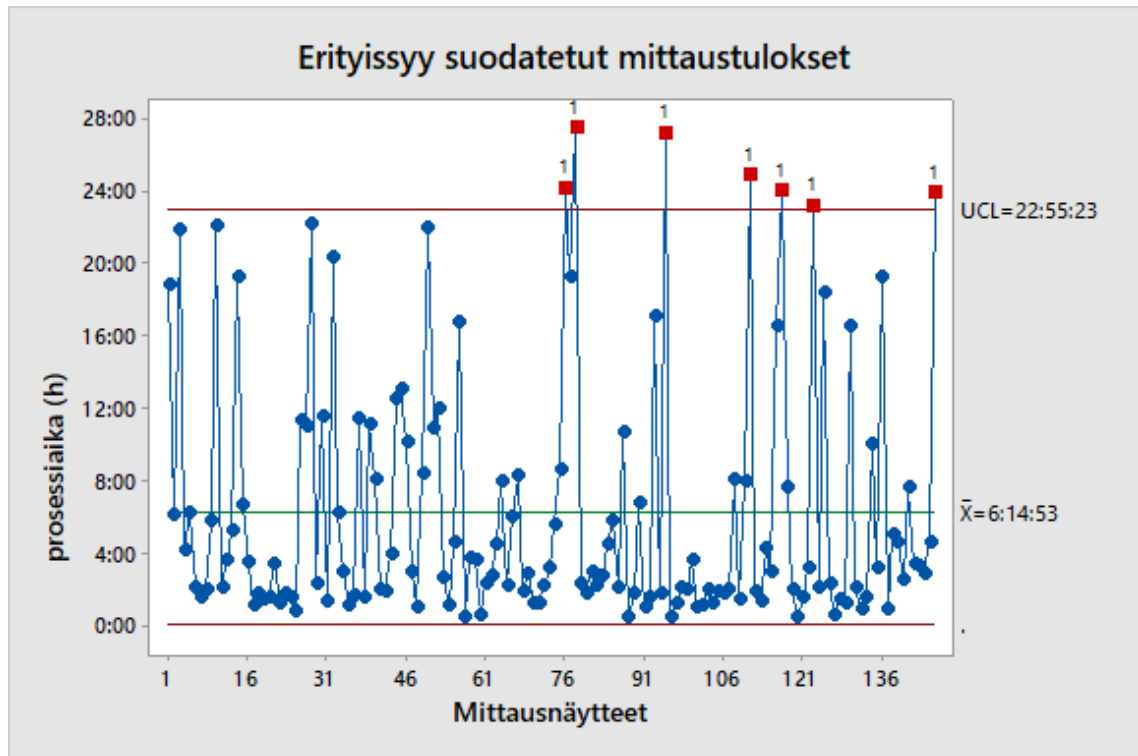
Kuva 28. Prosessiaikaa mitattaessa samat neljä suurta leimausvirhettä nousevat esiin suuresti vääristyneellä prosessiajalla.

Kun prosessiajan mittauksesta on suodatettu pois leimausvirheet, huomataan, että päivitettyyn ohjauskorttiin jää jäljelle 6 ohjausrajan ylittävää työtä (kuva 29). Töiden yksityiskohtainen tarkastelu ERP-järjestelmästä ja asentajia haastatteleamalla paljastaa, että töiden valmistuminen on venynyt tuotantosuosittelman mukaisesta yhdestä päivästä 3-5-kertaiseksi osa- ja laatu puutteiden vuoksi.



Kuva 29. Kun prosessiajan mittauksesta poistetaan automaattileimausvirheet esiin nousevat työt, joiden tekemisessä on esiintynyt erityissyitä.

Kun mittaustuloksista on suodatettu poikkeuksellisen paljon venyneet prosessiajan, huomataan selkeämmin, että yli 80% töistä tehdään alle kahdessa työvuorossa eli 16 tunnissa (kuva 30).



Kuva 30. Kun prosessiajan mittaustuloksista suodatetaan suurimmat erityisyyden sisältävät prosessiajat, nähdään selkeämmin, että osakokoonpanon jaksoaika on merkittävästi osin 1-2 työvuoron mittainen.

Tehtyjen töiden keskiarvo asettuu noin 6 tunnin kohdalle, koska yli puolet kaikista mittausarvoista (87 kpl) ovat kestoltaan alle neljä työtuntia. Merkittävimpien erityisyyden suodattamisen jälkeen jäljelle jäävästä mittausdatasta voidaan sanoa myös, että työajoissa esiintyvä vaihtelu on suurta. Suodatuksen jäljelle jääneen mittausdatan keskihajonta on 6 tuntia 20 minuuttia, joka tarkoittaa käytännössä, että prosessiajan variaatiokerroin suodatetulla mittausdatalla laskettuna saa likiarvon 1 (kaavat 3 ja 4). Arvo on korkea, kun huomioidaan, että mittaustuloksia on suodatettu merkittävästi. Se kertoo myös tuotantosolun kokemasta runsaasta kokonaisvaihtelusta.

Kohdeyritys ei ole aikaisemmin mitannut aktiivisesti tuotteiden prosessiaikaa. Havainto korkeasta kuormitusvariaatiosta ja tuotantosolun kokemasta vaihtelusta tuli kuitenkin ilmi asentajia haastateltaessa. Mittauksen toteutuksen lomassa toteutetuissa haastatteissa huomattiin, että asentajien kokemuksen mukaan tuotantosolun kokema vaihtelu on peräisin tilausten jatkuvasta uudelleenaikataulutamisesta ja niihin pakottavista osa ja laatu-putteista.

Tuotannossa esiintyvät erityisyydet kuten osa ja laatu-putteet aiheuttavat WIP:n kasvua ja siten ruuhkauttaa tuotantosolun työskentelytilaa. Samalla kaikki kuvaajassa 30 näkyvät työt valmistuivat jaksonajan venymisen verran myöhässä suunniteltuun tuotannon aikataulutukseen nähden. Tällä on vaikutusta seuraavien työvaiheiden toteutukseen.

Osakokoonpanojen myöhästyminen loppukokoonpanosta viivästyttää luonnollisesti loppukokoonpanon edistymistä ja vaarantaa siten koko tuotteen valmistumisen aikataulussa.

4. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksen osuudessa tarkastellaan kokeellisen osuuden perusteella saatuja tuloksia. Mittauksen luotettavuuden lisäksi tässä osiossa esitetään tutkimuksen keskeiset havainnot ja arvioidaan mittauksen vaikutusta tuotantoprosessiin.

4.1 Mittauksen luotettavuuden analyysi

Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli tarkastella kriittisesti kohdeyrityksen operatiivista mittausta. Tutkimuksen kriittinen arviointi on perusteltua erityisesti mittauskäytäntöjen, mittaustarkkuuden ja mittaustulosten soveltamisen näkökulmista. Mittauksen toteutuksessa huomattiin, että asentajien kuittauskäytännöissä oli merkittävästi mittaustuloksiin vaikuttavia eroavaisuuksia. Vaikka asentajat kuittasivat työt tuotantosolussa täsmällisesti, esiintyi itse kuittautavassa eroja, mitkä aiheuttivat merkittäviä viiveitä sähköiseen mittaustietoon. Työn sähköisessä kuittauksessa oli kaksi tapaa valmistaa työ, joista toinen vaati vahvistavan leiman tuotantosolun työnjohtajalta, kun taas toinen oli automaattinen. Toimintatavat tuotantosolussa yhtenäistettiin ohjeistamalla kuittaamaan työt kerralla valmiiksi tuotantosolusta käsin.

Asentajien vaihteleva töiden kuittautapa aiheutti niin sanotun automaattikuittauksen, missä ERP-järjestelmä huomaa vasta päivien viiveellä työn olevan jo valmis, jos työtä ei ole kuitattu valmiiksi asianmukaisella tavalla. Työ on tuotantosolun näkökulmasta oikeassa tilassa, mutta lopullinen kuittaus työlle puuttuu. Tällöin se lopettaa työn vasta kuorimitustuntien laskennan jälkeen keskiyön päivityssyklin yhteydessä. Tämä pidentää käsin ja sähköisesti rekisteröidyn prosessiajan erotuksen useisiin päiviin.

Myös käsin mitattu prosessiaika sisältää pienempiä vain minuutteja kestäviä merkitsemisvirheitä. Näitä ilmenee, kun työntekijän kuittaus siirtyy esimerkiksi kahvitauon jälkeen toteutettavaksi, tai jos työntekijä hoitaa muihin töihin liittyviä asioita ennen nykyisen työn päättämistä. Näitä ja sähköisessä mittauksessa havaittuja puutteita ei voida kiistää, mutta niiden vaikutus varsinaiseen prosessiajan mittaukseen jää maltilliseksi.

Käsin mitattujen tulosten tarkkuus hyväksytään vertailuarvona sähköiselle mittaukselle, koska sen toteutusta seurattaessa ei ilmennyt merkittäviä käsimittauksen luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä kuten sähköisten mittausten automaattileimausvirheiden kaltaisia systeemipohjaisia ongelmia. Käsin tehtyjen mittausten luotettavuuteen tehdyt havainnot ovat suuruusluokaltaan minuutteja, korkeintaan kymmeniä minuutteja. Tätä voidaan verrata leimausvirheistä ja erityisyyistä suodatettuun prosessiajan mittausdataan (kuva 27), jonka arvot esiintyvät tyypillisesti alle 4 tunnissa. Näin tarkasteltuna on selvää, ettei minuuttien virhe edusta näin suuressa prosessiajan vaihtelussa merkittävää virhetekijää kokonaisuuden kannalta.

Mittauksen luotettavuuden haasteet voidaan jakaa kolmeen komponenttiin. Ensimmäisenä mittauksen luotettavuutta heikentävänä tekijänä voidaan kritisoida jo luvussa 3.3 sivuttua molempien mittaustapojen absoluuttista tarkkuutta. Kuten kuvasta 26 tehdyn analyysin perusteella jo mainittiinkin, ei kumpaakaan mittaustapaa voida pitää absoluuttisesti oikeana. Kaikki mittaustavat, joissa asentaja kuittaa itsensä työlle sisältävät aina asentajakohtaista variaatiota, jonka suuruusluokka on muutamissa minuuteissa. Asentajakohtainen variaatio näkyy vain osittain mittaustuloksissa. Muutamien minuuttien suuruusluokan kohina on nähtävissä kuvassa 29. Toisaalta asentajakohtaiset tavat suorittaa kuittaus eri menetelmillä eroavat eikä molempiin kuittaustapoihin sisältyvä omanlaisensa kuittauskäytäntövariaatio näy mittaustuloksissa.

Tähän haasteeseen voitaisiin vastata helpottamalla asentajien toteuttamaa kuittausta niin, että kuittauksen vaiva olisi asentajalla olemattoman pieni. Tällainen tapa voisi olla esimerkiksi yleisesti logistiikassa käytettävä QR-koodi, joka kuitattaisiin työkohtaisten materiaalien siirron yhteydessä. Järjestelmäpohjaisella yksinkertaistamisella voidaan luoda toimintapolku, joka on yksinkertainen ja yksiselitteinen käyttää. Tällä voidaan merkittävästi vähentää asentajakohtaisia ja mittaustapakohtaista variaatiota.

