

Juha-Pekka Jokela

TUOTANTOKONSEPTIN SUUNNITTELU UUDELLE TUOTESUKUPOLVELLE

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Diplomityö
Tarkastaja: professori Minna Lanz
Tarkastaja: yliopisto-opettaja Hasse Nylund
Huhtikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Juha-Pekka Jokela: Tuotantokonseptin suunnittelu uudelle tuotesukupolvelle
Diplomityö, 80 sivua
Tampereen yliopisto
Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2021

Tämän työn tavoitteena oli selvittää, minkälaisia vaihtoehtoisia tuotantokonsepteja on kohdeyrityksen uuden sukupolven laitteille ja mikä niistä olisi paras yrityksen tarpeisiin. Tarve uudelle tuotantokonseptille on lähtöisin uusien tuotteiden modulaarisuuden ja yhtenäisen suunnittelun tarjoamasta kehityspotentialista, jota ei ole nykyisellään saatu täysin hyödynnettyä.

Tutkimusmenetelminä käytettiin kirjallisuuskatsausta, asiantuntijatyöpajoja, data-analyysia ja simulointia. Teoriaosuudessa esitellään kirjallisuuskatsauksen avulla kohdeyrityksen kaltaisen tuotannon erityispiirteitä ja sen kehittämisen lähtökohtia. Asiantuntijatyöpajat ja data-analyysi olivat merkittävässä roolissa yksityiskohtaisen tiedon hankkimisessa. Diplomityön empiirisessä osuudessa perehdyttiin kohdeyrityksen tuotantoon ja tuotteisiin sekä suunniteltiin vaihtoehtoisia ratkaisuja uudeksi tuotantokonseptiksi. Eri tuotantokonsepteja analysoitiin kohdeyritystä varten luodulla vertailukriteeristöllä ja Tecnomatix Plant Simulation -ohjelmalla. Vertailun ja simuloinnin perusteella valittiin paras tuotantokonsepti ja sitä kehitettiin iteroivassa prosessissa paremmaksi yhdessä kohdeyrityksen kanssa.

Parhaaksi tuotantokonseptiksi todettiin kokoonpanolinja, jossa linjan asemat ja asentajat erikoistuvat eri tehtäviin. Lisäksi eturunko ja sen varustelu siirrettäisiin rinnakkaiseen moduulituotantoon, jolloin kokoonpanolinjan työtehtäviä saataisiin vähennettyä. Ehdotetun kokoonpanolinjan todettiin olevan tilankäytöllisesti tehokas ja lyhentävän loppukokoonpanon läpäisyäikää sekä pienentävän sen keskihajonnan vaihtelua selkeästi.

Ehdotettu kokoonpanolinja toisi merkittäviä hyötyjä esimerkiksi tuotantovolyymien ja asentajien tuottavuuden kasvun muodossa. Se vaatisi kuitenkin merkittäviä muutoksia kohdeyrityksessä, sillä laitemallien kokoonpanojärjestyksiä ja materiaalien vaiheistuksia pitäisi muuttaa. Lisäksi asentajien nykyisiä työtehtäviä ja -tapoja pitäisi muuttaa vastaamaan paremmin syntynyttä tarvetta. Usean laitemallin kokoonpanolinja tarkoittaisi että kohdeyrityksen eri osastojen täytyy sitoutua yhteiseen tavoitteeseen eli kokoonpanolinjan toimintaedellytysten varmistamiseen.

Avainsanat: Kokoonpanolinja, erikoistuminen, matalavolyyminen kokoonpanotuotanto, simulointi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Juha-Pekka Jokela: Production Concept Design for a New Product Generation
Master of Science Thesis, 80 pages
Tampere University
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering
April 2021

The aim of this work was to find out what kind of alternative production concepts are available for a new product generation of the target company. Purpose was to find out which alternative would be the best for the needs of the company. The need for a new production concept stems from the development potential offered by the modularity and integrated design of the new products, which has not yet been fully exploited.

Literature review, expert workshops, data analysis and simulation were used as research methods. The theoretical part presents the special features of production like the target company and the starting points for its development. Expert workshops and data analysis played a significant role in obtaining detailed information. In the empirical part of the thesis, the production and products of the target company were introduced and alternative solutions were designed for a new production concept. Different production concepts were analyzed using the evaluation criteria created for the target company and the Tecnomatix Plant Simulation program. Based on the comparison and simulation, the best production concept was selected and developed better in the iterative process together with the target company.

The best production concept was found to be the assembly line, where the line's stations and assemblers specialize in different tasks. In addition, the front frame and its equipment would be transferred to parallel module production, thus reducing the workload of the assembly line. The proposed assembly line was found to be spatially efficient and to shorten the lead time of the final assembly and clearly reduce its standard deviation's variation.

The proposed assembly line would bring significant benefits for example by increasing production volumes and productivity of assemblers. However, it would require significant changes in the target company, as the assembly sequences of the product models and the phasing of the materials would have to be changed. In addition, the current work tasks and habits of installers would be changed to better meet the emerging need. An assembly line for several product models would mean that the different departments of the target company must commit to a common goal, i.e. to ensure the operating conditions of the assembly line.

Keywords: Assembly line, specialization, low volume assembly production, simulation

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

ALKUSANAT

Haluan kiittää kohdeyritystä mahdollisuudesta päästä tekemään diplomityö näin mielenkiintoisesta aiheesta. Opin diplomityön tekemisen aikana enemmän kuin olisin voinut uskoa. Se oli tiivis reilun puolen vuoden projekti, joka ei olisi onnistunut yhtä hyvin ilman ohjaajieni aktiivista tukea. Haluan kiittää Joonaa Isopahkalaa, Antti Sutista ja Eerikki Virtasta aktiivisesta sparraamisesta läpi koko diplomityön teon ajan. Aihe oli laaja ja se vaati usean henkilön osallisuutta. Kiitoksen ansaitsevat myös kaikki kohdeyrityksen työntekijät, jotka olivat mukana diplomityöni teossa. Aktiivisessa roolissa olivat myös koulun ohjaajat, Hasse Nylund ja Minna Lanz, joilta sain hyvin tukea tarvittaessa.

Diplomityö on ollut työläs projekti, mutta perheen tuki on helpottanut sitä. Haluankin kiittää puolisoani Petraa tuesta diplomityön aikana. Usein asiat jäsenyivät paikalleen, kun niistä pystyi puhumaan toisen ihmisen kanssa. Matka yliopistossa alkaa olemaan loppuillaan. Se on ollut pitkä, mutta kaverit ja kesätyöt ovat tuoneet siihen runsaasti vaihtelua.

Tampereella, 26.4.2021

Juha-Pekka Jokela

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Työn tausta, tavoitteet ja rajaus	1
1.2 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne.....	3
1.3 Tutkimusmenetelmien käyttö.....	4
2. TEORIAOSUUS.....	6
2.1 Tuotannon paradigmat	6
2.1.1 Massaräätälöinti.....	6
2.1.2 Lean tuotanto.....	7
2.1.3 Ketterä tuotanto	8
2.2 Matalavolyyminen kokoonpanotuotanto	9
2.2.1 Kokoonpanojärjestelmät.....	9
2.2.2 Läpäisyajan merkitys	15
2.2.3 Vaihtelu.....	16
2.2.4 Puskurit ja varmuusvarastot.....	18
2.2.5 Joustavuus.....	19
2.2.6 Optimaalinen työntekijäresurssi	21
2.3 Kokoonpanojärjestelmän suunnittelu.....	24
2.3.1 Tuoteanalyysi.....	24
2.3.2 Tuotantoanalyysi.....	25
2.3.3 Layout.....	26
2.3.4 Suunnitteluprosessi.....	27
2.3.5 Tuotannon ohjausperiaate ja tuotannonohjaus.....	29
2.4 Kokoonpanojärjestelmien simulointi	31
2.4.1 Simulointimallin hyödyt ja heikkoudet.....	32
2.4.2 Simulointiprosessi	32
3. UUDEN TUOTANTOKONSEPTIN SUUNNITTELU.....	35
3.1 Käytetty suunnittelumalli	35
3.2 Nykyisen kokoonpanojärjestelmän analysointi	36
3.3 Tuoteanalyysi.....	38
3.3.1 Suunnittelutuotteiston luonti	38
3.3.2 Kokoonpanon kehitysehdotukset	42
3.3.3 Suunnittelutuotanto	45
3.4 Tuotantoanalyysi.....	46
3.5 Tuotantokonseptivaihtoehdot	47
3.6 Tuotantokonseptien simulointi.....	50
3.6.1 Simulointimalli.....	50
3.6.2 Simuloinnin tulokset	52
3.6.3 Simuloinnin lähtötietojen korjaukset	54
3.6.4 Häiriöanalyysi	56
3.6.5 Huomioita simuloinnista	57

4.UUSI TUOTANTOKONSEPTI.....	59
4.1 Tuotantokonseptien vertailu	59
4.2 Uusi layout	61
4.3 Tarvittavat muutokset.....	62
4.3.1 Tuotteen C kokoonpanojärjestyksen muutos.....	62
4.3.2 Esivarustusolosolun kehittäminen.....	63
4.3.3 Työntekijäressurssin ohjaus.....	65
4.4 Matalan tuotantovolyymien layout	66
5.JOHTOPÄÄTÖKSET	67
5.1 Toimenpide-ehdotukset.....	68
5.2 Synkronoidun kokoonpanolinjan hyödyt	68
5.3 Tuotantokonseptin kriittinen analysointi.....	70
5.4 Tutkimusmenetelmien kriittinen arviointi.....	72
6.YHTEENVETO.....	73
LÄHTEET	75

KUVALUETTELO

Kuva 1	Diplomityön tutkimuskysymykset, -menetelmät ja odotettavat tulokset.....	3
Kuva 2	Tutkimuksen rakenne.....	4
Kuva 3	Tuote-prosessi -matriisi layoutin valintaan, mukaillen (Ahmad & Schroeder 2002)	10
Kuva 4	Eri kokoonpanojärjestelmien vahvuudet ja heikkoudet, mukaillen (Syvänen & Niemi 2008, s. 618).....	10
Kuva 5	Paikkakokoonpanon toimintaperiaate, mukaillen (Lapinleimu 2001, s. 129)	11
Kuva 6	Kokoonpanolinjan toimintaperiaate, mukaillen (Lapinleimu et al. 1997, s. 113).....	12
Kuva 7	Erilaisia tuotantolinjoja ja niiden määritellyt tuotevalikoimat, mukaillen (Becker & Scholl 2006, s. 696).....	14
Kuva 8	Vaihtelun määrän vaikutus tuotantoon, mukaillen (Hopp & Spearman 2011, s. 295).....	17
Kuva 9	Just-In-Time -lampi, mukaillen lähdeettä (Bennett & Forrester 1993).....	19
Kuva 10	Joustavan kokoonpanon osatekijät, mukaillen lähdeettä (Asadi et al. 2015a)	20
Kuva 11	Teollisuudessa käytetty systemaattinen systeemin suunnittelumalli lähteestä (Bellgran & Säfsten 2010, s. 87)	29
Kuva 12	Tuotannon ohjausmenetelmiä, kun muuttujina ovat kysyntä ja toimitusaika, mukaillen (Harrison et al. 2014).....	30
Kuva 13	Uuden sukupolven laitteiden loppukokoonpanotunnit laitemalleittain	39
Kuva 14	Yleisten optioiden työmäärä, menekki ja työmäärän jakautuminen L-vaiheille.....	41
Kuva 15	Paikkakokoonpano monipuolisesti koulutetuilla asentajilla.....	48
Kuva 16	Kokoonpanolinja liikkuvilla asentajilla.....	48
Kuva 17	Kokoonpanolinja erikoistuneilla asentajilla	49
Kuva 18	Kokoonpanolinja erikoistuneilla asentajilla ja eturunkomodulilla.....	49
Kuva 19	Perinteisen kokoonpanolinjan (vaihtoehto 3) simulointimalli.....	51
Kuva 20	Simuloitujen tuotantokonseptien tuotantomäärät muuttuvilla parametreilla	53
Kuva 21	Simuloitujen tuotantokonseptien tuotantomäärät korjauksilla huomioiden	55
Kuva 22	Tuotantomäärät esivarustusolosuhteen aikapuskurin eri arvoilla	57
Kuva 23	Takarunkolinjan asemien työn sisältö karkealla tasolla	61
Kuva 24	Kohdeyrityksen materiaalipuskureiden kärjistetty nykytilanne	63
Kuva 25	Kohdeyrityksen materiaalipuskureiden tavoiteltu tilanne	64
Kuva 26	Työntekijöiden sijoittelu uudessa tuotantokonseptissa	65
Kuva 27	Takarunkolinjan matalan tuotantovolyymien layout.....	66

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1</i>	<i>Ehdotetut kehitysehdotukset ja niiden vaikutus läpäisy aikaan</i>	<i>43</i>
<i>Taulukko 2</i>	<i>Laitemallien ennustetut suhteelliset osuudet vuonna 2025</i>	<i>46</i>
<i>Taulukko 3</i>	<i>Tuotevalikoiman laitteet sekä niiden suhteelliset osuudet ja loppukokoonpanotunnit</i>	<i>52</i>
<i>Taulukko 4</i>	<i>Simuloitujen tuotantokonseptien käyttöasteet</i>	<i>54</i>
<i>Taulukko 5</i>	<i>Arvioidut korjaukset simulointituloksiin</i>	<i>55</i>
<i>Taulukko 6</i>	<i>Simuloitujen tuotantokonseptien tuotantoluvut</i>	<i>56</i>
<i>Taulukko 7</i>	<i>Tuotantokonseptien vertailukriteerit, niiden painotukset ja tuotantokonseptien pisteytys</i>	<i>60</i>

LYHENTEET JA TERMIT

Asiantuntijatyöpaja	Työpaja, jossa pyritään selvittämään ja ratkaisemaan ongelmia yhdessä monipuolisella asiantuntijaryhmällä
CV	Vaihtelukerroin (<i>engl. Coefficient of Variation</i>), joka kuvaa vaihtelun voimakkuutta suhteessa lukujoukon keskiarvoon
ERP	Toiminnanohjausjärjestelmä (<i>engl. Enterprise Resource Planning</i>)
Ketterä tuotanto	Termi, joka kuvaa tuotantoa, jolla on hyvä kyky reagoida suunnittelemattomiin muutoksiin
Layout	Tuotantotilojen työasemien ja resurssien sijoittelu
Lean	Johtamisfilosofia, joka keskittyy arvoa tuottamattoman toiminnan poistamiseen
Läpäisy aika	Projektin tai prosessin aloituksen ja lopetuksen välinen aika
Massaräätälöinti	Toimintatapa, joka pyrkii tuottamaan varioituvia tuotteita massatuotannon tavoin kustannustehokkaasti
Moduuli	Itsenäinen osa lopputuotetta. Modulaarinen tuote kootaan useista moduuleista
MTO	Tilausohjautuva tuotannonohjausmenetelmä (<i>engl. Make-to-Order</i>), joka ohjaa tuotantoa asiakastilausten perusteella
PDM	Tuotetiedon hallintajärjestelmä (<i>engl. Product Data Management</i>)
Simulointi	Tietokoneen avulla tapahtuva järjestelmän mallintaminen, mallin kokeellinen manipulointi ja tulosten analysointi.
Tahtiaika	Tuotantolinjalla työvaiheen suorittamiseen kuluva aika
Tuotannon kysyntävauhti	Tahti (<i>engl. takt-time</i>), jonka mukaan asiakkaat tilaavat tuotteita. Aika, jonka työvaiheen suorittaminen tuotantolinjalla, eli tahtiaika, saa enintään kestää
Tuotantokonsepti	Yläkäsite, jolla viitataan suunniteltavaan tuotantokonseptiin. Tapa järjestää tuotteen tuotanto ja tukitoimet.
Varasto-ohjaus	Tuotannonohjausmenetelmä, joka ohjaa tuotantoa varastotasojen perusteella

1. JOHDANTO

Kokoonpanojärjestelmä on valmistavan yrityksen ydin, jonka sujuvasta toiminnasta yrityksen menestys on riippuvainen. Asiakkaista halutaan pitää kiinni ja palvella mahdollisimman hyvin, mikä aiheuttaa kokoonpanojärjestelmälle haasteita. Asiakkaat odottavat tuotteiltaan suurempaa määrää ominaisuuksia ja korkeampaa laatua yhä lyhyemmillä toimitusajoilla. Kasvaneet asiakasvaateet aiheuttavat tuotantoon yhä enemmän vaihtelua, joka heikentää aina kokoonpanojärjestelmän tehokkuutta. Kokoonpanojärjestelmiltä vaaditaan yhä enemmän joustavuutta ja tehokkuutta samalla kun kustannusten pitäisi pysyä matalalla tasolla (Karrer 2012, s. 1-2).

Kokoonpanojärjestelmällä on merkittävä vaikutus yrityksen menestykseen, sillä se määrittää rajoitteet esimerkiksi tuotannon läpäisyajoille ja tuotantomäärille. Kokoonpanojärjestelmiin liittyvät päätökset ovat tärkeitä, koska ne vaativat merkittäviä investointeja ja pitkän aikavälin sitoumuksia. Se tekee myös virheiden korjaamisesta vaikeaa. Kun asiakastarpeet muuttuvat, olemassa oleva kokoonpanojärjestelmä ei välttämättä enää kykene vastaamaan niihin. Silloin on aika miettiä vaihtoehtoisten kokoonpanojärjestelmien kykyä vastata näihin asiakastarpeisiin.

Uuden kokoonpanojärjestelmän suunnittelu vaatii huolellista suunnittelua ja perehtymistä. Huonosti johdetun kokoonpanojärjestelmän suunnitteluprosessin on todettu aiheuttavan ongelmia fyysisessä kokoonpanojärjestelmässä. Onnistuneita suunnitteluprosesseja ja kehitystyötä onkin jo pitkään pidetty valmistavien yritysten kilpailuedun lähteenä. (Svensson Harari et al. 2020, s. 1043; Bellgran & Säfsten 2004, s. 17-18)

1.1 Työn tausta, tavoitteet ja rajaus

Tässä diplomityössä kehitetään uusi tuotantokonsepti, joka tarkoittaa tapaa järjestää tuotteen tuotanto ja tukitoimet. Termit tuotantojärjestelmä ja kokoonpanojärjestelmä nähtiin liian suppeina kuvaamaan kehitettävää kokonaisuutta koko laajuudessaan. Diplomityössä käytetään termiä tuotantokonsepti kuvaamaan kokonaisuutta, joka sisältää kokoonpanojärjestelmän, asentajien ohjauksen ja materiaalivirtojen suunnittelun. Termi kokoonpanojärjestelmä kuvaa lähinnä layoutin suunnittelua.

Diplomityön kohdeyritys on korkean teknologian tuotteita valmistava teollisuuskonserni, joka toimii globaalisti ympäri maailmaa. Kohdeyritys on erikoistunut tuotteidensa osa- ja

loppukokoonpanoon. Tuotteet ovat suuria ja asiakkaiden toiveiden mukaan räätälöityjä tilausohjautuvia tuotteita. Tavoitteena on kehittää uusi tuotantokonsepti kohdeyrityksen uuden sukupolven tuotteille. Uuden tuotesukupolven suunnittelun lähtökohtana oli modulaarisuus, mikä mahdollistaisi nopeamman läpäisyajan loppukokoonpanossa.

Viime aikoina kohdeyrityksen loppukokoonpanon krooniset häiriölähteet on pääosin ratkaistu ja loppukokoonpanossa on todettu olevan hyödyntämätöntä potentiaalia. Tarve uudelle tuotantokonseptille juontaa juurensa kehitysmahdollisuuksiin, joita nämä uuden sukupolven modulaariset laitteet ja niiden yhtenäinen suunnittelu tarjoavat. Nykyisellä tuotantokonseptilla kohdeyritys ei ole saanut hyödynnettyä olemassa olevaa potentiaalia. Diplomityön tutkimuskysymykset ovat:

1. Mitä vaihtoehtoisia tuotantokonsepteja on uuden sukupolven laitteille?
2. Mikä ehdotetuista tuotantokonsepteista on paras uuden sukupolven laitteille?

Tällä hetkellä kaikki uuden sukupolven laitteet kootaan paikkakokoonpanossa, mikä tarkoittaa, että logistiikka tuo laitteen osat kokoonpanoruutuun, jossa asentajat asentavat ne paikalleen. Se on joustava toimintamalli, mutta ei ole välttämättä tehokas (Hytönen et al. 2008, s. 44). Kokoonpanolinjaan verrattuna paikkakokoonpanon etuna on, että viivästymisistä kärsivä laite ei myöhästyä muita tuotannossa olevia laitteita. Aiemmin uuden sukupolven laitteiden loppukokoonpano on usein kärsinyt osapuutteista tai virheellisistä osista, jolloin joustava paikkakokoonpano on ollut perusteltu ratkaisu. Diplomityön tekeminen pohjautuu oletukselle, että kehitystyön tuloksena osa- ja laatu puutteet helpottavat niin, että voidaan alkaa miettimään myös muita tuotantokonsepteja kuin rinnakkaista paikkakokoonpanoja. Uudelle tuotantokonseptille määritettiin tavoitteet ja tavoitteiden painotukset seuraavanlaisesti:

- | | |
|---|-------|
| 1. Loppukokoonpanon läpäisyajan vaihtelun pienentäminen | 50 % |
| 2. Loppukokoonpanon läpäisyajan lyhentäminen | 25 % |
| 3. Loppukokoonpanotuntien vähentäminen | 25 %. |

Diplomityön päätavoitteena on ehdottaa tuotantokonseptia, joka sisältää karkean kokoonpanojärjestelmän ja sen tukitoimet. Sen pitäisi tukea myös kohdeyrityksen pitkän aikavälin tavoitetta saada uusi asentaja koulutettua itsenäiseen työhön kahdessa viikossa. Tarkka layout-suunnitelma rajataan pois diplomityön tavoitteista. Diplomityön ei ole tarkoitus selvittää myöskään logistisia ja tietojärjestelmällisiä haasteita, joita uusi tuotantokonsepti saattaa luoda. Tuotantokonseptin ja kehitysehdotusten mahdollinen pilotointi tulisi tapahtumaan diplomityön jälkeen.

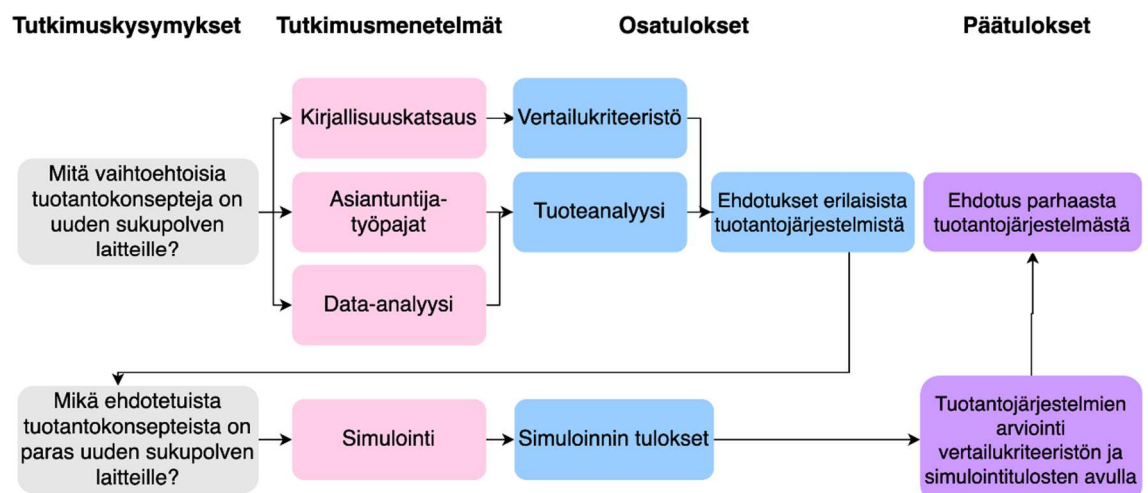
Kokoonpanojärjestelmä on pohjimmiltaan aina joko paikka-, solu- tai linjakokoonpano. Se voi myös olla näiden yhdistelmä ja sisältää alikokoonpanoja. (Syvänen & Niemi 2008,

s. 623) Kohdeyrityksessä on ollut käytössä erilaisia kokoonpanojärjestelmiä, jotka yhdistelevät näitä eri vaihtoehtoja. Osa kokoonpanojärjestelmistä on ollut käytössä pidempään ja toisten historia jäi lyhyemmäksi. Diplomityön tavoitteena oli tehdä esiselvitys niin hyvin, että ehdotettu kokoonpanojärjestelmä olisi kestävä ratkaisu tulevaisuuden haasteisiin.

1.2 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne

Diplomityön tutkimusmenetelmiä ovat kirjallisuuskatsaus, asiantuntijatyöpajat, data-analyysi ja simulointi. Diplomityön ensimmäisenä osatuloksena syntyi vaihtoehtoisia tuotantokonsepteja uudelle laitesukupolvelle. Myös nykyinen tuotantokonsepti kartoitettiin ja selvitettiin voisiko siirtyminen toisenlaiseen tuoda hyötyjä kohdeyritykselle. Toisen osatuloksen eli tuoteanalyysin avulla saatiin selvitettyä laitemallien olennaisimmat piirteet, loppukokoonpanon kypsyyden, laitteiden keskinäiset yhteneväisyydet ja eroavaisuudet sekä laitemallien vertailukelpoiset työmäärät.

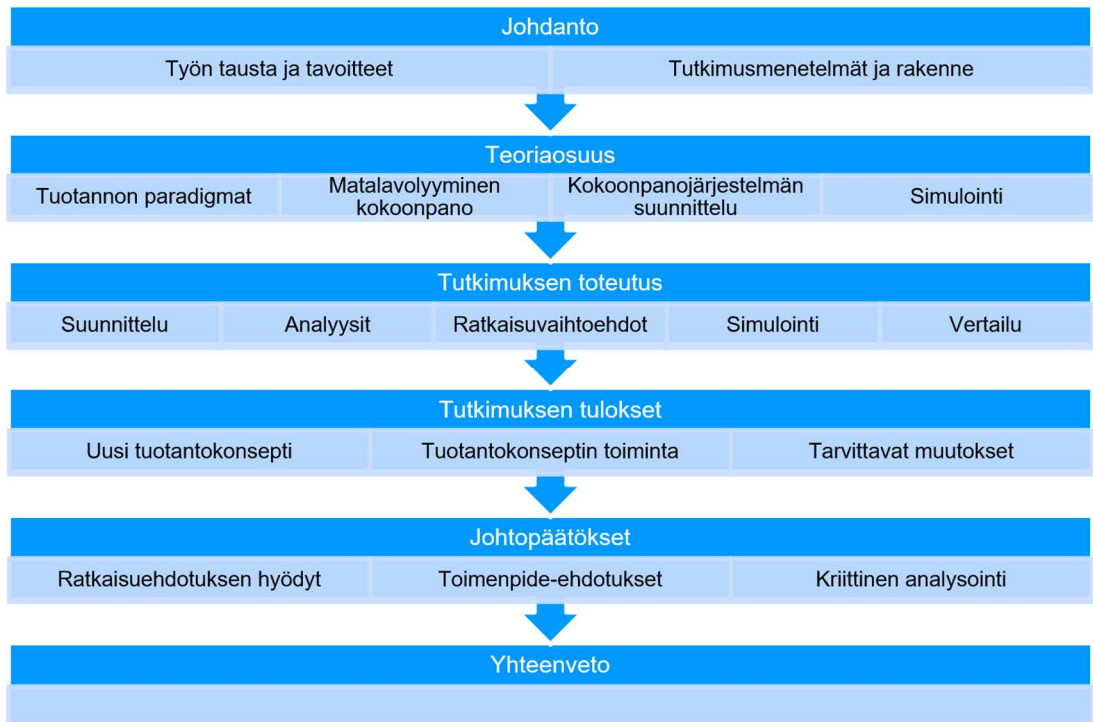
Kolmantena osatuloksena diplomityö tuotti vertailukriteeristön, jonka avulla voitiin vertailla eri kokoonpanojärjestelmiä kohdeyrityksen kaltaisessa tuotannossa. Tuotantokonseptien käyttäytymistä eri tilanteissa ja olosuhteissa mallinnettiin simuloimalla ja simulointitulokset muodostivat diplomityön neljännen osatuloksen. Vertailukriteeristöä ja simulointituloksia käytettiin selvittämään mikä tuotantokonsepti sopisi parhaiten kohdeyrityksen uuden sukupolven tuotteille. Kuvassa 1 esitellään diplomityön tutkimuskysymykset, -menetelmät ja tulokset.



Kuva 1 Diplomityön tutkimuskysymykset, -menetelmät ja odotettavat tulokset

Diplomityö koostuu teoriaosuudesta ja empiirisestä tutkimusosuudesta. Luvussa 2 esitellään työn teoria, joka sisältää tuotannon yleisten paradigmojen karkean esittelyn ja kohdeyrityksen kaltaisen tuotannon esittelyn. Teoriaosuus esittelee myös kokoonpanojärjestelmien suunnittelun periaatteet ja niiden simuloinnin. Luvuissa 3 ja 4

käsitellään tutkimuksen empiirinen osuuden toteutus ja tulokset. Luvussa 5 esitetään tutkimuksen johtopäätökset, toimenpide-ehdotukset ja kriittinen analyysi. Työn yhteenveto esitellään luvussa 6 ja tutkimuksen rakenne kokonaisuudessaan kuvassa 2.



Kuva 2 Tutkimuksen rakenne

Aineistona diplomityössä käytetään kirjallisuutta ja perusteorioita tuotantokonseptien ja kokoonpanojärjestelmien suunnitteluun liittyen. Työssä on myös tärkeässä roolissa asiantuntijatyöpajoista saadut tiedot ja kohdeyrityksen tietokannoista kerätty data. Diplomityössä on haastateltu enimmäkseen kohdeyrityksen työntekijöitä, mutta myös yrityksen ulkopuolisilta henkilöiltä saatiin arvokasta tietoa projektiin. Projektin aikana ilmenneet kehitysehdotukset kirjattiin ylös ja tuotiin kohdeyrityksen tietoon.

1.3 Tutkimusmenetelmien käyttö

Työn teoreettinen pohja perustuu alan kirjallisuuteen ja aiheesta kirjoitettuihin konferenssi- ja tutkimusartikkeleihin. Kirjallisuuskatsauksessa tutkitaan kohdeyrityksen tuotantoon sekä tuotantokonseptien suunnittelemiseen ja kehittämiseen liittyvää teoriaa. Teoriaosuudessa käsiteltäviä tärkeimpiä aihepiirejä ovat kokoonpanojärjestelmät ja niiden suunnittelu sekä kokoonpanotuotannon tärkeimmät osa-alueet. Kirjallisuudesta haettiin tukea uuden tuotantokonseptin kehittämiseen ja vertailukriteeristön luomiseen sekä oppeja kohdeyrityksen kaltaisen tuotannon ongelmien ratkaisemiseen.

Asiantuntijatyöpajojen avulla kerättiin tietoa kohdeyrityksen nykyisestä tuotantokonseptista, tuotteiden ominaispiirteistä ja kokoonpanosta sekä arvioitiin luotuja

tuotantokonseptivaihtoehtoja. Suuri osa diplomityön empiirisessä osassa tarvittua uudesta informaatiosta hankittiin asiantuntijatyöpajojen avulla. Niitä järjestettiin kahdeksan kappaletta ja osallistuvan ryhmän kokoonpanot vaihtelivat tarpeen mukaan. Kaiken kaikkiaan niihin osallistui kaksi työnjohtajaa, mekaniikka- ja sähköasentajia, mekaniikka- ja hydraulikkasuunnittelija sekä valmistus- ja tuotannonkehityspäällikkö. Lisäksi mukana oli protolaitteiden kehitysinsinööri, jolla on pitkä kokemus tuotannon työnjohdosta.

Tuotannon työnjohtajat ja asentajat olivat työn tärkeimpiä tietolähteitä, sillä kohdeyrityksen kokoonpanoa ei ole dokumentoitu kovin paljoa. Asiantuntijatyöpajat pidettiin enimmäkseen etäyhteydellä, mutta kolme palaveria järjestettiin tuotantotiloissa, jolloin tuotteita päästiin tutkimaan paikan päällä. Asiantuntijatyöpajojen tuloksina saatiin hyvin vastauksia diplomityön aikana syntyneisiin kysymyksiin. Osa asioista oli sellaisia, joihin ei voitu määrittää lopullista vastausta ilman fyysistä demonstrointia tuotannossa.

Systemaattista tiedonkeruuta käytettiin datan keräämiseksi ja sitä haettiin kohdeyrityksen tietokannoista. Data kerättiin ERP-järjestelmästä, PDM:stä, MES-tietokannasta ja Cognos-raporteista. Eri tietokannoista saatu data erosi hyvin paljon laadultaan ja tarvittujen prosessoinnin määrältä. ERP-järjestelmästä saatiin lähinnä nimikkeiden koodeja, joiden avulla PDM:stä löydettiin monipuolisesti informaatiota tuotteista ja niiden osista. MES-tietokannasta saatiin standardityölistat, joiden avulla eri tuotteiden kokoonpanoja vertailtiin. Cognos-raporteista selvisi myyntispesifikaatiot edellisiltä vuosilta. Dataa kerättiin vuosilta 2015-2021, painottuen kuitenkin vuosiin 2018-2021. Datan prosessoimiseksi käytettiin data-analyysia, jotta data saatiin hyödynnettävään muotoon. Data-analyysi koostui tarvittavan datan määrittelystä, sen keräämisestä, puhdistuksesta ja muuntamisesta hyödylliseen muotoon. Diplomityön aikana lisäksi todettiin, että kerätty data on vajavaista, joten sitä täydennettiin tarvittavilta osin asiantuntijatyöpajojen avulla.

Simulointia käytettiin kohdeyrityksen nykyisen ja vaihtoehtoisten tuotantokonseptien keskinäiseen vertailuun. Työssä käytettiin simulointiohjelmana Tecnomatix Plant Simulation -ohjelmaa. Tavoitteena oli saada selville eri tuotantokonseptien suorituskyvyt erilaisissa tilanteissa, eri olosuhteissa ja eri tuotevalikoimilla. Simulointia ei ole aiemmin hyödynnetty diplomityön kohteena olevassa yksikössä, joten tämän projektin tarkoituksena oli myös tuoda kokemuksia simuloinnista.

2. TEORIAOSUUS

Käsiteltävä teoria on valittu tukemaan mahdollisimman hyvin tuotantokonseptin suunnittelua kohdeyrityksen kaltaisessa tuotannossa. Luvussa 2.1 esitellään erilaisia tuotannon kehittämisen ajatussuuntia, joiden mukaan tuotantoa pyritään kehittämään. Luvussa 2.2 esitellään matalavolyymisen kokoonpanotuotannon ominaiset piirteet ja haasteet. Näiden avulla saadaan käsitys olosuhteista, joissa kohdeyritys toimii. Luvussa 2.3 esitellään kokoonpanojärjestelmän suunnittelun vaiheet ja suunnittelun eri osalueiden merkitys yritykselle. Viimeisenä luvussa 2.4 kerrotaan yleisesti kokoonpanojärjestelmien simuloinnista ja simulointiprosessista Tecnomatix Plant Simulation -ohjelmalla.

