

Alexi Raitio

VAIHTELUN HALLINTA ASIAKASOH- JAUTUVASSA TUOTANNOSSA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta

Diplomityö

Huhtikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Aleksi Raitio: Vaihtelun hallinta asiakasohjautuvassa tuotannossa

Diplomityö, 101 sivua

Tampereen yliopisto

Johtamisen ja tietotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tuotantotalous

Huhtikuu 2021

Tarkastajat: Yliopistonlehtori Rainer Breite ja Professori Marko Seppänen

Asiakasohjautuva engineer-to-order (ETO) tuotanto on vaihtelun ja kompleksisuuden näkökulmasta yksi selvästi haastavimmista tuotantomuodoista. Suuri vaihtelun määrä heikentää lähes aina tuotannon tehokkuutta ja toimitusvarmuutta tehden tuotannosta vaikeasti hallittavaa. Tämän tutkimuksen kohdeyrityksessä on havaittu, että tuotteiden asiakaskohtainen räätälöinti ja sen myötä tuotannossa esiintyvän vaihtelun määrä ovat viime vuosina lisääntyneet. Siten kyky minimoida tuotannossa esiintyvän vaihtelun määrää sekä hallita jäljelle jäävää vaihtelua mahdollisimman tehokkaasti nousevat avainasemaan, jotta ETO-tuotantoa hyödyntävät yritykset voisivat päästä tavoiteltuihin liiketoiminnallisiin tuloksiin. Näistä lähtökohdista tämän tutkimuksen tavoitteeksi asetettiin parantaa ymmärrystä siitä, mitkä tekijät aiheuttavat vaihtelua ETO-tyyppiseen tuotantoon sekä löytää keinoja, miten tuotannossa esiintyvää vaihtelua voidaan vähentää ja hallita.

ETO-tuotannossa esiintyvää vaihtelua tarkasteltiin tässä tutkimuksessa tuotannonohjauksen ja systeemiajattelun näkökulmien avulla. Tutkimusmenetelmänä käytettiin yhden tapauksen tapaus-tutkimusta ja tapauksena toimi suurehko kansainvälinen yritys, joka suunnittelee ja valmistaa suuria modulaarisia laitteita. Tutkimuksen aineistona käytettiin aihepiirin kirjallisuutta ja aiempia tutkimuksia, kohdeyrityksen tietojärjestelmistä kerättyjä arkistomateriaaleja sekä haastattelujen ja havainnoinnin avulla kerättyä laadullista tutkimusaineistoa.

Tutkimuksessa tunnistettiin, että ETO-tyyppinen tuotantosysteemi aiheuttaa monimutkaisen ja dynaamisen luonteensa vuoksi jo itsessään valtavan määrän vaihtelua ja vaihtelun taustalla piileviä todellisia juurisyitä on usein erittäin vaikeaa tunnistaa. Vaihtelun ja epävarmuuden suuren määrän vuoksi ETO-tyyppistä tuotantoa hyödyntävien yritysten todettiin olevan taipuvaisia käyttämään työntöohjausta sekä ajautumaan systeemin toimintaan negatiivisesti vaikuttavaan tuotannonohjauksen noidankehään. Lisäksi toimitusketjun alkupään vaiheilla havaittiin olevan erityisen suuri merkitys myöhempien vaiheiden, kuten kokoonpanon suorituskykyyn.

Jotta tuotannossa esiintyvää vaihtelua saataisiin vähennettyä, tulisi huomio kiinnittää toimitusketjun alkupään vaiheisiin ja erityisesti suunnittelun ja myynnin välisen yhteistyön kehittämiseen. Tutkimuksessa myös tunnistettiin, että toiminnan läpinäkyvyyttä lisäämällä ja keskeneräisen työn määrää rajoittamalla on mahdollista parantaa tuotannon hallittavuutta sekä pienentää riskiä joutua tuotannonohjauksen noidankehän kaltaiseen haitalliseen palautesilmukkaan. Pitkällä aikavälillä organisaation kyky oppia ja ymmärtää asioiden välisiä syvempiä riippuvuussuhteita on avainasemassa, jotta organisaatio pystyy kohdistamaan kehityspanokset sinne, missä niistä on vaihtelun vähentämisen ja hallinnan kannalta eniten hyötyä.

Avainsanat: vaihtelu, hallinta, asiakasohjautuva tuotanto, ETO, tuotannonohjaus, tuotannonsuunnittelu, systeemiajattelu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla

ABSTRACT

Aleksi Raitio: Controlling Variation in Customer-Driven Production

Master of Science Thesis, 101 pages

Tampere University

Master's Degree Programme in Management and Information Technology

Major: Industrial Engineering and Management

April 2021

Examiners: University Lecturer Rainer Breite and Professor Marko Seppänen

Customer-driven engineer-to-order (ETO) production creates challenges in terms of variation and complexity. Variation increases production lead times and costs and makes production difficult to control. The case company of this study discovered that customization of their products and the amount of variation in production have increased in recent years. Therefore, the ability to minimize variation in production and control the remaining variation efficiently is key to the success of companies operating on the ETO principle. The objective of this study is to improve the understanding of what factors cause variation in ETO-type production and how variation in production can be reduced and controlled.

In this study, variation in ETO production is viewed from the perspective of production control and systems thinking. The research method used is a single-case case study. Case company was a large international company that designs and manufactures large modular machines. The research materials used were related literature, archive materials collected from the case company information systems, and qualitative research material collected through interviews and observation.

This study finds that the ETO production system, due to its complexity and dynamism, causes a large amount of variation for reasons that are often difficult to identify. Variation in ETO production is usually caused by several interdependent factors. ETO production is also found to be susceptible to use the push-type production control and therefore end up in the production control vicious circle. Additionally, the upstream stages of the supply chain are found to be of particular importance for the performance of the later stages, such as assembly.

To reduce variation in production, attention should be paid to the upstream stages of the supply chain and especially to improving cooperation between the sales and design phases. Increasing transparency and limiting the amount of work in progress can improve the controllability of production and reduce the risk of harmful feedback loops like the vicious circle of production control. In the long run, an organization's ability to learn and understand the deeper interdependencies between different factors is key to enabling an organization to put development efforts where they are most beneficial in terms of reducing and controlling variation.

Keywords: variation, control, customer-driven production, engineer-to-order, ETO, production control, production planning, systems thinking

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

ALKUSANAT

Diplomityön valmistumisen myötä 3,5 vuotta kestänyt opiskelu töiden ohessa diplomi-insinööriksi tulee vihdoinkin päätökseen. Kiitos Tampereen Yliopiston Porin yksikölle näiden vuosien aikana saamastani laadukkaasta opetuksesta.

Kiitos myös diplomityön kohdeyritykselle haastavasta ja erittäin mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta. Aiheen mielekkyys ja merkityksellisyys auttoivat pitämään motivaation korkealla tasolla koko lähes vuoden kestäneen tutkimusprosessin ajan. Kiitos kohdeyrityksen edustajina toimineille ohjaajille ja työkavereille työn aikaisesta kannustuksesta ja sparrauksesta.

Kiitos kuuluu myös diplomityön ohjaaja Rainer Breitelle, joka toimi diplomityön ohjaajana Tampereen Yliopiston puolelta. Yhteistyö Rainerin kanssa sujui alusta lähtien hyvin ja työn aikana saadut neuvot ja vastakysymykset auttoivat pitämään fokuksen oikeissa asioissa kirjoitusprosessin aikana.

Suurin kiitos kuuluu kuitenkin perheelleni ja erityisesti avopuoliso Vilmalle, jonka tuki ja kärsivällisyys läpi koko opiskelutaipaleen on ollut korvaamatonta.

Laitilassa, 24.4.2021

Aleksi Raitio

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimusongelma.....	1
1.2 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset	2
1.3 Kohdeyrityksen esittely	3
1.4 Tutkimuksen rajaus ja näkökulman valinta	4
1.5 Tutkimusmetodologiset valinnat	6
1.6 Tutkimuksen rakenne.....	9
2. VAIHTELU TUOTANTOSYSTEEMISSÄ.....	11
2.1 Tuotantosysteemi.....	11
2.2 Vaihtelun luokittelu ja tyypit.....	12
2.3 ETO-tuotannon erityispiirteet.....	14
2.3.1 Tilauksen kytkentäpiste ja tuotantotyytit	14
2.3.2 ETO-yritysten luokittelu	16
2.3.3 Vaihtelu.....	18
2.3.4 Kilpailukeinot.....	20
2.4 Vaihtelun vaikutus tuotannon suorituskykyyn	20
2.5 Systemiajattelu ja vaihtelu.....	24
2.6 Tuotannonohjaus ja vaihtelu	26
2.6.1 Tuotannonohjauksen tavoitteet ja vaiheet	26
2.6.2 Tilausten vapautusperiaatteet	28
2.6.3 Imuohjaukseen perustuvia tuotannonohjausmenetelmiä	30
2.6.4 Tuotantojärjestys ja priorisointisäännöt	34
2.6.5 Kapasiteetin hallinta.....	36
2.6.6 Inhimilliset tekijät ja tuotannonohjaus	37
2.7 Yhteenveto teoriasta	38
3. AINEISTO JA MENETELMÄT	41
3.1 Arkistomateriaalit	41
3.2 Haastattelut.....	43
3.3 Havainnointi	43
3.4 Aineiston analysointimenetelmät.....	44
4. TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI.....	45
4.1 Kohdeyrityksen tuotannon yleiskuvaus.....	45
4.2 Kokoonpanon päätavoitteet.....	47
4.3 Kokoonpanon läpimenoaika	49
4.4 Käyttöasteen vaikutus läpimenoaikaan	51
4.5 Tuotannonsuunnittelun ja -ohjauksen nykytilanne	53
4.5.1 Nykyiset tuotannonsuunnittelu- ja ohjausperiaatteet	53
4.5.2 Kokoonpanon virtauksen todellinen tila	56
4.5.3 Kokoonpanon läpimenoaikojen seuranta	57

4.6	Kokoonpanon keskeytykset.....	59
4.6.1	Keskeytysten määrät ja tyypit.....	59
4.6.2	Keskeytysten vaikutusten analysointi.....	61
4.6.3	Laatupoikkeamien aiheuttamat keskeytykset.....	63
4.6.4	Komponenttipuutteiden aiheuttamat keskeytykset.....	64
4.7	Yhteenveto tuloksista.....	68
5.	KEHITYSEHDOTUKSET.....	71
5.1	Toimitusketjun läpinäkyvyyden parantaminen.....	71
5.2	Projektin lähtötiedot ja suunnittelun resurssointi.....	72
5.3	Komponenttipuutteiden hallinta.....	73
5.4	Tuotannonsuunnittelu ja -ohjaus.....	75
5.4.1	Tuotannonsuunnittelun ja -ohjauksen kehityssykli.....	75
5.4.2	Tuotannon seurantojen kehitys.....	76
5.4.3	Tuotannon hienokuormitus.....	78
5.4.4	Tuotannonohjausperiaatteiden muuttaminen.....	79
5.5	Yhteenveto kehitysehdotuksista.....	84
6.	YHTEENVETO.....	86
6.1	Tutkimuksen kontribuutio.....	86
6.2	Tutkimuksen arviointi ja rajoitteet.....	89
6.3	Jatkotutkimusaiheet.....	91
	LÄHTEET.....	92

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Kohdeyrityksen tuotantoprosessi.</i>	3
Kuva 2.	<i>Panos-muunnos-tuotos.</i>	12
Kuva 3.	<i>Erytis- ja satunnaissyyvaihtelun ero, mukaillen (Snee, 1990).</i>	13
Kuva 4.	<i>Virtauksen ja prosessointiajan vaihtelua aiheuttavia tekijöitä.</i>	14
Kuva 5.	<i>Asiakastilauksen kytkentäpiste, mukaillen (Olhager, 2003).</i>	15
Kuva 6.	<i>ETO-arkkityyppien luokittelu tuotantovolyymien ja tuotteiden räätälöintiasteen perusteella, mukaillen (Willner et al., 2016).</i>	17
Kuva 7.	<i>Käyttöasteen, jaksoajan ja vaihtelun välinen yhteys, mukaillen (Pound et al., 2014).</i>	23
Kuva 8.	<i>Lineaarisen ajattelun ja systeemiajattelun ero, mukaillen (Senge, 1990).</i>	25
Kuva 9.	<i>Tuotannonohjauksen malli, mukaillen (Lödding, 2012).</i>	27
Kuva 10.	<i>Kanban- ja työntöohjauksen ero, mukaillen (Spearman & Zazanis, 1992)</i>	31
Kuva 11.	<i>CONWIP-menettelyn periaate, mukaillen (Spearman et al., 1990).</i>	31
Kuva 12.	<i>LUMS COR -menettelyn periaate, mukaillen (Thürer et al., 2017).</i>	32
Kuva 13.	<i>DBR-menettelyn periaate, mukaillen (Thürer & Stevensson, 2018).</i>	33
Kuva 14.	<i>Tuotannonohjauksen noidankehä, mukaillen (Wiendahl et al., 2005).</i>	37
Kuva 15.	<i>ETO-tyyppinen tuotantosysteemi.</i>	39
Kuva 16.	<i>Kohdeyrityksen kokoonpanon layout.</i>	46
Kuva 17.	<i>Läpimenoajan ja tuntikertymän varianssin välinen yhteys.</i>	48
Kuva 18.	<i>Kokoonpanon virtauksen tavoitetila.</i>	49
Kuva 19.	<i>Peruslaitteiden kokoonpanon läpimenoajan vaihtelu.</i>	50
Kuva 20.	<i>SPC-kortti kokoonpanon läpimenoajasta.</i>	51
Kuva 21.	<i>Käyttöasteen vaikutus läpimenoaikaan teoriassa ja käytännössä. (Kuvan käyrien muodot vain suuntaa antavia esimerkkejä.)</i>	52
Kuva 22.	<i>Moduuli 1:n ja moduuli 2:n aloitusajankohta pääkokoonpanossa suhteessa moduuli 3:n aloitukseen.</i>	56
Kuva 23.	<i>Kokoonpanon virtauksen todellinen tila.</i>	57
Kuva 24.	<i>” Fixes that fail” systeemiarkkityyppi, mukaillen (Senge, 1990).</i>	59
Kuva 25.	<i>Kokoonpanon keskeytysten kestot ja lukumäärät syykategorioittain.</i>	60
Kuva 26.	<i>Kokoonpanon keskeytysten pituudet.</i>	62
Kuva 27.	<i>Kohdeyrityksen kokoonpanoon vaihtelua aiheuttavia tekijöitä.</i>	69
Kuva 28.	<i>Kohdeyrityksen kokoonpanoon vaihtelua aiheuttavien tekijöiden syy-seuraussuhteiden tunnistaminen systeemiajattelua hyödyntäen.</i>	70
Kuva 29.	<i>Tuotannosuunnittelun ja -ohjauksen kehityssykli.</i>	75
Kuva 30.	<i>Kohdeyrityksen kokoonpanon uudet tuotannonohjausperiaatteet.</i>	82
Kuva 31.	<i>Vaihtelun vähentämisen ja hallinnan kehitystoimenpiteet.</i>	85

TERMIT JA LYHENTEET

APS	Advanced Planning and Scheduling, Tuotannon hienokuormitus- ja ajoitusjärjestelmä
ATO	Assemble to Order, Tilauksesta kokoonpano
Bufferi	Ylimääräinen resurssi (aika, varasto tai kapasiteetti), jonka tarkoituksena on synkronoida kysyntä ja tarjonta kohtaamaan toisensa
CODP	Customer Order Decoupling Point, Arvoketjun piste, jossa tuote on linkitetty tiettyyn asiakastilaukseen
CONWIP	Constant Work In Progress, Imuohjaukseen perustuva tuotannonohjausmenetelmä, jossa keskeneräisen tuotannon määrä on vakio
COV	Coefficient of Variation, Vaihtelukerroin
DBR	Drum Buffer Rope, Tuotannonohjausmenetelmä, jossa tuotannon aloituspäätös tehdään tuotannon pullonkaulan suorituskyvyn perusteella
EDD	Earliest Due Date, Aikaisin tarvepäivä
EKP	Esikokoonpano
ERP	Enterprise Resource Planning, Toiminnanohjausjärjestelmä
ETO	Engineer to Order, Tilauksesta suunnittelu
Imuohjaus	Tuotannonohjausperiaate, jossa tuotannon aloituspäätöksissä otetaan huomioon tuotannon sen hetkinen kuormitustilanne (Pull)
LTS	Lead Time Syndrome, Tuotannonohjauksen noidankehä
Läpimenoaika	Materiaalin läpivirtausaika prosessin alkupisteestä prosessin loppupisteeseen
MES	Manufacturing Execution System, Tuotannonohjausjärjestelmä
MRP	Materials Requirements Planning, Materiaalivaatimusten suunnittelu
MTO	Make to Order, Tilauksesta valmistus
MTS	Make to Stock, Varastoon valmistus
Systeemi	Joukko toisistaan riippuvaisia osia, joilla on jokin yhteinen tavoite tai päämäärä.
Systeemiajattelu	Asioiden tarkastelu yksittäisten havaintojen sijaan kokonaisuutena
Tuotantosysteemi	Kokonaisjärjestelmä, joka vaaditaan tuotteen tuottamiseen. Tuotantosysteemi koostuu kaikista yrityksen toiminnoista ja resursseista, jotka vaaditaan panosten muuntamiseksi tuotoksiksi
Työntöohjaus	Tuotannonohjausperiaate, jossa tuotannon aloituspäätökset perustuvat puhtaasti ennalta määritettyyn tuotantosuunnitelmaan (Push)
WIP	Work In Progress, Keskeneräinen tuotanto
WLC	Work Load Control, Tuotannonohjausmenetelmä, jossa tuotannon aloituspäätös tehdään yksittäisten työasemien kuormitustason perusteella

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimusongelma

Ideaalimaailmassa kysyntä vastaisi aina täsmälleen tarjontaa, ja asiat sujuisivat aina juuri siten kuin oli alun perin suunniteltu, eli toisin sanoen prosesseissa ei esiintyisi lainkaan vaihtelua. Tällaisessa ideaalimaailmassa toiminnan johtaminen ja ohjaus olisi äärimmäisen helppoa (Pound *et al.*, 2014). Tällaista ideaalimaailmaa ei kuitenkaan valitettavasti ole olemassa ja todellisuudessa vaihtelua esiintyy aina ja kaikissa prosesseissa. Kyky minimoida vaihtelun määrä sekä hallita jäljelle jäävää vaihtelua mahdollisimman tehokkaasti nousevatkin avainasemaan, jotta yritys voisi päästä tavoiteltuihin liiketoiminnallisiin tuloksiin. (Deming, 1986; Pound *et al.*, 2014)

Asiakasohjautuvaa tuotantoa, joka alkaa tuotteiden suunnittelusta ja jatkuu aina tuotteiden valmistamiseen saakka kutsutaan kirjallisuudessa *Engineer to Order* eli ETO-tyyppiseksi tuotannoksi (Olhager, 2003). Globalisaatio ja asiakkaiden tiukentuneet vaatimukset ovat lisänneet asiakaskohtaisesti räätälöityjen tuotteiden kysyntää ja tämän myötä asiakasohjautuvien ETO-tuotantoa hyödyntävien yritysten lukumäärää (Grabenstetter, 2014). ETO-tuotantoa hyödyntävät yritykset eroavat toisistaan huomattavasti, ja ETO-tyyppinen tuotanto voidaan jakaa moniin erilaisiin alatyyppeihin (Amaro *et al.*, 1999; Hicks *et al.*, 2001; Willner *et al.*, 2016).

Monet tutkijat ovat yhtä mieltä siitä, että ETO-tyyppinen tuotanto on vaihtelun ja epävarmuuden suuren määrän vuoksi yksi selvästi haastavimpia tuotantomuotoja (Hicks *et al.*, 2001; Gosling & Naim, 2009; Mello *et al.*, 2017). Vaihtelun suuri määrä heikentää lähes aina tuotannon suorituskykyä, pidentää läpimenoaikoja sekä tekee tuotannosta vaikeasti ennustettavaa ja hallittavaa (Kingman, 1962; Bertrand & Muntslag, 1993; Pound *et al.*, 2014). ETO-yritysten pitäisi kuitenkin vaihtelun suuresta määrästä huolimatta pystyä jatkuvasti parantamaan sekä toimitusaikoja että kustannustehokkuutta, jotta kiristyvässä kilpailussa pystyttäisiin menestymään (Birkie & Trucco, 2016).

Tuotannossa esiintyvää vaihtelua voivat aiheuttaa lukuisat eri tekijät, kuten konerikot, komponenttien myöhästymiset, erilaiset eräkoot, kysynnän muutokset sekä suunnitteluvirheet ja laatuongelmat (Slack *et al.*, 2013). Edellä mainittujen vaihtelua aiheuttavien tekijöiden taustalla on yleensä vielä pidempiä syy-seurausketjuja, joita yrityksen on usein vaikea havaita ja ymmärtää (Deming, 1986). Selkeän yleiskuvan luominen erityisesti

ETO-tyyppisen toimitusketjun eri vaiheiden suoriutumisesta ja vaikutuksista toisiinsa onkin todettu olevan erittäin haastavaa (Mello *et al.*, 2017). Selkeän yleiskuvan luomista hankaloittaa osaltaan myös jatkuvasti tiukentuva kilpailu ja monimutkaisemmaksi muuttuva toimintaympäristö (Meadows, 2008; Plate, 2010).

Vaihtelun vähentämistä ja hallintaa on ehditty tutkimaan vuosien varrella paljon ja monista erilaisista näkökulmista. Erityisen paljon aihetta on tutkittu esimerkiksi Leanin (Birkie *et al.*, 2017), Six Sigman (Tjahjono *et al.*, 2010), Lean Six Sigman (Yadav & Desai, 2016) ja SPC:n (Lim *et al.*, 2014) näkökulmista. Myös ETO-tyyppisessä tuotannossa esiintyvää vaihtelua on ehditty tutkimaan suhteellisen paljon edellä mainituista näkökulmista, mutta tutkimustulosten yleistämisen on todettu olevan erittäin haastavaa, koska ETO-tyyppiset yritykset eroavat niin suuresti toisistaan (Birkie *et al.*, 2017; Mello *et al.*, 2017). Mello *et al.* (2017) totesivatkin, että aiheesta kaivattaisiin edelleen lisää case-tutkimuksia, jotta saataisiin lisättyä ymmärrystä erityyppisten ETO-yritysten kokemista haasteista sekä kehitystoimenpiteistä, joilla vaihtelun suurta määrää pystytään paremmin hallitsemaan.

1.2 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset

Tämän tutkimuksen tavoitteena on täydentää olemassa olevaa kirjallisuutta ja parantaa tiedeyhteisön ymmärrystä siitä, mitkä tekijät aiheuttavat vaihtelua ETO-tyyppisessä tuotannossa sekä miten tuotannossa esiintyvää vaihtelua voidaan vähentää ja hallita. Ymmärryksen lisäämiseksi ja uusien ideoiden saamiseksi aihetta tarkastellaan tässä tutkimuksessa yhden ETO-periaatteella toimivan kohdeyrityksen näkökulmasta.

Teoreettisen tarkastelun lisäksi tavoitteena on tuoda esille kehitysehdotuksia, joilla kohdeyrityksen tuotantoa saataisiin paremmin hallittavaksi sekä lisätä kohdeyrityksen ymmärrystä vaihtelun taustalla olevista juurisyistä. Tutkimuksen tavoitteisiin pääsemiseksi ja tutkimusongelman ratkaisemiseksi tutkimuksessa pyritään löytämään vastaukset seuraaviin kahteen tutkimuskysymykseen:

- *TK1: Mitkä tekijät aiheuttavat vaihtelua ETO-tyyppisessä asiakasohjautuvassa tuotannossa ja minkälainen vaikutus vaihtelulla on tuotannon suorituskykyyn?*
- *TK2: Miten ETO-tyyppisessä asiakasohjautuvassa tuotannossa esiintyvää vaihtelua voidaan vähentää ja hallita?*

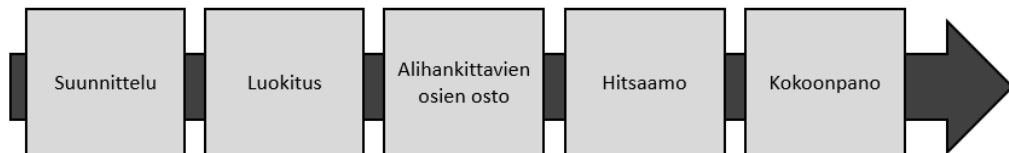
Tutkimuskysymyksiin pyritään vastaamaan perehtymällä aihepiiriin liittyvään kirjallisuuteen sekä tukemalla kirjallisuuskatsauksen löydöksiä empiirisen osion tuloksilla. Lisäksi

kohdeyritykselle annetaan osana TK2:sen vastausta teoriaan ja empiirisiin löydöksiin perustuen suosituksia, joiden avulla vaihtelua voidaan kohdeyrityksen kontekstissa vähentää ja hallita.

1.3 Kohdeyrityksen esittely

Kohdeyritys on osa suurehkoa kansainvälistä yritystä, joka valmistaa ja suunnittelee suuria modulaarisia laitteita, jotka muodostuvat kolmesta päämoduulista. Moduuleista huolimatta jokainen tilattu laite vaatii vielä enemmän tai vähemmän suunnittelua ennen kuin komponentteja voidaan tilata ja tuotantoa aloittaa. Kohdeyrityksessä asiakastilauksen kytkentäpiste on siis suunnittelussa, mikä tarkoittaa, että kohdeyrityksen tuotanto on tyypiltään ETO-tyyppistä asiakasohjautuvaa tuotantoa.

Kohdeyritys suorittaa itse ennen kokoonpanon aloitusta kahden laitteen toiminnan kannalta kriittisten komponentin yhteen hitsaamisen omassa hitsaamossaan. Muuten kohdeyrityksen toimipisteellä Suomessa on keskitytty vain projektinhallintaan, suunnitteluun ja laitteiden loppukokoonpanoon. Kohdeyrityksellä ei itsellään ole varsinaista osavalmistusta, ja käytännössä kaikki laitteen komponentit tulevat yrityksen toimipisteelle laajasta alihankintaverkostosta ympäri maailmaa. Kohdeyrityksen tuotantoprosessi sisältää suunnittelun, luokituksen, oston, hitsaamon ja lopputuotteiden kokoonpanon (kuva 1).



Kuva 1. Kohdeyrityksen tuotantoprosessi.

Muuttuneen markkinatilanteen ja tiukentuneen kilpailun myötä kohdeyrityksen tuotantomäärät ovat laskeneet viime vuosina huomattavasti 5–10 takaisista huippuvuosista. Toisaalta pienentyneet markkinat ja kiristynyt kilpailu ovat aiheuttaneet sen, että toimialalla kilpailevat yritykset pyrkivät erottumaan toisistaan tarjoamalla potentiaalisille asiakkailleen jatkuvasti enemmän asiakaskohtaista räätälöintiä. Tämä on korostunut erityisesti kohdeyrityksessä, jonka tärkeimpiä kilpailukeinoja ovat aina olleet korkea laatu ja palvelutaso. Korkealla palvelutasolla tarkoitetaan kohdeyrityksen tapauksessa suurta asiakaskohtaisen räätälöinnin määrää ja kykyä joustaa asiakkaiden toivomusten mukaisesti. Nykyään yhä suurempi osa kohdeyrityksen projekteista vaatii jopa huomattavia määriä asiakaskohtaista räätälöintiä. Vuosina 2019–2020 tällaisten projektien osuus kaikista myydyistä projekteista oli 35 %, kun vielä vuonna 2015 samainen osuus oli 15 %.

Lisääntyneen asiakaskohtaisen räätälöinnin myötä erilaisten tuotevariaatioiden ja komponenttien määrät ovat kasvaneet huomattavasti ja kohdeyrityksen toimitusketju on muuttunut huippuvuosia pienemmistä tuotantomääristä huolimatta koko ajan monimutkaisemmaksi. Rungas asiakaskohtainen räätälöinti ja lisääntynyt monimutkaisuus hankaloittavat toimitusprojektien läpivientiä sekä pidentävät läpimenoaikoja ja läpimenoajoissa esiintyvää vaihtelua. Korkean palvelutason ja laadun tavoittelu on tuonut mukanaan myös korkean kustannustason, joka hankaloittaa uusien tilausten saamista sekä pienentää yrityksen saamaa katetta. Kohdeyrityksen pitäisikin pystyä pienentämään jatkuvasti sekä kustannustasoaan, että läpimenoaikojaan, jotta kiristyvässä kilpailussa pystyttäisiin menestymään.

Kohdeyrityksen yhdeksi keskeiseksi ylätason KPI-mittariksi (*Key Performance Indicator*) on viimeisen vuoden aikana päädytty ottamaan projektien kustannuksissa ja läpimenoajassa esiintyvän varianssin suuruus. Mittarin on tarkoitus ohjata toimintaa suuntaan, jossa jo projektin alkaessa pystyttäisiin mahdollisimman hyvällä tarkkuudella ennustamaan milloin projekti tulee olemaan valmis ja mitkä projektin toteutuneet kustannukset tulevat olemaan. Tavoitteeseen eli kustannusten ja läpimenoaikojen nollavarianssiin pääsemisen on kuitenkin todettu olevan erittäin haastavaa, koska kohdeyrityksen tuotannossa esiintyy muiden ETO-periaatteella toimivien yritysten tapaan paljon erilaista vaihtelua.

Läpimenoajan ja kustannusten vaihteluun vaikuttaa luonnollisesti se, että yritys valmistaa monia erityyppisiä ja -kokoisia laitteita, joiden kokoonpaneminen vaatii eri verran aikaa ja työtä. Läpimenoaika vaihtelee kuitenkin huomattavasti myös samantyyppisten ja -kokoisten laitteiden välillä, mikä kertoo sen, että on olemassa muitakin vaihtelua aiheuttavia tekijöitä kuin erilaiset laitetypit ja -koot. Kohdeyrityksessä on huomattu, että erityisen paljon vaihtelua kokoonpanon läpimenoaikaan ja kustannuksiin aiheuttaa aikaisemmissa toimitusketjun vaiheissa olleet haasteet, jotka keskeyttävät laitteiden kokoonpanon. Kohdeyrityksessä kokoonpanovaiheen tehtäväksi jääkin usein paikata aikaisemmissa toimitusketjun vaiheissa olleita haasteita, jotta sovituissa toimitusaikatavoitteissa pysyttäisiin.

1.4 Tutkimuksen rajaus ja näkökulman valinta

Kirjallisuudessa on tunnistettu, että yrityksen prosesseissa esiintyvän vaihtelun määrä ja yrityksen ymmärrys asioiden syy-seuraussuhteista ovat kääntäen verrannollisia eli mitä enemmän yrityksen prosesseissa esiintyy vaihtelua, sitä vähemmän yrityksellä on ymmärrystä vaihtelua aiheuttavien tekijöiden juurisista (Deming, 1986). Asioiden tarkastelu systeemiajattelua hyödyntäen yksittäisen osien sijaan kokonaisuutena voikin auttaa

organisaatioita ymmärtämään paremmin eri asioiden välisiä riippuvuussuhteita sekä auttaa organisaatioita havaitsemaan vaihtelua aiheuttavien tekijöiden todellisia juurisyitä (Senge, 1990). Kun todelliset juurisyöt ovat tiedossa, pystytään kehitystoimenpiteet asettamaan sinne, missä niistä on vaihtelun vähentämisen kannalta eniten hyötyä (Doggett, 2005).

Myös käytössä olevilla tuotannonohjausperiaatteilla on tunnistettu olevan suuri vaikutus tuotannossa esiintyvän vaihtelun määrään sekä siihen, miten vaihtelun kanssa pystytään tulemaan toimeen (Hopp & Spearman, 2000). Yrityksen tarpeisiin parhaiten sopivat tuotannonohjausperiaatteet riippuvat kuitenkin pitkälti käytössä olevasta tuotantotyyppistä sekä yrityksen tuotannolle asetamista tavoitteista (Stevenson *et al.*, 2005). Tämän vuoksi ilman kunnollista yrityksen toimintaan perehtymistä ei voida sanoa, miten juuri tietyn yrityksen tuotantoa tulisi ohjata (Adrodegari *et al.*, 2015).

Tuotannonohjauksen ja systeemiajattelun hyödyntämistä puhtaasti vaihtelun vähentämisessä ja hallinnassa ei ole ehditty tutkimaan vielä yhtä paljon kuin Leanin, Six Sigman, Lean Six Sigman ja SPC:n hyödyntämistä. Tuotannonohjauksen ja systeemiajattelun hyödyntämispotentiaalin ja suuremman tutkimuksellisen uutuusarvon vuoksi ETO-tyyppisessä tuotannossa esiintyvää vaihtelua lähdetään tässä tutkimuksessa tarkastelemaan tuotannonohjauksen ja systeemiajattelun näkökulmista.

Tuotannonohjauksen osalta tarkastelun kohteena tässä tutkimuksessa on erityisesti tilausten vapautusperiaatteet, kapasiteetin hallinta ja lopullisen tuotantojärjestyksen määrittely. Tavoitteena on löytää keinoja, miten tuotannonohjauksen avulla voidaan vaikuttaa tuotannossa esiintyvän vaihtelun määrään ja toisaalta miten jäljelle jäävän vaihtelun kanssa pystytään tulemaan paremmin toimeen. Systeemiajattelun avulla sen sijaan pyritään parantamaan ymmärrystä vaihtelua aiheuttavista juurisyistä ja eri asioiden välisistä riippuvuussuhteista.

Vaihtelu on käsitteenä laaja ja se voidaan ymmärtää monella eri tavalla. Yksi tapa ajatella vaihtelua on jakaa se karkeasti laadulliseen eli tuotteen tai palvelun ominaisuuksissa esiintyvään vaihteluun sekä ajalliseen eli tuotteen tai palvelun tuottamiseen kuluvan ajan vaihteluun (Hopp & Spearman, 2000). Tässä tutkimuksessa tarkastelu rajataan ajalliseen vaihteluun.

Tämän tutkimuksen empiirinen osio liittyy osittain kohdeyrityksessä käynnistettyyn laajempaan kehitysprojektiin, jonka tarkoituksena on parantaa koko tilaus-toimitusketjun läpimenoaikaa ja kustannuskilpailukykyä. Laitteiden loppukokoonpanovaihe on yksi kohdeyrityksen keskeisimmistä toiminnoista ja käytännössä viimeinen toimitusketjun vaihe

ennen asiakasta. Monet toimitusketjun aikaisempien vaiheiden ongelmat heijastuvat tämän vuoksi myös kokoonpanon toimintaan ja läpimenoaikaan. Empiirisen osion vaihtelun tarkastelu rajataan näiden syiden vuoksi kohdeyrityksen kokoonpanon läpimenoajoissa esiintyvään vaihteluun. Tavoitteena on parantaa ymmärrystä siitä, mitkä tekijät aiheuttavat vaihtelua kohdeyrityksen kokoonpanon läpimenoaikoihin sekä miten läpimenoajojen vaihtelua voidaan vähentää ja hallita.

Työ rajataan koskemaan vain kohdeyrityksen sisäisesti ja kohdeyrityksen omista prosesseista aiheutunutta vaihtelua, jolloin tarkastelun ulkopuolelle jää kohdeyrityksen ulkopuolisten makrotason tekijöiden, kuten globalisaation ja maailman taloustilanteen vaikutukset tuotteiden kysyntään ja vaihtelun syntyyn. Tarkoituksena on keskittyä asioihin, joihin kohdeyritys voi omaa toimintaansa paremmin ymmärtämällä ja kehittämällä vaikuttaa.

1.5 Tutkimusmetodologiset valinnat

Tutkimusmetodologialla tarkoitetaan teoriaa siitä, miten tutkimus tulisi suorittaa (Mackenzie & Knipe, 2006). Saunders et al. (2009) mukaan tutkimusmetodologisia näkökulmia ovat: tieteenfilosofia, lähestymistapa, tutkimusstrategia, aikahorisontti ja aineistonkeruu- ja analysointimenetelmät.

Tieteenfilosofia

Tieteenfilosofisesta näkökulmasta tämä tutkimus on lähimpänä pragmatismista näkökulmaa. Pragmaattisessa näkökulmassa keskiössä on tutkimusongelma ja siitä johdetut tutkimuskysymykset, jotka määrittävät käytettävät aineistonkeruu- ja analyysimenetelmät (Mackenzie & Knipe, 2006).

Lähestymistapa

Tutkimusten lähestymistavat voidaan jakaa karkeasti deduktiiviseen ja induktiiviseen sekä näiden yhdistelmään eli abduktiiviseen lähestymistapaan. Deduktiivinen lähestymistapa on teorialähtöistä ja sen tavoitteena on testata olemassa olevia teorioita käsillä olevaan tutkimusongelmaan. Induktiivisen tutkimuksen lähtökohtana sen sijaan on tutkimuksen aikana kerätty aineisto ja sen tavoitteena on parantaa ymmärrystä aiheesta ja luoda uusia teorioita. (Saunders *et al.*, 2009)

Tämän tutkimuksen tavoitteena on luoda aihepiiriin liittyvän kirjallisuuden avulla teoreettinen viitekehys ja soveltaa sitä käsillä olevan tutkimusongelman ja tutkimuskysymysten ratkaisemiseen. Samalla tässä tutkimuksessa pyritään löytämään uusia näkökulmia ja lisäämään ymmärrystä vaihtelua aiheuttavista tekijöistä tutkimalla vaihtelua yhden ETO-

periaatteella toimivan kohdeyrityksen näkökulmasta. Tämän tutkimuksen lähestymistapa on näin ollen abduktiivinen, koska tutkimus sisältää piirteitä sekä deduktiivisesta että induktiivisesta lähestymistavasta.

Tutkimuksen tarkoitus

Tutkimukset voidaan jakaa niiden tarkoituksen mukaan kuvaileviin (*Descriptive*), kartoitaviin (*Exploratory*) ja selittäviin (*Explanatory*) tutkimuksiin (Saunders *et al.*, 2009; Robson & McCartan, 2016). Kartoittavan tutkimuksen tavoitteena on pyrkiä löytämään uusia näkökulmia ja oivalluksia tutkittavasta aiheesta. Kartoittavalle tutkimukselle on tyypillistä, että tutkimuksen näkökulma ja suunta muuttuvat vielä tutkimuksen aikana, kun ymmärrys tutkittavasta ilmiöstä lisääntyy. Kuvaileva tutkimus sen sijaan pyrkii esittämään tarkkoja kuvauksia kiinnostuksen kohteena olevista ilmiöistä, henkilöistä, yrityksistä tai prosesseista. Selittävän tutkimuksen tarkoituksena on pyrkiä löytämään selityksiä jollekin ilmiölle sekä tuoda esille ilmiön taustalla olevia laajempia syy-seuraussuhteita. (Hirsjärvi *et al.*, 2009; Saunders *et al.*, 2009)

Tämä tutkimus on pääasialliselta tarkoitukseltaan kartoittavaa tutkimusta, koska tutkimuksessa pyritään löytämään yhden case-yrityksen toimintaa kartoittamalla uusia näkökulmia kirjallisuudessa esitettyihin asioihin. Toisaalta tutkimuksessa pyritään tunnistamaan asioiden välillä olevia syy-seuraussuhteita, minkä vuoksi tutkimuksessa on myös selittävän tutkimuksen piirteitä.

Tutkimusstrategia

Tutkimusstrategialla tarkoitetaan tutkimuksen menetelmällisten valintojen kokonaisuutta eli toisin sanoen tutkijan suunnitelmaa siitä, miten tutkimukselle asetettuihin tavoitteisiin päästään (Hirsjärvi *et al.*, 2009). Tämän vuoksi tutkimusstrategian valinnan tulisi aina perustua käsillä olevaan tutkimusongelmaan ja siitä johdettuihin tutkimuskysymyksiin (Noor, 2008; Saunders *et al.*, 2009).

Tutkimuskysymyksiin vastaamiseksi tämän tutkimuksen tutkimusstrategiana käytetään tapaustutkimusta. Tapaustutkimuksella tarkoitetaan empiiristä tutkimusta, joka tutkii jotakin ilmiötä syvällisesti yhden tai useamman tapauksen näkökulmasta (Yin, 2014). Tässä tutkimuksessa tapauksia on yksi ja tapauksena toimii ETO-periaatteella toimiva kohdeyritys, jonka toimintaa syvällisesti tutkimalla pyritään löytämään vastaukset tutkimuksen alussa määriteltuihin tutkimuskysymyksiin. Yinin (2014) mukaan yhden tapauksen tapaustutkimuksen tekemistä puoltaa se, että tutkittava tapaus on joko kriittinen, epätavallinen, yleinen, paljastava tai pitkittäistutkimuksen mahdollistava tapaus. Tämän

tutkimuksen tapauksen valintaan päädyttiin, koska tutkittava tapaus on tyypiltään kriittinen tapaus eli tapaus sopii erityisen hyvin tutkittavaan aiheeseen ja sen odotetaan antavan arvokasta lisätietoa tutkittavasta aiheesta.

Tapaustutkimuksen vahvuutena on todettu olevan tutkimuksen kohteena olevan ilmiön syvälinen ymmärtäminen ja käytännönläheisyys (Meredith, 1998). Jonkin ilmiön syvälinen ymmärtämisen ja käytännön näkökulman huomioimisen myötä tapaustutkimus on myös hyvä keino luoda uutta teoriaa (Voss *et al.*, 2002). Toisaalta tapaustutkimuksen vahvuus eli jonkin ilmiön syvälinen ymmärtäminen on samaan aikaan myös tapaustutkimuksen yksi keskeinen heikkous, koska tapaustutkimuksen tuloksia saattaa olla haastavaa yleistää varsinkin, jos tutkinnan kohteena on ollut vain yksi tapaus (Meredith, 1998; Yin, 2014).

Aineistonkeruu- ja analysointimenetelmät

Tapaustutkimuksen tulosten yleistettävyyttä ja tutkimuksen validiteettia voidaan parantaa hyödyntämällä aineistotriangulaatiota, eli käyttämällä yhden aineistonkeruu- ja analysointimenetelmän sijaan monia erilaisia aineistonkeruu- ja analysointimenetelmiä (Voss *et al.*, 2002). Tapaustutkimukselle on tyypillistä, että tutkimuksessa käytetään sekä määrällisiä että laadullisia aineistonkeruu- ja analysointimenetelmiä (Meredith, 1998). Tapaustutkimuksen aineistona hyödynnetään tyypillisimmin olemassa olevia dokumentteja ja arkistomateriaaleja sekä haastattelujen ja suoran- ja osallistuvan havainnoinnin avulla kerättyä laadullista tutkimusaineistoa (Yin, 2014).

Tämän tutkimuksen aineistona käytetään aihepiiriin liittyvää kirjallisuutta, kohdeyrityksen tietojärjestelmistä kerättyä arkistomateriaaleja sekä haastattelujen ja havainnoinnin avulla kerättyä laadullista tutkimusaineistoa. On myös hyvä mainita, että tutkija on työskennellyt kohdeyrityksessä vakituisessa työsuhteessa jo 6 kuukautta ennen diplomityön aloittamista, minkä vuoksi tutkijalle on ehtinyt muodostua suhteellisen hyvä esiyymmärrys kohdeyrityksen toiminnasta ja sen tuotannossa esiintyvistä haasteista jo ennen tutkimuksen aloittamista.

Tutkimuksen pääkirjallisuuslähteenä käytetään aihepiiriin liittyvien tunnettujen ja arvostettujen vertaisarvioitujen tieteellisten aikakauslehtien tutkimusartikkeleita. Tutkimusartikkelien lisäksi lähteenä käytetään myös joitakin perinteisiä kirjoja. Eniten lähteenä käytettyjä tieteellisiä aikakauslehtiä ovat:

- International Journal of Production Research
- Production Planning and Control
- International Journal of Production Economics

- International Journal of Operations and Production Management

Tutkimuksen arkistomateriaaleina käytetään kohdeyrityksen tuotannonohjausjärjestelmästä (*MES, Manufacturing Execution System*) ja toiminnanohjausjärjestelmästä (*ERP, Enterprise Resource Planning*) kerättyä kvantitatiivista dataa. Tutkimuksessa hyödynnetään näin ollen sekä kvantitatiivista (arkistomateriaalit) että kvalitatiivista (haastattelut, havainnointi) aineistoa. Käytetyt aineistonkeruu- ja analysointimenetelmät on selostettu tarkemmin pääluvussa 3.