Toisena mittauksen luotettavuutta heikentävänä tekijänä ovat tuotantojärjestelmän sisäänrakennetut kuittauskäytännöt. Kuvassa 28 näkyvän ohjaukskortin perusteella käsittelyjen erityisyyden taustalta löydettiin tutkimuksessa useita systeemiperäisiä ongelmia. Näitä ovat esimerkiksi jälkiasennuksena normaalin prosessiketjun ohi tehtävät työt, jotka jätetään pahimmillaan viikoiksi odottamaan työasemalle sopivaa jälkiasennusvaihetta ja sitten työ suljetaan, kun osa on asennettu tuotteisiin esimerkiksi normaalin loppukokoonpanon sijaan tuotteen viimeistelyn yhteydessä. Tällaisia poikkeuskäytäntöjä esiintyy varmasti yleisesti valmistavan teollisuuden yhteydessä, mutta ne ovat vaihtelua lisääviä ongelmia joita voidaan poistaa vain toimintatapojen yhtenäistämällä ja systeemiä muuttamalla. Järjestelmämuutoksilla on luotava edellytykset kuitata tuotantosoluissa tehtävää työtä oikein, jotta sen luotettavuus on riittävällä tasolla.

Kolmantena mittauksen mittausepävarmuuteen vaikuttavana tekijänä sähköisen järjestelmän leimaukset. Virheelliset automaattileimaukset heikentävät merkittävästi mittauksen luotettavuutta, mutta niiden suodattaminen mittausdatasta on helppoa. Automaattileimaukset tapahtuivat aina vuorokauden vaihtuessa ja tällaiset leimat olivat normaalissa tuotannossa mahdottomia tehtaan kaksivuorotuotannon vuoksi, joten niiden esiintyminen oli helppoa paikantaa. Huolestuttavampaa mittauksen näkökulmasta onkin, löytyykö kuittaustapojen perusteella muita toimintamallien eroja, jotka johtavat systeemin erilaiseen käyttäytymiseen. Kun tässä kuormitusryhmässä löytyi toimintatavoista liikkeelle lähtenyt järjestelmän leimausvirhe, niin mittauksen luotettavuuden näkökulmasta täytyy olettaa, että tämän tyyppisiä haasteita voi löytyä myös muista tuotantosoluista. Nämä

haasteet täytyy ensisijaisesti ratkaista ERP-järjestelmän käyttöliittymää muuttamalla niin, että järjestelmän helppokäyttöisyys tuotannossa on etusijalla.

Oleellista mittaustulosten hyödynnettävyyden näkökulmasta on, ovatko mittaustulokset sovelluskelpoista operaatiotieteen teorioiden hyödyntämiseen tuotannossa, vai täytyykö mittausten menetelmiä kehittää tarkemmiksi. Tehtyjen mittausten ja niistä saatujen tulosten pohjalta toteutetun loogisen päättelyn avulla voidaan sanoa, että yllä mainitut mittausvirhettä aiheuttavat komponentit heikentävät merkittävästi kohdeyrityksen kykyä mitata tuotantoa luotettavasti. Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen voidaan siis vastata, ettei mittaus ole tällä hetkellä luotettavaa, mutta sitä voidaan kehittää kohti riittävää tarkkuutta.

Suodattamaton mittausdata (kuva 25) ei mahdu luvussa 3.2 esitettyihin mittauserävarmuuden maksimiarvoihin. Suodattamattoman mittausdatan mittausvirhe on keskiarvollisesti 4 tuntia kun suunnittelun aikataulun tarkkuuteen suhteutettuna hyväksyttävä toleranssi on 1 tunti ja 36 minuuttia (Salomäki 2003, s. 106-144). Tämän vuoksi mittauksen tarkkuutta ja edellytyksiä pitäisi kehittää merkittävästi, ennen kuin mittausdataa voidaan pitää suoraan täysin luotettavana pohjatietona operatiivisia päätöksiä tehtäessä.

Tilastollinen prosessiohjaus ja mittaustulosten analyysi mahdollistaa mittausvirheiden analyysin lisäksi kuitenkin myös tulosten analysoinnin. Tutkimuksen avulla mittauksesta on pystytty erottamaan keskeiset mittausvirhettä aiheuttavat komponentit. Kun näiden vaikutus suodatetaan pois mittaustuloksista, ovat myös mittaustulokset käyttökelpoisia tuotannon kokonaiskuvan hahmottamista varten.

Luotettavan mittauksen toteuttamiseksi tulisi varmistaa, että prosessiajan mittauksissa esiintyviä mittausvirheen elementtejä pystytään pienentämään. Tätä voidaan edistää vain mittausvirhettä aiheuttaviin komponentteihin yksityiskohtaisesti puuttamalla. Tutkimuksessa havaittiin, että mittauspilointi on erinomainen tapa puuttua mittauksen ongelmiin. Se mahdollistaa sekä mittausdatan analyysin että yhtenäisten toimintatapojen koulutuksen. Samalla se tuo esiin myös systeemipohjaiset ongelmat, jolloin niiden poistaminen esimerkiksi ERP-järjestelmää muuttamalla tai ohjeistusta selkeyttämällä on mahdollista. Mittauspilointi edistää myös tuotantojärjestelmän vaihtelun hallintaa, jolla selkeitä heijastevaikutuksia esimerkiksi tuotannossa ilmenevien erityistoimenpiteiden määrään, jotka vaikuttavat mittauksen luotettavuuteen.

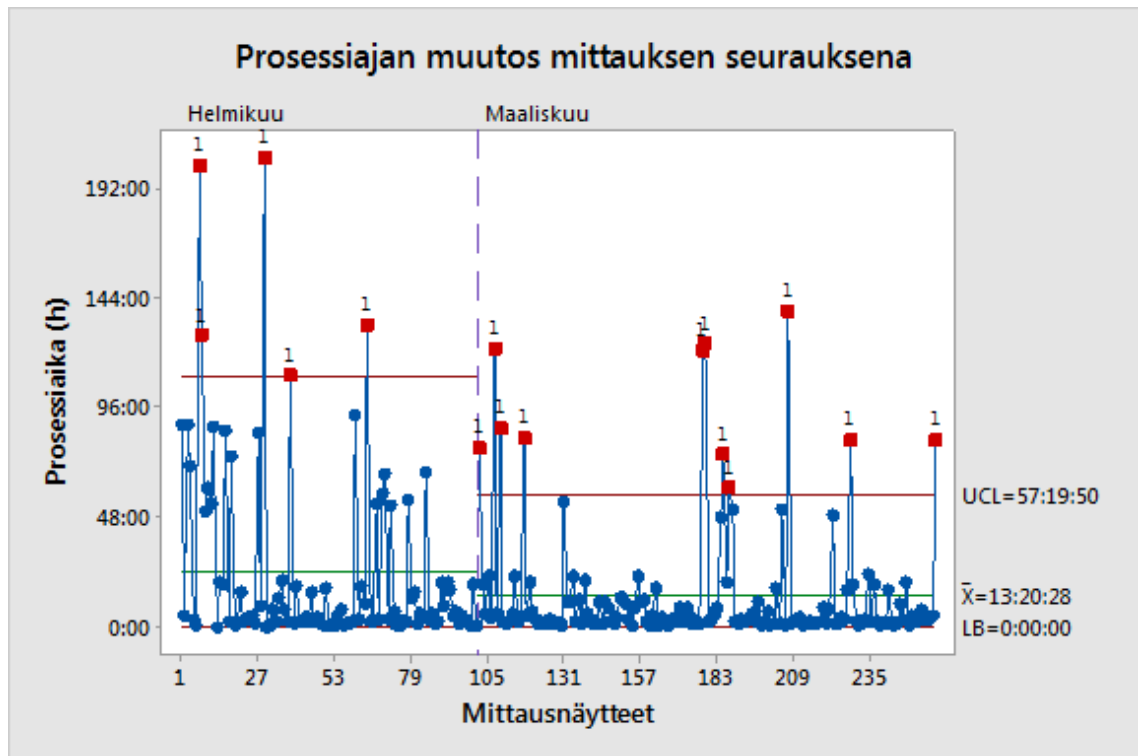
4.2 Mittaustulosten analyysi

Kokonaisuutena mitatusta prosessiajasta voidaan sanoa, että mitattu tuotantosolun kokee runsaasti vaihtelua prosessiajan näkökulmasta. Työkuormien kesto ja volyyymi vaihtelevat kuvassa 30 näkyvällä tavalla, joka vaikeuttaa logistiikan reagoinnin ennakoimista. Toisaalta voidaan myös sanoa, että lopetus ja aloitusleimojen mittaus ja näiden erotuksen laskenta on helppo tapa laskea prosessiaikaa. Prosessiajasta voidaan kappaleessa 3.2 käsitellysti laskea tuotannon vaihekohtainen läpimeno lähes reaaliaikaisesti. Toteutetun

mittausanalyysin perusteella toiseen tutkimuskysymykseen voidaan siis vastata, että prosessiajan laskenta työvaihekohtaisten kuittausten perusteella on yksi mahdollinen tapa mitata tarkasti tuotannon vaihekohtaista läpimenoa. Tämä mittaustapa mahdollistaa luvussa 5 käsitellyt kehitysehdotukset, jotka toimivat taloudellisena ajurina diplomityön ja mittauksen kehittämisen taustalla.

Tuotannosta mitatusta korkeasta vaihtelusta voidaan sanoa, että tuotantosolu kykenee yleensä toimimaan paremmin, jos työt ovat kestoiltaan tasaisempia, jolloin työn vaihdot, osien saapumiset ja seuraavien työvaiheiden reagointi pystytään ajastamaan järkevästi. Jos työvaihetta esimerkiksi seuraa osassa tapauksista kokoonpanojen maalaus, on huomattavasti tehokkaampaa valmistaa tasaisia kokoonpanoja, jotka valmistuvat ennen tehtaan sulkeutumista yöajalle. Tämä mahdollistaa töiden maalausten kuivumisen yöaikana ja edistää tuotteiden aikataulunmukaista siirtoa loppukokoonpanoon. Epätasainen kuormitus on vain yksi korkeahkon kokonaisvaihtelun lähteistä. Tuotantosolun vaihtelua aiheuttavat todennäköisesti kaikki luvussa 2.1.4 käsitellyt vaihtelun lähteet.

Epätasaisen kuormituksen lisäksi mittauksen tuloksena huomataan, että jo pelkkä tuotantosolussa toteutettu mittaus paransi merkittävästi mittauksen tarkkuutta ja laski siten keskimääräisiä prosessiaikoja. Alla nähtävässä kuvassa 31 nähdään, miten tuotantosolun käsittelemätön sähköisesti ERP-järjestelmästä takautuvasti kerätty helmikuun mittausdata suhteutuu varsinaisen maaliskuun mittauksessa kerättyyn mittausdataan. ERP-järjestelmästä kerättyjen leimauksien perusteella laskettua prosessiaikaa on käsitelty luvun 2.2.3 tilastollisen prosessiohjauksen ohjauskortin perusteella (kaavat 6 ja 7).