2.1 Tuotannon paradigmat

Eri aikakausina on ollut eri ajatussuuntia tuotannon kehittämisestä. Tässä luvussa pyritään selventämään eri ajatussuuntien ominaisia piirteitä ja niiden taustoja. Esiteltäviä paradigmoja ovat massaräätälöinti, lean-tuotanto ja ketterä tuotanto. Yritykset ovat siirtymässä aiemmista standardoitujen tuotteiden korkean volyymin tuotannosta erikoistuneempaan, räätälöidymmään ja personalisoituun tuotantoon (Svensson Harari et al. 2014 s. 1). ElMaraghyn et. al (2009, s. 6) mukaan dynaaminen ja globaali tuotantoverkosto edellyttää, että tuotantoprosessit, kokoonpanojärjestelmät ja logistiset sekä organisaatiolliset toimijat kykenevät sopeutumaan muutokseen nopeasti ja pienellä vaivalla. Tämä kyky, muunneltavuus, parantaa yrityksen kykyä vastata kysynnän muutoksiin ja tuotteissa tapahtuvaan vaihteluun.

2.1.1 Massaräätälöinti

Sahinin (2000, s. 59) mukaan massaräätälöinti syntyi, kun massamarkkinoiden asiakkaat ymmärsivät voivansa täyttää tarpeensa massatuotteiden sijaan niiden räätälöidyillä varianteilla. Valmistavat yritykset joutuvat selviytymään yhä vaativimmissa olosuhteissa. Niiltä vaaditaan yhä parempaa tuote- ja tuotevalikoimajoustavuutta, tiiviimpää yhteistyötä asiakkaiden ja toimittajien kanssa sekä luotettavampia toimituksia pienemmillä kustannuksilla. (Asadi et al. 2016, s. 189) Asiakkaiden nopeasti kehittyvät tarpeet ovat ohjanneet valmistavia yrityksiä räätälöityjen ja suuresti vaihtelevien tuotteiden valmistamiseen (Asadi et al. 2015b, s. 1)

Teresko (1994, s. 45) määrittelee massaräätälöinnin valmistusteknologiaksi, joka vaaditaan laajan valikoiman aiheuttamien kustannusten laskemiseen. Pine (1993, luvut

1-2) sen sijaan määrittelee massaräätälöinnin prosessiksi, jossa eri liiketoiminta-alojen yritykset käyttävät teknologiaa ja johtamistapoja hyväkseen tarjotakseen laajaa tuotevalikoimaa ja -räätälöintiä joustavasti ja nopealla vasteajalla. Pine (1993, s. 171, 196) erottelee massatuotannon ja massaräätälöinnin toteamalla, että massatuotannon tavoite on tuottaa standardoitua tuotetta hinnalla, jonka kuka vain voi ostaa. Sen sijaan massaräätälöinnin tavoite on tuottaa tarpeeksi vaihtelevaa tuotevalikoimaa, jotta jokainen löytää täsmälleen haluamansa tuotteen kohtuullisella hinnalla. Modulaariset komponentit ja modulaarinen tuoterakenne on nähty parhaana menetelmänä massaräätälöinnin saavuttamiseksi, kun samaan aikaan minimoidaan kustannukset ja maksimoidaan yksittäinen räätälöinti (Pine 1993, s. 171, 196).

Pine et al. (1993, s. 108) mukaan jatkuvaa parantamista tavoittelevat johtajat valmistus- ja palveluyrityksissä eivät ymmärrä, että massaräätälöinti on erilainen ja hyvin vieras tapa tehdä liiketoimintaa. Massaräätälöinti ei ole jatkuvan parantamisen laajennus, vaikkakin jatkuva parantaminen on massaräätälöinnin edellytys. Jatkuvaan parantamiseen ja massaräätälöintiin tähtäävät yritykset vaativat hyvin erilaiset organisaatorakenteet, arvot, opetusmenetelmät, johtamistavat ja -roolit sekä tavat olla yhteydessä asiakkaisiin. Massaräätälöinti vaatii dynaamisen organisaation, joka koostuu suhteellisen itsenäisistä yksiköistä. Se vaatii olemassa olevia prosesseja tai tehtäviä, jotka ovat vuorovaikutuksissa toisiinsa jokaisen tuotteen tai palvelun osalta. Prosessien ja tehtävien kytkentäjärjestelmän on oltava välitön, kustannukseton ja kitkaton. (Pine et al. 1993, s. 115)

2.1.2 Lean tuotanto

Glass et al. (2016, s. 278) mukaan lean-tuotanto esiteltiin ensimmäisen kerran Krafcikin (1988) teoksessa ”*Triumph of the Lean Production System*”. Womack et al. (1990) toivat leanin koko maailman tietoisuuteen teoksellaan ”*The Machine that Changed the World*”. Lean on peräisin Japanista Toyotan autotehtaalta, jossa Womack kumppaneineen paljasti tuotannon kehittyneen niin edistykselliseksi, että länsimaiset yritykset ovat omaksuneet sen mukaiset toimintatavat. Womack et al. (1990) mukaan lean-tuotanto pyrkii yhdistämään paikkakokoonpanon ja massatuotannon parhaat puolet välttäen molempien heikkouksia, kuten paikkakokoonpanon korkeita kustannuksia ja massatuotannon jäykkyyttä. Leanin määritelmät tyypillisesti korostavat lean-tuotannon kykyä hallita korkeampaa tuotevaihtelua ja suurempaa tuotantomäärää vähemmillä resursseilla verrattuna perinteiseen massatuotantoon.

Lean organisaatio ymmärtää asiakkaan kokeman arvon ja keskittää avainprosessit jatkuvasti nostamaan sitä. Lopullinen päämäärä on tarjota täydellistä arvoa asiakkaalle

täydellisen arvonluontiprosessin läpi, jossa ei ole yhtään hukkaa. Lean-ajattelu pyrkii kääntämään suuntautumista resurssitehokkuudesta virtauksen optimointiin. Tämä onnistuu poistamalla hukat arvovirroista sekä luomalla prosesseja, jotka vaativat vähemmän ihmisen panosta, tilaa, pääomaa ja aikaa sekä tekevät tämän pienemmillä kustannuksilla ja vähemmällä virheillä. Leanin mukaiset yritykset kykenevät vastaamaan asiakkaiden tarpeisiin monipuolisilla tuotevariaatioilla, korkeilla tuotantovolyymeilla, matalilla kustannuksilla ja nopeilla toimitusajoilla. (Lean Enterprise Institute 2021)

Modig et al. (2013) esittelivät tehokkuusparadoksin teoksessaan ”*Tätä on Lean*”. Tehokkuusparadoksin mukaan resurssitehokkuus vaikuttaa tehokkaamalta kuin virtaustehokkuus, koska resurssit ovat koko ajan käytössä. Todellisuudessa suuri osa käytetystä ajasta hukataan. Hukattu aika kuluu lisätöiden hoitamiseen, jotka aiheutuvat pitkästä läpäisyajasta, useasta keskeneräisestä virtausyksiköstä ja töiden uudelleen aloittamisesta. Yritysten pitäisi ensiksi keskittyä virtaustehokkuuden kehittämiseen, jotta lisätöiden määrä saadaan minimoitua ja sen jälkeen kehittää resurssitehokkuutta ylläpitäen virtaustehokkuus hyvällä tasolla. (Modig et al. 2013, s. 47-67)

2.1.3 Ketterä tuotanto

Sahinin (2000, s. 60) mukaan ketterän tuotannon konseptia käsiteltiin ensimmäisen kerran vuonna 1991, kun ryhmä tutkijoita huomasi perinteisen tuotanto-organisaation kyvyttömyyden sopeutua muuttuvaan ympäristöön. Ketterä valmistus määritellään kyvyksi toimia kannattavasti epävarmassa, epävakaassa ja jatkuvasti muuttuvassa ympäristössä. Sitä tarvitaan yleensä aikaperusteisessa kilpailutilanteessa, jossa tarvitaan lyhyttä vasteaikaa. Sahin (2000, s. 60) pyrkii erottelemaan joustavan valmistuksen ketterästä valmistuksesta. Joustava valmistus on kykyä reagoida suunniteltuihin muutoksiin, kun taas ketterä valmistus on kykyä reagoida suunnittelemattomiin muutoksiin. Ketterä valmistus on yleensä hyödyllinen seuraavanlaisissa olosuhteissa (Maskell 2001, s. 5):

- Kaikki muuttuu nopeasti ja odottamattomasti
- Markkinat haluavat pientä volyymia, korkeaa laatua sekä räätälöityjä ja yksilöllisiä laitteita
- Tuotteilla on lyhyt elinaika ja ne vaativat lyhyttä kehitys- ja läpäisyaikaa
- Asiakkaat haluavat heitä kohdeltavan yksilöinä.

Sahinin (2000, s. 56) mukaan ketterää tuotantoa on pidetty rikastettuna lean-tuotantona. Yrityksen tuotannon täytyy ensiksi olla hyvin edistyksellistä ja leanin mukaista, minkä jälkeen ketterän valmistuksen omaksuminen on mahdollista (Maskell 2001, s. 6). Leanin ja ketterän valmistuksen yksi suuri ero on erilaisissa toimittajasuhteissa. Lean-

valmistajat uskovat parhaan toimittajan löytyvän kilpailuilta markkinoilta. Sen sijaan ketterässä valmistuksessa strategiset kumppanuudet ovat merkittävässä roolissa, kun markkinoiden tarpeisiin pyritään vastaamaan nopeasti. (Gunasekaran 1998, s. 1224, 1229) Lapinleimun (2001, s. 42) mukaan Uhlmann & Schroder (1998) määrittelevät ketterän tuotannon keinoja ja tavoitteita seuraavanlaisesti:

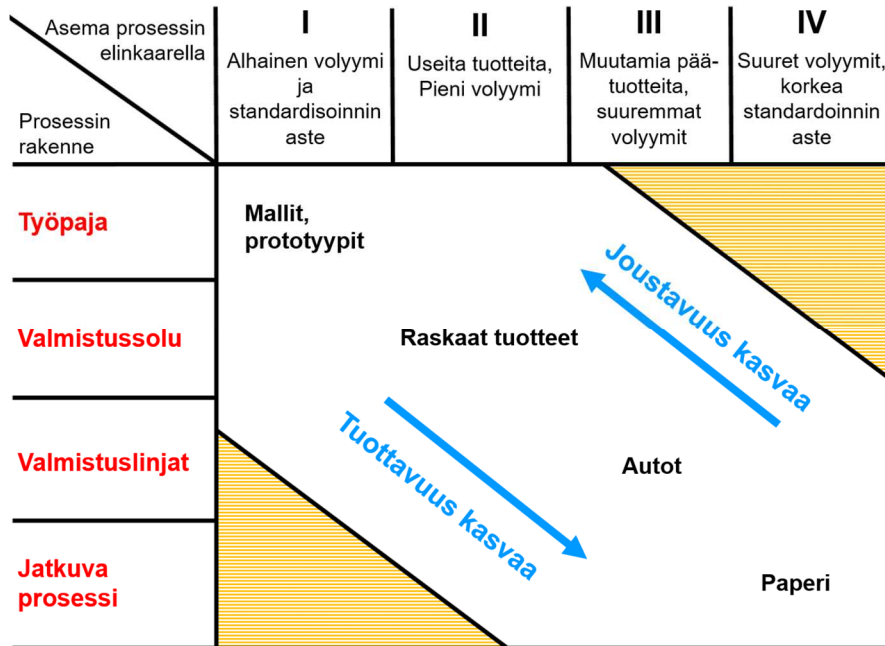
- Integroituminen asiakkaiden, toimittajien ja kumppanien kanssa
- Keskittyminen ydinosaamiseen
- Innovaatioita edistävä yrityskulttuuri
- Tiimityötä suosiva organisaatio, joka antaa pelivaraa myös yksilöille
- Yhteistyön tukeminen nykyaikaisilla kommunikointiratkaisuilla
- Innovatiivisten ja joustavien tekniikoiden kehittäminen ja käyttäminen

Asiakkaat vaativat yhä pienempiä määriä yhä enemmän räätälöityjä tuotteita. Maskell esittää, että leanin mukainen tuotanto on hyvä tekemään asioita, joita voidaan kontrolloida. Sen sijaan ketterän valmistuksen mukainen tuotanto pyrkii menestymään myös asioiden kanssa, joita ei voi kontrolloida. (Maskell 2001, s. 5) Lean-tuotanto keskittyy kustannusjohtajuusstrategiaan ja kustannustehokkuuteen, kun taas ketterä tuotanto keskittyy erilaistumisstrategiaan ja joustavuuden kehittämiseen. (Olhager 2003, s. 40)

2.2 Matalavolyyminen kokoonpanotuotanto

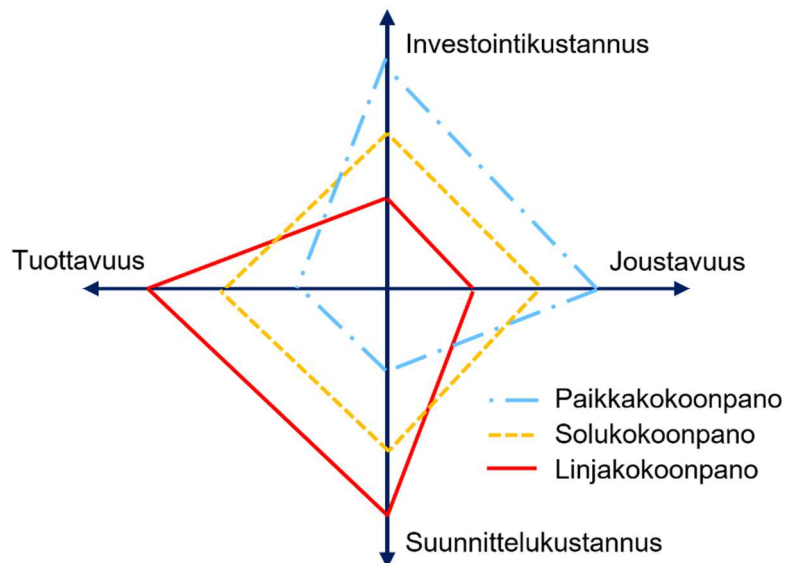
2.2.1 Kokoonpanojärjestelmät

Kokoonpanojärjestelmä kuvaa kuinka tavara ja ihmiset liikkuvat tehtaassa kokoonpanon aikana ja sen valinnassa tulee huomioida tuoterakenteen sopiminen kokoonpanojärjestelmään. Ne kokoonpanot, jotka voidaan tehdä erillisinä kokoonpanoina, kannattaa tehdä rinnakkaisina moduulikokoonpanoina. (Lapinleimu 2001, s. 129) Kokoonpanojärjestelmä on pohjimmiltaan aina joko paikka-, solu- tai linjakokoonpano. Se voi myös olla näiden yhdistelmä ja sisältää alikokoonpanoja. Nämä eri vaihtoehdot käyttäytyvät eri tavalla olosuhteiden ja tarpeiden vaihdellessa. (Syvänen & Niemi 2008, s. 623) Tuotantovolyymien vaihtelevuus vaikuttaa vahvasti kokoonpanojärjestelmän tyyppiin ja layoutin valintaan (Slack et al. 2016, s. 226-229). Kuvassa 3 esitellään tuote-prosessi -matriisi, joka kuvaa tuotteiden ja niiden tuotantovolyymien vaikutusta layoutin valintaan.



Kuva 3 Tuote-prosessi -matriisi layoutin valintaan, mukaillen (Ahmad & Schroeder 2002)

Matriisin vaaka-akselilla on erilaisia tuotteita ja niille erilaisia tuotantovolyyymeja. Pystyakselilla on eri tapoja järjestää tuotantoprosessi. Vaaka-akselilla alaspäin ja pystyakselille oikealle päin mentäessä tuottavuus kasvaa ja joustavuus vähenee. Vastaavasti toiseen suuntaan mentäessä tuottavuus laskee ja joustavuus kasvaa. Kuvassa 4 on esitelty Syväsen et al. (2008, s. 618) näkemys paikkakokoonpanon, solutuotannon ja perinteisen linjakokoonpanon vahvuuksista ja heikkouksista. Kirjoittajien määritelmän mukaan alle kahdeksan aseman kokoonpanolinja on solukokoonpanoa ja sen joustavuus, tahti aika, erikoistumisen taso ja investointitarve ovat paikkakokoonpanon ja perinteisen kokoonpanolinjan kompromissi.

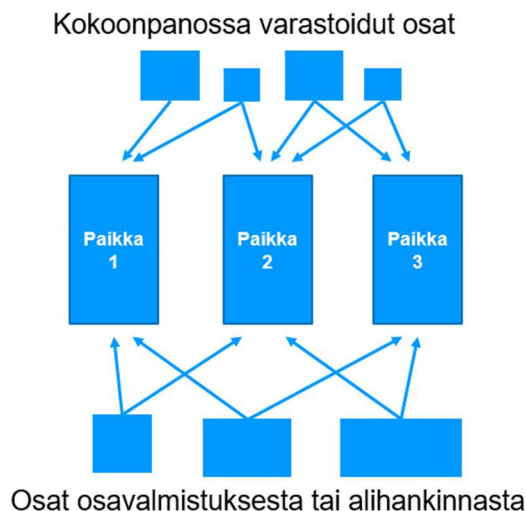


Kuva 4 Eri kokoonpanojärjestelmien vahvuudet ja heikkoudet, mukaillen (Syvänen & Niemi 2008, s. 618)

Päästäkseen eri kokoonpanojärjestelmän perinteisistä heikkouksista eroon, Bennett & Forrester (1993, s. 47) ehdottavat ratkaisuksi kokoonpanojärjestelmävaihtoehtojen yhdistämistä. Tällä tavoin voisi saavuttaa kokoonpanojärjestelmästä mahdollisimman suuret hyödyt. Santos et al. (2006, s. 26) mukaan on yleistä, että yrityksissä on käytössä useita eri layouteja tai niiden yhdistelmiä.

Paikkakokoonpano

Suurten tilausohjautuvien tuotteiden kokoonpano on perinteisesti tehty paikkakokoonpanossa. Työ on pääosin manuaalista ja se suoritetaan työntekijäryhmän toimesta. Tämä on joustava toimintamalli, mutta ei ole välttämättä tehokas. (Hytönen et al. 2008, s. 44) Paikkakokoonpanossa tuote ei liiku tuotantoprosessissa. Sitä käytetään sellaisten tuotteiden valmistuksessa, jotka ovat liian vaikeita liikuteltaviksi, kuten laivat ja rakennukset. (Santos et al. 2006, s. 26) Paikkakokoonpanossa tuote tehdään valmiiksi alusta loppuun ja kokoonpanon hoitaa tuotteen koosta riippuen yksi henkilö tai työryhmä. Paikkakokoonpano soveltuu hyvin yksittäis- ja pienerätuotantoon. (Lapinleimu et al. 1997, s. 112) Kuvassa 5 esitellään paikkakokoonpanon toimintaperiaate.



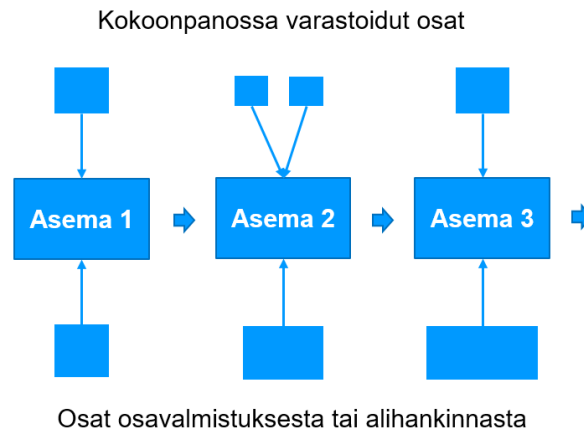
Kuva 5 Paikkakokoonpanon toimintaperiaate, mukailen (Lapinleimu 2001, s. 129)

Paikkakokoonpano on joustava tuotantomäärien suhteen, sillä sen kapasiteettia voidaan nostaa rinnakkaisilla kokoonpanopaikoilla pienin askelin. Se vaatii kuitenkin enemmän tilaa, työkaluja sekä kokeneita ja osaavia työntekijöitä kuin muut järjestelmät. Paikkakokoonpanon haasteeksi voi nousta osalogistiikka, sillä osat on saatava puskurivarastoiduksi ottoetäisyydelle toiminnan sujuvuuden, työmäärän, ohjauksen ja visuaalisuuden vuoksi. (Syvänen & Niemi 2008, s. 618; Lapinleimu 2001, s. 129) Materiaalinkäsittelyillä voi olla merkittävä vaikutus tuottavuuteen, sillä ne voivat aiheuttaa jopa 30 prosenttia tuotannon kokonaistunneista (Syvänen & Niemi 2008, s. 621).

Perinteinen kokoonpanolinja

Perinteinen kokoonpanolinja on virtauksellinen kokoonpanojärjestelmä, joka koostuu peräkkäin olevista tuotantoalueista, joita kutsutaan asemiksi. Lopputuote kulkee jokaisen aseman läpi niin, että jokaisella asemalla siihen kohdistuu kokoonpanotyötä. Aikaväliä tuotteiden vapauttamisen välillä tuotantoon kutsutaan tahtiajaksi ja jokaisella asemalla tehtyjen tehtävien kokonaisaika ei saisi ylittää tätä tahtiaikaa. (Alghazi & Kurz 2018, s. 124) Kokoonpanolinjassa kokoonpanojärjestys on ryhmitelty tuotteen tarvitsemien työtehtävien mukaiseksi ja se soveltuu suurten erien valmistukseen ja massatuotantoon. (Lapinleimu et al. 1997, s. 112; Santos et al. 2006, s. 26)

Syväsen et al. (2008, s. 618) mukaan linjakokoonpano tarkoittaa linjamaista kokoonpanoa, jossa kokoonpano tehdään vähintään kahdeksassa eri sijainnissa. Kokoonpanolinjan ominaisia piirteitä ovat virtaus, työnjako, työhön erikoistuminen, tahtiaika, laatu ja vaihtelevuus (Hu & Ko 2015, s. 1-2). Korkean räätälöintiasteen ja matalien tuotantovolyymien tuotteiden erityispiirre on se, että niiden valmistamiseen kokoonpanolinjalla tarvitaan pieni määrä asemia (Hytönen et al. 2008, s. 44). Kuvassa 6 esitellään kokoonpanolinjan toimintaperiaate.



Kuva 6 Kokoonpanolinjan toimintaperiaate, mukaillen (Lapinleimu et al. 1997, s. 113)

Kokoonpanolinjan etuja on, että suuria tuotantoeriä voidaan tuottaa edullisesti, materiaalin käsittely on minimaalista ja keskeneräisen tuotannon määrä pientä. Lisäksi tuotannonohjaus on yksinkertaista ja automaation käyttöönotto helpompaa muihin kokoonpanojärjestelmiin verrattuna. (Santos et al. 2006, s. 26). Kokoonpanolinja helpottaa työntekijän erikoistumista, työn standardointia ja madaltaa työkalujen kustannuksia (Hytönen et al. 2008, s. 44). Askin & Zhou (1997, s. 3096) lisäävät kokoonpanolinjan hyötyihin työkalujen korkeamman käyttöasteen ja asentajilta vaaditun matalamman taitotason. Kokoonpanolinjat toimivat yleensä matalammilla tuotantokustannuksilla, lyhyemmillä vaiheajoilla ja tuottavat korkealaatuisempia lopputuotteita kuin muut vaihtoehdot (Simaria & Vilarinho 2004, s. 392).

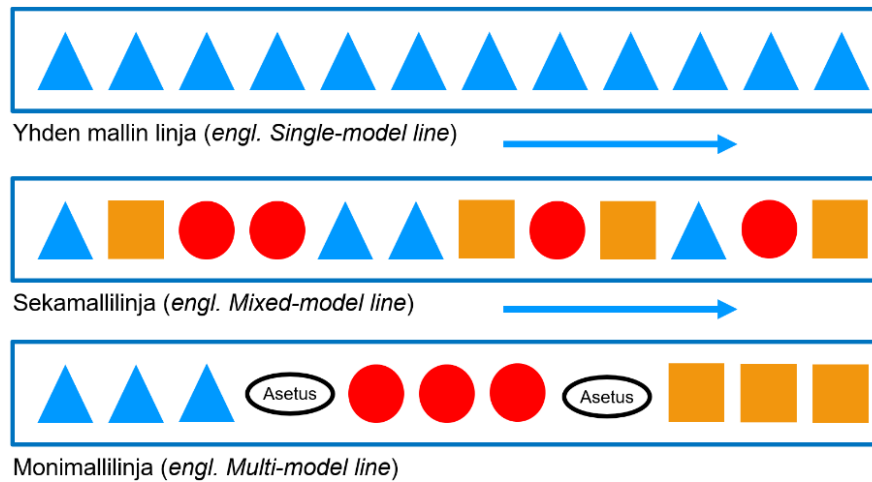
Santos et al. (2006, s. 26) toteavat, että perinteisen kokoonpanolinjan heikkouksia ovat joustamattomuus valmistaa suuria määriä erilaisia tuotteita ja asetusaikojen pituus vaihdettaessa uuteen tuotteeseen. Wang et al. (2005, s. 845) mukaan perinteinen kokoonpanolinja on herkkä tuotannollisille häiriöille ja vaihtelulle, mikä johtaa matalaan tehokkuuteen varsinkin matalan tuotantovolyymin aikaan. Lisäksi linjan asemien tasainen tasapainotus on vaikeaa. Työvoiman korkeaa käyttöastetta voi olla vaikea ylläpitää asemien vaihtelevien työkuormien takia (Askin & Zhou 1997, s. 3096).

Kokoonpanojärjestelmän häviöt ovat erityinen ongelma kokoonpanolinjan suunnittelussa (Svensson Harari 2015, s. 3). Näitä häviöitä aiheutuu tahdituksesta ja työaikojen vaihtelusta. Häviöitä voi vähentää luomalla materiaalipuskureita asemien välille tai mahdollistamalla tuotteiden pidempi saatavilla olo operaattoreille. (Bennett & Forrester 1993, s. 372) Kokoonpanolinjan tasapainotus ei ole helppoa, sillä tuotteet ja niiden työsisältö vaihtelevat. Tuotteen vaihtelu johtuu eri tuotteista ja asiakkaiden toivomista tuotteiden eri konfiguraatiosta, jolloin tuotteen rakenne, mittaparametrit ja lisälaitteet saattavat vaihdella. (Hytönen et al. 2008, s. 44) Kokoonpanolinjan tasapainotus vaatii kolmea asiaa: tehtävälistat työkestoineen, tehtävien tekojärjestyksen ja tahtiajan. Tämän jälkeen voidaan määritellä asemien määrä, työntekijöiden määrä kullakin asemalla ja tehtävät, jotka kullakin asemalla tehdään. (Svensson Harari 2015, s. 3)

Hytösen et al. (2008, s. 44) mukaan kirjallisuus käsittelee enimmäkseen tuotantolinjoja, joiden asemilla on yksi työntekijä. Kokoonpanolinjoja ja niillä valmistettavia tuotteita on hyvin paljon erilaisia eikä kaikki yleistyksyet päde jokaiseen tuotantolinjaan. Autoteollisuudessa Henry Fordin ja Frederick Taylorin luomat perinteiset tuotantolinjat tulevat jäämään harvinaisiksi arvokkaampien automallien ja niiden varianttien määrän takia. Ne ovat joustamattomia suuren vaihtelun tuotannossa. (Bozkurt et al. 2020, s. 38)

Sekamallilinja

Modernit kokoonpanojärjestelmät ovat usein lyhyitä linjoja, jotka ovat yksinkertaisempia kuin perinteiset kokoonpanolinjat. Tällaiset linjat on miehitetty hyvin koulutetuilla työntekijöillä, jotka kykenevät monipuolisesti eri tehtäviin. Tuotteiden räätälöinnin nouseva trendi ja lyhyemmät elinkaaret ovat aiheuttaneet perinteisten massatuotantolinjojen korvaamisen sekamallilinjoilla. (Bukchin et al. 2002, s. 405, 419) Sekamallilinja (*engl. Mixed-model line*) on tuotantolinja, joka on suunniteltu tuottamaan mitä tahansa etukäteen määriteltä tuotemallia ja -varianttia samanaikaisesti ja jatkuvasti ilman linjan uudelleen organisointia. Linjan asemat ovat tarpeeksi joustavia suoriutumaan eri varianteista aiheutuvista tehtävistä. (Bennett & Forrester 1993, s. 372; Rekiek et al. 2000, s. 268) Kuvassa 7 on esitetty tuotantolinjoja, jotka eroavat niille määritellyn tuotevalikoiman osalta.



Kuva 7 Erilaisia tuotantolinjoja ja niiden määritellyt tuotevalikoimat, mukailten (Becker & Scholl 2006, s. 696)

Kokoonpanolinjat ovat yleensä kalliita investointeja, joten niiden konfigurointi usealle tuotemallille sopivaksi on tärkeää (Alghazi & Kurz 2018, s. 124). Usein sekamallilinjat noudattavat tilausohjautuvaa tuotantotapaa, mikä lyhentää toimitusaikaa ja tarkoittaa tuotteiden sekalaista tuotantojärjestystä. Tyypillistä sekamallikokoonpanolinjalle on asemien vähäinen määrä, mekaanisen kuljetinlinjan puuttuminen ja korkeasti koulutetut työntekijät. (Bukchin et al. 2002, s. 405)

Sekamallilinja on laajalle levinnyt sen moninaisten hyötyjen takia. Se vähentää varastoja, eliminoi siirtokustannuksia ja vastaa asiakkaiden muuttuviin tarpeisiin tehokkaasti. (Hu et al. 2011, s. 720) Tarve sekamallilinjoille on syntynyt muuttuneiden asiakastarpeiden myötä. Asiakkaat odottavat tuotteiltaan yhä enemmän ominaisuuksia ja korkeampaa laatua samaan aikaan kun toimitusaikojen tulisi lyhentyä. Sekamallilinjojen on todettu kykenevän vastaamaan näihin vaatimuksiin. (Hu et al. 2008, s. 45)

Vaikka sekamallilinjassa on useita hyötyjä verrattuna yhden mallin kokoonpanojärjestelmään, se kärsii kuitenkin monista haitoista. Useampi malli tuotannossa aiheuttaa monimutkaisempaa kokoonpanoa sekä suurempaa vaihtelua työmäärään ja työn sisältöön. Sekamallilinjan ongelmat ovat suurimmillaan, kun linjalla tuotetut mallit eroavat toisistaan suuresti ja vaihe aika on lyhyt. (Hazbany et al. 2007, s. 483-484) Sen suurimmat tekniset ongelmat ovat (Rekiek et al. 2000, s. 268):

- Geneerinen tuotemallinnus
- Linjan tasapainotus
- Resurssisuunnittelu
- Uuden mallin lanseeraaminen linjalle.

Sekamallilinjalla on useita perusmalleja, jotka voivat sisältää vaihtelevan määrän erilaisia optioita. Asennettavien optioiden suuri ja vaihteleva määrä johtaa suureen vaihteluun tuotteen kokoonpanoajoissa. Alghazin & Kurzin (2018, s. 125) mukaan

vaihtelevaa kokonaistyöaikaa asemilla voidaan pyrkiä ratkaisemaan kahdella lähestymistavalla. Tahtiaika voidaan määrittää tuotteiden keskimääräisen työmäärän mukaan, jolloin joidenkin tuotteiden vaiheaja ylittää tahtiajan. Toinen tapa on määrittää tahtiaika työläimmän tuotteen vaiheajan mukaan, mikä pidentää tahtiaikaa ja sitä kautta laskee tehokkuutta. Sekamallinjan tasapainotusprosessi edellyttää vakaata ja määriteltyä tuotevalikoimaa (Bukchin et al. 2002, s. 405).

2.2.2 Lämpäisyajan merkitys

Lämpäisy aika määritellään projektin tai prosessin aloituksen ja lopetuksen väliseksi ajaksi. Usein tuotantoympäristössä se tarkoittaa asiakastilauksen saapumisen ja sen toteuttamisen välistä aikaa. (Wadhwa et al. 2005, s. 3135) Hopp et al. (1990, s. 78) huomasi jo varhain, että tuotannon lämpäisyajasta on tulossa kilpailuetu markkinoilla. Lyhyt lämpäisy aika on indikaattori toimivasta, joustavasta ja tehokkaasta kokoonpanojärjestelmästä. Se on yksinkertainen ja tehokas tapa mitata toiminnan tehokkuutta. Mitä lyhyempi tuotannon lämpäisy aika on, sitä paremmat edellytykset on parantaa toiminnan joustavuutta ja pienentää varastoja. (Miettinen 1993, s. 25; Lapinleimu et al. 1997, s. 55)

Hopp et al. (1990, s. 80) huomasivat, että tuotannon lämpäisyajasta usein vain pieni osa kuluu arvoa tuottavaan työhön. Tuotteen tuotantoaika käsittää suoritusajan, asetusajan, tuotteen liikuttamiseen kuluva ajan, jonotusajan, materiaalien odotusajan sekä liikuttamisen odotusajan. TEKES:n (2001, s. 7) vuosituhatosen vaihteessa tekemän selvityksen perusteella suunnitellusta työajasta häiriöihin kuluu 25 prosenttia sekä taukoihin ja odotuksiin 25 prosenttia. Varsinainen tekemisaika on siis puolet työajasta, josta jalostavaa työtä on noin 10-25 prosenttiyksikköä.

Hopp et al. (1990, s. 78) mukaan lämpäisy aikaa voi lyhentää käyttämällä yksinkertaisia ja halpoja menetelmiä. Tällöin kiinnitetään huomioita lämpäisy aikaa pidentäviin tekijöihin. Ehdotetut menetelmät on jaettu viiteen eri kategoriaan: tarkastele keskeneräistä tuotantoa, pidä asiat liikkeellä, synkronoi tuotanto, tasoita työvirta ja poista vaihtelu. Keskeneräisen tuotannon pitäisi olla optimoitu sitoutuneen pääoman ja riittävien varmuusvarastojen suhteen. Asioiden pitäminen liikkeellä tarkoittaa ajatusta, että valmistumista kohti liikkuvat tuotteet pienentävät lämpäisy aikaa ja varastoja. Tuotannon synkronointi kuvaa kokoonpanon ja valmistuksen synkronoinnin tärkeyttä. Työvirran tasoittaminen on tarkoitus pienentää keskeneräisen tuotannon määrää ja tuotannon lämpäisy aikaa. Vaihtelun poistolla pyritään vähentämään työn uudelleen tekemistä, seisokkiaikoja ja yhtenäisten työmenetelmien puuttumista. (Hopp et al. 1990, s. 79-72)

Lapinleimun et al. (1997, s. 58) mukaan kokoonpanon läpäisy aikaan vaikutetaan kahdella tavalla: levittämällä kokoonpanotyö rinnakkain tehtäviin osakokoonpanoihin ja kehittämällä osavalmistus ja osien ohjaus häiriöttömäksi. Wadhwan et al. (2005, s. 3137) mukaan tehokkain tapa lyhentää läpäisy aika on rinnakkaisten työvaiheiden mahdollistaminen ja lisääminen vähentämällä työvaiheiden välisiä riippuvuuksia. Läpäisy ajan lyhentäminen on yksi harvoista strategioista, jota sekä myynti- että tuotanto-osasto kannattavat (Hopp et al. 1990, s. 78).

Tuotannon näkökulmasta lyhyt läpäisy aika:

- Vähentää keskeneräisen tuotannon määrää
- Vähentää suunnittelumuutosten häiriöitä tuotantoprosessiin
- Mahdollistaa tuotantoaikatauluun lyhyemmän jäädytetyn aikajakson, mikä vähentää riippuvuutta pitkän aikavälin ennusteista
- Mahdollistaa helpomman johtamisen, koska seurattavia töitä on vähemmän
- Parantaa laadunhallintaa, kun valmistuksen ja lopputarkastuksen välinen aika lyhenee.