Aikahorisontti

Tutkimukset voidaan jakaa aikahorisontin mukaan poikittais- ja pitkittäistutkimuksiin. Poikittaistutkimuksessa tarkastelun kohteena on staattinen kuvaus jostain tietystä ajanhetkestä, kun taas pitkittäistutkimuksessa tarkastelun kohteena on jonkin ilmiön ajan yli tapahtuva kehitys ja käyttäytyminen. (Saunders *et al.*, 2009) Tämä tutkimus on aikahorisontiltaan poikittaistutkimus, koska tutkimuksessa tarkastellaan kohdeyrityksen tilannetta tietyssä ajanhetkenä.

Tutkimuksen aikataulu

Tutkimuksen sisältämät vaiheet ja niiden suunnitellut aikataulut on esitetty taulukossa 1. Kesän 2020 tavoitteena on valmistella tutkimusta tekemällä esiselvitystä kohdeyrityksestä ja tutkimuksen aihepiiriin liittyvästä kirjallisuudesta. Esiselvityksen jälkeen tehdään tutkimuksen tarkempi rajausta ja aloitetaan teoriaosuuden kirjoittaminen sekä perusteellisempi tiedonhaku tutkimuksen aihepiiriin liittyvästä kirjallisuudesta. Syksyllä 2020 aloitetaan myös systemaattisemmin tekemään empiiriseen osioon liittyvää havainnointia ja haastatteluja sekä analysoimaan kohdeyrityksen tietojärjestelmistä kerättyä dataa. Empiirisen osion tulokset ja kehitysehdotukset on tarkoitus saada valmiiksi helmikuun 2021 loppuun mennessä ja tutkimuksen lopullinen viimeistely suorittaa maaliskuun 2021 aikana.

Taulukko 1. Tutkimuksen aikataulu.

Työvaihe	Aloitus	Lopetus
Tutkimuksen valmistelu ja esiselvitys	1.5.2020	30.6.2020
Tiedonhaku ja teoriaosuuden kirjoitus	1.7.2020	1.12.2020
Empiirisen osion toteutus ja kirjoitus	1.10.2020	28.2.2021
Tutkimuksen viimeistely	1.3.2021	31.3.2021

1.6 Tutkimuksen rakenne

Kappaleen kaksi kirjallisuuskatsauksessa käsitellään tutkimuksen aihepiiriin oleellisesti liittyvää teoriaa ja pyritään luomaan ymmärrys siitä, mitä tutkimuksen aihepiiristä tähän

mennessä tiedetään. Kappaleessa 3 esitellään työssä käytettävät aineistonkeruu- ja analysointimenetelmät ja kappaleessa 4 aineiston perusteella saavutetut työn keskeiset tulokset.

Kappaleessa 5 esitetään kirjallisuuskatsauksen ja empiiristen tulosten perusteella tehtyjä kehitysehdotuksia, joiden avulla vaihtelua voidaan jatkossa vähentää ja hallita. Lopuksi kappaleessa 6 on esitetty, mitä uutta tietoa tutkimuksen avulla on saatu aikaiseksi antamalla vastaukset tutkimuksen alussa esitettyihin tutkimuskysymyksiin sekä arvioitu tutkimuksen tuloksia kriittisestä näkökulmasta.

2. VAIHTELU TUOTANTOSYSTEEMISSÄ

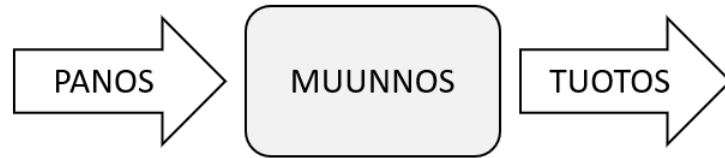
2.1 Tuotantosysteemi

Systeemillä tarkoitetaan toisistaan riippuvaisia osia, joilla on jokin yhteinen tavoite tai päämäärä, ja jotka muodostavat yhdessä jonkin laajemman kokonaisuuden (Forrester, 1961; Richmond, 1994; Backlund, 2000). Meadowsin (2008) mukaan systeemi on aina enemmän kuin vain osiensa summa. Systeemit voidaan jakaa niiden avoimuuden perusteella suljettuihin ja avoimiin systeemeihin (Jackson & Keyes, 1984). Suljetulla systeemillä tarkoitetaan systeemiä, joka ei ole vuorovaikutuksessa ympäristönsä kanssa. Avoin systeemi taas toimii vuorovaikutuksessa ympäristön kanssa ja on näin ollen suljetun systeemin vastakohta. (Ackoff, 1971)

Suljetussa systeemissä tietyn toiminnan tai ilmiön aiheuttavat syyt löytyvät systeemin sisältä, kun taas avoimessa systeemissä tietyn toiminnan tai ilmiön aiheuttavat syyt voivat löytyä joko systeemin itsensä sisältä tai systeemin ulkopuolisesta ympäristöstä (Forrester, 1994). Systeemistä voidaan käyttää myös termiä systeemien systeemi, jos systeemin sisällä olevilla alisysteemeillä on omat tarkoituksensa ja jos alisysteemit voisivat jatkaa oman tarkoituksensa täyttämistä silloinkin, kun ne irtautettaisiin kokonaissysteemistä (Maier, 1998).

Vaikka systeemin jokainen erillinen osapuoli suoriutuisi omiin tavoitteisiinsa nähden niin hyvin kuin mahdollista, niin kokonaissysteemin suorituskyky ei välttämättä ole paras mahdollinen, jos systeemi on huonosti organisoitu ja johdettu (Ackoff, 1971). Toisaalta, jotta voit itse menestyä, myös muiden systeemissä olevien osapuolten tulee menestyä. Lopulta systeemin rajat määrittävät minkälaisiin tuloksiin tietyssä systeemissä voidaan päästä, minkä vuoksi samaan systeemiin sijoitettaessa hyvin erilaisetkin organisaatiot ja ihmiset tuottavat lopulta yleensä samanlaisia tuloksia. (Senge, 1990)

Prosessi voidaan määritellä sarjaksi toimintoja, joiden tarkoituksena on muuttaa panokset tuotoksiksi. Panokset ja tuotokset voivat olla aineellisia, kuten komponentit, materiaalit ja koneet tai aineettomia, kuten tieto, palvelu ja energia. (International Standard Organization, 2008) Slack *et al.* (2013) mukaan kaikkia yrityksen toimintoja voidaan ajatella panos-muunnos-tuotos prosesseina. Prosessimaisen lähestymistavan avulla yritys voi parhaimmillaan poistaa eri toimintojen tai osastojen välillä olevat esteet ja saada eri toiminnot ja osastot työskentelemään paremmin yrityksen yhteisten päämäärien hyväksi (Davenport, 1993). Kuvassa 2 on esitetty yksinkertainen tapa kuvata prosessia.



Kuva 2. *Panos-muunnos-tuotos.*

Myös tuotanto voidaan määritellä muunnosprosessiksi, joka muuntaa prosessiin sisään tulevat panokset tuotantoresurssien avulla halutunlaisiksi tuotoksiksi (Hitomi, 1996; Slack *et al.*, 2013). Usein puhekielessä tuotanto ajatellaan suppeasti vain valmistuksena eli muunnosprosessina, jossa raaka-aineista tehdään komponentteja, jotka lopulta kokoonpannaan valmiiksi tuotteiksi (Ballard, 2000). Nykykirjallisuudessa tuotanto käsitellään kuitenkin laajemmin ja sen ajatellaan koostuvan kaikista toiminnoista, jotka vaaditaan tuotteen tai palvelun aikaansaamiseksi (Pound *et al.*, 2014). Näitä toimintoja voivat valmistuksen lisäksi olla esimerkiksi suunnittelu, osto, varasto ja lähetys (Rudberg & Wikner, 2004).

Tuotantosysteemi sen sijaan koostuu kaikista yrityksen toiminnoista ja resursseista, kuten koneista, ihmisistä, materiaaleista, toimitiloista ja tiedosta, jotka vaaditaan panosten (*input*) muuntamiseksi (*conversion process*) tuotoksiksi (*output*) (Cochran & Dobbs, 2002). Lapinleimun (2001) mukaan tuotantosysteemi voidaan nähdä kokonaisjärjestelmänä, joka vaaditaan tuotteen tuottamiseen. Käytössä olevalla tuotantosysteemillä on todettu olevan suuri vaikutus tuotannon suorituskykyyn (Koho, 2010).

2.2 Vaihtelun luokittelu ja tyypit

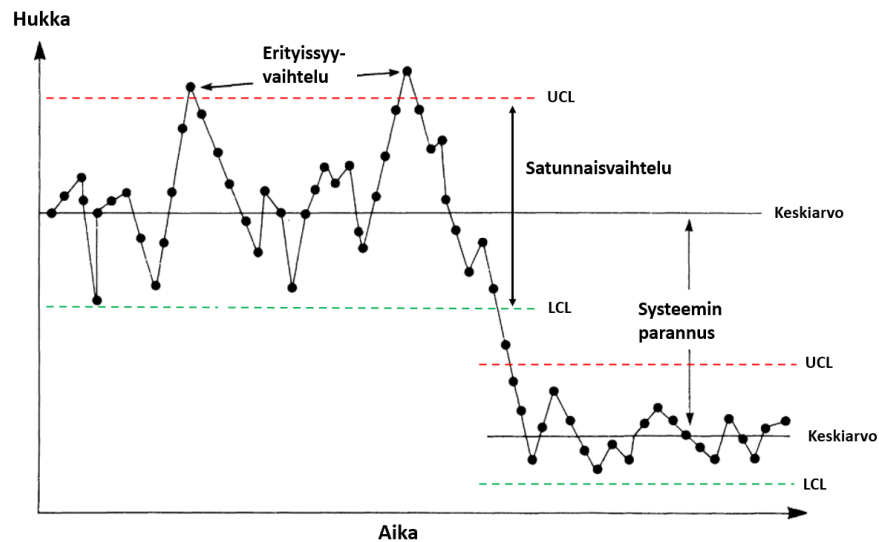
Kaikissa prosesseissa ja niiden tuotoksissa esiintyy aina vaihtelua (Shewhart, 1931; Deming, 1986; Snee, 1990; Wheeler, 2000). Shewhart (1931) ja Wheeler (2000) määrittelevät vaihtelun yksinkertaisesti muutoksiksi prosessin tuotoksissa. Pound *et al.* (2014) mukaan vaihteluksi taas voidaan kutsua kaikkea, mikä poikkeaa säännöllisestä ja ennakoitavasta käyttäytymisestä.

Shewhart (1931) jakoi prosessin tuotoksissa esiintyvän vaihtelun kahteen tyyppiin käyttäen vaihtelusta nimityksiä *non-assignable cause variation* ja *assignable cause variation*. Myöhemmin Deming (1986) nimesi edellä mainitut kaksi vaihtelutyyppiä satunnaissyvaihteluksi (*common cause variation*) ja erityissyvaihteluksi (*special cause variation*). Tässä tutkimuksessa vaihteluntyypeistä käytetään jatkossa Demingin luomia nimityksiä.

Satunnaissyvaihtelu on tyypiltään kroonista eikä sen taustalla ole yleensä mitään yksittäistä syytä. Satunnaissyvaihtelun voidaan ajatella olevan peräisin systeemistä

itsestään. Erityisyyvaihtelun taustalla taas on yleensä jokin yksittäinen tai tunnistettavissa oleva syy, joka on mahdollista löytää ja korjata. (Shewhart, 1931; Deming, 1986)

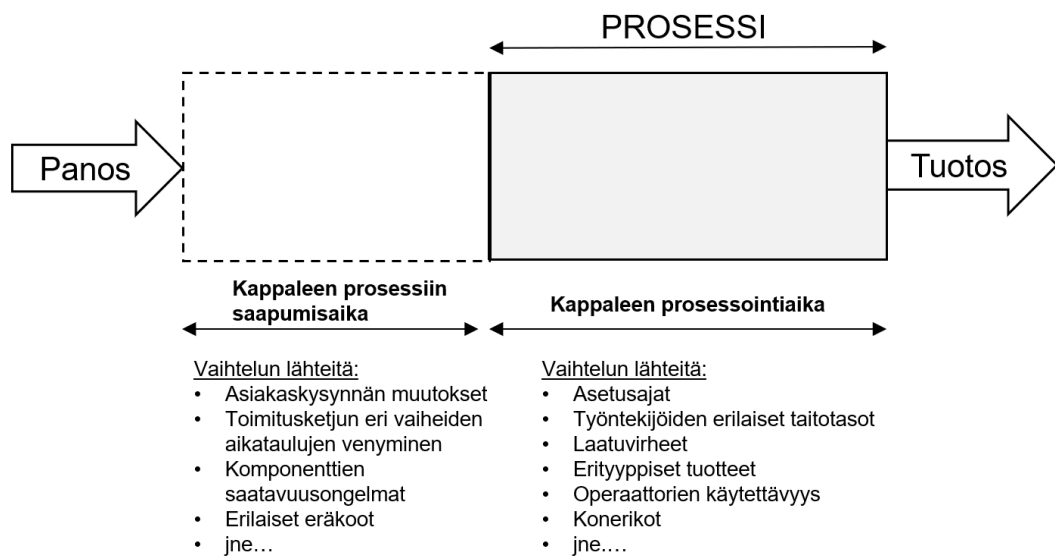
Yksi keino erottaa prosessissa esiintyvä satunnais- ja erityisyyvaihtelu toisistaan on hyödyntää Shewhartin vuonna 1926 esittelemiä ohjauskortteja (*control chart*). Ohjauskorteissa mittausarvot on järjestetty aikajärjestykseen ja kortit sisältävät keskiarvoviivan, ylemmän ohjausrajan (*UCL, Upper Control Limit*) ja alemman ohjausrajan (*LCL, Lower Control Limit*). Prosessissa esiintyvän vaihtelun voidaan sanoa olevan satunnaista ja prosessin olevan hallinnassa, kun kaikki mittausarvot ovat ohjausrajojen sisäpuolella. Jos taas yksi tai useampi mittausarvo on ohjausrajojen ulkopuolella, niin tällöin prosessissa esiintyy satunnaissyvaihtelun lisäksi erityisyyvaihtelua eikä prosessi tällöin ole hallinnassa. (Shewhart, 1926) Erityis- ja satunnaissyvaihtelun eroa on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3. Erityis- ja satunnaissyvaihtelun ero, mukailten (Snee, 1990).

Prosessin voidaan sanoa olevan stabiili ja ennustettava, kun sen tuotoksissa esiintyy vain satunnaissyvaihtelua ja vastaavasti epästabiili ja ei-ennustettava, kun sen ulostulossa esiintyy satunnaissyvaihtelun lisäksi erityisyyvaihtelua (Shewhart, 1931). Prosessissa esiintyvän vaihtelun syiden tarkempaan selvittämiseen ja korjaaviin toimiin on järkevää ryhtyä vain, kun prosessi ei ole hallinnassa eli siinä esiintyy erityisyyvaihtelua (Shewhart, 1926; Deming, 1986). Jos taas stabiilia prosessia, jossa esiintyy vain satunnaissyvaihtelua aletaan muuttamaan eli peukaloimaan, niin tilanne muuttuu usein vain huonommaksi ja vaihtelu lisääntyy, vaikka alkuperäisenä päämääränä olisi ollut vähentää vaihtelua (Shewhart, 1931; Deming, 1986; Juran & De Feo, 2010).

Tuotantoprosessissa esiintyvä ajallinen vaihtelu voidaan jakaa kahteen perustyyppiin: virtauksen vaihteluun ja prosessointiajan vaihteluun. Virtauksen vaihtelua kutsutaan joskus myös ulkoiseksi vaihteluksi ja sillä tarkoitetaan kappaleiden prosessiin saapumisaajoissa esiintyvää vaihtelua. Prosessointiajan vaihtelun taas ajatellaan olevan sisäistä vaihtelua ja sillä tarkoitetaan kappaleen prosessointi- eli valmistusajassa esiintyvää vaihtelua. On olemassa lukuisia eri tekijöitä, jotka aiheuttavat virtauksen ja prosessointiajan vaihtelua. (Hopp & Spearman, 2000; Slack *et al.*, 2013) Kuvassa 4 on havainnollistettu virtauksen ja prosessointiajan vaihtelun eroa sekä listattu joitakin Hoppin & Spearmanin (2000) ja Slack *et al.*, (2013) mainitsemia esimerkkejä vaihtelua aiheuttavista tekijöistä.



Kuva 4. Virtauksen ja prosessointiajan vaihtelua aiheuttavia tekijöitä.

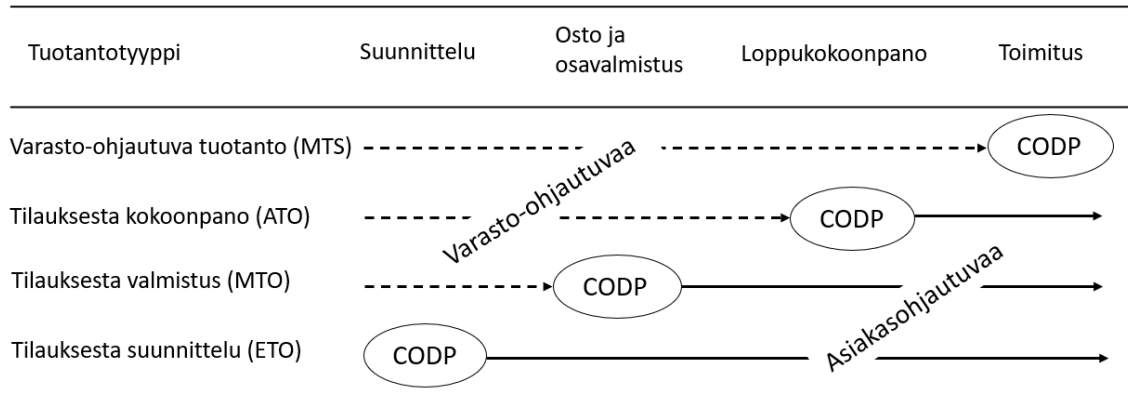
Vaihtelua aiheuttavat tekijät riippuvat lopulta aina siitä, minkälainen tuotantoprosessi on kyseessä. Tämän vuoksi keskeiseksi tekijäksi muodostuu kyky ymmärtää käsillä olevan tuotantoprosessin luonnetta sekä sitä, mitkä tekijät ovat juuri kyseisessä prosessissa niitä, joilla on suurin vaikutus vaihtelun syntyyn. (Hopp & Spearman, 2000) Seuraavaksi tarkastellaan minkälaisia erityispiirteitä ETO-tyyppinen asiakasohjautuva tuotanto pitää sisällään ja millä tekijöillä on taipumus aiheuttaa vaihtelua ETO-tuotantoon.

2.3 ETO-tuotannon erityispiirteet

2.3.1 Tilauksen kytkentäpiste ja tuotantotyypit

Tuotantotyypit voidaan jakaa eri luokkiin usealla eri tavalla (McCarthy, 1995). Yksi yleinen luokittelutapa on erottaa erilaiset tuotantotyypit toisistaan asiakastilauksen kytkentäpisteen (*CODP, Customer Order Decoupling Point*) perusteella. Asiakastilauksen kytkentäpiste on tuotteen valmistuksen arvoketjun piste, jossa tuote on linkitetty tiettyyn

asiakastilaukseen. Asiakastilauksen kytkentäpisteen tarkoituksena on erottaa asiakasohjautuvat ja varasto-ohjautuvat tuotannon vaiheet toisistaan. (Olhager, 2003) Tuotantotyypit jaetaan asiakastilauksen kytkentäpisteen mukaan usein neljään luokkaan: Varasto-ohjautuva tuotanto (*MTS, Make to Stock*), Tilauksesta kokoonpano (*ATO, Assemble to Order*), Tilauksesta valmistus (*MTO, Make to Order*) ja Tilauksesta suunnittelu (*ETO, Engineer to Order*) (Rudberg & Wikner, 2004). Kuvassa 5 on havainnollistettu asiakastilauksen kytkentäpisteen sijaintia eri tuotantotyypeissä.



Kuva 5. Asiakastilauksen kytkentäpiste, mukailen (Olhager, 2003).

Yritykselle optimaalisen tuotantotyypin valintaan ja asiakastilauksen kytkentäpisteen sijaintiin vaikuttavat hyvin monet eri tekijät (Sharman, 1984; Fisher, 1997; Van Donk, 2001; Olhager, 2003). Olhagerin (2003) mukaan kytkentäpisteen sijaintiin vaikuttavat tekijät voidaan jakaa markkinaperusteisiin, tuoteperusteisiin ja tuotantoperusteisiin tekijöihin.

Markkinaperusteisia asiakastilauksen kytkentäpisteeseen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi toimitusaikavaatimukset, kysynnän vaihtelevuus, tuotteen räätälöintivaatimukset sekä tilausten koko ja tilaustaaajuus. Tuoteperusteisia tekijöitä ovat tuotteen kompleksisuus, rakenne, modulaarisuus ja räätälöintimahdollisuudet. Tuotantoperusteisista tekijöistä tärkein on tuotteen läpimenoaika eli kuinka kauan tuotteen valmistaminen kestää. Muita tuotantoperusteisia tekijöitä ovat tuotannon suunnittelupisteiden lukumäärä ja pulonkaulojen sijainti sekä tuotannon joustavuus. (Olhager, 2003) Valittu tuotantomuoto yleensä sanelee yrityksen tuotantosysteemiltä vaadittavat ominaisuudet sekä toiminnan ohjaamisen ja johtamisen peruseriaatteet (Rudberg & Wikner, 2004).

Tässä tutkimuksessa syvennytään tutkimuksen rajauksen vuoksi tarkemmin ETO-tuotannon erityispiirteisiin. ETO-tuotannossa tuotteet suunnitellaan ja valmistetaan aina tietyn asiakkaan tarpeiden mukaisesti, minkä vuoksi jokainen asiakastilaus tuottaa ainutkertaisen tuotteen (Amaro *et al.*, 1999). Tilausten ainutkertaisuuden vuoksi yksittäisiä tilauksia voidaan käsitellä omina projekteinaan, minkä vuoksi ETO-tuotannosta käytetään joskus myös nimitystä projektituotanto (Yang, 2013; Vaagen *et al.*, 2017). Jotta

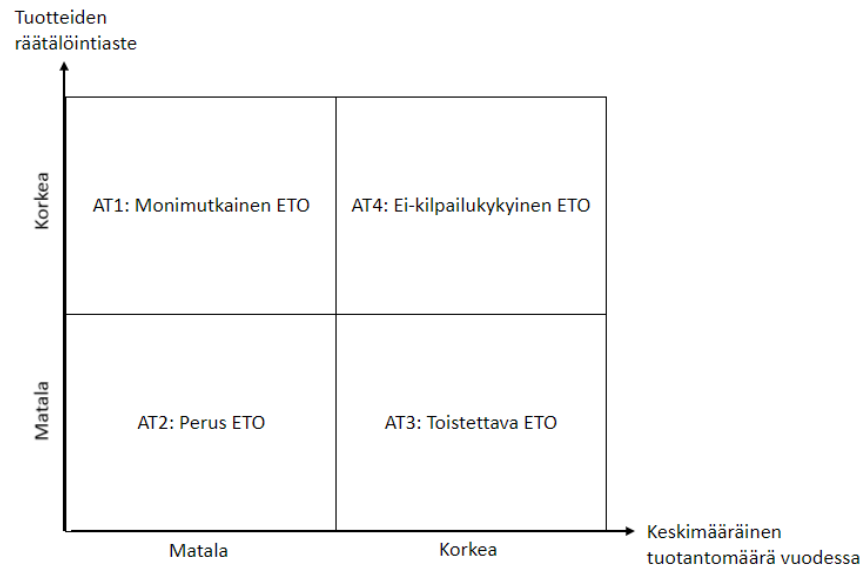
asiakaskohtainen räätälöinti olisi mahdollista, asiakastilauksen kytkentäpiste sijaitsee ETO-periaatteella toimivilla yrityksillä jo tuotteen suunnitteluvaiheessa. Tämä tarkoittaa luonnollisesti sitä, että läpimenoaika tilauksen saamisesta tuotteen toimittamiseen on ETO-tuotannossa yleensä suhteellisen pitkä. (Amaro *et al.*, 1999; Gosling & Naim, 2009)

ETO-periaatteella toimivan yrityksen tuotteet ovat yleensä monimutkaisia ja sisältävät lukuisia eri komponentteja ja alikokoonpanoja (Hicks *et al.*, 2000). Toisaalta jotkut tuotteen sisältämistä komponenteista ja alikokoonpanoista voivat olla hyvinkin pitkälle standardisoituja, kun taas osa komponenteista ja alikokoonpanoista räätälöidään aina asiakaskohtaisesti (Rahman & Shariff, 2003; Stavroulaki & Davis, 2010). ETO-tuotannossa tuotantomäärät ovat yleensä suhteellisen pieniä ja lopputuotteiden kokoonpano on usein pitkälti manuaalista ja vaatii työntekijöiltä korkeaa osaamistasoa ja monitaitoisuutta (Stevenson *et al.*, 2005).

2.3.2 ETO-yritysten luokittelu

ETO-periaatteella toimivat yritykset voivat erota toisistaan huomattavasti markkinaympäristön, kilpailutilanteen, tuotteiden- ja tuotannon monimutkaisuuden sekä asiakaskohtaisen räätälöinnin määrän suhteen. Esimerkiksi yritys, joka valmistaa asiakaskohtaisesti räätälöityjä ikkunaruujuja eroaa huomattavasti yrityksestä, joka valmistaa suuria ja monimutkaisia pitkälle räätälöityä teollisuuskoneita. (Bertrand & Muntslag, 1993) ETO-yritysten luokittelun avulla voidaan parantaa ymmärrystä siitä, minkä tyyppisestä yrityksestä on kulloinkin kysymys, jotta esimerkiksi tuotantosysteemi ja tuotannonohjaus osataan suunnitella juuri optimaaliseksi kyseisen yrityksen tarpeita ajatellen (Willner *et al.*, 2016).

ETO-yrityksiä on kirjallisuudessa yritetty luokitella monella eri tavalla (Amaro *et al.*, 1999; Hicks *et al.*, 2001; Wikner & Rudberg, 2005; Willner *et al.*, 2016). Esimerkiksi Willner *et al.* (2016) jakavat ETO-periaatteella toimivat yritykset kuvassa 6 esitettyyn neljään arkityyppiin tuotantovolyymin sekä projektikohtaisesti vaadittavan suunnittelun määrän eli tuotteiden räätälöintiasteen perusteella.



Kuva 6. ETO-arkkityyppien luokittelu tuotantovolyymin ja tuotteiden räätälöintiasteen perusteella, mukailen (Willner et al., 2016).

Ensimmäisestä arkkityypistä käytetään nimitystä monimutkainen ETO ja siinä tuotteiden räätälöintiaste on suuri, mutta tuotantomäärät ovat pieniä. Toinen arkkityyppi on perus ETO, ja siinä tuotteiden räätälöintiaste sekä tuotantomäärät ovat kumpikin pieniä. Kolmannessa arkkityypissä tuotteiden räätälöintiaste on pieni, mutta tuotantomäärät suuria. Tästä arkkityypistä käytetään nimitystä toistettava ETO. Neljäs arkkityyppi on nimeltään ei-kilpailukykyinen ETO ja siinä tuotteiden räätälöintiaste ja tuotantomäärät ovat molemmat suuria. Nimitys ”ei-kilpailukykyinen” juontaa juurensa siitä, että tuotantotoimintaa on yleensä hyvin haastavaa toteuttaa kustannustehokkaasti, kun tuotantomäärät ovat suuria ja valmistettavat tuotteet eroavat erittäin paljon toisistaan. (Willner et al., 2016)

Hicks et al. (2001) taas jakavat ETO-periaatteella toimivat yritykset vertikaalisen integraation määrän perusteella neljään eri tyyppiin:

- *Tyyppi 1:* Yritys pitää itsellään projektinhallinnan lisäksi kaikki tuotannon vaiheet suunnittelusta osien valmistukseen ja tuotteiden loppukokoonpanoon.
- *Tyyppi 2:* Yritys pitää itsellään projektinhallinnan lisäksi tuotteiden suunnittelun ja loppukokoonpanon, mutta on ulkoistanut osien valmistuksen alihankintaketjulle.
- *Tyyppi 3:* Yritys pitää itsellään projektinhallinnan ja tuotteiden suunnittelun, mutta on ulkoistanut osavalmistuksen ja tuotteiden loppukokoonpanon alihankintaketjulle.
- *Tyyppi 4:* Yritys pitää itsellään vain projektinhallinnan ja on ulkoistanut suunnittelun, osavalmistuksen ja tuotteiden loppukokoonpanon alihankintaketjulle.

Ykköstyypin ETO-yritykset menestyvät korkean vertikaalisen integraation määrän myötä parhaiten vakailta markkinoilla, joissa on vain vähän riskejä. Ykköstyypin toimintamalli pitää sisällään korkeat kiinteät kustannukset, koska kaikki toimitusketjun vaiheet pitää pystyä suorittamaan yrityksen sisäisesti. Markkinoiden muuttuessa epävarmemmiksi ja dynaamisemmiksi, yritysten tarve pienentää kiinteitä kustannuksia usein kasvaa ja toimintojen ulkoistaminen muuttuu houkuttelevammaksi vaihtoehdoksi. Dynaamisissa markkinaympäristöissä ETO-periaatteella toimiva yritys muistuttaakin usein tyyppiltään 2-, 3- tai 4- tyyppin yritystä. (Hicks *et al.*, 2001)

2.3.3 Vaihtelu

Vaihtelun ja epävarmuuden suuri määrä tekevät ETO-tyyppisestä asiakasohjautuvasta tuotannosta erityisen haastavan ja vaikeasti hallittavan tuotantomuodon (Bertrand & Muntslag, 1993; Gosling & Naim, 2009; Mello *et al.*, 2017). Vaihtelun suuren määrän vuoksi on hyvin tyypillistä, että ETO-tuotannossa tuote saattaa odottaa jopa yli 90 % tuotteen kokoonpanojasta erilaisissa väliavarastoissa ennen tai jälkeen työvaiheen, mikä tarkoittaa, että usein vain alle 10 % kokoonpanojasta kuluu itse tuotteen valmistamiseen (Kingsman & Hendry, 2002).

On olemassa monia eri asioita, jotka aiheuttavat vaihtelua ja epävarmuutta ETO-tyyppiin tuotantoon (Bertrand & Muntslag, 1993). Galbraithin (1973) mukaan epävarmuudella tarkoitetaan eroa sen välillä, kuinka paljon jonkin tehtävän suorittamiseen kokonaisuudessaan vaaditaan informaatiota ja kuinka paljon yrityksellä on sillä hetkellä informaatiota käytettävissä. Bertrand & Muntslag (1993) jakavat ETO-tuotannon epävarmuustekijät kolmeen eri tyyppiin, jotka kaikki vaikuttavat merkittävästi tuotannon ohjattavuuteen ja tuotannossa esiintyvän vaihtelun määrään.

Ensimmäinen epävarmuustekijä liittyy tuotespesifikaatioon, eli siihen millainen tuote asiakkaalle tullaan ylipäättään valmistamaan. Erityisesti uuden toimitusprojektin alkaessa valmistettavan tuotteen sisältämät komponentit ja lopputuotteen rakenne voivat olla vielä täysin hämärän peitossa. (Bertrand & Muntslag, 1993) ETO-ympäristössä on myös tyypillistä, että asiakas haluaa tilaamaansa tuotteeseen muutoksia vielä toimitusprojektin aikana (Vaagen *et al.*, 2017). Usein pienetkin muutokset asiakkaiden vaatimuksissa voivat vaikuttaa merkittävästi tuotteen rakenteeseen sekä koko toimitusketjun ja tuotantosysteemin toimintaan (Dooley & Van De Ven, 1999).

Toinen epävarmuustekijä liittyy tulevaisuuden kysynnän määrän ja tyyppin vaihteluun. Yksityiskohtaisen ja luotettavan kysyntäennusteen tekeminen on erityisen vaikeaa ETO-

ympäristössä, jossa tuotevariaatioita on paljon ja erityisesti investointihyödykkeiden kysyntä on usein riippuvaista yleisestä maailman markkinatilanteesta. (Bertrand & Muntslag, 1993)

Kolmas epävarmuustekijä liittyy prosessin epävarmuuteen. ETO-tuotannossa on erittäin vaikeaa tehdä projektin alussa tarkkoja arviota vaadittavien resurssien määrästä ja tyyppistä sekä siitä, minkä verran aikaa toimitusketjun eri vaiheiden toteuttamiseen todellisuudessa vaaditaan. (Bertrand & Muntslag, 1993) Toimitusketjun eri vaiheiden aikatauluttamisen on todettu olevan erittäin haastava tehtävä ja aikataulut pitävät aina sisällään huomattavan määrän epävarmuutta (Little *et al.*, 2000). Toisaalta aikataulujen paikkansapitävyys ja sovituisissa toimitusajoissa pysyminen on erityisen kriittistä juuri ETO-periaatteella toimiville yrityksille, koska ETO-yritysten valmistamia tuotteita käytetään tyypillisesti laajemmissa kokonaisuuksissa, kuten laivanrakennusprojekteissa, joissa asiakkaalle saattaa koitua mahdollisen myöhästymisen seurauksena erittäin suuria sakkokustannuksia (Grabenstetter & Usher, 2014).

Ajallisesti ETO-tuotannon läpimenoajan pullonkaulana on yleensä komponenttien suunnittelu- ja hankintavaihe (Elfving *et al.*, 2005; Gosling *et al.*, 2009). Tutkimuksissa on havaittu, että ETO-yrityksissä osavalmistus- ja kokoonpanovaiheiden aikatauluja ja edistymistä seurataan yleensä kohtalaisen tarkasti, mutta sen sijaan suunnitteluvaiheen aikatauluttamisen ja edistymisen seurannan on havaittu olevan monissa ETO-yrityksissä jopa erittäin puutteellista (Little *et al.*, 2000; Grabenstetter & Usher, 2014). Tähän vaikuttaa osaltaan se, että suunnitteluvaiheen kestoa on usein hankala arvioida kovinkaan tarkasti ja sen edistymistä on huomattavasti vaikeampi seurata kuin esimerkiksi tuotteen kokoonpanon edistymistä (Vaagen *et al.*, 2017). Toisaalta Grabenstetter ja Usher (2014) painottivat, että koska tuotteiden suunnitteluvaihe on ETO-tyyppisen tuotannon ensimmäinen vaihe, niin sen aikataulujen paikkansapitävyydellä on erittäin suuri merkitys ketjun seuraavien vaiheiden suorituskykyyn.

Wortmannin (1992) ja Vaagen *et al.* (2017) mukaan yksittäisistä toimitusketjun vaiheista juuri tuotteiden suunnitteluvaihe aiheuttaa eniten vaihtelua ETO-tyyppiseen tuotantoon. Tämä johtuu siitä, että kyseinen vaihe vaikuttaa niin merkittävästi kaikkien seuraavien toimitusketjun vaiheiden (esim. osto ja kokoonpano) sisältöön ja kestoon (Vaagen *et al.*, 2017). Erityisen paljon itse suunnitteluvaiheen työtä ja aikataulussa pysymistä on todettu hankaloittavan puutteelliset lähtötiedot ja asiakkaan suunnalta tulevat muutospyyntö (Grabenstetter & Usher, 2014).

2.3.4 Kilpailukeinot

ETO-periaatteella toimivien yritysten keskeisimpänä kilpailukeinoina on tuotteiden suuren räätälöintiasteen mukanaan tuoma korkea palvelutaso (Gosling & Naim, 2009). Toisaalta markkinoilla, joissa toiminta perustuu tuotteiden asiakaskohtaiseen räätälöintiin, kyky räätälöidä tuotteita on enemmänkin perusvaatimus eli ns. *qualifier* (kts. Hill, 1993), eikä näin ollen välttämättä toimi yritykselle enää erityisenä kilpailuedun lähteenä (Amaro *et al.*, 1999).

Tuotteen räätälöintiasteella on suora vaikutus toimituksen läpimenoaikaan, koska mitä suurempi tuotteen räätälöintiaste on, sitä enemmän yrityksen pitää suorittaa eri toimintoja tilauksen saamisen jälkeen (Amaro *et al.*, 1999). Tämän vuoksi ETO-periaatteella toimivan yrityksen tulee kiinnittää entistä enemmän huomiota lyhyisiin läpimenoaikoihin (Hicks *et al.*, 2001; Birkie & Trucco, 2016; Mello *et al.*, 2017). Lyhyiden läpimenoaikojen on todettu parantavan myös tuotannon ohjattavuutta ja ennustettavuutta (Hopp & Spearman, 2000).

Toimitusprosessin läpimenoaikaa ja tehokkuutta voidaan parantaa tuoterakenteiden standardisoinnin ja moduloinnin sekä työvaiheiden automatisoinnin avulla (Gosling & Naim, 2009; Haug *et al.*, 2009; Elgh, 2012). ETO-yritykset ovat kuitenkin kokeneet erittäin haastavaksi määrittää, minkä verran standardisointia ja automatisointia voidaan hyödyntää ilman, että yrityksen palvelutaso heikkenee liikaa (Willner *et al.*, 2016). Suuren vaihtelun määrän vuoksi joustavuus eli kyky mukautua nopeasti muuttuviin asiakasvaatimuksiin on ETO-yritykselle ratkaisevan tärkeää (Gosling & Naim, 2009). Lisäksi sujuva yhteistyö ja tiedonkulku eri osastojen ja erityisesti suunnittelun ja valmistuksen välillä on avainasemassa ETO-tuotannon onnistumisessa (Wortmann, 1992; Gosling & Naim, 2009; Mello *et al.*, 2017).

Vaihtelun vähentämisen ja hallinnan keinoja esitetään lisää kappaleissa 2.5 ja 2.6. Seuraavaksi kuitenkin tarkastellaan, minkälainen vaikutus vaihtelulla on tuotannon suorituskykyyn.

2.4 Vaihtelun vaikutus tuotannon suorituskykyyn

Suorituskyvyllä tarkoitetaan yrityksen kykyä saavuttaa tavoitteensa (Slack *et al.*, 2013; Andersson & Bellgran, 2015). Miltenburgin (2005) ja Slack *et al.* (2013) mukaan tuotannon keskeisimpiä tavoitteita ovat:

- *Laatu*: Kyky toteuttaa se, mitä on suunniteltu. Kyky täyttää johdonmukaisesti asiakkaan tarpeet ja odotukset

- *Nopeus*: Aika tilauksen saamisesta tuotteen tai palvelun toimittamiseen
- *Luotettavuus*: Kyky pitää kiinni asiakkaalle annetuista lupauksista, kuten toimitusajoista (toimitusvarmuus)
- *Joustavuus*: Kyky mukautua asiakkaiden muuttuviin vaatimuksiin, kuten erilaisiin tilausmääriin ja tuotevariaatioihin
- *Kustannukset*: Kyky tuottaa tuotteita tai palveluita mahdollisimman kustannustehokkaasti

Tavoitteisiin pääsemistä seurataan yleensä erilaisten suorituskykymittarien avulla (Slack *et al.*, 2013; Andersson & Bellgran, 2015). Suorituskykymittareilla on tärkeä rooli, koska niiden avulla toimintaa voidaan ohjata tehokkaasti haluttuun suuntaan. Suorituskykymittarien valinnassa pitää kuitenkin varmistaa, että erilliset mittarit tukevat toisiaan ja riski osaoptimoinnille on mahdollisimman pieni. Selkeät ja toistensa suhteen tasapainossa olevat mittarit ohjaavat parhaimmillaan toimintaa kohti yrityksen ylätason strategiassa määritellyjä päämääriä. (Behn, 2003; Tangen, 2004)

Tavoitteisiin pääsemisestä haastavaa tekee vaihtelu, joka heikentää lähes aina prosessien suorituskykyä ja tehokkuutta (Shewhart, 1931; Slack *et al.*, 2013; Pound *et al.*, 2014). Jotta vaihtelun vaikutusta tuotantoprosessin suorituskykyyn voidaan paremmin ymmärtää, pitää ensin ymmärtää minkälaisia lainalaisuuksia tuotantoympäristössä on voimassa.

Yksi tunnetuimmista tuotannon lainalaisuuksia kuvaavista kaavoista on nimeltään Littlen laki. Kaava on saanut nimensä sen kehittäjältä John Littleltä, joka esitteli sen laajemmalle yleisölle ensimmäisen kerran vuonna 1961. Little (1961) ilmaisi lakinsa muodossa

$$L = \lambda W, \quad (1)$$

jossa L on systeemissä sisällä olevien yksiköiden lukumäärä, λ yksiköiden keskimääräinen systeemiin saapumisnopeus ja W yksiköiden keskimääräinen systeemissä vietetty aika. Kaavassa esitetty riippuvuussuhde on voimassa riippumatta siitä, keskitytäänkö koko systeemiin vai sen sisällä oleviin pienempiin alisysteemeihin ja prosesseihin (Kanet, 2004; Little, 2011). Kaavan yksinkertaisuus ja monikäyttöisyys ovatkin luultavasti suurimpia syitä sen pitkään jatkuneeseen suosioon (Potter *et al.*, 2020).

Littlen kaavasta on olemassa erilaisia versioita, joista yksi tunnetuimmista on Hoppsin & Spearmanin (2000) käyttämä muoto

$$TH = WIP/CT, \quad (2)$$

jossa TH on läpimeno (*Throughput*), WIP keskeneräisen työn määrä (*Work In Progress*) ja CT jaksoaika (*Cycle Time*). Läpimenolla tarkoitetaan keskimääräistä prosessin ulostulon määrää aikayksikköä kohden, keskeneräisellä työllä prosessissa sisällä olevien yksiköiden lukumäärää ja jaksoajalla yksikön keskimääräistä prosessissa viettämää aikaa. Tässä tutkimuksessa Littlen kaavasta käytetään jatkossa edellä mainittua Hoppsin ja Spearmanin käyttämää muotoa.

Hoppsin & Spearmanin (2000) mukaan läpimenoajan (*Throughput Time*) ja jaksoajan (*Cycle Time*) erona on se, että läpimenoaika on tuotannosuunnittelussa käytettävä kiinteä vakioaika, kun taas jaksoaika on satunnaisesti muuttuva prosessin todellista suorituskykyä kuvaava aika. Hopp & Spearman (2000) kuitenkin huomauttivat, että monissa tutkimuksissa jaksoaikaa ja läpimenoaikaa käytetään myös toistensa synonyymeinä. Myös Turpin (2018) mainitsi artikkelissaan, että jaksoajasta ja läpimenoajasta on olemassa nykykirjallisuudessa monia erilaisia määritelmiä. Tässä tutkimuksessa jaksoajalla ja läpimenoajalla tarkoitetaan selkeyden vuoksi samaa asiaa eli kokonaisaikaa, joka yksiköltä kuluu prosessin alkupisteestä prosessin loppupisteeseen.