Kuva 31. Mittausprojektin vaikutus tuotantosolun prosessiaikoihin.

Ohjauskortista nähdään, että pelkkä töiden kuittaustapojen yhtenäistäminen ja asentajien koulutus on vähentänyt sähköisesti mitattuja prosessiaikojen keskiarvoa noin 50%. Tämä johtuu luvussa 3.5 käsitellyistä automaattileimausvirheiden vähenemisestä. Helmikuun töistä ennen asentajien koulutusta löytyi 18 automaattileimausvirhettä 105 näytteestä. Maaliskuussa koulutuksen jälkeen virheitä löytyi 4 kappaletta 157 mittausnäytteestä. Virheiden määrä tippui siis helmikuun 17%:sta maaliskuun 2,5%:iin. Tämä vertailu todistaa, että jo mittauksen pilotoinnilla ja toimintatapojen yhtenäistämällä saadaan aikaan merkittävä vaikutus tuotannon mittausdatan luotettavuuden näkökulmasta. Mittauspilotointia voidaan siis käyttää tehokkaana kokeellisena menetelmänä mittauksen kehityksessä, jolla sekä löydetään systeemisiä ongelmia, että parannetaan mittauksen tuloksia toimintatapamuutosten kautta.

Prosessiaikoja tarkasteltaessa (kuva 28) huomataan myös, että tuotantosolussa esiintyy töitä, jotka odottavat erityyppisten takia kymmeniä tunteja vaihekohtaista valmistumista. Tämä kasvattaa keskeneräistä tuotantoa ja jaksoaikaa. Se on myös merkittävää ajan hukkausta Leanin näkökulmasta tarkasteltuna. Leanin näkökulmasta tuotantosolussa esiintyy myös ylikuormitusta, kun päiväkohtainen keskeneräisen tuotannon määrä vaihtelee 5 ja 21 välillä tuotantokapasiteetin pysyessä tarkastelujakson aikana likimäärin vakiona.

Korkean vaihtelun, epätasaisen kuormituksen ja toteutetun pilotoinnin korkean tehokkuuden lisäksi prosessiajasta ei voida muodostaa muita vahvoja johtopäätöksiä. Prosessiajan mittaustuloksiin vaikuttaa vahvasti suodatettunakin mittauksen rajallinen luotettavuus. Yleisenä johtopäätöksenä voidaan kuitenkin sanoa, että töiden jakaminen tasaisempiin kokonaisuuksiin vähentää tuotannon vaihtelua ja tuotantosoluun kohdistuvaa keskeneräisen tuotannon jonoutumista. Yksittäinen työkohtainen tarkastelu kertoo, että osa töistä valmistui merkittävästi suunniteltua aikataulusta jäljessä ja tämä indikoi kapasiteetin puutteellisesta mitoitukselta. Näiden alustavien päätelmien mukaan ei voida kuitenkaan suositella toimenpiteitä, koska ennen ohjausta on varmistettava tiedon luotettavuus. Näin varmistetaan, ettei kehitys ja mittausprojekteissa saatujen tulosten perusteella syyllistytä tuotannon yli- tai aliohjaukseen. Luotettava ja tarkka mittausjärjestelmä tukisi tuotannon kehitystä tarjoamalla selkeitä menetelmiä tuotannon käytännön dynamiikan mittaamiseksi. Näin tuotannossa esiintyvät haasteet voidaan paikantaa tehokkaasti.

Mittauksen toteutus osana tutkimusprojektia on osoittanut, että itse mittauksen luotettavuudessa on kehitettävää ja tuotantojärjestelmän mittausjärjestelmässä on systeemiperäisiä ongelmia, jotka pitää ratkaista, että tuotannon mittauksesta saadaan luotettavaa. Luotettavan mittausdatan perusteella voitaisiin arvioida tuotannon nykyistä ohjausta ja tuotannon mahdollisia kehityskohteita osana tutkimuksen johdannossa ja luvussa 2.1 esitettyä pyrkimystä harjoittaa tuotannon kokonaisvaltaista optimointia.

5. TUOTANNON KEHITTÄMINEN

Tutkimuksen johtopäätöksissä huomattiin, että mittaustulokset tarjoavat merkittäviä kehitysmahdollisuuksia. Tuotannon mittauskyvyssä havaittiin mahdollisia kehityskohteita. Nykyinen mittauksen taso arvioitiin riittämättömäksi tehokkaan ja nopean tuotantotiedon analysoinnin näkökulmasta. Mittauksen kehittämiseen panostaminen korkean luotettavuuden ja helpon käytettävyyden saavuttamiseksi, on tämän tutkimuksen merkittävin johtopäätös. Mittauksen kehittäminen riittävälle tasolle mahdollistaa varsinaisten operatiivista kannattavuutta edistävien toimenpiteiden toteuttamisen.

Mittausvirheistä tilastollisen prosessiohjauksen avulla suodatettu mittausdata arvioitiin luotettavaksi ja sen perusteella voidaan soveltaa työn teoriaosuudessa esiteltyjä teorioita. Tämä edellyttää mittauksen kattavuuden ja keston laajentamista totuudenmukaisen tilannekuvan mittaamiseksi. Mittaustuloksista havaittiin useita yhtymäkohtia teorioissa käsiteltyyn dynamiikkaan ja tämä vahvistaa johtopäätöksien mukaisten toimenpide-ehdotusten rakentamista. Toimenpide-ehdotuksilla on tarkoitus vastata mittaustulosten perusteella analysoituihin tuotannon kehitysmahdollisuuksiin.

5.1 Toimenpide-ehdotukset

Mittaustapojen vertailun tuloksena todettiin, että kohdeyrityksen nykyinen mittauksen taso sisältää merkittäviä ongelmia luotettavuuden näkökulmasta. Nämä ongelmat ovat jatkuvasti läsnä yrityksen operatiivisessa toiminnassa. Tuotannon mittauksessa esiintyvät mittausvirheet ovat käsittelemättöminä merkittäviä mittaustuloksiin vaikuttavia tekijöitä. Tämän vuoksi tuotannon mittaukseen olisi syytä investoida. Tämän tutkimuksen valossa jo pelkästään nykyisen tuotantotiedon luotettavuutta kohtaan voidaan esittää kritiikkiä. Johdonmukainen toimintamalli edellyttää, että yrityksen pitäisi ensin varmistaa mittaustiedon luotettavuus, ennen kuin kohdeyritys voi käyttää mittaussjärjestelmiä järkevästi hyödykseen tuotantovirtauksen mallinnukseen.

Tässä tutkimuksessa saadut mittaustulokset esittävät vahvan perustelun mittauksen laajentamiselle kohdeyrityksen tuotannossa. Mittauksen kehittämisen puolesta puhuu esimerkiksi mittauksen aiheuttama sähköisen mittaustiedon virheen merkittävä suppeneminen (kuva 31). Aktiivisilla kehitystoimilla on mahdollista parantaa mittauksen luotettavuutta, kunhan kehitystoimet toteutetaan käytännönläheisesti soveltaen teoriaosuudessa käsiteltyjä muutosjohtamisen keskeisiä periaatteita.

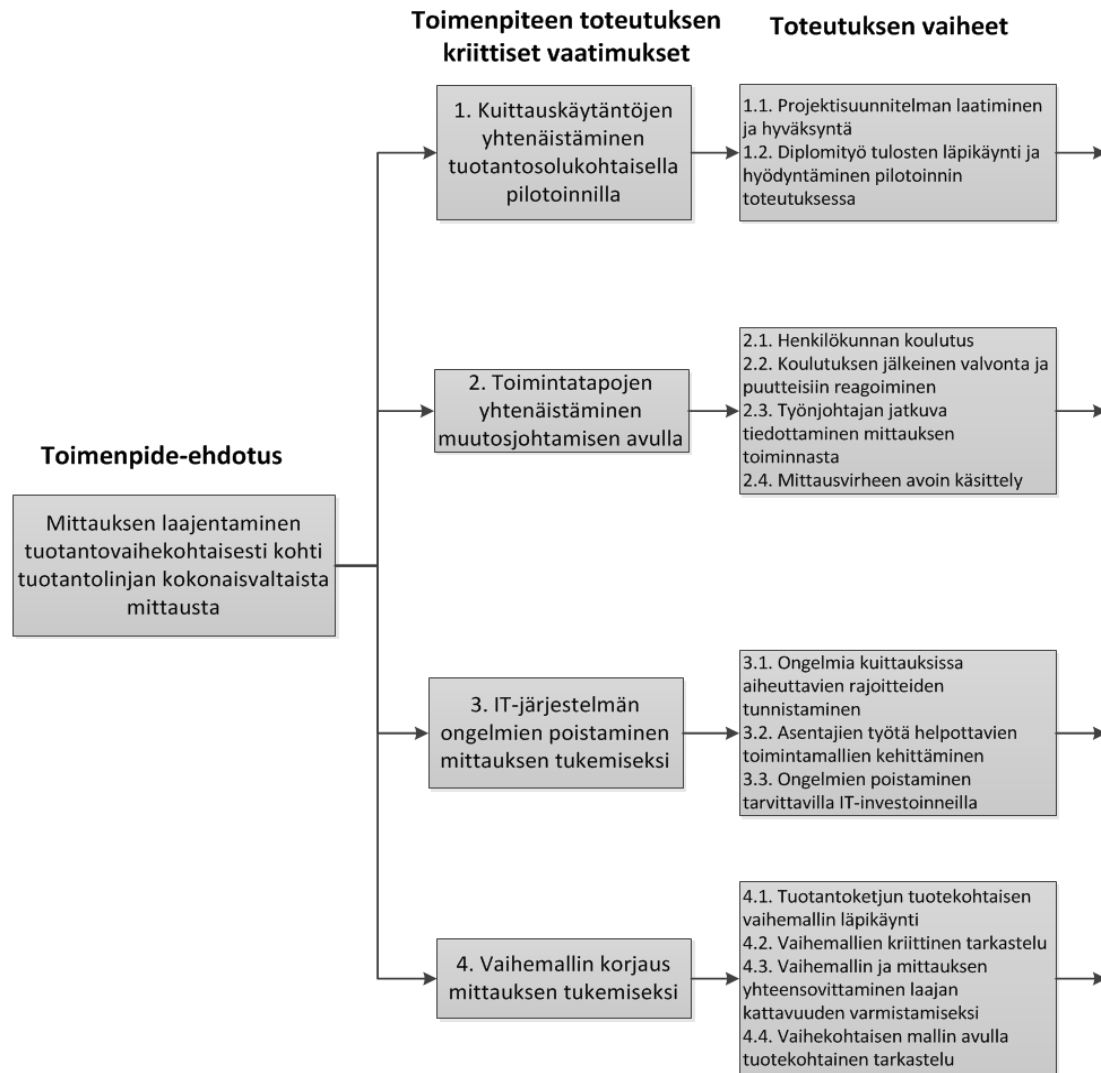
Sähköinen tuotantotieto edustaa yrityksen toimintakyvyn kannalta keskeistä mittaristoa, minkä perusteella yritys tekee operatiivisia päätöksiä. Näitä päätöksiä ovat esimerkiksi tuotannon uudelleenaikataulutukset, kapasiteettimitoitukset, layoutmuutokset ja resursien kohdistukset. Yllä mainittujen toimenpiteiden onnistuminen on yrityksen

operatiivisen kannattavuuden näkökulmasta kriittistä, joten parantamalla ymmärrystä ja reaaliaikaisen tarkemman tuotantotiedon saatavuutta ja luotettavuutta, voidaan samalla kehittää näiden keskeisten toimenpiteiden vaikuttavuutta.

