



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

KUISMA KOIVUSALO
KOKOONPANOOTEHTAAN MATERIAALIVIRTOJEN ANALYSOINTI
JA KEHITTÄMINEN
Diplomityö

Tarkastaja: professori Minna Lanz,
tohtorikoulutettava Hasse Nylund
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 9. marraskuuta
2016

TIIVISTELMÄ

KUISMA KOIVUSALO: Kokoonpanotehtaan materiaalivirtojen analysointi ja kehittäminen

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 109 sivua, 19 liitesivua

Helmikuu 2017

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tuotantotekniikka- ja automaatio

Tarkastajat: professori Minna Lanz, tohtorikoulutettava Hasse Nylund

Avainsanat: materiaalivirrat, tuotannonohjaus, simulointi, lean, prosessi, kehitys

Tässä diplomityössä tutkittiin hydraulikkaletkuasennelmia valmistavan kokoonpanotehtaan materiaalivirtauksien kehittämistä. Tavoitteena työssä oli etsiä keinoja tuotannon läpimenoaikojen ja varastotasojen alentamiseksi.

Ongelmien ratkaisemiseen käytettyjä tutkimusmenetelmiä olivat tuotantojärjestelmään perehtyminen, normaaliaikatutkimus, simulointitutkimus, arvovirta-analyysi sekä avoin kyselytutkimus. Lisäksi tutkimuksen aikana tutustuttiin aiempaan kirjalliseen materiaaliin ja tieteellisiin tutkimuksiin, jotka käsittelevät tutkimuksen aihepiiriin kuuluvia teemoja. Käytettyjen tutkimusmenetelmien havaittiin soveltuvan hyvin tutkimusongelmien ratkaisemiseen.

Tutkimus aloitettiin tutustumalla nykyiseen tuotantojärjestelmään käytännön tasolla osallistumalla kohdeyrityksen päivittäiseen toimintaan tuotannossa. Tutustumisen jälkeen toteutettiin normaaliaikatutkimus, jonka onnistuminen ei aivan täysin vastannut odotuksia. Kohdeyritykseen tutustumisen ja normaaliaikatutkimuksen avulla kerättiin materiaalia simulointitutkimusta ja arvovirta-analyysiä varten.

Arvovirta-analyysin, simulointitutkimuksen sekä kirjallisuustutkimuksen avulla etsittiin ja löydettiin nykyisestä tuotantojärjestelmästä useita parannuskohteita, joihin työssä esitetään ratkaisuja. Ensimmäisenä parannusehdotuksena esitettiin tuotannon ohjaustavan ja layoutin muuttamista. Toisena parannusehdotuksena esitettiin tuotannon eräkokojen pienentäminen, jotta tarve tuotteiden valmistamiseen varastoon vähenee. Kolmantena ja neljäntenä parannusehdotuksena esitettiin tuotantoautomaation implementointia tuotantojärjestelmään.

Kaikkien neljän parannusehdotuksen hyötyjä ja toteutettavuutta arvioitiin simulointitutkimuksen avulla. Simulointien tulokset olivat kauttaaltaan positiivisia. Muutosten avulla tuotannon läpimenoaikaa ja varastotasojen voitiin vähentää 50 %:lla nykyisistä.

ABSTRACT

KUISMA KOIVUSALO: Material Flow Analysis and Development of an Assembly Plant

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 109 pages, 19 Appendix pages

February 2017

Master's Degree Programme in Machine Engineering

Major: Production engineering and automation

Examiners: Associate Professor Minna Lanz, Doctoral Student Hasse Nylund

Keywords: material flow, manufacturing control, discrete event simulation, lean, process, development

The subject of this Master's thesis was to study the developing of material flow in assembly plant. The main objective of this thesis was to find a way to reduce the lead times and inventory levels of the production.

Research methods that were used to solve the research questions were familiarization with the production system, work study, simulation study, value stream mapping and open survey. In addition, the study explored earlier written material and scientific researches in the fields falling within the subject matter of the thesis. The research methods that were used were found to fit well for solving the research problems.

The study was started by familiarizing with the current production system at practical level by taking part to the daily activities in the target company's production facility. After the familiarization with the system, the work study was conducted. The success of the work study didn't quite fully meet the expectations of the study. Familiarization with the system and the work study were used to collect material for the simulation study and for the value stream mapping.

Value stream mapping, simulation study and literature research were used to search targets for improvement. Several targets were found in the study. The changing of the production control method and layout of the production was presented as the first improvement proposal. The reducing of the lot sizes of the production was presented as the second improvement proposal. The main goal of reducing the lot sizes was to decrease the need for making products to storage. The implementation of the production automation was presented to the production system as the third and fourth improvement proposal.

The benefits and the feasibility of all four development suggestions were analyzed using simulations. The results of the simulation study were positive throughout. By conducting the proposed changes to the production system, the lead times and the inventory levels of the production could be reduced by 50 % compared with the current state.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Parker Hannifin Oy:lle yrityksen tarpeesta ja halukkuudesta kehittää toimintaansa. Haluan kiittää yrityksen puolesta työhön osallistuneita henkilöitä: ohjaajaani Riitta Nykästä sekä tehdaspäällikkö Keijo Kilposta. Osoitan kiitokseni myös muille yrityksen palveluksessa työskenteleville, jotka olivat suurena apuna tämän työn valmistumisessa.

Haluan osoittaa kiitokset lisäksi toiselle työni ohjaajalle Hasse Nylundille sekä työn tarkastajalle Minna Lanzille, jotka molemmat ovat tarjonneet suuren avun työn eteenpäin viemiseen.

Eriyiset kiitokset haluan osoittaa avopuolisolleni Saanalle, suloiselle Alpi-koiralle sekä perheelleni saamastani tuesta ja avusta. Ilman teitä olisin tuskin jaksanut edetä työn kanssa yhtä tarmokkaasti. Haluan osoittaa lämpimät kiitokseni myös kaikille ystäväilleni.

”Luulitpa pystyväsi tai luulitpa epäonnistuvasi, olet oikeassa.”

- *Henry Ford*

Tampereella, 20.1.2017

Kuisma Koivusalo

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tavoitteet ja rajaukset	1
1.2	Tutkimusstrategiat ja -menetelmät	2
1.3	Aineisto	3
1.4	Työn rakenne	3
2.	TUOTANTON KEHITTÄMISEN KESKEISIMMÄT PERIAATTEET	4
2.1	Lean-periaatteet tuotantojärjestelmien kehittämisessä.....	5
2.1.1	Kokoonpanotuotannon kehittämisen tavoitteita	5
2.1.2	Käytännön keinoja tavoitteiden saavuttamiseksi	7
2.1.3	Arvovirtojen analysoiminen	8
2.2	Kokoonpanotuotannon tehdas- ja layout-suunnittelu	8
2.2.1	Tarpeita layout-muutoksille	9
2.2.2	Suunnitteluprosessi	10
2.2.3	Layout-vaihtoehtojen valintakriteereitä.....	11
2.2.4	Yleisimpiä layout-vaihtoehtoja kappaletavaratuotannolle.....	12
2.3	Tuotannon suunnittelu- ja ohjausperiaatteet	17
2.3.1	Tuotannosuunnittelu	18
2.3.2	Tuotannonohjaus.....	19
2.3.3	Ohjausmenetelmien valintakriteerit.....	26
2.4	Tuotantoautomaatio kokoonpanotuotannossa.....	28
2.5	Muutosten hallittu toteuttaminen tuotantoympäristöissä	30
3.	TUOTANTOJÄRJESTELMIEN ANALYSOINTI JA KEHITTÄMIEN SIMULOIMALLA.....	32
3.1	Prosessien simuloimisen lähtökohtia	33
3.2	Simulointiprosessin läpivienti.....	33
3.2.1	Ongelman määrittely ja tavoitteiden asettaminen.....	34
3.2.2	Tiedonkeruu ja konseptimallin luominen	35
3.2.3	Simulointimallin rakentaminen, verifiointi ja validointi	35
3.2.4	Testien suunnittelu, tekeminen ja analysointi.....	36
3.2.5	Dokumentointi ja simuloinnin tulosten esittäminen	36
3.3	Aineiston keruun menetelmiä	37
3.3.1	Standardoidut työnvaiheiden kestot.....	37
3.3.2	Työn mittaaminen	38
3.3.3	Normaaliaikatutkimus.....	39
3.4	Tapahtumapohjainen simulointi.....	42
3.5	Simuloinnin käyttäminen lean-menetelmien hyötyjen arvioinnissa	44
4.	TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO	45
4.1	Kirjallisuuskatsaus	45
4.2	Perehtyminen yrityksen päivittäiseen toimintaan	46
4.3	Kyselytutkimus	46