Myynnin näkökulmasta lyhyt läpäisy aika:

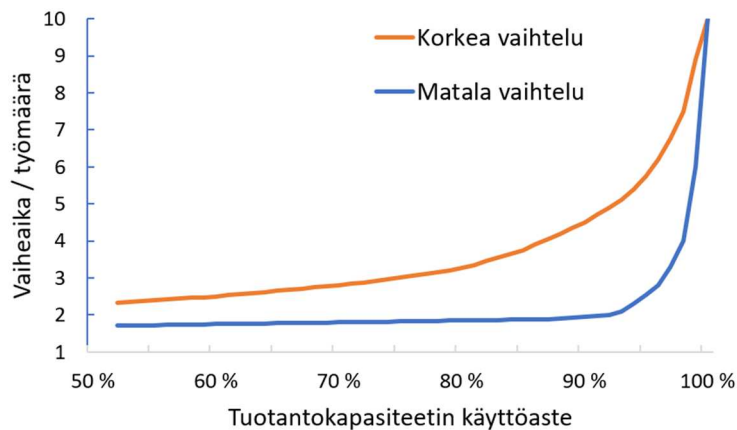
- Mahdollistaa tuotteen nopean toimituksen
- Vähentää peruuntuneiden tilausten vaikutusta
- Vähentää tarvetta tehdä ennusteita pitkälle tulevaisuuteen. (Hopp et al. 1990, s. 78)

On hyvä huomata, että läpäisy ajan lyhentämisestä saatavat hyödyt saavutetaan, jos ne kyetään tekemään ilman suuria uhrauksia muilla alueilla, kuten laadussa tai tuotannon suorituskyvyssä (Hopp et al. 1990). Santos et al. (2006, s. 26) mukaan teollisuus on havainnut moduloinnin hyväksi tavaksi pilkkoa tuotteen tuotantoa pienempiin ja yksinkertaisempiin osiin. Moduulit valmistetaan erillään ja kootaan alikokoonpanoina loppukokoonpanossa. Asennettävien komponenttien määrä loppukokoonpanossa pitäisi minimoida, sillä tuotannon suoritusnopeus kasvaa, kun tasapainotetulta kokoonpanolinjalta siirretään työtehtäviä kohti osakokoonpanoja. (Svensson Harari 2015, s. 3; Baker et al. 1993, s. 105)

2.2.3 Vaihtelu

Tuotantoprosessissa vaihtelua on kaikkialla ja se on väistämätöntä. Se on vihollinen tuotteen hyvälle laadulle, tahtiajan vakaudelle ja tuotantokustannuksille. Kokoonpanojärjestelmän kehittämisessä kaikkein tärkeintä on pyrkiminen vaihtelun vähentämiseen. (Wilson 2015, luku 11.4) Vaihtelun lähteitä ovat tuotevariaatio ja työasemien vaiheajojen vaihtelu. (Bukchin 1998, s. 2669) Näiden lisäksi vaihtelua voi muodostua myös satunnaisista hukkaa aiheuttavista tehottomuuksista tai viivästyksistä, kuten materiaalipuutteista, suunnitteluvirheistä, tilausmuutoksista, korjaustöistä tai välinerikoista (Mullens 2011, s. 35).

Tuotevaihtelu johtuu eri tuotteista ja asiakkaiden toivomista tuotteiden eri konfiguraatiosta, jolloin tuotteen rakenne, mittaparametrit ja optiot saattavat vaihdella. Työasemien välinen vaihtelu johtuu tuotteiden ja niiden työnsisällön vaihtelusta. (Hytönen et al. 2008, s. 44) Edellisten lisäksi Peltokorpi & Niemi (2019, s. 453) korostavat, että manuaalisessa kokoonpanotyössä työntekijöiden erot ovat yksi merkittävimmistä syistä vaihteluun tuotannossa. Kuvassa 8 esitetään vaihtelun vaikutus tuotantoon. Kuvaajasta huomataan, kuinka vaiheajan ja työmäärän suhde eli tuotannon tehokkuus heikkenee vaihtelun kasvaessa.



Kuva 8 Vaihtelun määrän vaikutus tuotantoon, mukailten (Hopp & Spearman 2011, s. 295)

Laajan tuotetarjonnan tarjoaminen kasvattaa alikokoonpanojen ja varastossa pidettävien materiaalien määrää. Tuotevalikoiman lisääminen johtaa tuotannon monimutkaistumiseen. (AlGeddawy et al. 2009, s. 5282) Hopp et al. (1990, s. 78) mukaan tuotannon läpäisy aika on riippuvainen keskimääräisestä tuotantoajasta, mutta myös tuotantoajan vaihtelun voimakkuudesta. Autoteollisuudessa on todistettu, että lisääntyvällä tuotevaihtelulla on merkittävä negatiivinen vaikutus tuotannon suorituskykyyn. Vaihtelu heikentää laatua ja tuottavuutta kokoonpanossa ja materiaalinhallinnassa. (Hu et al. 2008, s. 45) Varioituvuuden laki toteaa saman: ”Lisääntyvä vaihtelu heikentää aina kokoonpanojärjestelmän suorituskykyä” (Hopp & Spearman 2011, s. 295).

Pinen (1993) mukaan tuotteiden eri versioille on useita syitä, kuten maantieteellisistä ja kulttuurillisista tekijöistä johtuvat erilaiset alueelliset vaatimukset. Nämä vaatimukset edellyttävät tuotteelta useita malleja ja variantteja. Jopa saman alueen sisällä voi olla useita eri markkinasegmenttejä, jotka vaativat erilaisia tuotteita. Hyvänä esimerkkinä on autoteollisuus, joka tuottaa useita eri malleja kohdemarkkinoille asiakkaiden erilaisien mieltymysten takia (ElMaraghy 2009, s. 27-29). Markkinoilla oleva kilpailu pakottaa valmistajat tarjoamaan useita eri tuotevariantteja pitäen samalla hinnat ja toimitusajan kilpailukykyisinä (Forza & Salvador 2008, s. 817).

2.2.4 Puskurit ja varmuusvarastot

Tuotannossa olevan vaihtelun kompensoimiseksi tarvitaan puskureita. Puskurointilaki esittää, että vaihtelu tuotannossa puskuroidaan erilaisten puskureiden yhdistelmällä, joita on kolmea erilaista:

1. Materiaalivarastot
2. Kapasiteetti
3. Aika. (Wilson 2015, luku 11.4; Hopp & Spearman 2011, s. 295)

Tuotannossa pidetään välivarastoja, jotta ulkoisen vaihtelun vaikutus saadaan minimoitua. Varmuusvarastoja pidetään turvaamaan varastotasoa toimitusketjun sisäistä vaihtelua varten, joita ovat esimerkiksi laitteiston rikkoutuminen tai varaston loppuminen jossain toimitusketjun vaiheessa. Tarve väli- ja varmuusvarastoille johtuu vaihtelusta ja niiden koot riippuvat yleensä asiakaskysynnän muutoksen määrästä ja vaihtelusta toimitusehdoissa. Nämä vaihtelun lähteet ovat pääosin toimittavan yrityksen ulottumattomissa. (Wilson 2015, luvut 11.3.1-2)

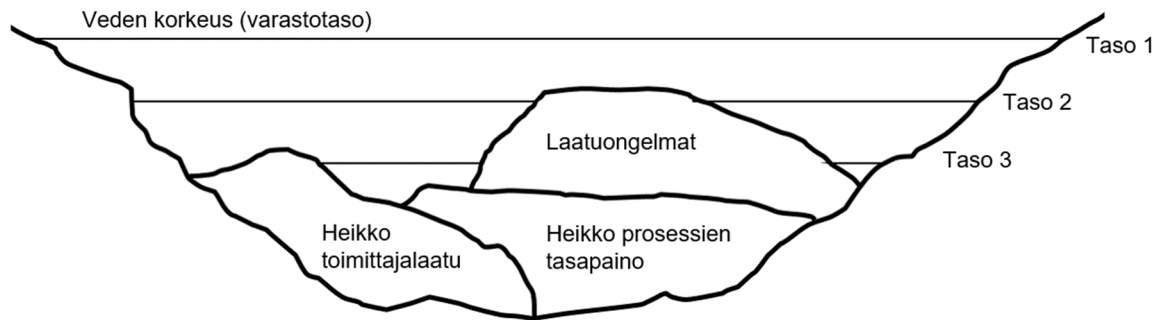
1970-luvulla, kun Just-In-Time -filosofiaa ajettiin eteenpäin, varastoja pienennettiin voimakkaasti, jopa kokonaan. Varastoista tuli vältettävä asia ja niistä piti päästä eroon. Toimia ei ajateltu kuitenkaan loppuun saakka. JIT:n pioneerit käsittivät asian niin, että varastoja pienentämällä päästään tavoitteisiin. Nämä toimet olivat harhaanjohtavia ja aiheuttivat vahinkoa tuotannolle, sillä kuvaillun kaltaisesti toimineet yritykset joutuivat kiirehtimään kaikkialla, tekemään paljon ylitöitä ja silti myöhästyivät toimitusajoista. Varastoja tarvitaan, jotta kyetään vastaamaan kysyntään ja minimoidakseen varastot pitää pienentää vaihtelun määrää. (Wilson 2015, luvut 11.1-4)

Lahtisen (2020, s. 32) mukaan matala varastotaso on parempi kuin korkea, mutta varastotaso pitää olla sillä tasolla, että se ei häiritse liiketoiminnan toteutumista eli asiakastoimituksia. Keskeinen työväline varastojen pienentämiseen on toimittajien toimitusaikojen lyhentäminen, sillä mitä lähempää ja nopeammin materiaaleja saa, sitä vähemmän puskureita tarvitaan. Hopp et al. (1990, s. 79) toteavat, että varastojen ja läpäisyajan suhteen ymmärtämiseksi pitää ymmärtää, että ne eivät olet toisista riippumattomia. Littlen laki

$$\text{Keskeneneräisten tuotteiden määrä} = \text{Läpäisy aika} * \text{Tahtiaika} \quad (1)$$

osoittaa, että keskeneneräisen tuotannon määrä riippuu tuotannon läpäisyajasta ja tahtiajasta (Stevenson 2011, s. 558). Toisaalta Modig et al. (2013, s. 35-36) toteavat Littlen lain myös osoittavan, että läpäisy aikaan vaikuttavat merkittävästi tuotannossa olevien virtausyksiköiden määrä ja tahtiaika. Pienempi keskeneneräinen tuotanto johtaa Littlen lain mukaan nopeampaan läpäisy aikaan.

Erialaisten varastojen huono puoli on, että ne aiheuttavat kustannuksia. Kustannuksia syntyy materiaalin käsittelystä, siirtelystä, varastotiloista, kuljetuksista ja tietojärjestelmien ylläpidosta. (Wilson 2015, luku 11.2) Varastojen heikkoutena pidetään myös pääoman sitoutumista, epäkuranttiusvaaraa sekä niiden jäykistävää ja tehottomuutta peittävää ominaisuutta. (Lapinleimu 2001, s. 109) Kuvassa 9 on esitelty Bennettin & Forresterin (1993) Just-In-Time -lampi, joka pyrkii kuvaamaan varastojen tehottomuutta peittävää ominaisuutta.



Kuva 9 Just-In-Time -lampi, mukailen lähdettä (Bennett & Forrester 1993)

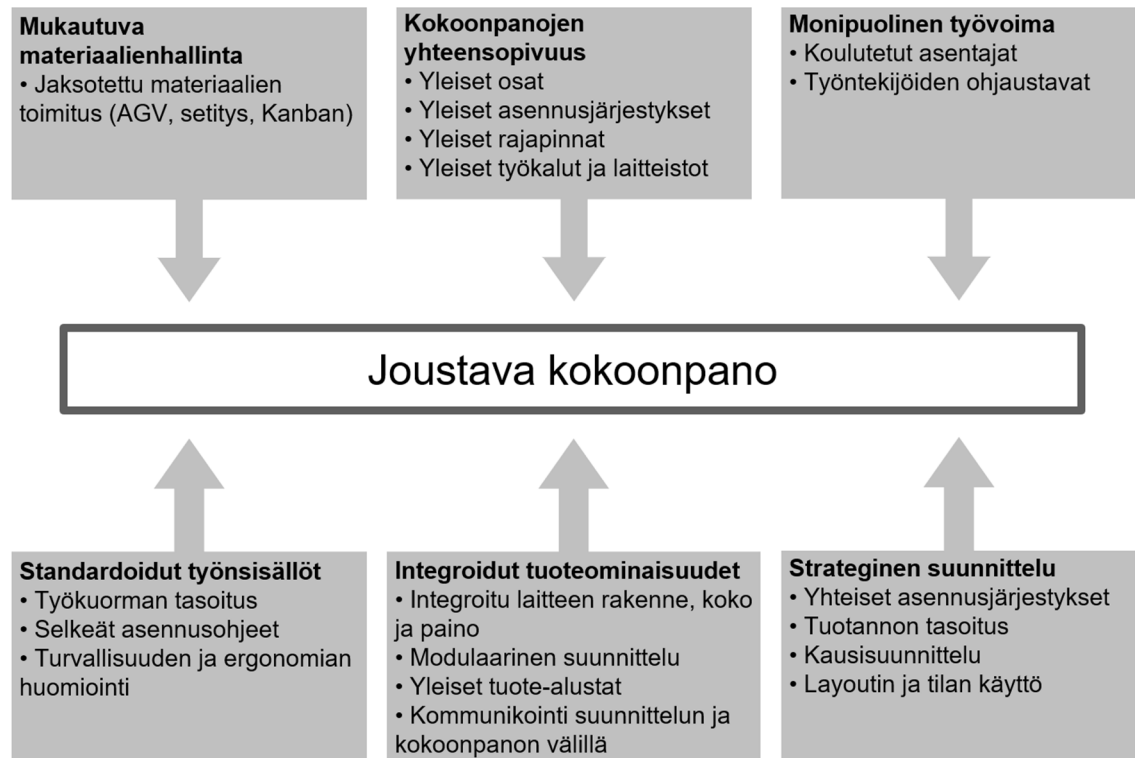
Lammen vedenkorkeus kuvaa yrityksen varastotasojen suuruutta. Laskemalla vedenkorkeutta suurimmat kivet eli suurimmat ongelmat paljastuvat. Yrityksen pitäisi tehokkaasti ratkaista nämä selkeät ongelmat ja sen jälkeen laskea vedenkorkeutta eli pienentää varastoja. Tällä tavoin yritys voi paikantaa syvällä piilevät ongelmat ja kehittää omaa toimintaansa. (Bennett & Forrester 1993, s. 293-294)

2.2.5 Joustavuus

Joustavuutta tarvitaan kokoonpanotuotannossa, koska tuotteiden elinkaaret lyhenevät, eräkoot pienenevät ja tuotteissa on paljon variantteja (Heilala & Voho 2001, s. 20). Joustavuus on kyky reagoida nopeasti ulkopuolisiin muutoksiin ilman suuria taloudellisia menetyksiä tai tuottavuuden laskua. Kokoonpanojärjestelmän joustavuuden lajit voidaan jakaa tuotejoustavuuteen, operatiiviseen joustavuuteen ja muunneltavuuteen. Tuotejoustavuus tarkoittaa valmistettävissä olevien tuotteiden laajuutta ja eri varianttien ongelmatonta valmistettavuutta. Operatiivinen joustavuus koostuu pienten erien valmistuskyvystä, tuotantosuunnitelman lyhyestä kiinteästä osuudesta, hyvästä ohjattavuudesta ja reservikapasiteetista. Muunneltavuus tarkoittaa mahdollisuutta muuttaa järjestelmää tuotteiston muuttuessa ja sen portaitaista toteuttamista. (Lapinleimu et al. 1997, s. 41, 62)

Joustavuudesta on tullut yrityksille työkalu vastata tuotevarianttien ja räätälöinnin tuomiin haasteisiin korkealla suorituskyvyllä. Kokoonpanojärjestelmältä vaaditaan usein joustavuutta, mutta kattavia selityksiä joustavan kokoonpanojärjestelmän määritelmästä

tai selkeitä ohjeita joustavuuden lisäämiseksi on vähän. (Asadi et al. 2015a, s. 235-236) Useat tutkimukset (Svensson Harari et al. 2020; Hytönen et al. 2008; Bellgran & Säfsten 2004) painottavat joustavuuden lisäämistä kokoonpanojärjestelmään. Ne eivät kuitenkaan ole selkeästi määritelleet minkälainen on joustava kokoonpanojärjestelmä tai mistä osatekijöistä se koostuu. Kuvassa 10 on Asadi et al. (2015a) esittelemät sekamallilinjan joustavuuden osatekijät viiteen raskaita ajoneuvoja valmistavaan kokoonpanotehtaaseen tehdyn tutkimuksen perusteella.



Kuva 10 Joustavan kokoonpanon osatekijät, mukailen lähdettä (Asadi et al. 2015a)

Raskaan kokoonpanoteollisuuden joustavuuden osatekijät ovat Asadi et al. (2015a, s. 247-248) mukaan mukautuva materiaalienhallinta, laitteiden kokoonpanojen yhteiset piirteet, monipuolinen työvoima, standardoidut työnsisällöt, integroidut tuoteominaisuudet ja strateginen suunnittelu. Joustava kokoonpano koostuu pienistä osatekijöistä, jotka lisäävät osaltaan kokoonpanon joustavuutta. Svensson Harari et al. (2014, s. 5) esittelevät eri tapoja lisätä kokoonpanolinjan joustavuutta:

- Tasainen kokoonpanopaikka
- Joustava AGV (*engl. Automated Guided Vehicle*) tuotteiden siirtämiseen
- Jatkuvasti liikkuvat tuotteet ja asennusalueet
- Liikkuvat asentajat ja vastaavat tavat tuotannon tasapainottamiseen
- Liikkuva ja sekvensoitu logistiikka
- Standardoitu ja konfiguroitava työvälineistö
- Monimutkaisuuksien vähentäminen

Käsitteitä joustava kokoonpanojärjestelmä ja sekamallilinja on usein pidetty teollisuuden vastauksena tulevaisuuden haasteisiin. Kuitenkaan järjestelmän suunnittelun aikaisten päätösten tukemiseen tai toimenpiteiden vaikutusten seurantaan ei ole nähty paljoo vaivaa. On nähtävissä tarvetta lisätä tietoisuutta, miten suunnitella joustava kokoonpanojärjestelmä ja miten saavuttaa ratkaisut, joilla lisätään kykyä hallita kokoonpanon vaihtelua. (Svensson Harari et al. 2014, s. 1)

2.2.6 Optimaalinen työntekijäresurssi

Suurikokoisten ja lyhyen läpäisyajan tuotteiden kokoonpanolinjalla puskureiden käyttöä asemien välissä ei ole nähty järkevänä tapana joustavuuden lisäämiseksi. Sen sijaan joustavuutta pitäisi pyrkiä löytämään työntekijäresurssista. (Hytönen et al. 2008, s. 44) Kokoonpanojärjestelmässä, jossa työntekijät ovat tärkeä resurssi, asentajan kyvyt ja joustavuus toteuttaa eri tehtäviä voi tehdä suuren eron kokoonpanoprosessin ajassa ja laadussa. Matalan volyymin tilausohjautuvassa tuotannossa on tyypillistä, että työntekijäresurssin ominaisuuksia voi kuvata seuraavalla tavalla (Hytönen et al. 2008, s. 45):

- Työntekijöillä on paljon osaamista yrityksen tuotteista ja tuotannosta
- Osa työntekijöistä on pysynyt työnantajalla pitkään ja työtyytyväisyys on korkealla
- Yritys on riippuvainen työntekijöiden pätevyydestä ja henkisestä pääomasta.
- Uuden työntekijän kouluttaminen on vaikeaa

Tarve monitaitoisille ja ristiin koulutetuille työntekijöille on erityisen tärkeää silloin, kun samassa kokoonpanojärjestelmässä kokoonpannaan erilaisia tuotteita. (Asadi et al. 2015a, s. 242) Joustavat prosessit ja työntekijäresurssi vaikuttavat suoraan tuotannon läpäisy aikaan. (Hemmati & Rabbani 2010, s. 265)

Erikoistuminen

Adam Smith esitteli jo vuonna 1776 teoksessaan ”Kansojen varallisuus” ajatuksen työn pilkkomisesta osiin, jolloin tapahtuu erikoistumista, joka johtaa tuottavuuden kasvuun (Chandra 2004, s. 787). Henry Fayol, joka tunnetaan johtamismenetelmien kehittäjänä, esitti myös yhtenä tärkeimpänä johtamisperiaatteena ajatuksen työkokonaisuuden jakamisesta pieniin osiin ja työntekijöiden erikoistumisesta niin, että jokainen tekee yhden näistä osista. Tämä erikoistuminen johtaa yksittäisten tehtävien tehokkuuden kasvuun, joka johtaa parempaan tuottavuuteen ja lopulta parempiin tuottoihin. (Fayol 1955)

Työntekijät oppivat asennustehtävät nopeammin, jos työ on yksinkertaisempaa ja sitä on vähemmän. Henry Ford jakoi kokoonpanolinjansa työtehtävät mahdollisimman pieniin

osiin, jolloin työtehtävät opittiin nopeasti ja tehokkuus kasvoi, mutta nopea tahti ja tylsistyminen aiheutti suurta vaihtuvuutta työntekijöiden keskuudessa. (Whitney 2004, s. 385) Volvon moottoritehtaalla 18 rinnakkaista solua muutettiin 18 asemaa käsittäväksi kokoonpanolinjaksi. Uuden asentajan oppimisaika lyheni kuukaudesta yhteen päivään. (Neumann et al. 2006, s. 910)

Pinkerin & Shumskyn (2000, s. 32) mukaan ristiin koulutetut ja joustavat työntekijät tuottavat enemmän kuin erikoistuneet työntekijät. He toteavat kuitenkin, että tehtävien suuri määrä rajoittaa osaamisen kehittymistä ja näin huonontaa laatua. Myös Hopp et al. (2004, s. 91) toteaa, että työntekijällä on toissijaisella työpisteellä matalampi tehokkuus. Ristiin koulutettujen työntekijöiden matala käyttöaste huonontaa laatua ja sen takia optimaalinen työntekijäresurssi sisältää sekoituksen sekä joustavia että erikoistuneita työntekijöitä.

Pinker & Shymsky (2000, s. 32) toteavat, että pienissä järjestelmissä, joissa on pitkät oppimisajat, optimaalinen työntekijäresurssikokoonpano tarjoaa merkittävästi suuremmat hyödyt kuin äärimmäiset ratkaisut joko joustavuuden tai erikoistumisen suhteen. On parempi, kun osa työntekijöistä on erittäin joustavia sekä monitaitoisia ja osa on joustamattomia sen sijaan että kaikki työntekijät olisi koulutettu yhtä joustaviksi ja osaaviksi (Hytönen et al. 2008, s. 45).

Työntekijäresurssin ohjaustavat

Työntekijöiden ohjaustapa määrittää työntekijälle tehtävät kokoonpanojärjestelmässä. (Hopp & Oyen 2004, s. 924) Vaihtelevassa suuresti räätälöityjen tuotteiden manuaalisessa kokoonpanotuotannossa vaaditaan tehokasta työntekijöiden ohjausta. Tuotannon päälliköiden pitäisi olla tietoisia, miten tuotetta valmistavien työntekijöiden määrä ja heidän osaamistasonsa vaikuttavat kokonaissuorituskykyyn. (Peltokorpi & Niemi 2019, s. 452)

On yleistä, että tuotantolinjan samalla asemalla on useampi työntekijä. Tällöin on kuitenkin suositeltavaa, että työntekijöille on määritelty tehtävät ja ne tehdään järjestyksessä niin, etteivät työntekijät viivytä toistensa tekemistä. (Alghazi & Kurz 2018, s. 126) Työntekijöiden ohjaukseen on kehitelty erilaisia ohjaustapoja, joita esittelee esimerkiksi Peltokorpi & Niemi (2019) ja Hytönen et al. (2008). Eri ohjaustapojen vaikutusta tuotannon tehokkuuteen vertailee Saadat et al. (2013). Hytönen et al. (2008) ovat tutkineet työntekijäresurssin allokoimista kokoonpanolinjalla, jonka tuotteiden räätälöintiaste on korkea ja tuotantovolyymit matalat. Koska työ on manuaalista, työntekijöiden hyödyntämisen tehokkuus on kriittistä ja se antaa parhaan tuottavuuden linjalle. (Hytönen et al. 2008, s. 44)

Perinteinen tapa järjestää miehitys kokoonpanolinjalle on se, että erikoistuneilla työntekijöillä on omat asemansa, joilla he pysyvät (Wang et al. 2005, s. 845). Miehitys voidaan järjestää myös niin, että työntekijä tai työntekijäryhmä liikkuu laitteen mukana alusta loppuun ja suorittaa kaikki kokoonpanovaiheet (Lapinleimu et al. 1997, s. 112). Kirjallisuus tuntee käsitteet nimillä liikkuvat ja paikallaan olevat työntekijät (*engl. walking-workers ja fixed-workers*). Tuotantolinjoilla, joilla asentajat pysyvät omilla asemillaan, on todettu olevan heikko joustavuus, tasaisen kysynnän tarve ja tasapainotuksen vaikeus. (Wang et al. 2005, s. 845-846) Toisaalta, kokoonpanolinja liikkuvilla työntekijöillä ei tuo erikoistumishyötyjä verrattuna paikkakokoonpanoon, sillä työntekijät suorittavat samat tehtävät molemmissa järjestelmissä (Hytönen et al. 2008, s. 618)

Bartholdi et al. (2001, s. 2) mukaan ämpäriprikaati (*engl. bucket-brigade*) on yksi tapa järjestää työntekijät tuotantoon. Siinä työntekijät liikkuvat joustavasti vierekkäisille asemille tarpeen mukaan. Ämpäriprikaatin hyötyjä ovat itsensä tasapainottava kokoonpanojärjestelmä, maksimaaliset tuotantomäärät ja ohjauksen yksinkertaisuus. Myöhemmässä julkaisussaan Bartholdi et al. (2010) toteaa itseohjautuvien ryhmien voivan toimia odottamattomasti ei-toivotulla tavalla tai tuotannon kannalta jopa katastrofaalisesti. Ämpäriprikaati ei myöskään sovi kaikenlaiseen tuotantoon. Se vaatii työtehtävien olevan joustavasti jaettavissa työasemien kesken ja monipuolista työntekijöiden kouluttamista. (Hytönen et al. 2008, s. 45)

Työntekijöiden koulutus on kallista ja liian laaja koulutus heikentää tuottavuutta varsinkin pitkällä tuotantolinjalla. On tärkeää tunnistaa optimaalinen taitotaso, jonka työntekijät tarvitsevat. (Saadat et al. 2013, s. 1030) Kokoonpanojärjestelmän tarvittava työntekijäjoustavuus voidaan hankkia kouluttamalla muutama asentaja monipuolisesti ja siirtelemällä heitä pullonkaularesurssille (Hytönen et al. 2008, s. 44). Itseohjautuvat ryhmät ovat joustava tapa tasapainottaa työtehtävät työntekijöiden kesken (Peltokorpi & Niemi 2019, s. 453).

Hytönen et al. (2008) esittelevät työntekijöiden ohjaamiseen luomaansa mallia suurien tilausohjautuvien tuotteiden tuotantoon, joiden kokoonpano tapahtuu yleensä ryhmissä. Mallissa kokoonpanolinjalla on monipuolisesti koulutetuista asentajista koostuva työntekijäryhmä, joka tasapainottaa kokoonpanolinjan liikkumalla pullonkaularesurssille. Tutkimuksessa todetaan ehdotetun mallin parantavan kokoonpanolinjan tehokkuutta merkittävästi. Hytönen et al. (2008, s. 44, 49) toteavat, että liikkuvien työntekijöiden allokoinnille pitää olla selkeät säännöt ja sen pitäisi olla mahdollisimman itseohjautuvaa.

2.3 Kokoonpanojärjestelmän suunnittelu

Stephensin & Meyersin (2010, s. 6-7) mukaan kokoonpanojärjestelmän suunnittelun päätavoitteet tulisi johtaa yrityksen missiosta, sillä se tarjoaa selkeän suunnan kehitykselle kaikilla organisaation tasoilla. Projektikohtaisesti luodut alataavoitteet sen sijaan tarkentavat tuloksia, jotka halutaan saavuttaa. Bellgran & Säfsten (2004, s. 23-24) korostavat, että uuden kokoonpanojärjestelmän suunnittelussa kannattaa harkita käytettävän kerättyä tietoa ja kokemuksia aiemmista projekteista ja järjestelmistä. Yleinen ongelma kuitenkin on, että osaaminen on yksilöllä ja organisaatiotasolle on dokumentoitu vähän tietoa. Yksilöiden tietotaidon siirtämisen vaikeus organisaation tietämykseksi on empiirisesti tunnistettu. (Bellgran & Säfsten 2004, s. 24)

Bellgran & Säfsten (2004, s. 1) pitävät tehokkuutta ja kestävyyttä kokoonpanojärjestelmän vaatimuksina nykyisissä tuotantoyrityksissä. Kokoonpanojärjestelmän kestävyuden taso vaihtelevassa ympäristössä voi olla erottava tekijä yrityksen menestyksen ja epäonnistumisen välillä. Jatkuva parantaminen, nopeat ja rinnakkaiset kehitysprosessit ja kokoonpanojärjestelmien lyhentyneet asetusajat ovat yrityksissä todellisuutta. Se tarkoittaa, että kokoonpanojärjestelmät on suunniteltava niin, että sisäiset ja ulkoiset muutokset ja häiriöt on hallittava toiminnan aikana menettämättä tehokkuutta, joustavuutta ja nopeutta sekä näiden seurauksena myöskään kannattavuutta. (Bellgran & Säfsten 2004, s. 1, 19) Onnistuneita suunnitteluprosesseja ja kehitystyötä on pitkään pidetty valmistavien yritysten kilpailuedun lähteenä. (Svensson Harari et al. 2020, s. 1043)

Teollisuuden pitäisi kehittää muunneltavia kokoonpanojärjestelmiä, jotka mahdollistavat laajemman tuotevalikoiman valmistamisen (Hu & Ko 2015, s. 4-5). Heikosti häiriöitä kestävä kokoonpanojärjestelmän seuraukset voivat olla matala resurssien käyttöaste ja kyvyttömyys hallita jatkuvia häiriöitä. Laatuongelmat ja matala tuottavuus ovat seurauksia, jotka vaikuttavat suoraan yrityksen kannattavuuteen. (Bellgran & Säfsten 2004, s. 19) Kokoonpanojärjestelmän suunnittelussa pitäisi alkuvaiheessa keskittyä joustavuuden lisäämiseen, koska silloin se on helpointa. (Svensson Harari 2020, s. 59)

2.3.1 Tuoteanalyysi

Kokoonpanojärjestelmien suunnittelu aloitetaan tuoteanalyysillä. (Lapinleimu et al. 1997, s. 300; Hu & Ko 2015, s. 4) Tuote- ja tuotantoanalyysit ovat lähtökohtana kokoonpanojärjestelmän suunnittelulle. Tuoteanalyysi selkiyttää kuvaa tuotteiden olennaisista piirteistä ja antaa perustan kokoonpanojärjestelmän suunnittelulle. Selvitettäviä piirteitä ovat muun muassa tuotteiden rakenne, moduulit ja ydinosat sekä

tuotteiden ominaisuudet, tuotantovolyymit ja versioiden määrät. (Lapinleimu et al. 1997, s. 302)

Kokoonpanojärjestelmä edellyttää suunnittelutuotteistoa, jonka valmistamiseksi järjestelmä suunnitellaan. Sen tarkoitus on ryhmitellä tuotteet niin, että yhdellä suunnittelutuotteella voidaan kuvata useampia nimikkeitä ja täten supistaa käsiteltävää nimikemäärää. Suunnittelutuotteisto ja tuotantovolyymit määrittelevät suunnittelutuotannon, jolle kokoonpanojärjestelmä suunnitellaan. (Lapinleimu et al. 1997, s. 302) Valittaessa suunnittelutuotteistoa raskaiden ajoneuvojen sekamallinlinjalle, voidaan käyttää seuraavia kriteerejä (Asadi et al. 2015b, s. 6):

- Tuotteiden kokoonpano-aika, paino ja koko ovat yhtenevät
- Kriittisimmät työvaiheet vastaavat toisiaan riittävällä tarkkuudella
- Tuotteiden kokoonpanot sisältävät samat päävaiheet ja moduulit
- Kriittisten työkalujen ja laitteistojen tarpeet ovat yhtenevät

Tuotteen ja sen kokoonpanon analysointi ja kehittäminen ovat tärkeässä roolissa kokoonpanojärjestelmän suunnittelussa. (Hu & Ko 2015, s. 4) Yhteisten suunnitteluratkaisujen käyttö eri tuotteiden suunnittelussa vähentää joustavuuden tarvetta kokoonpanojärjestelmässä. Tällaisia joustavaan kokoonpanoon liittyviä suunnitteluratkaisuja ovat ainakin yhteinen asennusjärjestys, samanlaiset rajapinnat, yhteiset materiaalit ja yhtenäiset tuotekohtaiset prosessit ja työkalut. (Svensson Harari 2015, s. 5)

2.3.2 Tuotantoanalyysi

Tuotantoanalyysi syventää kokoonpanojärjestelmän suunnittelun teknisiä perusteita ja sen keskeinen kysymys on: mitä järjestelmältä vaaditaan suunnittelutuotannon valmistamiseksi. Tuotantoanalyysissä määritellään muun muassa tuotannon kysyntävauhti ja tahtiaika, ulkoistamiskysymykset ja kapasiteetin tarve. (Lapinleimu et al. 1997, s. 301-303) Tuotannon kysyntävauhti (engl. takt time) on tahti, jonka mukaan asiakkaat tilaavat tuotteita. Se on myynnin referenssiluku, joka kuvaa tavoitetta, johon tuotannon täytyy kyetä vastatakseen kysyntään. (Rother & Shook 2003, s. 53) Tuotannon kysyntävauhti voidaan määrittää kaavalla

$$Kysyntävauhti = \frac{\text{Tuotannon vuosityöaika}}{\text{Kysyntä}}, \quad (2)$$

jossa tuotannon vuosityöaika ilmaistaan päivinä ja kysyntä kappalemääränä. (Stevenson 2011, s. 627) Kysyntävauhtia käytetään tuotannosuunnitteluvaiheessa ja Lovelle (2001, s. 32) huomauttaa, että tuotannon kysyntävauhti ja tuotannon tahtiaika ovat eri asioita. Tahtiajalla (engl. cycle time) tarkoitetaan enimmäisaikaa, jonka verran kappaleen

työstämiseen on aikaa yhdellä asemalla ja se on tuotannon kysyntävauhtia pienempi. Tuotannon tarvitsee toimia tahtiajan puitteissa vastatakseen kysyntävauhtiin. Ideaalitulanteessa tahtiaika ja tuotannon kysyntävauhti ovat hyvin lähellä toisiaan. Tahtiaika voidaan laskea kaavalla

$$Tahtiaika = \frac{Tuotannon\ vuosityöaika}{Haluttu\ tuotantomäärä}, \quad (3)$$

jossa tahtiajan yksikkö on päivää per kappale (Stevenson 2011, s. 260). Rother & Shook (2003, s. 74) suosittelevat, että tuotannon kysyntävauhti ja tahtiaika pyrittäisiin saamaan mahdollisimman yhtenäisiksi. Tuotannossa on aina hukkaa, joten kysyntävauhdin ja tahtiajan ero on perusteltua. Niiden merkittävä ero kuitenkin osoittaisi, että tuotannossa on paljon hukkaa aiheuttavia ongelmia, joita pyritään peittämään lyhyemmällä tahtiajalla. Samalla myös pienennettäisiin kannustinta poistaa nämä ongelmat. (Rother & Shook 2003, s. 71, 74) Kokoonpanolinjan asemien teoreettinen minimimäärä voidaan laskea käyttämällä kaavaa

$$N_{min} = \frac{\sum t}{Tahtiaika}, \quad (4)$$

jossa N_{min} on asemien teoreettinen minimimäärä ja $\sum t$ tuotteen kaikkien vaiheiden tahtiaikojen summa. Kokoonpanojärjestelmän suunnittelussa tärkein määrittävä tekijä on tahtiaika, joka määrittää suoraan kokoonpanolinjan tuotantomäärän (Stevenson 2011, s. 260).