5.1.1 Mittauksen kehittäminen näkyvyyden parantamiseksi

Mittauksen laajentamisella ja luotettavuuden kehityksellä tavoitellaan ensisijaisesti kattavaa faktatietoa operatiivisesta toiminnasta päätöksen tueksi. Mittauksen kehittämisen tavoitteena on tuoda mittauksen tarkkuus ja luotettavuus riittävälle tasolle. Tällaisena tasona voidaan pitää esimerkiksi suodattamattomien mittaustulosten alle 10 % mittausrvirhettä suhteessa toleranssialueeseen, jota käsiteltiin luvussa 3.4 (Salomäki 2003, s. 106–144). Tämän saavuttamisessa keskeisessä asemassa ovat automaattileimausvirheiden ja muiden vastaavien systeemistä aiheutuvien mittausrvirheiden poistaminen toimintatapoja muuttamalla.

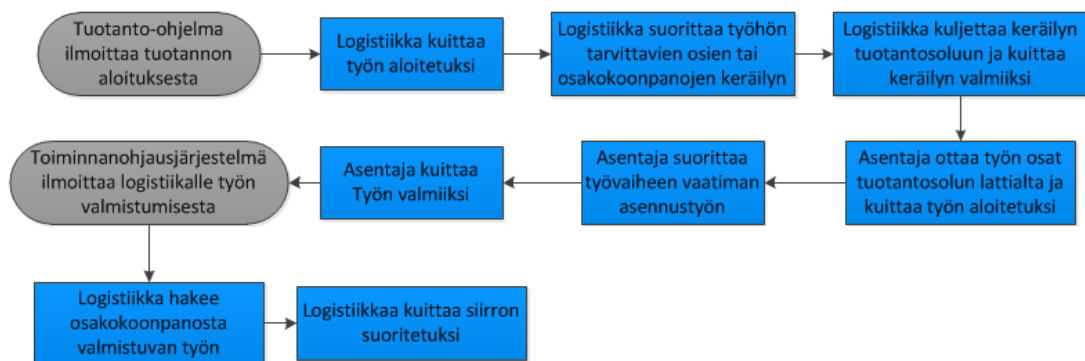
Mittausjärjestelmän rakentaminen voidaan jakaa neljään toimenpiteistä koostuvaan kokonaisuuteen. Nämä komponentit edustavat samalla myös vastausta kolmanteen tutkimuskysymykseen. Komponentit eivät todennäköisesti kata kaikkia mittauksen laajentamisen aikana ilmeneviä ongelmia, mutta ne muodostavat diplomityönperusteella saadun tilannekuvan mukaan keskeisen osan mittauksen toteutukseen liittyvistä haasteista. Näillä toimenpiteillä päästää mittauksen toteuttamisessa alkuun ja projektin jälkeen ilmeneviin haasteisiin voidaan tämän jälkeen reagoida tarpeen mukaan. Ensimmäisenä toimenpiteenä on tuotantovaihekohtainen pilotointi, joka tarkoittaa 1-3 kuukauden jaksoissa tehtäviä mittauspilotointeja. Testimittauksien jälkeen voidaan aloittaa muut keskeiset toimenpiteet mittausjärjestelmän rakentamiseksi: Toimintatapojen yhtenäistäminen, IT-investoinnit ja vaihemallin läpikäynti ja korjaus (kuva 32). Toimenpide-ehdotusten vaihekohtainen toteutus on kuvattu vielä tarkemmin vaihekohtaisesti liitteessä B.



Kuva 32. Keskeiset vaatimukset luotettavan ja tarkan mittausjärjestelmän rakentamiseksi. Liitteenä B koko mittauksen vaihekohtainen projektijaottelu. Liite B tarjoaa samalla yksityiskohtaisen vaihemallin kolmannen tutkimuskysymyksen keskeisistä virstanpylväistä.

Testimittaukset toteutetaan samaan tapaan kuin tässä tutkimuksessa tehty mittauspilotointi. Näiden mittauksien ideana ei ole niinkään kerätä tietoa yrityksen tuotannon suorituskyvystä. Ideana sen sijaan on luoda katsaus tuotantosolukohtaiseen mittaukseen ja samalla muuttaa päivittäisiä toimintamalleja. Mittauspilotoinnilla on saatu tässä tutkimuksessa hyviä tuloksia (kuva 31) luotettavuuden parantamisesta. On myös realistista odottaa, että samanlaisia tuloksia saavutetaan muissa tuotantosoluissa pelkästään mittausta toteuttamalla. Mittauspilotointi toimiikin eräänlaisena mahdollistajana tarkkojen kehitystoimien toimeenpanolle. Pilotointi on tehokas tapa löytää sekä tuotantojärjestelmän puutteellisia rakenteita että toimintamalleja. Nämä systemiset ongelmat ovatkin avainasemassa mittauksen kehittämisessä.

Avain asemassa luotettavan mittausjärjestelmän rakentamisessa ovat yhtenäiset toimintatavat. Tutkimuksen toteutuksen aikana huomattiin useita erilaisia kuittauskäytäntöjä sekä järjestelmällisiä toimintatapoja, jotka eivät tue luotettavien aikaleimauksien rakentamista. Näitä olivat esimerkiksi luvussa 3.2 läpikäyty virheelliset leimaukset ja sykäyksettä tapahtuvat massaleimaukset, joissa suuri määrä tekemättömiä töitä kuitataan kerralla heti valmiiksi aiheuttaen virheellisen leimauksen. Useiden eri toimintatapojen vuoksi kuvassa 33 on läpikäyty mittauksen kannalta järkevä ja yhtenäinen toimintatapa, jonka noudattaminen tukee tuotannon yhtenäistä mittausta. Tämän prosessimallin mukaan yhtenäistetyt toimintatavat tukevat mittauksen tarkkuutta ja kattavuutta.



Kuva 33. Toimintaohjeiden mukainen ja tuotannon kokonaisvaltaista mittausta tukeva prosessimalli tuotantosolun työvaiheista mittauksen ja materiaalivirtauksen näkökulmasta. Suorakulmiot edustavat ihmisten tekemiä prosessivaiheita ja lieriöt tietojärjestelmien tekemiä suoritteita.

Toimintatapojen yhtenäistämiseen tarvitaan luvussa 2.3 käsiteltyä muutosjohtamista, henkilökunnan koulutusta ja johdon vahvaa tukea. Osa toimintatavoista on ollut puutteellisia jo pitkään, mutta niitä on katsottu läpi sormien keskittyen vain tuotteiden nopeaan toimitukseen ja arjen ongelmien ratkaisuun. Pitkäjänteisen kehittämistoiminnan näkökulmasta on kuitenkin kriittistä, että systeemiperäiset ongelmat poistetaan, koska ne aiheuttavat toistuvia ongelmia arjen toiminnassa. Kun esimerkiksi työt kuitataan viikolla viiveellä valmiiksi, johtaa tämä seuraavien osien tilauksen myöhästymiseen virheellisestä varastosaldosta johtuen. Tämä aiheuttaa puutteellisten osien etsinnän ja koordinoinnin, joka syö tuotannon rajallisia resursseja. Voidaankin sanoa, että virheellinen toimintatapa leimauksissa aiheuttaa turhaa kiirettä päivittäisessä toiminnassa. Tällaisten toimintatapojen muutos vähentää kappaleessa 2.1.4 käsiteltyä vaihtelua ja siten vapauttaa resursseja tuottavan työn tekemiseen.

Myös IT-investoinnit aiheuttavat tuotantoon arjen jatkuvia ongelmia. Jo tutkimuksena aikana havaittiin ja korjattiin ERP-järjestelmään liittyviä puutteita kuten leimausten siirtämistä päiväkohtaisuudesta tarkkaan kellonaikaan ja prosessiajan automaattisen laskurin kehittäminen. Nämä muutokset tukivat mittausprojektin toteutusta mutta eivät vielä varsinaisesti ratkaise mittauksen toteutuksessa esiintyviä ongelmia. Mittauksen toteutusta

voitaisiin parantaa läpikäymällä kaikki tuotannossa esiintyvät toimintamallit, joissa on tietotekninen rajapinta. Työajan seuranta- ja ERP-järjestelmät täytyy rakentaa niin, että ne tukevat käytännön tekemistä mahdollisimman hyvin. Asentajille olisi järkevää esimerkiksi rakentaa yksinkertaistettu käyttöliittymä, jossa kuittauksen voi toteuttaa vain yhdellä tavalla ja työn eteneminen ei onnistu ilman kuittausta.

IT-investoinneilla ja johdetulla toimintatapojen muutoksella tähdätään molemmilla mittauksen helppoon toteutukseen. Tavoitteena on tehdä töiden oikeanlaisesta kuittauksesta helpoin toimintatapa, joka on vaivaton sekä asentajille että työnjohtajille. Jos toimintatapa on helpoin mahdollinen, on sen noudattaminen ja siten hyvien mittaustulosten saaminen todennäköistä. Kehitysehdotus on linjassa luvussa 2.2 käytyjen laatutekniikan teorioiden kanssa ja näillä muutoksilla tähdätään laadun asteittaiseen rakentamiseen osaksi tuotantoa järjestelmää muuttamalla.

Viimeisenä mittauksen kokonaisvaltaiseen rakentamiseen tähtäävänä kokonaisuutena ovat kohdeyrityksen tuotteiden vaihemallit. Vaihemalli määrittelee tuotteen työvaiheet, jotka sitten toteutetaan tuotannossa työvaihekohtaisissa tuotantosoluissa. Vaiheissa tapahtuu kuitenkin jatkuvaa muutosta, joka sekä lisää vaihtelua että erilaisia toimintatapoja. Vaihemallin tarkka läpikäynti ja sovitus niin että se vastaa todellista käytännön tekemistä tekee sen noudattamisesta ja tuotannon mittauksesta helpommin toteutettavaa. Vaihemalli on mittauksen kannalta tärkeä, koska tuotannon kokonaisvaltaisen mittauksen pitäisi kattaa koko tuotteen valmistuskaari osien saapumisesta tuotteen lähtöön. Toisin sanoen, vaihemallissa pitäisi olla vain oikeasti toteutettavia työvaiheita oikeilla sisällöillä. Näin saadaan laskettua luvussa 3.1 käsitelty prosessiaika jokaiselle työvaiheelle. Tästä kokonaisuudesta saadaan johdettua tuotteiden vaihekohtainen läpimenon laskenta jaksoaikaa hyödyntämällä (luku 3.1). Vaihekohtainen laskenta mahdollistaa esimerkiksi luvussa 2.1.2 käsiteltyjen pullonkaulojen tunnistamisen ja siten operatiivisen tehokkuuden noston.