Toinen keskeinen tuotannon lainalaisuuksia kuvaava kaava on John Kingmanin vuonna 1961 esittelemä yhtälö, jonka tarkoituksena on kuvata jaksoajan, käyttöasteen ja vaihtelun välistä yhteyttä. Kingmanin yhtälö voidaan esittää muodossa

$$CT = \left(\frac{c_a^2 + c_b^2}{2} \right) * \left(\frac{u}{1-u} \right) * t_0, \quad (3)$$

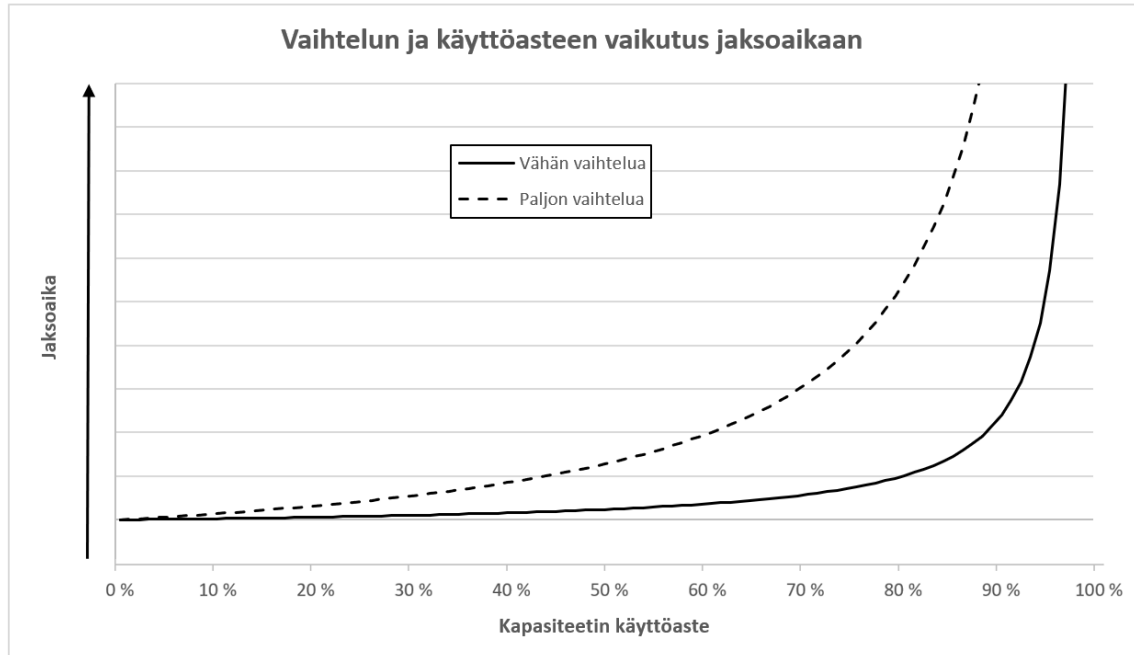
jossa CT on jaksoaika, c_a prosessiin saapuvien yksiköiden saapumisaikojen COV , c_b yksiköiden prosessointiaikojen COV , u resurssien käyttöaste ja t_0 keskimääräinen tehokas prosessiaika (Kingman, 1961). COV (*Coefficient of Variation*) lasketaan kaavalla,

$$COV = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (4)$$

jossa σ on tarkasteltavan kohteen keskihajonta ja μ tarkasteltavan kohteen keskiarvo (Vangel, 1996). COV mahdollistaa erilaisissa prosesseissa esiintyvän vaihtelun määrän vertailemisen keskenään. Kingmanin yhtälöstä käytetään usein myös yksinkertaistettua muotoa

$$CT = V * U * T, \quad (5)$$

jossa CT on jaksoaika, V vaihtelukomponentti $\left(\frac{c_a^2 + c_b^2}{2} \right)$, U käyttöastekomponentti $\left(\frac{u}{1-u} \right)$ ja T aikakomponentti (t_0) (Pound *et al.*, 2014). Kingmanin yhtälössä esitettyä jaksoajan, käyttöasteen ja vaihtelun välistä yhteyttä on havainnollistettu kuvassa 7. Kuvasta voidaan huomata, että jaksoaika alkaa käyttöasteen kasvaessa kasvaa eksponentiaalisesti.



Kuva 7. Käyttöasteen, jaksoajan ja vaihtelun välinen yhteys, mukailten (Pound *et al.*, 2014).

Prosessin tehokkuus voidaan jakaa kahteen luokkaan: resurssitehokkuuteen ja virtaustehokkuuteen. Virtaustehokkuudella tarkoitetaan arvoa tuottavien toimintojen osuutta kokonaisläpimenoajasta ja resurssitehokkuudella aikaa jona resurssit ovat käytössä jollain tietyllä ajanjaksolla. Hyvän virtaustehokkuuden merkinä on yleensä lyhyet läpimenoajat, kun taas hyvän resurssitehokkuuden merkinä on kapasiteetin korkea käyttöaste. Yrityksen menestyksen kannalta yleensä usein tärkeää, että virtaus- ja resurssitehokkuus olisivat molemmat mahdollisimman hyvällä tasolla. (Modig & Åhlström, 2012) Kingmanin yhtälöä havainnollistavasta kuvasta 7 voidaan kuitenkin huomata, että mitä enemmän prosessissa on vaihtelua, sitä vaikeampaa hyvän resurssi- ja virtaustehokkuuden samanaikainen saavuttaminen tulee olemaan.

Tuotantosysteemissä esiintyvän vaihtelun vaikutuksia vastaan voidaan pyrkiä suojautumaan hyödyntämällä erilaisia buffereita (Deblaere *et al.*, 2011; Pound *et al.*, 2014; Wibowo, 2018). Hopp & Spearman (2000) määrittelevät bufferin muunnosprosessissa olevaksi ylimääräiseksi resurssiksi, jonka tarkoituksena on synkronoida kysyntä ja tarjonta kohtaamaan toisensa. Pound *et al.* (2014) mukaan on olemassa vain kolme erityyppistä bufferia:

- **Aikabufferi:** Mikä tahansa muunnosprosessissa oleva viive kysynnän ja sen tyydyttämisen välillä. Esim. tuotantoprosessin suunnitellun läpimenoajan sisälle laskettu ylimääräinen aika.

- *Varastobufferi*: Prosessissa sisällä oleva ylimääräinen materiaali. Esim. tuotantoprosessissa sisällä oleva keskeneräinen työ eli WIP.
- *Kapasiteettibufferi*: Ylimääräinen kapasiteetti. Esim. ylimääräiset tuotantoprosessissa olevat työntekijät.

Aikabufferilla on kielteinen vaikutus asiakasvasteaikaan eli siihen aikaan, mikä yrityksellä kuluu tilauksen saamisesta tilauksen toimittamiseen asiakkaalle (Pound *et al.*, 2014). Aikabufferit voivat kuitenkin olla toimiva ratkaisu, kun kyseessä on jokin etukäteen tiedostettu epävarmuustekijä, kuten eri tuotevariaatioiden sisällään pitämät erilaiset työvaiheiden kestot. Aikabufferit muuttuvat vähemmän optimaaliseksi ratkaisuksi, jos taas kyseessä on jokin vaikeasti ennakoitava epätodennäköinen muutos, jolla olisi toteutessaan suuri vaikutus prosessin suorittamiseen. (Vaagen *et al.*, 2017) Varasto- tai kapasiteettibufferin hyödyntäminen saattaakin näin ollen olla parempi ratkaisu vaikeasti ennakoitavia yllättäviä muutoksia vastaan kuin aikabufferi.

Suuri kapasiteettibufferi kuitenkin heikentää resurssitehokkuutta eli kapasiteetin käyttöastetta, mutta samaan aikaan Kingmanin yhtälön mukaan tuotannon läpimenoaika lyhenee ja virtaustehokkuus paranee. Vastaavasti suuri prosessissa oleva WIP:n määrä (varastobufferi) parantaa resurssien käyttöastetta, mutta käänttöpuolena virtaustehokkuus heikkenee ja läpimenoajat kasvavat. Organisaation johdon yhtenä merkittävänä haasteena onkin määrittellä, miten paljon vaihtelulta halutaan suojautua ja millainen on paras määrä ja yhdistelmä erityyppisiä buffereita (Pound *et al.*, 2014).

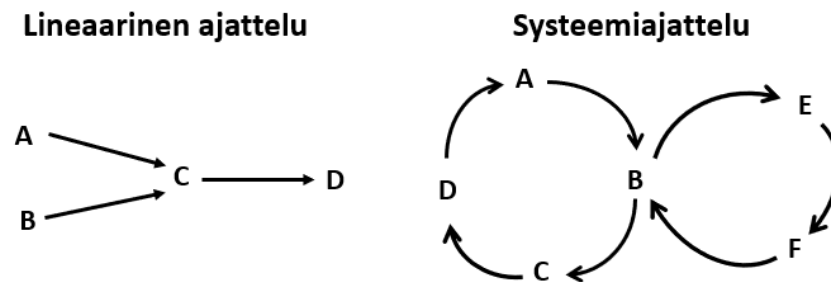
2.5 Systeemiajattelu ja vaihtelu

Systeemiajattelulla tarkoitetaan ajattelumallia, jossa asioita pyritään tarkastelemaan yksittäisten havaintojen sijaan kokonaisuutena (Senge, 1990; Meadows, 2008). Richmond (1994) vertaa systeemiajattelua ajattelutapaan, jossa pyritään näkemään samaan aikaan molemmat, sekä metsä että siellä olevat yksittäiset puut. Arnold & Wade (2015) sen sijaan määrittelevät systeemiajattelun joukoksi synergiassa toimivia analyyttisiä taitoja, joiden avulla pystytään tunnistamaan erilaisia systeemejä, ymmärtämään ja ennustamaan niiden käyttäytymistä sekä tarvittaessa suunnittelemaan systeemeihin muutoksia, joiden avulla päästään haluttuun lopputulokseen.

Systeemiajattelun yhtenä keskeisenä tavoitteena on parantaa ymmärrystä asioiden välisistä riippuvuussuhteista (Senge, 1990; Sterman, 2000). Systeemiajattelussa jokaista tekoa ja toimintaa voidaan ajatella sekä syynä että seurauksena. Kun maailmaa tarkastellaan systeemiajattelun avulla, niin kaikkien asioiden ja toimintojen välillä voidaan nähdä olevan palautesilmukka, joka kuvaa miten asiat vaikuttavat toisiinsa. (Senge,

1990; Forrester, 1994; Meadows, 2008) Palautesilmukkoja on olemassa kahdentyyppisiä: voimistavia ja tasapainottavia. Voimistavat palautesilmukat voimistavat ja lisäävät systeemissä tapahtuvaa muutosta, kun taas tasapainottavat palautesilmukat hillitsevät systeemissä tapahtuvaa muutosta. Toiminnan ja palautteen välillä voi myös olla viive, joka estää näkemästä toiminnan seurausta heti. Juuri viive tekee eri asioiden välisten riippuvuussuhteiden näkemisestä hankalaa. (Senge, 1990; Meadows, 2008)

Kuvassa 8 on esitetty lineaarisen ajattelun ja systeemiajattelun ero. Linearisessa yksittäisiin tapahtumiin perustuvassa ajattelussa asiat voidaan selittää tapahtumien välisinä suorina kausaalisisina ketjuina, joissa esimerkiksi tapahtuman D juurisyynä on ketjun aloitaneet tapahtumat A ja B. Systeemiajattelussa systeemin toiminta perustuu asioiden väliin palautesilmukoihin, minkä vuoksi juurisyynä ei koskaan ole mikään yksittäinen tapahtuma, vaan eri tapahtumien välillä palautesilmukoiden kautta vaikuttavat voimat. (Senge, 1990; Meadows, 2008)



Kuva 8. Lineaarisen ajattelun ja systeemiajattelun ero, mukailten (Senge, 1990).

Kun organisaatiot keskittyvät vain omaan asemaansa, niin niiden on hyvin vaikea nähdä miten oma tekeminen vaikuttaa muihin organisaatioihin sekä ulkopuoliseen maailmaan. Kun lopulta omien tekojen seuraukset aiheuttavat organisaatiolle ongelmia, nämä uudet ongelmat käsitellään ulkoisesti aiheutettuina, vaikka todellisuudessa organisaatio on aiheuttanut ne itse omalla toiminnallaan. Syyllisten etsiminen aina oman organisaation ulkopuolelta on tyypillistä organisaatioille, jotka eivät kykene hyödyntämään systeemiajattelua. (Senge, 1990)

Tarkasteltaessa asioita yksittäisten osasten sijaan kokonaisuutena systeeminä organisaatiolla on paremmat mahdollisuudet päästä käsiksi ongelmien taustalla oleviin todellisiin syihin (Arnold & Wade, 2015). Organisaation kyky jatkuvasti oppia nouseekin näin ollen avainasemaan, kun sen prosesseissa esiintyvää vaihtelua pyritään vähentämään. Kun organisaatio on selvillä siitä, mitkä asiat todella vaikuttavat toisiinsa, pystyy se jatkossa kohdistamaan parannustoimenpiteet paremmin juuri sinne, missä niistä on eniten hyötyä. (Senge, 1990) Olemassa olevan tiedon uudelleenkäyttö ja kokemusten jakaminen

organisaation sisällä on erityisen tärkeää ETO-tyyppisessä tuotannossa, jossa eri osastojen välinen yhteistyö on avainasemassa (Wortmann, 1992).

Useat tutkimukset osoittavat, että jopa korkeasti koulutetuilla henkilöillä on puutteelliset kyvyt ymmärtää monimutkaisten systeemien käyttäytymistä ja asioiden välisiä todellisia syy-seuraussuhteita (White, 1992; Moxnes, 2000; Sterman & Booth Sweeney, 2002). Yksi syy systeemiajattelun puutteelle on kulttuurissamme, jossa opimme pienestä pitäen näkemään vain asioiden välillä olevia lineaarisia helposti havaittavia riippuvuussuhteita (Senge, 1990).

Monet tutkijat ovat kuitenkin yhtä mieltä siitä, että systeemiajattelu on erityisen hyödyllinen lähestymistapa nykyisessä koko ajan monimutkaisemmaksi muuttuvassa maailmassa (Senge, 1990; Richmond, 1994; Meadows, 2008; Plate, 2010). Systeemiajattelun hyödyntämistä projektin hallinnassa on jo ehditty tutkimaan useiden eri tutkijoiden toimesta (Yeo, 1993; Winter & Checkland, 2003; Crawford & Pollack, 2004; Pollack, 2007). Systeemiajattelun tuomia mahdollisuuksia on myös tutkittu yleisesti toimitusketjun hallinnan näkökulmasta (Sahin & Robinson, 2002) sekä erikseen ETO-tyyppisen toimitusketjun hallinnan näkökulmasta (Mello *et al.*, 2017).

Yksi esimerkki systeemiajattelua hyödyntävästä kehitysmenetelmästä on 1980-luvulla kehitetty TOC (*Theory of Constraints*) eli rajoitteiden teoria (Mabin & Balderstone, 2003). TOC-menetelmän tavoitteena on pyrkiä löytämään systeemin suorituskykyä rajoittava tekijä eli pullonkaula, maksimoida pullonkaulan suorituskyky sekä mahdollisuuksien mukaan poistaa kyseinen pullonkaula. Systeemin pullonkaulat voivat olla joko fyysisiä, kuten koneen kapasiteetti ja rajallinen tuotantotila tai ei-fyysisiä, kuten heikko tiedonkulku tai hidas päätöksenteko. (Goldratt, 1984) TOC:n periaatetta on hyödynnetty jo pitkään tuotannonsuunnittelussa ja -ohjauksessa (Lödding, 2013) ja siihen perustuen on kehitetty DBR (*Drum Buffer Rope*) nimellä kulkeva tuotannonohjausmenetelmä (Ronen & Schragenheim, 1990), johon tutustutaan tarkemmin kappaleessa 2.6.3.

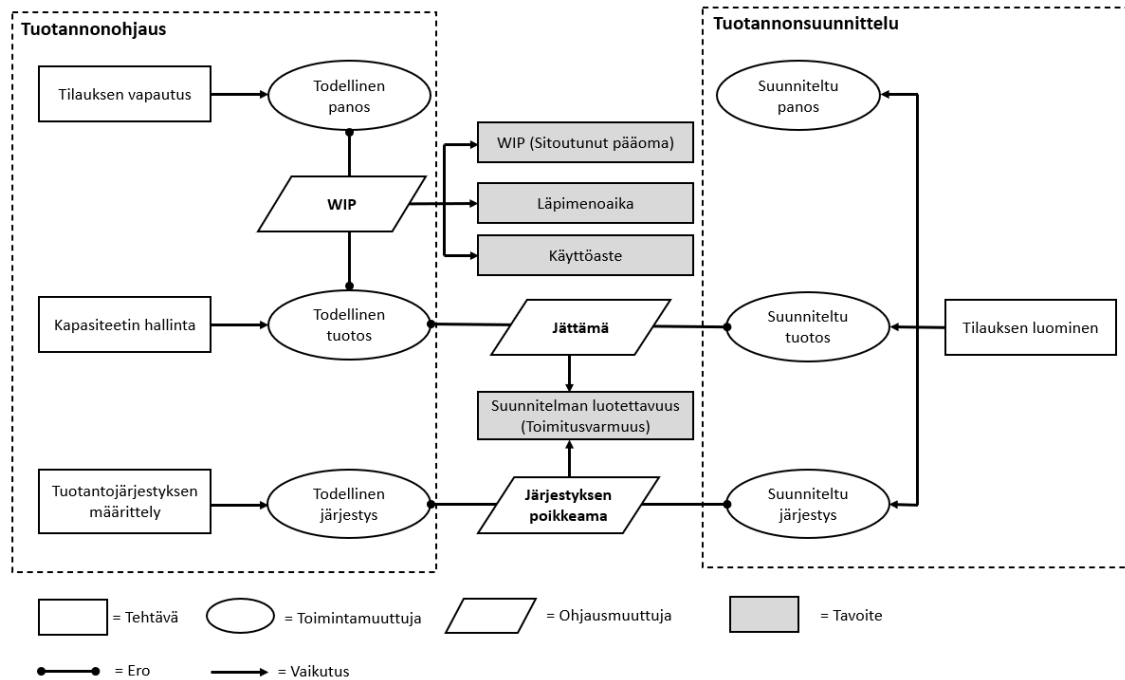
2.6 Tuotannonohjaus ja vaihtelu

2.6.1 Tuotannonohjauksen tavoitteet ja vaiheet

Tuotannonsuunnittelu ja -ohjaus pitää sisällään lukuisia eri vaiheita ja tehtäviä aina tilauksen saamisesta tilauksen toimitukseen. Yksi tuotannonsuunnittelun keskeisimmistä tehtävistä on tehdä päätuotantosuunnitelma (*MPS, Master Production Schedule*), jossa määritellään karkealla tasolla, milloin ja missä järjestyksessä tuotteet tullaan tuotan-

nossa valmistamaan. Tuotannonohjauksen tehtäväksi sen sijaan jää kyseisen tuotanto-suunnitelman toteuttaminen ja tuotannon hienokuormitussuunnitelman tekeminen. (ISA-95.00.01, 2005)

Lödding (2012) määritteli tuotannonohjauksen keskeisimpiä tehtäviä kuvassa 9 esitetyn tuotannonohjauksen mallin avulla. Löddingin mallissa tuotannonohjauksen keskeisimmiksi tehtäviksi on määritelty tilauksen vapautus, kapasiteetin hallinta ja lopullisen tuotantojärjestyksen määrittely.



Kuva 9. Tuotannonohjauksen malli, mukailten (Lödding, 2012).

Tuotannonohjauksella on todettu olevan suuri vaikutus tuotannon suorituskykyyn ja hallittavuuteen (Bertrand & Muntslag, 1993; Olhager & Wikner, 2000; Stevenson *et al.*, 2005; Nyhuis & Wiendahl, 2009). Käytettävillä tuotannonohjausperiaatteilla voidaan vaikuttaa tuotannossa esiintyvän vaihtelun määrään sekä siihen, miten jäljelle jäävän vaihtelun kanssa pystytään tulemaan toimeen (Hopp & Spearman, 2000). Bechten (1988), Stevenson *et al.* (2005) ja Löddingin (2013) mukaan tuotannonohjauksen keskeisimpiä tavoitteita ovat:

- Hyvä toimitusvarmuus
- Lyhyet läpimenoajat
- Kapasiteetin korkea käyttöaste
- Pieni sitoutunut pääoma

Tavoitteista voidaan huomata, että niiden välillä on ristiriitoja, minkä vuoksi tuotannonohjaus ei useinkaan voi keskittyä optimoimaan vain yhtä näistä tavoitteista. Tuotannonohjauksen tehtävänä onkin pyrkiä optimoimaan eri tavoitteet siten, että kokonaisuus vastaa yrityksen tuotantostrategiassa määritellyjä ylätasoon tavoitteita. (Wiendahl *et al.*, 2005) Optimoinnin apuna tuotannonohjaus voi käyttää Hoppsin & Spearmanin (2000) esittelemää kolmea bufferityyppiä: aika-, varasto-, ja kapasiteettibufferia. Yhden bufferityypin painoarvoa lisäämällä voidaan vaikuttaa muiden bufferityyppien tarpeeseen ja tämän myötä tuotannonohjauksen eri tavoitteiden toteutumiseen (Hopp & Spearman, 2000).

Jotta tuotannonohjaus voisi päästä yllä mainittuihin tavoitteisiinsa, tulee sen saada jatkuvasti ajantasaista tietoa ja palautetta tuotannon suoriutumisesta. Tuotannon suorituskyvyn mittaus ja läpinäkyvyys nousevatkin avainasemaan, jotta tuotantostrategian mukaiset tavoitteet voitaisiin saavuttaa. (Olhager & Wikner, 2000)

Tämän tutkimuksen teoreettisessa tarkastelussa keskitytään pääasiassa kuvassa 9 esitettyyn tuotannonohjauksen kolmeen keskeiseen tehtävään: tilauksen vapautukseen, kapasiteetin hallintaan ja tuotantojärjestyksen määrittelyyn. Pääpaino näistä on tilauksen vapautuksessa, koska sen avulla voidaan vaikuttaa niin merkittävästi tuotannossa esiintyvän vaihtelun määrään ja tuotannon läpimenoaikoihin (Kingsman & Hendry, 2002).

2.6.2 Tilausten vapautusperiaatteet

Tilauksen vapautuksella tarkoitetaan hetkeä, jolloin tuotannolle on annettu lupa alkaa valmistaa kyseistä tilausta. Tilauksen vapautuksen avulla pyritään kontrolloimaan systeemiin sisään syötettävien panosten (*input*) määrää. (Kingsman & Hendry, 2002; Lödding, 2013)

Ensimmäisten joukossa tuotantosysteemiin sisään syötettävien panosten kontrolloinnin merkityksen tuotannon suorituskykyyn nosti esille Oliver Wight (1970). Tämän jälkeen lukuisat muutkin tutkijat ovat todenneet tilausten vapautusperiaatteilla olevan suuri vaikutus tuotannon läpimenoaikoihin ja WIP-tasoihin sekä tuotannossa esiintyvän vaihtelun määrään (Spearman & Zazanis, 1990; Lu *et al.*, 2011; Thürer *et al.*, 2011). Erilaisista vapautusperiaatteista on muodostunut vuosien varrella monia erilaisia näkemyksiä ja keskustelu periaatteiden paremmuudesta on käynyt kiivaana jo useamman vuosikymmenen ajan (Bechte, 1988; Roderick *et al.*, 1992; Kingsman & Hendry, 2002; Axsäter, 2005; Thürer *et al.*, 2017; Haeussler *et al.*, 2020).

Tilauksen vapautusvaihetta edeltää tilauksen saapumisvaihe, jonka tarkoituksena on varmistaa, että tuotannolla on edellytykset valmistaa kyseinen tilaus (Bechte, 1988;

Perona *et al.*, 1997; Yan *et al.*, 2016). Tässä vaiheessa varmistetaan, että kaikki tuotteen valmistamiseen vaadittavat komponentit, työkalut, piirustukset ja ohjeet ovat saatavilla (Perona *et al.*, 1997). Tilauksen saapumisvaiheessa tilaukselle luodaan myös reititys eli määritellään missä tilaus valmistetaan ja minkä työvaiheiden kautta tilaus tulee kulkemaan tuotannossa (Bechte, 1988). Kun tuotantoedellytykset ovat kunnossa ja reititys on määritetty, niin tilaus hyväksytään tuotantoa edeltävään varastoon odottamaan tuotantoon vapautusta. Tuotantoa edeltävä varasto on tässä yhteydessä vain tietojärjestelmässä oleva listaus tilauksista, jotka ovat valmiita vapautettavaksi tuotantoon. (Perona *et al.*, 1997)

Ronen (1992) nosti artikkelissaan esille tilauksen saapumisvaiheessa tehtävien tuotannon edellytysten varmistuksen tärkeyden ja korosti, että tilausta ei koskaan pitäisi vapauttaa tuotantoon, jos kaikki tuotteen valmistamiseen vaadittavat komponentit eivät ole vielä saatavilla. Ronen käytti tästä periaatteesta nimitystä *Complete Kit Concept* (CK). CK-periaate saattaa kuulostaa itsestäänselvyydeltä, mutta käytännössä todella monissa yrityksissä tuotanto aloitetaan osapuutteistakin huolimatta kuvitellen, että tuotteet saadaan tällä tavoin toimimalla nopeammin valmiiksi. Todellisuudessa kuitenkin tuotannon kustannukset ja läpimenoaika vain kasvavat ja toimitusvarmuus heikkenee, kun tuotteiden valmistus joudutaan keskeyttämään ja tuotteet jäävät tuotannon lattialle odottamaan puuttuvia komponentteja (Ronen, 1992).

Tuotannonohjausmenetelmät voidaan jakaa tilausten vapautusperiaatteiden mukaan aikaperusteisiin ja kuormitusperusteisiin menetelmiin (Perona *et al.*, 1997). Aikaperusteisissä menetelmissä tilaukset vapautetaan tuotantoon tuotantosuunnitelmassa ennalta määritellyn aloitus eli vapautusajankohdan perusteella ilman, että tuotantosysteemin sen hetkistä kuormitusta otetaan huomioon (Lödding, 2013). Tilaukset siis ikään kuin työnnetään tuotantoon, minkä vuoksi aikaperusteiseen tilauksen vapautukseen perustuvasta tuotannonohjauksesta käytetään usein nimitystä työntöohjaus (*Push*) (Spearman & Zazanis, 1992).

Työntöohjauksen yhtenä merkittävänä ongelmana on se, että kun tuotantoprosessiin syötettävien uusien yksiköiden määrä ylittää prosessin kapasiteetin, niin prosessissa oleva WIP:n määrä pääsee kasvamaan teoriassa rajattomasti (Spearman & Zazanis, 1992). Kaavojen 2 ja 3 (Little ja Kingman) mukaan tämä tarkoittaa sitä, että myös prosessissa esiintyvä vaihtelu ja prosessin läpimenoaika alkavat kasvamaan rajattomasti. Tyypillinen esimerkki työntöohjauksesta on puhtaasti MRP:hen (*Materials Requirement Planning*) perustuva tuotannonohjaus, jossa tilaukset vapautetaan tuotantoon ennalta määritellyn tuotantosuunnitelman mukaisesti ottamatta huomioon tuotannon sen hetkistä kuormitusta (Hopp & Spearman, 2004).

Kuormitusperusteisessa menetelmässä tilaukset vapautetaan tuotantoon, kun systeemissä sisällä olevan WIP:n määrä alittaa koko tuotannolle tai yksittäiselle työvaiheelle ennalta määritellyn WIP:n määrän (Perona *et al.*, 1997). Kuormitusperusteiseen tilauksen vapautukseen perustuvasta ohjauksesta käytetään myös nimitystä imuohjaus (*Pull*), koska siinä tilaukset ikään kuin imetään tuotantoon (Spearman & Zazanis, 1992).

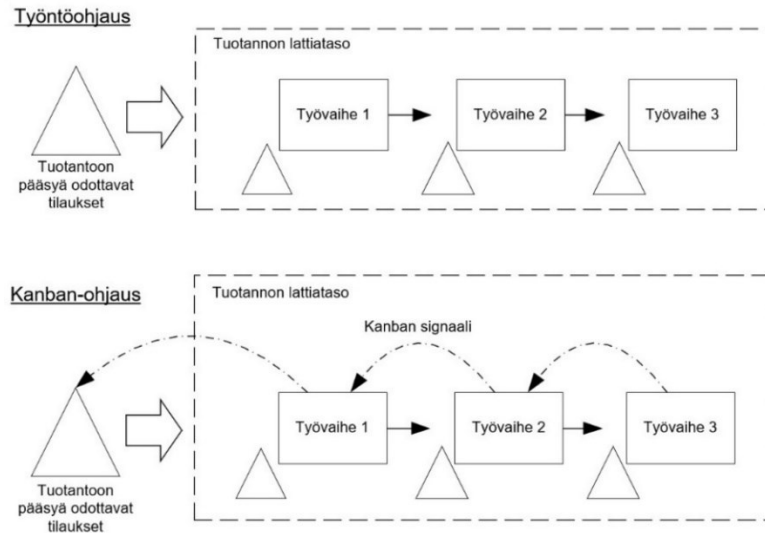
Imuohjauksessa kontrolloinnin kohteena on keskeneräisen tuotannon eli WIP:n määrä. Imuohjauksessa käytettävä systeemiin sisään syötettävien panosten eli WIP:n kontrollointi on huomattavasti helpompaa kuin työntöohjauksessa käytettävä prosessin ulostulon kontrollointi. Tämän vuoksi imuohjauksella pystytään hallitsemaan huomattavasti paremmin tuotannon eri työvaiheiden läpimenoaikoja ja niissä esiintyvää vaihtelua kuin työntöohjauksella. (Bechte, 1988; Spearman & Zazanis, 1992)

Systeeminäkökulmasta tarkasteltuna työntöohjatun tuotannon voidaan ajatella olevan tyypiltään avoin systeemi, kun taas imuohjattu tuotanto on tyypiltään suljettu systeemi. Käytännössä tuotannonohjausmenetelmät kuitenkin harvoin ovat 100 % puhtaasti työntö- tai imuohjaukseen perustuvia, vaan useimmiten niissä on sekä imu- että työntöohjauksen piirteitä, vaikka pääpaino olisikin toisessa näistä periaatteista. (Hopp & Spearman, 2004; Stevenson *et al.*, 2005)

Yrityksen tarpeisiin sopivimman tuotannonohjausmenetelmän tyyppi riippuu pitkälti siitä, minkälaista tuotantotilannetta pitää yrittää ohjata (Bertrand & Muntslag, 1993). Esimerkiksi MTS-tyyppinen varasto-ohjautuva tuotanto vaatii usein täysin erilaisen tuotannonohjausmenetelmän kuin ETO-tyyppinen asiakasohjautuva tuotanto. Imuohjauksen on todettu soveltuvan hyvin MTO- ja ETO-tyyppisen tuotannon ohjaamiseen, kun taas työntöohjaus soveltuu erityisen hyvin varasto-ohjautuvan MTS-tyyppisen tuotannon ohjaamiseen. (Adrodegari *et al.*, 2015; García *et al.*, 2020) Imuohjauksen etujen, kuten tuotannon paremman hallittavuuden sekä lyhyempien ja ennustettavampien läpimenoaikojen vuoksi tämän tutkimuksen teoreettisessa tarkastelussa keskitytään tästä eteenpäin erilaisiin imuohjausta hyödyntäviin tuotannonohjausmenetelmiin.

2.6.3 Imuohjaukseen perustuvia tuotannonohjausmenetelmiä

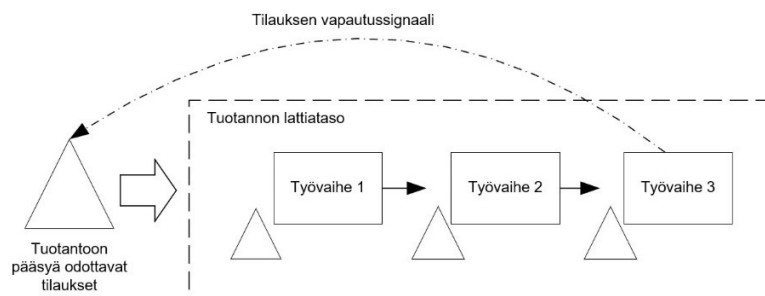
Yksi tunnetuimpia imuohjaukseen perustuvia tuotannonohjausmenetelmiä on Toyotan JIT-tuotannossa (Just in Time) käyttämä kanban-ohjaus, jossa eri työvaiheissa olevaa WIP:n määrää kontrolloidaan kanban-korttien avulla. Kanban-ohjauksessa työ siirtyy seuraavaan työvaiheeseen vasta, kun se on saanut seuraavan työvaiheen kanban-kortin itselleen merkiksi kapasiteetin vapautumisesta. Kanban-ohjauksen ja työntöohjauksen eroa on havainnollistettu kuvassa 10.



Kuva 10. Kanban- ja työntöohjauksen ero, mukailen (Spearman & Zazanis, 1992)

Kuvasta 10 nähdään, että kanban-ohjauksen ja työntöohjauksen merkittävin ero on se, että työntöohjauksessa ei ole tilausten vapautuspäätöksiä tehtäessä käytössä signaaleja, joiden avulla voitaisiin ottaa huomioon tuotannon kuormitus tilanne. Kanban-ohjaus vaatii hyvin toimiakseen vakaan tuotevalikoiman sekä virtaviivaisen tuotannon, jossa asetusajat ovat lyhyitä ja työt ovat mahdollisimman standardisoituja (Monden, 1993). Kanban-ohjausta käytettiin pitkään lähes synonyyminä imuohjaukselle samaan tapaan kuin MRP:n ajateltiin olevan synonyymi työntöohjaukselle (Hopp & Spearman, 2004). Tähän päivään mennessä on kuitenkin ehditty kehitellä monia muitakin imuohjauksen perustuvia tuotannonohjausmenetelmiä (Thürer *et al.*, 2016), eikä Kanban ole enää niin selkeä synonyymi imuohjaukselle kuin aiemmin (Hopp & Spearman, 2004).

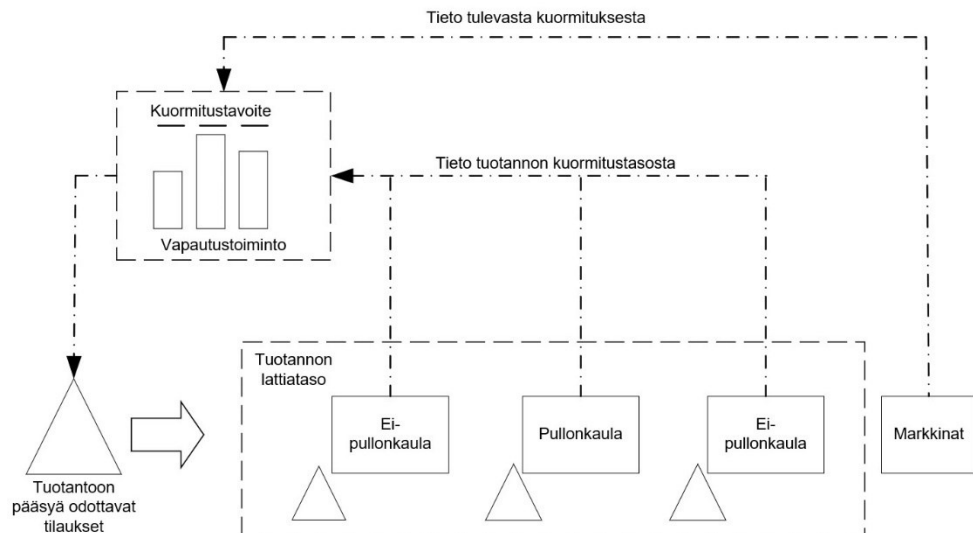
Spearman *et al.*, (1990) mukaan kanban-ohjausta on haastavaa soveltaa tuotantoon, jossa esiintyy paljon vaihtelua ja jonka työvaiheet eivät ole kovin pitkälle standardisoituja. He esittivätkin yhdeksi kanban-ohjauksen vaihtoehdoksi kuvassa 11 esitettyä CONWIP-tyyppistä (*Constant Work In Progress*) ohjausta, joka toimii myös imuperiaatteella, mutta siinä kontrolloinnin kohteena on systemissä sisällä olevan kokonais- WIP:n määrä.



Kuva 11. CONWIP-menetelmän periaate, mukailen (Spearman *et al.*, 1990).

CONWIP-menetelmällä ohjatussa tuotantosysteemissä on tietty vakiomäärä ohjaukortteja, jotka kiinnitetään tuotantolinjalla kulkeviin tuotteisiin, ja kun tuote tulee valmiiksi ohjaukortti palautetaan tuotantoprosessin viimeiseltä työvaiheelta ensimmäiselle työvaiheelle (Framinan *et al.*, 2003). Uusi tilaus voidaan siis vapauttaa tuotantoon vasta, kun jokin edellisistä on saatu kokonaan valmiiksi tuotannosta. CONWIP-menetelmä on periaatteeltaan hyvin yksinkertainen ja sen avulla päästään käsiksi imuohjauksen etuihin, kuten lyhyempiin läpimenoaikoihin ja pienempiin varastotasoihin. CONWIP-menetelmä soveltuu käytettäväksi myös vähemmän standardisoituihin tuotantoympäristöihin, joissa tuotteiden ja työvaiheiden välillä esiintyy enemmän vaihtelua. (Spearman *et al.*, 1990)

Osa tutkijoista on maininnut CONWIP-menetelmän yhdeksi heikkoudeksi sen, että se ottaa huomioon vain systeemissä sisällä olevan kokonais- WIP:n määrän eikä juurikaan yksittäisten työvaiheiden kuormitustilannetta (Jaegler *et al.*, 2018). Yksittäisten työvaiheiden kuormituksen huomioon ottamiseen on kuitenkin kehitetty useita muita tuotannonohjausmenetelmiä, jotka kulkevat yleensä yläkäsitteen WLC (*Work Load Control*) alla (Thürer *et al.*, 2011). WLC-periaatetta hyödyntävät tuotannonohjausmenetelmät perustuvat imuohjaukseen ja niissä tilauksen vapautuspäätös tehdään yksittäisten työvaiheiden tai työvaihekokonaisuuksien kuormituksen perusteella (Bechte, 1988; Kingsman & Hendry, 2002). Yksi esimerkki WLC:hen perustuvasta tuotannonohjausmenetelmästä on Thürer *et al.* (2012) kehittämä LUMS COR -menetelmä (*Lancaster University Management School Corrected Order Release*), jonka periaate on esitetty kuvassa 12.

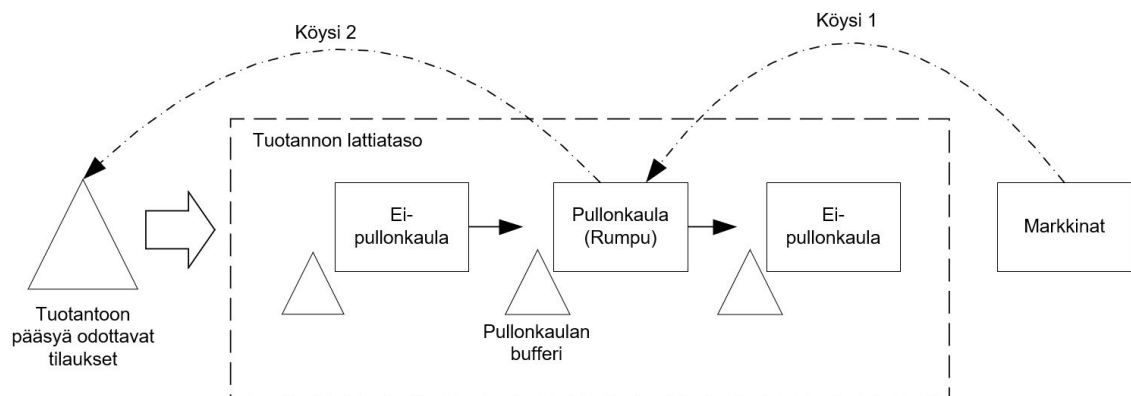


Kuva 12. LUMS COR -menetelmän periaate, mukailen (Thürer *et al.*, 2017).

LUMS COR -menetelmässä tilaukset vapautetaan tuotantoon yksittäisten työvaiheiden kuormitustason perusteella (Thürer *et al.*, 2012). Thürer *et al.* (2012) tekemien simulointien perusteella LUMS COR -menetelmän todettiin olevan yksi parhaista WLC-periaat-

teeseen perustuvista tuotannonohjausmenetelmistä ja se soveltuu erityisesti MTO-tyyppiseen asiakasohjautuvaan tuotantoon, jossa esiintyy paljon vaihtelua. LUMS COR -menetelmän heikkoudeksi voidaan kuitenkin mainita, että se on huomattavasti monimutkaisempi ja vaativampi käyttää, kuin esimerkiksi systeemin kokonais- WIP:iä rajoittava yksinkertainen CONWIP-menetelmä.

Edellä mainittujen tuotannonohjausmenetelmien lisäksi on myös olemassa DBR (*Drum Buffer Rope*) nimellä kulkeva tuotannonohjausmenetelmä, jossa tuotannon pullonkaulan eli rajoitteen käyttöaste pyritään maksimoimaan suunnittelemalla tuotantoaikataulu pullonkaulan kapasiteetin perusteella (Thürer *et al.*, 2017). DBR-tuotannonohjausmenetelmä hyödyntää imuohjausta ja siinä tilausten vapautukseen liittyvät päätökset tehdään prosessin pullonkaulan suorituskyvyn mukaan (Ronen & Schragenheim, 1990). DBR-menetelmän periaate on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. DBR-menetelmän periaate, mukailen (Thürer & Stevensson, 2018).

DBR-menetelmässä rumpu (*Drum*) on systeemin suorituskykyä rajoittava resurssi eli pullonkaula, jonka tuotantotahti määrittää koko tuotantosysteemin tuotantotahdin. Bufferilla (*Buffer*) tarkoitetaan tässä yhteydessä ennen pullonkaulaa olevaa varastobufferia, jonka tehtävänä on suojata pullonkaulaa vaihtelun aiheuttamilta häiriöiltä ja tuotantokatkoilta. Bufferin tavoitteena on siis varmistaa, että pullonkaulan käyttöaste pysyy mahdollisimman korkealla tasolla. (Ronen & Schragenheim, 1990; Gilland, 2002)

Köyden (*Rope*) tehtävänä on toimia linkkinä tuotantoa edeltävän varaston ja systeemin pullonkaulan (*Drum*) välillä. Kun pullonkaula saa yhden tilauksen valmiiksi, köysi "vetää" uuden tilauksen tuotantoon. (Ronen & Schragenheim, 1990; Gilland, 2002) Se, mikä tilaus vapautetaan seuraavaksi perustuu markkinoiden kysynnän mukaisesti määriteltyyn pullonkaulan tuotantoaikatauluun (Thürer & Stevenson, 2018). DBR:n voidaankin käytännössä sanoa olevan hybridiohjausmenetelmä, jossa pullonkaulaa edeltäviä työvaiheita ohjataan imuperiaatteella ja pullonkaulan jälkeisiä vaiheita työntöperiaatteella (Stevenson *et al.*, 2005).

DBR-menetelmän yhtenä päätavoitteena on lyhentää tuotannon läpimenoaikoja sekä tehdä tuotannosta paremmin hallittavaa maksimoimalla tuotannon pullonkaulan käyttöaste (Fry *et al.*, 1991). DBR-menetelmän käyttö helpottaa tuotannossa esiintyvän vaihtelun hallintaa ja mahdollistaa verrattain lyhyet ja ennustettavat läpimenoajat (Gupta & Snyder, 2009). Fry *et al.* (1991) huomauttivat, että perinteiset tuotannon käyttöasteeseen perustuvat suorituskykymittarit ovat ristiriidassa DBR-menetelmän tavoitteiden eli pienempien varastotasojen ja lyhyempien läpimenoaikojen kanssa. Suorituskyvyn mittaamisessa huomio tulisikin kiinnittää käyttöasteen sijaan tuotannon WIP-tasojen ja läpimenoaikojen mittaamiseen (Fry *et al.*, 1991).

Thürer *et al.* (2017) vertailivat tutkimuksessaan simulointia hyödyntäen WLC-menetelmän ja DBR-menetelmän soveltuvuutta korkean vaihtelun tuotantoon, jossa on pullonkaula. Lopputuloksena DBR:n todettiin olevan parempi vaihtoehto, jos tuotannon pullonkaula on merkittävä, kun taas WLC:n kanssa saatiin parempia tuloksia tuotannon pullonkaulan ollessa vähemmän merkittävä (Thürer *et al.*, 2017). Gilland (2002) taas vertaili simulointitutkimuksessaan CONWIP- ja DBR-menetelmiä keskenään ja havaitsi Thürer *et al.* (2017) tapaan DBR:n soveltuvan CONWIP:iä paremmin korkean vaihtelun tuotantoon, jossa on yksi merkittävä pullonkaula. Samankaltaisia tuloksia saatiin, kun DBR:ää ja MRP:tä vertailtiin keskenään (Gupta & Snyder, 2009). Toisaalta Miltenburg (1997) ja Steele *et al.* (2005) havaitsivat, että myös perinteistä MRP:tä voidaan kehittää huomattavasti ottamalla käyttöön joitakin DBR:lle ominaisia piirteitä, jolloin koko tuotannonohjausmenetelmää ei välttämättä tarvitse muuttaa.