2.3.3 Layout

Termiä layout-suunnittelu käytetään yleisesti kahdessa merkityksessä. Suppea merkitys tarkoittaa asioiden sijoittelua, ja laaja merkitys käsittää koko sijoittelun perustana olevan tuotantojärjestelmän suunnittelun. (Lapinleimu et al. 1997, s. 309) Layout viittaa osastojen, työasemien ja laitteiston järjestykseen kokoonpanojärjestelmässä sisältäen materiaalien ja ihmisten liikkeitä koko systeemin läpi. Layoutin suunnittelun tavoite on helpottaa työn, materiaalin ja informaation virtausta kokoonpanojärjestelmän läpi. (Stevenson 2011, s. 248) Muita tavoitteita ovat:

- Tehdä laadunhallinta helpoksi
- Hyödyntää työntekijöitä ja tilaa tehokkaasti
- Välttää pullonkauloja
- Minimoida materiaalinhallinnasta johtuvat kustannukset
- Poistaa tarpeeton materiaalin ja työntekijöiden liike
- Minimoida tuotantoaika
- Turvallisuus. (Stevenson 2011, s. 248)

Layouttiin liittyvät päätökset ovat tärkeitä, koska ne vaativat merkittäviä investointeja ja pitkän aikavälin sitoumuksia, mikä tekee virheiden korjaamisesta vaikeaa. Layoutilla on myös merkittävä vaikutus toimintojen kustannuksiin ja tehokkuuteen. (Stevenson 2011, s. 248) Santosin et al. (2006, s. 18) mukaan tuotannon työpisteiden ja tuotantoresurssien sijoittelulla on suora vaikutus tuotannon läpäisyaikoihin ja kokonaistuotantomäärään. Layoutsuunnittelu pyrkii selvittämään, miten saavutetaan:

1. Tilojen, työvälineiden ja työntekijöiden parempi hyödyntäminen
2. Materiaalin, tiedon ja ihmisten parempi virtaus
3. Työntekijöiden henkisen hyvinvoinnin ja turvallisuuden kehitys
4. Asiakasvuorovaikutuksen kehitys
5. Joustavuus. (Heizer & Render 2014, s. 394)

Layoutsuunnitelmat on hyvä nähdä muuttuvina, koska sidosryhmien tarpeet muuttuvat jatkuvasti. Hyvä layout on jo alun perin suunniteltu joustavaksi, mikä mahdollistaa tuote- ja tuotantomäärämuutokset nopeasti. Joustavan layoutin mahdollistaa tarpeeksi monipuolisesti koulutetut työntekijät, huolletut työvälineet, matalat investoinnit, läheiset työasemat sekä pienet ja liikuteltavat työvälineet. (Heizer & Render 2014, s. 394)

2.3.4 Suunnitteluprosessi

Schenkin et al. (2010, s. 18-22) mukaan kokoonpanojärjestelmän suunnitteluprojekti voidaan toteuttaa systemaattisen suunnitteluprosessin tai erilaisten tapauskohtaisten suunnittelumallien mukaisesti. Erilaisia suunnitteluprosessimalleja kokoonpanojärjestelmän suunnitteluun on esitelty useita erilaisia. Suunnitteluprosessien aloitus- ja lopetuspisteet vaihtelevat ja Bellgran & Säfsten (2010, s. 86) esittävätkin, että suunnitteluprosessit voidaan jäsentää eri vaiheisiin valitun lähtöpisteen mukaan.

Mutherin (2015, s. 1-1) mukaan layout-suunnittelun peruselementtejä ovat tuote ja tuotantomäärä, jotka määrittävät layoutin kaikki muut ominaisuudet ja ehdot suoraan tai epäsuorasti. Luotettavat tiedot näistä kahdesta ovat suunnitteluprosessissa keskeisessä roolissa. Seuraavaksi Muther (2015, s. 1-2) keskittyisi tuotteen reititykseen, jolla tarkoitetaan prosesseja sekä niiden toimintoja ja järjestystä. Neljäntenä tarkastellaan layoutin tukitoimintoja, jotka käsittävät laitteiston, apulaitteet sekä niihin liittyvät toiminnot ja tukipalvelut. Tukitoimintoihin kuuluvat myös toimitusten vastaanotto- ja lähetysalueet. Tukitoiminnot ovat tuotannon toiminnan kannalta välttämättömiä, ja ne tulee ottaa huomioon layoutsuunnittelussa. Neljän peruselementin lisäksi olennainen osa layout-suunnittelua on aika, sillä se vaikuttaa kaikkiin muihin elementteihin. (Muther 2015, 1-1) Suunnittelumallissaan Muther korostaa kysymystä *miksi*. Sitä toistetaan suunnitteluprosessin eri vaiheissa ja sillä kyseenalaistetaan päätöksien taustalla oleva

tieto. Näin varmistetaan prosessin päätöksien pohjautuminen mahdollisimman paikkansapitävälle tiedolle. (Muther 2015, s 1-1-1-3)

Lapinleimu et al. (1997, s. 300) esittelee karkealla tasolla tuotantojärjestelmän suunnittelun vaiheet:

1. Tuoteanalyysi
2. Tuotantoanalyysi
3. Valmistusstruktuurin luominen
4. Ohjausperiaatteiden määrittäminen
5. Valmistusyksiköiden kapasiteetilaskelmat
6. Valmistusyksiköiden tekniikan kehittäminen
7. Solujen sisäinen layout
8. Valmistusyksiköiden sijoittelulayout
9. Sisäisen logistiikan kehittäminen

Kokoonpanojärjestelmän suunnittelu voi edetä edellä esitellyn järjestyksen mukaisesti, mutta eri vaiheiden vaikutus toisiinsa on niin merkittävä, että käytännössä useamman vaiheen toteuttaminen yhtäaikaista ja aiempiin vaiheisiin palaaminen on välttämätöntä (Lapinleimu et al. 1997, s. 300) Prosessimallin tehtäväpolkua voi joutua iteroimaan useamman kerran. Suunnittelumallia kannattaa pitää enemmän loogisena ajatteluprosessina kuin päätösten varsinaisena järjestyksenä. (Hu & Ko 2015, s. 4)

Tuotteiden kokoonpanojärjestys on harvoin täsmälleen tiedossa, jolloin kokoonpanojärjestelmä kannattaa suunnitella yleisten sääntöjen ja aiempien kokemusten perusteella. Tuotteella on tapana muuttua ajan myötä ja sen kysyntä sekä tuotantokapasiteetti voi vaihdella. Sen takia kokoonpanojärjestelmään pitäisi sisällyttää joustavuutta esimerkiksi osien, prosessien ja tuotantovolyymien suhteen. Erilaiset kokoonpanojärjestelmät ovat myöskin alttiita vaihtelulle, minkä takia kokoonpanojärjestelmän suunnittelussa pitäisi ottaa huomioon toiminnallinen joustavuus suunnitteleamalla varastopuskureita, yleiskäyttöisiä työntekijöitä ja puskuriaikoja. (Hu & Ko 2015, s. 4)

Myös Bellgran ja Säfsten (2010, s. 83-84) toteavat, että tärkeimmät tekijät kokoonpanojärjestelmän suunnittelussa ovat tuote ja sen suunnittelu sekä arvioitu tuotantovolyymi. Heidän tutkimuksessaan on huomattu, että uutta kokoonpanojärjestelmää suunnitelleet ruotsalaiset yritykset käyttivät kahta lähestymistapaa hyväkseen. Ensimmäinen lähestymistapa aloittaa kokoonpanojärjestelmän suunnittelemisen layoutin avulla. Lopullista layoutia ei määritellä alussa, vaan eri vaihtoehtoja kehitellään rinnakkain ennen lopullista päätöstä. Toinen lähestymistavan lähtökohta on kokoonpanojärjestelmän vaatimusten määrittely.

Määriteltyjä vaatimuksia ovat esimerkiksi järjestelmän suorituskyvyt, tuotantovolyymit ja kokoonpanoaika. Kuvassa 11 esitellään teollisuudessa käytetty systemaattinen systeemin suunnittelumalli, joka pohjautuu osittain Bellgranin aiempiin tutkimuksiin. (Bellgran & Säfsten 2010, s. 87)

1. Karkea suunnittelu ja yksityiskohtainen informaatio	3. Kokoonpanojärjestelmän yksityiskohtainen suunnittelu
1.1 Analysoi nykyinen kokoonpanojärjestelmä	3.1 Valitun layoutin parantaminen
1.2 Tuotteiden myyntiennusteet	3.2 Järjestelmän eri osien yksityiskohtainen suunnittelu
1.3 Vastaavien kokoonpanojärjestelmien vertailu	3.3 Laitteiston ja varusteiden suunnittelu
1.4 Vaatimuksen määrittäminen kokoonpanojärjestelmälle	3.4 Testiasemien ja tuotanto-ohjelman suunnittelu
1.5 Tuoteanalyysi	3.5 Kokoonpanojärjestelmän komponenttien tilaus
2. Kokoonpanojärjestelmän kehitys	4. Kokoonpanojärjestelmän toteuttaminen
2.1 Toiminnallinen rakenne	4.1 Työkalujen suunnittelu ja hankinta
2.2 Ideoiden luonti	4.2 Tuotantoalueen valmistelu
2.3 Määritä ja valitse asennusperiaatteet	4.3 Kiinteiden laitteistojen asennus
2.4 Ideoiden konseptointi	4.4 Kokoonpanojärjestelmän rakentaminen
2.5 Määritä valmistusjärjestys	4.5 Kokoonpanon testaaminen
2.6 Alustavien layouttien luonti	4.6 Dokumentoinnin laatiminen
2.7 Työtehtävien organisointi	
2.8 Taloudellinen ja tekninen arviointi	
2.9 Kokoonpanojärjestelmän valinta	

Kuva 11 Teollisuudessa käytetty systemaattinen systeemin suunnittelumalli lähteestä (Bellgran & Säfsten 2010, s. 87)

Kuvan 11 suunnittelumalli jakautuu kokoonpanojärjestelmän karkeaan suunnitteluun sekä tiedon keräämiseen, kokoonpanojärjestelmän kehittämiseen, yksityiskohtaiseen suunnitteluun ja kokoonpanojärjestelmän toteuttamiseen. Ei ole poikkeuksellista, että todellisuudessa kokoonpanojärjestelmän suunnittelu etenee järjestelmällisen suunnitelman sijaan ongelma ja ratkaisu kerrallaan. Järjestelmällisyyden aste riippuu paljon siitä, kuinka hyvin tiedostetaan odotettavissa olevien ongelmien monimutkaisuus. (Bellgran & Säfsten 2010, s. 86)

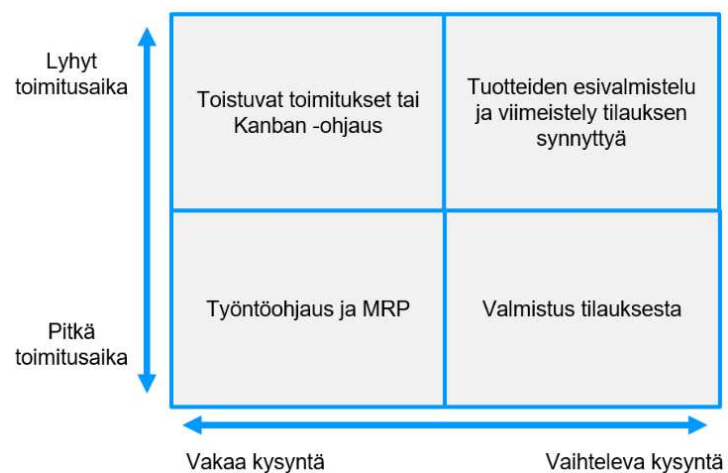
Kun työ kokoonpanojärjestelmän suunnittelun aikana ei ole perusteellista, ongelmat luultavasti ilmenevät fyysisessä kokoonpanojärjestelmässä. Tämä tarkoittaa, että seurauksia heikosti tehdystä suunnitteluvaiheen työstä ilmenee, mitä pidemmälle kokoonpanojärjestelmän toteutus etenee. Ilmeneviä ongelmia voivat olla esimerkiksi haasteet toteutuksen, ylösajon ja ylläpidon kanssa. Muita ongelmia voi olla tuotantohäiriöt tai äkillinen tarve muuttaa tekniikkaa, työn organisointia tai kapasiteettia. (Bellgran & Säfsten 2004, s. 17-18)

2.3.5 Tuotannon ohjausperiaate ja tuotannonohjaus

Nykyään tuotteiden monimutkaisuus, räätälöitävät optiot ja nopeat toimitusajat aiheuttavat kokoonpanojärjestelmän monimutkaistumista ja haasteita tuotannonohjaukselle. Kokoonpanojärjestelmältä vaaditaan enemmän joustavuutta ja tehokkuutta samalla kun kustannusten pitäisi pysyä matalalla tasolla. Huonosti johdettu tuotannonohjaus johtaa kohonneeseen keskeneräisen tuotannon määrään, heikkoon

toimitusten luotettavuuteen ja heikentää tuottavuutta. (Karrer 2012, s. 1-2) Toimivassa tuotannonohjausprosessissa tarvittavien resurssien, materiaalien ja kapasiteetin riittävydestä on huolehdittu ja ne on ajoitettu oikeaan paikkaan oikeaan aikaan (Lehtonen 2004, s. 66)

Tuotannonohjaamisen kaksi peruseriaatetta ovat varasto-ohjautuva ja tilausohjautuva tuotanto (Lödding & Rossi 2013, s. 140; Lapinleimu 2001, s. 109; Bennett & Forrester 1993, s. 24). Tilauksen tuotanto aloitetaan valitun ohjauseriaatteen mukaan joko asiakkaalta tai varastolta tulevan signaalin perusteella. Kuvassa 12 on esitelty erilaisia tuotannonohjausmenetelmiä toimitusajan ja kysynnän vaihtelun perusteella. (Lödding & Rossi 2013, s. 140-143)



Kuva 12 Tuotannonohjausmenetelmiä, kun muuttujina ovat kysyntä ja toimitusaika, mukaillen (Harrison et al. 2014)

Varasto-ohjautuvassa tuotannossa tuotantotilaus luodaan ennen asiakastilausta, jotka toimitetaan suoraan valmistuotevarastosta. Tuotantotilaus luodaan, kun kohdevaraston varastotasot tippuvat asiakastilausten takia ja aiheuttavat tarpeen uudelle tuotannolle. Erilaisia varasto-ohjauksen muotoja ovat aito imuohjaus, kaksilaatikkosysteemi ja puhdas varasto-ohjaus. Varasto-ohjautuvan tuotannon etuja ovat nopeat toimitukset, tuotannon yksinkertaisuus ja matala ulkopuolisen ohjauksen tarve. Sen heikkoutena pidetään varastojen jäykistävää ja tehottomuutta peittävää ominaisuutta, pääoman sitoutumista valmistuotevarastoon ja epäkuranttiusriskiä. (Lapinleimu 2001, s. 109; Lödding & Rossi 2013, s. 142-143)

Kokoonpanojärjestelmä voi käyttää useita erilaisia ohjaustapoja, mutta yhdellä tuotteella voi olla vain yksi ohjaustapa. Eri tuotantoyksiköiden ohjauksen lähtökohdat voivat olla samat, mutta yksiköiden luonne ja tuotantotyyppi vaikuttavat käytettäviin menetelmiin. Varasto-ohjauksen yksi muoto, aito imuohjaus, sopii erityisen hyvin osavalmistuksen ja kokoonpanon väliin (Lapinleimu 2001, s. 109-112).

Tilausohjautuvien tuotteiden kohdalla tuotantotilausten luominen on käytännössä tuotannosuunnittelua. Ilman asiakastilausta ei valmisteta mitään ja yksinkertaisimmillaan tilausohjattavan tuotteen asiakastilaus muutetaan suoraan tuotantotilaukseksi. (Lödding & Rossi 2013, s. 140) Lapinleimu (2001, s. 109-110) mukaan tilausohjausta käytetään tuotteille, jotka sitovat paljon pääomia ja tilausohjautuvan tuotannon toimitusaika on riittävä. Tuotteille on lisäksi ominaista, että niillä on paljon variantteja ja niiden valmistaminen sisältää epäkuranttiusriskin. Tilausohjauksen etuja ovat joustavuus erilaisten tuotteiden ja konfiguraatioiden valmistukseen, epäkuranttiusriskin puuttuminen ja pieni valmistusvarastoon sitoutunut pääoma. Laajasti tuotannossa käytettynä tilausohjatun tuotannon lyhyt toimitusaika ja pienet valmistuserät aiheuttavat haasteita tuotannolle ja tekevät siitä monimutkaisempaa. (Hemmati & Rabbani 2010, s. 265; Lapinleimu 2001, s. 109-110)

Asiakkaiden vaihteleva kysyntä yhdistettynä tilausohjautuvaan tuotantostrategiaan vaatii, että kokoonpanojärjestelmien pitää kyetä hallitsemaan asiakkaiden yksilöidyistä tilauksista johtuvat epävarmat markkinamuutokset ja mukautumaan uusiin tuotteisiin ja variantteihin. (Svensson Harari et al. 2014, s. 1) On tärkeää, että kokoonpanojärjestelmä ja kaikki sen tukifunktiot sekä fyysisellä että loogisella tasolla kykenevät mukautumaan näihin muutoksiin ja ovat käyttökelpoisia tulevienkin tuotesukupolvien ajan (EIMaraghy 2009, s. 26)

2.4 Kokoonpanojärjestelmien simulointi

Simuloinnilla tarkoitetaan tietokoneen avulla tapahtuvaa järjestelmän mallintamista, mallin kokeellista manipulointia ja tulosten analysointia. Simulointimallin parametreja muuttamalla voidaan tehdä päätelmiä järjestelmän käyttäytymisestä. (Lapinleimu et al. 1997, s. 319) Simulointi on tärkeä työkalu sekä tuotannon suunnittelu-, implementointi-että toimintavaiheessa. Simuloinnilla voidaan tunnistaa esimerkiksi tuotannon pullonkauloja ja käyttämätöntä potentiaalia sekä kokeilla tuotannon suorituskykyä ja erilaisia tuotannonohjaustapoja. (Bangsow 2015, s. 1)

Simulointi on hyvä työkalu osoittamaan investointien välittömiä kustannussäästöjä. Investointipäätöstä ei kuitenkaan pitäisi tehdä vain taloudellisten lukujen perusteella. Myös tuottavuus, kapasiteetin käyttöaste, laatu ja joustavuus pitäisi huomioida. (Freiberg & Scholz 2015, s. 223) Järjestelmien simulointi on luonteeltaan diskreettiä tapahtumapohjaista simulointia, jossa simulointikelloa siirretään tapahtumasta tapahtumaan. Näin ajan kulkua saadaan nopeutettua ja hyvin pitkienkin ajanjaksojen simulointi on mahdollista kohtuullisessa ajassa. (Lapinleimu et al. 1997, s. 322)

2.4.1 Simulointimallin hyödyt ja heikkoudet

Geng (2016, luku 12) toteaa, että simulointi on käytännössä ainoa tapa testata vaihtelun ja satunnaisten tapahtumien vaikutusta kokoonpanojärjestelmän toimintaan. Oikein käytettynä simulointi on erinomainen työkalu, jonka tarjoamat edut ovat kiistattomia. Sen avulla voidaan muun muassa arvioida investoinnin kannattavuutta, tehdä erilaisia analyyseja ja laskea varastojen riittäviä kokoja (Freiberg & Scholz 2015, s. 218). Simuloinnilla on kuitenkin myös omat heikkoutensa ja rajoituksensa, joita ovat muun muassa:

- Vaara, että malli ja todellisuus eivät vastaa toisiaan
- Tulosten oikeellisuuden todistaminen on vaikeaa
- Tulokset ovat usein epätarkkoja
- Huolellisesti tehty tutkimus kuluttaa aikaa
- Vaara, että takerrutaan epäolennaisuuksiin. (Lapinleimu et al. 1997, s. 329)

Carsonin (2005, s. 17) mukaan simulointia käytetään erilaisten vaihtoehtojen arviointiin, vertailuun ja analysointiin. Uusien ideoiden ja ongelmien ratkaisuihin liittyy käytännön riskejä, joiden takia näitä ei välttämättä koskaan kokeilla käytännössä. Simulointi on merkittävästi helpompaa, kustannustehokkaampaa ja riskittömämpää kuin kokeilu käytännössä. Tällöin myös vältetään esimerkiksi turha tuotantolaitteiden siirtely ja tilojen rakentaminen eikä häiritä käynnissä olevaa tuotantoa. (Lapinleimu et al. 1997, s. 319; Geng 2016, luku 12)

2.4.2 Simulointiprosessi

Tyypillisesti simulointimallilla vertaillaan valitulla tunnusluvulla eri vaihtoehtojen keskinäistä paremmuutta. Tietyt tekijät määritellään parametreiksi, joiden vaikutus tunnuslukuihin selvitetään kokeilemalla. (Lapinleimu et al. 1997, s. 322) Mallin rakennuksessa on päätettävä, mitä järjestelmän elementtejä malliin sisällytetään. Päätös eri elementtien sisällyttämisestä vaatii, että simuloinnilla on selkeä tavoite, johon elementtien merkityksellisyyttä verrataan. Mallinnuksen onnistuminen on riippuvainen siitä, miten mallintaja onnistuu määrittämään merkitykselliset elementit ja näiden välisen vuorovaikutuksen. Simulointimallin on oltava helposti ymmärrettävissä, mutta riittävän monimutkainen, jotta se kuvaisi mallinnettavaa järjestelmää todenmukaisesti. (Lapinleimu et al. 1997, s. 321-322) Simulointiprosessi on iteratiivinen prosessi, jossa voidaan palata edellisiin vaiheisiin. Sen vaiheet ovat Banksin (2005, s. 12-16) mukaan:

1. Tutkimusongelman määrittely
2. Tutkimuksen tavoitteiden ja projektisuunnitelman määrittely
3. Simulointimallin suunnittelu

4. Tiedon kerääminen
5. Simulointimallin rakentaminen
6. Simulointimallin verifiointi
7. Simulointimallin validointi
8. Simulointiajojen määrittely
9. Tuotantoajojen analysointi
10. Lisäajojen tarpeen selvittäminen
11. Dokumentointi ja raportointi
12. Implementointi

Simulointimallin luonnin keskeinen ongelma on määritellä järjestelmärajat siten, että ympäristöstä tuleva vaikutus otetaan huomioon mallissa. Ensimmäinen vaihe on tunnistaa nämä vuorovaikutukset ja sen jälkeen jokaisen tekijän kohdalla harkita erikseen:

- Laajennetaanko järjestelmä käsittämään kyseinen tekijä
- Käsitelläänkö tekijää järjestelmän syötteenä, jolloin sen arvoa voidaan muuttaa
- Jätetäänkö tekijän vaikutus ottamatta huomioon. (Lapinleimu et al. 1997, s. 320)

Banks et al. (2005, s. 311-316) mukaan simulointimallin verifiointi ja validointi tehdään yleensä samaan aikaan mallin luonnin kanssa. Verifiointin tarkoitus on varmistaa, että simulointimalli kuvaa haluttua tuotantoa niin kuin halutaan. Validointi tarkoittaa mallin ja sen käyttäytymisen vertaamista oikeaan järjestelmään ja sen käyttäytymiseen. Banks et al. (2005, s. 316) huomauttavat potentiaalisesta virheen mahdollisuudesta validoinnissa. Yleensä simulointimalli on sovitettu reaali maailman kanssa tietyn lähtödatan perusteella ja tällöin koko mallin oikeellisuus riippuu tämän lähtödatan oikeellisuudesta. Ratkaisuksi he ehdottavat mallin validoimista myös toisilla todellisuudesta saaduilla lähtöarvoilla.

Bangsowin (2015) mukaan simulointimallin tulokset riippuvat lähtötietojen laadusta ja luodun mallin tarkkuudesta todelliseen järjestelmään verrattuna. Lapinleimu et al. (1997, s. 338) toteavat, että vaikka lähtötietoja olisi saatavilla, ne voivat olla epätarkkoja tai väärässä muodossa. Usein lähtötietoja ei ole saatavilla ollenkaan, jolloin täytyy turvautua esimerkiksi yksinkertaistamiseen tai arvioon. Arvioita voi tarkentaa myöhemmin simulointiprosessin edetessä.

Simulointiprosessin viimeiset vaiheet käsittävät dokumentoinnin ja raportoinnin. Carsonin (2005, s. 22) mukaan simuloinnin tuloksista kannattaa tehdä sekä esitys että raportti. Esitys tarjoaa tilaisuuden kysymyksille ja vastauksille ja perusteellinen raportti viimeistään selventää esityksen aikana nousseet kysymykset. Raportin pitäisi sisältää myös oletukset, jotka simulointimalli pitää sisällään. Banks et al. (2005, s. 15) mukaan simuloinnin hyvään dokumentointiin on useita syitä. Dokumentointi lisää mallin

uskottavuutta, helpottaa sen uudelleenkäyttöä ja mahdollistaa toisen käyttäjän nopeamman perehtymisen.

Bangsowin (2015, s. 269) simuloinnissa datan vaihtelun kuvaamiseen voidaan käyttää todennäköisyysfunktioita, kuten normaalijakaumaa. Normaalijakauman arvot määrittävät keskiarvo ja keskihajonta. Normaalijakauman saamia arvoja rajaavat normaalijakaumalle asetetut minimi- ja maksimiarvot. Keskihajonnan numeerisen arvon sijasta usein käytetään vaihtelukerrointa (*engl. Coefficient of Variation, CV*), jota kutsutaan myös suhteelliseksi vaihteluksi. Se kuvaa satunnaisen arvon keskimääräistä poikkeamaa keskiarvosta. (Peltokorpi & Niemi 2018, s. 538) Bindu et al. (2020, s. 3) mukaan vaihtelukerroin on tilastollinen mittayksikkö, joka määrittellään lukujoukon keskihajonnan osuutena keskiarvosta. Prosentuaalinen CV lasketaan kaavalla

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} * 100, \quad (5)$$

missä σ on lukujoukon keskihajonta ja μ lukujoukon keskiarvo (Bindu et al. 2020, s. 3). Vaihtelukertoimen arvo voi vaikuttaa merkittävästi simulointituloksiin, minkä takia sen todenmukainen määrittäminen on tärkeää. Neumann et al. (2006, s. 911) mukaan Volvon uudella moottorikokoonpanolinjalla CV:n todettiin olevan 24 % kaikkien asemien kesken. Hytönen et al. (2008) simuloivat työntekijöiden ohjaustapoja matalavolyymisessä räätälöityjen tuotteiden kokoonpanossa. He käyttivät CV:nä eri arvoja väliltä 22 % - 54 %, mutta eivät perustelleet mihin nämä perustuivat. Hunter et al. (1990, s. 36) tutkivat työtehtävien haasteellisuuden vaikutusta työntekijöiden suoritustasoon. He totesivat, että matalan taitotason työtehtävissä CV:n arvo on 19 %. Saman tutkimuksen mukaan ammattitaitoa vaativien käsityöläisammattien ja päätöksentekoa vaativien sähköasentajien työtehtävien CV on keskimäärin 32 %.

3. UUDEN TUOTANTOKONSEPTIN SUUNNITTELU

Diplomityön tavoitteena on kehittää kohdeyritykselle tuotantokonsepti uuden sukupolven laitteiden kokoonpanoon. Tuotantokonsepti on melko uusi termi, jolle ei esimerkiksi ole suoraa englanninkielistä käännöstä. Se määritellään tavaksi järjestää tuotteen tuotanto sekä tukitoimet. Tässä diplomityössä tuotantokonseptin määritelmä sisältää kokoonpanojärjestelmän, asentajien ohjauksen sekä materiaalivirtojen suunnittelun.

Työn päätavoitteena on pienentää loppukokoonpanon läpäisyajan vaihtelua, lyhentää loppukokoonpanon läpäisyaikaa sekä vähentää loppukokoonpanotunteja. Osatavoitteena on mahdollistaa kohdeyrityksen pitkän aikavälin tavoite kouluttaa uusi asentaja itsenäiseen työhön kahdessa viikossa. Luvussa 3.1 esitellään kokoonpanojärjestelmän suunnittelussa käytetty suunnittelumalli. Nykyinen kokoonpanojärjestelmä ja sen piirteet esitellään luvussa 3.2 ja tuoteanalyysiprosessista kerrotaan luvussa 3.3 sekä tuotantoanalyysistä luvussa 3.4. Erilaiset luodut tuotantokonseptivaihtoehdot esitellään luvussa 3.5 ja niitä vertaillaan simuloimalla luvussa 3.6.

3.1 Käytetty suunnittelumalli

Diplomityössä käytetään pääsääntöisesti luvussa 2.3.4 esiteltyä Bellgranin aiempiin tutkimuksiin pohjautuvaa suunnittelumallia ja Lapinleimun et al. (1997, s. 300) esittelemiä suunnittelun vaiheita. Lapinleimun et al. (1997, s. 301) esittelemää mallia käytettiin diplomityössä ensisijaisena suunnittelumallina, kunnes huomattiin, että se ei ole itsensä selittävä vaan jättää paljon arvailujen varaan. Se ei myöskään etene loogisesti kohti tavoitetta. Bellgranin ja Säfstenin (2010, s. 87) esittelemä malli etenee loogisesti ja sisältää selkeät, ymmärrettävät vaiheet.

Kokoonpanojärjestelmän suunnittelu alkaa nykyisen kokoonpanojärjestelmän analysoinnilla, vastaavien kokoonpanojärjestelmien vertailulla ja vaatimusten määrittämisellä uudelle kokoonpanojärjestelmälle. Alkuvaiheessa on tärkeää myös arvioida tuotteiden myyntiennusteet ja suorittaa tuotteille tuoteanalyysi. Näiden vaiheiden jälkeen voidaan aloittaa kokoonpanojärjestelmien luominen, joka sisältää yhdeksän vaihetta. Diplomityön aikana toteutetaan Bellgranin ja Säfstenin (2010, s. 87) mallin vaiheet 1.1 – 2.9. Mallin vaiheet 3.1 – 4.6 toteutettaisiin tuotantokonseptin implementointivaiheessa.

3.2 Nykyisen kokoonpanojärjestelmän analysointi

Kohdeyrityksen nykyistä kokoonpanojärjestelmää analysoitiin asiantuntijatyöpajoilla, joihin osallistui valmistus- ja tuotannonkehityspäällikkö sekä kaksi tuotannon työnjohtajaa. Asiantuntijatyöpajojen mukaan kaikki uuden sukupolven laitemallit kootaan tällä hetkellä paikkakokoonpanossa. Kokoonpano rinnakkaisissa paikkakokoonpanoruuduissa on ollut perusteltua, koska laitemallien kokoonpanoissa on ollut paljon erilaisia häiriöitä. Kuten luvussa 2.2.1 esiteltiin, paikkakokoonpano on joustava ja häiriöitä kestävä tuotantokonsepti, joka kykenee peittämään erilaisten häiriöiden vaikutuksia. Tällä peittävällä ominaisuudella on myös negatiivisia ominaisuuksia. Paikkakokoonpanon etenemisestä on ulkopuolisen vaikea pysyä selvillä ja se peittää myös häiriöitä, jotka täytyisi ratkaista. Leanin mukainen tuotanto pyrki ratkaisemaan ilmenneet ongelmat, mutta niiden ratkaisemiseen ei aina välttämättä ole aikaa tai resursseja. Paikkakokoonpano voi myös piilottaa tehottomuutta, sillä kokoonpanoajat ovat pitkiä ja selkeää työjärjestystä ei ole, jolloin edes osaston työnjohtaja ei välttämättä tiedä, mitä kokoonpanoruudussa pitäisi tapahtua

Kohdeyrityksen tuotannossa on jonkin verran erikoistumista, sillä useat moduuli- ja osakokoonpanot tehdään erikoistuneiden asentajien toimesta. Myös laitteiden sähkö tarkastus, testaus ja viimeistely tehdään siihen erikoistuneiden asentajien toimesta. Kuitenkin laitteiden loppukokoonpanossa erikoistumista on vähän, vaikka se on kestoltaan pitkä työvaihe. Selkeimmät erikoistumiset ovat asentajien jako mekaanisiin ja sähköasentajiin sekä solukoordinaattoreihin, jotka selvittelevät ongelmia muiden puolesta. Kohdeyrityksen asentajilla ei ole selkeää erikoistumista tiettyjen laitemallien valmistamiseen, vaan asentajat kokoonpanevat niitä tuotteita, joille työnjohtaja tarvitsee työntekijöitä. Tällainen organisoimaton työntekijöiden ohjaus heikentää asentajien tehokkuutta ja aiheuttaa tuottavuuden menetyksiä.

Nykyinen paikkakokoonpanojärjestelmä ei ole myöskään virtaustehokas. Kun laite valmistuu, se pitää ajaa kokoonpanoruudusta ja hallista ulos. Osa kokoonpanoruuduista on ahtaita ja lisäksi hallin rakenteet vaikeuttavat pitkäpuomisten laitteiden ulosajoa. Näin ollen loppukokoonpanosta valmistuneen laitteen siirtäminen on aikaa vievää, mutta niin on myös uuden laitteen aloitus. Seuraavan laitteen materiaaleille ei ole selkeää puskurivarastoa, joten materiaalien odottamisesta aiheutuu viivettä tuotantoon. Uuden laitteen kokoonpano alkaa runkojen yhdistämisestä ja rungot voi tilata kokoonpanoruutuun vasta kun se on vapaa. Takarungon saapuminen ruutuun on riippuvainen sen tilaamisesta ja logistiikan palvelukyvyistä. Pisimmillään ruutu on tyhjänä useita tunteja, jopa vuoron, eivätkä asentajat pysty tekemään mitään hyödyllistä. Välillä

takarunko on ruutuun saapuessa niin likainen, että se on lähetetty pesukammioon pesuun, jolloin tehokasta työaikaä menetetään yhä enemmän.