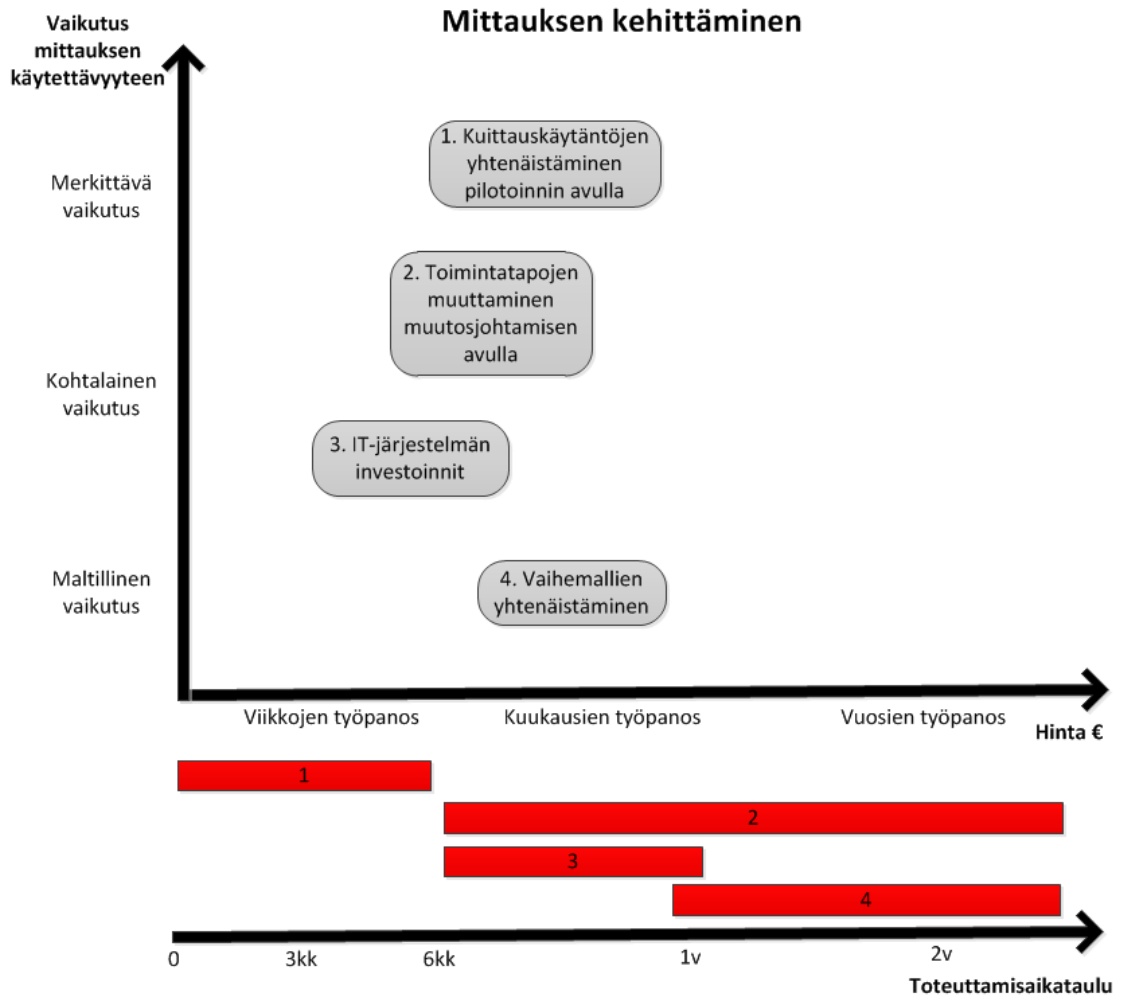
Yllä mainitut mittauksen kokonaisvaltaiseen kehittämiseen tähtäävät toimenpiteet tarkoittavat myös merkittäviä taloudellisia panostuksia tuotannon kehitystoimintaan. Koska toteutettavien toimenpiteiden laajuus ja eteen tulevien ongelmien määrä ei ole täysin selvillä voidaan kustannuksia arvioida lähinnä oikeassa suuruusluokassa. Suurimmat kustannukset tuotannonkehittämisestä aiheutuvat henkilötyöresursseista. Tuotantolinjaston vaihekohtainen pilotointi sisältää logistiikka huomioiden 15 suurta työvaihekokonaisuutta (kuva 17). Tämän vuoksi testimittauksien toteuttaminen 1-3kk kestoilla vie ainakin puoli vuotta ja 1-2 henkilön täyden työpanoksen. Huomioiden työn vaatiman täyden paneutumisen sekä satunnaisen työnjohtajien ja muiden asiantuntijoiden kuormituksen voidaan arvioida, että pilotoinnin kustannukset nousevat useisiin työkuukausiin. Pilotoinnin hinta-vaikuttavuussuhde on kuitenkin kuvan 31 mittaustulosten perusteella erinomainen.

Verrattuna muihin kehittämistoimiin, pilotointi on myös ripein toimenpide. Varsinkin muutosjohtamista vaativa toimintamallien muokkaaminen on jatkuva prosessi, joka vie

vähintään vuosia. Toimintamallien muutos ei vie pilotoinnin tavoin aktiivisesti täyspäivästä työpanosta. Se vaatii kuitenkin runsaasti henkilökunnan koulutusta, johdon sitoutumista ja jatkuvaa tiedottamista muutoksen aikaansaamiseksi. Lyhyellä aikavälillä kustannukset jäävät pilotointia alemmas, mutta vuosien päähän ulottuvalle prosessille on vaikeaa arvioida kustannuksia.

IT-järjestelmien kustannus koostuu pääasiallisesti pilotoinnin aikana käytetystä selvittelystä ja parempien toimintamallien rakentamisesta ja jalkauttamisesta. Pienien IT-investointien kustannus jää muutamiiin henkilötyöpäiviin, mutta niiden määrää on vaikeaa arvioida etukäteen. Muutostarpeet ilmenevät kuitenkin nopeasti pilotoinnin yhteydessä, joten niiden toteuttamisaikatauluksi voidaan ajatella 6-12 kuukautta.

Vaihemalleihin tutustuminen edellyttää tuotannon tarkkaa tuntemusta. Tämän vuoksi vaihemallien ja tuotekohtaisten työskentelymallien muokkaus edellyttää testimittauksien suorittamista. Mittaamalla koko olemassaoloa työvaiheketjua nähdään, onko vaihemalleissa mittaukseen vaikuttavia puutteita. Näiden puutteiden korjaaminen ja kehittäminen on hidas projekti ja se edellyttää sekä johdon että tuotesuunnittelun koordinoitua. Vaikuttavuudeltaan vaihemallit ovat listan toimenpiteistä vähiten vaikuttavia (kuva 34), mutta niiden laiminlyönti johtaa helposti puutteelliseen mittausketjuun, siten läpimenomittauksen vaihekohtaisiin vääristymiin.



Kuva 34. Mittauksen kehitystoimenpiteiden aikataulu ja kustannusarvio.

Kehitystoimien kustannukset ovat suhteellisen pieniä verrattuna toimilla saataviin vaikutavuuteen sekä siihen kehitykseen mitä toteutetun mittauksen (kuvat 31 ja 34) perusteella saatiin aikaan. Noin 50% keskimääräinen prosessiajan lasku kertoo paitsi mittaustarkkuuden heikosta tasosta, mutta myös merkittävästä mittauksen kehityspotentialista. Kohdeyrityksen tuotantoyksikön liikevaihdon liikkua sadoissa miljoonissa voidaan aiheellisesti sanoa, että mittausvirheen vuoksi syntyvän saldivirheen aiheuttamat osapuutteet tarkoittavat yritykselle vuositasolla myöhästyvien tuotteiden muodossa miljoonien eurojen liikevaihdon menetystä. Näiden suuruusluokkien valossa on perusteltua suunnata mittauksen kehittämiseen investointi, joka on suuruusluokaltaan maksimissaan muutamia henkilötyövuosia.

Osana tämän diplomityön toteutusta järjestettiin kohdeyrityksen johdolle myös työpajoja, joissa käsiteltiin diplomityön keskeisiä teorioita ja niiden soveltamista tuotantoon. Tutkimuksen aikana positiivisten kokemusten perusteella suositellaankin, että kehitys- ja laatuorganisaatio järjestäisi jatkossakin yrityksen operatiivista johtoa ja henkilökuntaa kouluttavia työpajoja. Työpajat ovat erinomainen tapa jakaa tietoa tapahtuvasta kehitystoiminnasta ja lisätä samalla ymmärrystä johdon käytössä olevista työkaluista ja toiminnan

mitatusta tasosta. Työpajat ja muutoskoordinointi rakennettiin hyödyntäen luvussa 2.3 käsiteltyjä muutosjohtamisen periaatteita ja siinä korostuvat erityisesti toimintatapojen muutoksen vaatima pitkä sopeuttamisaika ja johdon vankkumaton tuki.

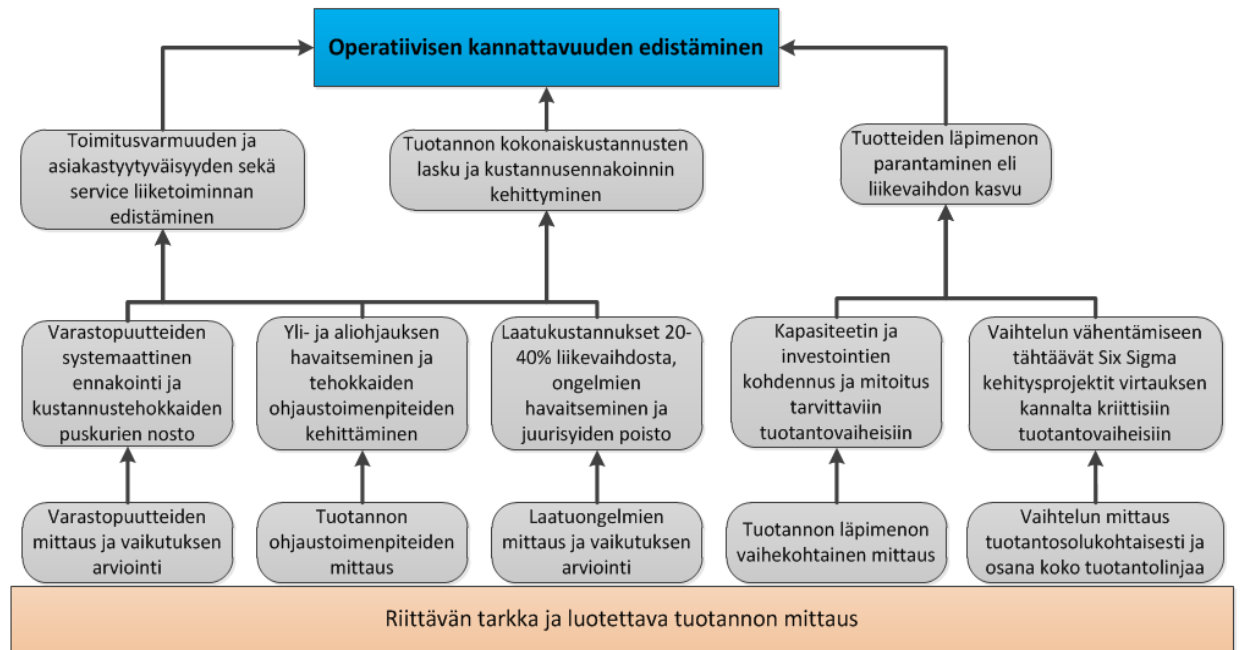
Työn aikana kohdeyrityksen ERP-järjestelmään toteutettiin ohjelmistoinvestointi, jolla tavoitellaan mittauksen helpompaa toteutusta. Tutkimuksessa toteutetussa mittauksessa virtauslaskenta toteutettiin hyödyntämällä Excelin ja Minitabin kaltaisia laskentaohjelmistoja. Mittauksessa tehtyjen havaintojen perusteella toteutettu investointi mahdollistaa kuitenkin töiden virtauslaskennan automatisoinnin suoraan osaksi ERP-järjestelmää. Tämä tarjoaa helposti käytettävän työkalun tuotannonkehittämisen edetessä täysimääräiseen tuotantolinjaston mittaukseen ja mallinnukseen.