4.4	Simulointitutkimus.....	47
4.4.1	Simulointi käyttäen Plant Simulation -ohjelmistoa	48
4.4.2	Tiedonkeruu ja konseptimallin luonti	50
4.4.3	Työvaiheaikojen keruu	50
4.4.4	Suunnittelutuotteiston valinta	54
4.4.5	Arvovirta-analyysi	55
4.4.6	Konseptimallin luominen.....	56
4.5	Tulosten analysointi	56
5.	KOHDEYRITYKSEN LÄHTÖTILANNE	58
5.1	Valmistettavat hydraulikkaletkuasennelmat	58
5.2	Nykyisen tuotantoprosessin kuvaus	60
5.2.1	Saapuneen tavaran vastaanotto ja hyllytys	64
5.2.2	Materiaalin keräily ja toimitus tuotantosoluille	65
5.2.3	Letkuasennelmien valmistus tuotantosoluilla.....	67
5.2.4	Asennelmien keräily tuotantosoluilta välivarastoon ja lähetettäville kuormalavoille	71
5.2.5	Asennelmasarjojen keräily varastosta.....	72
5.3	Nykytilan simulointitutkimus	73
5.3.1	Nykytilan simulointimallin esittely	73
5.3.2	Nykytilan simulointitutkimuksen tulosten esittely	76
5.3.3	Simulointimallin validointi	81
6.	TUOTANTOPROSESSIN KEHITTÄMINEN	82
6.1	Prosessien arvovirtojen analysoiminen ja kehittäminen	82
6.1.1	Tuotannon ohjaustavan muuttaminen	83
6.1.2	Tulevaisuudentilan materiaalivirrat	84
6.1.3	Asennelmien valmistuksen kehittäminen	86
6.2	Ratkaisuvaihtoehtojen analysointi simuloimalla	87
6.2.1	Skenaario 1: layout-muutos	87
6.2.2	Skenaario 2: pienempi taloudellinen tuotantoeräkkö.....	93
6.2.3	Skenaario 3: materiaalinkuljetuksen automatisointi.....	93
6.2.4	Skenaario 4: automaattiosolu.....	95
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOKEHITYSEHDOTUKSET	99
8.	YHTEENVETO	102

LIITE A: ARVOVIRTA-ANALYYSIN TULOKSET

LIITE B: KYSELYTUOKSIMUKSESSA KÄYTETTY KYSELYLOMAKE

LIITE C: SIMULOINTIPROJEKTIN KONSEPTIMALLI

LIITE D: TYÖAIKOJEN MITTAUKSISSA KÄYTETYT LOMAKKEET

LIITE E: ELPYMISAJAT

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Tilaus-toimitusketjun kuvaus ja tutkimuksen aihepiiri.</i>	2
Kuva 2.	<i>Kiinteän sijainnin layout.</i>	12
Kuva 3.	<i>Funktionaalinen tuotantolinjasto.</i>	13
Kuva 4.	<i>Tuotantolinjasto.</i>	14
Kuva 5.	<i>Solulayout.</i>	15
Kuva 6.	<i>Tuotantosolujen ja funktionaalisen layoutin yhdistelmä.</i>	16
Kuva 7.	<i>Tuotantolinjaston ja funktionaalisen linjaston yhdistelmä.</i>	16
Kuva 8.	<i>Tilauksen kytkeytymispiste. (Perustuu lähteeseen Olhager 2003).</i>	17
Kuva 9.	<i>Tuotantoprosessi tilaus- ja varasto-ohjautuvilla tuotteilla.</i>	19
Kuva 10.	<i>Tilausten yhdisteleminen ja eritteleminen. (Perustuu lähteeseen Lödding 2013, s. 141)</i>	20
Kuva 11.	<i>Tilauspisteohjaus. (Perustuu lähteeseen Lödding 2013, s. 154)</i>	22
Kuva 12.	<i>Ennusteiden käyttö tilauspiste-mallissa. (Perustuu lähteeseen Lödding 2013, s. 218)</i>	24
Kuva 13.	<i>CONWIP, työntöohjaus ja imuohjaus. (Perustuu lähteeseen Hopp & Spearman 2000, s. 351)</i>	26
Kuva 14.	<i>Simulointiprojektin vaiheiden läpivienti. (Perustuu lähteeseen Law 2005)</i>	34
Kuva 15.	<i>Kuvaus oppimiskäyrän vaikutuksesta työntekijän tehokkuuteen. (Perustuu lähteeseen Aft 2015)</i>	37
Kuva 16.	<i>Tapahtumapohjainen simulointi. (Perustuu lähteeseen Law & Kelton 2000, s. 9)</i>	43
Kuva 17.	<i>Siemens Tecnomatix Plant Simulation –ohjelmiston käyttöliittymä.</i>	49
Kuva 18.	<i>Normaaliaikatutkimuksessa käytetty mittauspöytäkirja.</i>	51
Kuva 19.	<i>Lasketut työerien kestot ja niiden luottamusvälit.</i>	52
Kuva 20.	<i>Valmistettavia hydraulikkaletkuasennelmia. (Parker 2015)</i>	58
Kuva 21.	<i>Tehtaan tuotantoprosessi.</i>	61
Kuva 22.	<i>Tilaus-toimitusprosessi tilausohjautuvassa tuotannossa.</i>	61
Kuva 23.	<i>Tilaus-toimitusprosessi varasto-ohjautuvassa tuotannossa.</i>	62
Kuva 24.	<i>Tehtaan nykyiset materiaalivirrat.</i>	63
Kuva 25.	<i>Työajan jakautuminen liittimien hyllyttämisessä.</i>	64
Kuva 26.	<i>Työajan jakautuminen letkujen hyllyttämisessä.</i>	65
Kuva 27.	<i>Työajan jakautuminen liittinten, tarrojen ja työmääräimien toimittamisessa tuotantosoluille.</i>	66
Kuva 28.	<i>Työajan jakautuminen letkujen toimittamisessa tuotantosoluille.</i> ..	67
Kuva 29.	<i>Valmistuneen tuotannon väliset erot ERP:n ja tuotannosta manuaalisesti kerätyn tiedon välillä.</i>	68
Kuva 30.	<i>Asiakkaille lähetettyjen asennelmien määrät ja tuotevariaatiot.</i> ...	69
Kuva 31.	<i>Valmistettujen asennelmien määrät ja tuotevariaatiot.</i>	69

Kuva 32.	<i>Asennelmien valmistuksen työn vaiheistus.....</i>	<i>70</i>
Kuva 33.	<i>Työajan jakautuminen letkuasennelmien valmistuksessa tuotantosoluilla.....</i>	<i>70</i>
Kuva 34.	<i>Työajan jakautuminen asennelmien keräilyssä soluilta.....</i>	<i>71</i>
Kuva 35.	<i>Työajan jakautuminen asennelmasarjojen keräämisessä varastosta.....</i>	<i>72</i>
Kuva 36.	<i>Nykytilan simulointimallin tuotantolinjasto.....</i>	<i>74</i>
Kuva 37.	<i>Tuotantosolut 1 (vas.) ja 10 (oik.) nykytilan simulointimallissa... </i>	<i>75</i>
Kuva 38.	<i>Varasto-ohjautuvan (vas.) ja tilausohjautuvan (oik.) tuotannon loppukokoonpano nykytilan simulointimallissa.....</i>	<i>75</i>
Kuva 39.	<i>Kuukauden tuotantomäärä nykytilan simulointimallissa.....</i>	<i>77</i>
Kuva 40.	<i>Päivittäinen tuotantomäärä nykytilan simulointimallissa.....</i>	<i>77</i>
Kuva 41.	<i>Kuukauden lähetetty tuotanto nykytilan simulointimallissa.....</i>	<i>78</i>
Kuva 42.	<i>Varastotasot nykytilan mallissa.....</i>	<i>79</i>
Kuva 43.	<i>Avoimet tuotantotilaukset soluilla nykytilan simulointimallissa....</i>	<i>79</i>
Kuva 44.	<i>Keskeneräisen tuotannon määrä nykytilan simulointimallissa.....</i>	<i>80</i>
Kuva 45.	<i>Tuotannon läpimenoajat nykytilan simulointimallissa.....</i>	<i>80</i>
Kuva 46.	<i>Mukautettu CONWIP-ohjaus. (Perustuu lähteeseen Lödding 2013, s. 336).....</i>	<i>83</i>
Kuva 47.	<i>Tulevaisuudentilan tuotannon layout.....</i>	<i>85</i>
Kuva 48.	<i>Valmistuotevarasto ja loppukokoonpanolinja.....</i>	<i>86</i>
Kuva 49.	<i>Skenaario 1:n ja 2:n simulointimallien tuotantolinjasto.....</i>	<i>88</i>
Kuva 50.	<i>Kuukauden tuotantomäärä skenaario 1:n simulointimallissa.....</i>	<i>89</i>
Kuva 51.	<i>Kuukauden lähetetty tuotanto skenaario 1:n simulointimallissa... </i>	<i>89</i>
Kuva 52.	<i>Varastotasot skenaario 1:n simulointimallissa.....</i>	<i>90</i>
Kuva 53.	<i>Avoimet tuotantotilaukset soluilla skenaario 1:n simulointimallissa.....</i>	<i>91</i>
Kuva 54.	<i>Keskeneräisen tuotannon määrä skenaario 1:n simulointimallissa.....</i>	<i>91</i>
Kuva 55.	<i>Tuotannon läpimenoaika skenaario 1:n simulointimallissa.....</i>	<i>92</i>
Kuva 56.	<i>Eräkoon vaikutus tuotannon asetusaikeisiin.....</i>	<i>93</i>
Kuva 57.	<i>Skenaario 3:n ja 4:n simulointimallien tuotantolinjasto.....</i>	<i>94</i>
Kuva 58.	<i>Kuukauden tuotantomäärä skenaario 4:n simulointimallissa.....</i>	<i>95</i>
Kuva 59.	<i>Päivittäinen tuotantomäärä skenaario 4:n simulointimallissa.....</i>	<i>96</i>
Kuva 60.	<i>Kuukauden lähetetty tuotanto skenaario 4:n simulointimallissa... </i>	<i>96</i>
Kuva 61.	<i>Varastotasot skenaario 4:n simulointimallissa.....</i>	<i>97</i>
Kuva 62.	<i>Tuotannon läpimenoaika skenaario 4:n simulointimallissa.....</i>	<i>97</i>
Kuva 63.	<i>Varaston luokittelun käsitteellinen viitekehys. (Perustuu lähteeseen van Kampen et al. 2012).....</i>	<i>101</i>
Kuva 64.	<i>Nykytilan arvovirtakaavio tuoteryhmälle 1.....</i>	<i>110</i>
Kuva 65.	<i>Nykytilan arvovirtakaavio tuoteryhmälle 2.....</i>	<i>111</i>
Kuva 66.	<i>Nykytilan arvovirtakaavio tuoteryhmälle 3.....</i>	<i>112</i>