Kohdeyrityksen tuotteissa on pitkät puomit, jotka vaativat kokoonpanoruuduilta paljon tilaa. Isot kokoonpanoruudut mahdollistavat materiaalien säilyttämisen ja näin materiaaleja voidaan tilata huomattavan ajoissa. Myös ilmenneet osapuutteet ovat ohjanneet materiaalien tilaamiseen varmuuden vuoksi ennen aikaisesti. Lisäksi materiaalinohjaus toimii niin, että kokoonpanon aloitukseen tuodaan materiaaleja, joita tarvitaan vasta pitkän ajan päästä. Tällaiset toimintatavat johtavat suureen materiaalin määrään, jolloin osien etsimiseen kuluu turhaa aikaa. Suurien kokoonpanoruutujen tilankäyttö on tehotonta, koska puomit ovat asennettuna laitteeseen vain noin *30 prosenttia* loppukokoonpanon läpäisyajasta. Tämä tarkoittaa, että *70 prosenttia* laitteen loppukokoonpanoajasta kokoonpanoruudun tila on selkeästi vajaakäytöllä.

Luvussa 2.2.5 esiteltiin raskaan ajoneuvoteollisuuden joustavuuden osatekijät Asadi et al. (2015a) mukaan. Diplomityössä havaittiin, että kohdeyrityksessä osa esitellyistä joustavuuden osatekijöistä on hyvällä tasolla ja toisissa olisi kehitettävää. Henkilöstö on koulutettu monipuolisesti sekä uuden sukupolven laitteet ovat yhteneväisiä ja jakavat samoja piirteitä. On kuitenkin osia ja työmenetelmiä, jotka voisi yhtenäistää laitemallien välillä. Myöskään työn sisältöjen standardointi ei ole kovin pitkällä, vaan kohdeyrityksen sisällä on useita erilaisia työskentelytapoja. Selkein eroavaisuus on hydrauliletkujen letkutus, minkä voi tehdä usealla eri tavalla. Materiaalinhallinta rajattiin diplomityöstä pois, mutta selvityksen aikana ilmeni useista lähteistä huoli materiaalinhallinnan kyvystä mukautua muutoksiin. Virtautettu ja tehokas materiaalinkäyttö vaatii kehittyneen ja joustavan materiaalinhallinnan.

Diplomityön alussa haluttiin tutustua kohdeyrityksen edellisten kokoonpanojärjestelmien lisäksi eri lähteistä löytyviin vastaaviin kokoonpanojärjestelmiin. Virtuaalikokouksien avulla päästiin tutustumaan tarkemmin kohdeyrityksen kahden eri tehtaan tuotantokonsepteihin Suomessa ja Ranskassa. Muiden lähteiden avulla perehdyttiin Ponsen, Metso Mineralsin, Normetin, Fastemsin, Bronto Skyliftin ja Junttanin kokoonpanojärjestelmiin ja niiden uudistamisiin. Verrokkirytysten vertailuanalyysin perusteella huomattiin, että verrokkit ovat myös kamppailleet samojen haasteiden kanssa kuin kohdeyritys. Merkille pantavaa on, että kaikki mainitut yritykset olivat joko siirtyneet tai harkitsivat siirtymistä virtautettuun linjakokoonpanotuotantoon. Kirjallisista lähteistä voi löytää verrokkirytysten uusien kokoonpanojärjestelmän positiivisia puolia, mutta niiden heikkoudet ja ilmenneet haasteet eivät lähteistä usein paljastu. Tällöin kokonaiskuva jää helposti yksipuoliseksi.

3.3 Tuoteanalyysi

Kuten luvussa 2.3.1 todettiin, kokoonpanojärjestelmän suunnittelu aloitetaan tuoteanalyysillä. Tuoteanalyysi selkiyttää kuvaa tuotteiden olennaisista piirteistä, kuten rakenteesta, moduuleista ja tuotantovolyymeista. Diplomityössä suoritettua tuoteanalyysin tarkoitus oli selvittää laitemallien loppukokoonpanon yhteneväisyydet ja eroavaisuudet, optioiden ja moduulien varianttien vaikutus loppukokoonpanoon ja laitemallien kypsyydet. Laitemallin kypsyydellä tarkoitetaan kokoonpanon sujuvuutta eli kuinka paljon laitemallin kokoonpanossa on muun muassa osa- ja laatu puutteita sekä valmistusrakente- ja suunnitteluvirheitä. Tuoteanalyysissä pyrittiin myös selvittämään laitteiden loppukokoonpanon vaihtelun syyt karkealla tasolla.

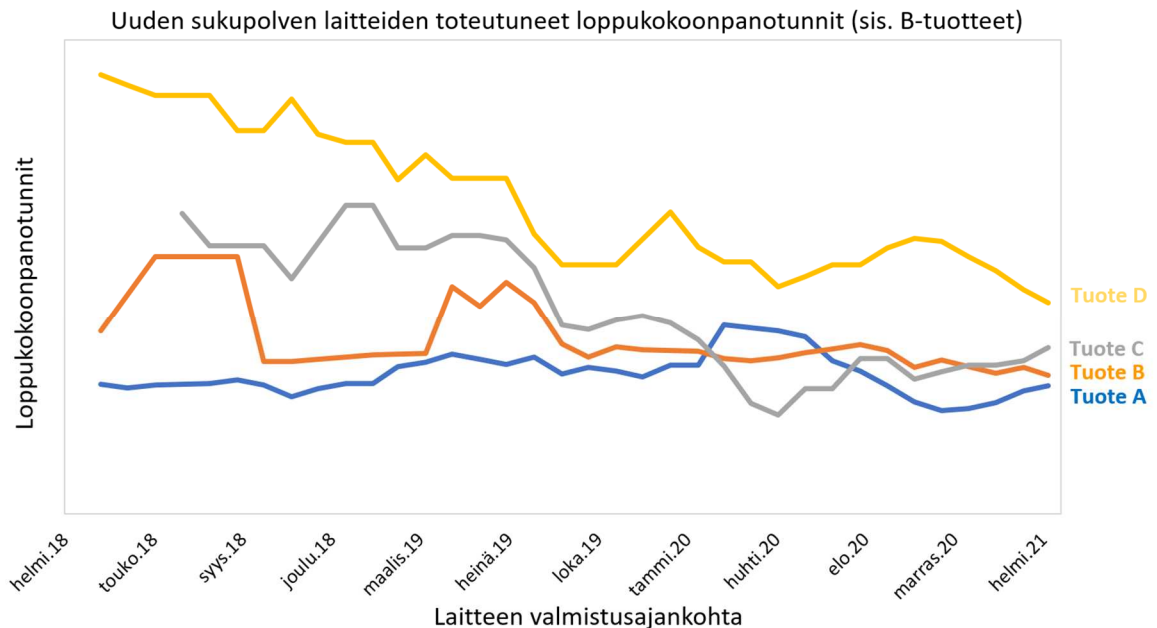
Suunnittelutuotteisto määritellään luvussa 3.3.1 ja aluksi tarkasteltiin laitteiden ominaisuuksia karkealla tasolla. Karkean tarkastelun perusteella voitiin rajata alustavaa suunnittelutuotteistoa ja välttää turhaa työtä tarkemmissa tutkimuksissa. Tuoteanalyysin tavoitteena oli myös löytää tapoja lyhentää laitteiden loppukokoonpanojen läpäisyä ja yhtenäistää niiden loppukokoonpanoja. Nämä esitellään luvussa 3.3.2 kehitysehdotuksina. Luvussa 3.3.3 esitellään laitteiden arvioidut tuotantovolyymit ja suunnittelutuotanto, jonka valmistamiseen kokoonpanojärjestelmä suunnitellaan.

3.3.1 Suunnittelutuotteiston luonti

Tuoteanalyysissä luotiin suunnittelutuotteisto, jolle kokoonpanojärjestelmä suunniteltiin. Tavoitteena oli löytää uuteen kokoonpanojärjestelmään tuotevalikoima, joiden loppukokoonpano on riittävän yhdenmukaista ja näin ollen odotetut hyödyt olisivat suuremmat. Valittujen tuotteiden yhteenlaskettu tuotantovolyymi pitäisi olla myös riittävällä tasolla, koska tavoiteltu synkronoidumpi kokoonpanojärjestelmä ei välttämättä kykene suureen kapasiteettijouksoon. Diplomityön suunnitteluvaiheessa kohdeyrityksen ohjausryhmä määritteli neljä laitemallia, joiden soveltuminen yhteiseen kokoonpanojärjestelmään selvitetään. Nämä laitemallit ovat Tuote A, Tuote B, Tuote C sekä Tuote D ja tuoteanalyysin tuloksena niistä muodostetaan suunnittelutuotteisto.

Suunnittelutuotteiston arvioinnista käytettiin apuna tiedonlähteinä kohdeyrityksen Cognos- ja MES-tietokantoja ja tutkimusmenetelminä data-analyysia ja asiantuntijatyöpajoja. Data-analyysia käytettiin laitemallien rakenteiden ja loppukokoonpanotuntien vertailuun sekä toteutuneiden toimitusten myyntidatan analysointiin. Se oli pääosin datan karsintaa, prosessointia ja muuntamista käyttökelpoiseen muotoon Excelissä. Asiantuntijatyöpajoilla täydennettiin puutteita, joita vielä ilmeni datan prosessoinnin jälkeen. Kuvassa 13 on esitelty Tuote A:n, Tuote B:n, Tuote C:n sekä Tuote D:n toteutuneet loppukokoonpanotunnit vuodesta 2018 vuoden

2021 alkuun. Kuvaajan luvuissa on mukana myös uutta suunnittelua vaatineet B-tuotteet.



Kuva 13 Uuden sukupolven laitteiden loppukokoonpanotunnit laitemalleittain

Kuten kuvasta 13 huomataan, Tuote A:n, B:n ja C:n loppukokoonpanotunnit ovat melko lähellä toisiaan. Tuote D:n loppukokoonpanotunnit ovat olleet koko tuotteen elinkaaren ajan selvästi suuremmat muihin verrattuna. Jo tuoteanalyysin alussa tunnistettiin Tuote D:n poikkeuksellisuus ja sen soveltuvuus kokoonpanojärjestelmään päätettiin selvittää ennen muihin tehtäviin ryhtymistä.

Selvityksen tuloksena Tuote D päätettiin karsia suunnittelutuotteistosta useista syistä. Syyt olivat laitemallin suurempi työmäärä, merkittävät viimeaikaiset suunnittelumuutokset, jatkuvat osa- ja laatu puutteet sekä virheet valmistusrakenteissa. Osa näistä ongelmista tulee todennäköisesti tulevaisuudessa korjaantumaan, mutta siitä huolimatta laitemallin ei nähty soveltuvan suunniteltavaan kokoonpanojärjestelmään. Tuote D eroaa liikaa suunnittelutuotteiston muista laitemalleista. Suurimpana haasteena nähtiin Tuote D:n loppukokoonpanon suuri työmäärä, joka on noin 40 prosenttia suurempi kuin muilla laitteilla keskimäärin sekä muista eroava kokoonpanojärjestys.

Laitteiden yhteneväisyydet ja eroavaisuudet

Suunnittelutuotteistoksi tarkempiin selvityksiin valittiin Tuote A, Tuote B, Tuote C. Nämä laitemallit kuuluvat samaan tuoteperheeseen, jonka suunnittelussa on pyritty yhdenmukaiseen suunnitteluun ja modulaariseen rakenteeseen. Työnjohtajien ja asentajien kanssa toteutetussa asiantuntijatyöpajassa laitemallien todettiin olevan hyvin samankaltaisia loppukokoonpanon näkökulmasta. Myös MES-tietokannasta saadut standardityölistat tukevat näkemystä, että laitteiden loppukokoonpanot ovat

yhteneviä. Laitemallien perusversioiden, jotka eivät sisällä optioita, loppukokoonpanossa ei ole kovin suurta määrää eroavaisuuksia. Perusversioiden suurin ero on puomeissa, sillä Tuote C on yksipuominen laite porausmoduulilla, kun Tuotteissa A ja B on kaksi eteenpäin poraavaa puomia. Tuote C:n loppukokoonpanon kokoonpanojärjestys onkin erilainen erilaisen puomin takia. Sen loppukokoonpanossa puomi asennetaan ennen ohjaamo, kun Tuotteille A ja B ohjaamo asennetaan ennen puomeja.

Selkeästi eniten vaihtelua loppukokoonpanoon aiheuttavat laitteen mukana myytävät lisälaitteet eli optiot. Kaikkien laitemallien osalta voidaan sanoa, että asiakkaan valitsevat optiot vaikuttavat merkittävästi loppukokoonpanon työkuormaan. Osa optioiden aiheuttamasta työmäärän lisääntymisestä kohdistuu moduulikokoonpanoihin, mutta merkittävä osuus vaikuttaa loppukokoonpanoon. Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään data-analyysin avulla optioiden ja moduulien varianttien aiheuttama työkuorman lisäys loppukokoonpanon eri L-vaiheille.

Optioihin liittyvä data saatiin kohdeyrityksen Cognos-raporteista, jotka sisälsivät vuonna 2015-2020 myytyjen laitteiden tiedot. Raporteista saatiin myytyjen laitteiden myyntispesifikaatiot, joiden perusteella tiedettiin eri laitemallien mukana myytyjen optioiden määrät. Tämä data karsittiin ja muunnettiin käyttökelpoiseen muotoon. Nämä tiedot yhdistettiin MES-tietokannasta ja asiantuntijatyöpajoista saatuihin tietoihin optioiden työmääristä loppukokoonpanossa. Tuloksena saatiin optiokohtaiset tiedot myyntimääristä sekä työmääristä ja L-vaihe, jolle työ kohdistuu sekä yleisistä että laitemallikohtaisista optioista. Prosessoitua dataa hyödynnettiin simuloinnissa luomalla tuotevalikoima, joka vastaa keskiarvallisesti myytyjen laitteiden tuoterakennetta.

Kohdeyrityksen tuotannossa laitteen loppukokoonpano jaetaan L-vaiheisiin, joita on yleensä viisi. Kuvassa 14 on esitelty laitemallien yleisimmät optiot, niiden aiheuttama työmäärän lisäys eri L-vaiheella ja menekki, joka kuvaa, kuinka moneen laitteeseen optio on myyty edellisen viiden vuoden aikana. Kaikista optioista ei tietoja ollut monipuolisesti saatavilla edes asiantuntijatyöpajan avulla.

Yleiset optiot	Lisäys LKP-tunteihin	Menekki	Työmäärän jakautuminen L-vaiheittain (h)										
			L1		L2		L3		L4		L5		
			Mek	Säh	M	S	M	S	M	S	M	S	
Optio 1	5	69 %	2		1							2	
Optio 2	2	54 %				2							
Optio 3	4	36 %					3		1				
Optio 4	3	29 %										3	
Optio 5	14	18 %						3			11		
Optio 6	2	6 %										2	
Optio 7	7				1		2						4
Optio 8	4				1		3						
Optio 9	6						4		2				
Optio 10	3						3						
Optio 11	4					3							1
Yhteensä			2		8		18		19		7		

Kuva 14 Yleisten optioiden työmäärä, menekki ja työmäärän jakautuminen L-vaiheille

Tehdyn selvityksen perusteella moduulien eri variantit eivät lisää loppukokoonpanon työtä merkittävästi, mutta optioiden vaikutus loppukokoonpanoon on suuri. Kuvassa 14 esitellyjä tietoja voidaan käyttää hyväksi muun muassa kokoonpanojärjestelmän tasapainottamisessa. Niiden avulla voidaan esimerkiksi arvioida, kuinka paljon tietyn työlään option asentamiseen täytyy varata kapasiteettipuskuria.

Asiantuntijatyöpajoissa selvisi, että laitteiden kokoonpanon aikana ilmenee yleisesti häiriöitä. Usein häiriöt ovat aiheutuneet osapuutteista, jolloin osa tai moduuli ei ole saapunut ajoissa loppukokoonpanoon. Osassa on voinut myös olla laatuvirhe, jolloin osaa pitää muokata tai tarvitaan uusi osa varastosta tai alihankkijalta. Häiriöitä voi syntyä myös valmistusrakenteessa tai asennuskuvissa olevan virheen takia. Myös asentaja saattaa tehdä virheen, joka pitää korjata. Nykyään häiriöitä on Tuotteiden A, B ja C loppukokoonpanossa melko vähän. Tuoteanalyysin perusteella voidaan sanoa että näiden laitteiden piirteet, tuoterakenteet, valmistusjärjestys ja loppukokoonpanon kypsyys ovat lähellä toisiaan. Tuotteiden A, B ja C yhteneväisestä rakenteesta ja kokoonpanojärjestyksestä on odotettavissa selviä tehokkuushyötyjä. Ne valitaankin uuden kokoonpanojärjestelmän suunnittelutuotteistoksi.

Tuote E

Diplomityön alussa uskottiin, että myös Tuote E -projektissa syntyvä laite saadaan tulevaisuudessa uuteen kokoonpanojärjestelmään. Tuotteeseen E tutustuttiin osallistumalla tuotekehityksen ja tuotannon välisiin palavereihin, joissa käytiin laitteen kokoonpanoteknisiä muutoksia läpi. Tuotteen E kehitys oli vielä hyvin varhaisessa vaiheessa ja se voi muuttua vielä useampaan kertaan. Sen tuotelayout ei ollut lopullinen vuoden 2020 lopulla eikä asennusjärjestyksiä ollut vielä mietitty. Oli kuitenkin mahdollista havaita, että Tuote E on hyvin erilainen laite kokoonpanna kuin muut diplomityössä

käsittelyt laitteet. Jo alustavien selvitysten perusteella voidaan sanoa, että sen sisällyttäminen samaan kokoonpanojärjestelmään aiheuttaisi uuden tuotantokonseptin odotettujen hyötyjen pienenemisen.

Tuote E:n erilaisen tuoterakenteen johdosta huomattava osa kokoonpanotunneista siirtyisi osakokoonpanosta loppukokoonpanoon. Selkeimpiä eroja Tuote E:n ja muiden esiteltyjen laitteiden kokoonpanossa on se, että kustannussyistä Tuote E:ssä ei ole selkeitä moduuleja. Runkoon on hitsattu moduulien runkorakenteet ja moduulit rakennetaan suoraan laitteeseen loppukokoonpanossa. Tällaisia kokoonpanoja ovat muun muassa voimayksikkö, kaapeli- ja vesikelat sekä maatuet. Lisäksi moottorin asentaminen eroaa kokonaisuudessaan moduuleista eniten. Tuotteen E kokoonpanossa tarvittavia apuvälineitä ei ole vielä suunniteltu, mutta todennäköisesti erilaisten apuvälineiden määrä kasvaa. Erilaiset moduulirakenteet tarvitsevat omat nostoapuvälineet ja lisäksi Tuotteessa E on NC7 -rungot, jotka vaativat eri rungonyhdistämistyökalut kuin Tuotteet A, B ja C. Luvussa 2.3.1 esiteltiin kriteerit suunnittelutuotteiston valintaan raskaiden ajoneuvojen sekamallilinjalle:

- Tuotteiden kokoonpanoaika, paino ja koko ovat yhtenevät
- Kriittisimmät työvaiheet vastaavat toisiaan riittäväällä tarkkuudella
- Tuotteiden kokoonpanot sisältävät samat päävaiheet ja moduulit
- Kriittisten työkalujen ja laitteistojen tarpeet ovat yhtenevät

Verrattuna muihin valittuihin laitemalleihin Tuote E täyttää näistä kriteereistä lähinnä paino- ja kokovaatimuksen sekä osan samoista kriittisistä työvaiheista ja työkaluista. Näiden syiden takia Tuotetta E ei sisällytetty uuden tuotantokonseptin suunnittelutuotteistoon.

3.3.2 Kokoonpanon kehitysehdotukset

Tuoteanalyysin aikana järjestetyissä asiantuntijatyöpajoissa tuli ilmi useita asioita, joiden kehittämällä voitaisiin päästä lähemmäksi luvussa 1.1 esiteltyjä diplomityön tavoitteita. Esiteltävät kehitysehdotukset ovat pääsääntöisesti keinoja lyhentää loppukokoonpanon läpäisyäikää. Taulukossa 1 on esitelty ehdotetut kehitysehdotukset ja niiden lyhentävä vaikutus loppukokoonpanon läpäisyäikaan. Kehitysehdotusten toteuttaminen siirtäisi työtä yhteensä 16 – 21 prosenttia loppukokoonpanosta moduulikokoonpanoon laitemallista riippuen.

Taulukko 1 Ehdotetut kehitysehdotukset ja niiden vaikutus läpäisy aikaan

Kehitysehdotukset	
Kaikki laitemallit:	Läpäisyajan lyheneminen
Eturungon siirto moduulituotantoon	15 %
Puomisuportin varustelu moduulissa	1 %
Tuote B:	
Puomin viimeisen pätkän letkutus puomisolussa	3 - 5 %
Tuote C:	
Kasetin varustelu erillään mahdollisimman paljon	2 - 4 %
Puomin porauksen letkujen tilaaminen letkunippuna	15 %*
* lyhentää puomisolon läpäisy aika	

Eturungon varustelun siirto moduulituotantoon

Merkittävin kehitysehdotus on laitteiden eturungon varustelun siirtäminen moduulituotantoon. Projektin aikana tutustuttiin kohdeyrityksen tuotantokonsepteihin Suomessa ja Ranskassa sekä erääseen metsäkoneita valmistavaan yritykseen. Näissä tehtaissa raskaiden ajoneuvojen rungot varustellaan erillään ja yhdistetään osittain varusteltuina myöhemmin. Toimenpide muuttaisi laitteiden kokoonpanojärjestystä huomattavasti, sillä nykyään laitteiden loppukokoonpano aloitetaan etu- ja takarungon yhdistämisellä.

Eturungon siirtäminen rinnakkaiseksi moduulikokoonpanoksi vähentäisi loppukokoonpanon työn sisältöä ja siten läpäisy aika arviolta 15 prosentilla. Siirrettävä työmäärä on selvitetty standardityölistoista, joista selviää laitteiden kokoonpanotehtävät. Riippuen laitteesta ja sen optioista, luku voi olla jopa suurempi, sillä siirrettävän työmäärän arviointi toteutettiin varovaisuusperiaatetta noudattaen. Parhaimmassa tapauksessa eturunkomoduliin olisi siirrettävissä lisää työtehtäviä, kuten puomisuportin asennus ja varustelu. Tällöin puomisuport olisi kiinnitettynä ja asennettuna jo ennen runkojen yhdistämistä. Haasteeksi tässä muodostuu eturungon nostaminen siltanosturilla yhdistämistä varten, sillä eturungon pitäisi pysyä vaakatasossa.

Eturungon siirtämisestä moduulituotantoon ja sen toteutuksen mahdollisuudesta tehtiin selvitys karkealla tasolla. Suurin haaste on nivelen yli menevät hydrauliletkut. Letkutus olisi muutettava sellaiseksi, että jatkossa letkut koostuvat kahdesta tai kolmesta osasta. Yksi vaihtoehto toteutukseen on, että runkojen letkut letkutetaan nivelen lähellä olevaan letkujigiin ja yhdistämisvaiheessa ne yhdistetään kolmannella letkulla. Letkutusjigit tekisivät letkutustyöstä yksinkertaisempaa ja standardoisivat sen. Myös rikkoutuneen letkun vaihto helpottuisi, koska jatkossa ei tarvitsisi vaihtaa letkua, joka yltää

takarungolta eturungolle asti. Periaatteessa ongelmia vääränpituisten letkujen kanssa ei pitäisi olla, mutta sellaisen ongelman ratkaiseminen olisi helppoa nivelellä olevan välipätkän mittaa säätämällä. On selvää, että suurempi määrä letkuliitoksia aiheuttaa enemmän letkujen vuotoriskejä.

Asiantuntijatyöpajassa suunnittelijoiden kanssa selvitettiin parasta vaihtoehtoa letkuliitosten tekemiseen. Vaihtoehtoina olivat läpivientilevy, pikaliittimet ja jatkonipat. Läpivientilevy nähtiin huonoksi vaihtoehdoksi letkujen suuren määrän takia ja pikaliittimet rajattiin pois, koska niitä ei ole kokeiltu laitteiden käyttöympäristön kaltaisissa olosuhteissa. Pikaliittimiä vastaan on myös se tosiasia, että asiakkailta ei usein ole näitä liittimiä varastoissaan. Näin ollen parhaana vaihtoehtona letkutuksen toteuttamiseen nähtiin jatkonipat.

Toinen suuri haaste eturungon moduulituotannolle on mahdollisuus siitä, että runkoja ei pysty keskinivelen valmistusvirheen seurauksena yhdistämään. Näiden valmistusvirheiden löytämiseksi pitäisi kehittää laadunvarmistusprosessi, joka varmistaa, että runkojen yhdistämisessä ei tule haasteita. Muita haasteita tai lisätoita aiheuttavat nivelen yli menevä rasvaletku sekä kardaanin ja ohjaussyinterien asennus myöhäisessä vaiheessa. Keskusteluissa asentajien kanssa näitä ei kuitenkaan nähty suurina ongelmina. Karkean selvityksen perusteella sähköasentajien työtehtävät eivät häiriinny runkojen erillisen varustelun takia. Tällä hetkellä suuri osa sähkökaapeleista tulee valmiina setteinä liitimeen, jolloin niiden kytkeminen nivelen yli on helppoa myöhemmässäkin vaiheessa.

Haitat runkojen erillisestä varustelusta olisivat kohtuullisen pienet. Sen sijaan hyödyt voisivat olla merkittävät. Varovaisen arvion mukaan 15 prosenttia loppukokoonpanon työmäärästä voisi siirtää rinnakkaiseen moduulituotantoon. Pelkän työmäärän lisäksi moduulituotantoon saattaa siirtyä myös eturunkokokoonpanon mukana häiriöitä, jotka nykyään huomataan vasta loppukokoonpanossa. Hyvin suunniteltuna eturunkomodulin työn sisältö on selkeä ja asentajat erikoistuvat sen tekemiseen. Loppukokoonpanon työmäärän pienentyessä jäljelle jäävien työtehtävien toistomäärät kasvavat ja näin ollen tuottavuuden pitäisi kasvaa erikoistumisen lisääntyessä. Yksi merkittävästi tehostuva asia on materiaalinhallinta. Jatkossa loppukokoonpanossa olisi vähemmän osia, jolloin tarpeelliset osat löytyvät vähemmällä etsimisellä ja ne vievät vähemmän tilaa. Lisäksi loppukokoonpanon pilkkominen parantaa tuotannon läpinäkyvyyttä, jolloin esimerkiksi kehitystoimenpiteitä on helpompi löytää.

Muut kehitysehdotukset

Projektin aika ilmeni myös pienempiä kehitysehdotuksia, jotka lyhentävät loppukokoonpanon läpäisyäikää. Pieni, mutta kaikkiin laitemalleihin vaikuttava muutos

olisi puomisupportin varustelun siirtäminen esivarustelusolun tehtäväksi. Loput kehitysehdotukset ovat laitemallikohtaisia. Tuotteen B puomien letkutusta loppukokoonpanossa voi kehittää niin, että se on yhtä nopeaa kuin Tuotteen A. Tällä hetkellä puomien viimeinen pätkä tehdään loppukokoonpanossa. Ehdotus on, että Tuotteen B puomien viimeisen letkutuksen teko siirrettäisiin puomimoduulin tehtäväksi. Näin tehtiin jo vuosina 2014-2015, mutta siitä luovuttiin, koska letkutuksen tekeminen puomisolussa oli epäergonomista. Asiantuntijatyöpajassa nähtiin, että letkutustyö on kehitytty ja nyt työtehtävä saataisiin tehtyä ergonomisesti jo puomisolussa.

Myös Tuotteen C loppukokoonpanosta löydettiin kehitystarpeita. Tuote C on keskimäärin hieman nopeampi kokoonpanna puomin asennukseen asti. Puomi ja porausmoduuli aiheuttavat kuitenkin paljon työtä myöhäisessä vaiheessa. Tuotteen C puomin aiheuttamaa työmäärää loppukokoonpanolle onkin vähennettävä, jotta sen kokoonpano pysyy paremmin muiden kanssa samassa tahdissa. Ehdotuksena onkin siirtää porausmoduulin varustelua mahdollisimman paljon moduulituotantoon. Vaihtoehtoinen ratkaisu on pitää porausmoduulin varustelu loppukokoonpanossa, mutta osoittaa sille lisäresurssi varustelun tekemiseksi loppukokoonpanon rinnalla.

Eräs kehitysehdotus Tuotteelle C on tilata porauksen letkut valmiina letkunippuna alihankkijalta. Se ei nopeuttaisi loppukokoonpanoa, mutta keventäisi puomisolun työkuormaa. Tällä hetkellä porauksen letkunippu ja sen suojaspiralointi tehdään erillisessä puomisolussa. Porauksen letkunipun tekeminen on hyvin raskas työvaihe ja letkunipun tilaaminen valmiina vähentäisi puomisolun työkuormaa. Toimenpide nostaisi kohdeyrityksen puomikapasiteettia, sillä puomin kokoonpano olisi jatkossa nopeampaa.

3.3.3 Suunnittelutuotanto

Kuten luvussa 2.2.1 todettiin, tuotteiden tuotantovolyymien vaihtelu vaikuttaa vahvasti kokoonpanojärjestelmän valintaan. Olisi suositeltavaa, että suunnittelutuotteiston laitteiden tuotantovolyymien summa on riittävällä tasolla, jotta on mahdollista harkita erilaisia kokoonpanojärjestelmävaihtoehtoja. Useamman laitemallin sisällyttäminen samaan kokoonpanojärjestelmään tuo joustavuutta, sillä eri laitemallien kysyntävolyymit saattavat vaihdella eri tavoin. Paikkakokoonpanon kapasiteettijoustavuus on erinomainen, kun taas perinteisellä kokoonpanolinjalla se on heikko.

Kokoonpanojärjestelmän suunnittelun alussa projektissa määriteltiin eri laitemallien arvioidut tuotantovolyymit vuoteen 2025 asti. Arviot tehtiin myynti- ja tuotannonohjauspäällikön sekä laitemallien tuotepäälliköiden kanssa. Tuotepäälliköt ovat lähellä asiakasrajapintaa aistimassa markkinoiden suuntaa ja pystyvät näin

antamaan tarkempia laitemallikohtaisia tietoja volyymien suunnasta. Tuotepäälliköt haastateltiin myynti- ja tuotannonohjauspäällikön kanssa ja haastattelujen pohjalta tehtiin arviot laitemallien tuotantovolyyymeista vuosille 2021-2025.

Arvioitujen tuotantovolyymien perusteella uuden kokoonpanojärjestelmän rajaavina tuotantovolyyymeina pidettiin 50 – 100 laitteen vuosivolyyymia. Lukuihin ei huomioitu uutta suunnittelua vaativia B-tuotteita eikä Tuotetta E. Noin 100 laitteen vuosivolyyymi saavutettaisiin suotuisalla kehityksellä arvion mukaan vuonna 2025. Vuosivolyymin alarajana pidetään 50 laitetta, jolloin laitteiden kysyntä laskisi 50 prosenttia arvioidusta kysynnästä. Taulukossa 2 on esitelty prosenttiosuudet eri laitemallien osuuksista suhteessa kokonaisvolyyymiin.

Taulukko 2 Laitemallien ennustetut suhteelliset osuudet vuonna 2025

Ennustetut tuotantovolyymit, 2025	
Tuote A	56 %
Tuote B	31 %
Tuote C	13 %

Kuten luvussa 2.3.1 mainittiin, suunnittelutuotteisto ja tuotteiden tuotantovolyymit määrittävät suunnittelutuotannon, jonka valmistamiseksi uusi kokoonpanojärjestelmä suunnitellaan. Toimivan ja tehokkaan kokoonpanojärjestelmän suunnitteleminen laajalle 50-100 laitteen tuotantovolyyymille on vaikeaa. Sen takia tavoiteltu tuotantokapasiteetti rajattiin 65-90 laitteeseen vuodessa.

3.4 Tuotantoanalyysi

Kuten luvussa 2.3.2 todettiin, tuotantoanalyysi syventää ymmärrystä kokoonpanojärjestelmän suunnittelun perusteisiin ja vastaa kysymykseen: mitä järjestelmältä vaaditaan suunnittelutuotannon valmistamiseksi. Tuotantoanalyysissä määritellään tuotannon kysyntävauhti, tahtiaika ja asemien minimimäärä. Tuotannon kysyntävauhdin määrittämisessä käytettiin tavoitellun tuotantokapasiteetin pyöristettyä keskiarvoa. Tuotannon kysyntävauhti saatiin kaavalla (2).

Tuotannolle piti määrittää myös tahtiaika, joka alittaa kysyntävauhdin ja tuottaa uuden laitteen useammin kuin asiakas tilaa laitteen. Tuotanto sisältää aina hukkaa ja sen vaikutukseen voi varautua suunnittelemalla tahtiaika kysyntävauhtia lyhyemmäksi. Kuten luvussa 2.3.2 kerrottiin, suuri ero näiden tahtien välillä voi peittää olemassa olevia ongelmia ja vähentää kannustinta niiden ratkaisemiseksi. Tuotannon tahtiajan laskemisessa käytettiin tuotantovolyyymia, joka on hieman enemmän kuin kysyntävauhdin laskennassa käytetty luku. Tuotannon tahtiaika määriteltiin kaavalla (3).

Tuotannon tahtiajan avulla saadaan laskettua kokoonpanolinjan asemien teoreettinen minimimäärä N_{min} . Sen laskemiseen tarvitaan $\sum t$, joka tarkoittaa laitteiden loppukokoonpanon vaiheiden tahtiaikojen summaa. $\sum t$ laskettiin kaavalla

$$\sum t = \frac{\text{Loppukokoonpanotunnit}}{\text{Asentajien lukumäärä vuorossa}}$$

missä loppukokoonpanotunnit on laskettu Tuotteiden A, B ja C viimeisten viiden valmistuneen laitteen keskiarvotunneista. Laitemallien osuutta painotettiin niiden ennustettujen tuotantovolyymien perusteella. Toteutuneista tunneista on lisäksi vähennetty luvussa 3.3.2 esiteltyjen kehitysehdotusten arvioitu vaikutus loppukokoonpanotunteihin. Asemien minimimääräksi saadaan kaavan (4) avulla

$$N_{min} = \frac{\sum t}{\text{Tahtiaika}} = 6,22 \text{ asemaa.}$$

Laskuissa käytettiin loppukokoonpanotunteja, jotka ovat toteutuneet kohdeyrityksen paikkakokoonpanojärjestelmässä. On oletettavaa, että työskentely kokoonpanolinjalla on tehokkaampaa kuin paikkakokoonpanoissa. Tällöin laskuissa pitäisi käyttää loppukokoonpanotuntien $\sum t$ arvona pienempää lukua. Voi myös olettaa, että uuden sukupolven laitteiden kokoonpanotuntien lasku jatkuu luonnollisista syistä myös tulevaisuudessa. Nämä asiat huomioon ottaen, uuden kokoonpanojärjestelmän asemien sopivaksi määräksi nähtiin kuusi asemaa. Pelivaran huomioiminen asemien teoreettisen minimimäärän ja suunniteltujen asemien lukumäärän välissä olisi voinut olla järkevää. Selvityksessä nähtiin kuitenkin, että suuri pelivara aiheuttaa tehottomuutta ja piilottaa ongelmia. Saattaisi käydä, kuten Rother & Shook (2003, s. 71) luvussa 2.3.2 totesivat kysyntävauhdista ja tuotannon tahtiajasta. Tuotannossa oleva häiriöiden etukäteinen kompensointi peittää ongelmat ja pienentää kannustinta poistaa nämä ongelmat.