2.6.4 Tuotantojärjestys ja priorisointisäännöt

Tuotannonohjauksen yhtenä tehtävänä on määritellä, missä järjestyksessä tilaukset lopulta tullaan valmistamaan tuotannossa (Lödding, 2013). Tuotantojärjestyksellä on todettu olevan vaikutusta tuotannon sujuvuuteen ja tuotannon läpimenoajoissa esiintyvään vaihteluun (Ahmed & Fisher, 1992; Melnyk *et al.*, 1992).

Erilaiset tuotannon keskeyttävät häiriöt, kuten konerikot, laatuongelmat ja komponenttien myöhästymiset aiheuttavat usein myös tarpeen muuttaa tuotantojärjestystä ja priorisoida tilauksia kesken tuotannon (Lödding, 2012). Mitä enemmän tuotannossa esiintyy vaihtelua, sitä suurempi merkitys tuotannonaikaisilla priorisoinneilla on tuotannon suorituskykyyn (Melnyk *et al.*, 1992). Toisaalta tilausten priorisointitarve ja priorisoinnin merkitys muuttuu sitä pienemmäksi, mitä vähemmän tuotannossa on keskeneräistä työtä, jota pitää priorisoida. Priorisointisääntöjen onkin todettu lopulta vain voivan kompensoida tuotannonsuunnittelun ja -ohjauksen aikaisemmissa vaiheissa tehtyjä virheitä. (Lödding, 2013).

Tuotantojärjestyksen määrittelystä haastavaa tekee se, että teoriassa on olemassa $n!$ tapaa määrittellä n tilauksen tuotantojärjestys (Rajendran & Holthaus, 1999). Tuotantojärjestyksen määrittelyä helpottamaan onkin luotu erilaisia priorisointisääntöjä, joilla jokaisella on omat hyvät ja huonot puolensa. Priorisointisääntöjen valintaan vaikuttaakin pitkälti, se minkälaisia tavoitteita yritys on tuotannolleen asettanut. (Lödding, 2013)

Rajendranin & Holthausin (1999) mukaan priorisointisäännöt voidaan jakaa viiteen kategoriaan: (1) säännöt, jotka ottavat huomioon tuotannon prosessointiajat, (2) säännöt, jotka huomioivat sovitun toimituspäivän, (3) yksinkertaiset säännöt, jotka eivät huomioi prosessointiaikoja eikä sovitun toimituspäiviä, (4) säännöt, jotka ottavat huomioon nykyisen tuotantotilanteen ja (5) säännöt, jotka ottavat huomioon kaksi tai useampaa edellä mainituista asioista. Taulukossa 2 on esitetty yksi yleisesti käytetty sääntö kustakin edellä mainitusta kategoriasta.

Taulukko 2. Esimerkkejä tuotannon priorisointisäännöistä.

Sääntö	Lyhenne	Kategoria
Shortest Processing Time	SPT	(1)
Earliest Due Date	EDD	(2)
First In First Out	FIFO	(3)
Work In Next Queue first	WINQ	(4)
Least Slack Time	LST	(5)

SPT-säännössä seuraavaksi työksi valitaan se työ, jonka prosessointiaika on lyhyin. SPT-säännön on todettu olevan paras priorisointisääntö tuotannon keskimääräisen läpimenoajan lyhentämisessä. (Baker, 1984; Kaban *et al.*, 2012)

FIFO-säännön periaatteena on, että työt valmistetaan siinä järjestyksessä kuin ne ovat työasemalle saapuneet. Säännön avulla saadaan ylläpidettyä luonnollinen alkuperäisessä tuotantosuunnitelmassa määritelty tuotantojärjestys. FIFO-sääntöä hyödyntämällä tuotannon läpimenoaikojen vaihtelu saadaan yleensä myös pidettyä matalammalla tasolla kuin muita sääntöjä käyttämällä. (Rajendran & Holthaus, 1999; Nyhuis & Wiendahl, 2009)

EDD-säännössä seuraavaksi valmistettavaksi työksi valitaan se työ, jonka sovitun toimituspäivään on vähiten aikaa. EDD-sääntö on myös yksinkertainen käyttää ja sen avulla on mahdollista minimoida tuotannon myöhästymiset. (Rajendran & Holthaus, 1999)

LST-säännössä seuraavaksi valmistettavaksi työksi valitaan se työ, jonka sovitun toimituspäivän, nykyhetken ja jäljellä olevan läpimenoajan erotus on pienin. Pieni LST-arvo tarkoittaa, että työ on jäljessä tavoiteajastaan, kun taas suuri LST-arvo kertoo, että työ

on tavoiteaikaansa edellä. LST-säännön dynaamisuuden vuoksi se aiheuttaa yleensä monia muutoksia tuotantojärjestykseen, minkä seurauksena todellinen tuotantojärjestys saattaa erota usein huomattavasti suunnitellusta järjestyksestä. (Lödding, 2013)

Mikään yksittäinen sääntö ei toimi yhtä hyvin kaikissa mahdollisissa tilanteissa. On kuitenkin huomattu, että prosessointiajan huomioivat säännöt toimivat erityisen hyvin tilanteissa, joissa tuotannon kuormitus tilanne on korkea ja tuotantoaikataulut tiukkoja ja vastaavasti sovitut toimituspäivät huomioivat säännöt toimivat paremmin tilanteissa, joissa tuotannon kuormitus tilanne on matalampi ja toimitusvarmuus erityisen tärkeä mittari. (Blackstone *et al.*, 1982; Baker, 1984)

2.6.5 Kapasiteetin hallinta

Kapasiteetin hallinnan tehtävänä on säätää tuotannon kapasiteetti siten, että tuotannon toteutuneet tuotokset vastaavat suunniteltuja tuotoksia. Haastavaa kapasiteetin hallinnasta tekevät erilaiset häiriöt, muutokset ja keskeytykset eli vaihtelu, jota tuotanto joutuu tavalla tai toisella aina kohtaamaan. (Lödding, 2013) Jos tuotannossa ei esiintyisi lainkaan vaihtelua, olisi kapasiteetin hallinta äärimmäisen helppoa (Pound *et al.*, 2014).

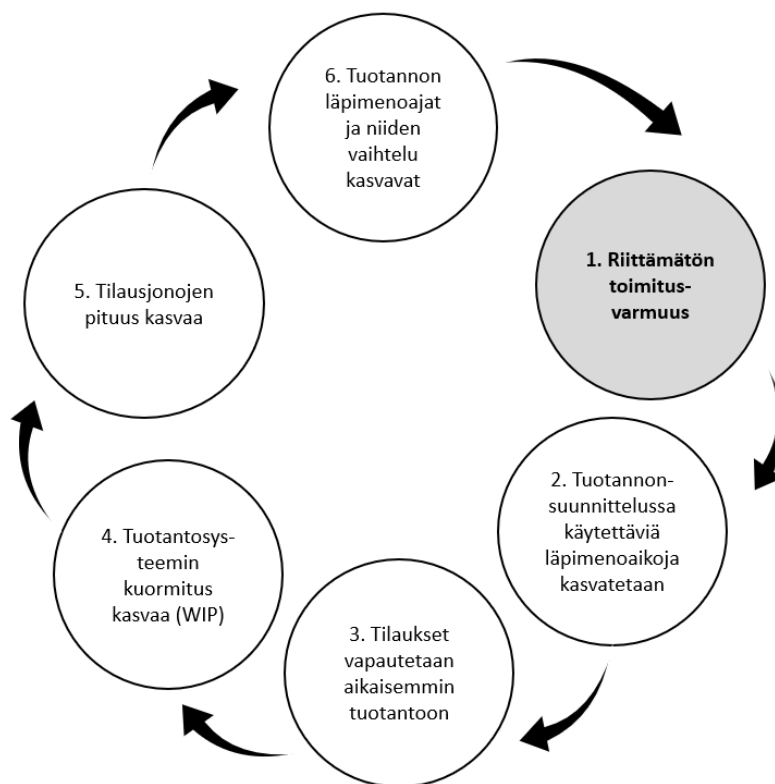
Yleisiä lyhyen aikavälin kapasiteetin säätökeinoja ovat olemassa olevien resurssien uudelleen allokointi sekä ylitöiden teettäminen (Lödding, 2013; Carvalho *et al.*, 2016). Tuotannon joustavuus tekee kapasiteetin hallinnasta huomattavasti helpompaa ja on avainasemassa, jotta vastaantuleviin muutoksiin ja häiriöihin pystyttäisiin reagoimaan mahdollisimman tehokkaasti (Lödding, 2012).

D'Souza & Williams (2000) jakavat tuotannon joustavuuden ulkoiseen ja sisäiseen joustavuuteen. Ulkoiseen joustavuuteen kuuluvat volyymin joustavuus eli kyky muuttaa tarpeen vaatiessa nopeasti tuotantoprosessin tuotantomääriä sekä valikoiman joustavuus eli kyky valmistaa monia erilaisia tuotteita. Sisäiseen joustavuuteen kuuluvat prosessin joustavuus eli kyky mukautua vastaan tuleviin muutoksiin ja häiriöihin sekä materiaalin käsittelyn joustavuus eli kyky käsitellä joustavasti erilaisia materiaaleja. (D'Souza & Williams, 2000) Henkilöstön monitaitoisuuden on todettu olevan prosessin joustavuuden näkökulmasta kriittisessä roolissa varsinkin, kun kyseessä on vaativa käsin tehtävä manuaalinen kokoonpanotyö (Heilala & Voho, 2001), jollaista myöskin ETO-tyyppinen kokoonpano usein on.

2.6.6 Inhimilliset tekijät ja tuotannonohjaus

Inhimillisillä tekijöillä on havaittu olevan suuri rooli tuotannosuunnittelun ja -ohjauksen onnistumisessa (Selçuk *et al.*, 2006; Wiendahl *et al.*, 2006; Bendul & Knollmann, 2016; Bendul, 2019). Esimerkiksi, jos tuotannon läpimenoaikatavoitteet ylittyvät ja toimitukset myöhästyvät, niin tyypillinen reaktio on pidentää tuotannosuunnittelussa käytettäviä laskennallisia läpimenoaikoja (Bendul & Knollmann, 2016). Tämä saattaa kuitenkin käynnistää kuvassa 14 esitetyn tuotannon läpimenoaikoja entisestään pidentävän tuotannonohjauksen noidankehäksi (*LTS, Lead Time Syndrome*) kutsutun ilmiön (Mather & Plossl, 1978; Wiendahl *et al.*, 2005).

Noidankehä alkaa, kun heikon toimitusvarmuuden seurauksena tuotannosuunnittelussa käytettäviä läpimenoaikoja kasvatetaan, mikä aiheuttaa sen, että tilaukset pitää jatkossa vapauttaa tuotantoon aikaisemmin kuin ennen. Aikaisemman tuotannon aloituksen myötä tuotannossa oleva keskeneräisen työn (WIP) määrä lisääntyy, minkä seurauksena tuotannon todellinen läpimenoaika kasvaa ja toimitusvarmuus heikkenee entisestään. Tällöin on palattu noidankehän lähtöpisteeseen ja tuotannosuunnittelussa käytettäviä läpimenoaikoja pitää jälleen kasvattaa. (Wiendahl *et al.*, 2005; Selçuk *et al.*, 2006)



Kuva 14. Tuotannonohjauksen noidankehä, mukailten (Wiendahl *et al.*, 2005).

Tuotannonohjauksen noidankehä on hyvä esimerkki itseään vahvistavasta organisatiolle haitallisesta palautesilmukasta, joista jo Senge (1990) kirjassaan varoitti. Kahnemanin (2003) mukaan syynä tuotannonohjauksen noidankehä -tyyppisen ilmiön syntymiselle ovat ihmisten mielessä olevat kognitiiviset vinoumat, jotka saavat ihmiset tekemään usein systemaattisesti vääriä päätöksiä monimutkaisissa ja epävarmoissa tilanteissa.

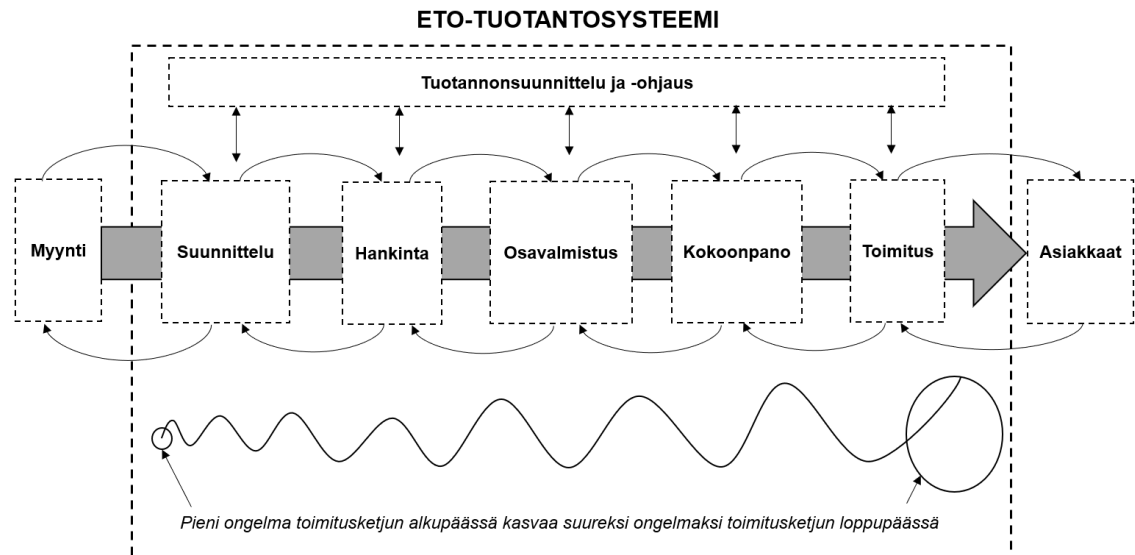
Tuotannonohjauksen noidankehä on todennäköisesti kuitenkin vain yksi monista mahdollisista tuotantosysteemin suorituskykyyn negatiivisesti vaikuttavista noidankehistä (Akkermans *et al.*, 1999). Tuotantosysteemissä piilevät haitalliset noidankehät olisikin hyvä pyrkiä tunnistamaan mahdollisimman hyvissä ajoin ennen, kuin niiden aiheuttamat ongelmat ovat päässeet kasvamaan liian suuriksi. Noidankehien tunnistamiseksi asioita voisikin olla hyvä pyrkiä tarkastelemaan systeemiajattelun tapaan yksittäisten havaintojen sijaan laajempaa kokonaisuutena.

2.7 Yhteenveto teoriasta

Vaihtelua esiintyy aina ja kaikissa prosesseissa ja vaihtelu heikentää lähes aina prosessien suorituskykyä ja tehokkuutta (Shewhart, 1931; Deming, 1986; Snee, 1990; Slack *et al.*, 2013; Pound *et al.*, 2014). ETO-tyyppisessä tuotannossa jokainen toimitusketjun vaihe (mm. suunnittelu, osto, osavalmistus, kokoonpano, lähetys) toimii asiakasohjautuvasti, mikä tarkoittaa, että ennen tilauksen saamista ei voida vielä tietää minkälainen tuote pitäisi valmistaa. Suuri epävarmuuden ja vaihtelun määrä tekevätkin ETO-tyyppisestä asiakasohjautuvasta tuotannosta yhden selvästi haastavimmista tuotantomuodoista.

Jotta ETO-tyyppisessä tuotannossa esiintyvää vaihtelua voitaisiin paremmin ymmärtää, niin ETO-tuotantoa tulee tarkastella laajempaa tuotantosysteeminä, jossa usealla eri palasella on jokin yhteinen päämäärä. Tuotantoyrityksessä tämä päämäärä on yleensä laadukkaiden tuotteiden toimittaminen sovittuun aikaan asiakkaalle. Systeeminäkökulmasta tarkasteltuna jokaisen ETO-tuotannon vaiheen voidaan nähdä olevan keskinäisriippuvuudessa toistensa kanssa, ja jokaisen eri vaiheen välillä on joko vaihtelua tasapainottava tai vaihtelua voimistava palautesilmukka.

Kuvassa 15 on esitetty kirjallisuuskatsauksen perusteella tehty hahmotelma ETO-tyyppisestä tuotantosysteemistä. Kuvan selkeyttämisen vuoksi palautesilmukka on piirretty vain peräkkäisten vaiheiden välille, vaikka todellisuudessa jokaisen vaiheen välillä vaikuttaa jonkinlainen palautesilmukka.



Kuva 15. ETO-tyyppinen tuotantosysteemi.

Kuvasta 15 voidaan havaita, että ETO-tyyppisessä tuotantosysteemissä on tyypillistä, että pieni muutos tai ongelma toimitusketjun alkupään vaiheissa, kuten suunnittelussa saattaa aiheuttaa suuren vaikutuksen loppupään vaiheiden, kuten kokoonpanon suorituskykyyn. Toisaalta varsinkin ETO-tyyppisessä monimutkaisessa tuotantosysteemissä vaihtelun todellisenä aiheuttajana ei useinkaan ole mitään selkeää yksittäistä syytä, vaan taustalla on monia eri syitä, jotka keskinäisriippuvuuksien myötä ovat yhdessä ajan mittaan aiheuttaneet myöhemmin havaitun vaihtelun.

Organisaation oppimiskyvykyys ja kyky ymmärtää eri asioiden välisiä riippuvuussuhteita nousevatkin pitkällä tähtäimellä vaihtelun vähentämisen näkökulmasta aivan keskeiseen rooliin. Paremman ymmärryksen myötä yritys pystyy kohdistamaan kehitystoimenpiteet sinne, missä niistä on vaihtelun vähentämisen kannalta eniten hyötyä. Kirjallisuuskatsauksen perusteella huomio olisi vaihtelun vähentämisen näkökulmasta hyvä kiinnittää erityisesti ETO-tuotannon alkupään vaiheisiin, kuten suunnitteluun ja hankintaan.

Toisaalta asiakaskohtainen räätälöinti on monen ETO-periaatteella toimivan yrityksen yksi keskeisimmistä kilpailukeinoista, minkä vuoksi asiakaskohtaisen räätälöinnin vähentäminen ja tuotteiden liian pitkälle menevä standardisointi saattavat heikentää ETO-yri-tysten kilpailukykyä. Tämän vuoksi keskeiseksi menestystekijäksi ETO-tyyppisessä tuotannossa nousee se, **miten suuren vaihtelun määrän kanssa pystytään tulemaan toimeen eli miten vaihtelua hallitaan.**

Vaihtelun hallinnan näkökulmasta tuotannonsuunnittelu ja -ohjaus ovat avainroolissa. Tuotannonsuunnittelun yhtenä keskeisenä tehtävänä on määrittää mikä on paras määrä ja yhdistelmä kolmea keskeistä bufferityyppiä (aika, varasto ja kapasiteetti), joiden avulla

vaihtelun vaikutuksilta suojaudutaan, kun taas tuotannonohjauksen tehtävänä on ohjata tuotantoa siten, että tuotanto pysyy mahdollisista häiriöistäkin (vaihtelu) huolimatta tuotantosuunnitelmassa ja pääsee sille asetettuihin tavoitteisiinsa. Kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan todeta, että hyödyntämällä tuotannonohjauksessa imuohjausta eli rajoittamalla systeemiin sisään syötettävien uusien töiden määrää, on mahdollista vähentää tuotannossa esiintyvää vaihtelua ja tämän myötä parantaa tuotannon hallittavuutta. Imuohjauksella olisi näin ollen suuri hyödyntämispotentiaali myös ETO-tyyppisen tuotannon ohjaamisessa.

3. AINEISTO JA MENETELMÄT

3.1 Arkistomateriaalit

Arkistomateriaalina tässä tutkimuksessa toimii kohdeyrityksen toiminnanohjausjärjestelmästä (*ERP, Enterprise Resource Planning*) ja tuotannonohjausjärjestelmästä (*MES, Manufacturing Execution System*) saatava kokoonpanon suorituskykydata sekä yrityksen intranetistä löytyvä tuotantosuunnitelma. MES-järjestelmästä kerättyjä tietoja ovat kokoonpanon kokonaisläpimenoaika, yksittäisten työvaiheiden läpimenoajat sekä kokoonpanon aikaiset keskeytykset. ERP-järjestelmästä kerättiin tietoja projektien toteutuneista kustannuksista, aikatauluista ja komponenttien saapumisajoista. Tavoitteena on kerättyjen arkistomateriaalien avulla saada muodostettua yleiskuva kokoonpanon tämänhetkisestä suorituskyvystä ja kokoonpanossa esiintyvistä vaihtelusta.

ERP:stä, MES:stä ja Intranetistä kerätty tutkimusaineisto on ajanjaksolta 1.11.2019–31.12.2020. Aineistonkeruun aloitusajankohdaksi valittiin 1.11.2019, koska kokoonpanossa siirryttiin tällöin työskentelemään kahdesta vuorosta yhteen vuoroon. Tavoitteena on tarkastella yhteen vuoroon siirtymisen jälkeen kokoonpanossa aloitettuja laitteita, jotka ovat valmistuneet kokoonpanosta aikavälillä 1.11.2019–31.12.2020. Otannan pitäisi olla kyseisellä ajanjaksolla varsinkin peruslaitteiden osalta riittävän suuri, jotta datasta voidaan tehdä päätelmiä kohdeyrityksen kokoonpanon nykyisestä suorituskyvystä. Arkistomateriaalien analysoimisessa hyödynnettiin Microsoft Exceliä sekä Minitab-ohjelmistoa.

Datan laadun arviointi

Yrityksen kokoonpanossa käytössä oleva MES-järjestelmä on yrityksen itsensä kehittämä eli kyseessä ei ole kaupallinen MES-järjestelmä. MES-järjestelmää on vuosien varrella kehitetty vastaamaan paremmin kohdeyrityksen sen hetkisiä tarpeita ja se sisältää nykyään monia kaupallisissakin MES-järjestelmissä olevia ominaisuuksia. Viimeisin suurempi MES-järjestelmän päivitys tehtiin vuonna 2017 ja päivityksen myötä MES-järjestelmän tietokantaan alettiin kerätä kokoonpanon kokonaisläpimenoaikojen lisäksi myös yksittäisten työvaiheiden toteutuneita läpimenoaikoja. Yksittäisten työvaiheiden läpimenoaikojen seuranta varten ei kuitenkaan ollut luotu vielä tämän tutkimuksen aloitukseen mennessä visuaalista näkymää, josta läpimenoaikoja voisi helposti tarkastella.

MES-järjestelmästä saatavat tiedot kokoonpanon kokonaisläpimenoajoista ovat tarkkoja, mutta sen sijaan yksittäisten työvaiheiden läpimenoajat ovat vain suuntaa antavia,

koska ne muodostuvat kokoonpanon työntekijöiden MES-järjestelmään tekemien aika-kirjausten perusteella. Työntekijöiden aikakirjaukset eivät aina ole täysin tarkkoja, mikä voidaan havaita esimerkiksi vertaamalla MES-järjestelmässä olevaa laitteen sijaintitietoa laitteen todelliseen fyysiseen sijaintiin tuotannon lattialla. Työntekijöiden MES-järjestelmään tekemien kirjausten tarkkuus on kuitenkin parantunut merkittävästi siitä, kun viimeisin MES-järjestelmän päivitys otettiin käyttöön 2017 alussa. Tarkkuusvirheistä huolimatta MES-järjestelmän yksittäisten työvaiheiden läpimenoaikoja koskevia kirjauksia hyödyntämällä on mahdollista muodostaa jonkinlainen yleiskuva siitä, mistä eri osista kokoonpanon kokonaisläpimenoaika muodostuu ja miten työvaiheet etenevät suhteessa toisiinsa.

MES-järjestelmästä kerättiin myös tietoja kokoonpanon keskeyttäneistä häiriöistä ja niiden kestoista. Kokoonpanossa on sääntönä, että jos kokoonpanon keskeyttävän häiriön pituus on yli 4 tuntia, niin laite siirretään erilliselle keskeytysosastolle. Keskeytettyä laitetta ei kuitenkaan yleensä siirretä fyysisesti tehtaan lattialla mihinkään, vaan siirto tapahtuu ainoastaan muuttamalla laitteen status MES-järjestelmästä keskeytetyksi. Keskeytyksen tarkemmat syytiedot kirjataan myöhemmin laatuinsinöörin toimesta MES-järjestelmään. Tiedot keskeytyksen aiheuttajista ja syistä ovatkin suhteellisen tarkkoja ja luotettavia, koska niiden paikkansapitävyydestä vastaa erillinen henkilö, jonka päivittäisiin tehtäviin keskeytystilaston ylläpito kuuluu.

Keskeytysten kestot sen sijaan muodostuvat kokoonpanon työntekijöiden tekemien MES-kirjausten perusteella. Keskeytys alkaa, kun laite on siirretty keskeytysosastolle ja loppuu kun se on siirretty keskeytysosastolta takaisin kokoonpanoon. Laitetta ei aina muisteta siirtää välittömästi keskeytyksen alettua keskeytysosastolle, minkä vuoksi keskeytysten kestot eivät ole täysin tarkkoja. Toisaalta sama tapahtuu myös toisinpäin, eli keskeytettyjä laitteita ei myöskään aina muisteta siirtää välittömästi keskeytyksen päätyttyä keskeytysosastolta takaisin kokoonpanoon. Keskeytysten kestoja tutkimalla voidaan samaan tapaan kuin yksittäisten työvaiheiden läpimenoaikoja tutkimalla muodostaa yleiskuva siitä, minkä pituisia ja tyyppisiä keskeytyksiä kokoonpanossa yleensä esiintyy.

Projektin kokoonpanon aikaisia kustannuksia seurataan siten, että kokoonpanon työntekijät kirjaavat projektin kokoonpanoon käytetyt työtunnit MES-järjestelmään, josta tiedot lopulta siirtyvät ERP-järjestelmään. Tuntikirjausten tarkkuus on huomattavasti parempi kuin yksittäisten työvaiheiden läpimenoaikoja koskevat kirjaukset. Työtuntien siirrossa MES-järjestelmästä ERP-järjestelmään esiintyy kuitenkin välillä häiriöitä, minkä vuoksi

kaikki syötetyt työtunnit eivät aina siirry onnistuneesti ERP-järjestelmään. Tutkimusaineiston keruuajanjaksolla häiriöiden osuus kaikista syötetyistä työtunneista oli noin 2 % prosenttia.

3.2 Haastattelut

Haastattelumenetelmänä tässä tutkimuksessa käytettiin puolistrukturoitua teemahaastattelua. Puolistrukturoidussa teemahaastattelussa haastattelukysymysten aihepiirit eli teemat ovat yleensä tiedossa, mutta kysymysten järjestys ja tarkat muodot ovat vielä avoimia (Hirsjärvi *et al.*, 2009). Teemahaastattelun aihepiirit voivat myös vaihdella haastattelujen välillä. Puolistrukturoidut teemahaastattelut ovat yleisiä erityisesti kartoittavissa ja selittävässä laadullisissa tutkimuksissa. (Saunders *et al.*, 2009)

Haastattelujen tavoitteena oli parantaa ymmärrystä kokoonpanon läpimenoaikaan vaihtelua aiheuttavista tekijöistä sekä auttaa muodostamaan käsitys kohdeyrityksessä käytössä olevista tuotannonsuunnittelu- ja ohjausperiaatteista. Haastatteluja suoritettiin yhteensä 4 kappaletta tammi–helmikuun 2021 aikana. Haastateltujen valinta perustui harjintaan ja haastateltavina oli muutamia avainhenkilöitä toimitusketjun eri vaiheista.

Tutkimuksen esiselvitysvaiheessa touko–kesäkuun 2020 aikana järjestettiin lisäksi työpajoja, joihin osallistui kokoonpanoa edeltävien toimitusketjun vaiheiden (myynti, projektin veto, suunnittelu, osto, luokitus) edustajia. Työpajoissa käytyjen keskustelujen tavoitteena oli saada selville, mitä toimitusketjun eri vaiheet kokivat suurimmiksi haasteiksi toimitusprojektien toteuttamisessa.

Työpajat liittyivät laajempaan käynnissä olevaan kehitysprojektiin, minkä vuoksi keskustelua fasilitoi kaksi muuta kohdeyrityksen edustajaa. Tutkija itse toimi keskusteluissa pääasiassa havainnoitsijana ja muistiinpanojen kirjaajana. Työpajoja pidettiin yhteensä 5 kappaletta toukokuu–kesäkuun 2020 aikana. Kaikki työpajat pidettiin etäyhteyden välityksellä ja kuhunkin työpajaan osallistui fasilitoijat ja tutkija mukaan lukien 5–10 henkilöä. Virallisten haastattelujen ja työpajojen lisäksi myös epäviralliset avointa haastattelua muistuttavat spontaanit käytäväkeskustelut ovat toimineet tutkimuksen yhtenä keskeisenä laadullisen aineiston keruumenetelmänä.

3.3 Havainnointi

Haastattelujen ja työpajojen avulla saatiin selville vain se, miten haastateltavat havaitsevat ja kokevat sen mitä ympärillä tapahtuu. Havainnoinnin avulla päästään usein paremmin käsiksi siihen, miten ihmiset ja organisaatiot todellisuudessa toimivat. Havainnoinnin

avulla voidaankin saada selville tietoa, jota haastateltavat eivät halua kertoa suoraan haastattelijalle. (Hirsjärvi *et al.*, 2009)

Yin (2014) jakaa havainnointimenetelmät suoraan havainnointiin ja osallistuvaan havainnointiin. Tämän tutkimuksen havainnointimenetelmänä käytettiin pääasiassa suoraa havainnointia, jossa tutkija on tarkkaillut kohdeyrityksen toimintaa, palaverikäytäntöjä, käytäväkeskusteluja sekä ihmisten toimintaa ja eleitä ilman, että tutkittavat ovat sitä välttämättä sen suuremmin tiedostaneet. Lisäksi käytössä on ollut osallistuva havainnointi, koska tutkija on myös säännöllisesti osallistunut tuotannon viikoittaisiin palavereihin, joiden aikana tutkija on havainnoinnin lisäksi itse osallistunut käytyihin keskusteluihin. Kaiken tutkimuksen aikaisen havainnoinnin tavoitteena on ollut parantaa ymmärrystä kohdeyrityksen kokoonpanon nykytilanteesta sekä tekijöistä, jotka aiheuttavat vaihtelua kokoonpanon läpimenoaikaan.

3.4 Aineiston analysointimenetelmät

Tapaustutkimuksen aineiston analysoimiseen ei ole olemassa mitään selkeitä työkaluja tai ohjeita siitä, miten missäkin tilanteessa tulisi toimia. Tämän vuoksi aineiston analysoinnissa ja päätelmien tekemisessä korostuu tutkijan omat taidot ja ymmärrys tutkittavasta aiheesta (Yin, 2014). Yinin (2014) mukaan tapaustutkimuksen aineiston analysoimisessa voidaan kuitenkin hyödyntää seuraavia viittä tekniikkaa: teorian/mallin vastaavuus, selitysten rakentaminen, aikasarja-analyysi, loogiset mallit ja tapausten välinen synteesi.

Tämän tutkimuksen pääasiallisena analysointitekniikkana käytetään teorian/mallin vastaavuutta. Teorian/mallin vastaavuudessa tavoitteena on löytää tutkimusaineiston ja olemassa olevien teorioiden ja mallien väliltä yhtäläisyyksiä. Aineiston ja teorian väliltä löydetty yhtäläisyydet vahvistavat tutkimuksen validiteettia. (Yin, 2014)

Analysoinnissa käytetään myös loogisten mallien tekniikkaa, joka on periaatteeltaan hyvin samanlainen kuin teorian/mallin vastaavuus. Loogisten mallien tekniikassa tavoitteena on pyrkiä löytämään ilmiöiden ja tapahtumien välillä olevia syy-seurausyhteyksiä (Yin, 2014).

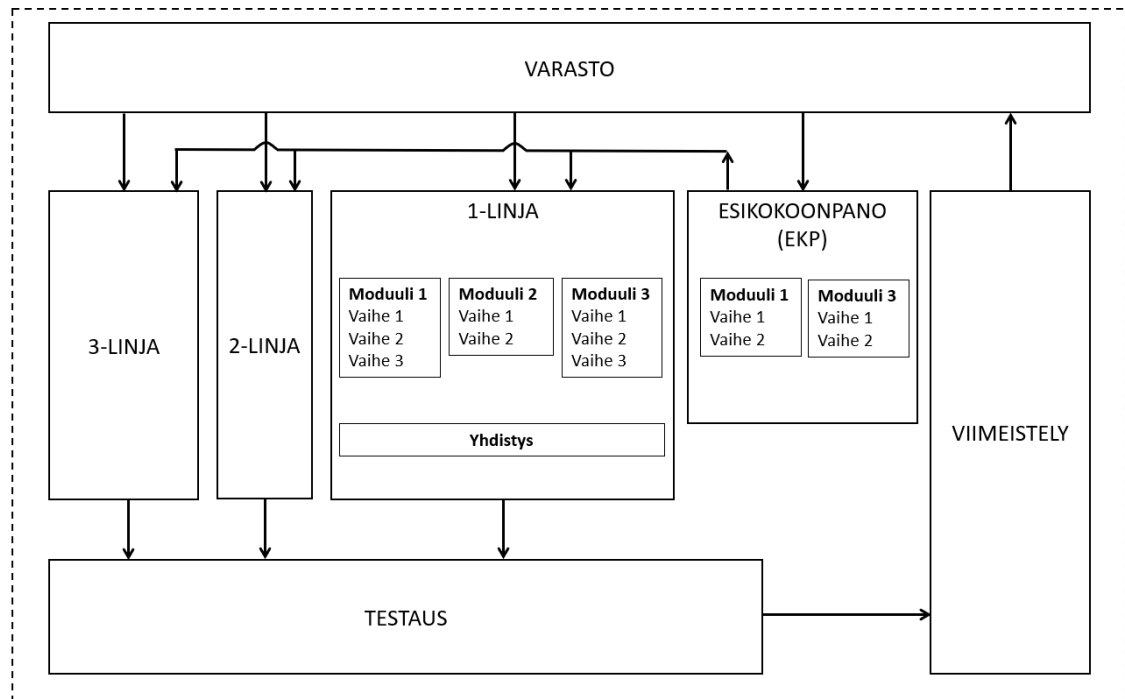
4. TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

4.1 Kohdeyrityksen tuotannon yleiskuvaus

Wilner *et al.* (2016) esittelivät artikkelissaan ETO-yritysten nelikenttämatriisin, jossa pystyakselilla on asiakaskohtaisen räätälöinnin määrä ja vaaka-akselilla tuotantovolyymi. Korkean räätälöintiasteen rajana matriisissa on 2000 tuntia suunnittelua per tuote ja korkean tuotantovolyymien rajana 750 valmistettua tuotetta per vuosi. Kohdeyrityksen tuotantovolyymit ja tuotteiden räätälöintiaste ovat näihin rajoihin nähden kumpikin suhteellisen pieniä, minkä vuoksi kohdeyritys sijoittuu kyseisessä matriisissa vasemman alanurkan perus ETO ruutuun.

Hicks *et al.* (2001) käyttivät ETO-yritysten luokittelussa kriteerinä vertikaalisen integraation määrää eli sitä, kuinka suuren osan toimitusketjun vaiheista yritys on päättänyt pitää itsellään ja kuinka suuren osan vastaavasti ulkoistaa. Hicks *et al.* (2001) jaottelivat yritykset neljään tyyppiin siten, että ykköstyypin yrityksessä vertikaalisen integraation määrä oli suurta ja nelostyyppin yrityksessä vähäistä. Tässä luokittelussa kohdeyritys voitaisiin luokitella kakkostyyppin ETO-yritykseksi, mikä tarkoittaa sitä, että kohdeyritys on päättänyt pitää itsellään projektinhallinnan lisäksi tuotteiden suunnittelun ja loppukokoonpanon, mutta on ulkoistanut osien valmistuksen alihankintaketjulle. Vielä muutamia vuosia sitten kohdeyrityksellä oli itselläänkin jonkin verran osavalmistusta, mutta markkinoiden epävarmuuden ja dynamiikan lisääntyessä kohdeyritys päätti ulkoistaa loputkin osavalmistuksen vaiheet alihankkijoille.

Kohdeyrityksen kokoonpanotilat rakennettiin muutama vuosi sitten käytännössä täysin uusiksi ja kokoonpanon layout päivitettiin sellaiseksi, että tukee mahdollisimman hyvin materiaalien sujuvaa virtausta. Tilojen ja layoutin puolesta kohdeyrityksellä pitäisikin olla erinomaiset edellytykset saavuttaa helposti hallittava ja virtaustehokas kokoonpano. Kohdeyrityksen kokoonpano on jaettu käytettävissä olevan nosturikapasiteetin mukaan kolmeen eri kokoonpanolinjaan (kuva 16). Kokoonpano alkaa aina esikokoonpanosta eli EKP:stä ja jatkuu siitä joko ykkös-, kakkos- tai kolmos- pääkokoonpanolinjan kautta testaukseen ja lopulta viimeistelyyn. EKP ja pääkokoonpanolinjat ovat jaettu laitteen sisältämien kolmen päämoduulin mukaisesti muutamaaan pienempään vaiheeseen. Kokoonpanolla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa kaikkia vaiheita EKP:stä viimeistelyyn.



Kuva 16. Kohdeyrityksen kokoonpanon layout.

Asiakkaan tilauksia kutsutaan projekteiksi ja yhteen projektiin sisältyy lähes aina kaksi laitetta. Samaan projektiin kuuluvat laitteet ovat yleensä keskenään identtisiä ja ne pyritään valmistamaan kokoonpanossa aina tuotantolinjatyyppisesti peräkkäin. Projekti tulee kokoonpanossa valmiiksi vasta sitten, kun molemmat projektiin kuuluvat laitteet ovat valmistuneet. Molempien projektiin kuuluvien laitteiden tulee myös olla pääkokoonpanon osalta valmiina, jotta laitteiden testausvaihe voidaan aloittaa.

Kohdeyrityksen kokoonpanossa tuotteen valmistamiseen tarvittavat komponentit toimitetaan työasemalle kittausperiaatetta hyödyntäen. Kittauksella tarkoitetaan periaatetta, jossa varasto kerää tuotteen valmistamiseen tarvittavat komponentit osaluettelon perusteella yhteen ja toimittaa valmiin kitin kutsusta työasemalle (Caputo & Pelagagge, 2011). Kohdeyrityksessä tavoitteena on, että alihankitut komponentit saapuisivat tehtaalle viimeistään viikko ennen kokoonpanon suunniteltua aloitusta, jotta varasto ehtisi suorittaa komponenttien keräilyn varmasti ajallaan. Hitsaamossa tarvittavat komponentit tulisi olla tehtaalla vähintään 2 viikkoa ennen kokoonpanon aloitusta.

Valtaosa yrityksen valmistamista laitteista kokoonpannaan 1-linjalla. 1-linjalla valmistettavat perustyyppin laitteet ovat hieman standardisoidumpia kuin muilla linjoilla valmistettavat laitteet. 2- ja 3-linjojen tuotantomäärät taas ovat huomattavasti 1-linjaa pienempiä ja niissä valmistetaan perustyyppin laitteiden lisäksi hieman suurempia ja erikoisempia laitteita. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan pääasiassa 1- ja 3-linjoja, koska nykyisen

markkinatilanteen vuoksi 2-linjalla valmistettavien tuotteiden kysyntä on toistaiseksi erittäin matalalla tasolla. Lisäksi tutkimuksen empiirinen tarkastelu rajataan koskemaan vain 1- ja 3-linjoilla valmistettuja perustyyppin laitteita, koska erikoislaitteiden kohdalla otanta olisi jäänyt liian pieneksi.

4.2 Kokoonpanon päätavoitteet

Kohdeyrityksen kokoonpanossa on käytössä neljä keskeistä ylätasoa suorituskykymittaria: käyttöaste, tehokkuus, toimitusvarmuus ja turvallisuus. Turvallisuus on rajattu tämän tutkimuksen tarkastelun ulkopuolelle, minkä vuoksi tässä tutkimuksessa keskitytään tarkastelemaan käyttöastetta, tehokkuutta ja toimitusvarmuutta.

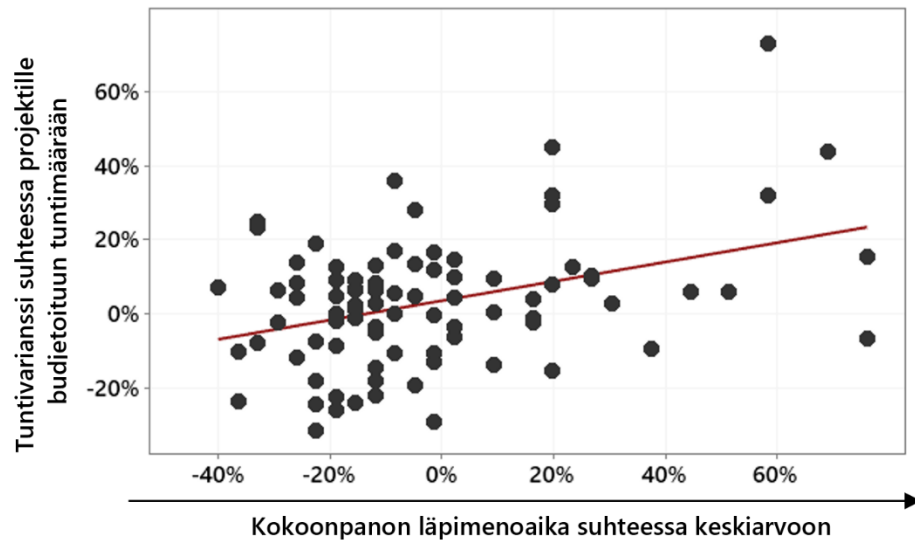
Kohdeyrityksessä jokaisen projektin kokoonpanoon on etukäteen budjetoitu tietty määrä työtunteja, joissa kyseisen projektin laitetypit pitäisi pystyä kokoonpanemaan. Projektille budjetoitujen työtuntien määrällä on siis osaltaan vaikutus siihen, millä hinnalla tuotteita voidaan myydä asiakkaille. Jotta projektin kokoonpanemiseen käytettyjä työtunteja pystyttäisiin seuraamaan, on työntekijöiden MES-järjestelmään kirjaamat työtunnit jaettu suoriin projektille kohdistettuihin työtunteihin sekä epäsuoriin ei-projektille kohdistettuihin työtunteihin. Epäsuoria työtunteja ovat esimerkiksi harjoitteluun, odotteluun, kehitystöihin ja siisteyden ylläpitoon käytetyt työtunnit.

Tehokkuudella tarkoitetaan kohdeyrityksessä projektille kohdistettujen suorien työtuntien ja projektille budjetoitujen työtuntien erotusta. Tavoitteena on, että projektin toteutuneiden ja budjetoitujen työtuntien välinen erotus eli varianssi olisi mahdollisimman lähellä nollaa tai nollan alle. Lähellä nollaa oleva varianssi kertoo kokoonpanon kustannusten hyvästä ennustettavuudesta, alle nollan oleva varianssi kustannustavoitteen alittamisesta ja yli nollan oleva varianssi kustannusten ylittämisestä. Kustannusten varianssi on viime aikoina saanut myös konsernitasolla enemmän ja enemmän huomiota ja se on nostettu yhdeksi keskeisimmäksi suorituskykyä kuvaavaksi mittariksi.

Kohdeyrityksessä on havaittu, että projektille kirjatut työtunnit ylittyvät yleensä projekteilla, joiden kokoonpano on keskeytynyt erilaisten häiriöiden vuoksi ja joiden läpimenoaika on pitkä. Projektin läpimenoajan ja projektille kirjattujen työtuntien välistä yhteyttä päätettiin analysoida tekemällä muuttujien välillä Pearsonin korrelaatiotesti sekä piirtämällä seuraavan sivun alun kuvassa 17 esitetty hajontakaavio. Hajontakaaviossa vaakakselilla on kokoonpanon läpimenoaika ja pystyakselilla tuntikertymän varianssi.