Kuva 67.	<i>Nykytilan arvovirtakaavio tuoteryhmälle 4.....</i>	<i>113</i>
Kuva 68.	<i>Tulevaisuudentilan arvovirtakaavio tuoteryhmälle 1.</i>	<i>114</i>
Kuva 69.	<i>Tulevaisuudentilan arvovirtakaavio tuoteryhmälle 2.</i>	<i>115</i>
Kuva 70.	<i>Nykytilan simuloinnin konseptimalli.</i>	<i>121</i>
Kuva 71.	<i>Tulevaisuudentilan simulointimallin konsepti.....</i>	<i>122</i>
Kuva 72.	<i>Simulointimallin tuotantosolu.</i>	<i>123</i>

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1.	<i>Taloudellisen toimintaympäristön aikaisemmat ja nykyiset vaatimukset. (Santos et al. 2007, s. 43).....</i>	<i>4</i>
Taulukko 2.	<i>Tuotantojärjestelmätyypit. (Hu & Ko 2015)</i>	<i>9</i>
Taulukko 3.	<i>Tuotantojärjestelmien systemaattinen suunnitteluprosessi.....</i>	<i>11</i>
Taulukko 4.	<i>Tuotantotilausten generoinnissa käytettäviä menetelmiä.</i>	<i>27</i>
Taulukko 5.	<i>Tuotantotilausten vapauttamisessa käytettäviä menetelmiä.</i>	<i>28</i>
Taulukko 6.	<i>Luottamustaso ja sitä vastaava z:n arvo. (Aft 2015).....</i>	<i>42</i>
Taulukko 7.	<i>Apuajat ja apuaikalisä.</i>	<i>53</i>
Taulukko 8.	<i>Mitattujen standardiaikojen vertailu ERP:ssä oleviin standardiaikoihin.</i>	<i>53</i>
Taulukko 9.	<i>Työntutkimuksen tuloksia tuotannon muutosten jälkeen.....</i>	<i>54</i>
Taulukko 10.	<i>Tuoteperhematriisi.</i>	<i>55</i>
Taulukko 11.	<i>Hydrauliikkaletkujen pituustoleranssit. (SFS-EN 854 2015).....</i>	<i>59</i>
Taulukko 12.	<i>Tuotannon läpimenoajat nykytilan simulointimallissa.</i>	<i>81</i>
Taulukko 13.	<i>Tuotannon läpimenoajat skenaario 1:n simulointimallissa.</i>	<i>92</i>
Taulukko 14.	<i>Tuotannon läpimenoajat skenaario 4:n simulointimallissa.</i>	<i>98</i>
Taulukko 15.	<i>Simulointitutkimuksen tulokset.....</i>	<i>99</i>
Taulukko 16.	<i>Ratkaisuehdotusten arviointi ja yhteenveto.....</i>	<i>102</i>
Taulukko 17.	<i>Kyselytutkimuksessa käytetyt kysymykset. (Perustuu lähteeseen Järvenpää et al. 2014).....</i>	<i>116</i>
Taulukko 18.	<i>Liittimien hyllyttäminen.....</i>	<i>124</i>
Taulukko 19.	<i>Letkujen hyllyttäminen</i>	<i>124</i>
Taulukko 20.	<i>Komponenttien keräileminen soluille.....</i>	<i>125</i>
Taulukko 21.	<i>Letkuasennelmien keräily soluilta.....</i>	<i>125</i>
Taulukko 22.	<i>Kokoonpanoaikojen mittaust.</i>	<i>126</i>
Taulukko 23.	<i>Letkuasennelmasarjojen keräily.....</i>	<i>126</i>
Taulukko 24.	<i>Elpymisajat fyysisestä (määritelmä A) ja henkisestä (määritelmä B) kuormituksesta. (Perustuu lähteeseen EK-SAK tuottavuustyöryhmä 2011).....</i>	<i>127</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AT	Asiakastilaus
CONWIP	engl. Constant Work in Process, jatkuvan tuotannon ylläpitäminen
CORMA	engl. Capacity Oriented Materials Management, kapasiteettiperusteinen materiaalinhallinta
CSF	engl. Critical Success Factor, kriittiset menestystekijät
CT	engl. Cycle Time, työnvaiheen tekemiseen kuluva aika, työnvaihe-aika
DES	engl. Discrete Event Simulation, tapahtumapohjainen simulointi
ERP	engl. Enterprise Resource Planning, tuotannonohjausjärjestelmä
Gantt-kaavio	Tehtävien aloitusajankohtien sekä niiden kestojen esittämisessä käytetty janakaaviotyyppi
KET	Keskeneräisen tuotannon määrä
KIT	Varasto-ohjautuvasti valmistettava tuotanto
Lean	Johtamisfilosofia, joka tähtää tuotteeseen arvoa tuottamattoman työn karsimiseen
Layout	Tuotantotilan työpisteiden ja resurssien fyysinen sijoittelu
LT	engl. Lead Time, tuotteen valmistuksen aloittamisesta sen valmistamiseen kuluva aika, läpimenoaika
MTO	engl. Make to Stock, tilauksesta valmistaminen
Tahtiaika	Työnvaiheen suorittamiseen kuluva aika
Takt-aika	Aika, jonka työnvaiheen suorittaminen saa enimmillään viedä
TKP	Tilauksen kytkeytymispiste
TPS	engl. Toyota Production System, Toyotan valmistusjärjestelmä
VSM	engl. Value Stream Mapping, arvovirta-analyysi
<i>DPS</i>	tilauksen suunniteltu aloitusajankohta [työpäivä]
<i>k</i>	tarkkuus [%]
<i>k_j</i>	keskijoutuisuus
<i>k_{jm}</i>	yksittäinen joutuisuuskerroin
<i>l_a</i>	apuaikaprosentti [%]
<i>m</i>	keskijoutuisuushavaintojen lukumäärä [kpl]
<i>n</i>	mittaussykkien lukumäärä [kpl]
<i>RDMD_m</i>	keskimääräinen kysyntänopeus [kpl/työpäivä]
<i>s</i>	mittaustulosten keskihajonta
<i>SL</i>	varastotaso [kpl]
<i>SO_{open}</i>	avoimet tuotantotilaukset [kpl]
<i>SOP</i>	tilauspiste [kpl]
<i>T</i>	työarvo [min]
<i>t</i>	päivittäinen kokonaistyöaika [min]
<i>t_a</i>	päivittäinen apuaika [min]
<i>t_{aset}</i>	työeräkohtainen asetus aika [min]
<i>t_E</i>	elpymisaika [min]
<i>n_{erä}</i>	valmistettavan tuotantoerän suuruus [kpl]
<i>t_N</i>	työn normaaliarvo [min]
<i>t_n</i>	yksittäinen aikahavainto [min]
<i>TPL_o</i>	suunnittelun ajanhetki [työpäivä]
<i>t_{pv}</i>	päivävakio [min]

t_v	valittu aika [min]
x	yksittäinen mittaustulos
\bar{x}	mittaustulosten keskiarvo
z	standardoitu taulukkoarvo

1. JOHDANTO

Kohdeyritys valmistaa hydraulikkaletkuasennelmia ja niistä koottuja asennelmasarjoja asiakkaidensa vaativiin tarpeisiin. Korkean vaatimustason lisäksi tuotteiden asiakasräätälöintiaste on hyvin korkea ja yritys tarjoaakin tuotevalikoimassaan monia erilaisia letkuja ja liitinvaihtoehtoja, jotka soveltuvat useaan eri käyttötarkoitukseen. Asiakas voi valita tilaamiensa letkujen pituudet, sisähalkaisijat sekä liittimet, minkä lisäksi yrityksellä on tarjota muutamia erilaisia letkunsuojia. Letkuasennelmia ja -sarjoja toimitetaan nopeimmillaan muutaman päivän toimitusajoilla asiakkaille eri puolille Suomea, Ruotsia ja Viroa, mikä asettaa tiukat tavoitteet toimitusketjun täsmällisyydelle erityisesti asennelmien kokoonpanoprosessin osalta.

1.1 Tavoitteet ja rajaukset

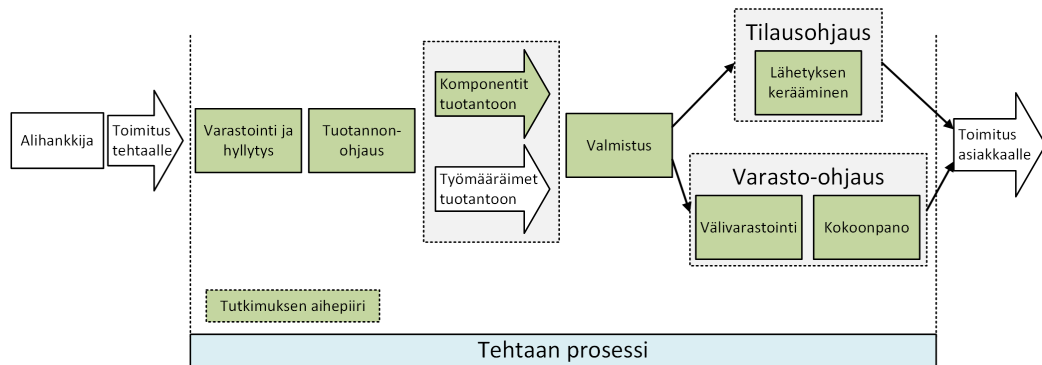
Tässä diplomityössä pyrkimyksenä on parantaa tarkasteltavan prosessin kustannustehokkuutta tehtaan materiaalivirtauksia analysoimalla ja kehittämällä. Tutkimusta selkeyttämään ja tutkimuksen aihepiiriä kuvaamaan on asetettu tutkimuskysymyksiä. Tutkimuskysymykset toimivat samalla tämän työn tutkimusongelmina. Tutkimusongelmien ratkaisua varten tutkimuksessa käytetään alalla vakiintuneita tutkimusstrategioita ja -menetelmiä. Tässä työssä vastataan seuraaviin kysymyksiin:

- Mitä muutoksia tarvitsee tehdä, jotta tuotannon läpimenoaikaa voidaan lyhentää?
- Mitä muutoksia tarvitsee tehdä, jotta tuotannon varastosaldojen määrää voidaan vähentää?