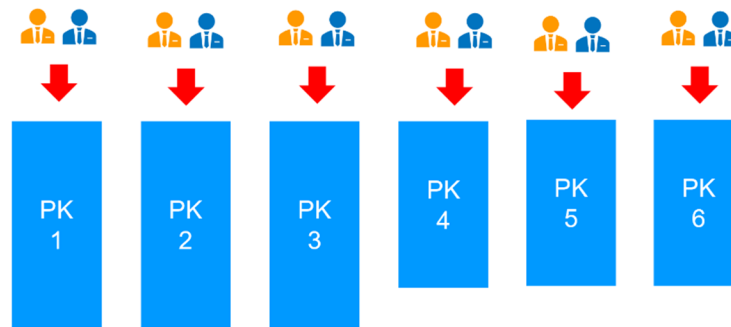
3.5 Tuotantokonseptivaihtoehdot

Diplomityössä luotiin erilaisia vaihtoehtoja uudeksi tuotantokonseptiksi. Tuotantokonseptin kuului myös layoutin suunnittelu ja tässä kohtaa eri vaihtoehdot pidettiin suurpiirteisinä. Kuten luvussa 2.3.3 kerrottiin, layoutilla on suora vaikutus tuotannon läpäisyaikoihin ja tuotantomääriin. Layout myös osaltaan määrittää ja rajoittaa mahdollisuudet joustavuuden luomiselle. Luvun 2.2.1 mukaan kokoonpanojärjestelmä on aina paikka-, solu- tai linjakokoonpano. Diplomityössä suunniteltiin näitä yhdistelemällä erilaisia vaihtoehtoisia layout-ratkaisuja.

Kohdeyrityksen kaltaisessa kokoonpanossa työntekijäresurssin tuottavuus ja ohjaus on kriittinen tekijä, joten eri vaihtoehdoissa otettiin myös kantaa työntekijöiden ohjaukseen ja erikoistumiseen. Luvussa 2.2.5 todettiin, että työn pilkkominen ja työntekijän

erikoistuminen johtaa merkittäviin tuottavuusparannuksiin. Tämä havainto on ollut yksi suurimmista vaikuttajista eri vaihtoehtojen suunnittelussa. Kuvissa 15, 16, 17 ja 18 esitellään parhaiksi todetut layout-vaihtoehdot, joita analysointiin tarkemmin.

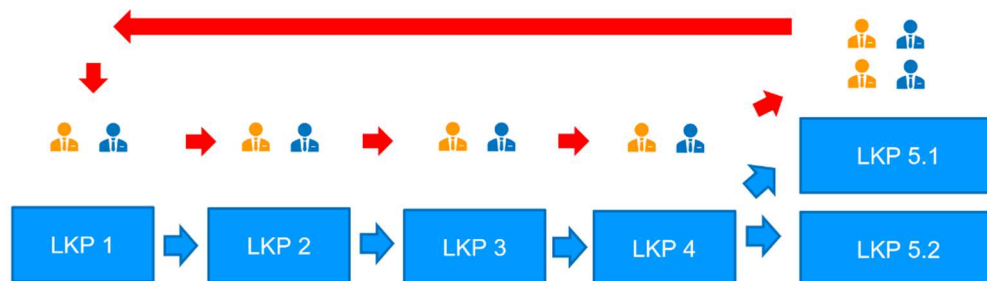
Vaihtoehto 1: Paikkakokoonpano



Kuva 15 Paikkakokoonpano monipuolisesti koulutetuilla asentajilla

Kohdeyrityksen nykyinen tuotantokonsepti eli paikkakokoonpano pidettiin vertailussa mukana, koska se on joustava tuotantokonsepti. Paikkakokoonpanossa monitaitoiset asentajat tekevät laitteen alusta loppuun. Sen hyviä puolia ovat joustavuus, häiriöiden sietokyky ja työsuunnittelun helppous. Heikkouksia ovat muun muassa erikoistumisen puute, vaihtelevat läpäisyajat sekä heikko tuotannon läpinäkyvyys ja tilankäyttö.

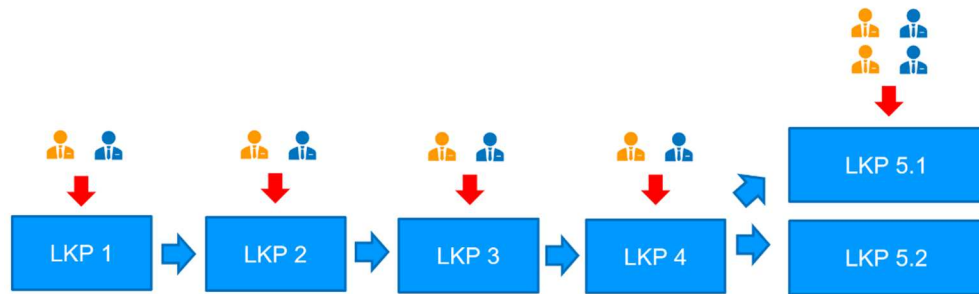
Vaihtoehto 2: liikkuva paikkakokoonpano, liikkuvat asentajat



Kuva 16 Kokoonpanolinja liikkuvilla asentajilla

Ensimmäinen vaihtoehtoinen tuotantokonsepti on kokoonpanolinja, jota kutsutaan liikkuvaksi paikkakokoonpanoksi. Asentajat liikkuvat laitteen mukana linjan alusta linjan loppuun asti. Kohdeyrityksessä on jo toiminnassa tämänkaltaisen tuotantokonsepti vanhemman sukupolven tuotteiden valmistukseen. Vaihtoehdon hyötyjä ovat useat linjatuotannosta saatavat hyödyt, kuten tehokas tilankäyttö ja materiaalinhallinta, erikoistuneet asemat sekä lyhyempi läpäisy aika ja sen pienempi vaihtelu. Vaikka tuotantokonsepti on kokoonpanolinja, se sisältää hyvin paljon paikkakokoonpanossa olevaa joustavuutta. Vaihtoehdon suurimpia heikkouksia ovat asentajien erikoistumisen puute, heikko tuotannon läpinäkyvyys ja tuotteen liikuttaminen, vaikka miehistö ei vaihdu.

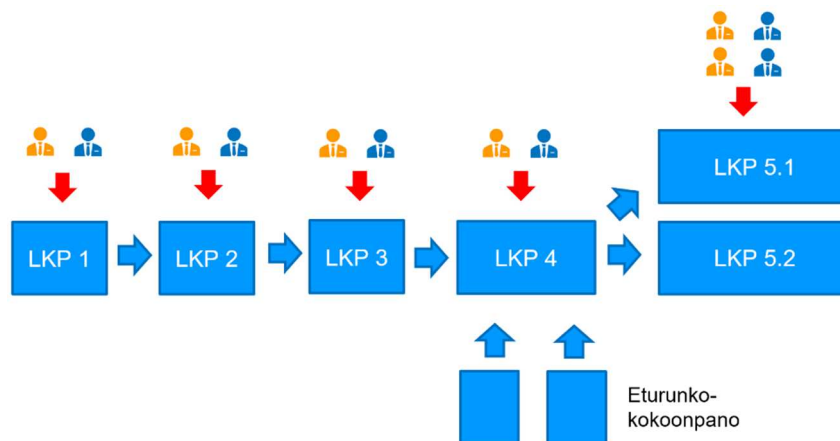
Vaihtoehto 3: perinteinen kokoonpanolinja, erikoistuneet asentajat



Kuva 17 Kokoonpanolinja erikoistuneilla asentajilla

Toinen vaihtoehtoinen tuotantokonsepti on perinteinen kokoonpanolinja, jossa asentajat erikoistuvat omille asemilleen. Tämän vaihtoehdon hyötyjä ovat asentajien ja asemien erikoistuminen, lyhyet läpäisyajat ja niiden pieni vaihtelu sekä tehokas materiaalinhallinta ja tilankäyttö. Heikkouksia ovat huono häiriöiden sietokyky, heikko joustavuus, suurten materiaalipuskureiden tarve ja tasaisten työnsisältöjen suunnittelun vaikeus.

Vaihtoehto 4: takarunkolinja, erikoistuneet asentajat



Kuva 18 Kokoonpanolinja erikoistuneilla asentajilla ja eturunkomoduurilla

Kolmas vaihtoehtoinen tuotantokonsepti on kokoonpanolinja, jossa asentajat ovat erikoistuneet omille asemilleen ja eturungon varustelu on siirretty rinnakkaiseen moduulituotantoon. Eturungon moduulituotanto tarkoittaa, että loppukokoonpanon työkuorma ja läpäisy aika on noin 15 prosenttia pienempi. Tuotantokonseptin hyötyjä olisivat kaikki jo edellä mainitut linjatuotannon edut. Verrattuna perinteiseen kokoonpanolinjaan (vaihtoehto 3) erikoistuminen, loppukokoonpanon tilankäyttö ja työnsisältöjen selkeys ovat paremmat, kuten myös läpäisy aika on lyhyempi. Tuotantokonseptin heikkouksia ovat huono häiriöiden sietokyky, heikko joustavuus, suurten materiaalipuskureiden tarve ja tasaisten työnsisältöjen suunnittelun vaikeus.

3.6 Tuotantokonseptien simulointi

Tuotantokonseptien vertailua tehtiin simuloimalla niitä Siemensin Tecnomatixin Plant Simulation -ohjelmalla. Kohdeyrityksen yksikössä, johon diplomityö tehtiin, ei ole aiemmin käytetty simulointia hyväksi. Simuloinnin tavoitteena oli vertailla tuotantokonsepteja todellisuuden kaltaisissa olosuhteissa. Simulointi nähtiin vaihtoehtoisena vertailumuotona perinteiselle teollisuusfysiikalle. Kuten luvun 2.4.1 alussa todettiin, simulointi on käytännössä ainoa tapa testata vaihtelun ja satunnaisten tapahtumien vaikutusta tuotantokonseptin toimintaan. Teollisuusfysiikan laskukaavat eivät pysty huomioimaan satunnaisten häiriöiden negatiivista vaikutusta koko järjestelmän toimintaan. Simuloinnissa tärkeää on tutkittavien asioiden tai ongelmien rajaaminen. Projektissa määritettiin simuloinnin tavoitteiksi selvittää, mitä ovat eri tuotantokonseptien

- tuotantomäärät
- loppukokoonpanon läpäisyajat
- loppukokoonpanon läpäisyajan vaihtelu
- käyttöasteet
- herkkyys häiriöille,

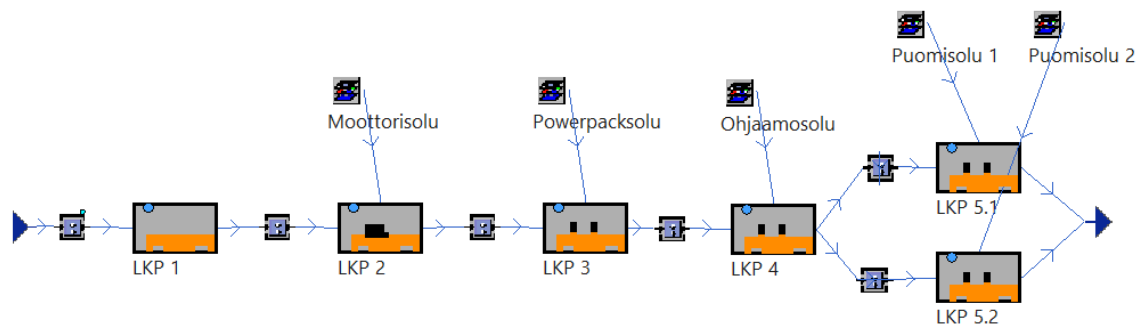
kun tuotevalikoima, satunnaisvaihtelun määrä ja materiaalipuskurin suuruus vaihtelevat. Simuloimalla vertailtiin neljää vaihtoehtoista tuotantokonseptia. Nämä olivat aiemmin esitellyt vaihtoehdot 1, 2, 3 ja 4.

3.6.1 Simulointimalli

Simulointimalli luotiin Siemensin Tecnomatix Plant Simulation -ohjelmalla. Simuloinnin alkuvaiheessa määriteltiin tavoitteet simulointimallin sisällölle. Suurin osa kaikista tavoitteista saatiin luotua malliin, mutta henkilöresurssin ja pienien materiaalivirtojen lisääminen malliin ei onnistunut mallinnuksen vaikeuden tai ajanpuutteen takia. Henkilöresurssin joustavuutta ei saatu mallinnettua samanlaiseksi kuin mitä se on todellisuudessa. Esimerkiksi todellisuudessa työnjohtaja tietää etukäteen, minne pullonkaula todennäköisesti on syntymässä. Simulointimallissa vastaavan ennustettavuuden luominen paljastui hyvin hankalaksi. Koska henkilöresurssia ei saatu vastaamaan todellisuutta, se jätettiin kokonaan pois.

Mallin rakentaminen tehtiin osa kerrallaan ja sen toimivuutta testattiin tasaisin väliajoin. Ensiksi luotiin yksinkertaiset mallit kuvaamaan paikkakokoonpanoa ja yksinkertaista linjakokoonpanoa. Kun näihin malleihin oli saatu luotua halutut ominaisuudet, malleista tehtiin variantit kuvaamaan kaikkia vaihtoehtoja 1, 2, 3 ja 4. Kuvassa 19 on esitetty perinteisen kokoonpanolinjan (vaihtoehto 3) simulointimalli. Kokoonpanolinjalla on kuusi

asemia, joista kaksi viimeistä ovat rinnakkaisia. Lisäksi malli sisältää moottori-, voimayksikkö-, ohjaamo- ja puomisolut. Näiden moduulien valmistumisajankohtaa voitiin varioida normaalijakauman mukaisesti.



Kuva 19 Perinteisen kokoonpanolinjan (vaihtoehto 3) simulointimalli

Mallit ovat karkeita, mutta ne on yritetty luoda mahdollisimman hyvin todellisuutta vastaavaksi. Jokaisen mallin olosuhdetta kuvaavat parametrit ja tuotantosäännöt pysyvät samoina simuloinnin aikana. Kaikille simulointimalleille tuotevalikoimat ovat aina samat ja esivarustusolosuhteet tuottavat samalla tavalla materiaaleja. Malli on täysin Excel-ohjattu eli sen lähtöparametreja muutetaan Excelissä ja malli hakee uudet lähtötiedot Excel-tiedoston eri välilehdiltä. Tulokset otettiin kopioimalla ne mallista ja siirtämällä Excel-pohjaan, joka laski suoraan halutut arvot tuloksista.

Paikkakokoonpanomallissa (vaihtoehto 1) on kuusi kokoonpanoruutua, jotka eivät vaikuta toistensa toimintaan. Perinteinen kokoonpanolinja ja takarunkolinja (vaihtoehdot 3 ja 4) ovat perinteistä linjat tuotantoa eli asemakohtainen työaikojen vaihtelu aiheuttaa odotusta muilla asemilla. Niissä laite pääsee etenemään vasta kun seuraava asema vapautuu. Liikkuvalla paikkakokoonpanolla (vaihtoehto 2) asemat 1-4 ovat toisistaan riippumattomia asemia, joiden aikana laitteet eivät häiritse toistensa toimintaa. Linjan lopussa on kaksi rinnakkaista asemaa, jotka saattavat ensimmäisen kerran pysäyttää linjan takana tulevien laitteiden tuotannon.

Linjamuotoisille tuotantokonsepteille (vaihtoehdot 2, 3 & 4) on simuloitu linjan siirrosta aiheutuvaksi siirtoajaksi 60 minuuttia. Perinteisellä kokoonpanolinjalla ja takarunkolinjalla siirron voi aloittaa vasta, kun seuraava asema vapautuu. Sen sijaan liikkuvalla paikkakokoonpanolla siirto voi tapahtua heti kun edellinen työvaihe on valmis. Tällä pyritään huomioimaan se, että liikkuvan paikkakokoonpanon siirto voi todellisuudessa tapahtua joustavammin silloin kun se halutaan tehdä.

Simulointimallien sisältämä vaihtelu koostui kahdesta tekijästä: tuotevalikoimasta ja L-vaiheiden keston vaihtelusta. Eri laitteita ja niiden vaihtelevaa määrää optioita on luotu kuvaamaan tuotevalikoima, joka sisältää kolme laitemallia, joilla jokaisella on kolme eri optiotasoa. Simuloinnissa oletetaan, että luvussa 3.3.2 ehdotetut kokoonpanon

kehitysehdotukset on tehty ja näin saatu L-vaiheiden kestoja tasattua. Optioiden määrät ja niiden aiheuttama työmäärän lisäys on huomioitu tuotevalikoiman luomisessa luvussa 3.3.1 kerrotun mukaisesti. Tuotevalikoiman optioiden suhteelliset osuudet vastaavat kohdeyrityksen viiden vuoden aikana myytyjen laitteiden optioiden suhteellisia osuuksia. Optioiden aiheuttama työmäärä on arvioitu standardityölistan tunneista. Tuotevalikoiman laitteet optiotasoihin, laitteiden suhteelliset osuudet ja niiden simuloinnissa käytetyt kokoonpanotunnit on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3 Tuotevalikoiman laitteet sekä niiden suhteelliset osuudet ja loppukokoonpanotunnit

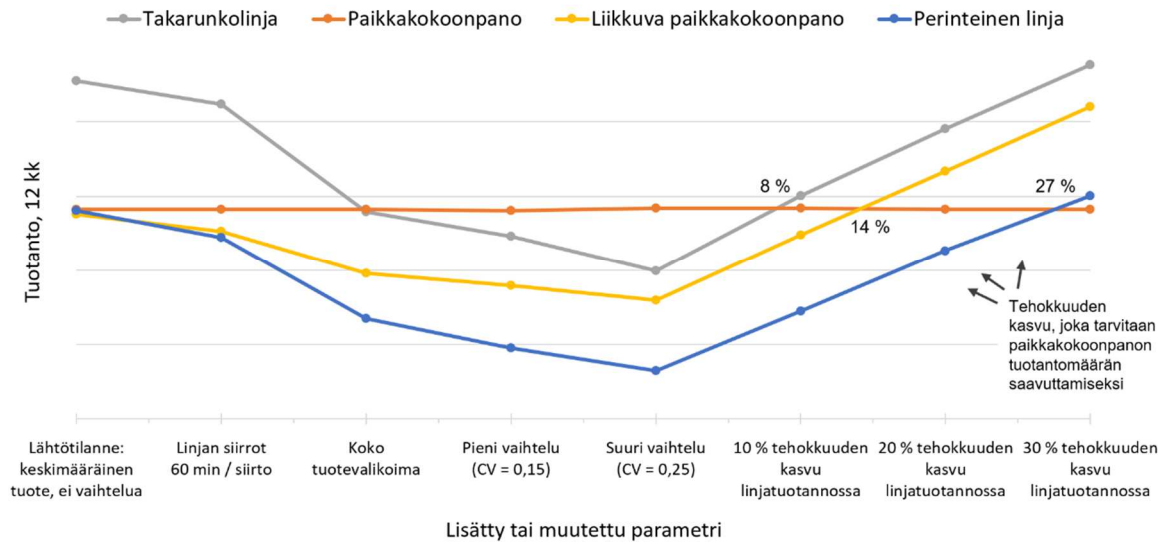
Laitemalli_Optiotaso	Osuus	Loppukokoonpanotunnit
Tuote A_1	28 %	-
Tuote A_2	20 %	-
Tuote A_3	8 %	-
Tuote B_1	3 %	-
Tuote B_2	12 %	-
Tuote B_3	16 %	-
Tuote C_1	7 %	-
Tuote C_2	5 %	-
Tuote C_3	1 %	-

Simulointimalliin ei voi sisällyttää kaikkia pieniä tekijöitä, jotka vaikuttavat tuotantoon. Tätä vaihtelua pyritään kuvaamaan asemien työajan varioimisella normaalijakauman mukaisesti. Ensiksi laitteen kokonaistyöaika jaettiin tasan asemien kesken. Sen jälkeen asemien työnkestoja simuloitiin varioimalla jokaisen aseman työaikaa erikseen joka kerta laitteen saapuessa asemalle. Luvussa 2.4.2 todettiin, että kohdeyrityksen kaltaisessa tuotannossa vaihtelukerroin CV on 20-30 prosentin tasolla. Käytettäväksi vaihtelukertoimeksi valittiin 25 prosenttia. Variointi toteutettiin käyttämällä normaalijakaumaa, jonka parametreina käytettiin $CV = 25 \%$, $min = 0,60$ ja $max = 1,40$. Minimi- ja maksimiarvot rajaavat normaalijakauman ääripäitä. Ne määriteltiin niin, että tuotevalikoimasta ja työvaiheiden epätasaisuudesta aiheutuva kokonaisvaihtelu toteutti arvon $CV = 25 \%$.

3.6.2 Simuloinnin tulokset

Simuloinnin tuloksista luotiin kuvaajia, joiden avulla tulosten visuaalinen esittäminen on helpompaa. Kuvassa 20 on esitetty eri tuotantokonseptien tuotantomäärät muuttuvilla parametreilla. Kuvassa eriväriset kuvaajat kuvaavat eri tuotantokonsepteja ja pystyakselilla on simuloitujen tuotantomäärät 12 kuukaudessa. Kuvaajaa luetaan vasemmalta oikealle ja jokainen piste on uusi simulointitulokset. Vaaka-akselilla esitetään simulointiin lisätty tai muutettu parametri. Kuvaajan simuloinneissa tuotantokonsepteille pyrittiin ensiksi lisäämään kaikki linjat tuotantoon heikentävästi vaikuttavat olosuhteet.

Sen jälkeen linjamuotoisiin kokoonpanojärjestelmiin lisättiin tehokkuutta pienentämällä työaikoja 10, 20 ja 30 prosentilla. Tehokkuuden kasvattamisella pyrittiin näyttämään, kuinka paljon eri tuotantokonseptien tehokkuuden pitäisi kasvaa, jotta se tuottaa yhtä paljon tuotteita kuin paikkakokoonpano.



Kuva 20 Simuloitujen tuotantokonseptien tuotantomäärät muuttuvilla parametreilla

Simuloinnin lähtötilanteessa kuvan 20 vasemmassa laidassa jokaisen tuotantokonseptivaihtoehdon olosuhteet ovat samat. Lähtötilanteessa tuotantomäärät ovat samat lukuun ottamatta takarunkolinjaa, jonka laitteiden loppukokoonpanoon kohdistuva työmäärä on 15 prosenttia pienempi. Tämä johtuu moduulituotantoon siirretystä eturungon varustelusta. Kuten kuvasta 20 nähdään, tuotevalikoimasta ja asemien vaiheajojen vaihtelusta aiheutuva kokonaisvaihtelu laskee merkittävästi kokoonpanolinjojen tuotantomääriä. Paikkakokoonpanoon vaihtelu ei vaikuta, sillä tuotevalikoiman keskimääräinen työmäärä pysyy vakiona ja kokonaisvaihtelu vaikuttaa molempiin suuntiin, joten sen summa on vakio.

Kokoonpanolinjojen tehokkuutta kasvatettiin 10, 20 ja 30 prosenttia. Kuvaajasta voitiin päätellä, kuinka paljon eri tuotantokonseptien pitäisi tuoda tehokkuushyötyjä tuottaakseen yhtä paljon tuotteita kuin paikkakokoonpano. Tulosten mukaan kokoonpanolinjojen tehokkuushyötyjen tarvitsee olla 8, 14 ja 27 prosenttia kuvan 20 mukaisesti vastatakseen paikkakokoonpanon tuotantomääriin. Simuloinnin mukaan varsinkin perinteisen linjan (vaihtoehto 3) tarvitsema tehokkuusparannus, 27 %, on huomattavan suuri.

Simuloinnissa on aina oletuksia ja rajoituksia, jotka vaikuttavat tuloksiin. Tässä työssä merkittävimpiä ovat henkilöresurssin puuttuminen, seuraavan laitteen nopea aloitus ja takarunkolinjan lyhyemmät työajat. Henkilöresurssin mallinnuksen puute vaikuttaa

merkittävästi takarunkolinjan ja perinteisen linjan simulointimallien tuotantoon. Niissä työskentely pysähtyy usein epätasaisten vaiheikojen takia. Taulukossa 4 on esitetty eri tuotantokonseptien käyttöasteet kuvan 20 viimeisessä simulointivaiheessa. Käyttöasteen mittaaminen sisälsi työasemien työajan sekä epätasaisten vaiheikojen aiheuttaman odotteluajan. Kuten taulukosta nähdään, linjatuotantojen käyttöaste kärsii epätasaisista työajoista 6-10 prosenttia, kun työntekijäresurssin joustoa ei ole.

Taulukko 4 Simuloitujen tuotantokonseptien käyttöasteet

	Paikkakokoonpano	Liikkuva paikkakokoonpano	Perinteinen linja	Takarunkolinja
Käyttöaste	100 %	94 %	90 %	90 %

Simulointimalli sisältää myös oletuksen, että seuraavan laitteen kokoonpano alkaa heti seuraavan laitteen siirryttyä pois kokoonpanoruudusta. Todellisuudessa uuden laitteen aloitus ei ole niin mutkatonta, varsinkaan paikkakokoonpanossa, kuten luvussa 3.2 todettiin. Kolmas tuloksiin vaikuttava oletus liittyy takarunkolinjan työntekijäresurssin suuruuteen. Jokaisen loppukokoonpanojärjestelmän simulointimallissa työskentelee 30 työntekijää. Muista poiketen, takarunkolinjalta on siirretty eturungon varustelu moduulituotantoon ja siellä työskentelee 5-7 henkilöä. Täten kokonaisuudessaan takarunkolinjakonseptissa kokoonpanossa työskentelee enemmän työntekijöitä ja se mahdollistaa suuremman tuotantomäärän. Diplomityöprojektissa tarkasteltiin kuitenkin vain loppukokoonpanojärjestelmiä ja sen läpäisyajoja, joten moduulikokoonpanon työntekijöitä ei enempää huomioida.

3.6.3 Simuloinnin lähtötietojen korjaukset

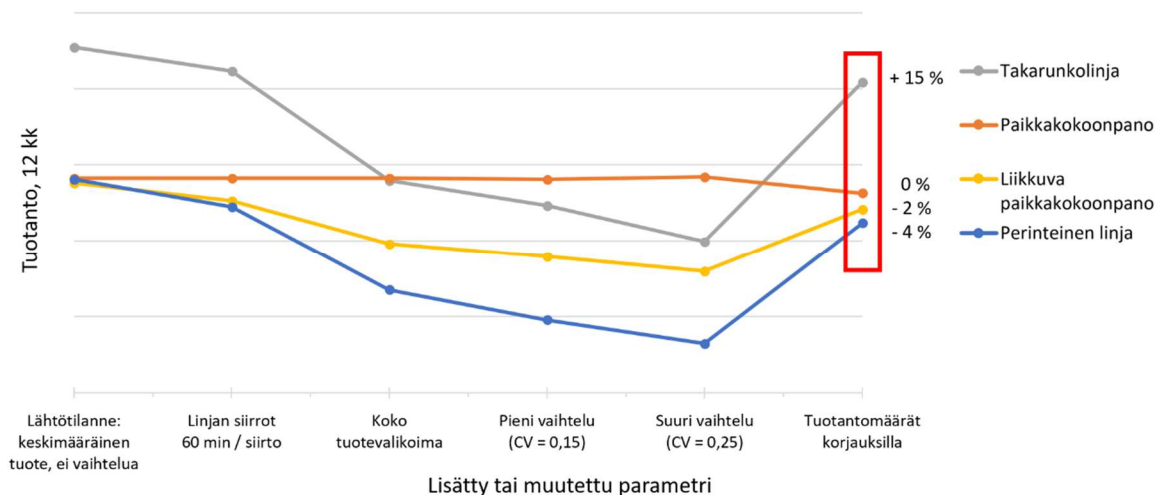
Oli etukäteen tiedossa, että simulointimalli ei kykene huomioimaan kaikkia tuotantoon liittyviä tekijöitä. Sen takia saadut tulokset ovat suuntaa antavia. Nämä virheet haluttiin oikaista ja se tehtiin arvioimalla oletusten ja puuttuvien tekijöiden vaikutusten suuruudet. Taulukossa 5 on esitetty arviot eri tekijöiden vaikutuksista tuotantokonseptien tehokkuuteen. Taulukossa esitetyt tuotantokonseptien kokonaiskorjaukset on huomioitu simulointimalleissa pienentämällä tai suurentamalla asetettuja kokoonpanoajoja samassa suhteessa. Simulointiajot suoritettiin uudelleen parempien tulosten saamiseksi.

Taulukko 5 Arvioidut korjaukset simulointituloksiin

	Arvioitu vaikutus tehokkuuteen			
	Paikkakokoonpano	Liikkuva		Takarunkolinja
		paikkakokoonpano	Perinteinen linja	
Linjatuotannosta aiheutuva hyöty				
Työntekijöiden ja asemien erikoistuminen	0 %	2 %	8 %	10 %
Uuden työntekijän nopea oppiminen	0 %	1 %	3 %	3 %
Tehokas tilankäyttö	0 %	2 %	2 %	2 %
Tehokas materiaalinkäsittely	0 %	2 %	2 %	2 %
Hyvä läpinäkyvyys	0 %	0,5 %	1 %	1 %
Karkeiden oletuksien korjaus				
Todellinen työntekijäresurssin jousto	0 %	1,5 %	4 %	4 %
Todellinen tuotannonohjaus	-2 %	0 %	0 %	0 %
Yhteensä	-2 %	9 %	20 %	22 %

Suurin hyöty linjatuotannosta aiheutuu erikoistumisesta, joka on suurimmillaan takarunkolinjalla ja perinteisellä linjalla, koska asentajat erikoistuvat omille asemilleen. Pienempien työkokonaisuuksien takia uusi tai uudelleen koulutettava asentaja saavuttaa hyvän tehokkuuden nopeasti. Myös liikkuvassa paikkakokoonpanossa tapahtuu erikoistumista, vaikka asentajat eivät erikoistu. Linjan kokoonpanoasemat erikoistuvat tekemään vain tiettyjä tehtäviä, joten tilat ja työkalut suunnitellaan vain tarpeeseen.

Linjatuotannossa myös tilankäyttö, materiaalinkäsittely ja läpinäkyvyys ovat paremmalla tasolla kuin paikkakokoonpanossa ja tuovat pieniä tehokkuushyötyjä. Linjamuotoisten kokoonpanojärjestelmien käyttöasteet olivat simuloinnissa 90-94 prosentin tasolla. Joustavan työntekijäresurssin oletetaan kompensoivan vaihtelua 1,5 - 4 prosenttia. Todellisen mukainen tuotannonohjaus tarkoittaa, että seuraavan laitteen aloitus ei välttämättä pysty alkamaan heti edellisen valmistuttua. Varsinkin paikkakokoonpanossa uuden laitteen aloituksessa on viivettä ja tämä on otettu huomioon kahden prosentin tehokkuuden laskuna. Lukua voi verrata laitteen loppukokoonpanon läpäisy aikaan, jolloin huomataan, että kaksi prosenttia on varovainen arvio. Kuvassa 21 on esitetty korjauksilla huomioitujen simulointiajojen tulokset.

**Kuva 21** Simuloitujen tuotantokonseptien tuotantomäärät korjauksilla huomioiden

Korjausten jälkeen takarunkolinjan tuotantomäärä on selkeästi suurin kaikista tuotantokonsepteista. Simuloinnin tulokset osoittavat, että liikkuvan paikkakokoonpanon ja perinteisen linjan tuotantomäärät jäävät paikkakokoonpanoa pienemmiksi. Simulointi on hyvä näyttämään eri vaihtoehtojen *suorituskyvyn erot* toisiinsa verrattuna. Simuloinnin absoluuttiset tulokset eivät kuitenkaan ole lupauksia tulevaisuuden tuotannosta. Taulukossa 6 on esitetty korjausten jälkeiset tuotantokonseptien tuotantoluvut. Linjamuotoisten tuotantokonseptien suoriutumista on verrattu paikkakokoonpanon lukuihin.

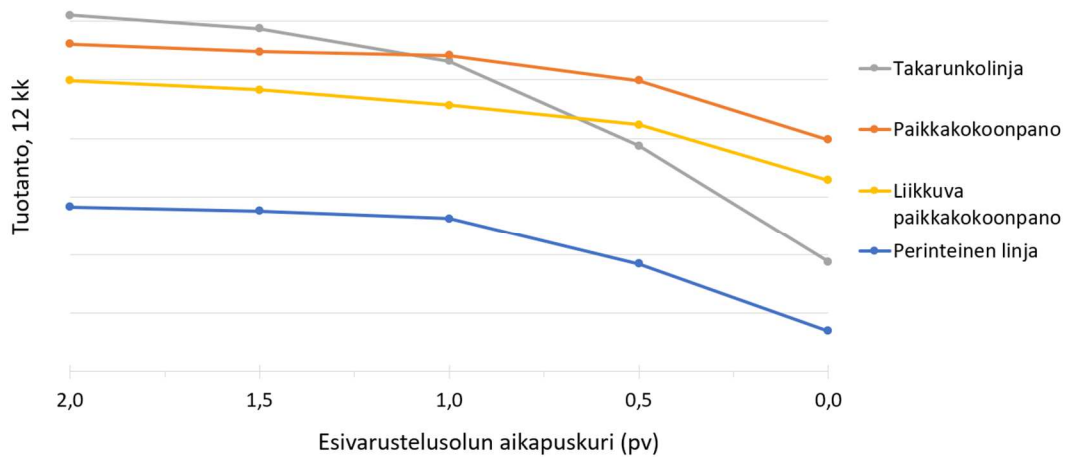
Taulukko 6 Simuloitujen tuotantokonseptien tuotantoluvut

Tuotantoluvut	Paikkakokoonpano	Liikkuva		Takarunkolinja
		paikkakokoonpano	Perinteinen linja	
Tuotantomäärä (laitetta)	-	-2 %	-4 %	15 %
Läpäisy aika (pv)	-	1 %	-4 %	-20 %
Läpäisyajan vaihtelu (pv)	-	-3 %	-30 %	-44 %

Kuten taulukosta 6 nähdään, takarunkolinjan tuotantomäärä sekä läpäisy aika ja sen vaihtelu kehittyvät hyvin myönteisesti verrattuna paikkakokoonpanoon. Simuloinnin perusteella liikkuvan paikkakokoonpanon luvut pysyisivät pitkälti paikkakokoonpanoa vastaavina. Perinteinen linja tuottaisi neljä prosenttia vähemmän laitteita lyhyemmällä läpäisyajalla ja selvästi pienemmällä läpäisyajan vaihtelulla. Simulointitulosten perusteella takarunkolinja on kaikista vaihtoehdoista lupaavin tuotantokonsepti.

3.6.4 Häiriöanalyysi

Simuloinnin aikana toteutettiin häiriöanalyysi, jonka tarkoituksena oli tutkia tuotantokonseptien suoriutumista poikkeustilanteissa. Häiriöanalyysin muuttujana oli esivarustelusolun aikapuskuri, joka sijaitsee esivarustelun ja loppukokoonpanon välissä. Häiriöanalyysissä käytetyt esivarustelusolun parametrit eivät olleet kohdeyrityksen todellisesta tuotannosta, vaan ne arvioitiin karkealla tasolla. Oleellista on, että olosuhteet ovat simuloinneissa jokaiselle tuotantokonseptille samat. Esivarustelusolun tuotannon kuvattiin vaihtelevan normaalijakauman mukaan enintään kolme päivää suuntaansa. Häiriöanalyysin on tarkoitus herättää ajatuksia eri tuotantokonseptien ominaisuuksista ja tarpeista. Kuvassa 22 on esitetty tuotantokonseptivaihtoehtojen tuotantomäärät esivarustelusolun aikapuskurin eri arvoilla.