Tuntikertymän varianssi ja läpimenoaika ovat tietojen luottamuksellisuuden vuoksi tästä eteenpäin muutettu suhteellisiksi luvuiksi. Suhdelukujen avulla on myös helpompi ymmärtää vaihtelun suurusluokkaa, eikä puhtaiden lukuarvojen käyttö toisi työn tavoitteiden

saavuttamisen näkökulmasta erityistä lisäarvoa. Tuntikertymän varianssi on muutettu suhdeluvuksi siten, että toteutunut varianssi on jaettu projektille budjetoidulla kokonais-tuntimäärällä. Läpimenoajat ovat muutettu suhdeluvuiksi siten, että toteutuneita läpimenoaikoja verrataan kokoonpanon keskimääräiseen läpimenoaikaan. Nollaa pienemmät prosenttiluvut tarkoittavat keskimääräistä pienempää läpimenoaika ja nollaa suuremmat prosenttiluvut keskimääräistä suurempaa läpimenoaika.



Kuva 17. Läpimenoajan ja tuntikertymän varianssin välinen yhteys.

Pearsonin korrelaatiotestin r -arvoksi saatiin 0,38, mikä tarkoittaa, että muuttujien välillä on positiivinen korrelaatio eli kokoonpanon läpimenoajan kasvaessa myös projektin päälle kirjatulla suorilla työtunneilla on taipumus kasvaa. Tuloksen voidaan sanoa olevan tilastollisesti merkittävä, koska testin antama p -arvo on pienempi kuin 0,001.

Läpimenoajan pituudella ja vaihtelevuudella on todettu olevan tehokkuuden lisäksi suuri vaikutus myös yrityksen toimitusvarmuuteen (Hopp & Spearman, 2000; De Treville *et al.*, 2004; Slack *et al.*, 2013). Kohdeyrityksen kokoonpanon toimitusvarmuuden tavoite on, että 90 % valmistettavista projekteista olisi kokoonpanon suhteen valmiina tavoitepäivämäärään mennessä. Kokoonpanon jälkeen on yleensä varattu projektista riippuen vielä joitakin päiviä tai viikkoja varoaikaa ennen kuin projekti lähtee asiakkaalle, minkä vuoksi läheskään kaikki kokoonpanon myöhästymät eivät johda siihen, että koko projektin toimitus myöhästyi ja näkyisi myöhästymisenä myös asiakkaalle. Kokoonpanon myöhästymät aiheuttavat kuitenkin aina riskin myös ulkoiselle asiakasmyöhästymälle.

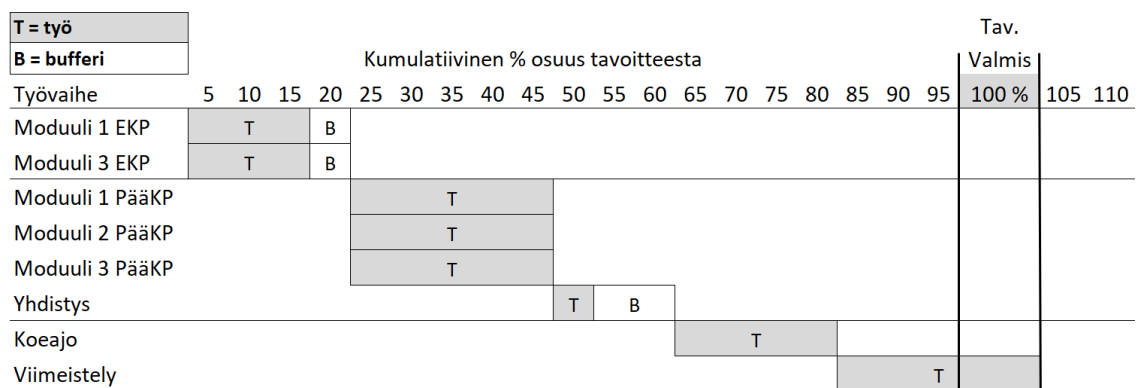
Tutkimuksen tarkasteluajanjaksolla kokoonpanon toimitusvarmuus oli 64 %, eli 36 % projekteista valmistui kokoonpanosta myöhässä tavoiteaikatauluun nähden. Toimitusvarmuus vaihtelee kuukausitasolla huomattavasti ja tarkasteluajanjakso sisälsi kaksi kuukautta, jolloin kokoonpanon toimitusvarmuus oli tavoitteessa ja vastaavasti kaksi

kuukautta, jolloin toimitusvarmuus oli alle 30 %. Kokoonpanon myöhästymisen taustalla on yleensä lukuisia erilaisia syitä, eikä myöhästymät läheskään aina johdu puhtaasti kokoonpanon omasta tekemisestä. Läpimenoajan suuren merkityksen vuoksi tässä tutkimuksessa keskitytään jatkossa pääasiassa kokoonpanon läpimenoaikaan ja sen vaihteluun, koska läpimenoaika ja sen vaihtelua pienentämällä sekä tehokkuuden, että toimitusvarmuuden oletetaan parantuvan.

4.3 Kokoonpanon läpimenoaika

Kohdeyrityksen kokoonpanon sisäiseen peruslaitteiden kokonaisläpimenoaikatavoitteen on laskettu mukaan noin 15 % puhdasta bufferia. Tämän lisäksi yksittäisten työvaiheiden läpimenoaika-arviot pitävät vielä sisällään jonkin verran varmuusbufferia. Eri työvaiheiden vaatimaa tehokasta prosessointiaikaa ei tällä hetkellä kuitenkaan tiedetä kovinkaan tarkasti, eikä yksittäisille työvaiheille ole määritelty selkeitä läpimenoaikatavoitteita.

Peruslaitteiden kokonaisläpimenoaikatavoitteen pitäisi tuotannon kehityspäällikön ja työnjohtajien mukaan kuitenkin olla realistinen ja siihen pitäisi olla ilman suurempia vastaantulevia ongelmia hyvät mahdollisuudet päästä. Läpimenoaikatavoitteen pääseminen edellyttää sen, että laitteen sisältämät kolme moduulia (moduuli 1, 2 ja 3) etenisivät kokoonpanossa suurin piirtein samaan tahtiin. Kokoonpanon virtauksen tavoitetilaa ja eri vaiheiden tavoitekestoja suhteessa kokonaistavoitteen on havainnollistettu kuvassa 18.

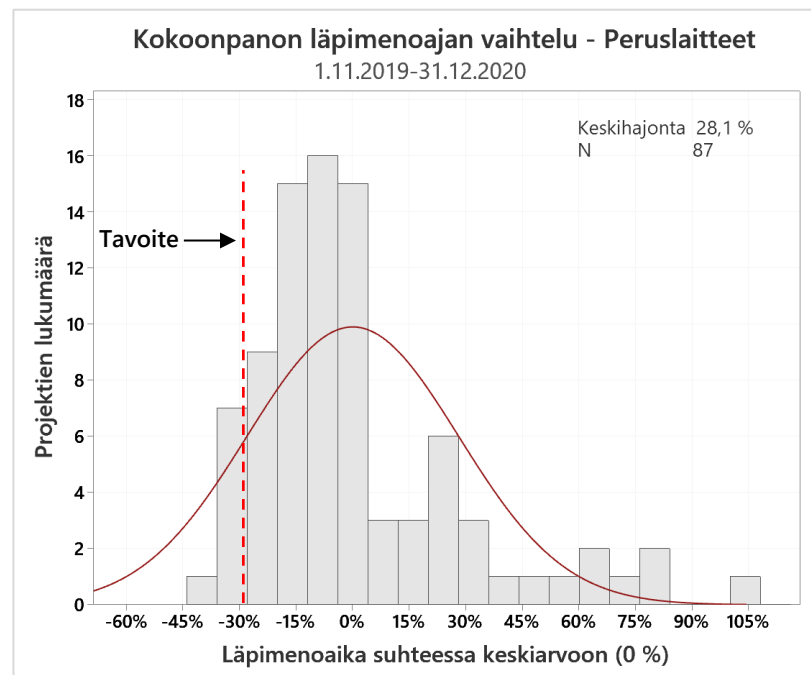


Kuva 18. Kokoonpanon virtauksen tavoitetila.

Kuvassa 18 esitetyssä tavoitetilassa kokoonpano aloitetaan samanaikaisesti moduuli 1:n ja moduuli 3:n esikokoonpanoissa. Esikokoonpanon valmistumisen jälkeen on varattu hetki aikaa bufferiin, jonka jälkeen tavoitteena on, että kaikkia kolmea moduulia alettaisiin tekemään samanaikaisesti pääkokoonpanossa. Moduulien läpimenoaikojen pitäisi

olla suurin piirtein samanpituisia, minkä vuoksi moduulien pitäisi valmistua pääkokoonpanosta lähestulkoon samanaikaisesti. Moduulien valmistumisen jälkeen ne yhdistetään yhdistysvaiheessa kokonaiseksi laitteeksi. Yhdistyksen jälkeen on varattu kokonaistavoitteeseen nähden noin 10 % bufferia ennen kuin laitteet siirtyvät koeajoon ja sen kautta viimeistelyyn.

Edellä esitetty kuvaus kokoonpanon etenemisestä on kuitenkin vain tavoitetila. Kokoonpanon toteutuneiden läpimenoaikojen tarkastelua varten tehtiin kuvassa 19 esitetty läpimenoajan histogrammi, jossa vaaka-akselilla näkyy kokoonpanon läpimenoaika suhteessa keskimääräiseen läpimenoaikaan ja pystyakselilla projektien lukumäärä.



Kuva 19. Peruslaitteiden kokoonpanon läpimenoajan vaihtelu.

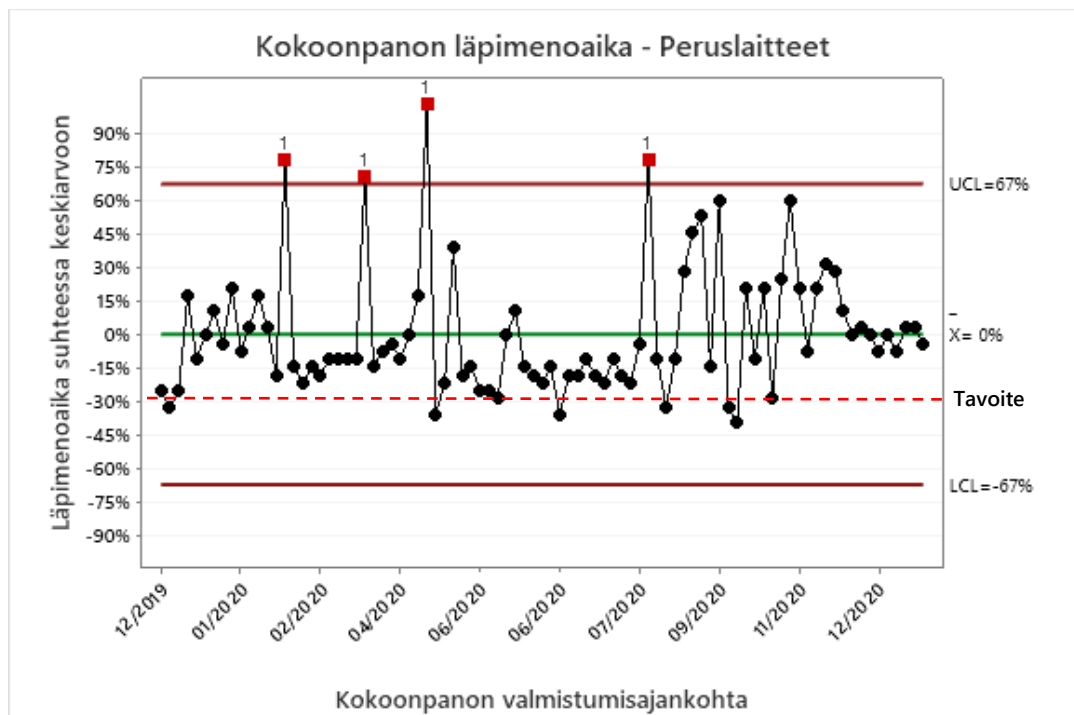
Kuvasta 19 nähdään, että kokoonpanon tavoitelämpimenoaika on noin 30 % pienempi kuin kokoonpanon keskimääräinen toteutunut läpimenoaika ja tavoiteaikaan on päästy vain hyvin pienessä osassa projekteja. Läpimenoajan keskihajonta oli tarkasteluajanjaksolla 28,1 % keskimääräisestä läpimenoajasta, mikä tarkoittaa, että läpimenoaika vaihtelee huomattavasti projektien välillä.

Lämpimenoajassa esiintyvää vaihtelun määrää tarkastelemalla voidaankin todeta, että jos kokoonpano alkaisi tänään, niin aloitushetkellä pystytään sanomaan peruslaitteiden osalta noin ± 28 % tarkkuudella milloin kokoonpano tulisi olemaan valmiina. Läpimenoajassa esiintyvä vaihtelu tekee kokoonpanon valmistumisaikojen ennustamisen erittäin haastavaksi, mikä taas vaikuttaa negatiivisesti toimitusvarmuuteen. Seuraavissa kappaleissa 4.4, 4.5 ja 4.6 pyritään selvittämään tarkemmin, mitä eri tekijöitä pitkien ja vaihtelevien läpimenoaikojen taustalla on.

4.4 Käyttöasteen vaikutus läpimenoaikaan

Kokoonpanon käyttöaste lasketaan kohdeyrityksessä jakamalla työntekijöiden projektille kohdistamat työtunnit kaikilla työtunneilla. Näin laskien käyttöaste oli tarkasteluajanjak-solla keskimäärin noin 77 %. Eri laitetyyppien kokoonpanolle budjetoituihin työtunteihin on kuitenkin laskettu mukaan jonkin verran ylimääräistä varmuusbufferia, minkä vuoksi todellinen käyttöaste on matalampi kuin edellä mainittu laskennallinen käyttöaste. Matala käyttöaste ei välttämättä aina ole huono asia, koska varsinkin ETO-tyyppisessä tuotannossa on hyvä, että tuotannolla on käytössään ylimääräistä kapasiteettia tasaamaan tuotannossa esiintyvää vaihtelua (Hopp & Spearman, 2000).

Matalan käyttöasteen pitäisi myös kohdeyrityksen tapauksessa helpottaa kokoonpanossa esiintyvän vaihtelun hallintaa, koska tällöin ylimääräisiä resursseja on enemmän käytettävissä kuormituspiikkien ja erilaisten häiriötilanteiden varalle. Jotta käyttöasteen vaikutusta kohdeyrityksen kokoonpanon läpimenoajassa esiintyvään vaihteluun pystyttäisiin paremmin ymmärtämään, tehtiin läpimenoajasta kuvassa 20 esitetty SPC-kortti. SPC-kortissa vaaka-akselilla on kokoonpanosta valmistuneet projektit aikajärjestyksessä ja pystyakselilla kokoonpanon läpimenoaika suhteutettuna keskimääräiseen läpimenoaikaan.



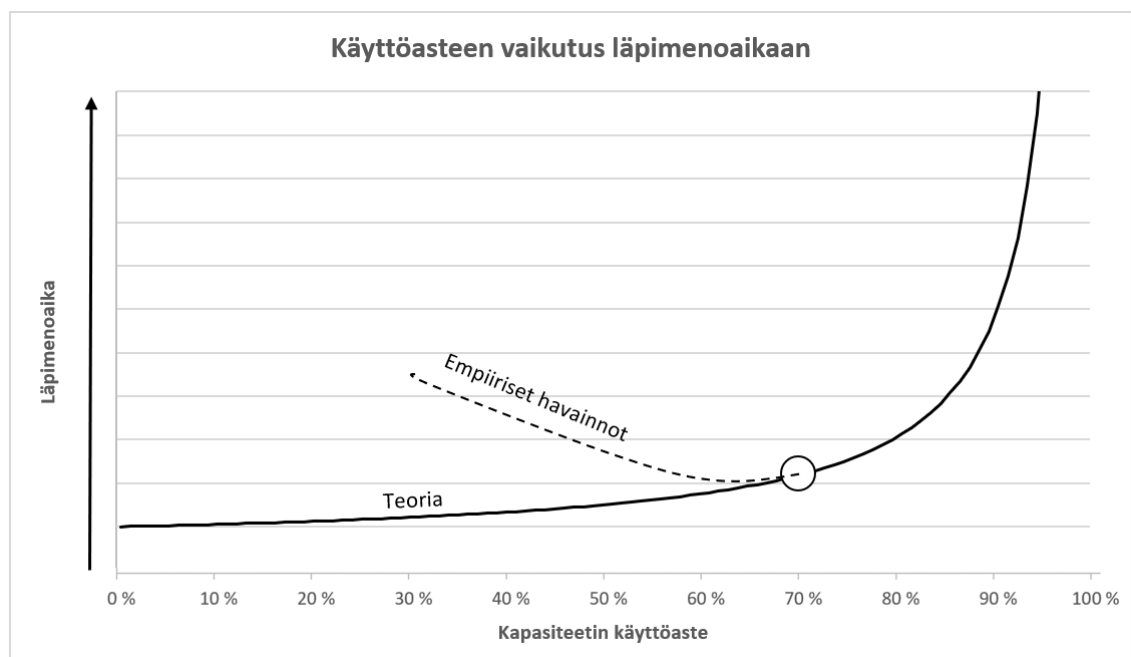
Kuva 20. SPC-kortti kokoonpanon läpimenoajasta.

SPC-kortista nähdään, että kokoonpanon läpimenoajassa esiintyy satunnaissyyvaihtelun lisäksi erityissyyvaihtelua, koska neljä mittapistettä (merkitty punaisella neliöllä) on ylittänyt prosessin ylemmän ohjausrajan (UCL). Kokoonpanoprosessin voidaan tällöin

sanoa olevan hallitsemattomassa tilassa ja erityisyyvaihdelun aiheuttaneet syyt pitäisi pyrkiä selvittämään (Deming, 1986).

SPC-kortista voidaan myös huomata, että kesä-heinäkuussa ja joulukuussa valmistuneiden projektien läpimenoajoissa esiintyvä vaihtelu on ollut huomattavasti pienempää kuin muina aikoina valmistuneiden projektien. Tuotannonjohdon mukaan yhtenä selittävä tekijänä pienemmälle vaihtelulle on se, että kesän ja joulun aikana kokoonpanon kuormitus ja käyttöaste on ollut korkeampi kuin muina ajanjaksoina. Korkean kuormituksen aikoina laitteiden kokoonpano suoritetaan kohdeyrityksessä yleensä nopeammin kuin aikoina, jolloin kuormitus on matalampi.

Käytännön havainnon ja teorian välillä voidaankin näin ollen havaita osittainen ristiriita, koska Kingmanin yhtälön (kaava 3) mukaan läpimenoajan pitäisi käyttöasteen pienentyessä lyhentyä ja käyttöasteen kasvaessa pidentyä. Kohdeyrityksessä tilanne on kuitenkin päinvastainen, koska korkeammalla käyttöasteella päästään yleensä lyhyempiin ja ennustettavimpiin läpimenoaikoihin kuin matalalla käyttöasteella. Käytännön ja teorian välistä ristiriitaa on havainnollistettu kuvassa 21. (HUOM. Kuvan 21 tarkoitus on vain havainnollistaa tilannetta ja läpimenoaika esittävien käyrien tarkat muodot ja käyttöaste-terajat saattavat todellisuudessa poiketa kuvassa esitetystä.)



Kuva 21. Käyttöasteen vaikutus läpimenoaikaan teoriassa ja käytännössä. (Kuvan käyrien muodot vain suuntaa antavia esimerkkejä.)

Edellä mainittu ilmiö on myös osittain tunnistettu kirjallisuudessa ja esimerkiksi Wiendahl *et al.* (2005) ja Bendul (2019) ovat huomanneet, että työntekijöillä on taipumus hidastaa työtahtiaan tuotannon kuormitustilanteen ollessa matala. Wiendahl *et al.* (2005) mukaan

ilmiön taustalla on työnantajan ja tuotannon operaattorien erilaiset tarpeet ja tavoitteet: työnantajan tavoitteena on yleensä saada tuotteet valmiiksi lyhyellä läpimenoajalla, mutta tuotannon operaattorien tärkeimpänä henkilökohtaisena tavoitteena saattaakin olla erityisesti matalan kuormituksen aikana pitää kiinni työpaikastaan. Tämän vuoksi matalan kuormituksen aikana vähäisiä töitä tehdään usein hitaammin, jotta työt riittäisivät pidemmäksi ajaksi (Wiendahl *et al.* 2005).

4.5 Tuotannonsuunnittelun ja -ohjauksen nykytilanne

4.5.1 Nykyiset tuotannonsuunnittelu- ja ohjausperiaatteet

Uusi projekti käynnistyy kohdeyrityksessä aina projektipäällikön pitämällä aloituspalaverilla, jossa käydään läpi projektin perustiedot ja aikataulusuunnitelma. Aloituspalaveriin osallistuu vähintään yksi edustaja jokaisesta toimitusketjun vaiheesta ja palaverin tavoitteena on, että kaikki toimitusketjun vaiheet ovat tietoisia projektin teknisistä ja ajallisista vaatimuksista.

Kohdeyrityksen tuotannon karkeasuunnittelusta vastaa toimitusketjun pääsuunnittelija (Master Scheduler). Pääsuunnittelija osallistuu kysyntäennusteiden (SORB, Sales and Operations Review Board) tekoon sekä tekee asiakkailta tulevien toimitusaikakyselyjen perusteella tuotannon alustavat aikaslottivaraukset noin 1–4 viikon tarkkuudella. Tarkempi tuotantojärjestys ja kokoonpanon aloitusaika pyritään määrittelemään viikon tarkkuudella, kun kokoonpanon alustavasti suunniteltuun aloitukseen on aikaa noin 13 viikkoa. Tällöin määriteltyä kokoonpanon suunniteltua aloitusajankohtaa kutsutaan kokoonpanon jäädytetyksi aloitukseksi. Kokoonpanon jäädytetyjä aloituksia määriteltäessä pyritään ottamaan huomioon mahdolliset myöhästymässä olevat komponentit, luokitushaasteet ja muuttuneet asiakasvaatimukset.

Tuotantosuunnitelmaa kutsutaan kohdeyrityksessä tuotannon ajojärjestykseksi ja se sijaitsee kohdeyrityksen intranetissä. Nykyisen ajojärjestyslistan vahvuus on, että se koostaa yhteen paikkaan monia projektin toteutukseen liittyviä oleellisia asioita, kuten projektin yleistiedot, komponenttien saatavuustilanteen, luokitustilanteen ja suunnitellut tuotantoaikataulut. Osa ajojärjestyslistan tiedoista tulee automaattisesti kohdeyrityksen ERP-järjestelmästä ja osa tiedoista täytetään listaan manuaalisesti. Esimerkiksi kokoonpanossa olevien projektien etenemistilanne täytetään ajojärjestyslistaan manuaalisesti epäsäännöllisin väliajoin, eikä ajojärjestyslista tämän vuoksi sovellu kokoonpanon reaaliaikaiseen ja luotettavaan tilanneseurantaan.

Ajojärjestyslistan riveillä ja sarakkeilla on valtava määrä tuotannon eri vaiheiden (luokitus, osto, hitsaamo, kokoonpano) suunniteltuja aloitus- ja lopetuspäivämääriä, eikä tuotantosuunnitelmaa ole tällä hetkellä mahdollista tarkastella esimerkiksi visuaalisessa jannamuodossa. Tämän vuoksi kokonaiskuvan hahmottaminen sekä parhaan tuotantojärjestyksen ja tuotannon aloitusajankohtien optimointi on nykyisen ajojärjestyslistan kanssa erittäin haastavaa. Ajojärjestyslista onkin suunniteltu lähtökohtaisesti vain tuotannon karkeakuormituksen tekemiseen, mutta erillisen hienokuormitustyökalun puutteen vuoksi ajojärjestyslistaa käytetään nykyään myös tuotannon hienokuormituksen tekemiseen. Tuotantojohtajan ja tuotannonohjauksesta vastaavan työnjohtajan kanssa käydyissä haastatteluissa nousikin esille, että tuotannon hienokuormitus- ja optimointityökalun puutteen koettiin hankaloittavan toimivan tuotantosuunnitelman tekemistä.

Kokoonpanon lopullinen aloituspäätös eli tilauksen vapautuspäätös tehdään lopulta työnjohtajien toimesta senhetkiseen tuotantotilanteeseen perustuen. Tavoitteena kuitenkin on, että projektit aloitettaisiin kokoonpanossa aina ennalta määritellyn tuotantosuunnitelman mukaisesti, mikä tarkoittaa, että kohdeyrityksen tuotannonohjaus perustuu työntöohjaukseen (Spearman & Zazanis, 1992). Työntötyyppisen tuotannonohjauksen on todettu aiheuttavan huomattavasti enemmän vaihtelua tuotannon läpimenoaikoihin kuin imutyypin tuotannonohjauksen (Kingsman & Hendry, 2002; Hopp & Spearman, 2004). Kohdeyrityksen kokoonpanossa ei myöskään ole käytössä selkeitä priorisointisääntöjä, joiden mukaan toimittaisiin aina, kun tarvetta tilausten priorisoinneille tulee esimerkiksi kokoonpanon keskeytysten vuoksi.

Verrattaessa tuotannon ajojärjestykseen kirjattua kokoonpanon alustavasti suunniteltua aloitusviikkoa (jäädytetty aloitus) toteutuneeseen aloitusviikkoon, huomataan, että suunniteltu aloitusviikko on toteutunut vain 60 % projekteista. Toisin sanoen 40 % kokoonpanon aloituksista on jouduttu siirtämään vähintään yhdellä viikolla aiemmaksi tai myöhemmäksi kuin alun perin oli suunniteltu. Työnjohtajien mukaan aloituksen siirron taustalla on yleensä se, että projektista puuttuu vielä niin paljon komponentteja, ettei projektia kannata aloittaa kokoonpanossa. Toisaalta projekteja myös aloitetaan kokoonpanossa usein, vaikka niistä puuttuisikin vielä komponentteja. Erityisen hankalaksi koettiin se, että myöhässä olevien komponenttien arvioidut saapumisajat muuttuvat yleensä monta kertaa, minkä vuoksi koskaan ei voida olla varmoja, milloin puuttuvat komponentit oikeasti saapuvat.

Työnjohtajat myös mainitsivat, että kokoonpanon aloituksen siirtopäätöksiin vaikuttaa kokoonpanon senhetkinen keskeytystilanne ja linjalla oleva keskeneräisen työn määrä. Kohdeyrityksellä ei kuitenkaan ole käytössään minkäänlaisia virallisia WIP-rajoitteita, joiden mukaan tilausten vapautuspäätöksiä tehtäisiin. Päätökset kokoonpanon aloituksista

perustuvat siis pitkälti työnjohtajien omaan harkintaan ja näkemykseen vallitsevasta tilanteesta.

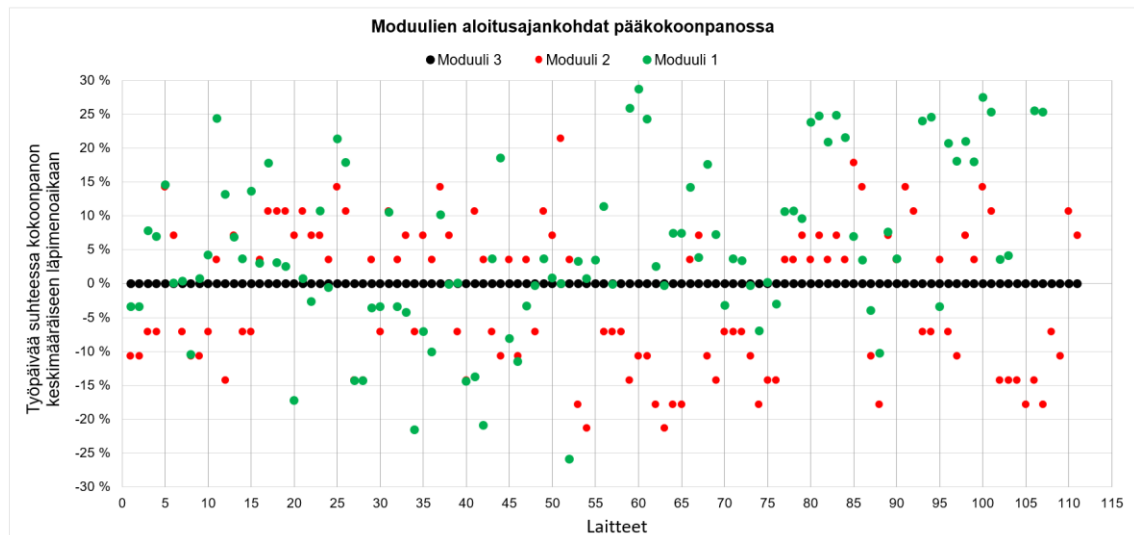
Ajojärjestyslistan lisäksi kohdeyrityksellä on käytössään erillinen Excel-pohjainen laitteiden testaus- eli koeajoaikataulu, jossa eri projektien suunnittelut koeajoajat on esitetty janamuodossa. Koeajoaikataulua ylläpitää tuotannonohjauksesta vastaava työnjohtaja, joka päivittää koeajoaikataulua manuaalisesti kokoonpanon edetessä. Laitteiden koeajoaikataulut eivät siis ole täysin selvillä vielä kokoonpanon alkaessa. Yksi syy erillisen koeajoaikataulun ylläpitämiselle on se, että janamuotoisen näkymän koetaan helpottavan koeajon aikataulutuksen suunnittelua. Koeajo myös mielletään kokoonpanon pullonkaulauksi, minkä vuoksi koeajon aikataulua ja kuormitusta pyritään seuraamaan tarkemmin kuin muiden työvaiheiden aikatauluja. Paikanpäälle koeajoa seuraamaan pitää pyytää yleensä ulkopuolinen luokituslaitoksen edustaja, jolle koeajoaika pitää ilmoittaa luokituslaitoksesta riippuen yleensä noin 1–2 viikkoa etukäteen. Välillä myös asiakkaat haluavat tulla paikanpäälle katsomaan laitteiden koeajoa ja heille koeajoaika pitää yleensä ilmoittaa vielä huomattavasti aikaisemmin kuin luokituslaitoksille.

Koeajosta ja viimeistelystä vastaavan työnjohtajan kanssa käydyissä keskusteluissa nousi esille, että pääkokoonpanon valmistumisaikojen heikko ennustettavuus hankaloittaa huomattavasti koeajon aikataulutusta. Esimerkiksi luokituslaitoksen edustajan paikalle kutsuminen on hyvin hankalaa, kun laitteen todellista koeajopäivää ei pystytä sanomaan kuin vasta aikaisintaan muutama päivä ennen koeajoa. Luokituslaitoksen edustajaa ei myöskään olla saatu aina haluttuun aikaan paikalle varsinkaan, jos kutsu on jouduttu esittämään liian pienellä varoitusajalla. Tämä taas on aiheuttanut ylimääräistä odotusta ja osaltaan pidentänyt laitteiden läpimenoaikoja.

Projektipäälliköt totesivat kokoonpanon eri vaiheiden valmistumisaikojen heikon ennustettavuuden tuottavan haasteita myös asiakkaiden kanssa kommunikointiin. Projektipäälliköiden tehtävänä on ilmoittaa laitteen koeajoaikataulu asiakkaalle, ja jos etukäteen ilmoitettu koeajoaikataulu vielä syystä tai toisesta matkan varrella muuttuu, niin se heikentää yleensä asiakkaan saamaa laatuvaikutelmaa.

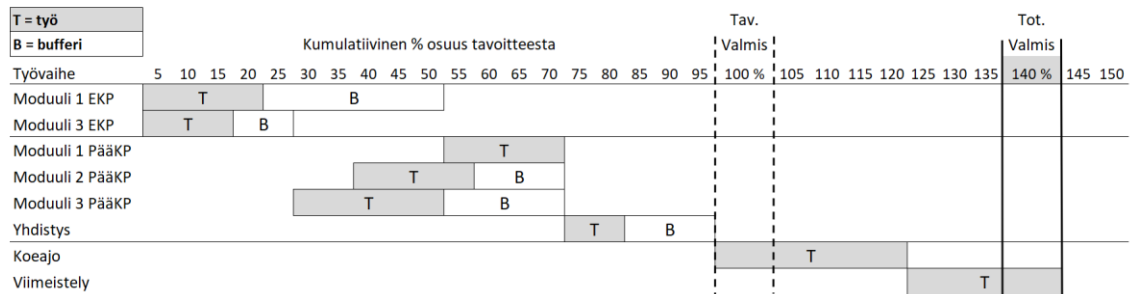
4.5.2 Kokoonpanon virtauksen todellinen tila

Kokoonpanon virtauksen todellisen tilanteen hahmottamiseksi tutkittiin MES-järjestelmästä saatavia eri työvaiheiden aloitus- ja lopetusleimauksia ja tehtiin kuvassa 22 esitetty vertailu moduulien aloitusajankohdista pääkokoonpanossa. Moduuli 3:n pääkokoonpanon aloitusajankohta toimii vertailussa nollakohtana, johon moduuli 1:n ja moduuli 2:n aloitusaikoja verrataan. Jotta moduulien eriaikaisen aloittamisen vaikutus kokonaisläpimenoaikaan olisi helpompi ymmärtää, on moduuli 1:n ja 2:n aloitusaikojen ero moduuli 3:n aloitusajankohtaan suhteutettu kuvan pystyakselilla kokoonpanon keskimääräiseen läpimenoaikaan. Tavoitetilanne siis olisi, että moduulit aloitetaan pääkokoonpanossa samaan aikaan, mikä tarkoittaisi, että kuvassa 22 näkyvät moduulien aloitusajankohtia esittävät pisteet olisivat mahdollisimman lähellä nollaa prosenttia.



Kuva 22. Moduuli 1:n ja moduuli 2:n aloitusajankohta pääkokoonpanossa suhteessa moduuli 3:n aloitukseen.

Kuvasta kuitenkin huomataan, että saman laitteen eri moduulien aloitusajankohdat eroavat huomattavasti toisistaan ja vain pienessä osassa laitteita edes kahden moduulin pääkokoonpano on aloitettu samanaikaisesti. Ensimmäisenä ja viimeisenä aloitetun moduulin välinen erotus työpäivissä mitattuna on suuruusluokaltaan keskimäärin noin 20 % kokoonpanon keskimääräisestä läpimenoajasta. Moduulien toteutuneet läpimenoajat ovat suurin piirtein samansuuruisia, minkä vuoksi moduulien eriaikaisesta aloituksesta ei ole käytännön kannalta juurikaan hyötyä, koska kaikkien moduulien tulee kuitenkin olla valmiina ennen kuin moduulien yhdistysvaihe voidaan aloittaa. Moduulien eritahtisen etenemisen vaikutusta kokoonpanon kokonaisläpimenoaikaan on havainnollistettu seuraavan sivun alun kuvassa 23.



Kuva 23. Kokoonpanon virtauksen todellinen tila.

Kuvasta 23 nähdään, että moduulien eriaikainen aloittaminen ja eritahtinen eteneminen vaikuttavat merkittävästi kokoonpanon läpimenoajan pituuteen ja vaihtelevuuteen. MES-järjestelmän perusteella tehtyä mallinnusta tilanteesta vahvistaa se, että moduulien eritahtinen eteneminen voidaan todentaa myös menemällä havainnoimaan tilannetta kokoonpanon lattiatasolle.

MES-kirjauksia analysoitaessa myös havaittiin, että laitteet ovat keskimäärin noin 35 % kokoonpanon kokonaisläpimenoajasta työvaiheita ennen tai työvaiheiden jälkeen olevissa buffereissa. Tämän lisäksi laitteet ovat ison osan työasemalla olevasta ajasta erinäisisistä syistä keskeytettyinä, mikä tarkoittaa, että varsinaisen tehokkaan työajan osuus kokonaisläpimenoajasta jää suhteellisen pieneksi. Vaihtelun suuren määrän vuoksi on kuitenkin hyvin tyypillistä, että asiakasohjautuvassa tuotannossa tuote saattaa odottaa valtaosan kokoonpanoajasta erilaisissa väliavarastoissa ennen tai jälkeen työvaiheen (Kingsman & Hendry, 2002). Moduulien eritahtinen eteneminen ja bufferiajan suuri osuus vaikuttavat kuitenkin huomattavasti kohdeyrityksen kokoonpanon kokonaisläpimenoaikaan ja läpimenoajan vaihteluun.

4.5.3 Kokoonpanon läpimenoaikojen seuranta

Tutkijan omaan havainnointiin ja aihepiiriin kirjallisuuteen perustuen yhtenä keskeisenä syynä kohdeyrityksen kokoonpanon läpimenoaikojen suurelle vaihtelulle ja kokoonpanon heikolle ohjattavuudelle on läpimenoaikojen puutteellinen seuranta. Esimerkiksi Olhager & Wikner (2000) huomauttivat, että tuotannonohjauksen tulisi saada jatkuvasti ajantasaista ja luotettavaa tietoa tuotannon suoritumisesta, jotta tuotanto voisi päästä sille asetettuihin tavoitteisiin. Suorituskyvyn mittaamisen ja toiminnan läpinäkyvyyden merkitystä on painotettu myös monissa muissa tutkimuksissa (Neely, 1999; Behn, 2003; Tangen, 2004).

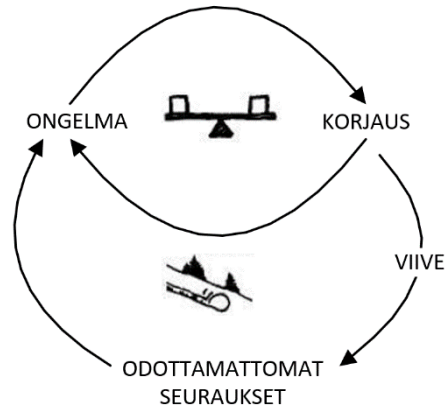
Kohdeyrityksen tapauksessa kokoonpanon yksittäisten työvaiheiden tai työvaihekokonaisuuksien läpimenoaikoja ei tutkimuksen aloitushetkellä seurattu kovinkaan tarkasti ja usein vasta projektin valmistuttua todettiin, mikä projektin kokonaisläpimenoaika lopulta

oli. Projektin päätyttyä ei myöskään yleensä tarkalleen tiedetty, mistä osista kokonaisläpimenoaika koostui ja mitkä olivat tarkempia syitä tavoiteläpimenoajan ylitykselle. Puutteellisen seurannan myötä läpimenoajat ja niissä esiintyvä vaihtelu ovat kuitenkin päässeet pikkuhiljaa kasvamaan ilman, että tiedetään tarkalleen mistä kasvu johtuu.

Työvaiheiden valmistumisajankohtien arviointi vaikuttaa havaintojen mukaan olevan erittäin haastavaa, ja esimerkiksi työnjohtajalta saatuihin eri vaiheiden valmistusaikojä koskeviin arvioihin sisältyy aina runsaasti varmuusbufferia mahdollisten ongelmien varalle. Toisaalta valmistumisaikojen arvioinnin haastavuus ei ole mikään ihme, koska yksittäisten työvaiheiden todelliset läpimenoajat eivät ole selkeästi tiedossa, eikä läpimenoaikoja pystynyt vielä tämän tutkimuksen alussa reaaliaikaisesti seuraamaan.

Myös tuotannosuunnittelussa käytettävään kokoonpanon suunniteltuun läpimenoaikaan lasketaan laitekohtaisessa tavoiteläpimenoajassa sisällä olevan bufferiajan lisäksi mukaan yleensä vielä noin 40–60 % ylimääräistä bufferiaikaa. Projektit aloitetaankin kokoonpanossa yleensä varmuuden vuoksi hyvissä ajoin ennen projektin laskennallista viimeistä mahdollista aloituspäivää, joka saadaan vähentämällä projektin sovitusta toimituspäivästä projektiin kuuluvien laitetyyppien kokoonpanon sisäinen tavoiteläpimenoaika. Varmuuden vuoksi hyvissä ajoin aloittamisen taustalla on ajatus, että kaikki työ on aina eteenpäin, koska jossain vaiheessa kokoonpano kuitenkin keskeytyy joko komponenttipuutteiden tai erilaisten laatupoikkeamien vuoksi.

Kappaleessa 2.6.6 esitelty tuotannonohjauksen noidankehä kuvastaa hyvin kohdeyrityksen tilannetta. Noidankehä syntyy kohdeyrityksessä, kun heikon toimitusvarmuuden seurauksena tuotannosuunnittelussa käytettäviä läpimenoaikoja kasvatetaan varmuuden vuoksi. Pidempien suunniteltujen läpimenoaikojen myötä tilaukset pitää jatkossa aloittaa kokoonpanossa aiempaa aikaisemmin, mikä aiheuttaa sen, että kokoonpanossa oleva WIP:n määrä pääsee kasvamaan. Lisääntyneen WIP:n määrän myötä kokoonpanon läpimenoajat pääsevät kuitenkin kasvamaan ja toimitusvarmuus heikkenee entisestään. Tällöin on palattu noidankehän lähtöpisteeseen ja suunnittelussa käytettäviä läpimenoaikoja joudutaan jälleen pidentämään. Kuvassa 24 esitetty Sengen (1990) ”*fixes that fail*” systeemiarkkityyppi kuvastaa hyvin myös tuotannonohjauksen noidankehän taustalla vaikuttavaa mekanismia.



Kuva 24. ”Fixes that fail” systeemiarkkityyppi, mukailten (Senge, 1990).

Fixes that fail systeemiarkkityypissä ongelman ratkaisemiseksi tehdään ensin jokin lyhyen tähtäimen korjaustoimenpide, joka vaikuttaa aluksi toimivalta, mutta lopulta pienellä viiveellä aiheuttaa odottamattomia negatiivisia seurauksia systeemin toimintaan (Senge, 1990). Tekojen ja seurausten välillä oleva viive onkin keskeinen syy sille, miksi asioiden välisiä todellisia syy-seuraussuhteita on niin vaikea tunnistaa ja tuotannonohjauksen noidankehän kaltainen haitallinen palautesilmukka pääsee syntymään.

4.6 Kokoonpanon keskeytykset

4.6.1 Keskeytysten määrät ja tyypit

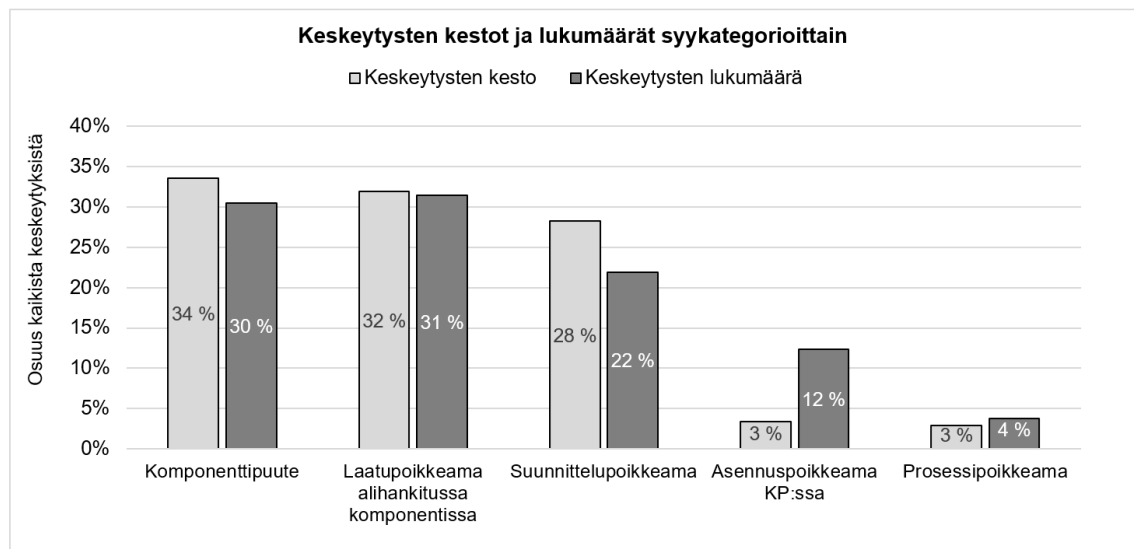
Melkein kaikissa kokoonpanon eri henkilöiden kanssa käydyissä keskusteluissa nousi esille, että kokoonpanon keskeyttävien häiriöiden koetaan olevan suurin syy kokoonpanon pitkille ja ennen kaikkea suuresti vaihteleville läpimenoajoille. Keskeytykset ja erityisesti komponenttipuutteet nousivat myös toistuvasti esille havainnoissa muiden ihmisten välisiä käytäväkeskusteluja.