Läpimenoajalla ja varastojen määrällä on yrityksen näkökulmasta merkittävä vaikutus tuotannon kokonaistehokkuuteen. Läpimenoajan lyhentämiselle on annettu numeeriseksi tavoitteeksi 30 % nykyisestä läpimenoajasta. Tärkeintä läpimenoajan lyhentämisessä on kuitenkin varastointitarpeen vähentäminen noin 20 %:iin päivittäisen tuotannon määrästä.

Työlle määritettyjen tavoitteiden täyttämiseksi tuotantoprosessia tulee parantaa siten, että arvoa tuottavien työvaiheiden osuus tuotannon kokonaisläpimenoajoista saadaan mahdollisimman suureksi. Työvoiman sijoittuminen tuotannossa tulee täten keskittää arvoa tuottavaan työhön, minkä seurauksena myös materiaalien tarpeeton kuljettaminen ja käsittely vähenevät. Tavoitteiden saavuttamiseksi myös varastointia kehitetään ja tuotteiden tarpeeton varastointi poistetaan.

Tutkimuksen tavoitteisiin pääsemiseksi on tarpeen ottaa huomioon myös inhimillisiä ja prosessin ohjaustarpeeseen vaikuttavia tekijöitä. Inhimillisten tekijöiden osalta merkittävimpänä on muutosvastarinnan välttäminen. Prosessin ohjaustarpeen suhteen on huomattavaa, että ohjauksen tarve muutosten toteutuksen jälkeen pysyisi samana tai mielellään jopa vähenisi.



Kuva 1. Tilaus-toimitusketjun kuvaus ja tutkimuksen aihepiiri.

Koska tutkimus on aihepiiriltään laaja, jää yksittäisiin prosesseihin ja työvaiheisiin perehtyminen pintapuoliseksi. Tutkimuksessa perehdytään kokoonpanotehtaan toimintaan kokonaisuutena ja esitettävät ratkaisut keskittyvät koko tehtaaseen yksittäisten toimintojen sijasta. Tutkimuksen aihepiiri on esitetty kuvassa 1.

1.2 Tutkimusstrategiat ja -menetelmät

Tutkimuksen laaja-alaisuuden vuoksi tutkimuksen toteuttamisessa joudutaan käyttämään useampaa kuin yhtä tutkimusstrategiaa. Tutkimuksen teoreettinen osuus koostuu kirjallisuuskatsauksesta, jossa käsitellään tutkimuksen keskeistä teoria-aineistoa. Tutkimuskohteen nykytilan selvittämiseen ja sen arvioimiseen käytetään strategioina empiiristä, määrällistä ja laadullista tutkimusta.

Tutkimusstrategioiden perusteella tutkimukseen valittiin soveltuvia tutkimusmenetelmiä. Käytännön tutkimusmenetelmät tässä tutkimuksessa ovat:

- tuotantojärjestelmään perehtyminen
- normaaliaikatutkimus
- simulointitutkimus
- arvovirta-analyysi
- avoin kyselytutkimus.

Käytetyistä tutkimusmenetelmistä tässä tutkimuksessa painottuvat tuotantoon perehtyminen, normaaliaikatutkimus sekä simulointitutkimus. Useita näistä tutkimusmenetelmistä käytetään aineiston keruuseen tutkimuskohteesta.

1.3 Aineisto

Tutkimuksessa käytettävä aineisto koostuu kirjallisuusaineistosta, kohdeyrityksen toimittamasta aineistosta sekä tutkimusta varten kerätystä aineistosta. Kirjallisuuskatsauksessa käytettävä aineisto koostuu Tampereen teknillisen yliopiston kirjaston, Kone- ja tuotantotekniikan laitoksen kirjaston ja kirjaston verkkojulkaisujen tarjoamista teoksista. Lisäksi jotkin käytetyistä teoksista löytyivät avoimina verkkomateriaaleina. Kirjallisuuskatsauksen aineistoa kerätessä on pyritty varmistamaan lähdeostosten luotettavuus ja niissä esitetyn tiedon tieteellinen oikeellisuus.

Tutkimuskohteesta kerättiin aineistoa empiirisen tutkimuksen, laadullisen tutkimuksen ja normaaliaikatutkimuksen avulla. Empiirisessä tutkimuksessa tutkimusympäristöä havainnoitiin osallistumalla viikon ajan yrityksen päivittäiseen toimintaan, minkä avulla kartoitettiin tutkimuskohteen nykytilaa. Empiiristä tutkimusta täydentämään toteutettiin lisäksi laadullinen tutkimus, joka muodostui yrityksessä tehdystä avoimesta kyselytutkimuksesta. Normaaliaikatutkimuksen avulla selvitettiin simulointitutkimuksen ja yritykseen esitettävien kehittämistarpeiden kannalta tärkeitä tietoja prosessin eri vaiheiden kes- toista.

1.4 Työn rakenne

Luvuissa 2, 3 ja 4 käsitellään tutkimuksen teoreettiset lähtökohdat. Luvussa 2 perehdytään lean-valmistuksen keskeisiin periaatteisiin kokoonpanotuotannon kehittämisessä, kokoonpanotuotannon layout-suunnitteluun sekä tuotannon ohjausperiaatteisiin. Samassa luvussa käsitellään myös pintapuolisesti tuotantoautomaation mahdollisuuksia ja muutosten toteuttamista tuotantoympäristöissä. Luvussa 3 perehdytään tuotantojärjestelmien simulointiin simulointiprojektin läpiviennistä siihen tarvittavan aineiston keräämiseen. Luvussa 3 käsitellään myös lyhyesti tapahtumapohjaisen simuloinnin teoriaa sekä lean-periaatteiden ja simuloinnin yhdistämistä tuotantojärjestelmien kehitysprojekteissa. Luvussa 4 käsitellään tutkimuksessa käytetyt tutkimusmenetelmät ja tutkimusta varten kerätty aineisto.

Luvut 5, 6, ja 7 muodostavat tutkimuksen empiirisen osion. Luvussa 5 esitellään tarkemmin kohdeyrityksen toimintaa sekä käydään läpi nykytilan simulointitutkimuksen toteuttaminen ja sen tuottamat tulokset. Luvussa 6 esitetään tutkimuskohteesta löydettyjä parannuskohteita ja ratkaisuja ongelmien poistamiseksi. Luvussa 7 on esitetty tutkimuksen tuloksista tehdyt johtopäätökset ja jatkokehitysehdotukset.

2. TUOTANTON KEHITTÄMISEN KESKEISIMMÄT PERIAATTEET

Henry Ford kehitti ensimmäisen tuotantolinjaston Yhdysvalloissa 1910-luvulla ja mullisti T-mallin valmistuksen kustannustehokkuuden. Linjastolla autot liikkuvat kiskoja pitkin työpisteeltä toiselle köyden välityksellä. Verrattuna aikaisempaan tuotantomalliin, jossa autot pysyivät paikallaan, yhden auton valmistukseen kuluva aika saatiin pudotettua 13 tunnista 6 tuntiin. Muutos valmistusajoissa oli merkittävä ja täten mahdollisti T-mallin tuotantomäärien huomattavan kasvun. Kasvaneelle tuotantokapasiteetille oli myös tarvetta, koska T-mallin hinnan laskiessa yhä useampi pystyi ostamaan oman auton. Autojen valmistuksessa käytettyä perinteistä massatuotantoa kuvasi kuitenkin tuotteiden huono asiakasräätälöityvyys: autojensa väriksi Ford oli valinnut mustan, koska sen kuivumisaika oli kaikista pienin. (Santos et al. 2007, s. 39–40) Kului 12 vuotta ennen kuin T-mallia alkoi saada myös muun värisenä (McCalley 1994).