Kuva 22 Tuotantomäärät esivarustusajan aikapuskurin eri arvoilla

Kuvan 22 lähtötilanne on kuvan 20 simuloituvaihe, jossa kokoonpanolinjojen tehokkuutta kasvatettiin 10 prosenttia. Luvun 3.6.3 arvioituja korjauksia ei ole huomioitu häiriöanalyysissä. Olennaista kuvassa on eri tuotantokonseptien kulmakäyrän jyrkkyys. Paikkakokoonpanon ja liikkuvan paikkakokoonpanon tuotannot eivät kärsi esivarustelujen aikapuskurin pienenemisestä kovinkaan paljoa. Sen sijaan takarunkolinjan ja perinteisen linjan tuotantomäärät tippuvat rajusti, kun esivarustelut eivät saavu ajallaan tuotantoon. Takarunkolinjan kulmakäyrä on jyrkin, koska sen tuotannossa on eturunkomodulin takia eniten esivarusteluja. Kuvan 22 voi yleistää niin, että erikoistuneet kokoonpanolinjat ovat hyvin herkkiä erilaisille häiriöille. Ne vaativat aika-, materiaali- ja resurssipuskureita toimiakseen häiriöttömästi.

3.6.5 Huomioita simuloinnista

Kokoonpanolinjoja eri miehitystavoilla on simuloitu muun muassa Hytönen et al. (2008) ja Wang et al. (2005). Molemmat tutkimukset ovat päätyneet tuloksiin, joissa perinteinen kokoonpanolinja paikallaan olevilla työntekijöillä on tehokkuuden suhteen heikoin. Tutkimusten simuloinnit ovat kuitenkin yksipuolisia, sillä ne eivät huomioi perinteiselle kokoonpanolinjalle minkäänlaisia tehokkuushyötyjä erikoistumisesta ja nopeasta oppimisesta. Ne eivät myöskään ole huomioineet ollenkaan järjestelmän sisään rakennettua joustavuutta. Myös tässä diplomityössä päädyttiin tuloksiin, jossa perinteinen kokoonpanolinja on heikoin. Tulokset herättävät kysymyksen, että onko perinteinen linja oikeasti heikoin vai eivätkö tutkimukset kykene huomioimaan linjan ominaisuuksia tarpeeksi.

Simulointi on hyvä päätöksenteon apuväline, mutta ei välttämättä päätöksen peruste. Kuten simuloinnissa aina, simuloinnin tulokset riippuvat asetetuista parametreista ja muista lähtötiedoista. Simulointimallien luominen vaatii perinpohjaista perehtymistä kaikkiin malliin vaikuttaviin tekijöihin. Aina kaikkia tekijöitä ei saada tunnistettua tai

sisällytettyä malliin. Simulointimalli sisältää oletuksia ja yleistyksiä, jolloin on mahdollisuus, että käytetään vääriä arvoja. Kuten luvussa 2.4.1 mainittiin, tulosten oikeellisuuden todistaminen on vaikeaa ja aina on vaara, että simuloinnin tulokset ja todellisuus eivät vastaa toisiaan.

Tässä työssä simuloitujen tuotantokonseptien suorituskykyyn vaikuttaa merkittävästi vaihtelun voimakkuus ja arvioitujen korjausten suuruus. Työn aikana useissa määrittelyissä noudatettiin varovaisuusperiaatetta, jotta ehdotetut vaihtoehdot tuotantokonseptit, eli kokoonpanolinjat, eivät näyttäytyisi ainakaan todellisuutta paremmalta. Simulointitulokset esittivät kuvassa 21, että liikkuva paikkakokoonpano ja perinteinen kokoonpanolinja eivät pääsisi paikkakokoonpanon tuotantomääriin lähitulevaisuudessa. Tämän aiheutti pääosin kolmesta eri laitemallista ja niiden optioista aiheutuva vaihtelu. Toisaalta luvussa 3.6.3 arvioidut kokoonpanolinjojen hyödyt saattavat pidemmällä aikavälillä osoittautua merkittävästi suuremmiksi. Todennäköisesti esitetyissä linjakonsepteissa on piilevää potentiaalia, jota tämän työn simulointimalleissa ei otettu huomioon.

4. UUSI TUOTANTOKONSEPTI

Ehdotus uudeksi tuotantokonseptiksi on vaihtoehto 4 eli takarunkolinja. Takarunkolinjan todettiin simulointikokeilla lyhentävän loppukokoonpanon läpäisyäikää *20 prosentilla* ja pienentävän läpäisyajan keskihajontaa *jopa 44 prosenttia* verrattuna paikkakokoonpanoon. Ehdotettujen kehitysehdotusten avulla *16 - 21 prosenttia* kokoonpanotyötä saadaan siirrettyä loppukokoonpanosta moduulituotantoon. Kohdeyrityksen pitkän aikavälin tavoite on saada uusi asentaja koulutettua itsenäiseen työskentelyyn kahdessa viikossa. Ehdotettu takarunkolinja tarjoaa tavoitteen toteutumiseen hyvän mahdollisuuden, sillä työkokonaisuudet ovat selkeästi pienempiä kuin aiemmin.

Luvussa 4.1 esitellään vaihtoehtoisten tuotantokonseptien vertailu, joka tehtiin parhaan tuotantokonseptin löytämiseksi. Luvussa käydään läpi valintakriteerit, jotka vaikuttivat takarunkolinjan valintaan seuraavaksi tuotantokonseptiksi. Ehdotetun tuotantokonseptin layout esitellään luvussa 4.2 ja tuotantokonseptin vaatimat muutokset luvussa 4.3. Takarunkolinjan matalan tuotantovolyymien layout esitellään luvussa 4.4.

4.1 Tuotantokonseptien vertailu

Kohdeyrityksen tarpeisiin haluttiin löytää paras tuotantokonsepti, joten eri vaihtoehtoja arvioitiin painotetun pisteytyksen avulla. Vertailussa käytettiin vertailukriteeristöä, joka painottaa niitä asioita, joita kohdeyritys tuotantokonseptilta haluaa. Vertailukriteeristö luotiin lähettämällä Forms-kysely kohdeyrityksen toimihenkilöistä koostuvalle ryhmälle, jonka uskottiin edustavan kattavaa ja asiantuntevaa otantaa. Kyselyn perusteella alustavaa vertailukriteeristöä muokattiin ja vertailukriteereille määriteltiin painotukset väliltä 1-10. Painotus kuvaa kriteerin tärkeyttä yrityksen tulevaisuuden tuotannossa. Tuotantokonseptien pisteytys toteutettiin skaalalla 1-5. Vertailukriteerit, niiden painotukset ja tuotantokonseptien pisteytys on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7 Tuotantokonseptien vertailukriteerit, niiden painotukset ja tuotantokonseptien pisteytys

Vertailukriteeri (skaala 1-5)	Painotus (1-10)	Paikkakokoonpano Vaihtoehto 1	Liikkuva		Takarunkolinja Vaihtoehto 4
			paikkakokoonpano Vaihtoehto 2	Perinteinen linja Vaihtoehto 3	
Tuotannollisten häiriöiden kestävyys	10	4,5	3	1	1
Loppukokoonpanon läpäisy aika	10	2	4	4	5
Kokoonpanojärjestelmän skaalautuvuus	9	4,5	2	1,5	2
Tuotevalikoiman vaihtelun kestävyys	9	4,5	3	2,5	2,5
Läpäisyajan vaihtelun pienentäminen	8	1	3	4	5
Puskureiden mahdollisuus	8	4	2,5	2,5	2,5
Tuotannon läpinäkyvyys	8	2	3	4,5	4,5
Myyntilisten häiriöiden kestävyys	7	4	3,5	3	3
Asentajan tuottavuus	7	2,5	3,5	4,5	4,5
Kehitysmahdollisuuksien löytäminen	6	2	3	4,5	4,5
Tilan ja työkalujen käytön tehokkuus	5	2	4	4	5
Tuotannonohjauksen yksinkertaisuus	5	2,5	5	5	4,5
Työn ohjauksen vähäinen tarve	5	4	3,5	3	3
Tuotantojärjestelmän käyttökustannukset	4	3	3	3	3
Painotettu keskiarvo		3,1	3,2	3,2	3,5

Tuotantokonseptien arvioinnissa käytettiin apuna kirjallisuudesta löydettyjä seikkoja ja asiantuntijatyöpajoissa saatuja ajatuksia. Osa kriteereistä oli sellaisia, että niiden pisteytyksessä voitiin käyttää tukena simuloinnissa saatuja tuloksia. Tällaisia olivat tuotannollisten häiriöiden kestävyys, läpäisy aika ja läpäisyajan vaihtelu. Kirjallisuuslähteiden ja simulointitulosten avulla todettiin takarunkolinjan omaavan heikon tuotannollisten häiriöiden kestävyyn. Sillä todettiin myös olevan lyhyt loppukokoonpanon läpäisy aika ja läpäisyajan pieni vaihtelu. Paikkakokoonpano sijoittuu näiden kriteerien osalta toiseen ääripäähän ja muut vaihtoehdot edellä mainittujen väliin. Suurin osa kriteereistä vaati subjektiivista arviointia ja annettujen pisteytyksien perusteet esitellään seuraavassa.

Kokoonpanojärjestelmän skaalautuvuus on paikkakokoonpanossa toteutettavissa helposti, mutta kokoonpanolinjoilla hankalaa, koska se vaatisi linjan asemien lisäämistä ja työtehtävien uutta tasapainottamista. Etukäteen määritellyn tuotevalikoiman vaihtelu vaikuttaa vähiten paikkakokoonpanoon, mutta sen ei pitäisi vaikuttaa paljoa kokoonpanolinjoihinkaan. Paikkakokoonpanon nähtiin mahdollistavan erilaiset puskurit parhaiten, kun taas kokoonpanolinjoilla niiden mahdollisuudet ovat pienemmät. Tuotannon läpinäkyvyys on heikointa paikkakokoonpanossa ja liikkuvalla paikkakokoonpanolla. Takarunkolinjalla ja perinteisellä kokoonpanolinjalla tuotanto on läpinäkyvää, sillä linjan asemilla tehdään aina määritellyt tehtävät ja tuotannon seuranta on helpompaa. Läpinäkyvyys on suoraan kytköksissä kehitysmahdollisuuksien löytymiseen, jonka pisteytys noudattelee pääosin läpinäkyvyyden pisteytystä.

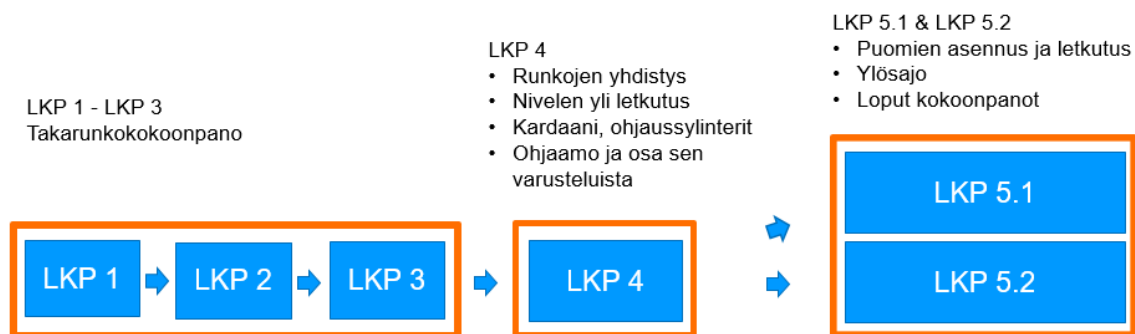
Myyntilisten häiriöiden kestävyys kuvaa ennen tuotannon aloitusta tapahtuvia muutoksia. Paikkakokoonpanon uskotaan kestävän hieman muita paremmin tällaiset häiriöt. Luvussa 2.2.1 todettiin, että paikkakokoonpanon asentajien tehokkuus on

matalampi kuin kokoonpanolinjan. Asentajan tuottavuuden uskotaan kehittyvän pitkällä aikavälillä selkeästi paremmaksi takarunkolinjalla ja perinteisellä kokoonpanolinjalla. Tilan ja työkalujen käytön tehokkuus on kokoonpanolinjoilla hyvä, koska erikoistuneille asemille hankitaan vain tarvittavat materiaalit. Myös tilankäyttö on selkeästi tehokkaampaa, koska kokoonpanolinjan alkupään asemilla ei tarvitse varata tilaa puomien asennusta varten. Takarunkolinjan tilan ja työkalujen käyttö on tehokkainta, koska eturungon varustelu on irrotettu omaksi kokoonpanokseen.

Tuotannonohjaus nähdään yksinkertaisimpana kokoonpanolinjoilla, koska niiden kokoonpanojen eteneminen ja uusien laitteiden aloitus on tasaista ja rutiininomaista. Yksi kriteereistä on työn ohjauksen vähäinen tarve. Nähtiin, että kokoonpanolinjat vaativat eniten aktiivista työn ohjausta sujuvan toiminnan takaamiseksi. Sen takia ne saivat heikoimmat pisteet. Tuotantojärjestelmien käyttökustannusten arviointi oli näin varhaisessa vaiheessa hankalaa, joten eri vaihtoehdot ovat saaneet arvioinnissa samat pisteet.

4.2 Uusi layout

Takarunkolinjalla eturungon varustelu on siirretty loppukokoonpanosta moduulituotantoon, mikä mahdollistaa selkeämmät työnsisällöt koko järjestelmään. Eturungon varustelu itsessään on yksi kokonaisuus, mutta myös takarunkokokoonpanosta muodostuu aiempaa selkeämpi ja pienitöisempi kokonaisuus. Pienentyneen työmäärän takia toistomäärät lisääntyvät ja osaaminen paranee. Takarunkolinjan layoutissa on viisi peräkkäistä asemaa ja lisäksi viimeisen aseman vierellä on rinnakkainen asema. Syy rinnakkaiseen asemaan on se, että puomien asennuksen jälkeen laitetta ei voi enää siirtää ja työtä on vielä paljon jäljellä. Rinnakkaisten asemien tahtiaika on kaksi kertaa muita pidempi. Kuvassa 23 on esitetty takarunkolinjan asemien työnsisältö karkealla tasolla.



Kuva 23 Takarunkolinjan asemien työnsisältö karkealla tasolla

Kolmella ensimmäisellä asemalla suoritetaan takarungon varustelu. Selvitysten perusteella takarungon voi varustella pitkälti valmiiksi ennen yhdistämistä. Joitain

tehtäviä voi jäädä myöhempisiin vaiheisiin, kuten sammutusjärjestelmän viimeistely. Neljännellä asemalla yhdistetään etu- ja takarunko, letkutetaan hydrauliletkut nivelen yli sekä asennetaan ohjaussylinterit ja yhdistetään kardaanit. Lisäksi neljännellä asemalla nostetaan laitteen päälle ohjaamo. Viimeisellä asemalla asennetaan puomit, letkutetaan ne alustalle ja suoritetaan laitteen ylösajo. Diplomityössä tehtiin kokoonpanolinjan tehtävien tasapainotus vain karkealla tasolla. Takarunkolinjan tehtävien tasapainotus noudattelisi kuitenkin seuraavia pääpiirteitä:

- LKP 1, LKP 2 ja LKP 3 -asemien välillä työtehtävien keskinäinen tasapainotus on vapaata
- LKP 4 ja LKP 5 -asemien välillä on joitain työtehtäviä, joilla tasapainotusta voi tehdä
- Takarunkokokoonpanon (LKP 1-3) ja jälkimmäisten kahden aseman (LKP 4-LKP 5) välillä tehtäviä ei voi juurikaan tasapainottaa, vaan näiden keskinäiset läpäisyajat pitää tasapainottaa henkilöresurssia säätämällä
- Asemien työmäärät voivat olla erisuuruiset, mutta asemien läpäisyajat pitää tasapainottaa henkilöresurssin avulla.

Kuten luvussa 2.2.1 todettiin, kokoonpanolinjan työtehtävien tasainen tasapainotus on yksi kokoonpanolinjan suurimmista haasteista. Kohdeyrityksen tuotannossa asemakohtaisesta tasapainotuksesta tekee vaikeaa asemakohtaisten rajapintojen määrittäminen. Eli miten työtehtävät jaetaan asemille niin, että asemilla on omat selkeät työkokonaisuudet ja ne tehdään oikeassa järjestyksessä. Myös asemien keskinäiset läpäisyajat pitää saada yhtä pitkiksi. Asemakohtaisen läpäisyajan säätämisessä voi käyttää apuna työtehtävien uudelleensijoittelun lisäksi asemakohtaisen asentajaresurssin määrää.

4.3 Tarvittavat muutokset

Ehdotetun takarunkolinjan toteutus vaatii tiettyjen toimenpiteiden suorittamista. Ensinnäkin luvussa 3.3.2 esitetyt kokoonpanon kehitysehdotukset pitää toteuttaa, jotta Tuotteiden A, B ja C yhteinen kokoonpanolinja voisi toimia. Näiden lisäksi pitää toteuttaa luvuissa 4.3.1 - 4.3.3. esitettävät muutosehdotukset. Nämä ovat Tuotteen C kokoonpanojärjestyksen muutos, esivarustelusolun kehittäminen ja työntekijöiden ohjauksen muuttaminen.

4.3.1 Tuotteen C kokoonpanojärjestyksen muutos

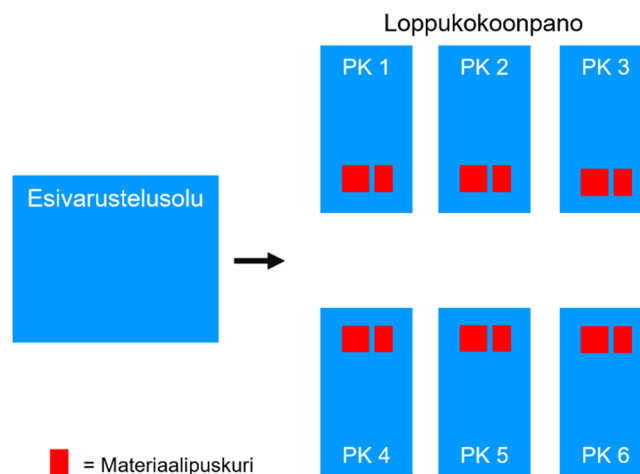
Synkronoitu kokoonpanojärjestelmä vaatii tuotteita, joiden työvaiheiden pituudet ovat lähellä toisiaan. Tuotteiden kokoonpanojärjestyksen ei ole pakko olla sama, mutta samanlainen kokoonpanojärjestys selkeyttäisi kokoonpanojärjestelmää ja helpottaisi sen tasapainottamista. Tuote C on tietyiltä osin erilainen laite kuin Tuote A ja B ja sen takia myös laitteiden kokoonpanojärjestykset eroavat toisistaan. Tuotteiden A ja B

kokoonpanossa ohjaamo asennetaan ennen puomeja. Tuotteen C loppukokoonpanossa sen sijaan puomi ja puomisupportin taakse tulevat lisäpainot asennetaan ennen ohjaamo. Syy on se, että ohjaamon asennuksen jälkeen puomin ja lisäpainojen asennus olisi hankalampaa.

Laitemallien yhdenmukainen kokoonpanojärjestys vaatisi Tuotteen C ohjaamon asennuksen ennen puomia. Alustavan selvityksen mukaan se olisi mahdollista ilman suunnittelumuutoksia tuotteeseen. Silloin puomin pulttien kiristäminen tapahtuisi ohjaamon ja puomisupportin välissä olevassa pienessä tilassa. Paikka on hankala sijainniltaan ja ergonomisen työasennon näkökulmasta. Asiaa pitää tarkastella tarkemmin myöhemmin. Toinen ongelma ehdotetussa järjestyksessä on lisäpainojen asentaminen. Jatkossa ne asennettaisiin viimeisenä pieneen tilaan puomisupportin ja ohjaamon väliin. Työ vaatii tarkkaa nosturityöskentelyä ja ohjaamon suojaamista kolhuilta.

4.3.2 Esivarustelusolun kehittäminen

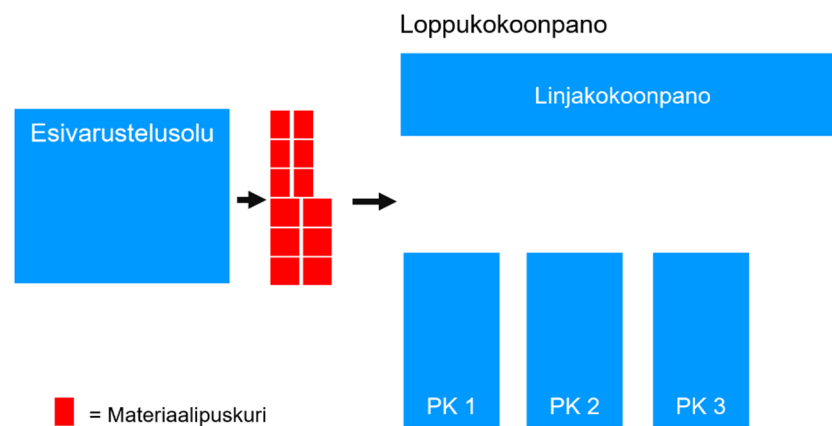
Kohdeyrityksen tuotanto on järjestetty niin, että esivarustelusolu tuottaa puolivalmiita osakokoonpanoja loppukokoonpanoon. Jo diplomityön alussa huomattiin, että osakokoonpanojen myöhästymiset aiheuttavat häiriöitä loppukokoonpanoon. Tällä hetkellä osakokoonpanojen valmistus tapahtuu ajallisesti lähellä todellista tarvetta. Kuten luvussa 2.2.4 todettiin, tuotannossa oleva vaihtelu pitäisi kompensoida puskureiden yhdistelmällä. Esivarustelusolun ja loppukokoonpanon välissä on pieni aikapuskuri, mutta valmiille osakokoonpanoille ei ole layoutissa materiaalipuskuria. Materiaalipuskurina toimii joko paikkakokoonpanoruuduissa oleva ylimääräinen tila tai ulkotilat. Kuvassa 24 on esitetty kohdeyrityksen materiaalipuskureiden kärjistetty nykytilanne.



Kuva 24 Kohdeyrityksen materiaalipuskureiden kärjistetty nykytilanne

Diplomityössä selvitettiin esivarustelusolun toimintaa asiantuntijatyöpajan avulla. Siellä todettiin, että esivarustelusolun ohjaus ei ole selkeää ja toimivaa. Puutteellisen ohjauksen takia esivarustelujen valmistus saatetaan aloittaa vasta kun loppukokoonpanosta tulee impulssi sen tarpeesta. Isojen kokoonpanojen ohjaus toimii, mutta ei ole optimi. Kompressoria pienempien esivarustelujen ohjaus on heikolla tasolla. Näiden ohjaus tapahtuu usein asentajien välisellä kommunikoinnilla. On myös yleistä, että loppukokoonpanon asentaja käy kysymässä esivarustelusta osakokoonpanojen valmistumista. Heikko ohjaus tarkoittaa, että asentajat joutuvat käyttämään työaikaansa selvittelyihin eivätkä pysty keskittymään arvoa tuottavan työn tekemiseen. Toimintatapa on muodostunut, koska esivarustelujen ohjaus ei ole selkeää ja ne tehdään suoraan tarpeeseen.

Suoraan tarpeeseen valmistaminen on oppikirjamaista Just-In-Time-tuotantoa. Kuitenkin kohdeyrityksen ydintoiminta, eli loppukokoonpano, häiriintyy siitä liikaa. Esivarustelusolun tuotanto ei ole kovin virtaustehokasta, mutta ei myöskään resurssitehokasta. Se on niin lähellä tarvetta, että asentajat joutuvat usein keskeyttämään työnteon ja mukautumaan loppukokoonpanon tarpeisiin. Esivarustelusolun toimintaa on kehitettävä, jotta loppukokoonpanon on mahdollista saavuttaa sen havaittu kehityspotentiaali. Kuvassa 25 on esitetty materiaalipuskureiden tavoiteltu tila.



Kuva 25 Kohdeyrityksen materiaalipuskureiden tavoiteltu tilanne

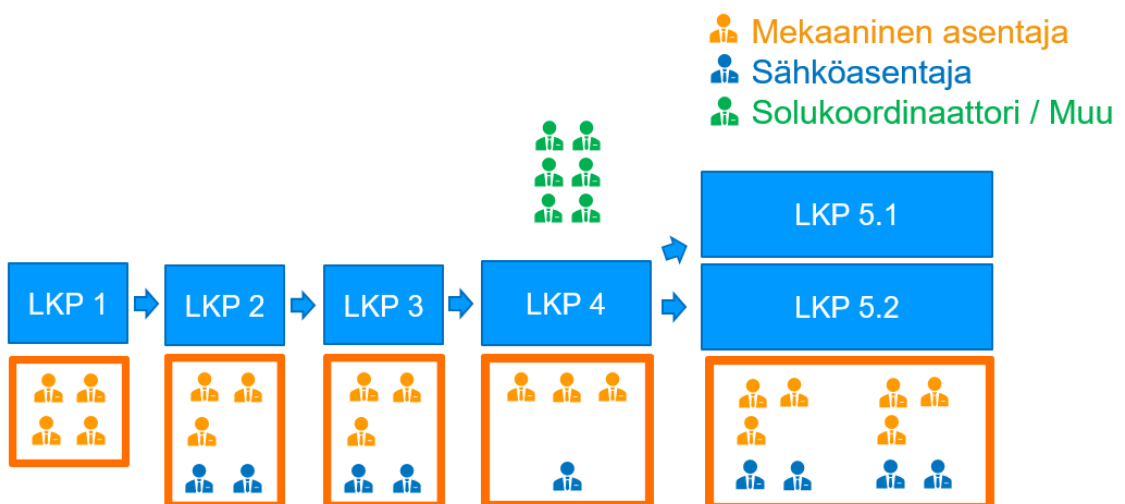
Toimintaa kehitettäisiin niin, että esivarustelun läheisyyteen luodaan osakokoonpanokohtaiset materiaalipuskurit, jotka toimivat samalla visuaalisena ohjauksena. Esivarustelusolun asentajien tavoite on pitää materiaalipuskurit täynnä työlistan mukaisessa järjestyksessä. Loppukokoonpanon asentajia kiellettäisiin tilaamasta osakokoonpanoja liian aikaisin. Väärään aikaan tilaaminen aiheuttaa vaihtelua esivarustelusolun toimintaan ja täyttää loppukokoonpanon materiaaliruutuja turhaan. Materiaalipuskurit tarkoittaisivat, että esivarustelun ja loppukokoonpanon

asentajien ylimääräinen kommunikointi vähenee. Ne myös poistaisivat tarpeen kuluttaa työskentelyaikaa seuraavista osakokoonpanoista huolehtimiseen.

On hyvä, että kohdeyityksellä on käytössä edes kokoonpanoruuduissa olevat materiaalipuskurit. Ne ovat kuitenkin väärässä paikassa. Erillisissä paikkakokoonpanoruuduissa olevat materiaalipuskurit eivät puskuroid esivarustusolosuolun kohdistuvia häiriöitä ja ohjaa sen toimintaa. Kohdeyityksen tämänhetkiselä toimintatavalla se kärsii materiaalipuskureiden haitoista, mutta ei nauti niiden hyödyistä. Esivarustelun kehittämisen jälkeen keskeneräisen tuotannon määrä saattaisi pysyä samana, mutta esivarustusolosuolun ja loppukokoonpanon tuotanto olisi tasaisempaa ja toisista riippumattomampaa.

4.3.3 Työntekijäresurssin ohjaus

Ehdotetussa tuotantokonseptissa on viisi erilaista asemaa, joille asentajat erikoistuvat. Asemakohtaisten työtehtävien avulla mekaanisia ja sähköasentajia voitaisiin sijoittaa vain niille asemille, joilla heitä tarvitaan. Takarunkolinjassa olisi kapasiteettipuskurina ryhmä monipuolisesti koulutettuja asentajia luvussa 2.2.6 esitellyn Hytösen et al. (2008) mallin mukaisesti. Osa ryhmästä on koko ajan tasapainottavissa kokoonpanotehtävissä, kun toisille on suunniteltu hiljaisemmalle ajalle muita tehtäviä. Nämä asentajat ottaisivat vastuulleen esimerkiksi solukoordinaattorin tehtävät, asennusohjeiden luomisen ja muita kehitystehtäviä. Kun tuotannossa tulee tarve lisäresurssille, kehitystehtävät siirretään sivuun ja kaikki asentajat siirtyisivät tasapainottamaan tuotantoa. Tällaista konseptia on jo itse asiassa hyödynnetty eräällä kohdeyityksen kokoonpanolinjalla. Kuvassa 26 on esitelty karkea ehdotus työntekijöiden sijoittelusta ja heidän lukumäärästä eri asemilla. Tässä esimerkissä LKP 1 -asemalle sijoitettaisiin pelkästään mekaanisia asentajia ja sähköasennukset aloitettaisiin vasta LKP 2 -asemalla.

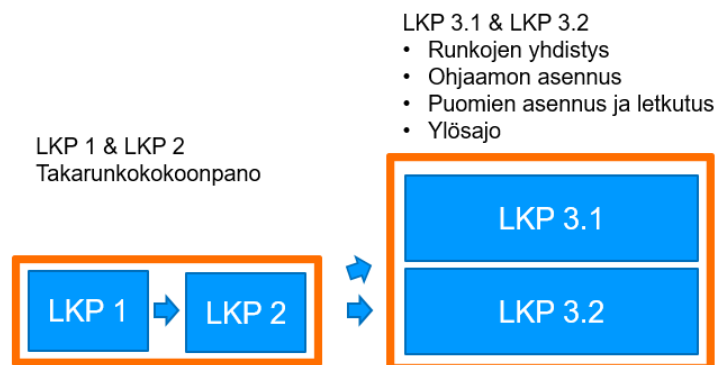


Kuva 26 Työntekijöiden sijoittelu uudessa tuotantokonseptissa

Kuten luvussa 2.2.6 kerrottiin, työntekijöiden liian laaja kouluttaminen on kallista ja tehotonta. Todettiin myös, että on tehokkaampaa kouluttaa osa asentajista monipuolisesti samalla kun osa asentajista erikoistuu pienempään määrään tehtäviä. Luvussa 2.2.6 myös esitettiin, että työkokonaisuuksien pilkkominen johtaa erikoistumiseen, joka parantaa tuottavuutta. Asentajien keskittyminen pienempään kokonaisuuteen tarkoittaa lyhyempää oppimisaikaa ja tehokkaan työskentelyn saavuttamista nopeammin. Se myös mahdollistaa syvällisemmän paneutumisen omiin tehtäviin ja täten uusien kehitysehdotusten löytämisen helpommin. Erikoistumisen hyödyt on selvästi huomattu myös kohdeyrityksessä, sillä suuri osa työntekijöistä työskentelee erikoistuneissa osa- tai moduulikokoonpanoissa. Kuitenkin loppukokoonpanossa erikoistumista on ollut tähän asti hyvin vähän, ja tämä on väistämättä tarkoittanut menetettyä tuottavuutta.

4.4 Matalan tuotantovolyymien layout

Kuten luvussa 2.1 todettiin, yksi kokoonpanojärjestelmän joustavuuden elementti on sen muunneltavuus. Matalan kysynnän aikaan tuotantovolyymit saattavat laskea ja voi syntyä tarve pienemmälle kokoonpanojärjestelmälle. Takarunkolinjasta kehitettiin variantti, jolla voi valmistaa pienempää tuotantovolyymia tehokkaasti. Kuvassa 27 on esitetty takarunkolinjan matalan tuotantovolyymien layout ja suurpiirteisesti sen asemien työtehtävät.



Kuva 27 Takarunkolinjan matalan tuotantovolyymien layout

Pääpiirteet vaihtoehdossa pysyvät samoina, mutta asemien työtehtäviä on yhdistetty. Takarunkokokoonpano (LKP 1 & 2) ja muu loppukokoonpano (LKP 3) ovat edelleen erillisiä. Layoutista on poistettu kaksi asemaa, ja tahtiaikaa pidennetty noin 1,7 - kertaiseksi. Samalla kokoonpanojärjestelmän tuotantokapasiteetti laskee noin 65 prosenttiin verrattuna kuuden aseman layoutiin. Layoutin etuja on, että työskentely ja tilankäyttö on edelleen tehokasta ja keskeneräinen tuotannon määrä pieni. Layoutin muutos olisi helppoa, sillä takarunkolinjan layoutissa ei ole kiinteitä asennuksia.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Diplomityön ensimmäinen tutkimuskysymys kysyy, mitä vaihtoehtoisia tuotantokonsepteja on kohdeyrityksen uuden sukupolven laitteille. Diplomityössä tuotantokonsepti määriteltiin koostuvan kokoonpanojärjestelmästä, asentajien ohjauksesta ja materiaaliirroista. Luvussa 2.2.1 tuotiin esille, että kokoonpanojärjestelmä muodostuu aina paikka-, solu-, tai linjakokoonpanosta tai niiden yhdistelmästä. Luvussa 2.2.6 todettiin, että asentajien tehokas hyödyntäminen ja ohjaaminen on tärkeä osa tuotantokonseptia. Näistä asioista kehittämällä kehitettiin erilaisia vaihtoehtoisia tuotantokonsepteja, joista potentiaalisimmiksi todettiin luvussa 3.5 esitellyt takarunkolinja, perinteinen linja, liikkuva paikkakokoonpano ja paikkakokoonpano.

Toinen tutkimuskysymys kysyy, mikä ehdotetuista tuotantokonsepteista on paras uuden sukupolven tuotteiden valmistukseen. Selvityksen jälkeen parhaaksi vaihtoehdoksi valikoitui takarunkolinja, jossa asentajat erikoistuvat tehtäviinsä ja eturungon varustelu siirretään moduulituotantoon. Ehdotus on sekamallilinja, jolla tuotetaan tuotteita A, B ja C. Se vastaa hyvin tuotantokonseptille asetettuihin tavoitteisiin, jotka olivat loppukokoonpanon läpäisyajan vaihtelun pienentäminen, läpäisyajan lyhentäminen ja loppukokoonpanotuntien vähentäminen. Simulointitulosten perusteella takarunkolinja pienentää loppukokoonpanon läpäisyajan vaihtelun keskihajontaa *jopa 44 prosenttia* ja loppukokoonpanon läpäisyaikaa *20 prosenttia*. Ehdotetut kehitysehdotukset siirtäisivät loppukokoonpanosta *16 – 21 prosenttia* työtä moduulituotantoon. Tämän lisäksi kokoonpanolinjan erikoistumisen voi odottaa laskevan loppukokoonpanotunteja entisestään.

Ehdotettu takarunkolinja tuo toteutuessaan merkittävää kehitystä kohdeyrityksen loppukokoonpanoon ja sen toteutusmahdollisuuksia onkin lähdetty selvittämään esiselvityksenä toimineen diplomityön jälkeen. Diplomityö on herättänyt kohdeyrityksessä keskustelua keskeisistä havainnoistaan, kuten eturungon moduloinnista, erikoistumisen hyödyistä ja sen olemattomasta määrästä kohdeyrityksen loppukokoonpanossa. Varsinkin kokoonpanotyön mahdollinen laadun paraneminen ja vakiintuminen on ollut asia, joka on herättänyt mielenkiintoa.

Diplomityö oli esiselvitys myöhemmin mahdollisesti toteutettavalle tarkemmalle tuotantokonseptin ja kokoonpanojärjestelmän suunnittelulle. Työssä esiteltujen asioiden pohjalta on mahdollista jatkaa kohti tuotantokonseptin tarkempaa suunnittelu- ja implementointivaihetta. Ne alkaisivat luvussa 5.1 esiteltujen toimenpide-ehdotusten

toteuttamisella. Luvussa 5.2 pohditaan synkronoidun kokoonpanolinjan mahdollistamia hyötyjä. Ehdotettua tuotantokonseptia analysoidaan kriittisesti luvussa 5.3 ja tutkimusmenetelmiä luvussa 5.4.