Diplomityön perusteella ehdotetaan, että rakennettu automaattista laskentaa voidaan kehittää kohti visuaalista mittaristoa. Hyvänä toteutus pohjana mittaristolle voisi toimia esimerkiksi analytiikkaohjelmisto Microsoft Power BI. Visuaalisille mittaristoille voidaan tiivistää helposti suuri määrä mitattua tuotantotietoa nopeasti tulkittavaan muotoon ja mittariston käyttöönotto tukee varsinaisten kannattavuutta edistävien päätösten tekemistä. Mittariston rakentamista suositellaan rinnan mittauksen luotettavuuden kehityksen kanssa. Tuotannon toimintamallien ja uusien työkalujen jalkauttaminen on hidasta ja on muutosjohtamisen motivaation kannalta tärkeää, että tehdystä kehitystyöstä kyetään näkemään konkreettisia tuloksia kohtalaisen toteutusajan puitteissa.

5.1.2 Operatiivisen kannattavuuden edistäminen

Yllä esitetyllä kehityssuunnitelmalla pyritään rakentamaan tuotantolinjan laajuinen tarkka ja luotettavat mittausjärjestelmä. Itse tuotannon mittaus ei kuitenkaan tuota yrityksessä lisäarvoa vaan sitä tuottaa mittauksen hyödyntäminen operatiivisen toiminnan päätöksenteossa. Mittausjärjestelmää voidaan ajatella perustuksina (kuva 35), jonka päälle rakennetaan lisäarvoa tuottavia toimintoja. Nämä mittaus ja analysointikeinot (kuva 35) toimivat vastauksena diplomityön neljänteen tutkimuskysymykseen, joka on määritetty erityisesti tutkimuksen rahoittaneen kohdeyrityksen taloudellisia ajureita ajatellen. Mittariston mahdollistamien menetelmien avulla pyritään tukemaan luvussa 2.1.1 sekä 2.1.2 käsiteltyjä liiketoiminnan strategisia päätöksiä, joiden pyrkimyksenä on optimoida operatiivisen toiminnan kokonaiskannattavuutta.

Mittauksen mahdollistamia operatiivisia työkaluja on esimerkiksi tuotantosolukohtainen läpimeno eli käyttöastelaskenta, jonka avulla voidaan määrittää tuotannon pullonkaulojen sijainti. Vastaavasti, virtausta mallintamalla voidaan myös havaita muuhun systeemiin nähden tarpeettoman hyvin virtaavia tuotantosoluja ja parantaa näin tuotantojärjestelmän resurssitehokkuutta ylimääräisiä resursseja uudelleen kohdentamalla.



Kuva 35. Mittauksen kehittämisen toiminnan kannalta riittävälle tasolle mahdollistaa varsinaisten tuotannonkehitystoimenpiteiden käyttöönoton. Mittauksen avulla voidaan kehittää sekä tuotannon kustannustehokkuutta että edistää liikevaihdon hallittua muutosta.

Läpimenon vaiheittaisen mittauksen lisäksi voidaan tuotantosolun mittausdatan perusteella laskea (kaavat 3 ja 4) myös solukohtaista vaihtelun määrää. Vaihtelulla on merkittävä vaikutus tuotannon läpimenoon, koska rajusti vaihteleva tuotanto heijastuu työntävässä tuotantojärjestelmässä töiden ajoittaisena odotteluna. Vaihtelua ja käytösuhdetta voidaan mitata jatkuvana virtana sähköisestä mittaustiedosta. Näin niissä tapahtuvia muutoksia pystytään tarkkailemaan ja tuotannossa ilmenevät erityisyydet näkyvät suoraan liikevaihtoa heijastavassa läpimenon linjakohtaisessa mittauksessa. Mittauksen perusteella voidaan mitoittaa kustannustehokkaasti vaihtelua vaimentavia puskureita virtauksen parantamiseksi. Tällaiset vaihtelubalansoidut tuotantolinjat kykenevät vaimentamaan tuotantojärjestelmässä ilmeneviä vaihteluita ilman, että vaihtelu kertaantuu läpi linjaston ja aiheuttaa virtauksen ja tuotelaadun heilahtelua asiakasrajapinnan lähetyvillä. Kun vaihtelun tasoa onnistutaan laskemaan, mahdollistaa se puskurien asteittaisen pienentämisen kohti Lean tuotantoa.

SPC:tä hyödyntämällä voidaan sekä määrittää että verrata tuotantosolukohtaisesti vaihtelun tasoa ja määrittää täten tehokkaimmat tuotannon kehityskohteet. Näitä tuotantoluja voidaan kehittää Luvussa 2.2.3 käsiteltyjen Six Sigma-projektien avulla. Kaavan 5 avulla voidaan määrittää tuotteiden tai tuotantosolujen todellisia käytettävyyssasteita, ja tämän jälkeen kohdennetaan järjestyksessä ennakoivia huolto-ohjelmia kustannusten kannalta kriittisiin kohteisiin. Näin saadaan vähennettyä tuotantoprosessin välittyvää vaihtelua joka parantaa pitkällä aikavälillä tuotannon läpimenoa eli kohdeyrityksen liikevaihtoa.

Mittauksella mahdollistetaan myös tuotannon laatukustannusten aiempaa tarkempi laskenta, analysointi ja ennakointi. Luvussa 2.2.2 käsitelty laadun kustannukset muodostavat merkittävän 20–40% kustannuserän yrityksen liiketoiminnalle. Yrityksillä on siis selkeä taloudellinen ajuri pienentää laatuongelmien ja puutteiden määrää ja täten parantaa operatiivista kannattavuutta. Näiden puutteiden paikantaminen ja niiden juurisyiden ratkaiseminen helpottuu huomattavasti, kun tuotantoa mitataan luotettavasti. Luotettava ja reaaliaikainen mittaus mahdollistaa myös tuotekohtaisesti laatukustannusten laskennan.

Tuotantosolujen tarkempi mittaus tukee myös tuotannonohjauksen toimintakykyä. Kun tuotannonohjauksella on käytössään luotettavaa tietoa tuotantosolukohtaisesta operatiivisesta suorituskyvystä, kykenee se kohdentamaan tuotantolinjakohtaisesti oikean määrän resursseja ja töitä asiakkaiden tilausten perusteella. Tämä vähentää töiden uudelleenaikataulutusta ja parantaa tilausten toimitusvarmuutta. Kapasiteetin todenmukainen mitoitus ja sen perusteella toteutettu tuotannonohjaus edistävät asiakastyytyväisyyttä ja siten kohdeyritykselle merkittävää huoltoliiketoimintaa. Huoltoliiketoiminta on korkean kannattavuuden lisäksi taloussuhdanteesta riippumatonta, joten se tukee kohdeyrityksen kannattavuuden pitkäjänteisyyttä.

Mittauksella tuetaan myös varastopuutteiden vaikutusten arviointia ja hallintaa. Kriittisten varastonimikkeiden puuttuminen näkyy selkeästi tuotantomittauksessa toimituksen viivästymisenä ja prosessiaikojen kasvuna. Näiden nimikkeiden määrittäminen ja analysointi mittauksista hyödyntämällä mahdollistaa osasaatavuuden kehittymisen. Tällä on vaikutusta sekä viivästyksistä aiheutuvien kustannuksien kuten uhkasakkojen, pikatoimitusten ja lisäkoordinoinnin määrään, että myös tuotannon läpivirtaukseen eli liikevaihdon kasvuun.

Tuotannon mittauksella voidaan laadun, tuotantovirtauksen ja ohjauksen kehittämisen helpottamisen lisäksi myös todentaa saadut vaikutukset. Kun tuotantoa mitataan luotettavasti ja tuotantojärjestelmään kohdistetaan mittauksen perusteella valikoituja kehitysprojekteja, voidaan samalla todentaa projektien taloudellinen vaikuttavuus ja kustannustehokkuus. Näin voidaan todentaa, maksavatko tuotannossa jatkuvasti toteutettavat kehitysprojektit itseään takaisin ja mitkä kehitysprojektit todella parantavat merkittävästi tuotannon kokonaiskannattavuutta. Samalla tuotannon mittauksella voidaan selkeästi osoittaa miten esimerkiksi tuotantoketjussa tapahtuvat muutokset kuten uudet tuotantolaitteet, uudet toimittajat tai uudet tuotteet vaikuttavat tuotantovirtaukseen ja operatiiviseen kannattavuuteen. Voidaan siis sanoa, että mittauksella parannetaan kehityskohteiden löytämisen lisäksi tuotannon kehitystoimintaan liittyvää itsekriittisyyttä ja käytettävien resursien vaikuttavuuden arviointia.

5.2 Tutkimuksen kriittinen arviointi

Tutkimuksen kokonaisvaltaiseen toteutukseen kuuluu oleellisena osana myös tutkimuksen kriittinen arviointi. Kriittisen arvioinnin tarkoituksena on punnita saatujen

tutkimustulosten luotettavuutta ja tutkimuksen toteutuksen kulkua. Samalla arvioidaan myös tutkimuksen taustatekijöiden vaikutusta johtopäätöksiin sekä tutkimuksessa esitettyjen menetelmien sovellettavuutta tutkimuksen tilaajan näkökulmasta.

Tutkimuksen luotettavuutta voidaan tarkastella sekä ulkoisesti että sisäisesti (Alasuutari 1999). Tutkimuksen tulosten analysointi edellyttää mittaustulosten luotettavuuden tarkastelua eli niiden kykyä ilmentää mitattua toimintaa riittävän tarkasti ja asiaan kuuluvasti (Salomäki 2003). Ulkoisen luotettavuuden arviointi on haastavampaa, koska mittausdatan tulokset ovat riippuvaisia juuri mittauskohteesta. On myös tapauskohtaista, miten mitausvirheen suuruutta arvioidaan ja voidaanko saatuja tuloksia yleistää käytettäväksi mitauskontekstin ulkopuolissa tapauksissa.