Kun Ford menestyi markkinoilla 1950-luvulla, Toyota oli käynyt vuonna 1949 lähellä konkurssia (Santos et al. 2007, s. 5). Korjatakseen tilanteen Toyota päätti ottaa käyttöön useita Fordin aikanaan kehittämiä tuotantoperiaatteita. Japanilaiset eivät kuitenkaan läheneet kopioimaan näitä periaatteita suoraan vaan toivat omat kulttuurilliset erityispiirteensä mukaan tuotantoperiaatteidensa suunnitteluun ja käyttöönottoon. Tärkeimpiä kulttuurista periytyviä tekijöitä, jotka otettiin huomioon Toyotan uudessa tuotantofilosofiassa, olivat työntekijöiden osallistaminen ja systemaattisuus sekä jatkuva parantaminen. Nykyään Toyotan valmistusjärjestelmää (TPS, Toyota production system), joka kehittyi edelleen jatkuvien parannusten seurauksena, käytetään esimerkkinä muita tuotantojärjestelmiä kehitettäessä. Toyotan tuotantofilosofian pohjalta kehitetyssä lean-ajattelussa tämä jatkuvan parantamisen periaate on avainasemassa. (Santos et al. 2007)

Taulukko 1. Taloudellisen toimintaympäristön aikaisemmat ja nykyiset vaatimukset. (Santos et al. 2007, s. 43)

	Aikaisemmat vaatimukset	Nykyiset vaatimukset
Tuote	Pieni valikoima	Laaja valikoima
Toimitusaika	Matalat vaatimukset	Tiukat vaatimukset
Eräkoko	Suuri	Pieni
Läpimenoaika	Pitkä	Lyhyt
Tuotteen elinkaari	Pitkä	Lyhyt

Yrityksen oman tarpeen lisäksi myös ulkopuolelta tuleva tarve edellyttää organisaatiota muuttumaan ja kehittämään toimintaansa. Santosin et al. (2007, s. 43–44) mukaan asia-

kastarpeet ja vaatimukset ovat muuttuneet merkittävästi kuluneiden vuosikymmenten aikana. Tuotantojärjestelmien tehokkuutta on jouduttu parantamaan, jotta kasvavaan asiakasräätelöityvyyteen on kyetty. Hun & Kon (2015) mukaan tuotteiden massaräätelöinti nousi voimakkaaksi trendiksi 1980-luvulla, kun asiakkaat halusivat yksilöllisiä tuotteita massatuotettujen tuotteiden hinnalla. Uusimpana trendinä tuotteiden valmistuksessa ja suunnittelussa on heidän mukaansa personoitu tuotanto: asiakas osallistuu tuotteen määrittämiseen ja spesifiointiin aikaisempaa enemmän. Taulukossa 1 on esitetty asiakastarpeiden ja taloudellisen toimintaympäristön aikaisemmat ja nykyiset vaatimukset.

2.1 Lean-periaatteet tuotantojärjestelmien kehittämisessä

Toyota onnistui 1980-luvulla kääntämään tuotantojärjestelmänsä (TPS) tehokkuuden vahvaan nousuun omaksumalla joitain yhdysvaltalaisen ajoneuvoteollisuuden parhaimpia käytäntöjä sekä ottamalla japanilaisen työskulttuurin vahvuudet osaksi päivittäistä toimintaa (Santos et al. 2007). Toyotan tuotantojärjestelmän perustana ovat Wilsonin (2015) mukaan hukun (*muda*) eliminointi, prosessien ja tuotteiden laadun kehittäminen (*jidoka*) sekä jatkuva parantaminen (*kaizen*). Kaikkien edellä mainittujen periaatteiden onnistunut hyödyntäminen edellyttää suotuisaa yrityskulttuuria. Hyviä käytäntöjä ja tapoja tulee ylläpitää ja kehittää määrätietoisesti, jotta kehittämistoimien aikana saavutetut parannukset toimintaan vakiintuvat.

Suuri harhaluulo monelle yritykselle lean-toimintaan siirtymisessä on Wilsonin (2015, luku 2) mukaan lyhytaikaisten taloudellisten etujen tavoittelu. Lean-toiminnassa kyse ei kuitenkaan ole lyhytaikaisesta kustannustensäästöohjelmasta, vaan tavoitteena on jatkuva organisaation kehittäminen. Uudistusten toteuttaminen yrityksessä on mahdollista vain, jos koko organisaatio kykenee muuttumaan. Ymmärrys lean-periaatteista tulisikin olla jokaisella yrityksen johtavassa asemassa olevalla henkilöllä, sillä vain siten voidaan välttää hyvien strategioiden painautuminen yrityskulttuurin alle.

Menestyvä organisaatio ottaa toiminnassaan huomioon myös työntekijöiden turvallisuuden ja viihtyvyyden. Turvallisuuteen panostamalla mahdollistetaan tuotannon tavoitteiden täyttyminen: työajalla tapahtuvat äkilliset tapaturmat ja onnettomuudet usein estävät tuotannon valmistumisen aikataulun mukaisesti sekä heikentävät työntekijöiden tyytyväisyyttä ja yrityskuvaa (Averill 2011). Työntekijöiden huomioimiseen kuuluu myös heidän työpaikkojensa turvaaminen. Työntekijöiden määrän vähentämisen tavoittelemisen ei tue lean-periaatteiden mukaista toimintaa (Wilson 2015).

2.1.1 Kokoonpanotuotannon kehittämisen tavoitteita

Organisaatiolla on Wardin et al. (2015) mukaan halu ja tarve kehittää omaa toimintaansa kohti parempia prosesseja parantamalla niiden laadukkuutta, laaduntuottokykyä ja tehok-

kuutta. Kehittämisen avulla pyritään usein asiakastyytyväisyyden ja toiminnan liiketoiminnallisten edellytysten parantamiseen. Lean-valmistuksessa painopisteenä on toiminnan kehittäminen vähentämällä hukkaa ja kustannuksia sekä lyhentämällä läpimenoaikoja.

Arvoa tuottamattoman toiminnan eli hukan vähentäminen on yksi lean-toiminnan keskeisiä ajatuksia (Womack & Jones 2003; Ward et al. 2015; Wilson 2015). Tavanomaisen arvoa tuottamattoman toiminnan, esimerkiksi ylilaadun tekemisen ja materiaalien tarpeettoman siirtelyn, lisäksi hukkaa ovat liiallinen varastointi ja tarve laatupoikkeamien korjaamiselle. Kaikkea hukkaa ei kuitenkaan voida Womackin & Jonesin (2003, s. 37–38) mukaan poistaa välittömällä muutoksilla. Heidän mukaansa tuotantoon hukkaa aiheuttava toiminta voidaan jakaa kahteen kategoriaan: arvoa tuottamattomaan toimintaan, jota ei voida välittömästi poistaa tai vähentää, sekä arvoa tuottamattomaan toimintaan, joka voidaan välittömästi karsia pois.

Varastot aiheuttavat organisaatiolle Löddingin (2013, s. 33–37) mukaan kustannuksia sitomalla käytettävissä olevaa pääomaa ja lisäämällä tuotannon tilantarvetta. Wilson (2015, luku 11) mainitsee myös tuotteiden siirtelystä aiheutuvat suorat ja epäsuorat kustannukset tekijöiksi, jotka puoltavat varastotasojen alentamista. Varastoja on tyypillisesti kahdenlaisia, valmiiden tuotteiden varastoja sekä keskeneräisten tuotteiden varastoja. Varastot ovat seurausta tuotannossa tapahtuvista muutoksista ja vaihteluista, joita esiintyy jatkuvasti todellisissa teollisissa ympäristöissä. Tarve kummallekin varastotyypille on yksilöllinen. Valmiiden tuotteiden varastoa ylläpidetään myynnin varmistamisen takia, sillä yrityksen asiakastyytyväisyys riippuu osaltaan paljolti siitä, miten luvatut toimitusajat ja -määrät pitävät paikkansa. Keskeneräisen tuotannon (KET) varastoja ylläpidetään, jotta ulkoisen ja sisäisen kysynnän vaihteluiden aiheuttamat muutokset tuotantomäärissä eivät aiheuttaisi ongelmia toimitusvarmuuteen ja siten heikentäisi asiakastyytyväisyyttä. (Wilson 2015, luku 11)

Tuotannon hukatekijöiden vähentämisen lisäksi tuotannon läpimenoaikojen lyhentäminen mielletään tärkeäksi tavoitteeksi lean-valmistuksessa. Wilsonin (2015, luku 13) mukaan läpimenoaika on yksi tärkeimmistä mittareista lean-tuotannon tehokkuuden arvioimiseen, Ward et al. (2015) puolestaan esittävät mittaamiseen lähestymistapaa, jossa mittaamista tehdään koko organisaation laajuisesti ja mittarit ovat sidottuja yrityksen strategiaan tavoitteisiin.

Tuotannossa tapahtuvia muutoksia, jotka ovat seurausta lean-menetelmien käyttöönotosta, ovat Wardin et al. (2015) mukaan parantunut materiaalien virtaus sekä arvoa tuottamattomien työvaiheiden ja liiallisen varastoinnin poistuminen. Läpimenoaikojen lyhentymisen näkyy organisaatiossa parantuneena asiakastyytyväisyytenä, tuotannon joustavuuden kehittymisenä ja reagointikyvyn parantumisena (Wilson 2015, luku 13). Lisäksi tuotannon läpimenoaikojen lyhentäminen johtaa tuotantokustannusten alenemiseen ja tilausmäärien kasvuun, koska lyhyt toimitusaika on huomattava kilpailuetu (Pound et al.

2014, luku 2). Keskeneräisen tuotannon määrää vähentämällä saavutetaan tuotantoon parempi materiaalien virtaus, sillä tuotteet virtaavat tuotannon aloituksesta sen valmistumiseen ilman ylimääräisiä pysähdyksiä (Santos et al. 2006, s. 18–21). Myös laatupoikkeamien korjaaminen välittömästi, ennen viallisten tuotteiden pääsyä eteenpäin tuotannossa, on osa lean-toimintaa (Ward et al. 2015). Osana organisaation kehittymistä on myös parantunut työntekijöiden ja ympäristön huomioiminen (Averill 2011, s. 135–136).