Kokoonpanon keskeytysten tutkimiseen käytetään tässä tutkimuksessa kohdeyrityksen MES-järjestelmästä saatavaa keskeytystilastoa. Tarkasteltavat projektit ja ajanjakso ovat samat kuin läpimenoajan analysoinnissa. Keskeytystilaston mukaan tarkasteluajan jaksolla kokoonpanossa keskeytettyjä projekteja oli yhteensä 59 kpl, ja keskeytettyjä laitteita yhteensä 103 kpl. Kokoonpanossa keskeytyneiden projektien osuus kaikista valmistuneista projekteista oli 67 %.

Tiettyyn projektiin kuuluvat laitteet ovat yleensä keskenään lähes identtisiä, minkä vuoksi projektin keskeytyksen aiheuttanut asia, kuten komponenttipuute, laatupoikkeama tai suunnittelupoikkeama esiintyy samanaikaisesti molemmissa projektiin kuuluvissa laitteissa ja molemmat projektiin kuuluvat laitteet joudutaan siirtämään keskeytysosastolle.

Projektin keskeytyksen kokoonpanossa aiheuttava poikkeama voi myös esiintyä vain toisessa projektiin kuuluvassa laitteessa. Näiden syiden vuoksi keskeytettyjen laitteiden lukumäärä on aina suurempi kuin keskeytettyjen projektien lukumäärä. Yhdessä laitteessa voi kokoonpanon aikana myös esiintyä monia erilaisia poikkeamia, minkä vuoksi yksi laite voi keskeytyä kokoonpanon aikana useampaan kertaan.

Kun keskeytyksistä poistetaan niin sanotut tuplakäynnit, joissa kumpikin projektiin kuuluva laite on ollut saman syyn vuoksi keskeytettynä, saadaan kokoonpanossa keskeytettujen laitteiden lukumääräksi 67 kpl ja keskeytysten kokonaismääräksi 106 kpl. Kaikista kokoonpanon keskeytyksistä 37 % on tapahtunut 1-linjan pääkokoonpanossa, 29 % EKP:ssa, 19 % koeajossa tai viimeistelyssä ja 15 % 3-linjan pääkokoonpanossa. Kuvassa 25 keskeytysten kestot ja lukumäärät on jaettu keskeytyksen syyn mukaisesti viiteen kategoriaan ja kunkin kategorian aiheuttamien keskeytysten lukumäärät ja kestot ovat suhteutettu kokoonpanon kokonaiskeskeytysmäärään ja kokonaiskeskeytysaikaan.



Kuva 25. Kokoonpanon keskeytysten kestot ja lukumäärät syykategorioittain.

Kuvasta huomataan, että komponenttipuutteet sekä komponenteissa esiintyvät laatu- ja suunnittelupoikkeamat ovat keskeytysten lukumäärissä ja kestoajoissa mitattuna kolme selkeästi suurinta keskeytystyyppiä. Kuvasta myös nähdään, että kokoonpanon omat asennuspoikkeamat ovat tyypillisesti kestoaltaan suhteellisen lyhyitä verrattuna muihin keskeytystyyppeihin. On myös mahdollista, että kokoonpanon itse aiheuttamia poikkeamia ei nosteta niin herkästi esille kuin muista osastoista tai toimittajista aiheutuvia poikkeamia. Isossa kuvassa tällä ei kuitenkaan ole kovin suurta merkitystä, koska kolme suurinta syykategoriaa erottuvat varsinkin keskeytysten kestoissa niin selkeästi muista kategorioista.

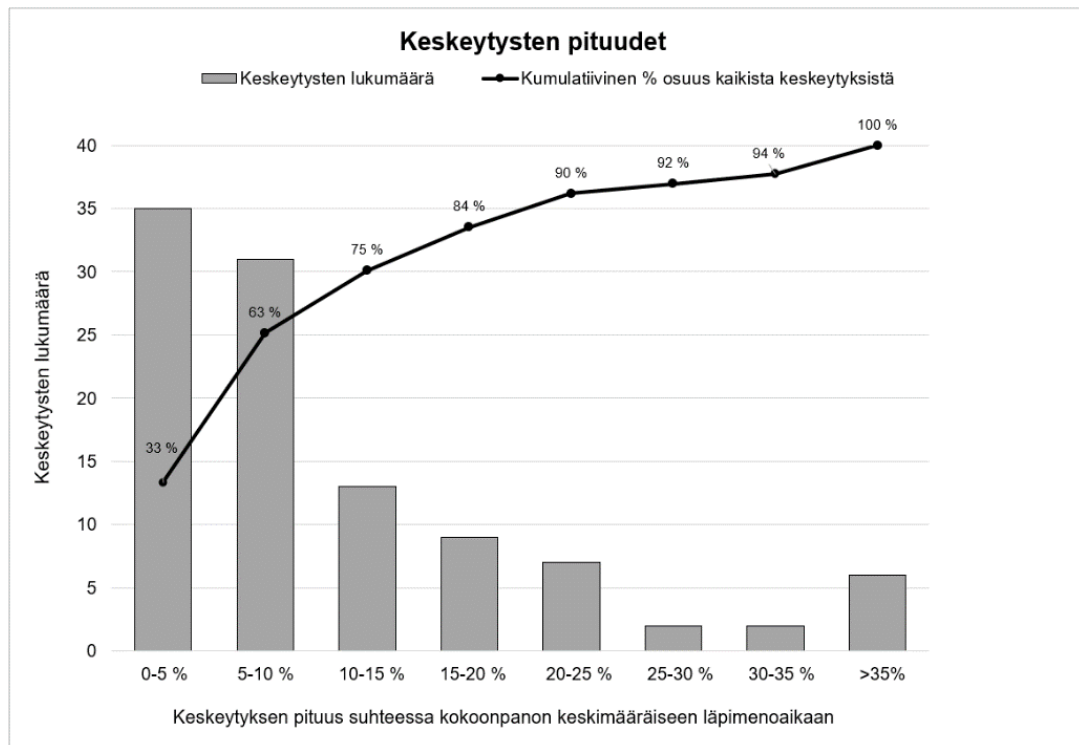
Työnjohdon kanssa käydyissä keskusteluissa painotettiin, että suunnittelupoikkeamat ja alihankituissa komponenteissa esiintyvät laatu-poikkeamat tulevat aina esille täysin yllättäen, minkä vuoksi ne ovat kokoonpanon kannalta ongelmallisempia kuin komponenttipuutteet. Komponenttipuutteet sen sijaan ovat yleensä suhteellisen hyvin tiedossa ennakkoon, minkä vuoksi ne olisi mahdollista ottaa paremmin huomioon tuotannonohjaukseen liittyvissä päätöksissä.

Kaikki suunnittelu- ja asennuspoikkeamat ovat lähtöisin kohdeyrityksen omasta toiminnasta, kun taas kaikki alihankituissa komponenteissa esiintyvät laatu-poikkeamat ovat lähtöisin toimittajien toiminnasta. Keskeytyksen aiheuttaneista komponenttipuutteista 69 % on peräisin toimittajien- ja 31 % kohdeyrityksen toiminnasta. Kohdeyrityksen omasta toiminnasta aiheutuneet komponenttipuutteet ovat yleensä seurausta toimitusketjun jonkin vaiheen aikataulujen venymisestä.

Kaikki keskeytyskategoriat huomioiden keskeytyksistä tasan 50 % on aiheutunut kohdeyrityksen omasta toiminnasta ja 50 % toimittajien toiminnasta. Keskeytysten vastuiden jakauma kertoo sen, että kohdeyrityksellä on omaa sisäistä toimintaansa kehittämällä suuri potentiaali vähentää kokoonpanon keskeytyksiä.

4.6.2 Keskeytysten vaikutusten analysointi

Jotta keskeytysten vaikutuksesta kokoonpanon läpimenoaikaan saataisiin parempi käsitys, keskeytysten pituudet päätettiin jakaa kahdeksaan eri luokkaan siten, että ensimmäinen luokka on 0–5 %, toinen luokka 5–10 % ja viimeinen luokka yli 35 % kokoonpanon keskimääräisestä läpimenoajasta. Tämän jälkeen selvitettiin kuhunkin luokkaan kuuluvien keskeytysten lukumäärä ja piirrettiin seuraavan sivun alussa oleva kuva 26, jossa x-akselilla on keskeytysten kestoluokat ja y-askelilla keskeytysten lukumäärä. Kuvaajassa näkyvä musta viiva esittää keskeytysten lukumäärän prosentteissa esitettyä kumulatiivista kertymää.



Kuva 26. Kokoonpanon keskeytysten pituudet.

Keskeytyksen keskimääräinen kesto oli tarkastelujaksolla 12,1 % ja mediaanikesto 7 % kokoonpanon keskimääräisestä läpimenoajasta. Kuvasta 26 voidaan havaita, että valtaosa eli noin 75 % keskeytyksistä on ollut kestoltaan alle 15 % kokoonpanon keskimääräisestä läpimenoajasta. Taulukossa 3 on esitetty, miten keskeytysten kestot suhteessa kokoonpanon keskimääräiseen läpimenoaikaan jakautuvat syykategorioittain.

Taulukko 3. Kokoonpanon keskeytysten kestot syykategorioittain.

Keskeytyskategoria	Kpl	Mediaanikesto	Ka.kesto	Keskihajonta
Komponenttipuute	32	10 %	13 %	9 %
Laatupoikkeama alihankitussa komponentissa	33	7 %	12 %	14 %
Suunnittelupoikkeama	23	9 %	15 %	19 %
Asennuspoikkeama	13	2 %	3 %	4 %
Prosessipoikkeama	4	9 %	9 %	6 %
Kaikki kategoriat	105	7 %	11 %	13 %

Taulukosta 3 huomataan, että komponenttipuutteiden sekä komponenteissa esiintyvien laatu- ja suunnittelupoikkeamien aiheuttamat keskeytykset ovat keskimääräiseltä kestoltaan suunnilleen samaa suuruusluokkaa (12–15 %), kun taas kokoonpanon omien asennuspoikkeamien aiheuttamat keskeytykset ovat selvästi lyhyimpiä (3 %). Keskihajonnan perusteella suunnittelu- ja laatupoikkeamista aiheutuneiden keskeytysten pituudet vaihtelevat hieman enemmän kuin muista syistä aiheutuneiden keskeytysten pituudet. Ko-

konaisuutena voidaan kuitenkin todeta, että kokoonpanon keskeytykset ovat olleet kokoonpanon keskimääräiseen läpimenoaikaan nähden kestoltaan suhteellisen lyhyitä, eivätkä keskeytykset ainakaan puhtaasti tämän datan perusteella yksinään selitä pitkiä ja vaihtelevia läpimenoaikoja.

Työnjohtajien ja tuotannonjohdon kanssa käydyissä keskusteluissa kuitenkin painotettiin, että oli keskeytyksen pituus mikä tahansa, niin keskeytykset vaikuttavat lähes aina myös muiden kuin keskeytyneiden projektien kokoonpanoon ja läpimenoaikaan. Tämä johtuu siitä, että kokoonpantavat laitteet ovat kooltaan suuria ja uuden työn aloittaminen keskeytyneen tilalle vie aina suhteellisen paljon aikaa. Monesti varsinkin lyhyiden keskeytysten kohdalla käykin niin, ettei keskeytyneen laitteen tilalle edes oteta uutta työtä, jos tiedetään, että keskeytys loppuu lähiaikoina. Tämän seurauksena kokoonpanossa keskeytynyt projekti pysäyttää usein koko tuotantolinjan tekemisen, minkä vuoksi myös keskeytyneen projektin perässä tulevien projektien läpimenoajat kasvavat ja koko tuotantolinjan vaihtelu lisääntyy.

Työnjohtajien mukaan erityisen haitallisiksi kokoonpanon tekemisen kannalta koetaan juuri lyhyet keskeytykset niiden suuren määrän vuoksi. Projektit pitää lyhyenkin keskeytysten vuoksi aloittaa kokoonpanossa useaan kertaan, mikä heikentää tehokkuutta ja lisää sekä fyysisiä, että henkisiä asetusajoja. Pitkät keskeytykset koettiin siinä mielessä helpommiksi, että niiden kohdalla tilalle osattiin yleensä nopeammin ottaa seuraava projekti työn alle. Pitkät keskeytykset aiheuttavat kuitenkin suuremman riskin sille, että projektin koko toimitus myöhästyy, minkä vuoksi niiden taustalla olevat juurisyöt tulisi tarkoin ratkoa. Tässä tutkimuksessa päähuomio on kuitenkin tuotannon ohjattavuuden näkökulmasta suuressa massassa eli lyhyemmissä keskeytyksissä, joiden pituus on alle 15 % kokoonpanon keskimääräisestä läpimenoajasta.

4.6.3 Laatupoikkeamien aiheuttamat keskeytykset

Komponenttien laatuun liittyvät poikkeamat voidaan jakaa toimittajaperäisiin valmistuspoikkeamiin sekä kohdeyrityksen omiin suunnittelupoikkeamiin. Komponenttien suunnittelulla on todettu olevan vaikutusta myös komponenteissa esiintyviin valmistuspoikkeamiin, koska suunnittelijan pitäisi pystyä suunnittelemaan kappale aina siten, että sen valmistettavuus on mahdollisimman hyvä. Kohdeyrityksessä on jo ennen tämän tutkimuksen aloitusta tunnistettu tarve parantaa suunnittelun sekä oston, valmistuksen ja kokoonpanon välistä yhteistyötä ja tiedonkulkua. Kesällä 2020 käyttöön otettiin uudentyyppinen IPPR-prosessi (Integrated Product and Production Readiness), jonka tavoitteena on varmistaa, että tieto uusista komponenteista ja kokoonpanoista siirtyy aina suunnittelusta ostoon ja tuotantoon.

Tiedon kulkemisen tueksi luotiin uusi intranet pohjainen työkalu, johon suunnittelijat kirjaavat ylös uudet komponentit ja kokoonpanot, joita ei olla ennen valmistettu. Tämän jälkeen suunnittelija kirjaa mitä uusi komponentti tai muutos pitää sisällään ja linkittää tiedon uudesta komponentista toimittajalaadun tai kokoonpanon teknisille asiantuntijoille, jotka arvioivat uuden komponentin tai kokoonpanon valmistettavuutta. Tämän lisäksi strateginen ostaja tarkastelee, onko komponentti hankittavissa kilpailukykyisellä hinnalla ja toimitusajalla. Jos strateginen ostaja tai toimittajalaadun tai kokoonpanon tekninen asiantuntija huomaa, että komponentissa tai kokoonpanossa on hankinnan, valmistuksen tai kokoonpanon näkökulmasta puutteita, niin hän laittaa tästä tiedon suunnittelijalle, joka pyrkii tekemään tarvittavat korjaukset komponenttiin.

Tämän prosessin avulla komponenttien valmistettavuuden pitäisi parantua ja toimittajaperäiset laatupoikkeamat pitäisivät vähentyä. Komponentit pitäisi myös olla paremmin kokoonpantavissa kohdeyrityksen omassa kokoonpanossa, kun niiden yhteensopivuus on tarkastettu kokoonpanon teknisen asiantuntijan toimesta. Uuden prosessin vaikutukset tulevat kuitenkin näkymään kohdeyrityksen kokoonpanossa vasta suhteellisen pitkällä viiveellä, koska komponenttien saapuminen suunnittelupöydältä kokoonpanoon vie yleensä aikaa puolesta vuodesta useampiin vuosiin. Koska komponenttien laatupoikkeamiin liittyviä kehitystoimia on jo parhaillaan menossa, niin kokoonpanon keskeytysten aiheuttajista päähuomio kiinnitetään tässä tutkimuksessa komponenttipuutteisiin ja siihen, miten niiden vaikutusta kokoonpanon läpimenoaikojen vaihteluun voitaisiin vähentää.

4.6.4 Komponenttipuutteiden aiheuttamat keskeytykset

Osto-osasto sijaitsee kohdeyrityksessä toimitusketjun keskivaiheilla, mikä tarkoittaa, että ennen kuin komponentteja voidaan alkaa ostaa, tulee laite ja sen sisältämät komponentit ensin suunnitella. Joidenkin projektien kohdalla voidaan hyödyntää hyvinkin pitkälle jo olemassa olevia moduuleja ja komponentteja, kun taas koko ajan suuremmassa osassa projekteja vaaditaan jopa suuriakin määriä asiakaskohtaista suunnittelua. Mitä pidempään suunnittelu kestää, niin sitä myöhempään osto pääsee ostamaan komponentteja ja tällöin riski kokoonpanossa esiintyvälle komponenttipuutteelle suurenee.

Oston tavoitteena on saada kaikki laitteen rakentamiseen vaadittavat komponentit tehtaalte viimeistään viikkoa ennen kokoonpanon suunniteltua aloitusta (jäädytetty aloitus). Komponenttien saapumisen jälkeen varastolle on varattu vielä viikon verran aikaa kerätä kaikki laitteeseen kuuluvat komponentit kittilavoihin odottamaan kokoonpanon aloitusta.

Tällä hetkellä iso osa komponenteista saapuu tehtaalle kuitenkin vasta 0–7 päivää ennen kokoonpanon aloitusta ja monet komponentit vasta kokoonpanon aloituksenkin jälkeen. Se, mitkä komponentit aiheuttavat kokoonpanon keskeytyksen riippuu pitkälti siitä, missä vaiheessa kokoonpanoa (EKP, pääkokoonpano vai viimeistely) kyseistä komponenttia tarvitaan ja kuinka kriittinen myöhässä oleva komponentti on laitteen rakentamisen kannalta. Esimerkki erittäin kriittisestä komponentista on päämoduulin runko, jonka päälle muut komponentit kasataan, kun taas esimerkki vähemmän kriittisestä komponentista on jokin pieni komponentti, joka on helppo jälkiasentaa myöhäisemmässäkin vaiheessa kokoonpanoa.

Kokoonpanon keskeytykseksi asti päätyy yleensä vain kaikkein räikeimmät ja haitallisimmat komponenttimyöhästymät, mikä tarkoittaa, että todellinen myöhässä olleiden komponenttien lukumäärä on huomattavasti suurempi kuin kokoonpanon keskeytyksenä asti näkyvät komponenttipuutteet. Huomioitavaa on, että aiheuttipa komponentti kokoonpanon keskeytyksen tai ei, niin kaikki myöhässä olevat komponentit hankaloittavat huomattavasti tuotannonsuunnittelua ja -ohjausta. Erityisen hankalaksi tuotannonsuunnittelun ja -ohjauksen näkökulmasta koetaan myöhässä olevien komponenttien saapumisajoissa esiintyvät lukuisat muutokset. ERP-dataa tutkimalla huomattiin, että myöhässä olleiden komponenttien arvioidut saapumisajat ovat muuttuneet tarkasteluajanjaksolla keskimäärin 3,6 kertaa per komponentti. Erityisen usein komponenttien arvioidut saapumisajat muuttuvat kauempaa saapuvien komponenttien kohdalla, koska niiden kuljetusajoissa (laiva ja juna) esiintyy huomattavasti enemmän vaihtelua ja epävarmuutta kuin lähempää kohdeyritystä saapuvien komponenttien kuljetusajoissa.

Se milloin komponentit pyritään hankkimaan tehtaalle suhteessa kokoonpanon suunniteltuun aloitukseen, on jo pitkään ollut paljon keskustelua herättänyt puheenaihe erityisesti kokoonpanon toimihenkilöiden ja oston välillä. Kokoonpanon toiveena on, että komponentit pyrittäisiin hankkimaan tehtaalle jo 2 viikkoa ennen kokoonpanon suunniteltua aloitusta, koska tällöin komponenttien saapumisajoissa esiintyvä vaihtelu pystyttäisiin ottamaan paremmin huomioon ja todennäköisyyksille, että kaikki komponentit ovat käytävissä kokoonpanon aloitushetkellä olisi suurempi. Oston tavoitteena on komponenttien ajallaan saapumisen lisäksi varaston arvon pitäminen kohtuullisella tasolla. Haasteena on se, että varaston arvo kasvaa sen mukaan, mitä aikaisemmin komponentit hankitaan tehtaalle.

Oston intressit ovat siis osittain taloudellisia (toimintaan sidottu pääoma), kun taas kokoonpanon intressit ovat tyypiltään pääasiassa laadullisia koskien toimitusvarmuutta ja sen myötä yrityksen mainetta. Laadullisten tavoitteiden, kuten toimitusvarmuuden mer-

kityksen arviointi, on huomattavasti hankalampaa kuin selkeän taloudellisen mittarin, kuten varastoarvon. Toisaalta ennen kokoonpanoa olevan varaston minimointi ei välttämättä todellisuudessa pienennä toimintaan sidotun pääoman määrää, koska myöhässä saapuvat komponentit aiheuttavat yleensä sen, että kokoonpanon läpimenoaika pitenee ja varaston arvo vain siirtyy ennen kokoonpanoa olevasta varastosta kokoonpanossa olevaksi keskenkeräiseksi työksi.

Myöhässä olevia komponentteja seurataan erillisellä intranettiin rakennetulla ERP-dataan pohjautuvalla seurannalla. Seurannassa näkyy myöhässä oleva komponentti, komponentin arvioitu saapumisaika, projekti johon komponentti kuuluu, kokoonpanon suunniteltu aloitus kyseiselle projektille, aiheuttaja (kohdeyritys itse vai toimittaja) sekä ostajan vapaatekstikenttään kirjaama syy komponentin myöhästymisestä. Syykirjauksia ei ole millään tavalla kategorisoitu, ja ne perustuvat pääasiassa vain ostajan näkemykseen myöhästymisen syystä. Näiden seikkojen vuoksi myöhästymisten juurisyistä on puhtaasti nykyisen datan pohjalta hankalaa vetää sen tarkempia johtopäätöksiä.

Komponenttipuuteseurannasta voidaan kuitenkin nähdä, että 69 % kaikista komponenttipuutteista on ollut peräisin kohdeyrityksen omasta toiminnasta, mikä tarkoittaa, että jossain kohdassa yrityksen toimitusketjua on tapahtunut jotain, minkä vuoksi ostotilaus on päästy tekemään liian myöhäisessä vaiheessa. Lopuissa 31 %:ssa tapauksia komponentin myöhästymisen taustalla on ollut toimittajaperäiset haasteet, joihin yritys itse ei suoraan pysty vaikuttamaan. Syiden jakauma kertoo sen, että yrityksellä on omaa sisäistä toimintansa kehittämällä suuri potentiaali saada parannetuksi komponenttien saapumista ajallaan ja sen myötä kokoonpanon sujuvuutta.

Komponenttipuuteseurantaa tarkasteltaessa huomattiin, että komponenttipuutteiden kokonaislukumäärä oli vuonna 2018 lähes kolme kertaa suurempi kuin vuosina 2019 ja 2020, vaikka laitemäärä on pysynyt näiden vuosien aikana suurin piirtein samana. Jotta komponenttipuutteiden määrän pudotuksesta ja juurisyistä saataisiin parempi käsitys, päätettiin haastatella oston tiiminvetäjää, joka on toiminut kohdeyrityksen ostotoiminnossa jo kymmenien vuosien ajan.

Oston tiiminvetäjän kanssa käydyssä haastattelussa selvisi, että vielä ennen vuotta 2015 komponentit pyrittiin hankkimaan tehtaalle noin 2 viikkoa ennen kokoonpanon suunniteltua aloitusta, mutta varaston arvon pienentämiseksi vuosina 2015–2016 tätä aikaa lyhennettiin yhdellä viikolla siten, että kaikki laitteen sisältämät komponentit pyrittiin saamaan tehtaalle viimeistään viikkoa ennen kokoonpanon suunniteltua aloitusta. Markkinatilanne ja kohdeyrityksen oma tuotantostrategia oli kuitenkin vielä ennen vuotta 2015

hyvin erilainen kuin nykyään, koska tällöin huomattavasti nykyistä suurempi osa alihankituista komponenteista saapui tehtaalle Suomesta ja muualta suhteellisen läheltä yrityksen toimipistettä. Lisäksi kohdeyritys valmisti vielä ennen vuotta 2015 itse osan laitteeseen tulevista kriittisistä komponenteista.

Kirstyneen kilpailun ja kustannussäästöjen saamiseksi komponenttien hankinta on siirtynyt viime vuosien aikana yhä kauemmas yrityksen toimipisteestä, mikä taas on lisännyt komponenttien kuljetusajoissa esiintyvää vaihtelua. Vuosina 2015–2016 tehty komponenttien varastointimäärien ja turva-aikojen pienentäminen yhdessä muuttuneen tuotantostrategian ja markkinatilanteen kanssa aiheuttivatkin sen, että komponenttipuutteiden määrä kasvoi valtavasti ja laitteiden kokoonpano alkoi olemaan tämän vuoksi todella hankalaa.

Oston tiiminvetäjän mukaan vuoden 2018 lopulla saatiin kuitenkin lupa suurentaa varaston arvoa ja käyttöön otettiin ostotilausten optimointiohjelma, joka antaa historiadataan pohjautuvia suosituksia siitä, milloin ja minkä verran mitäkin komponenttia kannattaisi ostaa, jotta varmistutaan, että komponentit saapuvat ajallaan tehtaalle. Komponenttien varastointimäärien ja turva-aikojen lisääminen onkin oston tiiminvetäjän mukaan selvästi suurin syy komponenttipuutteiden määrän suurelle pudotukselle vuodesta 2018 vuoteen 2019 ja 2020. Myös kirjallisuudesta löytyy tukea komponenttien varastointimäärien ja turva-aikojen suurentamiselle ja esimerkiksi Hegedus & Hopp (2001) ja Manzini & Urgo (2018) totesivat, että komponenttien hankintaan liittyvien varmuusbufferien tiputtaminen minimiin ei välttämättä ole paras strategia asiakasohjautuvassa korkean vaihtelun tuotantoympäristössä.

Varastointimäärien ja turva-aikojen lisääminen ei kuitenkaan auta siihen, jos kohdeyrityksen toimitusketjun alkupään vaiheissa (suunnittelu ja luokitus) esiintyy poikkeamia, joiden vuoksi komponentteja päästään ostamaan niin myöhään, ettei niitä ole enää edes mahdollista saada tehtaalle kokoonpanon suunniteltuun aloitukseen mennessä. Oston tiiminvetäjän ja toimitusketjun pääsuunnittelijan mukaan suunnittelun aikataulujen venyminen on yksi selvästi yleisimpiä kohdeyrityksen omasta toiminnasta johtuvia syitä komponenttien myöhästymisille.

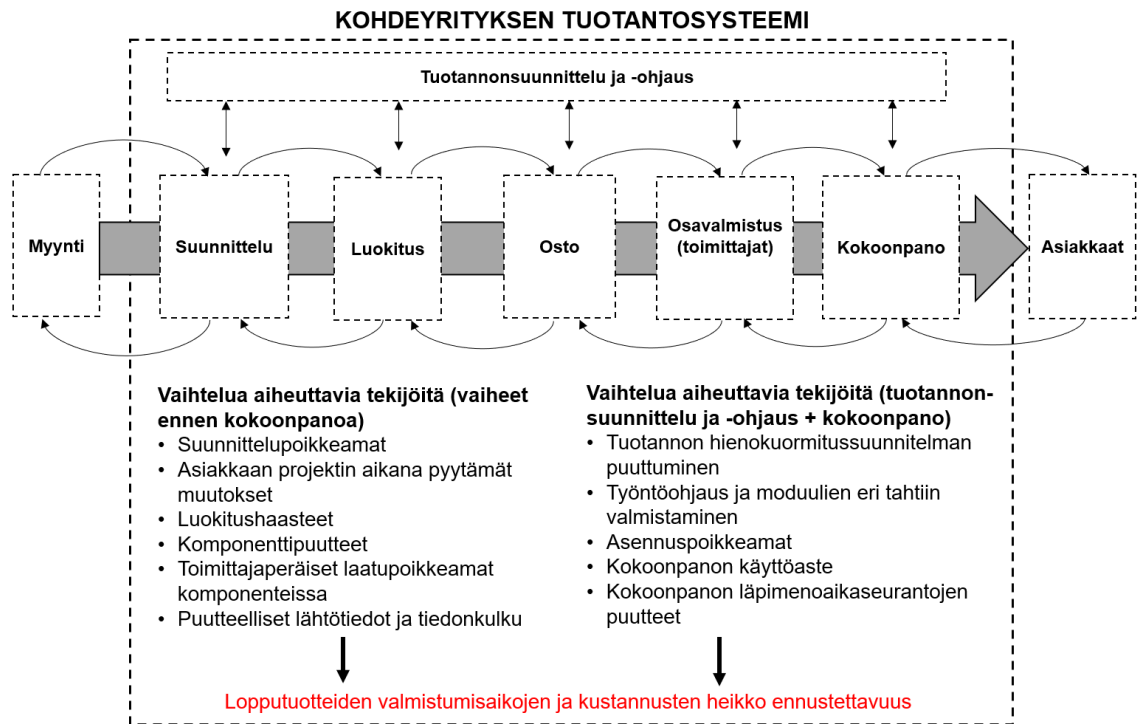
Suunnittelun myöhästymisen taustalla voi sen sijaan olla monia eri syitä. Yksi perustavaa laatua oleva juurisyy suunnittelun aikataulujen venymiselle on viime vuosien aikana kiristynyt kilpailu, joka aiheuttaa kohdeyritykselle lisää painetta hyväksyä uusia tilauksia kohdeyrityksen kannalta huonommilla ehdoilla, kuten lyhyillä toimitusajoilla ja pienemmillä katteilla. Tuotteet vaativat myös jatkuvasti enemmän ja enemmän asiakaskohtaista

räätälöintiä. Usein käy myös niin, ettei projekteja myytäessä olla välttämättä täysin ymmärretty, minkä verran asiakaskohtaista räätälöintiä myyty projekti todellisuudessa vaatii, ja kun projekti on alkanut, on suunnittelu vienyt huomattavasti odotettua enemmän aikaa. Lyhyillä toimitusajoilla myydyt projektit aiheuttavat myös lisäkiirettä suunnitteluun, mikä taas kasvattaa suunnittelu- ja osaluettelopoikkeamien mahdollisuutta.

Kesän 2020 aikana pidetyssä työpajassa nousi esille, että suunnitteluosaston mukaan erityisen paljon heidän työtään hankaloittaa juuri puutteelliset lähtötiedot eli projektin alkaessa a) ei välttämättä vielä täysin tiedetä minkälainen laite tarkalleen ottaen pitäisi suunnitella ja/tai b) huomataan, että projekti vaatii paljon enemmän suunnittelua kuin alun perin luultiin. Lähtötietojen paremmalla kommunikoinnilla ja toiminnan läpinäkyvyyden lisäämisellä voisikin olla mahdollista hallita paremmin nykyisen markkinatilanteen aiheuttamaa lisääntyntä vaihtelua.

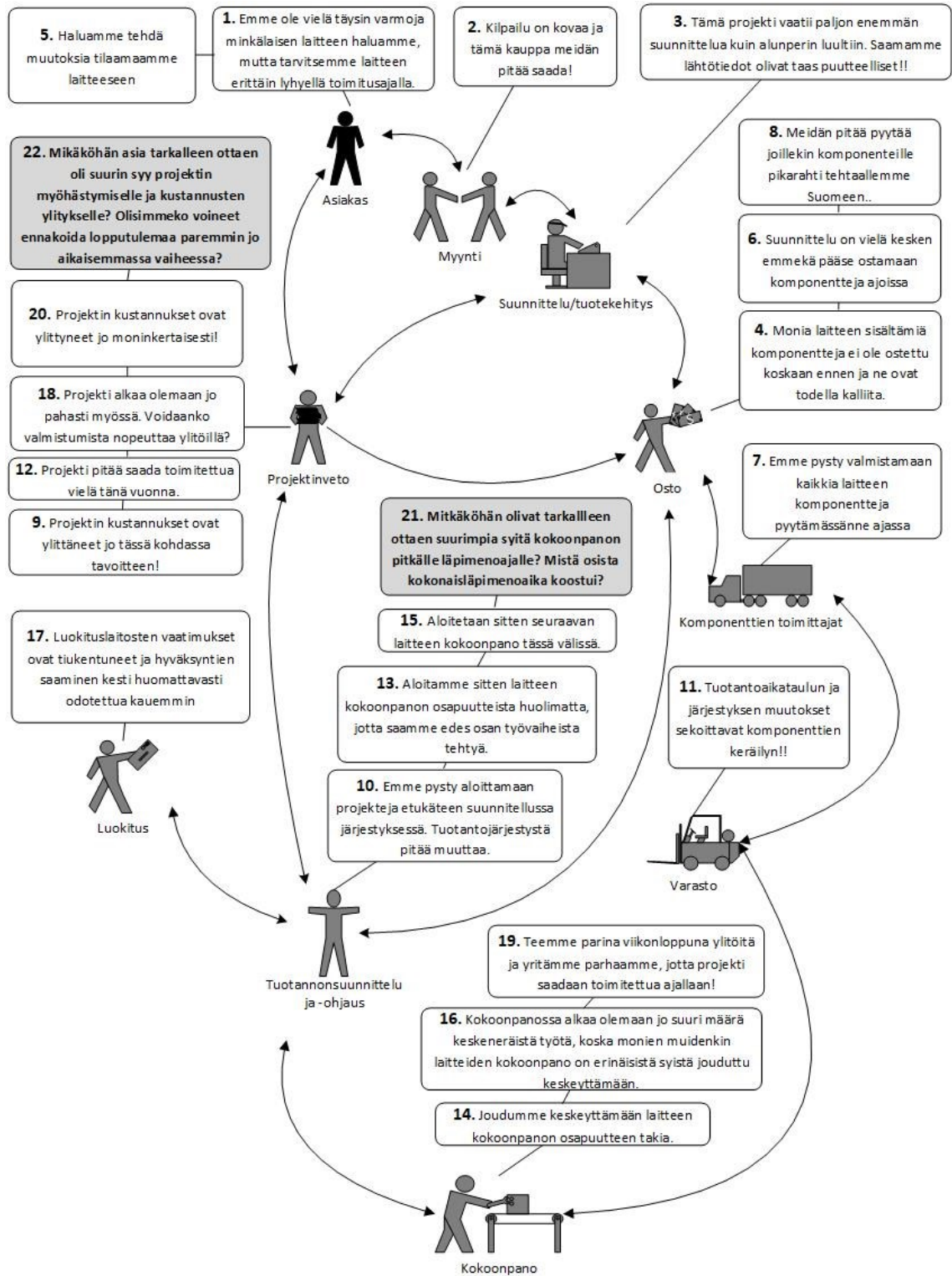
4.7 Yhteenveto tuloksista

Kohdeyrityksen tapauksessa havaittiin, että sekä kokoonpanoprosessiin sisään syötettävät panokset, että kokoonpanoprosessi itsessään aiheuttavat vaihtelua kokoonpanon läpimenoaikaan. Erityisen suuri vaikutus vaihtelun syntyyn tunnistettiin olevan toimitusketjun alkupään vaiheilla sekä käytettävillä tuotannosuunnittelu- ja ohjausperiaatteilla. Kuvassa 27 on esitetty empiiristen tulosten perusteella tehty yhteenveto keskeisimmistä vaihtelua aiheuttavista tekijöistä kokoonpanoa edeltävien vaiheiden ja kokoonpanon näkökulmasta. Vaihtelua aiheuttavat tekijät yhdessä heikentävät kustannusten sekä lopputuotteiden valmistumisaikojen ennustettavuutta ja sen myötä toimitusvarmuutta.



Kuva 27. Kohdeyrityksen kokoonpanoon vaihtelua aiheuttavia tekijöitä.

Jotta kokoonpanon läpimenoajassa esiintyvää vaihtelua ja vaihtelun syytä voitaisiin paremmin ymmärtää, tulee kohdeyrityksen tuotantoa tarkastella laajempina tuotantosysteiminä. Kohdeyrityksen toimitusketjun eri vaiheiden kanssa touko–kesäkuussa 2020 pidettyjen työpajojen ja tutkimuksen aikaisten muiden empiiristen havaintojen pohjalta tehtiin kuvan 28 piirros, jonka tarkoituksena on koota yhteen ja havainnollistaa toimitusketjun eri vaiheissa esiintyviä haasteita sekä tuoda esille miten eri vaiheet vaikuttavat toisiinsa vaiheisiin. Kuvan yksinkertaistamiseksi nuolien määrä rajoitettiin vain kaikkein kriittisimpien yhteyksien kuvaamiseen, vaikka todellisuudessa jokainen eri vaihe on jollain tavalla keskinäisriippuvuudessa toistensa kanssa.



Kuva 28. Kohdeyrityksen kokoonpanoon vaihtelua aiheuttavien tekijöiden syy-seuraussuhteiden tunnistaminen systeemijattelua hyödyntäen.

5. KEHITYSEHDOTUKSET

5.1 Toimitusketjun läpinäkyvyyden parantaminen

Selkeän kokonaiskuvan hahmottaminen toimitusketjun eri vaiheiden sujumisesta on todettu olevan erityisen haastavaa ETO-tyyppisessä tuotannossa (Little *et al.*, 2000; Mello *et al.*, 2017). Toisaalta juuri sujuva tiedonkulku ja läpinäkyvyys eri vaiheiden edistymisestä ovat avainasemassa ETO-tyyppisen toimitusketjun hallinnassa (Hicks *et al.*, 2001; Mello *et al.*, 2015).

Kohdeyrityksellä ei vielä tämän tutkimuksen aikana ollut olemassa visuaalista projektien ylätasoon seurantanäkymää, josta voitaisiin seurata toimitusketjun eri vaiheiden aikataulussa pysymistä ja eri vaiheissa ilmaantuneita haasteita. Projektin päätyttyä ei myöskään pystytty selkeästi katselmoimaan, mitkä toimitusketjun vaiheet ovat pysyneet sovitussa aikataulussa saatikka muodostamaan käsitystä, miten eri vaiheiden suoriutuminen on vaikuttanut muihin vaiheisiin. Ainoa keino tutkia jälkikäteen projektin aikana ilmenneitä haasteita on käydä läpi projektin aikaisia sähköpostikeskusteluja ja kysellä eri osastojen edustajilta projektin aikaista haasteista.

Projektien ylätasoon seurantaa varten olisi hyvä luoda selkeä visuaalinen koontinäkyvä, jonka avulla saataisiin muodostettua parempi käsitys projektien etenemisestä ja mahdollisista projektien aikana ilmenneistä poikkeamista. Seurannassa olisi hyvä näkyä kaikki meneillään olevat projektit sekä toimitusketjun eri vaiheiden (suunnittelu, luokitus, osto, hitsaamo ja kokoonpano) suoriutuminen suhteessa tavoitteeseen. Toimitusketjun eri vaiheiden suoriutuminen suhteessa tavoitteeseen ja toisiin vaiheisiin voisi olla hyvä esittää esimerkiksi Gantt-kaaviota hyödyntäen.

Visuaalinen projektin ylätasoon seurantanäkyvä helpottaisi projektien seurantaa ja antaisi paremmat edellytykset reagoida projektin aikana ilmenneisiin poikkeamiin proaktiivisesti jo projektin aikana. Seurantanäkymän avulla voitaisiin myös projektin päätyttyä huomattavasti nykyistä paremmin katselmoida, mitkä projektin vaiheet ovat sujuneet hyvin ja missä kohdissa on ollut haasteita sekä tunnistaa eri vaiheiden välisiä syvällisempiä riippuvuussuhteita.

Projektin jälkeisen katselmoinnin avulla olisi mahdollista muodostaa selkeä yleiskuva projektin kulusta ja sen myötä oppia toteutuneista projekteista (Schindler & Eppler, 2003; Bakker *et al.*, 2011). Organisaation oppimiskyvykkyys onkin nostettu monessa lähteessä yhdeksi kriittisimmistä kilpailutekijöistä varsinkin dynaamisissa ja nopeasti muuttuvissa ympäristöissä (Senge, 1990; Yang *et al.*, 1997; Marsick & Watkins, 2003; Dalkir, 2017). Organisaation oppimiskyvykkyuden ja organisaatiossa esiintyvän vaihtelun välillä on

myös todettu olevan yhteys, koska mitä parempi on organisaation kyky oppia ja ymmärtää toimintaansa vaikuttavien asioiden välisiä riippuvuussuhteita, sitä paremmin organisaatio pystyy kohdentamaan kehityspanokset sinne, missä niistä on vaihtelun vähentämisen kannalta eniten hyötyä (Deming, 1986).

5.2 Projektin lähtötiedot ja suunnittelun resurssointi

Kappaleessa 4.6.4 kerrottiin, että suunnittelupoikkeamat ja suunnittelun aikataulujen venyminen ovat yleisimpiä kohdeyrityksen omasta toiminnasta johtuvia syitä sille, että komponentit päästään ostamaan myöhässä. ETO-tyyppisen tilaus-toimitusketjun alkupään vaiheiden, kuten myynnin ja suunnittelun, kriittinen rooli toimitusketjun onnistumisen kannalta selittyy osittain sillä, että yleensä pienikin muutos tai ongelma alkupäässä saattaa kasvaa piiskavaikutuksen (bullwhip effect) tavoin suureksi ongelmaksi myöhemmissä vaiheissa, kuten kokoonpanossa (Forrester, 1961).

Tuotannossa esiintyvän vaihtelun vähentämisen näkökulmasta kehityspanokset tulisi keskittää erityisesti toimitusketjun alkupäähän. Suunnittelun kriittistä roolia ETO-tyyppisen tuotannon onnistumisen kannalta on painotettu myös monessa tutkimuksessa (Wortmann, 1992; Elfving *et al.*, 2005; Gosling *et al.*, 2009; Vaagen *et al.*, 2017). Tutkijat ovat myös havainneet, että suunnittelun aikataulut on monessa ETO-tyyppisessä yrityksessä jopa erittäin puutteellista (Little *et al.*, 2000; Grabenstetter & Usher, 2014).

Puutteelliset lähtötiedot nostettiin kohdeyrityksessä useassa kesän 2020 aikana käydyssä työpajassa yhdeksi keskeisimmäksi haasteeksi varsinkin toimitusketjun alkupäässä. Myös kirjallisuudessa on tunnistettu lähtötietojen suuri merkitys ETO-tyyppisen toimitusketjun onnistumisessa (Grabenstetter & Usher, 2014).

Lähtötietojen jakamista varten kohdeyrityksessä on jo aiemmin vuoden 2020 alussa luotu järjestelmä, josta pitäisi löytyä jo myytyjen sekä tulevien mahdollisten kauppojen eli prospectien kaikki oleelliset lähtötiedot, kuten projektin tekniset vaatimukset, projektin alustavat toimitusaikataulut ja tiedot asiakkaasta. Haasteena on kuitenkin se, että tällä hetkellä ei ole sovittuna selkeää prosessia, miten lähtötietoja käytetään ja jaetaan eri osastojen välillä erityisesti ennen virallista tilauksen saamista. Gargeya & Brady (2005) painottivatkin, että hienoimmatkin tietojärjestelmät vaativat aina tuekseen sen, että yrityksen prosessit on luotu tukemaan niiden käyttöä.

Lähtötietojen jakamiseksi ja tulevien potentiaalisten kauppojen katselmoimiseksi tulisi sopia selkeä prosessi, jonka avulla voidaan varmistua, että a) kaikilla projektin toteutukseen osallistuvilla tahoilla on hyvissä ajoin tiedossa minkälaisia teknisiä ja aikataulullisia

vaatimuksia tulevissa projekteissa on ja b) projektin toteutukseen vaadittavat suunnitteluresurssit ovat varmasti olemassa. Suunnittelun tarkemmalla resurssoinnilla ja aikataulutuksella saattaisi olla parantuneen toimitusvarmuuden lisäksi vaikutusta myös suunnittelijoiden työhyvinvointiin ja motivaatioon (Oyedele, 2010).

5.3 Komponenttipuutteiden hallinta

Komponenttien ajallaan saapuminen on keskeisessä roolissa, jotta luodussa tuotanto-suunnitelmassa on mahdollista pysyä. Monissa kokoonpanon työnjohtajien kanssa käydyissä keskusteluissa painotettiin komponenttien arvioitujen saapumisaikojen paikkansapitävyyttä ja sitä, että ne eivät saisi vaihdella niin paljon kuin tällä hetkellä (ka. 3,6 kertaa per komponentti). Kokoonpanon työnjohtajat totesivat, että komponentin myöhässä tuleminen ei ole niin haitallinen asia silloin, jos komponentin arvioitu saapumispäivä pystyttäisiin tietämään nykyistä tarkemmin. Työnjohdon toiveena olikin, että ostolta saataisiin optimistisen saapumisaika-arvion sijaan, vaikka vähän pidempi, mutta realistinen arvio myöhässä tulevien komponenttien saapumisajoista.