Tutkimuksen teoriassa esitetyt laskentamallit ovat monimutkaisia ja niiden hyödyntäminen vaatii runsaasti aikaa ja nykyisen toiminnan sopeuttamista. Laatutekniikan, tilastollisen prosessiohjauksen ja operaatiotieteen virtausmallien käyttöönotto tarvitsee myös laadukkaaseen mittaukseen perustuvan pohjan. Vain kunnollisella faktojen ja nykyisen toiminnan tason määrittämisellä voidaan ymmärtää toiminnassa esiintyviä haasteita, ja siten kohdentaa näihin haasteisiin oikeita kehitystoimenpiteitä. Tämä tarkoittaa käytännössä, että merkittävien parannusten aikaansaaminen on vie runsaasti aikaa ja resursseja. Tutkimuksen konsepteja voidaankin kritisoida niiden soveltamiskynnyksestä. Menetelmät ovat todistetusti toimivia mutta niiden soveltamisen yhteydessä ei ole mahdollisuutta nopeisiin pikavoittoihin liiketoiminnan näkökulmasta.

Hidasta on menetelmien soveltamisen lisäksi tässä tutkimuksessa esitettyjen teorioiden ymmärtäminen. Mallit ovat kuitenkin luonteeltaan suljettujen systeemien malleja, ja niiden tuominen avoimeen tuotantojärjestelmään vaatii asianmukaista sopeuttamista. Tämän vuoksi päivittäinen työskentely ja matemaattinen virtauslaskenta eivät aina kuitenkaan toimi yhtenevästi. Käytännön toiminnassa esiintyy yleensä aina poikkeuksia ja yllättävää vaihtelua, johon reagoiminen on operatiivisen toiminnan sujuvuuden kannalta välttämätöntä. Teoriakokonaisuudessa esitetyissä konsepteissa oletetaan myös, että lukijalla on teknisen alan koulutusta ja hän kykenee ymmärtämään perusteita niin tilastotieteistä, kustannuslaskennasta kuin matemaattisesta mallinnuksestaakin. Tämän vuoksi tutkimuksen hyödyntämisen tueksi tarvitaan koulutusta ja käytännön soveltavia esimerkkejä.

Mittaustulos sisältää aina mittaus tapa, -henkilö ja -ympäristökohtaisen epävarmuuden. Tämä epävarmuus täytyy huomioida todellista mittaustulosta arvioitaessa. Todentamalla mittausepävarmuuden rajat voidaan luotettavasti arvioida vaihteluväli, missä mitatun prosessin todellinen suoritusarvo sijaitsee. Tätä mittauksen todellisen arvon ja mitatun arvon erotusta kutsutaan mittausjärjestelmän kohdistukseksi.

Yleisesti onnistuneen käytännön mittauksen ehtona on luonnollisesti myös mittauksen toistettavuus (Repeatability). Toistettavuudella tarkoitetaan saman mittauksen toistamista

ja saatujen mittaustulosten muodostamaa hajontaa. Tämän mittauksen toistettavuutta voidaan todentaa diplomityön jatkona toteutettavissa laajennetuissa testimittauksissa. Tulosten luotettavuutta voidaan arvioida myös uusittavuudella (Reproducibility) Uusittavuutta voidaan arvioida, kun samaa mittauskohdetta mittaa useampi mittaja samoissa olosuhteissa (Salomäki 2003, s. 134-158). Aikapohjaisissa mittauksissa uusittavuutta esiintyy, kun saman rakenteen mukaisia töitä leimataan eri päivinä eri henkilöiden toimesta. Tällöin mittaustulokseen eli aikaleimaan välittyy mittaajakohtainen toimintatapa, johon lukeutuvat mukaan esimerkiksi tyyli kuitata työ valmiiksi ennen taukoa tai tauon jälkeen. Uusittavuuden suuruusluokka on siis mittaustuloksissa tyypillisesti muutamia prosenttiyksiköitä mittaustuloksesta. On siis sanottava, että mittaajakohtainen vaihtelu on merkittävää, mutta ei kriittistä tämän tutkimuksen kannalta. Jos mitatuissa arvoissa esiintyy kymmenien tuntien automaattileimavirheitä ja viikkojen osaviivästyksiä, ovat minuuttien leimauserot merkityksettömiä muiden haasteiden suuruusluokkiin nähden.

Myös tutkimuksen johtopäätöksiä kohtaan voidaan esittää kritiikkiä. Tilastollisten menetelmien tarkkuus paranee merkittävästi, jos mittauksissa käytettäisiin esimerkiksi 3 kuukauden otantaa. Otannan merkitys korostuu mittanäytteiden muodostamaa jakaumaa tarkasteltaessa, kun yksittäiset mittausrvirheet vaikuttavat merkittävästi jakaumiin pienemmissä otannoissa. Onneksi tätä heikkoutta paikattiin mittauksissa keräämällä työkohtaisia erityishuomioita töiden aikana. Lomakkeeseen merkityt erityishuomiot käsiteltiin haastatteluilla asentajien kanssa, jolloin voitiin varmistua, että ohjausrajojen yli menevät arvot sisältävät todellakin poikkeuksellisia toimia. Samalla täytyy myös muistaa, että tässä mittauksessa käsiteltiin ensisijaisesti mittauksen luotettavuutta ja toteutusta ei niinkään mittaustulosten perusteella kartoitettua toiminnan tasoa. Tämän vuoksi SPC:n luotettavuus ei ole tämän tutkimuksen kannalta ensisijainen prioriteetti.

Tuotannon toimintatapojen kehittämisessä tärkeässä roolissa on myös organisaation kokonaisvaltainen muutosjohtaminen. Toimenpide-ehdotusten näkökulmasta muutosjohtaminen edustaa niitä päivittäisiä tekoja, jotka parantavat uusien työtapojen omaksumista ja tiedon kulkua yrityksen sisällä. Operatiivisen johdon sitoutuminen toteuttavien kehitystoimenpiteiden tukemiseen ja loppuun asti viemiseen yksi tuotannonkehityksen suurimmista haasteista. On yrityksen näkökulmasta selkeä riski, että tässä tutkimuksessa esitettyjä toimenpide-ehdotuksia ei saada jalkautettua ihmisten asenteisiin saakka. Tämän toteuttamiseksi tarvitaan pitkäjänteistä työskentelyä jonka onnistumiseen vaikuttaa eniten johdon vankkumaton tuki.

Yhteenvedona diplomityöstä voidaan sanoa, että siinä tehdyt havainnot olivat yrityksen näkökulmista uusia, mutta helposti ymmärrettäviä. Mittauksen toteutuksella luotiin uusi näkökulma mitata kohdeyrityksen tuotantoa. Teorian tarjoama ymmärrys tuki mittauksien toteutusta ja analyysiä. Teoriaan pohjautuvan mittaustulosten analyysin perusteella tehdyt johtopäätökset todentavat selkeästi kohdeyrityksen tarpeen kehittää tuotannon reaaliaikaista mittausta. Tähän tarpeeseen vastattiin tutkimuksen toimenpide-ehdotuksissa, jossa esitettiin tuotannon mittauksen kehityskohteet ja toimintasuunnitelma mittauksen

kehittämiseksi luotettavalle tasolle. Tutkimuksessa esitettyjen soveltavien teorioiden ja näiden toimenpiteiden turvin, voidaan edistää pitkäjänteistä tuotannonkehitystoimintaa, jolla tähdätään operatiivisen toiminnan kannattavuuden kehittymiseen toimenpide-ehdo-
tuksissa esitettyjen työkalujen turvin.

LÄHTEET

Alasuutari, P. (1999). Laadullinen tutkimus, 3. painos. Vastapaino, Tampere, ISBN: 9789517680554, 317 s.

Allen, H., Bunn, W. (2007). How Risky Is Overtime, Really? Harvard Business Review. Saatavissa (viitattu 24.4.2018): <https://hbr.org/2007/05/how-risky-is-overtime-really>.

American Society of Quality. Cost of Quality. Saatavissa (viitattu 28.4.2018): <http://asq.org/learn-about-quality/cost-of-quality/overview/overview.html>.

Amiri, M., Mohtashami, A. (2011). Buffer allocation unreliable production lines based on design of experiments, simulation, and genetic algorithm. The International Journal of Advance Manufacturing Technology. Saatavissa (viitattu 28.4.2018): <https://link-springer-com.libproxy.tut.fi/article/10.1007%2Fs00170-011-3802-8>.

Amsden, R.T., Butler, H.E., Amsden D.M. (1998). SPC Simplified: Practical Steps to Quality. Productivity Press, UK, ISBN: 9780527763404, 304 p.

Appelbaum, S.H., Habashy, S., Malo, J., Sharif, H. (2012). Back to the future: revisiting Kotter's 1996 change model. Journal of Management Development, Vol. 31 Iss: 8, pp.764-782.

Armernakis, A.A., Bedeian, A.G. (1999). Organizational Change: A Review of Theory and Research in the 1990s. Journal of Management, Vol. 25.

Berardinelli, C. (2018). A Guide to Control Charts. I Six Sigma. Saatavissa (viitattu 24.2.2018): <https://www.isixsigma.com/tools-templates/control-charts/a-guide-to-control-charts/>.

Bryman, A., Bell, E. (2007). Business Research Methods, Oxford University Press, Oxford, UK, ISBN: 9780199668649, 816 p.

Burman, R. (1995). Manufacturing Management Principles and Systems. McGraw, London, ISBN: 978-0077090449, 432 p.

Butler, P. (2016). Statistical Process Control. Saatavissa (viitattu 24.2.2018): <http://slideplayer.com/slide/5920212/>.

Chen, C.S., Mestry, S., Damodaran, P., Wang. (2009). C. The Capacity planning problem in make-to-order enterprises. Mathematical and Computer Modelling, Vol. 50, 2007, pp.1461-1473.