2.1.2 Käytännön keinoja tavoitteiden saavuttamiseksi

Saavuttaakseen toiminnalle asetettuja tavoitteita yrityksen täytyy kyetä lyhentämään tuotantonsa läpimenoaikoja (Womack & Jones 2003, s. 24). Läpimenoaikaa voidaan Wilsonin (2015, luku 13) mukaan lyhentää poistamalla tuotannosta tarpeetonta odottamista ja arvoa tuottamattomia työvaiheita, lyhentämällä kaikkien työvaiheiden kestoja sekä vähentämällä tuotannosta valmistuneiden virheellisten tuotteiden määrää. Läpimenoajan käsite ja sitä kuvaava termi eivät kuitenkaan ole täysin yksiselitteisiä lean-kirjallisuudessa. Tuotannon läpimenoajalla tarkoitetaan Wilsonin (2015, luku 11) mukaan aikaa asiakastilauksen valmistamisen aloittamisesta tuotteen valmistumiseen. Womack & Jones (2003) määrittelevät tuotannon kokonaisläpimenoajan tarkoittavan aikaa, joka muodostuu asiakastilauksen saapumisen ja tuotteen valmistumisen välisestä ajasta. Wilsonin (2015) ja Womackin & Jonesin (2003) määritelmät ovat yhdenmukaisia silloin, kun tuotannon kapasiteetti ei ylitä (Wilson & Jones 2003, s. 349).

Läpimenoajan lyhentäminen, ja samalla myös varastotasojen alentaminen, edellyttää usein eräkokojen pienentämistä (Wilson 2015, luku 13; Allahverdi & Soroush 2006). Yhden kappaleen eräkokoon on ideaali tavoite, jossa tuotteita siirretään niiden yksittäisten tuotantoerien kokoisissa erissä. Hyötynä eräkokoon pienentämisestä on myös nopeampi reagointi tuotannossa oleviin ongelmiin. Laatuvirheet voidaan havaita aikaisemmin ja tuotannon tilaa voidaan seurata tarkemmin. (Santos et al., s. 20–21) Eräkokoon pienentäminen yhteen kappaleeseen ei kuitenkaan Poundin et al. (2014, luku 3) mukaan ole järkevä tavoite. Eräkokoon, ja samalla keskeneräisen tuotannon määrän, pienentäminen vähentää kyllä tuotannon läpimenoaikaa, mutta eräkokoon laskiessa optimipisteen alapuolelle kokonaistuotantomäärä laskee.

Jotta tuotannon eräkokojen pienentäminen olisi mahdollista, tulee asetusten kesto kiinnittää huomiota (Wilson 2015, luku 13). Asetusajoista johtuen tuotannon eräkokoja ei taloudellisista syistä haluta laskea niin alas kuin varastotasojen ylläpidon kannalta olisi edullista. Asetusaikoja on kuitenkin useissa tapauksissa mahdollista pienentää merkittävästi kehittämällä toimintaa ja uudelleenorganisoimalla tuotantoa. Asetusaikojen lyhentämisellä on kustannussäästöjen lisäksi huomattavia etuja tuotannon joustavuudelle, sillä ne määrittävät pienimmän mahdollisen eräkokoon niissä tapauksissa, joissa tuotannon kapasiteetti on äärimmillään. (Lödding 2013, s. 92–93)

Singh & Khanduja (2009) esittelevät artikkelissaan asetusaikojen vähentämiseen käytettävää SMED (single-minute exchange of die) -menetelmää. Menetelmässä asetusajat jaotellaan linjaston ulkopuolella ja linjastossa tapahtuviin vaiheisiin. Linjaston ulkopuolella tapahtuvien vaiheiden tulisi olla valmiina ennen asetustyön siirtymistä linjastolle, jotta asettaminen aiheuttaisi mahdollisimman vähän häiriöitä tuotantoon. Kun asetuksia tehdään linjastolla, käytettävien työmenetelmien tulee tukea työtä ja mahdollistaa sen tekeminen mahdollisimman lyhyessä ajassa. Kuten muissakin lean-toiminnan mukaisissa työtehtävissä, myös parhaat asetustyömenetelmät tulee standardoida ja niitä tulee kehittää jatkuvasti.

2.1.3 Arvovirtojen analysoiminen

Arvovirta-analyysin tavoitteena on kartoittaa materiaalin ja tiedon kulkemista sekä niiden suhdetta toisiinsa (Izumi 2015). Womackin & Jonesin (2003, s. 252–253) sekä Rotherin (2005) mukaan arvovirtakaavioiden laatiminen on ensimmäisiä toimia lean-toimintaan siirryttäessä. Arvovirta-analyysien toteuttaminen edellyttää kriittisyyttä organisaation toimintatapojen ja työmenetelmien arvioimisessa, jotta voidaan välttyä tilanteelta jossa nykyisestä toiminnasta ei kyetä löytämään parannuskohteita.

Arvovirtakaavioiden laatiminen aloitetaan nykytilasta. Nykytilan arvovirtakaavioon merkitään tuotteen valmistuksessa esiintyvät tieto- ja materiaalivirratt sekä tuotannon eri vaiheiden arvoa tuottavat vaiheet ja arvoa tuottamattomat vaiheet. Nykytilan arvovirtakaavioiden perusteella laaditaan hahmotelma tulevaisuuden arvovirtakaavioista, joihin merkitään havaitut potentiaaliset parannuskohteet. Arvovirta-analyysi toimii täten työkaluna nykyisten prosessien ongelmakohtien löytämisessä ja parannuskohteiden esittämisessä. (Izumi 2015; Womack & Jones 2003 s. 316–320) Arvovirtakaavioissa käytetään erityisiä piirrossymboleja, joita käytetään kuvaamaan tuotannon ja logistiikan eri toimintoja (Manos 2006).

2.2 Kokoonpanotuotannon tehdas- ja layout-suunnittelu

Tuotantotilojen työpisteiden ja resurssien sijoittelulla on Santosin et al. (2006, s. 18) mukaan suora vaikutus tuotannon läpimenoaikoihin ja kokonaistuotantomäärään. Tuotantotilojen fyysisen rakenteen suunnittelemisesta käytetään nimitystä layout-suunnittelu. Mutherin (1968) esittämä systemaattisen layout-suunnittelun malli määrittelee prosessinomaisen lähestymistavan tuotantotilojen layout-suunnittelulle. Systemaattisesti toteutettu layout-suunnittelu tarjoaa Mutherin (1968, s. 1-1–1-2) mukaan lukuisia etuja: suunnittelun toteuttaminen varsinaisten tuotantotilojen ulkopuolella säästää aikaa ja rahaa. Systemaattisen suunnittelun avulla voidaan myös varmistaa lopputuloksen käyttökelpoisuus.

Ennen tuotannon layout-suunnittelun aloittamista on Mutherin (1968, s. 1-1–1-2) mukaan kuitenkin tarpeen tuntea suunniteltavan tuotantotilan vaatimukset ja tulevan toiminnan keskeiset parametrit: tuotteet ja niiden tuotantomäärät. Näiden lisäksi muita tuotannon

layout-suunnittelussa tarvittavia tietoja ovat Mutherin (1968 s. 1-2-1-4) mukaan tuotteen valmistuksen vaiheistus käsittäen prosessin, sen vaiheet ja niiden järjestyksen, tuotannon tukipalvelut käsittäen ylläpidon, huollon, ensiavun ja työntekijöiden sosiaalityöt, tuotteiden ja tuotannon elinkaaret ja tuotannon toimintoihin kuluvat työajat.

Tuotantojärjestelmää ei kuitenkaan aina suunnitella valmiiksi asti määritetyille tuotteille. Hu & Ko (2015) ja Vaughn et al. (2002) esittävät, että rinnakkaisen tuotesuunnittelun ja tuotantojärjestelmän suunnittelun johdosta tuotteen spesifikaatio valmistuu usein samanaikaisesti tuotantojärjestelmän kanssa. Suunnittelu on näin ollen aloitettava ylempältä tasolta edeten yksityiskohtaisempaan suunnitelmaan tuotekehityksen edetessä.

Tuotantotilojen layout-suunnittelussa on Bangsowin (2010, s. 1) mukaan usein hyödyllistä käyttää simulointityökaluja järjestelmien suunnittelun, käyttöönoton ja operoinnin aikana. Simulointiohjelmistot tarjoavat laajan valikoiman erilaisia ominaisuuksia ja työkaluja suunnittelijan avuksi: simulointien avulla voidaan helposti ja kustannustehokkaasti vertailla eri vaihtoehtoja ja löytää olemassa olevista tuotantojärjestelmistä parannuskohteita. Tuotantojärjestelmien simulointia käsitellään tarkemmin luvussa 3.

2.2.1 Tarpeita layout-muutoksille

Asiakastarpeiden ja tuotannon toimintaympäristön muutokset aiheuttavat Santosin et al. (2006, s. 18-19) mukaan tarpeen muuttaa tuotannon layoutia. Yleisiä muutoksia toimintaympäristössä ovat tarve kustannustehokkuuden parantamiselle, tuotantokapasiteetin lisäämiselle sekä uusien tuotteiden valmistamisen aloittamiselle. Tuotantoa voidaan toisaalta joutua supistamaan, siirtämään ulkomaille tai ulkoistamaan.

Kehitys tuotantojärjestelmissä on Hun & Kon (2015) mukaan menossa kohti joustavampia ja uudelleenkonfiguroitavia järjestelmiä. Uudelleenkonfiguroitavien järjestelmien perustana ovat joustavat tuotantojärjestelmät, joihin on lisätty mahdollisuus myös fyysisten tuotantolaitteiden muutoksille. Taulukossa 2 on vertailtu eri tuotantojärjestelmätyyppejä.