Oston tiiminvetäjän ja toimitusketjun pääsuunnittelijan kanssa käydyissä haastatteluissa nousi myös esille, että olisi hyvä, jos komponentit olisi jaettu esimerkiksi A, B, C ja D kategorioihin sen mukaan, missä vaiheessa niitä tarvitaan kokoonpanossa. Kategorisoinnit auttaisivat oston tiiminvetäjän mukaan ostajia priorisoimaan paremmin komponentit, jotka tarvitaan heti kokoonpanon aloituksessa ja jotka vaativat mahdollisia pikakäydytyksiä tehtaalle. Ehdotuksen perusteella komponentit päätettiin jakaa kategorioihin siten, että A-kategorian komponentit tarvitaan EKP:ssa, B-kategorian pääkokoonpanossa, C-kategorian viimeistelyssä. D-kategorian komponentit lähtevät asiakkaalle suoraan varastosta eikä niitä tarvita vielä kokoonpanon aikana. Komponenttien kategorisoinneista huolimatta tavoitteena tulee edelleen olemaan, että kaikki komponentit hankitaan tehtaalle viimeistään viikkoa ennen kokoonpanon suunniteltua aloitusta.

Kohdeyrityksessä myös tunnistettiin, että nykyistä intranetissä sijaitsevaa komponenttipuutteseurantaa pitäisi päivittää siten, että se antaisi nykyistä paremman läpinäkyvyyden mahdollisiin tuleviin komponenttipuutteisiin. Syksyn 2020 aikana päätettiinkin luoda yhdessä toimitusketjun pääsuunnittelijan kanssa määritelmä uudesta komponenttipuutteiden seurantanäkymästä, joka on tarkoitus ottaa käyttöön kevään 2021 aikana. Uuden seurantanäkymän merkittävimmät erot verrattuna nykyiseen on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Nykyisen ja uuden komponenttipuuteseurannan vertailu.

Eroavaisuus	Nykyinen seuranta	Uusi seuranta
Laajuus	Vain kokoonpanon tarvitsemat jo myöhässä olevat komponentit	Kaikki projektiin kuuluvat komponentit mukaan lukien hitsaamo ja suora lähetys. Mukana myös komponentit, jotka eivät vielä ole myöhässä, mutta ostaja on merkinnyt riskiksi.
Komponenttien luokittelu	Ei luokittelua	Komponenttien jako A, B, C ja D luokkiin sen mukaan, missä vaiheessa kokoonpanoa komponenttia tarvitaan
Komponenttipuutteiden syiden kirjaaminen	Vapaatekstikenttä	Etukäteen määritellyt juurisyykategoriat ja vapaatekstikenttä
Datan visualisointi ja mittarit	Ei visualisointia tai selkeitä mittareita	Mittarit tilanteen seurantaan. Datan visualisoiminen siten, että nähdään kehitystrendejä ja mahdollisia piileviä ongelmia.
Seurannassa näkyvä "tähtäyspiste"	Kokoonpanon suunniteltu aloitus (jäädetytty aloitus)	Kokoonpanon suunniteltu aloitus miinus 1 viikko
Ilmoitukset	Komponenttipuutteen ilmoitus vain ostajille	Komponenttipuutteen ilmoitus ostajien lisäksi myös puutteen juurisyyksi merkityn osaston vastuulliselle henkilölle

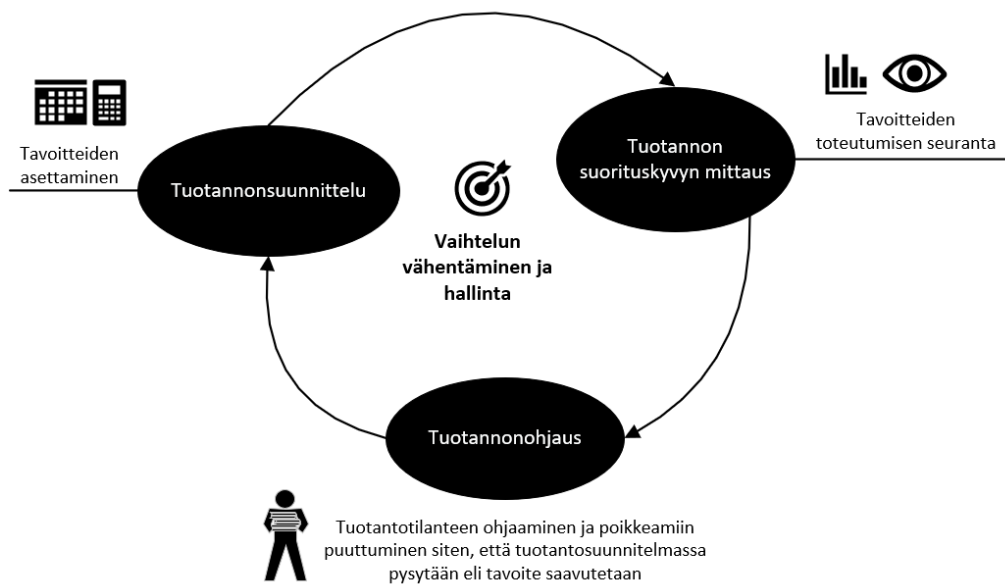
Uuden seurannan yhtenä keskeisenä tavoitteena on parantaa kohdeyrityksen ymmärrystä komponenttipuutteiden taustalla olevista juurisyistä. Tätä tavoitetta tukee uuteen seurantaan lisätyt juurisyykategoriat sekä datan visualisointi kehitystrendien ja mahdollisten piilevien ongelmien esille tuomiseksi. Jatkossa tieto komponenttipuutteesta menee ostajan lisäksi myös puutteesta vastuulliseksi merkityn osaston edustajalle.

Yksi keskeinen muutos komponenttipuuteseurannassa on myös näkyvän tähtäyspisteen muutos. Nykyisessä seurannassa näkyvissä on vain kokoonpanon suunniteltu aloitusaika. Todellisuudessa komponentit pitäisi saada tehtaalte jo viikko ennen suunniteltua aloitusta, jotta varasto ehtisi tehdä komponenttien keräilyt ajallaan. Nykyisessä seurannassa näkyvä tähtäyspiste saattaakin antaa vaikutelman, että komponentti on myöhässä vasta, kun se saapuu myöhemmin kuin kokoonpano on aloitettu. Tämän vuoksi uudessa seurannassa näkyväksi tähtäyspisteeksi laitettiin komponenttien todellinen tarveaika eli 1 viikko ennen kokoonpanon suunniteltua aloitusta.

5.4 Tuotannonsuunnittelu ja -ohjaus

5.4.1 Tuotannonsuunnittelun ja -ohjauksen kehityssykli

Kappaleessa 4.5 esitetyn kohdeyrityksen tuotannonsuunnittelun ja -ohjauksen nykytilanteen analysoinnin perusteella tultiin siihen tulokseen, että tuotannossa esiintyvän vaihtelun vähentämisen ja hallinnan näkökulmasta kohdeyrityksen tulisi kehittää kolmea tuotannon onnistumiseen keskeisesti vaikuttavaa asiaa: tuotantosuunnitelman tarkkuutta, tuotannonohjausperiaatteita sekä tuotannon suorituskyvyn mittausta. Tuotannonsuunnittelun, tuotannonohjauksen ja tuotannon suorituskyvyn mittaamisen välistä riippuvuutta on havainnollistettu kuvassa 29.



Kuva 29. Tuotannonsuunnittelun ja -ohjauksen kehityssykli.

Kirjallisuuskatsauksen ja empiiristen havaintojen myötä oivallettiin, että kyseessä on iteraatiivinen prosessi, jossa tuotannon suorituskyvyn mittaaminen ja sen pohjalta tehty tuotannonohjaus tekevät yhdessä sen, että tuotantosuunnitelma pystytään jatkossa tekemään entistä realistisemmaksi ja tarkemmaksi. Tarkka ja realistinen tuotantosuunnitelma sen sijaan tekee tuotannonohjauksesta jatkuvasti helpompaa, minkä ansiosta tuotantosuunnitelmaa pystytään päivittämään jälleen tarkemmaksi. Systeemiajattelun näkökulmasta kyseessä on systeemin toimintaan positiivisesti vaikuttava itseään vahvistava palautesilmukka (Meadows, 2008).

Tuotannonohjausta ei myöskään pystyisi suorittamaan tehokkaasti ilman selkeää tuotantosuunnitelmaa ja tuotannon suorituskyvyn mittausta. Toisaalta jos olemassa olisi vain tuotantosuunnitelma, jonka toteutumista seurattaisiin passiivisesti tuotannon suori-

tuskykymittarien avulla, niin tällöin olisi olemassa suuri riski sille, että läpimenoajat pääsisivät pikkuhiljaa kasvamaan, ja ajauduttaisiin kappaleessa 2.6.6 esiteltyyn tuotannonohjauksen noidankehään. Positiivinen silmukka vaatii näin ollen toimiakseen kaikki kolme osa-aluetta: tuotannosuunnittelu luo tuotantosuunnitelman eli asettaa koko tuotannolle ja sen eri vaiheille tavoitteet, kun taas tuotannonohjauksen tehtävänä on tuotannon suorituskyvyn mittareista saadun palautteen avulla ohjata tuotantoa siten, että tuotanto pysyy tuotantosuunnitelmassa määritellyissä tavoitteissa (Olhager & Wikner, 2000; Lödding, 2012). Edellä esitettyihin kolmeen osa-alueeseen liittyviä kehitysehdotuksia esitellään seuraavaksi tarkemmin omissa luvuissaan.

5.4.2 Tuotannon seurantojen kehitys

Tuotantosuunnitelman tekemisen ja tuotannonohjauksen näkökulmasta olisi tärkeää, että kohdeyrityksessä tiedettäisiin nykyistä paremmalla tarkkuudella se, minkä verran mikäkin työvaihe todellisuudessa vaatii aikaa. Tällä hetkellä kaikkien eri työvaiheiden läpimenoaika-arvioihin on laskettu mukaan tuntematon määrä bufferia, eikä todellinen työvaiheen vaatima läpimenoaika ole selkeästi tiedossa. Tämä tekee tuotannosuunnittelun ja -ohjaamisen sekä eri työvaiheiden valmistumisaikojen ennustamisen erittäin hankalaksi. Erityisesti Hopp & Spearman (2000) painottivat kirjassaan todellisen ja bufferoidun läpimenoajan erottamista toisistaan.

Jos eri työvaiheiden vaatimat läpimenoajat haluttaisiin todella saada selville, tulisi työvaiheiden sisältämä työmäärä selvittää esimerkiksi työntutkimuksen avulla. Työntutkimus vaatisi kuitenkin sen, että työtehtävät olisivat hyvin pitkälle standardisoituja. (Geng, 2016) Tämän tutkimuksen empiiristen havaintojen perusteella tultiin siihen tulokseen, että kohdeyrityksen tapauksessa ainakin alkuun riittäisi hyvin, jos kokoonpanon eri työvaiheille asetettaisiin edes jotkin selkeät läpimenoikatavoitteet ja tavoitteiden toteutumisen seuranta varten luotaisiin selkeä seurantanäkymä. Jo pelkästään selkeän tavoitteen asettamisella on todettu olevan taipumus parantaa tarkasteltavan kohteen suorituskykyä (Locke & Latham, 2006).

Kokoonpanon uudet työvaihekohtaiset tavoitelämpimenoajat sovittiin yhdessä työnjohdon ja tuotannonkehitystiimin kanssa ja niiden määrittelyssä hyödynnettiin tämän tutkimuksen aikaisia analyyseja eri vaiheiden toteutuneista läpimenoajoista. Työvaihekohtaisten läpimenoikatavoitteiden lisäksi kokoonpanon kokonaisläpimenoikatavoitteeseen laskettiin mukaan vielä noin 15 % puhtaasti ylimääräistä bufferia. Työvaihekohtaisia läpimenoikatavoitteita ja bufferiaikaa on hyvä myöhemmin vielä tarkentaa, kun kokoonpanon eri vaiheiden läpimenoajoista on alettu saamaan parempi käsitys.

Paremmen käsityksen saamiseksi tarvitaan kuitenkin seurantanäkymä, josta toteutuneita läpimenoaikoja voidaan helposti seurata. Kappaleessa 4.5.3 kerrottiin, että tämän tutkimuksen alussa kohdeyrityksellä oli seurannan alla vain kokoonpanon kokonaisläpimenoaika, eikä käytössä ollut erillistä seurantanäkymää, josta nähtäisiin kokoonpanon läpimenoaika työvaihekohtaisella tarkkuudella. Hyvänä puolena kuitenkin oli, että 2017 tehdyn MES-päivityksen ansiosta tieto työvaihekohtaisista läpimenoajoista oli kyllä olemassa MES-järjestelmän tietokannassa.

Tuotantotilanteen seurattavuuden parantamiseksi tutkimuksen aikana kokoonpanon käyttöön kehitettiin MES-järjestelmässä sijaitseva seurantanäkymä, josta päästään näkemään kokonaisläpimenoajan lisäksi yksittäisten työvaiheiden toteutuneet läpimenoajat suhteessa tavoitteeseen. Seurantanäkymä toimii lähes reaaliajassa ja se perustuu MES-järjestelmään tehtäviin kirjauksiin. Työnjohtajien toiveesta näkymään on myös linkitetty eri työvaiheissa ilmenneet komponenttipuutteet, laatupoikkeamat ja muut kokoonpanon tekemistä häirinneet asiat.

Uuteen seurantanäkymään tehtiin myös ominaisuus, joka antaa ennusteen koeajon aloitusajankohdasta sekä siitä, milloin kokoonpano tulisi olemaan kokonaisuudessaan valmis. Ennuste lasketaan lisäämällä laitteen tämänhetkiseen työvaiheeseen kaikkien jäljellä olevien työvaiheiden laskennallinen läpimenoaika tavoitetahtiaikoja käyttäen. Ennuste muuttuu kokoonpanon edetessä sen mukaan, miten laite on edennyt kokoonpanossa ja onko laitetypille määritellyissä tavoitetahtiajoissa pysytty. Työvaihekohtaisten läpimenoaikojen tarkempaa analysointia varten luotiin lisäksi erillinen näkymä, jossa jokaisesta työvaiheesta on tehty aikasarjatyyppinen kuvaaja, jonka avulla voidaan tarkastella miten eri työvaiheiden läpimenoajat ja läpimenoajoissa esiintyvä vaihtelu ovat kehittyneet ajan suhteen.

Tuotannonjohdolta saadun palautteen mukaan uudet seurantanäkymät helpottavat huomattavasti kokoonpanon edistymisen ja kokoonpanon aikaisten poikkeamien seurantaa. Uusien seurantojen avulla pystytään myös havaitsemaan paremmin, mitkä työvaiheet rajoittavat kokoonpanon läpimenoa ja mihin työvaiheisiin kehityspanokset olisi hyvä kohdistaa.

Jotta seurannoista saataisiin kaikki hyöty irti, tulee MES-järjestelmään tehtävät kirjaukset saada vielä huomattavasti nykyistä tarkemmiksi. Tavoitteena on, että tuotannonohjaus ja työnjohto saisivat uudesta seurannasta mahdollisimman luotettavaa ja reaaliaikaista tietoa töiden etenemisestä ja työvaihekohtaisista läpimenoajoista. Ajantasaisen ja luo-

tettavan palautteen saaminen tuotannon suoriutumisesta on todettu olevan avainasemassa, jotta tuotannonohjaus voisi päästä sille asetettuihin tavoitteisiinsa (Olhager & Wikner, 2000).

Työvaihekohtaisten läpimenoaikatavoitteiden asettaminen ja seurantanäkymän luominen ovat tärkeitä askelia kohti tuotannon parempaa hallittavuutta. Nämä eivät kuitenkaan yksinään vielä riitä, ja parannuksia tarvitaan myös tuotantosuunnitelmaan ja tuotannonohjaukseen.

5.4.3 Tuotannon hienokuormitus

Löddingin (2013) mukaan yksityiskohtaisen tuotannon hienokuormitus suunnitelman avulla voidaan varmistua, että tilausten ajallaan valmistumiseen on olemassa ainakin teoreettiset mahdollisuudet. Tarkan ja luotettavan hienokuormitus suunnitelman laatiminen vaatii kuitenkin sen, että tuotannon läpimenoajat ja käytössä oleva kapasiteetti ovat mahdollisimman tarkasti tiedossa (Lödding, 2013). Kappaleessa 4.5.1 todettiin, että nykyisenä tuotannon hienokuormitus suunnitelmana toimii intranetissä sijaitseva tuotannon ajojärjestyslista. Haasteena on, että ajojärjestyslistan avulla on hyvin hankalaa määritellä optimaalinen tuotantojärjestys ja tuotantoaikataulu, koska ajojärjestyslista on lähtökohdaisesti tarkoitettu vain tuotannon karkeakuormituksen esittämiseen.

Kohdeyrityksessä on jo useiden vuosien ajan harkittu kaupallisen hienokuormitusohjelmiston (*APS, Advanced Planning and Scheduling*) hankkimista, mutta toistaiseksi sellaista ei ole vielä hankittu. Kohdeyrityksellä on suunnitelmissa ottaa käyttöön seuraavien 3–6 vuoden aikana uusi ERP-järjestelmä sekä samassa yhteydessä jonkinlainen tuotannon hienokuormitusohjelmisto. Tähän on kuitenkin vielä suhteellisen pitkä aika, eikä tulevaisuudessa mahdollisesti käyttöön otettava hienokuormitusohjelmisto auta tämän hetken tuotannonohjauksellisiin haasteisiin.

Tuotannonohjauksesta vastaava työnjohtaja ja tuotantojohtaja nostivatkin esille, että tuotannon käyttöön olisi hyvä saada jo ennen uuden ERP:n ja APS:n käyttöönottoa edes jonkinlainen yksinkertainen hienokuormitustyökalu, jonka avulla tuotantosuunnitelma saataisiin esitettyä esimerkiksi Gantt-tyyppisessä janamuodossa. Tuotannonsuunnittelua käsittelevissä empiirisissä tutkimuksissa on havaittu, että myös hyvin yksinkertaisen hienokuormitustyökalun avulla voidaan saavuttaa hyviä tuloksia, kunhan suunnittelutoiminta on systemaattista ja suunnittelun lähtötietona käytettävät parametrit ja laskukaavat ovat tuotantotilanteeseen sopivia (Jonsson & Mattsson, 2003; Tenhiälä, 2011).

Siirtymävaiheen ajaksi tuotannon käyttöön aloitettiin tutkimuksen lopussa luomaan yksinkertaista Excel-pohjaista hienokuormitustyökalua, jonka avulla nykyisessä tuotannon

ajojärjestyslistassa olevat tiedot saadaan esitettyä visuaalisessa janamuodossa. Hienokuormitustyökaluun on tarkoitus myös luoda joitakin sääntöjä, joiden avulla saadaan indikoitua tuotantosuunnitelmassa olevat mahdolliset ristiriidat ja kapasiteettirajoitteet. Hienokuormitustyökalua on tarkoitus tämän tutkimuksen jälkeen kehittää vielä siten, että se ottaisi MES-järjestelmästä saatavan datan avulla huomioon myös tuotannon nykyisen kuormitustilanteen sekä mahdolliset komponenttipuutteet.

Kohdeyrityksen tapauksessa tuotantojärjestyksen määrittelyssä voisi olla hyvä käyttää EDD-sääntöä, jossa seuraavaksi valmistettavaksi tilaukseksi valitaan se tilaus, jonka toimituspäivään on vähiten aikaa. EDD-säännön on todettu olevan hyvä ratkaisu, jos tuotannon kuormitustilanne on suhteellisen matala ja toimitusvarmuus erittäin tärkeä mittari (Baker, 1984; Rajendran & Holthaus, 1999). Lisäksi kohdeyrityksen sisäisestä logistikasta vastaavan henkilön kanssa käydyssä haastattelussa nousi esille, että tuotannon hienokuormitussuunnitelmaan tehtävät muutokset tulisi minimoida, kun kokoonpanon aloitukseen on aikaa alle 2 viikkoa, koska muuten muutokset saattavat vaikuttaa varaston toimintaan ja komponenttien keräilyyn.

Tuotantosuunnitelma ja uudet työvaihekohtaiset läpimenoaikatavoitteet on myös tärkeä kommunikoida selkeästi aina työntekijätasolle asti. Paremman läpinäkyvyyden ja kommunikoinnin avulla kappaleessa 4.4 esitetyt työnantajan ja tuotannon työntekijöiden erilaiset tarpeet ja tavoitteet olisi mahdollista saada paremmin kohtaamaan. Kun tavoitteet ovat selkeitä ja yhteisiä, niin tällöin matalallakaan käyttöasteella ei pitäisi jatkossa olla niin suurta vaikutusta läpimenoaikoihin.

5.4.4 Tuotannonohjausperiaatteiden muuttaminen

Uuden tuotannon hienokuormitussuunnitelman tarkoituksena on lopulta vain esittää tuotantosuunnitelma nykyistä visuaalisemmassa muodossa sekä antaa paremmat mahdollisuudet tunnistaa suunnitelmassa olevia ristiriitoja jo ennen tuotannon aloittamista. Tuotannonohjauksen tehtäväksi jää lopulta huolehtia tehdyn suunnitelman toteutuksesta. Useassa eri kirjallisuuslähteessä on todettu, että tuotantosysteemiin sisään syötettävien uusien töiden rajoittaminen tuotannon kuormitustilanteen mukaan on yksi tehokkaimpia keinoja, joilla tuotannonohjaus voi vaikuttaa tuotannon läpimenoaikoihin ja niiden vaihteluun sekä tämän myötä tuotantosuunnitelman toteutumiseen (Bechte, 1988; Hopp & Spearman, 2004; Thürer *et al.*, 2017). Tuotannon kuormituksen huomioon ottavia imuohjaukseen perustuvia tuotannonohjausmenetelmiä on olemassa lukuisia erilaisia ja yritykselle parhaiten sopiva tuotannonohjausmenetelmä riippuu pitkälti yrityksen tuotantotyy-
pistä ja tuotannolle asetetuista tavoitteista (Stevenson *et al.*, 2005).

Kappaleessa 2.6 kerrottiin, että DBR-menetelmä soveltuu parhaiten tuotantoon, jossa on yksi selkeä pullonkaula. WLC-periaatteeseen perustuva tuotannonohjausmenetelmä, kuten LUMS COR taas soveltuu paremmin tuotantoon, jossa työasemien välinen kuormitus on tasaisempaa eikä mikään työasema erotu selkeästi tuotantoa rajoittavana pullonkaulana. (Thürer *et al.*, 2017) CONWIP-menetelmä on kaikista imuohjaukseen perustuvista tuotannonohjausmenetelmistä siinä mielessä yksinkertaisin, että siinä kontrolloinnin kohteena on vain systeemissä sisällä olevan kokonais- WIP:n määrä, eikä niinkään yksittäisten työasemien kuormitustilanne, niin kuin DBR- ja LUMS COR -menetelmissä (Hopp & Spearman, 2004).

Kohdeyrityksessä laitteiden koeajovaiheen on koettu jo pitkään olevan kokoonpanon läpimenoa rajoittava pullonkaula. Toisaalta tuotannon kehityspäällikön mukaan laitteiden koeajovaihe olikin vielä ennen vuonna 2018 tehtyä tehdasuudistusta selkeä pullonkaula, joka rajoitti tuotantotahtia, mutta tehdasuudistuksessa tehdyn koeajokapasiteetin lisäyksen ja nykyisen matalan kuormitustason vuoksi koeajon merkitys kokoonpanon pullonkaulana on pienentynyt merkittävästi. MES-järjestelmästä analysoitujen toteutuneiden läpimenoaikojen perusteellakaan koeajovaiheen ei voida sanoa olevan kokoonpanon pullonkaula.

Jos tilanne olisi se, että esimerkiksi koeajo olisi selkeä pullonkaula, joka rajoittaisi tuotantotahtia, niin tällöin DBR-menetelmä saattaisi olla kohdeyrityksen tapauksessa varteenotettava vaihtoehto käytettäväksi tuotannonohjausmenetelmäksi. Ongelmaksi kuitenkin muodostuisi se, että rummun (Drum) eli koeajon luotettavaa tuotantoaikataulua olisi äärimmäisen vaikea tehdä nykyisillä suuresti vaihtelevilla työvaihekohtaisilla läpimenoajoilla ja moduulien eriaikaisilla aloituksilla pääkokoonpanossa. Komponenttien epävarma saatavuustilanne sekä kokoonpanon aikaiset keskeytykset loisivat vielä entisestään lisähaastetta pullonkaulan tuotantoaikataulujen luomiseen ja niissä pysymiseen.

Työnjohdon kanssa käydyissä keskusteluissa nousikin esille, että uusien tuotannonohjausperiaatteiden olisi hyvä olla mahdollisimman yksinkertaisia, jotta niitä olisi helppo ymmärtää ja käyttää. Työnjohto myös mainitsi, että olisi hyvä, jos kokoonpanon aloitusperiaatteista luotaisiin selkeä prosessikaavio, jonka perusteella päätös aloituksesta voitaisiin tehdä. Myös Lödding (2013) huomautti, että tuotannonohjausperiaatteiden tulisi toimivuuden lisäksi olla niin yksinkertaisia kuin mahdollista, koska tällöin tuotannolta on helpompaa saada niiden käytölle hyväksyntä ja niiden käyttöön sitoudutaan todennäköisesti paremmin.

Kohdeyrityksen tapauksessa yksinkertainen systeemin kokonais- WIP:ä kontrolloiva tuotannonohjausmenetelmä, kuten CONWIP voisi olla toimivin ratkaisu, koska

CONWIP-menetelmän yhtenä etuna on juuri sen yksinkertaisuus ja käyttöönoton helpous (Hopp & Spearman, 2000). CONWIP-menetelmän on myös todettu soveltuvan erinomaisesti ETO- ja MTO-tyyppiseen asiakasohjautuvaan tuotantoon, jossa esiintyy paljon vaihtelua (Pound *et al.*, 2014; Thürer *et al.*, 2016).

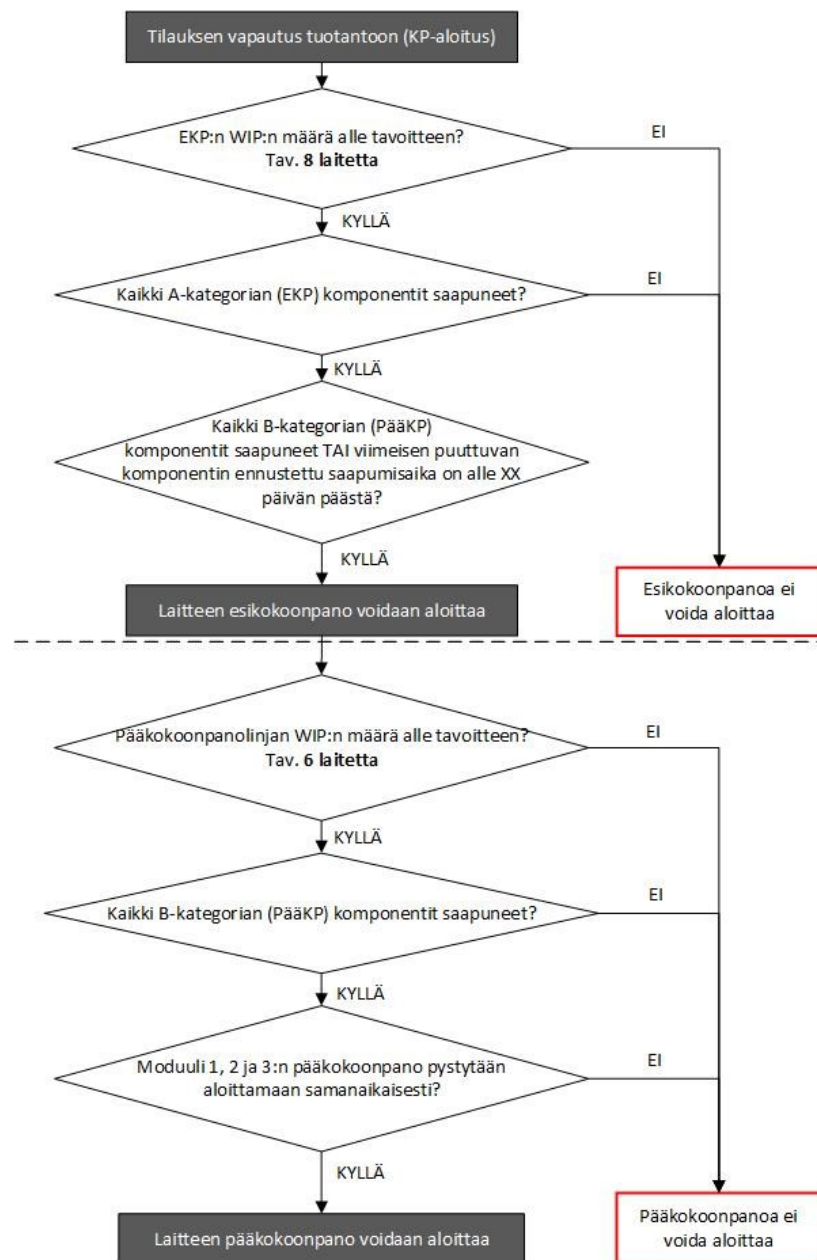
Ennen CONWIP-menetelmän käyttöönottoa pitäisi kuitenkin saada selville mikä olisi systeemin toiminnan kannalta optimaalinen WIP:n määrä. Optimaalisen WIP:n määrään määrittelyä hankaloittaa se, että työvaihekohtaiset läpimenoajat eivät ole tällä hetkellä tiedossa sillä tarkkuudella, että niiden avulla voitaisiin suorittaa WIP-tasojen tai tuotantoaikataulujen tarkempaa optimointia.

Peruslaitteiden osalta puhtaasti fyysisen tilan ja työasemien lukumäärän perusteella EKP:hen mahtuu kerralla yhteensä 4 laitetta, ykkös- ja kolmoslinjalle kumpaankin 4 laitetta, koeajoon 4 laitetta ja viimeistelyyn 8 laitetta. Tuotannonjohdon kanssa käydyissä keskusteluissa nousi esille, että EKP:n jälkeisessä bufferissa voisi olla maksimissaan neljän laitteen esikokoonpanot odottamassa linjalle pääsyä. Ykkös- ja kolmoslinjan pääkokoonpanojen jälkeisissä buffereissa olevien laitteiden maksimimäärä voisi olla 2 laitetta/linja. Näin määritellen maksimi WIP:n määrä, joka kokoonpanoon mahtuisi olisi 28 laitetta.

Vaikka koeajo ei olekaan tällä hetkellä enää selkeä pullonkaula, joka rajoittaa tuotantoahtia, niin koeajo on edelleen siinä mielessä kriittinen piste, että sen aloitusajankohta pitäisi pystyä arvioimaan luokituslaitosten paikalle kutsumisen vuoksi huomattavasti tarkemmin kuin tällä hetkellä. Kohdeyrityksen tapauksessa saattaisikin olla hyvä ratkaisu rajoittaa vain ennen koeajoa olevaa WIP:n määrää sen sijaan, että rajoitettaisiin koko kokoonpanossa olevaa WIP:iä. Tämä tarkoittaisi sitä, että koeajoa edeltäviä vaiheita ohjattaisiin imuohjauksella ja koeajon jälkeisiä vaiheita työntöohjauksella. Koeajon jälkeisten vaiheiden ohjaaminen työntöohjauksella ei pitäisi tuottaa suurempia ongelmia, koska koeajon jälkeiset viimeistelyn vaiheet ovat tahtiajaltaan huomattavasti lyhyempiä kuin koeajo ja sitä edeltävät vaiheet.

Bufferipaikat mukaan lukien EKP:n WIP-raja olisi näin ollen max. 8 laitetta ja 1- ja 3-linjojen WIP-raja olisi max. 6 laitetta/linja. WIP-rajoituksella olisi suuri vaikutus erityisesti EKP:ssä olevaan WIP:n määrään, koska EKP:n keskimääräinen WIP-määrä on ollut ison osan tutkimuksen tarkasteluajanjaksosta 20–60 % suurempi kuin nyt määritelly rajoitus. WIP-rajoitteita voidaan päivittää myöhemmin, kun työasemien läpimenoajoista ja optimaalisesta WIP:n määrästä saadaan nykyistä parempi käsitys. Nyt alkuvaiheessa tärkeintä kuitenkin on, että systeemiin sisälle syötettävien uusien töiden määrää aletaan edes jollain tasolla rajoittamaan.

Tuotannonohjausperiaatteissa olisi WIP:n rajoittamisen lisäksi hyvä ottaa huomioon, että kokoonpanoa ei aloitettaisi, jos laitteesta puuttuu vielä komponentteja. Erityisesti Ronen (1992) painotti kokoonpanon aloittamista vasta, kun kaikki laitteen valmistamiseen vaadittavat komponentit ovat saapuneet tehtaalle. Lisäksi kappaleiden 4.3 ja 4.5.2 perusteella moduulien samanaikainen aloittaminen ja eteneminen pääkokoonpanossa olisi keskeisessä roolissa, jotta läpimenoaikatavoitteisiin voitaisiin päästä. Edellä mainittujen asioiden pohjalta kohdeyritykselle luotiin yhdessä työnjohdon kanssa kuvassa 30 esitetty yksinkertainen prosessikaavio, jonka avulla päätös esikokoonpanon ja pääkokoonpanon aloittamisesta voidaan tehdä.



Kuva 30. Kohdeyrityksen kokoonpanon uudet tuotannonohjausperiaatteet.

Jatkossa komponentin puuttuessa laitteen kokoonpanoa ei joko aloiteta lainkaan tai sitten laite odottaa puuttuvia komponentteja pääkokoonpanoa edeltävässä bufferissa. Tämän pitäisi vähentää kokoonpanon aikaisia keskeytyksiä noin 25–30 %:lla, koska laitteiden kokoonpano ei enää jatkossa keskeytyisi komponenttipuutteista johtuen. Jotta pääkokoonpanoa edeltävä bufferiaika saataisiin pidettyä kohtuullisella tasolla, tulee EKP:n aloituspäätöstä tehtäessä tarkastaa myös pääkokoonpanon komponenttien saatavuustilanne ja erityisesti se, milloin viimeisen myöhässä saapuvan komponentin ennustettu saapumispäivä on suhteessa sen hetkiseen päivämäärään. Uusien tuotannonohjausperiaatteiden WIP-rajoituksia noudattamalla on myös mahdollista vähentää kokoonpanossa olevan keskeneräisen tuotannon määrää ja tämän myötä parantaa tuotannon hallittavuutta.

Uusien tuotannonohjausperiaatteiden lisäksi on tärkeää muistaa, että tuotannonohjaus vaatii aina tuekseen jatkuvasti ajantasaista ja luotettavaa tietoa tuotannon suoritumisesta. Tämän vuoksi tuotantotilanteen aktiivinen seuranta ja korjaavien toimenpiteiden teko on erittäin tärkeässä roolissa, jotta tuotanto voisi päästä tavoitteisiinsa. Gupta & Snyder (2009) huomauttivatkin, että uuden tuotannonohjausmenetelmän käyttöönoton ei voida olettaa ratkaisevan yksinään kaikkia tuotannonohjaukseen liittyviä haasteita. Ilman johdon täydellistä tukea ja osallistumista uuden menetelmän käyttöönotto voi aiheuttaa enemmän ongelmia kuin mitä se ratkaisee (Gupta & Snyder, 2009).

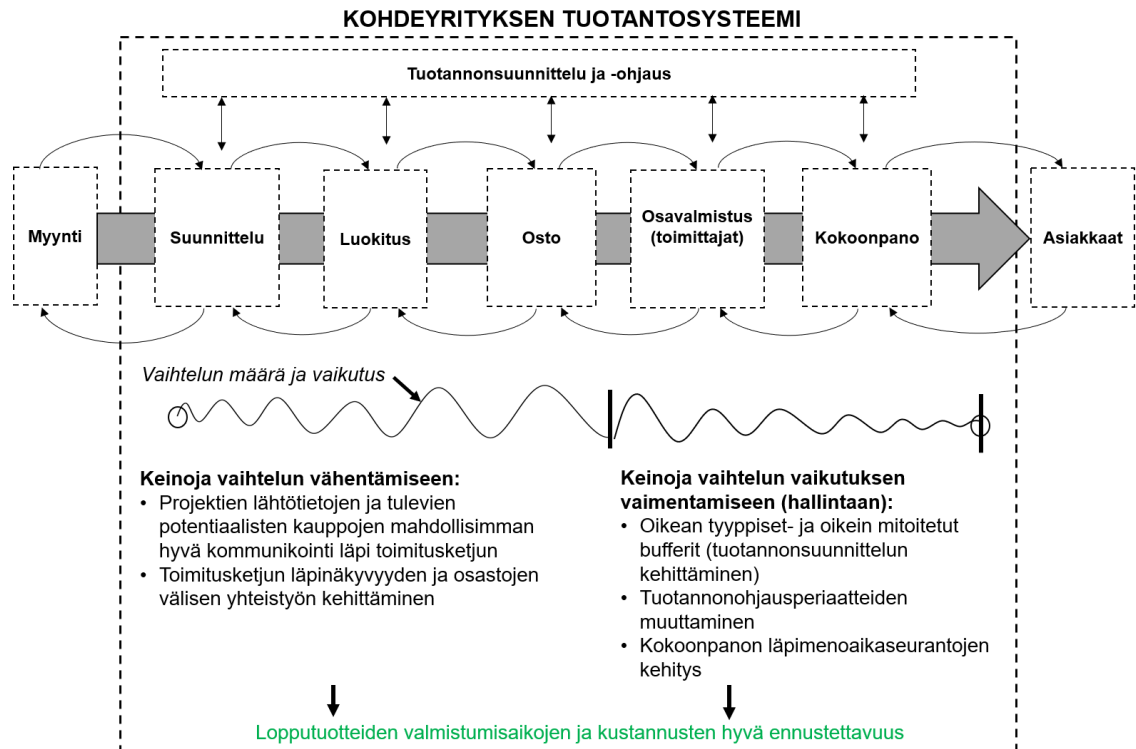
5.5 Yhteenveto kehitysehdotuksista

Taulukkoon 5 on koottu yhteen tämän tutkimuksen teoreettisten ja empiiristen löydösten perusteella esitetyt kehitysehdotukset sekä kerrottu lyhyesti ehdotuksen hyöty. Taulukossa on myös kerrottu, onko ehdotuksen tarkoituksena lähtökohtaisesti vaihtelun vähentäminen vai vaihtelun hallinta sekä tuotu esille joitakin keskeisimpiä kirjallisuuslähteitä, jotka tukevat kutakin ehdotusta.

Taulukko 5. Yhteenveto kehitysehdotuksista.

Kehitysehdotus	Hyöty	Vaihtelun vähentäminen vai hallinta	Kehitysehdotusta tukevia lähteitä
Projektin ylätasoin seurantanäkymän luominen	Parantaa ymmärrystä toimitusprojektin etenemisestä. Antaa mahdollisuuden oppia valmistuneista projekteista.	Ensisijaisesti vaihtelun hallinta, pidemmällä aikajänteellä vaihtelun vähentäminen	Deming, 1986; Gosling & Naim, 2009; Bakker et al., 2011; Mello et al., 2017
Lähtötietojen parempi kommunikointi jo ennen projektin alkamista (prospektit)	Parantaa toimitusketjun alkupään vaiheiden (erityisesti suunnittelu) valmiutta toteuttaa projektit. Parantaa koko toimitusketjun aikataulun ja kustannusten paikkaansapitäävyyttä.	Vaihtelun vähentäminen	Grabenstetter & Usher, 2014; Vaagen et al., 2017
Uusi komponenttipuutteiden seurantanäkymä ja komponenttien arvioitujen saapumisaikojen tarkennus	Parantaa ymmärrystä mahdollisista tulevista osapuutteista ja osapuutteiden juurisista. Tarkemmat arviot saapumisajoista helpottavat huomattavasti tuotannosuunnittelua ja -ohjausta.	Vaihtelun hallinta	Hicks et al., 2000; Mello et al., 2015
Tuotannonohjausperiaatteiden uudistaminen	Parantaa tuotannon hallittavuutta ja aikataulunpitoa sekä vähentää läpimenoajassa esiintyvää vaihtelua.	Vaihtelun vähentäminen ja hallinta	Hopp & Spearman, 2000; Stevenson et al., 2005; Thürer et al., 2017
Tarkempien läpimenoaika-seurantojen luominen kokoonpanoon	Ymmärretään mistä osista kokonaisläpimenoaika muodostuu. Pystytään ohjaamaan toimintaa proaktiivisesti oikeaan suuntaan, jos havaitaan poikkeamia kokoonpanon aikana.	Ensisijaisesti vaihtelun hallinta, pidemmällä aikajänteellä vaihtelun vähentäminen	Olhager & Wikner, 2000; Pound et al., 2014
Tuotannon hienokuormitustyökalun kehittäminen	Helpottaa realistisen ja toimivan tuotantosuunnitelman tekemistä.	Vaihtelun vähentäminen ja hallinta	Olhager & Wikner, 2000; Tenhiälä, 2011; Lødding, 2013

Vaihtelun vähentämisen ja hallinnan kehitystoimenpiteiden linkitys kappaleessa 4.7 esitettyihin vaihtelua aiheuttaviin tekijöihin on esitetty kuvassa 31. Vaihtelun hallinta on esitetty kuvassa ikään kuin iskunvaimentimena, jonka tarkoituksena on vaimentaa systeemistä syntyvää vaihtelua siten, että yritys voi päästä vaihtelusta huolimatta haluttuihin operatiivisiin tuloksiin.



Kuva 31. Vaihtelun vähentämisen ja hallinnan kehystoimenpiteet.

6. YHTEENVETO

6.1 Tutkimuksen kontribuutio

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli parantaa ymmärrystä siitä, mitkä tekijät aiheuttavat vaihtelua ETO-tyyppisessä tuotannossa sekä miten tuotannossa esiintyvää vaihtelua voidaan vähentää ja hallita. Vaihtelua tarkasteltiin tässä tutkimuksessa tuotannonohjauksen ja systeemijattelun näkökulmien avulla ja tutkimusmenetelmänä käytettiin yhden tapauksen tapaustudkimusta. Tutkimuksen aineistona toimi aihepiiriin liittyvä kirjallisuus, kohdeyrityksen tietojärjestelmistä kerätty arkistomateriaali sekä haastattelujen ja havainnoinnin avulla kerätty laadullinen tutkimusaineisto. Tutkimuksen kontribuutiota eli tutkimuksen avulla luotua uutta tietoa tarkastellaan seuraavaksi antamalla tiivistetyt vastaukset tutkimuksen alussa määriteltyihin kahteen tutkimuskysymykseen.

***TK1:** Mitkä tekijät aiheuttavat vaihtelua ETO-tyyppisessä asiakasohjautuvassa tuotannossa ja minkälainen vaikutus vaihtelulla on tuotannon suorituskykyyn?*

Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen vastattiin pääluvun 2 kirjallisuuskatsauksen avulla. Kirjallisuuskatsauksen keskeisimpien löydösten yhteenveto on esitetty kappaleessa 2.7. Kirjallisuuskatsauksen löydöksiä täydennettiin empiirisen osion tuloksilla, joiden yhteenveto on esitetty kappaleessa 4.7. Vaihtelulla todettiin olevan sekä teoreettisen, että empiirisen tarkastelun perusteella erittäin suuri negatiivinen vaikutus tuotannon suorituskykyyn. Vaihtelun suuri määrä tekee ETO-tyyppisestä asiakasohjautuvasta tuotannosta erittäin haastavan tuotantomuodon ja on olemassa lukuisia eri tekijöitä, jotka aiheuttavat vaihtelua ja epävarmuutta ETO-tuotantoon.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella tehdyssä synteessissä tultiin siihen tulokseen, että ETO-tyyppinen tuotantosysteemi aiheuttaa monimutkaisen ja dynaamisen luonteensa vuoksi jo itsessään valtavan määrän vaihtelua ja vaihtelun taustalla piileviä todellisia juurisyytä on usein erittäin vaikeaa tunnistaa. Systeminäkökulmasta tarkasteltuna jokainen ETO-toimitusketjun vaihe on keskinäisriippuvuudessa toistensa kanssa ja jokaisen eri vaiheen välillä voidaan nähdä olevan joko vaihtelua tasapainottava tai vaihtelua voimistava palautesilmukka. Tämän vuoksi ETO-tuotantosysteemissä vaihtelun todellisena aiheuttajana ei useinkaan ole mitään selkeää yksittäistä syytä, vaan taustalla on monia eri syitä, jotka keskinäisriippuvuuksien myötä ovat yhdessä ajan mittaan aiheuttaneet myöhemmin havaitun vaihtelun. Kirjallisuuskatsauksen perusteella tehty synteesi tuo uuden näkökulman siihen, miten ETO-tyyppistä asiakasohjautuvaa tuotantoa olisi hyvä tarkastella.