- Cretu, A.E., Brodie, R.J. (2005). The influence of brand image and company reputation where manufacturers market to small firms: A customer value perspective. *Industrial Marketing Management*, Vol. 36, Iss. 2, 2007, pp. 230-240.
- DeFeo, J., Juran, J.M. (2014). *Juran's Quality Essentials for Leaders*. McGraw-Hill Education, New York, ISBN: 978-0071825917, 1730 p.
- Deming, E.W. (2000). *Out of The Crisis*. The MIT Press, Massachusetts, ISBN: 978-0262541152, 524 p.
- Economic Institute of Japan. (1982) *Import Barriers, Analysis of Divergent Bilateral Views*, Washington, USA.
- Faridah, S.A.S., Bang, N., Melewar, T.C., Hui, L.Y., Martin, L. (2016). Explicating industrial brand equity: Integrating brand trust, brand performance and industrial brand image. *Pro Quest, Emerald publishing*. Saatavissa (viitattu 21.3.2018): <https://search-proquest-com.libproxy.tut.fi/docview/1791228074?pq-origsite=su-mon&https://search.proquest.com/abicomplete/advanced>.
- Fernandez, S., Rainey, H.G. (2006). *Managing Successful Organizational Change in the Public Sector*. *Washington Public Administration Review*, Vol. 22, Iss.2, 2006, pp. 168-176.
- Geng, H. (2015). *Manufacturing Engineering Handbook, Second Edition*. McGraw-Hill Education, Singapore, ISBN: 978-0071839778, 23 p.
- Gong, Q., Yang, Y., Wang, S. (2014). Information and decision-making delays in MRP, KANBAN and CONWIP. *Elsevier. International Journal of Production Economics*, Vol. 156, 2014, pp.208-213. Saatavissa (viitattu 25.2.2018): <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tut.fi/science/article/pii/S0925527314001935?via%3Dihub>.
- Green C.S. (2015). *The Research is Clear: Long Hours Backfire for People and for Companies*. *Harvard Business Review*. Saatavissa (28.1.2018): <https://hbr.org/2015/08/the-research-is-clear-long-hours-backfire-for-people-and-for-companies>.
- Heikkilä, T. (2004). *Tilastollinen tutkimus. 5. painos*. Edita, Helsinki, ISBN: 9789513728960, 320 s.
- Hirsjärvi, S., Remes, P., Sajavaara, P. (2009). *Tutki ja kirjoita, Kirjayhtymä Oy, Helsinki*, ISBN: 9789513148362, 464 s.
- Hopp, W.J., Spearman, M.L. (2011). *Factory Physics*. Waveland Press, USA Illinois, ISBN: 978-1577667391, 720 p.

- Hopp, W.J., Roof, M.L. (1998). Setting WIP levels with statistical throughput control (STC) in CONWIP production lines. *International journal of Production Research*, Vol.36, Iss. 4, 1998, pp.867-882.
- Ip, W.H., Huang, M., Yung, K.L., Wang, D., Wang, X. (2007). CONWIP based control of a lamp assembly production line. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 18, Iss. 2, 2007, pp.261-271.
- Jensen, P. (2011). *Operations Planning, Variability Basics*. Industrial Engineering of South Dakota School of Mines. Saatavissa (viitattu 18.2.2018): <http://slideplayer.com/slide/7677691/>.
- Juran J.M. (2016). *Juran's Quality Handbook*. McGraw-Hill, Boston, USA, ISBN: 978-0071165396, 1800 p.
- Kohjasteh-Ghamari, Y. (2007). A performance comparison between Kanban and CONWIP controlled assembly systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 20, 2009, pp. 751.
- Kotter, J.P (1996). *Leading Change*. Harward Business School Press, Boston, ISBN: 978-0875847474, 208 p.
- Korkman, S. (2015). *Talous ja Utopia*. Docendo, Helsinki, ISBN: 9789525912500, 278 s.
- Lawrence. P.R. (1969). How to Deal with Resistance to Change. *Harward Business Review*. Saatavissa (viitattu 24.2.2018): <https://hbr.org/1969/01/how-to-deal-with-resistance-to-change>.
- LaJeunesse, R. (2009). Work Time Regulation as Sustainable Full Employment Strategy. *The Social Effort Bargain, Journal Review of Social Economy*, Vol. 39, Iss. 3, 2011, pp. 402-406.
- Liker, J.K. (2004). *The Toyota Way, 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. McGraw-Hill Professional, New York, ISBN: 9780071392310, 372 p.
- Little, J.D, Graves, S. (2008). *Little's Law*, Massachusetts Institute of Technology, USA. Saatavissa (viitattu 23.2.2018): <http://web.mit.edu/~sgraves/www/papers/Little's%20Law-Published.pdf>.
- Manka, M. (2007). *Työrauhan julistus: miten olla ihmisiksi alaisena ja esimiehenä*. Kirjapaja, Helsinki, ISBN: 9789516075375, 176 s.

Martz, E. (2013). How to Create and Read an I-MR Control Chart. The Minitab Blog. Saatavissa (viitattu 25.2.2018): <http://blog.minitab.com/blog/understanding-statistics/how-create-and-read-an-i-mr-control-chart>.

Mattila, P. (2011). Johdettu muutos- Avaimet organisaation hallittuun uudistumiseen. Talentum Oyj, Helsinki, ISBN: 9789521417474, 246 s.

Medhi, J. (2002). Stochastic Models in Queueing Theory, second edition. Academic Press, MIT, USA, Elsevier Science, ISBN: 9780080541815, 450 p.

Montgomery, D. (2012). Introduction to Statistical Quality Control. Wiley, London, ISBN: 978-1118573594, 754 p.

Nelson, L.S. (2013). In Memoriam, Journal of Quality Technology, Vol. 45, Iss. 4, 2013, pp. 394.

Pound, E.S (2017). Flow Benchmarking, Factory Physics, ISBN: 978-0071822503, 384 p. Saatavissa (viitattu 18.1.2018): <https://factoryphysics.com/flow-benchmarking>.

Pound, E.S., Bell, J.H., Spearman, M.L. (2014). Factory Physics for Managers, McGraw-hill Education, London, ISBN: 9780071822503, 384 p.

Prevette, S.S. (2018). Dr. Deming's Funnel Experiment. Symphony Technologies. Saatavissa (viitattu 15.2.2018): <http://www.symphonytech.com/articles/pdfs/spFunnel.pdf>.

Rabinovich, E., Dresner, M.E., Evers, P.T. (2003). Assessing the effects of operational processes and information systems on inventory performance, Elsevier. Journal of Operations Management, Vol. 21, Iss. 1, 2003, pp. 63-80. Saatavissa (viitattu 17.2.2018): <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tut.fi/science/article/pii/S0272696302000414?via%3Dihub>.

Salminen, P. (1990). Tuotteiden ja toiminnan laadun kehittäminen. Metalliteollisuuden keskusliitto, Metalliteollisuuden kustannus Oy, Helsinki, ISBN: 9789518174502, 179 s.

Salomäki, R. (2003). Hyödynnä SPC, Suorituskykyiset prosessit. Metalliteollisuuden keskusliitto, Metalliteollisuuden kustannus Oy, Helsinki, ISBN: 9789518177077, 400 s.

Sharma, R., Kharub, M. (2014). Attaining competitive positioning through SPC- an experimental investigation from SME. Emerald Group Publishing Limited. Measuring Business Excellence, Vol. 18, Iss. 4, 2004, pp. 86-103. Bradford, UK.

Shingo, S. (1984). A Study of the Toyota Production System from an Industrial Engineering Viewpoint. Taylor & Francis Inc, ISBN: 978-0915299171, 296 p.

Schroeder, R.G., Linderman, K., Liedtke, C., Choo, A.S. (2007). Six Sigma: Definition and underlying theory. Journal of Operations Management, Vol. 26, 2008, pp. 536-554.

- Sjåholm Knudsen, E., Foss, K. (2014). The effect of recessions on firms' boundaries. *Industrial and Corporate Change*. Vol. 24, pp. 1081-1108.
- Spearman, M.L., Zazanis, M.A. (1992). Push and Pull Production systems: Issues and Comparisons. North-western University, Evanston Illinois. Saatavissa (viitattu 26.2.2018): <http://web.a.ebscohost.com.libproxy.tut.fi/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=e2500ac5-146e-425f-954b-f1718fc39d3b%40sessionmgr4010>.
- Sumanth, D.J. (2000). *Total Productivity Management: A Systematic and Quantitative Approach to Compete in Quality, Price and Time*, ISBN: 9781574440577, 407p.
- Summers, D.C.S. (2010). *Quality*. Pearson Prentice Hall, New Jersey, ISBN: 978-0131592490, 592 p.
- Summers, D.C.S. (2005). *Quality Management Creating and Sustaining Organisational Effectiveness*. Pearson Prentice Hall, New Jersey, ISBN: 978-0132626439, 432 p.
- Suomen Tilintarkastajat. (2017). Tärkeimmät talouden mittarit yritysjohtoon ja tilintarkastajan silmin. Suomen tilintarkastajat ry. Saatavissa (viitattu 17.8.2017): <https://www.suomentilintarkastajat.fi/blogi/talouden-ammattilaiset/tarkeimmat-talouden-mittarit-yritysjohtoon-ja-tilintarkastajan-silmin>.
- Stevenson, W.J. (2007). *Operations Management*. McGraw-hill, New York, USA, ISBN: 978-0073525259, 944 p.
- Tekin, G., Yiltay, S., Ayaz, E. (2016). The Effect of Brand Image on Consumer Behaviour: Case study of Louiss Vuitton-Moet Hennessy. *International Journal of Academic Value Studies*. Vol. 2, Iss. 1, 2016, pp.1-24.
- Teknoliateollisuus. Maailmantalouden kasvu jatkuu entisellään 2018, Teknoliateollisuus. Saatavissa (viitattu 25.2.2018): http://teknoliateollisuus.fi/sites/default/files/file_attachments/t_talousnakymat_4_2017_fi_0.pdf.
- Tilastokeskus. (13.7.2017). Bruttokansantuote kasvoi 1,9 prosenttia viime vuonna, Tilastokeskus. Saatavissa (viitattu 24.2.2018): https://www.stat.fi/til/vtp/2016/vtp_2016_2017-07-13_tie_001_fi.html.
- Tsurumi, Y. (1983). *Problems of America's Industry*. New York Times, USA.
- Uluskan, M. (2015). A comprehensive insight into the Six Sigma DMAIC toolbox. Department of Industrial Engineering, Anadolu University, Eskisehir, Turkey. Saatavissa (viitattu 15.2.2018): <https://search-proquest-com.lib-proxy.tut.fi/docview/1831239161/fulltextPDF/56A68466EFE04201PQ/1?accountid=27303>.

Wheeler, J.D. (2013). The Problem of Long-Term Capability. Quality Digest. Saatavissa (viitattu 15.1.2018): <https://www.qualitydigest.com/inside/quality-insider-column/problem-long-term-capability.html>.

Wheeler, J.D. (2000). Understanding Variation: The Key to Managing Chaos. SPC Press, Knoxville Tennessee, ISBN: 978-0945320531, 174 p.

Wheeler, J.D., Chambers, D.S. (2010). Understanding Statistical Process Control. SPC Press, Knoxville Tennessee, ISBN: 978-0945320692, 428 p.

World Economic Forum. (2016). Companies are demanding more productivity. But overworked employees are not the answer. Saatavissa (viitattu 11.2.2018): <https://www.weforum.org/agenda/2016/11/companies-are-demanding-more-productivity-but-overworked-employees-are-not-the-answer/>.

Yang, M.G, Hong, P, Modi, S.B. (2011). Impact of lean manufacturing and environmental management on business performance: An empirical study of manufacturing firms. International Journal of Production Economics, Vol. 129, 2011, pp. 251-261.

Zhou, B., Liu, Y., Yu, J., Tao, D. (2017). Optimization of buffer allocation in unreliable production lines based on availability evaluation, John Wiley & Sons Ltd, Vol. 39, Iss, 1, 2008, pp. 204-219. Saatavissa (viitattu 16.2.2018): <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/oca.2341/full>.

LIITE B: TOIMENPIDE-EHDOTUSTEN VAIHEKOHTAINEN TOTEUTUSUUNNITELMA