Taulukko 2. Tuotantojärjestelmätyypit. (Hu & Ko 2015)

Tyyppi	Laitteisto	Ohjelmisto
Dedikoidut järjestelmät	kiinteä	kiinteä
Joustavat järjestelmät	kiinteä	muutettava
Uudelleenkonfiguroitavat järjestelmät	muutettava	muutettava

Tarve muutoksille voi tulla Santosin et al. (2006, s. 19–20) mukaan myös oman toiminnan sisältä: kokonaan uuteen sijaintiin muutettaessa myös tuotannon layout halutaan mahdollisimman ideaaliksi. Lisäksi hankittaessa uusia koneita ja laitteita halutaan niiden sijoittelun avulla maksimoida tehokkuus. Tuotannossa olevien haasteiden, kuten materiaali-
virtojen ongelmien ja keskeneräisen tuotannon suuren määrän, korjaamiseksi voidaan

Santosin et al. (2006, s. 21-38) mukaan joutua tekemään muutoksia tuotannon layoutiin. Ideaaliin yhden kappaleen eräkokoon siirtyminen lisää usein materiaalien kuljetukseen tarvittavia resursseja. Tämä asettaa tarpeen tuotantovaiheiden siirtämiselle mahdollisimman lähelle toisiaan, koska resurssien käyttäminen materiaalin siirtämiseen ei ole arvoa tuottavaa toimintaa. Materiaalien siirtomatkojen lyhentämisestä on Halesin (2015) mukaan hyötyä, vaikka yhden kappaleen eräkoko ei tavoiteltaisikaan.

2.2.2 Suunnitteluprosessi

Suunnitteluprojekti voidaan Schenkin et al. (2010, s. 18–20) mukaan toteuttaa systemaattisen suunnitteluprosessin lisäksi erityyppisten suunnittelumallien mukaisesti. Systemaattiset suunnitteluprosessit toteutetaan nimensä mukaisesti prosesseina. Suunnittelumalleja on puolestaan kahdenlaisia, systemaattisia ja tilanneperusteisia. Tilanneperusteisessa suunnitteluprojektissa suunnitteluprosessi riippuu suoraan tehdyistä operatiivisista päätöksistä. Muutokset tehtyihin päätöksiin, jotka liittyvät esimerkiksi projektin tavoitteisiin, tuotantojärjestelmän vaatimuksiin ja tuotteeseen, aiheuttavat muutoksia myös suunnitteluprojektin etenemiseen. Systemaattisessa suunnitteluprosessissa suunnittelu etenee ennalta määritetyn prosessin mukaisesti aloituspisteestä lopetuspisteeseen. Tarvittaessa prosessin eri vaiheista voidaan siirtyä vaiheita taaksepäin, mutta tällöin projektin kesto-aika pitenee.

Systemaattisen suunnitteluprosessin sisällöstä ei ole yhtä selkeätä näkemystä. Schenkin et al. (2010, s. 19) esittämä systemaattinen prosessi kattaa vaiheet tuotantojärjestelmän kehitystyöstä sen purkamiseen ja kierrättämiseen. Santos et al. (2006, s. 30–36) puolestaan määrittelevät prosessin kattavan vaiheet tavoitteiden määrittelemisestä tehtaan tuotannon jatkuvaan parantamiseen. Hu & Ko (2015) taas määrittävät kokoonpanotuotannon valmistusjärjestelmäsuunnittelun kattavan vaiheet tuoteanalyysistä järjestelmän layout-suunnitteluun. Taulukossa 3 on esitetty näiden systemaattisten suunnitteluprosessien vaiheet.

Hu & Ko (2015) painottavat prosessissaan tuotteen analysointia, sen tuotettavuuden kehittämistä ja parhaiten soveltuvien valmistusmenetelmien valitsemista. Tuotantojärjestelmien kehittäminen perustuu heidän prosessissaan tietämykseen kokoonpanovaiheiden kestoista, niiden vaiheistuksesta ja tarvittavasta tuotantokapasiteetista. Tuotantokapasiteetin määrittäminen perustuu ennusteisiin ja mahdolliseen olemassa olevaan tilauskantaa. Tarvittavan tuotantokapasiteetin määrittää tuotteen kysyntänopeuden perusteella laskettava maksimituotantoaika, takti-aika. Tuotantokapasiteetissa tulee huomioida myös muuttuvien tekijöiden, kuten seisokkien ja laatuongelmien, vaikutukset kapasiteetin tarpeeseen. Varsinainen layout-suunnittelu on Hun & Kon (2015) esittämässä prosessissa vasta viimeisenä vaiheena.

Taulukko 3. Tuotantojärjestelmien systemaattinen suunnitteluprosessi.

	Schenk et al. (2010)	Santos et al. (2006)	Hu & Ko (2015)
1.	Suunnittelu	Ongelman määrittely	Tarvittavien tuotantovaiheiden määrittäminen
2.	Asennus ja konfigurointi	Ongelman analysoiminen	Tuotantovaiheiden keston määrittäminen
3.	Tuotannon käynnistäminen	Vaihtoehtojen kartoittaminen	Tuotantokapasiteetin määrittäminen
4.	Tuotannon ylläpitäminen	Parhaan ratkaisun valitseminen	Vaiheistuksen valitseminen
5.	Tuotannon lopettaminen	Toteutuksen määrittäminen	Järjestelmän tasapainotus
6.		Jatkuva parantaminen	Layoutin suunnittelu ja kapasiteetin tasapainotus

Schenkin et al. (2010, s. 19) määrittelemä suunnitteluprosessi kattaa koko tehtaan elinkaaren, kun muut kaksi prosessia kattavat ainoastaan tuotannon layout-suunnittelun. Hun & Kon (2015) suunnitteluprosessi kattaa Schenk et al. (2010) prosessista vain ensimmäisen vaiheen, suunnittelun. Santos et al. (2006, s. 30–36) kuvaa suunnitteluprosessin samankaltaisena kuin Hu & Ko (2015), mutta laajennettuna käytännön toteutuksen rakentamisella ja sen ylläpidolla. Santosin et al. (2006, s. 30–36) esittämän prosessin 6. vaihe vastaa Schenk et al. (2010, s. 19) esittämän prosessin 3. ja 4. vaihetta.

2.2.3 Layout-vaihtoehtojen valintakriteereitä

Parhaan layoutin valinta on luonteeltaan monitavoiteoptimointitehtävä. Monitavoiteoptimoinnissa pyritään parhaan ratkaisun löytämiseen silloin, kun valintaan vaikuttavia kriteereitä, tavoitefunktioita, on enemmän kuin yksi (Arora 2004, s. 524). Muther (1968, s. 10-5) esittää layoutin valinnalle useita kriteereitä, joista keskeisiä ovat:

- materiaalivirtausten tehokkuus
- materiaalin käsittelyn tehokkuus
- varastoinnin tehokkuus
- ohjaustarve ja ohjattavuus
- tilankäytön tehokkuus ja tilantarve
- turvallisuus
- ylläpito
- kustannukset
- laajennettavuus tulevaisuuden tarpeita varten.

Ongelman ratkaisemiseksi on Mutherin (1968, s. 10-4–10-10) mukaan tarpeen asettaa kullekin kriteerille painoarvo. Painotusten määrittämisessä on tarpeen olla mukana mah-

dollisimman laajasti tehtaan suunnittelu- ja käyttöönottoprosessissa mukana olevia henkilöitä. Painoarvojen asettamisen jälkeen eri layout-vaihtoehtoja voidaan vertailla keskenään ja vertailun tulosten perusteella voidaan päätyä sopivimpaan ratkaisuun.

2.2.4 Yleisimpiä layout-vaihtoehtoja kappaletavaruotannolle

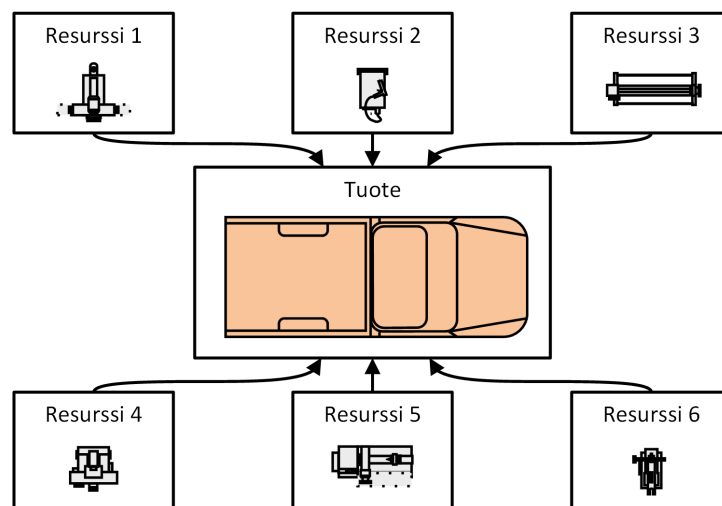
Yleisimmät layout-vaihtoehdot valmistavalle- ja kokoonpanoteollisuudelle ovat Zandinin (2001, luku 112) ja Santosin et al. (2006, s. 25) mukaan:

- kiinteän sijainnin layout
- funktionaalinen layout
- tuotantolinjasto
- solu-layout
- yhdistelmä-layout.

Edempänä esiteltävät layout-tyypit esittävät periaatteellisia malleja tuotannon materiaa-
livirtauksista. Käytännön ratkaisut ovat usein yhdistelmä erilaisia layout-malleja. Yhden
tehtaan tuotanto voi lisäksi koostua useammasta eri layout-mallista. (Hu & Ko 2015)

Kiinteän sijainnin layout

Kiinteän sijainnin layoutilla tarkoitetaan Zandinin (2001, luku 112) mukaan rakennetta,
jossa resurssit tuodaan tuotteen luokse tuotteen pysyessä paikallaan. Siinä ei esiinny tuo-
tettavien materiaalien virtausta, eikä se täten sovellu suurilla tuotantomääriä valmistavaan
kappaletavaruotannolle. Kuvassa 2 on esitetty kiinteän sijainnin layoutin periaate.