5.1 Toimenpide-ehdotukset

Tuotantokonseptin implementointi vaatii useiden toimenpiteiden suorittamista ennen implementointivaiheen aloittamista. Jos ehdotettu tuotantokonsepti päätetään toteuttaa, se vaatii yksityiskohtaista implementointisuunnitelmaa. Diplomityön aikana huomattiin, että hyvä ja yksityiskohtainen suunnitelma helpottaa projektin toteuttamista ja parantaa tulosten laatua. Luvuissa 3.3.2 ja 4.3 esitettiin useita kehitysehdotuksia ja muutoksia, jotka pitää toteuttaa ennen takarunkolinjan toteuttamista. Ne aiheuttavat muutoksia muun muassa laitteisiin, työmenetelmiin ja kokoonpanojärjestyksiin.

Luvun 3.3.2 kehitysehdotusten toteuttamiskelpoisuus selvitettiin vain suurpiirteisellä tasolla. Seuraava vaihe olisi kehitysehdotusten teknisten ratkaisujen analysointi sekä niiden vaikutusten arviointi ja kokeileminen käytännössä. Joidenkin kehitysehdotusten teknisten ratkaisujen luominen voi viedä aikaa, joten ne kannattaa aloittaa ajoissa. Tällainen on esimerkiksi eturungon siirtäminen moduulituotantoon.

Implementointivaiheessa kokoonpanolinjalle tehtäisiin työtehtävien asemakohtainen tasapainotus. Se vaatii tietoja työvaiheiden kestoista ja riippuvuussuhteista. Tasapainotusta varten kohdeyrityksen standardityölistojen ja laitteiden virtausmallien ajantasaisuus pitäisi tarkistaa. Mitä laadukkaammalle tiedolle tasapainotus perustuu, sitä parempi siitä tulee. Synkronoidun kokoonpanolinjan tehokkuuteen vaikuttaa merkittävästi asemien vaiheajojen tasapaino, joten tasapainotuksen onnistuminen on tärkeää. Lisäksi asiantuntijatyöpajoissa todettiin, että Tuotteiden A, B ja C asennusohjeiden määrät ja niiden tasot vaihtelevat laitemallien kesken. Työtehtävien standardointi olisi hyvä aloittaa ajoissa tekemällä yhtenäiset asennusohjeet laitemallien kesken. Se vaatisi yhteistyötä laitemallien asentajien välillä, mikä saattaisi tuoda esiin myös kehityskohteita. Tulevat uudet toimintatavat vaativat standardoituja työtehtäviä, hyviä asennusohjeita ja yhdessä sovittuja pelisääntöjä.

5.2 Synkronoidun kokoonpanolinjan hyödyt

Synkronoitu kokoonpanolinjatuotanto toisi useita hyötyjä verrattuna kohdeyrityksen nykyiseen paikkakokoonpanojärjestelmään. Esimerkiksi uudessa layoutissa tilankäyttö on huomattavan tehokasta, sillä jokaiselle työvaiheelle on varattu vain tarpeellinen määrä tilaa. Kolme ensimmäistä asemaa voivat olla lyhyitä, koska takarungon

kokoonpano ei vaadi paljoa pituutta. Tilankäyttö on optimoitu myös puomien tarvitseman tilan osalta, sillä vain kaksi viimeistä asemaa ovat pitkiä.

Linjakokoonpanotuotanto on ennustettavaa, läpinäkyvää ja aiheuttaa tasaisen kuorman edellisille ja seuraaville vaiheille. Tasainen moduulien kysyntä yhdistettynä moduuli- ja loppukokoonpanon väliseen aikapuskuriin tarkoittaa tasaista ja riippumatonta työntekoa moduulituotannoille. Myös seuraaville vaiheille, eli testaukselle ja viimeistelylle, on tärkeää saada tasaisesti töitä, koska muuten epätasainen kuormitus pitää kompensoida resurssipuskurilla. Lisäksi synkronoitu tuotanto helpottaa logistiikan tehtäviä, sillä kokoonpanolinjan tarpeet ovat tasaisia ja ennustettavia. Koska materiaalien tarpeen ajankohta on tiedossa, materiaalinhallinnan voi luoda tehokkaaksi ja palvelemaan tarvetta. Simulointitulosten mukaan takarunkolinjan läpäisyajan keskihajonta pienenee 44 prosenttia paikkakokoonpanoon verrattuna, joten tuotanto olisi merkittävästi tasaisempaa kuin paikkakokoonpanossa.

Erikoistuvat asemat ja työntekijät mahdollistavat työtehtäviin erikoistumisen ja niiden tekemisen standardoimisen. Standardoiduille tehtäville voidaan luoda kattavat asennusohjeet, jolloin oppiminen on nopeampaa ja kaikki työntekijät tekevät tehtävät samalla tavalla. Tämän pitäisi parantaa ja tasoittaa tuotteiden laatua ja vähentää virheiden mahdollisuutta. Kattavat asennusohjeet myös nopeuttavat ja tehostavat uuden asentajan oppimista ja täten parantavat asentajien tuottavuutta. Tuotteiden A, B ja C asettaminen samaan sekamallilinjaan mahdollistaa työmenetelmien yhtenäistämisen ja nimikkeiden vähentämisen laitemallien välillä. Nämä toimenpiteet parantavat osaltaan kokoonpanon joustavuutta.

Tulevaisuudessa kohdeyrityksen uuden sukupolven tuotteiden kysyntävolyymien ennustetaan kasvavan merkittävästi. Tämä tarkoittaa, että uuden sukupolven laitteiden loppukokoonpanoon pitää kouluttaa merkittävästi lisää asentajia. Uusilla tai uudelleen koulutetuilla vanhoilla asentajilla tulee olemaan pitkä oppimisaika, jos opittavana on koko laitteen loppukokoonpano. Takarunkolinjan hyödyt tulisivat tässä asiassa nopeasti ilmi, sillä uusilla asentajilla olisi selkeästi vähemmän opittavaa. Tällöin asentajat oppisivat paremmin ja saavuttaisivat nopeasti hyvän tehokkuuden. Luvussa 2.2.6 kerrottiin Volvon uudesta moottorikokoonpanolinjasta, jossa uuden asentajan oppimisaika lyheni kuukaudesta yhteen päivään, kun tuotanto jaettiin 18 osaan. Tästä päätellen, jokainen työkokonaisuuden puolittaminen enemmän kuin puolittaa oppimisajan.

Kokoonpanolinja erikoistuneilla asemilla on riippuvainen asemien tahtiaikojen keskinäisestä tasapainosta. Tuote ei pysty etenemään seuraavalle asemalle, ennen kuin määritellyt tehtävät on tehty. Tämä aiheuttaa tuotannon hetkellisiä pysähtymisiä. Näiden pysähtymisien juurisyiden selvittäminen mahdollistaa tuotannon kehittämisen ja sen

virtauksen parantamisen. Takarunkolinja onkin hyvin virtaava, mikä tarkoittaa, että esimerkiksi uuden laitteen aloitus on sujuvaa ja nopeaa materiaalipuskureiden ansiosta.

Takarunkolinjan tasapainotus tulisi olemaan helpompaa kuin kahden muun ehdotetun kokoonpanolinjan (vaihtoehdot 2 ja 3), sillä takarunkolinja koostuu selkeämmistä kokonaisuuksista. Eturungon varustelu on siirretty moduulituotantoon, jolloin takarungon kokoonpano jää omaksi selkeäksi kokoonpanokseen. Suuritoinen takarungon varustelu täytyy jakaa vain kolmelle asemalle, mikä on verrattain vähän. Työkokonaisuuksien jakaminen useammalle asemalla tekisi asemien työtehtävien tasapainottamista vaikeampaa ja laskisi linjan käyttöastetta. Takarunkolinjan viimeisillä asemilla on paljon tehtäviä, jotka tehdään jokaiselle laitteelle, joten niiden työn sisältö on hyvin standardoitua. Esimerkiksi LKP 4 -asemalla jokaisen laitteen rungot ja letkut yhdistetään sekä asennetaan ja kytketään ohjaamo. LKP 5 -asemalla jokaiselle laitteelle asennetaan puomit, letkutetaan ne ja suoritetaan ylösajo.

5.3 Tuotantokonseptin kriittinen analysointi

Diplomityössä kannustetaan vahvasti selkeään erikoistumiseen loppukokoonpanossa. Selvityksessä tunnistettiin kuitenkin käytännön tarve ylläpitää osalla asentajista enemmän kuin yhden aseman osaaminen. Tuotannossa tulee välillä yllättäviä häiriöitä ja työntekijöiden poissaolot ovat tavallisia luonnollisista syistä. Näiden kompensoimiseen tarvitaan joustavuutta. Useamman kuin yhden aseman osaaminen tuo järjestelmään joustavuutta, mutta vähentää erikoistumista. Erikoistuminen ja joustavuuden välillä pitäisikin löytää optimiratkaisu.

Selvityksen aikana toteutettu simulointi ja häiriöanalyysi osoitti, että perinteiset kokoonpanolinjat ovat hyvin herkkiä vaihtelulle. Kohdeyrityksen tuotannossa on useita eri vaihtelun lähteitä, mutta pääosin ne liittyvät materiaaleihin. Kuten luvussa 2.2.4 todettiin, tuotannossa olevan vaihtelun kompensoimiseksi käytetään puskureita, joita on kolmenlaisia: materiaali-, kapasiteetti- ja aikapuskureita. Ehdotettu tuotantokonsepti vaatii näiden kaikkien käyttöä. Materiaalipuskureilla voidaan varautua osien toimitushäiriöihin ja laatuvirheisiin. Kapasiteettipuskurina toimisi esitelty monipuolisesti koulutettu joustava asentajaryhmä, joka tasapainottaa tuotannossa olevaa vaihtelua. Aikapuskuria käytettäisiin moduuli- ja loppukokoonpanojen välissä turvaamaan kokoonpanolinjan häiriötöntä toimintaa.

Suurelta puskurit eivät poista kaikkia materiaaleista johtuvia häiriöitä. Sen kanssa on pärjättävä ja siihen on varauduttava mahdollisuuksien mukaan. Puskurit lisäävät kustannuksia ja ylikapasiteetti voi aiheuttaa tehottomuutta. Ne kuitenkin mahdollistaisivat suuret hyödyt tuotantokonseptin toteutuessa. Uudessa tuotantokonseptissa keskitytään

ensiksi loppukokoonpanon virtaustehokkuuden kasvattamiseen, mikä tapahtuu ainakin aluksi resurssitehokkuuden kustannuksella. Kun loppukokoonpanon virtaustehokkuus on hyvä, voidaan keskittyä resurssitehokkuuden kasvattamiseen.

Luvussa 4.1 esiteltiin eri tuotantokonseptien vertailuanalyysi. Tuotantokonseptien vertailu tapahtui diplomityöntekijän toimesta, jolloin mahdollisuus virheisiin on kohtalainen. Vertailukriteerien valinta ja painotus tehtiin kohdeyrityksestä valittujen henkilöiden avulla ja vertailukriteerien painotus oli 1-10. Tämä herättää kysymyksen, että painotetaanko kokoonpanolinjan suurinta heikkoutta, eli häiriöherkkyyttä, tarpeeksi. Vertailukriteeristöissä oli kolme kriteeriä tätä varten: tuotannollisten häiriöidenkestokyky, tuotevalikoiman vaihtelunkestokyky ja myynnillisten häiriöidenkestokyky. Kokoonpanolinjat saivat näistä heikot pisteet, mutta se ei välttämättä riitä kuvaamaan niiden todellista häiriöherkkyyttä ja sen vaikutusta tuotantoon.

Suoritettu tuotantokonseptien vertailu ei ota kantaa eri vaihtoehtojen toteutettavuuteen vaan vertaili vaihtoehtoja sillä oletuksella, että ne kyetään toteuttamaan. Luvussa 2.2.1 todettiin, että paikkakokoonpano ja kokoonpanolinja ovat toistensa vastakohtia monen ominaisuuden osalta, joten yhdellä tuotantokonseptillä ei voi saada kaikkia ominaisuuksia. Tuotantokonseptien heikkoudet eivät kuitenkaan tarkoita, etteikö niihin voisi varautua ja pienentää niiden vaikutusta. Eri yritykset tarvitsevat tuotantokonseptiltä erilaisia ominaisuuksia, joten selkeää oikeaa vastausta tuotantokonseptin valintaan ei ole olemassa. Tehdyssä vertailussa painotettiin kohdeyrityksen arvostamia tekijöitä ja takarunkolinja saavutti selkeästi parhaan painotetun keskiarvon. Takarunkolinja sai hyvät pisteet varsinkin nopeasta läpäisyajasta ja sen pienestä vaihtelusta sekä erilaisista tehokkuutta mittaavista vertailukriteereistä.

Selvityksen aikana perehdyttiin Tuote E -projektiin ja sen tuloksena syntyvään laitteeseen. Projekti tuottanee muutoksia, joilla lasketaan tuotekustannuksia ja nämä muutokset saattavat tulla myös Tuotteelle A lähitulevaisuudessa. Muutokset todennäköisesti lisäävät Tuotteen A kokoonpanotyötä loppukokoonpanossa ja täten vaikeuttaisi sekamallilinjain tasapainottamista. Mahdollisessa tuotantokonseptin implementointivaiheessa tuotannonkehityksen ja tuotesuunnittelun pitäisi olla jatkuvassa yhteydenpidossa. Hyvä tiedon kulku vähentäisi riskiä tehdä asioita, jotka ovat ristiriidassa keskenään.

Takarunkolinjan toiminta ei alussa tule olemaan täydellistä, vaan sitä täytyy hioa ja kehittää jatkuvasti. Tämän mahdollistamiseksi on välttämätöntä, että järjestelmään luodaan systemaattinen tapa, miten ilmenevät ongelmat korjataan. Ongelmiin pitäisi varautua jo etukäteen, panostamalla esimerkiksi asennusohjeisiin, laitemallien työtehtävien ja -tapojen yhtenäistämiseen sekä esivarustusolosuhteiden kehittämiseen.

Tuotteiden A, B ja C loppukokoonpanon pitäisi olla mahdollisimman yhteneväistä sekamallinlinjan toiminnan varmistamiseksi.

5.4 Tutkimusmenetelmien kriittinen arviointi

Diplomityössä tehty selvitys pohjautuu pitkälti diplomityöntekijän kokemukseen kohdeyrityksen tuotannosta, kohdeyrityksen työntekijöiden kanssa suoritettuihin asiantuntijatyöpajoihin ja kirjallisuuteen. Kaikissa mainituissa lähteissä on mahdollisuus virheelliseen tietoon. Tekijän kokemus saattaa olla rajoittunutta ja myös haastatellut kohdeyrityksen työntekijät saattavat katsoa asiaa vain yhdestä näkökulmasta. Kirjallisuudesta voi löytää tukea lähes mille tahansa väitteelle, jos asioita irrottaa kontekstistaan. Tämän takia lähteiden selkeä esittely ja niiden luotettavuuden arviointi on tärkeää. Diplomityössä käytettiin tutkimusmenetelminä kirjallisuuskatsausta, data-analyysiä, asiantuntijatyöpajoja ja simulointia. Valitut menetelmät osoittautuivat onnistuneiksi valinnoiksi. Niiden avulla saatiin hyvin tietoa sekä teoreettisista lähteistä, että kohdeyrityksen tuotannosta. Diplomityö sai kohdeyrityksen suunnasta kiitosta kattavista teoreettisista perusteluista koko diplomityöprojektin ajan.

Data-analyysin ja asiantuntijatyöpajojen avulla syvennettiin perehtymistä kohdeyrityksen laitteisiin ja tuotantoon. Diplomityössä päästiin tälläkin osa-alueella hyvälle tasolle. Projektin oli tarkoitus olla esiselvitys, mutta monia asioita saatiin selvitettyä kiitettävällä tarkkuudella. Data-analyysin avulla selvitettiin muun muassa laitemallien yhteisiä työtehtäviä, kokoonpanotunteja ja eturungon varusteluun siirrettäviä työtehtäviä. Se tuki hyvin muiden tutkimusmenetelmien avulla saatuja tietoja. Asiantuntijatyöpajat tarkensivat yksityiskohtia muun muassa laitteiden kokoonpanosta ja poistivat epävarmuustekijöitä. Haasteena oli käytössä olleiden resurssien rajallisuus, koska diplomityö oli vasta esiselvitys. Suuremmalla panostuksella teknisiin kysymyksiin olisi voitu saada parempi selvyys jo diplomityön aikana.

Diplomityössä olisi voitu päästä tarkempiin tuloksiin myös, jos tiedon keruuta olisi suoritettu kohdeyrityksen loppukokoonpanosta. Nyt diplomityö pohjautuu aiemmin kerätylle ja luodulle datalle, jonka oikeellisuuden ja ajantasaisuuden voi kyseenalaistaa. Tiukka aikataulu aiheutti kuitenkin sen, että diplomityön työmäärää piti rajata. Neljäs tutkimusmenetelmä oli simulointi. Se oli sekä diplomityön tekijälle, että kohdeyritykselle varsin uusi työkalu. Tuotannon simulointi osoittautui arvioitua vaikeammaksi ja simulointi vaati arvioitua enemmän työaikaa. Tulokset olivat kuitenkin lupaavia ja täyttivät odotukset. Jatkossa simulointimalleja voi parantaa ja niihin syötettyä dataa tarkentaa.

6. YHTEENVETO

Diplomityön tarkoituksena oli luoda kohdeyrityksen uuden sukupolven laitteille uusi tuotantokonsepti. Tuotantokonseptille asetettiin tavoitteiksi loppukokoonpanon läpäisyajan vaihtelun pienentäminen, läpäisyajan lyhentäminen ja loppukokoonpanotuntien vähentäminen. Vaikka näille tavoitteille ei numeerisia arvoja ollutkaan, diplomityössä luodun takarunkolinjan nähtiin täyttävän asetetut tavoitteet hyvin. Tuloksia ei pystytty näyttämään käytännössä toteen diplomityön aikana, sillä kokoonpanolinjaa ei implementoitu työn aikana.

Selvitys aloitettiin perehtymisellä aiempiin tutkimuksiin käsiteltävästä aiheesta. Niiden pohjalta luotiin työn teoriaosuus, joka koostui tuotannon paradigmaista, matalavolyymisesta kokoonpanotuotannosta, kokoonpanojärjestelmän suunnittelusta ja simuloinnista. Teoriaosuuteen pyrittiin löytämään tutkimuksia kohdeyrityksen tuotantoon olennaisesti liittyvistä asioista, kuten läpäisyajasta, vaihtelusta, joustavuudesta ja työntekijöiden ohjauksen merkityksestä. Kattavan teorian tutkimisen jälkeen siirryttiin tutkimuksen empiiriseen vaiheeseen, joka alkoi kohdeyrityksen tuote- ja tuotantoanalyseillä. Ne antoivat raamit luoduille tuotantokonseptivaihtoehdoille, joita kehiteltiin useampia. Vaihtoehtojen luonnin jälkeen suoritettiin simuloinnin suunnittelu ja simulointiajot. Samaan aikaan luotiin kohdeyrityksen henkilöstön avustuksella tuotantokonseptien vertailua varten vertailukriteeristö, jonka avulla erilaisia vaihtoehtoja vertailtiin. Vertailun ja simuloinnin jälkeen parhaaksi vaihtoehdoksi todettiin takarunkolinja, jonka yksityiskohtia kehitettiin iteroivassa prosessissa kohdeyrityksen kanssa.

Diplomityön tuloksia voidaan pitää pääosin luotettavina, huomioon ottaen asioiden tarkastelun syvyys. Diplomityö oli vasta esiselvitys ja käytetyt resurssit sen mukaiset, joten useissa teknisissä asioissa ei voitu päästä kovin korkealle luotettavuustasolla. Esitetyt asiat on työssä pyritty perustelevaan ja taustoittamaan perusteellisesti. Työn suurin anti oli yrityksen tuotannon tarkastelu kokoonpanolinjan suunnittelun kautta sekä laajan ja kattavan pohjatyön tekeminen. Diplomityö dokumentoitiin asianmukaisesti, jotta diplomityössä luotu arvo jäisi tekijän lisäksi myös kohdeyritykselle.

Tuotantokonseptia pitäisi aina katsoa kokonaisuutena, sillä se on enemmän kuin osa-alueidensa summa. Toimiakseen hyvin, kokoonpanojärjestelmän eri osa-alueiden täytyy sopia saumattomasti yhteen. Tuotantokonseptin muutos vaatii yrityksessä paljon muitakin muutoksia kuin tuotteiden ja niiden kokoonpanojärjestyksen muuttamisen. Muutoksia tarvitaan myös työntekijöiden ohjaukseen, materiaalinohjaukseen,

työmenetelmiin ja varsinkin ajattelutapoihin. Usean laitemallin sisältävä uusi kokoonpanolinja edellyttää koko kohdeyrityksen henkilöstöltä motivaatiota ja halua saada linja toimimaan. Se ei voi olla vain yhden osaston kehitysprojekti, sillä tuotantokonsepti ei toimi, jos yksikin osa-alue ei suoriudu vaadittavalla tasolla. Linjan implementointi vaatii onnistuakseen laajan tuen ja sen takia asiasta pitäisikin tehdä koko yrityksen tahtotila.

LÄHTEET

- Ahmad, S. & Schroeder, R.G. (2002). Refining the product-process matrix. *International journal of operations & production management*. Vol. 22(1), s. 103-124.
- Alghazi, A. & Kurz, M.E. (2018). Mixed model line balancing with parallel stations, zoning constraints, and ergonomics. *Constraints: an international journal*. Vol. 23(1), s. 123-153.
- Asadi, N., Fundin, A. & Jackson, M. (2015a). The Essential Constituents of Flexible Assembly Systems: A Case Study in the Heavy Vehicle Manufacturing Industry. *Glob J Flex Systems Management*. Vol 16(3), s. 235–250.
- Asadi, N., Jackson, M. & Fundin, A. (2015b) Handling product variety in a mixed-product assembly line: A case study. *DS 80-4 Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 4: Design for X, Design to X, Milan, Italy, 27-30.07.2015.* s. 041-050.
- Asadi, N., Jackson, M. & Fundin, A. (2016). Drivers of Complexity in a Flexible Assembly System- A Case Study. *Procedia CIRP*. Vol. 41, s. 189-194.
- Askin, R.G. & Zhou, M. (1997). A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem. *International Journal of Production Research*. Vol. 35(11), s. 3095-3106.
- Baker, K.R., Powell, S.G. & Pyke, D.F. (1993). Optimal Allocation of Work in Assembly Systems. *Management science*. Vol. 39(1), s. 101-106.
- Bangsow, S. (2015). *Tecnomatix Plant Simulation: Modeling and Programming by Means of Examples*. Springer International Publishing AG, Cham. 731 s.
- Banks, J., Carson, J.S. & Barry, L. (2005). *Discrete-event system simulation*. Pearson, no. Fourth edition. 648 s.
- Bartholdi, J.J., Eisenstein, D.D. & Foley, R.D. (2001). Performance of bucket brigades when work is stochastic. *Operations research*. Vol. 49(5), s. 710-719.
- Bartholdi, J.J., Eisenstein, D.D. & Lim, Y.F. (2010). Self-organizing logistics systems. *Annual reviews in control*. Vol. 34(1), s. 111-117.
- Becker, C. & Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* Vol. 168(3), s. 694-715.
- Bellgran, M. & Säfssten, K. (2010). *Production development design and operation of production systems*. Springer. 353 s.

Bellgran, M. & Säfsten, K. (2004) Production System Design and Evaluation for Increased System Robustness. Second World Conference on POM and 15th Annual POM Conference, Cancun, Mexico. April 30 - May 3, 2004.

Bennett, D.J. & Forrester, P.L. (1993). Market-focused production systems: design and implementation. Prentice Hall Hertfordshire.

Bindu, K.H., Morusupalli, R., Nilanjan Dey & Rao, C.R. (2020). Coefficient of variation and machine learning applications. CRC Press, Boca Raton. 148 s.

Bozkurt, A., Hagg, M. & Schulz, R. (2020). Innovative logistics concepts for a versatile and flexible manufacturing of lot size one. Proceedings of the 1st Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2020), s.37-47. Saatavissa (viitattu 9.2.2021): <https://doi.org/10.15488/9640>

Bukchin, J. (1998). A comparative study of performance measures for throughput of a mixed model assembly line in a JIT environment. International Journal of Production Research. Vol. 36(10), s. 2669-2685.

Bukchin, J., Dar-El, E. & Rubinovitz, J. (2002). Mixed model assembly line design in a make-to-order environment. Computers & Industrial Engineering. Vol. 41(4), s. 405-421.

Carson, J.S. (2005). Introduction to modeling and simulation. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005. IEEE. 13 s.

Chandra, R. (2004). Adam Smith, Allyn Young, and the Division of Labor. Journal of economic issues. Vol. 38(3), s. 787-805.

ElMaraghy, H.A. (2009). Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. Springer London. 436 s.

Fayol, H. (1955). General and industrial management. Pitman Publishing, London. 110 s.

Forza, C. & Salvador, F. (2008). Application support to product variety management. International Journal of Production Research. Vol. 46(3), s. 817-836.

Freiberg, F. & Scholz, P. (2015). Evaluation of investment in modern manufacturing equipment using discrete event simulation. Procedia Economics and Finance. Vol. 34, s. 217-224.

Geng, H. (2016). Manufacturing engineering handbook. McGraw-Hill Education. 1088 s.

Glass, R., Seifermann, S. & Metternich, J. (2016). The Spread of Lean Production in the Assembly, Process and Machining Industry. Procedia CIRP. Vol. 55, s. 278-283.

Gunasekaran, A. (1998). Agile manufacturing: Enablers and an implementation framework, International Journal of Production Research. Vol. 36(5), s. 1223-1247.

- Harrison, A., Hoek, R.I.v. & Skipworth, H. (2014). *Logistics management and strategy: competing through the supply chain*. Pearson, Harlow, England. 427 s.
- Hazbany, S., Gilad, I. & Shpitalni, M. (2007). About the efficiency and cost reduction of parallel mixed-model assembly lines. *The future of product development*. Springer, Berlin, Heidelberg. s. 483-492.
- Heilala, J. & Voho, P. (2001). Modular reconfigurable flexible final assembly systems. *Assembly Automation*. Vol. 21(1), s. 20-30.
- Heizer, J. & Render, B. (2014). *Operations management: sustainability and supply chain management*. Pearson, Harlow. 912 s.
- Hemmati, S. & Rabbani, M. (2010). Make-to-order/make-to-stock partitioning decision using the analytic network process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 48(5-8), s. 801-813.
- Hopp, W.J. & Oyen, M. (2004). Agile workforce evaluation: a framework for cross-training and coordination. *IIE transactions*. Vol. 36(10), s. 919-940.
- Hopp, W.J. & Spearman, M.L. (2011). *Factory physics*. Waveland, Long Grove. 720 s.
- Hopp, W.J., Spearman, M.L. & Woodruff, D.L. (1990) Practical strategies for lead time reduction. *Manufacturing Review*. Vol. 3(2), s. 78-84.
- Hopp, W.J., Tekin, E. & Van Oyen, M.P. (2004). Benefits of Skill Chaining in Serial Production Lines with Cross-Trained Workers. *Management Science*. Vol. 50(1), s. 83-98.
- Hu, J.S., Ko, J. (2015). Assembly System Design, in: Geng, H., *Manufacturing Engineering Handbook, Second Edition*. McGraw-Hill Education, USA. 9 s.
- Hu, S.J., Ko, J., Weyand, L., ElMaraghy, H.A., Lien, T.K., Koren, Y., Bley, H., Chryssolouris, G., Nasr, N. & Shpitalni, M. (2011). Assembly system design and operations for product variety. *CIRP Annals*. Vol. 60(2), s. 715-733.
- Hu, S.J., Zhu, X., Wang, H. & Koren, Y. (2008). Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains. *CIRP annals*. Vol. 57(1), s. 45-48.
- Hunter, J.E., Schmidt, F.L. & Judiesch, M.K. (1990). Individual Differences in Output Variability as a Function of Job Complexity. *Journal of applied psychology*. Vol. 75(1), s. 28-42.
- Hytönen, J., Niemi, E. & Toivonen, V. (2008). Optimal workforce allocation for assembly lines for highly customized low-volume products. *International Journal of Services Operations and Informatics*. Vol. 3(1), s. 28-39.
- Karrer, C. (2012). *Engineering Production Control Strategies A Guide to Tailor Strategies that Unite the Merits of Push and Pull*. Springer, Berlin, Heidelberg. 188 s.

- Krafcik, J.F. (1988). Triumph of The Lean Production System. MIT Sloan management review. Vol. 30(1), s. 41.
- Lahtinen, H. (2020). Uuden sukupolven kokoonpanotehdas: Visio ja tiekartta materiaalitoimintoihin. Tudi-hanke. Saatavissa (viitattu 14.1.2021) https://tudi.fi/wp-content/uploads/2020/07/TUDI_VisioRoadmap_FINAL.pdf
- Lapinleimu, I. (2001). Ideaalitehdas: tehtaan suunnittelun teorian kiteytys. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere. 197 s.
- Lapinleimu, I., Kauppinen, V. & Torvinen, S. (1997). Kone- ja metallituoteteollisuuden tuotantojärjestelmät. WSOY, Porvoo. 398 s.
- Lean Enterprise Institute. What is Lean? verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.2.2021): <https://www.lean.org/whatslean/>
- Lehtonen, J. (2004). Tuotantotalous. WSOY, Helsinki. 296 s.
- Lödding, H. & Rossi, R. (2013). Handbook of Manufacturing Control: Fundamentals, description, configuration. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 577 s.
- Lovelle, J. (2001). Mapping the value stream. IIE solutions. Vol. 33(2), s. 26.
- Maskell, B. (2001). The age of agile manufacturing. Supply chain management. Vol. 6(1), s. 5-11.
- Miettinen, P. (1993). Tuotannonohjaus ja logistiikka. Painatuskeskus, Helsinki. 102 s.
- Modig, N., Åhlström, P. & Tillman, M. (2013). Tätä on lean: ratkaisu tehokkuusparadoksiin. Rheologica Publishing, Tukholma. 167 s.
- Mullens, M.A. (2011). Factory design for modular homebuilding: equipping the modular factory for success. Constructability Press. 252 s.
- Muther, R. (2015). Systematic layout planning. Industrial Education Institute, Boston, MA.
- Neumann, W.P., Winkel, J., Magneberg, L.M. & Mathiassen, S.E. (2006). Production system design elements influencing productivity and ergonomics: A case study of parallel and serial flow strategies. International journal of operations & production management. Vol. 26(8), s. 904-923.
- Olhager, J. (2003). Strategic positioning of the order penetration point. International Journal of Production Economics. Vol. 85(3), s. 319-329.
- Peltokorpi, J. & Niemi, E. (2019). Effects of group size and learning on manual assembly performance: an experimental study. International Journal of Production Research. Vol. 57(2) s. 452-469.
- Peltokorpi, J. & Niemi, E. (2018). Differences between worker pairs in manual assembly: A case study. Procedia Manufacturing. Vol. 25, s. 535-542.

- Pine, B.J. (1993). *Mass customization: the new frontier in business competition*. Harvard Business School Press, Boston (Mass.). 592 s.
- Pine, B.J., Victor, B. & Boynton, A.C. (1993). Making mass customization work. *Harvard business review*. Vol. 71(5), s. 115.
- Pinker, E.J. & Shumsky, R.A. (2000). The Efficiency-Quality Trade-Off of Cross-Trained Workers. *Manufacturing & Service Operations Management*. Vol. 2(1), s. 32-48.
- Rekiek, B., De Lit, P. & Delchambre, A. (2000). Designing mixed-product assembly lines. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Vol. 16(3), s. 268-280.
- Rother, M. & Shook, J. (2003). *Learning to see value stream mapping to add value and eliminate muda*. Lean Enterprise Institute. 102 s.
- Saadat, M., Tan, M.C.L., Owliya, M. & Jules, G. (2013). Challenges and trends in the allocation of the workforce in manufacturing shop floors. *International Journal of Production Research*. Vol. 51(4), s. 1024-1036.
- Sahin, F. (2000). Manufacturing competitiveness: different systems to achieve the same results. *Production and inventory management journal*. Vol. 41(1), s. 56.
- Santos, J., Wysk, R.A. & Torres, J.M. (2006). *Improving production with lean thinking*. Wiley, Hoboken, New Jersey. 264 s.
- Schenk, M., Wirth, S. & Müller, E. (2010). *Factory planning manual: situation-driven production facility planning*. Springer, Heidelberg. 410 s.
- Simaria, A.S. & Vilarinho, P.M. (2004). A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II. *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 47(4), s. 391-407.
- Slack, N., Brandon-Jones, A. & Johnston, R. (2016). *Operations management*. Pearson Education, Harlow.
- Stephens, M.P. & Meyers, F.E. (2010). *Manufacturing facilities design and material handling*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 512 s.
- Stevenson, W.J. (2011). *Operations management*. McGraw-Hill/Irwin, New York.
- Svensson Harari, N. (2020). *Working procedures in design processes to achieve flexible assembly systems*. Mälardalen University Press Dissertations. 72 s.
- Svensson Harari, N. (2015). *Design Process of Flexible Assembly Systems*. Mälardalen University Press Licentiate Theses. 135 s.
- Svensson Harari, N., Fundin, A. & Carlsson, A. (2020). A Participatory Research Approach for studying the Design Process of Flexible Assembly Systems. *Procedia CIRP*. Vol. 93, s. 1043-1048.

Svensson Harari, N., Bruch, J. & Jackson, M. (2014). Mixed-Product Assembly Lines: Characteristics and Design Challenges. 6th Swedish Production Symposium, SPS14, Gothenburg, Sweden. 9s.

Syvänen, P. & Niemi, E. (2008). Assembly layout set-up for an agile market environment. FAIM 2008, s. 616.

TEKES. Keskiraskas ja raskas kokoonpanotoiminta 1998-2000. Teknologiaohjelmaraportti 2/2001. Helsinki, 2001. 131 s. Saatavissa (viitattu 17.12.2020): <https://docplayer.fi/2116799-Keskiraskas-ja-raskas-kokoonpanotoiminta-1998-2000.html>

Teresko, J. (1994). Mass customization or mass confusion? Industry Week. Vol. 243(12), s. 45.

Uhlmann, E. & Schroder, C. (1998). Agile Produktion als Antwort auf den Wandel der Märkte. Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. Vol. 93(5), s. 180-183.

Wadhwa, S., Rao, K.S. & Chan, F.T.S. (2005). Flexibility-enabled lead-time reduction in flexible systems. International Journal of Production Research. Vol. 43(15), s. 3131-3162.

Wang, Q., Owen, G.W. & Mileham, A.R. (2005). Comparison between fixed- and walking-worker assembly lines. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of engineering manufacture. Vol. 219(11), s. 845-848.

Whitney, D.E. (2004). Mechanical assemblies their design, manufacture, and role in product development. Oxford University Press, New York. 544 s.

Wilson, L. (2015). How to implement lean manufacturing. McGraw-Hill Education LLC, New York.

Womack, J.P., Jones, D.T. & Roos, D. (1990). The machine that changed the world. Rawson, New York. 272 s.