Lisäksi tutkimuksen yksi keskeinen teoreettinen kontribuutio on käyttöasteen ja läpimenoajan välisen teoriasta osittain poikkeavan yhteyden tunnistaminen. Käytännön ja teorian välinen ristiriita ilmeni, kun havaittiin, että tutkimuksen kohdeyrityksessä kokoonpanon läpimenoajalla ja sen vaihtelulla oli taipumus kasvaa kokoonpanon kuormitustason ollessa matala ja vastaavasti pienentyä, kun kuormitustaso oli korkea. Tutkimuksen aikainen empiirinen havainto on näin ollen ristiriidassa teorian kanssa, koska teorian mukaan tilanne pitäisi olla täysin päinvastainen. Tutkimuksen kohdeyrityksen tapauksessa yhtenä keskeisenä syynä käyttöasteen teoriasta poikkeavalle vaikutukselle läpimenoaikaan oli se, että kokoonpanon yksittäisille työvaiheille ei ollut määritelty selkeitä läpimenoaikataivoitteita eikä läpimenoaikojen seuranta varten ollut olemassa selkeää seurantanäkymää.

Teoreettista kontribuutiota synnytti myös havainto työntöohjauksen ja tuotannonohjauksen noidankehän suuresta vaikutuksesta ETO-tuotannon suorituskykyyn ja tuotannossa esiintyvän vaihtelun määrään. Tutkimuksen empiirisessä osassa tunnistettiin, että työntöohjauksen käyttöön kohdeyrityksessä ajoi erityisesti se, että suuren keskeytysmäärän ja epävarmuuden vuoksi projektit pyrittiin aloittamaan kokoonpanossa aina varmuuden vuoksi mahdollisimman aikaisessa vaiheessa ajatellen, että kaikki tehty työ on eteenpäin, kun projekti jossain kohdassa kuitenkin keskeytyy. Tämän tyyppinen ajattelu aiheutti kuitenkin sen, että kokoonpanossa oleva keskeneräisen työn määrä ja läpimenoajat pääsivät kasvamaan entisestään, jolloin ajaututtiin systeemin suorituskykyyn negatiivisesti vaikuttavaan tuotannonohjauksen noidankehään.

Vaihtelun ja epävarmuuden suuri määrä olivat siis keskeisiä tekijöitä työntöohjauksen käytölle ja tuotannonohjauksen noidankehän synnylle kohdeyrityksessä. Kohdeyrityksen kontekstissa tehty havainto tuotannon taipumuksesta hyödyntää työntöohjausta ja tämän myötä ajautua tuotannonohjauksen noidankehään saattaisi olla yleistettävissä koskemaan laajemminkin ETO-tyyppistä asiakasohjautuvaa tuotantoa, koska työntöohjauksen käytön ja noidankehän syntymisen laukaisijat eli vaihtelun ja epävarmuuden suuri määrä kuuluvat ETO-tyyppisen tuotannon keskeisimpiin ominaispiirteisiin.

Muita merkittäviä kohdeyrityksen tuotantoon vaihtelua aiheuttavia tekijöitä olivat suunnittelun aikataulujen venyminen, suunnittelupoikkeamat ja toimittajaperäiset laatu-poikkeamat komponenteissa. Tutkimuksessa havaittiin, että ETO-tyyppisen toimitusketjun alkupään vaiheissa tapahtuneella hyvinkin pienellä muutoksella tai virheellä saattaa olla suuri vaikutus toimitusketjun loppupään vaiheiden suorituskykyyn. Tämän tutkimuksen löydökset vahvistavat näiltä osin aiempaa aiheeseen liittyvää teoriaa, koska myös aiemmissa tutkimuksissa on tunnistettu toimitusketjun alkupään ja erityisesti suunnittelun suuri vaikutus tuotannossa esiintyvään vaihteluun.

TK2: *Miten ETO-tyyppisessä asiakasohjautuvassa tuotannossa esiintyvää vaihtelua voidaan vähentää ja hallita?*

Toiseen tutkimuskysymykseen vastattiin kirjallisuuskatsauksen ja empiirisen osion löydösten perusteella tehtyjen pääluvussa 5 esitettyjen kehitysehdotusten avulla. Tutkimuksen kohdeyrityksen tapauksessa vaihtelun vähentämisen näkökulmasta huomio tulisi kiinnittää erityisesti myynnin, suunnittelun ja oston välisen yhteistyön kehittämiseen sekä toimitusketjun läpinäkyvyyden ja tiedonkulun parantamiseen. Myös monissa aiemmissa tutkimuksissa on painotettu, että vaihtelun vähentämisen näkökulmasta panostukset olisi hyvä kohdistaa ETO-tyyppisen toimitusketjun alkupäähän sekä toimitusketjun läpinäkyvyyden parantamiseen. Tämän tutkimuksen empiiriset havainnot vahvistavat myös näiltä osin olemassa olevaa teoriaa.

Lisäksi empiirisen osion aikana huomattiin, että vaihtelun vähentäminen oli kohdeyrityksen toiminnassa ja ihmisten välisissä keskusteluissa jo nykyään toistuvasti tavalla tai toisella esillä ja toiminnan kehittämisen lähtökohtana vaikutti olevan pitkälti pyrkimys vaihtelun minimointiin. On kuitenkin tärkeää muistaa, että kompleksisuus, epävarmuus ja suuri vaihtelun määrä kuuluvat ETO-tyyppisen tuotannon ominaispiirteisiin, ja jos tuotannossa esiintyvän vaihtelun määrää haluttaisiin vähentää todella merkittävästi, niin asiakastilauksen kytkentäpisteen tulisi sijaita suunnittelun (ETO) sijaan myöhemmissä vaiheissa, kuten valmistuksessa (MTO), kokoonpanossa (ATO) tai varastossa (MTS). Tuotteiden asiakaskohtainen räätälöinti on kohdeyrityksen lisäksi monissa muissa ETO-tyyppisissä yrityksissä edelleen erittäin keskeinen kilpailukeino ja tuotantotyyppin vaihtamisella tulisi näin ollen olemaan menetettyjen kauppojen muodossa myös jonkinlainen hintalappu. Toisaalta oli tuotantotyyppi mikä tahansa niin vaihtelua tulee esiintymään aina ja kaikissa prosesseissa. Näiden seikkojen vuoksi keskeiseksi menestystekijäksi ETO-tyyppisessä asiakasohjautuvassa tuotannossa nousee se, **miten olemassa olevan suuren vaihtelun määrän kanssa pystytään tulemaan toimeen eli miten vaihtelua hallitaan.**

Tuotannonsuunnittelun ja -ohjauksen todettiin sekä kirjallisuuden, että empiiristen havaintojen perusteella olevan vaihtelun vähentämisen ja erityisesti vaihtelun hallinnan näkökulmasta erittäin suuressa roolissa. Kohdeyrityksen nykytilanteen analysoinnin perusteella tultiin siihen tulokseen, että jo hyvinkin pienillä tuotannonsuunnitteluun ja -ohjaukseen liittyvillä kehitystoimenpiteillä, kuten yksinkertaisen hienokuormitus suunnitelman tekemisellä, tuotannon läpimenoaikaseurantojen kehittämällä sekä yksinkertaisten WIP:n määrää rajoittavien tuotannonohjausperiaatteiden luomisella saattaisi olla yhdessä suuri vaikutus tuotannon suorituskykyyn ja vaihteluun. Tutkimuksessa myös ha-

vaihteluun, että systeemiajattelun avulla on mahdollista tunnistaa tuotannonohjauksen noidankehän kaltaisia mekanismeja, jotka aiheuttavat vaihtelua ETO-tyyppisen tuotantosysteemin toimintaan. Tutkimuksen empiiriset havainnot ja teoria yhdessä osoittavatkin sen, että systeemiajattelulla saattaisi olla laajempaaakin hyödyntämispotentiaalia ETO-tuotantoon vaihtelua aiheuttavien tekijöiden tunnistamisessa.

Käytännön kontribuution kannalta tutkimuksen yksi suurimmista ansioista oli se, että tutkimus onnistui parantamaan huomattavasti kohdeyrityksen ymmärrystä kokoonpanon nykyisestä suorituskyvystä, ja siitä mitkä tekijät aiheuttavat vaihtelua eli vaikuttavat negatiivisesti kokoonpanon suorituskyvyyteen. Paremman ymmärryksen myötä kohdeyrityksessä pystytään jatkossa asettamaan kehityspanokset sinne, missä niistä on vaihtelun vähentämisen ja hallinnan kannalta eniten hyötyä. Tutkimuksen aikana myös aloitettiin tekemään monia kehitystoimenpiteitä, joiden avulla vaihtelua saadaan kohdeyrityksessä tulevaisuudessa vähennettyä sekä paremmin hallittua. On kuitenkin hyvä tiedostaa, että vaihtelun vähentäminen ja ennen kaikkea vaihtelun hallintaa tukevien kyvykkyyksien kehittäminen on haastava ja aikaa vievä prosessi, johon yrityksen henkilöstön tulee johtoa myöten sitoutua useiden vuosien ajaksi.

Yhteenvedona voidaan todeta, että jatkuvasti monimutkaisemmaksi muuttuvan toimintaympäristön myötä kyky hallita suurta vaihtelun määrää saattaa tulevaisuudessa toimia jopa yhtenä ETO-tuotannon keskeisimmistä kilpailukeinoista. Tämän vuoksi on tärkeää varmistaa, että yrityksen ylätasen strategia ja tuotantostrategia ovat mahdollisimman hyvin linjassa toistensa suhteen.

6.2 Tutkimuksen arviointi ja rajoitteet

Yinin (2014) mukaan tapaustutkimuksen kriittinen arviointi voidaan suorittaa neljän kriteerin perusteella: rakenteellinen validiteetti, sisäinen validiteetti, ulkoinen validiteetti ja reliabiliteetti. Rakenteellisella validiteetilla tarkoitetaan tutkimuksen kykyä tutkia sitä, mitä oli tarkoitus tutkia. Tapaustutkimuksen rakenteellista validiteettia voidaan parantaa hyödyntämällä aineistotriangulaatiota sekä antamalla tutkimuksen valmis käsikirjoitus luettavaksi muutamalle tutkimuksen aihealueeseen keskeisimmin liittyvälle henkilölle kohdeyrityksessä. (Yin, 2014)

Tässä tutkimuksessa käytettiin aineistotriangulaatiota eli johtopäätösten tekemisessä hyödynnettiin monia erilaisia aineistoja, kuten aihepiiriin liittyvää kirjallisuutta, kohdeyrityksen tietojärjestelmistä kerättyä arkistomateriaalia sekä haastattelujen ja havainnoinnin tuloksena saatua laadullista aineistoa. Lisäksi tutkimuksessa on pyritty hyödyntä-

mään suhteellisen laajasti ja monipuolisesti aihetta käsittelevää kirjallisuutta ja kirjallisuuslähteistä suurin osa on peräisin tunnetuista tieteellisistä vertaisarvioituista aikakauslehdistä. Aineistotriangulaatio ja monipuolinen vertaisarvioitujen lähteiden käyttö vahvistavat tämän tutkimuksen rakenteellista validiteettia.

Lisäksi tutkimuksen aikaisia löydöksiä esiteltiin matkan varrella useaan kertaan eri henkilöille kohdeyrityksessä ja lopuksi lähes valmis tutkimusraportti annettiin luettavaksi ja arvioitavaksi kohdeyrityksen tuotantojohtajalle, tuotannonkehityspäällikölle ja toimitusketjun pääsuunnittelijalle. Kohdeyrityksessä tehdyn loppuarvioinnin perusteella tutkimuksen rakenteellisen validiteetin todettiin olevan hyvä ja tutkimuksen vastaavan hyvin tutkimuksen alussa määriteltyihin tutkimuskysymyksiin.

Sisäisellä validiteetilla tarkoitetaan tutkimuksen johtopäätösten ja syy-seurausketjujen paikkansapitävyyttä. Sisäiseen validiteettiin pitää kiinnittää huomiota erityisesti silloin, kun tutkimus on luonteeltaan selittävää eli kun pyritään löytämään vastauksia, miten ja miksi tyyppisiin kysymyksiin. (Yin, 2014) Tämän tutkimuksen sisäistä validiteettia heikentää kohdeyrityksen MES-järjestelmästä kerätyissä yksittäisten työvaiheiden läpimenoajoissa ja keskeytysten kestoajoissa esiintyneet tarkkuusvirheet. Aineistotriangulaatio parantaa tutkimuksen sisäistä validiteettia, koska sen avulla pystyttiin pienentämään yksittäisen tietolähteen vaikutusta tehtyihin johtopäätöksiin.

Ulkoisella validiteetilla tarkoitetaan tutkimusten tulosten yleistettävyyttä (Yin, 2014). Tämän tutkimuksen ulkoista validiteettia heikentää se, että kyseessä on yhden tapauksen tutkimus ja tapauksen ainutlaatuisuudesta johtuen tutkimustulosten yleistettävyydessä on rajoitteita. Myös tutkimuksen rajausta vaikuttaa tulosten yleistettävyyteen. Tämän tutkimuksen rajauksena oli tutkia vaihtelua ETO-tyyppisen asiakasohjautuvan tuotannon näkökulmasta, minkä vuoksi tutkimuksen tulokset eivät välttämättä ole yleistettävissä esimerkiksi MTO-tyyppiseen asiakasohjautuvaan tuotantoon. Monipuolinen vertaisarvioitujen kirjallisuuslähteiden käyttö sekä tutkimusaineiston ja kirjallisuuden väliltä löydetty monet yhtäläisyydet parantavat tämän tutkimuksen tulosten yleistettävyyttä.

Reliabiliteetilla tarkoitetaan tutkimuksen toistettavuutta eli tutkimuksen kykyä antaa johdonmukaisia tuloksia (Yin, 2014). Tavoitteena on, että muut tutkijat pystyvät toistamaan tutkimuksen noudattamalla samoja prosesseja ja menetelmiä ja lopputuloksena päättämään samoihin tuloksiin ja päätelmiin kuin aiemmassa tutkimuksessa. Tutkimuksen reliabiliteettia voidaan parantaa kuvaamalla käytetyt tutkimusmenetelmät mahdollisimman tarkasti ja läpinäkyvästi. (Yin, 2014) Tämän tutkimuksen reliabiliteettia heikentää se, että tutkimuksessa käytetty aineisto on tapauksen ainutlaatuisuuden vuoksi erittäin riippuvaista kohdeyrityksestä. Lisäksi tutkija työskenteli tutkimuksen aikana kohdeyrityksessä

vakituudessa työsuhhteessa, mikä saattoi rajoittaa tutkijan kykyä tarkastella asioita täysin objektiivisesta näkökulmasta. Tutkimuksen reliabiliteettia parantaa kuitenkin se, että käytetyt tutkimusmenetelmät ja tutkimusprosessin aikana tehdyt valinnat on pyritty perustelemaan ja kuvailemaan tutkimusraportissa mahdollisimman tarkasti.

6.3 Jatkotutkimusaiheet

Tässä tutkimuksessa ETO-tyyppisessä asiakasohjautuvassa tuotannossa esiintyvää vaihtelua tarkasteltiin tuotannonohjauksen ja systeemiajattelun näkökulmista. Tutkimuksen laajuuteen ei kuulunut vaihtelun vähentämiseen ja hallintaan liittyvien kehitysehdotusten toimivuuden testaaminen käytännössä. Tämän tutkimuksen luonnollisena jatkona olisikin tutkia esitettyjen kehitysehdotusten, kuten uusien tuotannonohjausperiaatteiden ja tuotannon paremman seurattavuuden, vaikutusta tuotannossa esiintyvään vaihteluun käytännössä. Jatkotutkimuksen kannalta olisi myös mielenkiintoista selvittää, millä tavalla matala tai korkea käyttöaste vaikuttavat tuotannon läpimenoaikaan muissa asiakasohjautuvissa tuotantoyrityksissä, ja onko mahdollista löytää jotkin käyttöasteen alaja ylärajat, joiden jälkeen läpimenoaika alkaa pienenemään tai suurenemaan.

Lisäksi ETO-tyyppisessä asiakasohjautuvassa tuotannossa on tyypillistä, että vaihtelun suuren määrän vuoksi päätöksiä joudutaan usein tekemään puutteellisilla lähtötiedoilla ja suuren epävarmuuden alla. Kirjallisuudessa on tunnistettu, että ihmisillä on taipumus tehdä kognitiivisten vinoumien vuoksi tällaisissa olosuhteissa systemaattisesti heikompia päätöksiä, kuin olosuhteissa, joissa epävarmuutta on vain vähän (Kahneman, 2003). Myös tämän tutkimuksen aikana tunnistettiin, että päätöksentekoon liittyvillä kognitiivisilla vinoumillä on vaikutusta tuotannonohjauksen noidankehän syntyyn ja sen myötä tuotannon suorituskykyyn. Vaihtelun ja epävarmuuden suuren määrän vuoksi tuotannonohjauksen noidankehä on todennäköisesti vain yksi monista ETO-tuotannon suorituskykyyn negatiivisesti vaikuttavista noidankehistä. Erilaisten noidankehien vaikutuksista ETO-tyyppisen tuotannon suorituskykyyn on kuitenkin olemassa hyvin niukalti tieteellistä tutkimusta. Jatkotutkimuksen kannalta olisikin mielenkiintoista selvittää minkälaiset muut noidankehät ovat tyypillisiä ETO-tyyppisessä asiakasohjautuvassa tuotannossa ja minkälainen vaikutus niillä on tuotannon suorituskykyyn.

LÄHTEET

- Ackoff, R. (1971). Towards a System of Systems Concepts. *Management Science*, 17(11), 661–671.
- Adrodegari, F., Bacchetti, A., Pinto, R., Pirola, F., & Zanardini, M. (2015). Engineer-to-order (ETO) production planning and control: An empirical framework for machinery-building companies. *Production Planning and Control*, 26(11), 910–932.
- Ahmed, I., & Fisher, W. W. (1992). Due Date Assignment, Job Order Release, and Sequencing Interaction in Job Shop Scheduling. *Decision Sciences*, 23(3), 633–647.
- Akkermans, H., Bogerd, P., & Vos, B. (1999). Virtuous and vicious cycles on the road towards international supply chain management. *International Journal of Operations and Production Management*, 19(5–6), 565–582.
- Amaro, G., Hendry, L., & Kingsman, B. (1999). Competitive advantage, customisation and a new taxonomy for non make-to-stock companies. *International Journal of Operations and Production Management*, 19(4), 349–371.
- Andersson, C., & Bellgran, M. (2015). On the complexity of using performance measures: Enhancing sustained production improvement capability by combining OEE and productivity. *Journal of Manufacturing Systems*, 35, 144–154.
- Arnold, R. D., & Wade, J. P. (2015). A definition of systems thinking: A systems approach. *Procedia Computer Science*, 44(C), 669–678.
- Axsäter, S. (2005). Planning order releases for an assembly system with random operation times. *OR Spectrum*, 27(2–3), 459–470.
- Backlund, A. (2000). The definition of system. *Kybernetes*, 29(4), 444–451.
- Baker, K. (1984). Sequencing Rules and Due-Date Assignments in a Job Shop. *Management Science*, 30(9), 1093–1104.
- Bakker, R. M., Cambré, B., Korlaar, L., & Raab, J. (2011). Managing the project learning paradox: A set-theoretic approach toward project knowledge transfer. *International Journal of Project Management*, 29(5), 494–503.
- Ballard, H. G. (2000). The last planner system of production control. Dr.Tech. thesis. University of Birmingham.
- Bechte, W. (1988). Theory and practice of load-oriented manufacturing control. *International Journal of Production Research*, 26(3), 375–395.
- Behn, R. D. (2003). Why Measure Performance? Different Purposes Require Different Measures. *Public Administration Review*, 63(5), 586–606.
- Bendul, J. (2019). Understanding the meaning of human perception and cognitive biases for production planning and control. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2201–2206.
- Bendul, J., & Knollmann, M. (2016). The Lead Time Syndrome of Manufacturing Control: Comparison of Two Independent Research Approaches. *Procedia CIRP*, 41, 81–86.

- Bertrand, J. W. M., & Muntslag, D. R. (1993). Production control in engineer-to-order firms. *International Journal of Production Economics*, 30–31, 3–22.
- Birkie, S. E., & Trucco, P. (2016). Understanding dynamism and complexity factors in engineer-to-order and their influence on lean implementation strategy. *Production Planning and Control*, 27(5), 345–359.
- Birkie, S. E., Trucco, P., & Kaulio, M. (2017). Sustaining performance under operational turbulence: The role of Lean in engineer-to-order operations. *International Journal of Lean Six Sigma*, 8(4), 457–481.
- Blackstone, J.H., Phillips, D.T., Hogg, G.L., (1982). A state-of- the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations. *International Journal of Production Research*, 20(1), 27-45.
- Caputo, A. C., & Pelagagge, P. M. (2011). A methodology for selecting assembly systems feeding policy. *Industrial Management and Data Systems*, 111(1), 84–112.
- Carvalho, A. N., Oliveira, F., & Scavarda, L. F. (2016). Tactical capacity planning in a real-world ETO industry case: A robust optimization approach. *International Journal of Production Economics*, 180, 158–171.
- Cochran, D. S., & Dobbs, D. C. (2002). Evaluating manufacturing system design and performance using the manufacturing system design decomposition approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 20(6), 390–404.
- Crawford, L., & Pollack, J. (2004). Hard and soft projects: A framework for analysis. *International Journal of Project Management*, 22(8), 645–653.
- Dalkir, K. (2017). *Knowledge management in theory and practice*. Cambridge, Massachusetts: MIT press.
- Davenport, T. H. (1993). *Process innovation: reengineering work through information technology*. Boston: Harvard Business School Press.
- De Treville, S., Shapiro, R. D., & Hameri, A. P. (2004). From supply chain to demand chain: The role of lead time reduction in improving demand chain performance. *Journal of Operations Management*, 21(6), 613–627.
- Deblaere, F., Demeulemeester, E., & Herroelen, W. (2011). Proactive policies for the stochastic resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 214(2), 308–316.
- Deming, W. E. (1986). *Out of the crisis*. Cambridge, Massachusetts: MIT, Center for Advanced Engineering Study.
- Doggett, A. M. (2005). Root Cause Analysis: A Framework for Tool Selection. *Quality Management Journal*, 12(4), 34–45.
- Dooley, K. J., & Van De Ven, A. H. (1999). Explaining Complex Organizational Dynamics. *Organization Science*, 10(3), 358–372.
- D'Souza, D. E., & Williams, F. P. (2000). Toward a taxonomy of manufacturing flexibility dimensions. *Journal of Operations Management*, 18(5), 577–593.
- Elfving, J. A., Tommelein, I. D., & Ballard, G. (2005). Consequences of competitive

- bidding in project-based production. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 11(4), 173–181.
- Elgh, F. (2012). Decision support in the quotation process of engineered-to-order products. *Advanced Engineering Informatics*, 26(1), 66–79.
- Fisher, M. L. (1997). What is the right supply chain for your product? *Harvard business review*, 75, 105–117.
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Forrester, J. W. (1994). System dynamics, systems thinking, and soft OR. *System Dynamics Review*, 10(2–3), 245–256.
- Framinan, J. M., González, P. L., & Ruiz-Usano, R. (2003). The CONWIP production control system: Review and research issues. *Production Planning and Control*, 14(3), 255–265.
- Fry, T. D., Karwan, K. R., & Steele, D. C. (1991). Implementing DBR to control manufacturing lead times. *The International Journal of Logistics Management*, 2(1), 12–18.
- Galbraith, J.R. (1973). *Designing Complex Organizations*. Reading MA: Addison-Wesley.
- García, J. G., Gallego-García, S., & García-García, M. (2020). Development of a pull production control method for ETO companies and simulation for the metallurgical industry. *Applied Sciences*, 10(1), 1–15.
- Gargeya, V. B., & Brady, C. (2005). Success and failure factors of adopting SAP in ERP system implementation. *Business Process Management Journal*, 11(5), 501–516.
- Geng, H. (2016). *Manufacturing Engineering Handbook*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education.
- Gilland, W. G. (2002). A simulation study comparing performance of CONWIP and bottleneck-based release rules. *Production Planning and Control*, 13(2), 211–219.
- Goldratt, E.M. and Cox, J. (1984). *The Goal*. New York: North River Press.
- Gosling, J., & Naim, M. M. (2009). Engineer-to-order supply chain management: A literature review and research agenda. *International Journal of Production Economics*, 122(2), 741–754.
- Grabenstetter, D. H., & Usher, J. M. (2014). Developing due dates in an engineer-to-order engineering environment. *International Journal of Production Research*, 52(21), 6349–6361.
- Gupta, M., & Snyder, D. (2009). Comparing TOC with MRP and JIT: A literature review. *International Journal of Production Research*, 47(13), 3705–3739.
- Haeussler, S., Stampfer, C., & Missbauer, H. (2020). Comparison of two optimization based order release models with fixed and variable lead times. *International Journal of Production Economics*, 58(12), 3724–3743.
- Haug, A., Ladeby, K., & Edwards, K. (2009). From engineer-to-order to mass

- customization. *Management Research News*, 32(7), 633–644.
- Hegedus, M. G., & Hopp, W. J. (2001). Setting procurement safety lead-times for assembly systems. *International Journal of Production Research*, 39(15), 3459–3478.
- Heilala, J., & Voho, P. (2001). Modular reconfigurable flexible final assembly systems. *Assembly Automation*, 21(1), 20–28.
- Hicks, C., McGovern, T., & Earl, C. F. (2000). Supply chain management: A strategic issue in engineer to order manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 65(2), 179–190.
- Hicks, C., McGovern, T., & Earl, C. F. (2001). A Typology of UK Engineer-to-Order Companies. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 4(1), 43–56.
- Hill, T. (1993). *Manufacturing strategy: The strategic management of the manufacturing function*. London: Macmillan.
- Hirsjärvi S., Remes P., & Sajavaara P. (2009) *Tutki ja kirjoita*. Helsinki: Tammi.
- Hitomi, K. (1996). *Manufacturing systems engineering: a unified approach to manufacturing technology, production management, and industrial economics*. 2nd ed. London: Taylor & Francis.
- Holthaus, O., & Rajendran, C. (1997). Efficient dispatching rules for scheduling in a job shop. *International Journal of Production Economics*, 48(1), 87–105.
- Hopp, W. J., & Spearman M. L. (2000). *Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management*, 2nd ed. New York: Irwin/McGraw-Hill.
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2004). To pull or not to pull: What is the question? *Manufacturing and Service Operations Management*, 6(2), 133–148.
- International Standard Organization. (2008). *ISO 9000 Introduction and Support Package: Guidance on The Concept and Use of the Process Approach for Management Systems*. Iso/Tc 176/Sc 2/N 544R3, 1–12.
- ISA-95.00.01. (2005). *Enterprise - Control System Integration, Part 1: Models and Terminology*, ISA Standard.
- Jackson, M. C., & Keyes, P. (1984). Towards a System of Systems Methodologies. *The Journal of the Operational Research Society*, 35(6), 473–486.
- Jaegler, Y., Jaegler, A., Burlat, P., Lamouri, S., & Trentesaux, D. (2018). The ConWip production control system: a systematic review and classification. *International Journal of Production Research*, 56(17), 5736–5756.
- Jonsson, P., & Mattsson, S. A. (2003). The implications of fit between planning environments and manufacturing planning and control methods. *International Journal of Operations and Production Management*, 23(8), 872–900.
- Juran, J. M., & De Feo, J. A. (2010). *Juran's quality handbook: the complete guide to performance excellence*. 6th ed. McGraw-Hill Education.

- Kaban, A. K., Othman, Z., & Rohmah, D. S. (2012). Comparison of dispatching rules in job-shop scheduling problem using simulation: a case study. *International Journal of Simulation Modelling*, 11(3), 129–140.
- Kahneman, D. (2003). Maps of bounded rationality: Psychology for behavioral economics. *American Economic Review*, 93(5), 1449–1475.
- Kanet, J. J. (2004). Mean flowtime and inventory in production systems: A finite time analogue to Little's Law. *International Journal of Production Economics*, 91(1), 37–46.
- Kingman, J. F. C. (1961). The single server queue in heavy traffic. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 57(4), 902–904.
- Kingman, J. F. C. (1962). On Queues in Heavy Traffic. *Journal of the Royal Statistical Society*, 24(2), 383–392.
- Kingsman, B., & Hendry, L. (2002). The relative contributions of input and output controls on the performance of a workload control system in make-to-order companies. *Production Planning and Control*, 13(7), 579–590.
- Koho, M. (2010). Production System Assessment and Improvement - A Tool for Make-to-Order and Assemble-to-Order Companies. Dr.Tech. thesis. Tampere University of Technology.
- Lapinleimu, I. (2001). Ideal factory: theory of factory planning, produceability and ideality. Dr.Tech. thesis. Tampere University of Technology.
- Lim, S. A. H., Antony, J., & Albliwi, S. (2014). Statistical Process Control (SPC) in the food industry - A systematic review and future research agenda. *Trends in Food Science and Technology*, 37(2), 137–151.
- Little, D., Rollins, R., Peck, M., & Porter, J. K. (2000). Integrated planning and scheduling in the engineer-to-order sector. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 13(6), 545–554.
- Little, J. D. C. (1961). A Proof for the Queuing Formula: $L = \lambda W$. *Operations Research*, 9(3), 383–387.
- Little, J. D. C. (2011). Little's law as viewed on its 50th anniversary. *Operations Research*, 59(3), 536–549.
- Locke, E. A., & Latham, G. P. (2006). New Directions in Goal-Setting Theory. *Current Directions in Psychological Science*, 15(5), 265–268.
- Lödding, H. (2012). A Manufacturing Control Model. *International Journal of Production Research*, 50(22), 6311–6328.
- Lödding, H. (2013). *Handbook of Manufacturing Control: Fundamentals, Description, Configuration*. Berlin: Springer.
- Lu, H. L., Huang, G. Q., & Yang, H. D. (2011). Integrating order review/release and dispatching rules for assembly job shop scheduling using a simulation approach. *International Journal of Production Research*, 49(3), 647–669.
- Mabin, V. J., & Balderstone, S. J. (2003). The performance of the theory of constraints

- methodology: Analysis and discussion of successful TOC applications. *International Journal of Operations and Production Management*, 23(6), 568–595.
- Mackenzie, N., & Knipe, S. (2006). Research Paradigms, Methods and Methodology. *Issues in Educational Research*, 16(3), 213–231.
- Mather, H., & Plossl, G. W. (1978). Priority fixation versus throughput planning. *Production and Inventory Management Journal*, 19, 27–51.
- Maier, M. W. (1998). Architecting Principles for Systems-of-Systems. *Systems Engineering*, 1(4), 267–284.
- Manzini, M., & Urgo, M. (2018). A risk based approach to support the supplying of components in a MTO assembly process. *Journal of Manufacturing Systems*, 46, 67–78.
- Marsick, V. J., & Watkins, K. E. (2003). Demonstrating the value of an organization's learning culture: the dimensions of the learning organization questionnaire. *Advances in developing human resources*, 5(2), 132–151.
- McCarthy, I. (1995). Manufacturing classification: Lessons from organizational systematics and biological taxonomy. *Integrated Manufacturing Systems*, 6(6), 37–48.
- Meadows, D. H. (2008). *Thinking in Systems: A primer*. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing.
- Mello, M. H., Gosling, J., Naim, M. M., Strandhagen, J. O., & Brett, P. O. (2017). Improving coordination in an engineer-to-order supply chain using a soft systems approach. *Production Planning and Control*, 28(2), 89–107.
- Mello, M. H., Strandhagen, J. O., & Alfnes, E. (2015). The role of coordination in avoiding project delays in an engineer-to-order supply chain. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 26(3), 429–454.
- Melnyk, S., Denzler, D., & Fredendall, L. (1992). Variance Control vs. Dispatching efficiency. *Production and Inventory Management Journal*, 33(3), 6–13.
- Meredith, J. (1998). Building operations management theory through case and field research. *Journal of Operations Management*, 16(4), 441–454.
- Miltenburg, J. (1997). Comparing JIT, MRP and TOC, and embedding TOC into MRP. *International Journal of Production Research*, 35(4), 1147–1169.
- Miltenburg, J. (2005). *Manufacturing strategy: how to formulate and implement a winning plan*. 2nd ed. New York: Productivity Press.
- Modig, N. ja Ahlstrom, P. (2012). *This is Lean: Resolving the Efficiency Paradox*. Stockholm: Rheologica Publishing.
- Monden, Y. (1993). *Toyota Production System: An Integrated Approach to Just-In-Time*, 2nd ed. Norcross, GA: Industrial Engineering and Management Press.
- Moxnes, E. (2000). Not only the tragedy of the commons : misperceptions of feedback and policies for sustainable development. *System Dynamics Review*, 16(4), 325–348.

- Neely, A. (1999). The performance measurement revolution: Why now and what next? *International Journal of Operations and Production Management*, 19(2), 205–228.
- Noor, K. B. M. (2008). Case study: A strategic research methodology. *American Journal of Applied Sciences*, 5(11), 1602–1604.
- Nyhuis, P., & Wiendahl, H. P. (2009). *Fundamentals of production logistics: Theory, tools and applications*. Berlin: Springer-Verlag.
- Olhager, J. (2003). Strategic positioning of the order penetration point. *International Journal of Production Economics*, 85(3), 319–329.
- Olhager, J., & Wikner, J. (2000). Production planning and control tools. *Production Planning and Control*, 11(3), 210–222.
- Oyedele, L. O. (2010). Sustaining architects' and engineers' motivation in design firms: An investigation of critical success factors. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 17(2), 180–196.
- Perona, M., Cigolini, R., & Portioli, A. (1997). Order review and release strategies in a job shop environment: A review and a classification. *International Journal of Production Research*, 35(2), 399–420.
- Plate, R. (2010). Assessing individuals' understanding of nonlinear causal structures in complex systems. *System Dynamics Review*, 26(1), 19–33.
- Pollack, J. (2007). The changing paradigms of project management. *International Journal of Project Management*, 25(3), 266–274.
- Potter, A., Towill, D. R., & Gosling, J. (2020). On the versatility of Little's Law in operations management: a review and classification using vignettes. *Production Planning and Control*, 31(6), 437–452.
- Pound, E. S., Bell, J. H., & Spearman, M. L. (2014). *Factory physics for managers: How leaders improve performance in a post-lean six sigma world*. London: McGraw-Hill.
- Rahman, A. R., & Shariff N. B. M. (2003). The need for a new product development framework for engineer-to-order products. *European Journal of Innovation Management*, 6(3), 182–196.
- Rajendran, C., & Holthaus, O. (1999). Comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and jobshops. *European Journal of Operational Research*, 116(1), 156–170.
- Richmond, B. (1994). Systems thinking/system dynamics: Let's just get on with it. *System Dynamics Review*, 10(2–3), 135–157.
- Robson, C. ja McCartan, K. (2016). *Real World Research: A Resource for Users of Social Research Methods in Applied Settings*. 4th ed. Oxford: John Wiley & Sons.
- Roderick, L. M., Phillips, D. T., & Hogg, G. L. (1992). A comparison of order release strategies in production control systems. *International Journal of Production Research*, 30(3), 611–626.
- Ronen, B. (1992). The complete kit concept. *International Journal of Production Research*, 30(10), 2457–2466.

- Ronen, B., & Schragenheim, E. (1990). Drum-Buffer-Rope Shop Floor Control. *Production and Inventory Management Journal*, 31(3), 18–23.
- Rudberg, M., & Wikner, J. (2004). Mass customization in terms of the customer order decoupling point. *Production Planning and Control*, 15(4), 445–458.
- Sahin, F., & Robinson, E. P. (2002). Flow Coordination and Information Sharing in Supply Chains: Review, Implications, and Directions for Future Research. *Decision Sciences*, 33(4), 505–536.
- Saunders, M., Lewis, P. & Thornhill, A. (2009). *Research methods for business students*. 5th ed. Harlow: Prentice Hall.
- Schindler, M., & Eppler, M. J. (2003). Harvesting project knowledge: a review of project learning methods and success factors. *International journal of project management*, 21(3), 219–228.
- Selçuk, B., Fransoo, J. C., & De Kok, A. G. (2006). The effect of updating lead times on the performance of hierarchical planning systems. *International Journal of Production Economics*, 104(2), 427–440.
- Senge, P. (1990). *The Fifth Discipline*. New York: Doubleday Currency.
- Sharman, G. (1984). The rediscovery of logistics. *Harvard Business Review*, 62(5), 71–79.
- Shewhart, W. A. (1926). Quality Control Charts. *Bell System Technical Journal*, 5(4), 593–603.
- Shewhart, W. A. (1931). *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. London: Macmillan & Company.
- Slack, N., Brandon-Jones, A., & Johnston, R. (2013). *Operations Management. 7th edition*. London: Pearson Education Limited.
- Snee, R. D. (1990). Statistical thinking and its contribution to total quality. *The American Statistician*, 44(2), 116–121.
- Spearman, M. L., Woodruff, D. L., & Hopp, W. J. (1990). CONWIP: A pull alternative to kanban. *International Journal of Production Research*, 28(5), 879–894.
- Spearman, M. L., & Zazanis, M. A. (1992). Push and pull production systems. Issues and comparisons. *Operations Research*, 40(3), 521–532.
- Stavroulaki, E., & Davis, M. (2010). Aligning products with supply chain processes and strategy. *International Journal of Logistics Management*, 21(1), 127–151.
- Steele, D. C., Philipoom, P. R., Malhotra, M. K., & Fry, T. D. (2005). Comparisons between drum-buffer-rope and material requirements planning: A case study. *International Journal of Production Research*, 43(15), 3181–3208.
- Sterman, J. (2000). *Systems Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World*. New York: McGraw-Hill.
- Sterman, J. D., & Booth Sweeney, L. (2002). Cloudy skies: assessing public understanding of global warming. *System Dynamics Review*, 18(2), 207–240.

- Stevenson, M., Hendry, L. C., & Kingsman, B. G. (2005). A review of production planning and control: The applicability of key concepts to the make-to-order industry. *International Journal of Production Research*, 43(5), 869–898.
- Sun, H., & Hong, C. (2002). The alignment between manufacturing and business strategies : its influence on business performance. *Technovation*, 22(1), 699–705.
- Tangen, S. (2004). Performance measurement: From philosophy to practice. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 53(8), 726–737.
- Tenhiälä, A. (2011). Contingency theory of capacity planning: The link between process types and planning methods. *Journal of Operations Management*, 29(1–2), 65–77.
- Thürer, M., & Stevenson, M. (2018). On the beat of the drum: improving the flow shop performance of the Drum–Buffer–Rope scheduling mechanism. *International Journal of Production Research*, 56(9), 3294–3305.
- Thürer, M., Stevenson, M., & Protzman, C. W. (2016). Card-based production control: a review of the control mechanisms underpinning Kanban, ConWIP, POLCA and COBACABANA systems. *Production Planning and Control*, 27(14), 1143–1157.
- Thürer, M., Stevenson, M., & Silva, C. (2011). Three decades of workload control research: A systematic review of the literature. *International Journal of Production Research*, 49(23), 6905–6935.
- Thürer, M., Stevenson, M., Silva, C., Land, M. J., & Fredendall, L. D. (2012). Workload control and order release: A lean solution for make-to-order companies. *Production and Operations Management*, 21(5), 939–953.
- Thürer, M., Stevenson, M., Silva, C., & Qu, T. (2017). Drum-buffer-rope and workload control in High-variety flow and job shops with bottlenecks: An assessment by simulation. *International Journal of Production Economics*, 188, 116–127.
- Tjahjono, B., Ball, P., Vitanov, V. I., Scorzafave, C., Nogueira, J., Calleja, J., Minguet, M., Narasimha, L., Rivas, A., Srivastava, A., Srivastava, S., & Yadav, A. (2010). Six sigma: A literature review. *International Journal of Lean Six Sigma*, 1(3), 216–233.
- Turpin, L. (2018). A note on understanding cycle time. *International Journal of Production Economics*, 205, 113–117.
- Vaagen, H., Kaut, M., & Wallace, S. W. (2017). The impact of design uncertainty in engineer-to-order project planning. *European Journal of Operational Research*, 261(3), 1098–1109.
- Van Donk, D. P. (2001). Make to stock or make to order: The decoupling point in the food processing industries. *International Journal of Production Economics*, 69(3), 297–306.
- Vangel, M. G. (1996). Confidence intervals for a normal coefficient of variation. *The American Statistician*, 50(1), 21–26.
- Voss, C., Tsikriktsis, N., & Frohlich, M. (2002). Case research in operations management. *International Journal of Operations and Production Management*, 22(2), 195–219.

- Wheeler, D. J (2000). *Understanding variation: the key to managing chaos*. Knoxville, TN: SPC Press.
- White, P. (1992). The anthropomorphic machine: Causal order in nature and the world view of common sense. *British Journal of Psychology*, 83(1), 61–96.
- Wibowo, B. S. (2018). Managing On-Time Delivery in Engineering-to-Order Supply Chain with Buffer Time Optimization. *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)*, Yogyakarta, Indonesia, 1–5.
- Wiendahl, H. P., Cieminski, G., Begemann, C., & Nickel, R. (2006). Human Factors in Production Planning and Control. Integrating Human Aspects in Production Management. *IFIP International Conference for Information Processing*, 160, 113–125.
- Wiendahl, H. H., Von Cieminski, G., & Wiendahl, H. P. (2005). Stumbling blocks of PPC: Towards the holistic configuration of PPC systems. *Production Planning and Control*, 16(7), 634–651.
- Wight, O. (1970). Input/output control a real handle on lead time. *Production and Inventory Management*, 11(3), 9-31.
- Wikner, J., & Rudberg, M. (2005). Integrating production and engineering perspectives on the customer order decoupling point. *International Journal of Operations and Production Management*, 25(7), 623–641.
- Willner, O., Powell, D., Gerschberger, M., & Schönsleben, P. (2016). Exploring the archetypes of engineer-to-order: an empirical analysis. *International Journal of Operations and Production Management*, 36(3), 242–264.
- Winter, M., & Checkland, P. (2003). Soft systems : a fresh perspective for project management. *Civil Engineering*, 156(4), 187–192.
- Wortmann, J. C. (1992). Production management systems for one-of-a-kind products. *Computers in Industry*, 19(1), 79–88.
- Yadav, G., & Desai, T. N. (2016). Lean Six Sigma: a categorized review of the literature. In *International Journal of Lean Six Sigma*, 7(1), 2–24.
- Yan, H., Stevenson, M., Hendry, L. C., & Land, M. J. (2016). Load-Oriented Order Release (LOOR) revisited: bringing it back to the state of the art. *Production Planning and Control*, 27(13), 1078–1091.
- Yang, B., Watkins, K. E., & Marsick, Y. (2004). The Construct of the Learning Organization : Dimensions , Measurement , and Validation. *Human Resources Development Quarterly*, 15(1).
- Yang, L. R. (2013). Key practices, manufacturing capability and attainment of manufacturing goals: The perspective of project/engineer-to-order manufacturing. *International Journal of Project Management*, 31(1), 109–125.
- Yeo, K. T. (1993). Systems thinking and project management - time to reunite. *International Journal of Project Management*, 11(2), 111–117.
- Yin, R. (2014). *Case Study Research: Design and Method*. London: Sage.