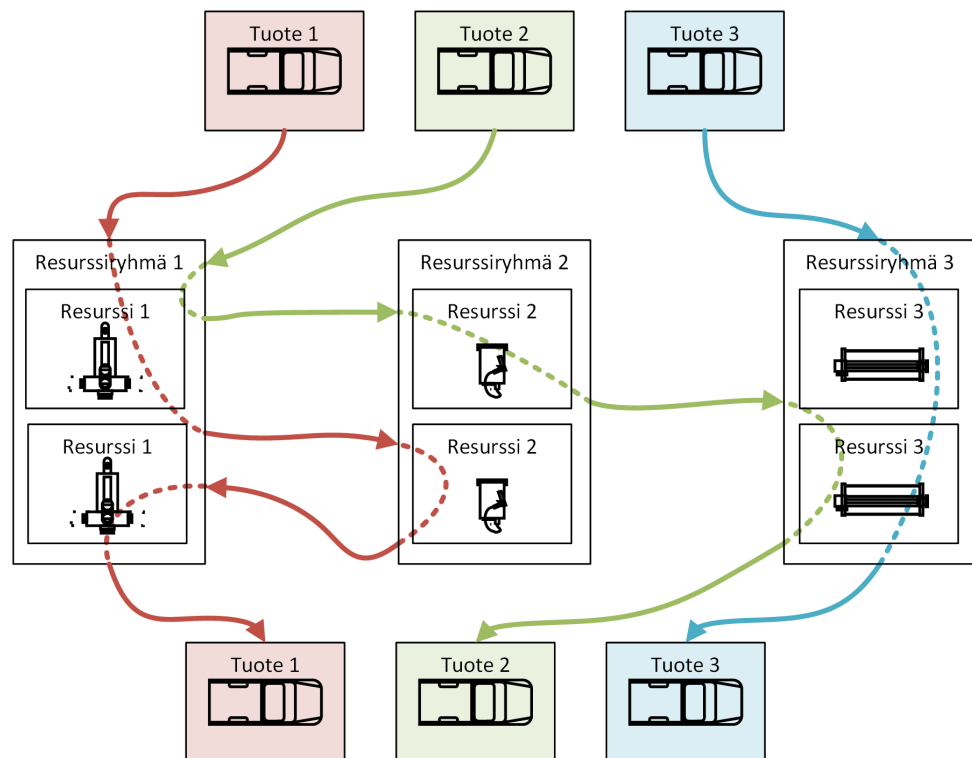


Kuva 2. Kiinteän sijainnin layout.

Kiinteän sijainnin layout soveltuu parhaiten tuotantoon, jossa lopputuotteet ovat vaikeasti
siirrettäviä (Santos et al. 2006, s. 25). Zandinin (2001, luku 112) mukaan tällaista tuotan-
toa ovat esimerkiksi laivat sekä rakennukset.

Funktionaalinen layout

Funktionaalisisessa layoutissa tuotantoresurssit ovat Santosin et al. (2006, s. 26) mukaan tyypillisesti ryhmiteltyinä omiksi osastoikseen. Funktionaalinen layout soveltuu usein parhaiten pienten tuotantoerien valmistamiseen. Mahdollisten tuotevariaatioiden määrä on tyypillisesti suuri, koska käytetyt koneet ovat yleismallisia. Täten funktionaalinen layout edellyttää työntekijöiltä korkeaa osaamistasoa, minkä lisäksi erilaisia työkaluja tarvitaan laaja-alaisesti. Periaatekuva funktionaalisesta layoutista on esitetty kuvassa 3.

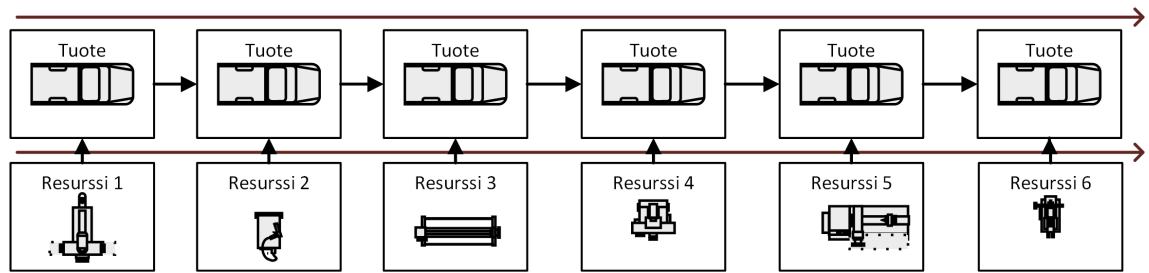


Kuva 3. Funktionaalinen tuotantolinjasto.

Zandinin (2001, luku 112) ja Santosin et al. (2006, s. 26–27) mukaan ongelmia funktionaalisisessa layoutissa ovat monesti pitkiksi muodostuvat asetustajat, suuri keskeneräisen tuotannon määrä ja suuri ohjaustarve. Tuotteiden reitit resurssiryhmien välillä voivat muodostua hyvinkin pitkiksi, mikä vaikuttaa myös osaltaan läpimenoaikoihin. Lisäksi materiaalien kuljetusmatkoista tulee pitkiä ja materiaalinkuljetuksen automatisointi voi olla hankalaa.

Tuotantolinjasto

Tuotantolinjastossa, eli tuotekohtaisessa layoutissa, tuotantoresurssit ovat Zandinin (2001, luku 112) ja Santosin et al. (2006, s. 27–28) mukaan jaoteltuina tuotekohtaisesti niiden valmistuksen mukaiseen järjestykseen. Tuotantolinjasto mahdollistaa hyvän tuotavuuden ja tuotantokapasiteetin tuotannolle, jossa tuotevariaatioiden määrä on kohtuullisen pieni. Havainnollistava kuvaus tuotantolinjastosta on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Tuotantolinjasto.

Tuotantolinjasto on tyypillisesti helposti ohjattava. Lisäksi tuotantoautomaation käyttäminen linjastoilla on usein mahdollista ja kannattavaa. Linjaston tiiviistä rakenteesta johtuen materiaalin käsittely on mahdollisimman vähäistä. (Santos et al. 2006, s. 27–28)

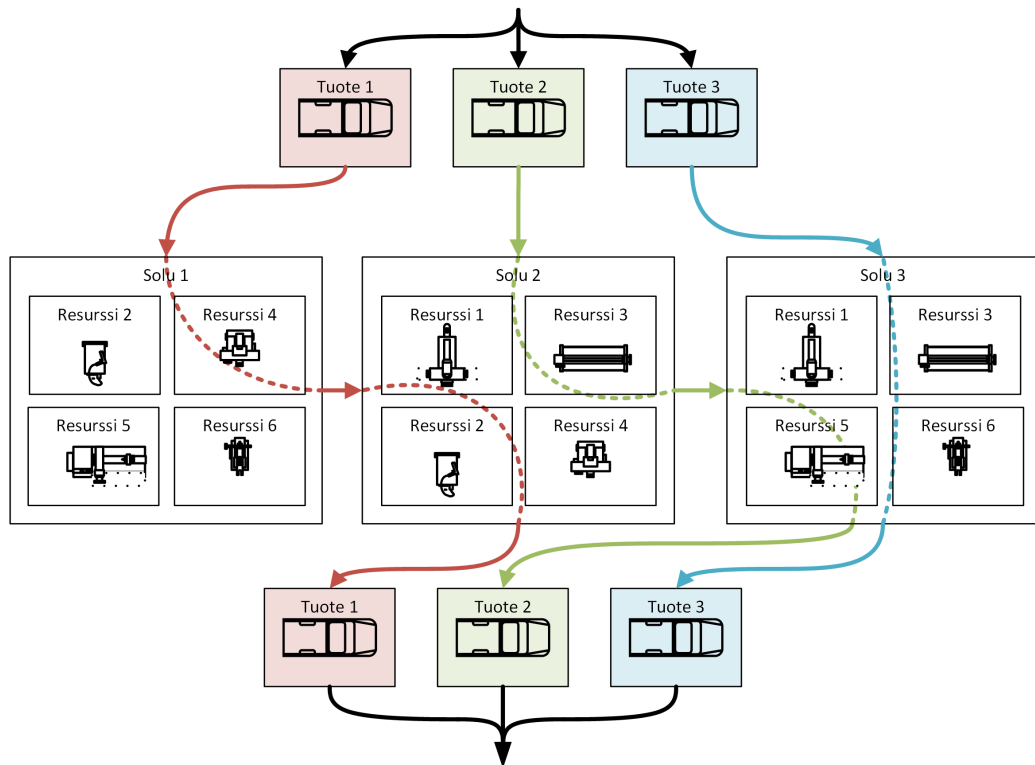
Materiaalivirrat voivat tuotantolinjastossa Hun & Kon (2015) mukaan olla joko synkronoituja tai synkronoimattomia. Synkronoidussa tuotannossa materiaalit liikkuvat vaiheelta toiselle säännöllisin aikavälein. Usein määräävänä tekijänä on pullonkaulavaiheen vaiheaika. Synkronoimattomassa tuotantolinjassa materiaali virtaa vaiheesta toiselle työn valmistuttua. Tällöin vaiheiden kapasiteetti voidaan hyödyntää tehokkaasti, mutta haittapuolena on tarve vaiheiden välisille puskurivarastoille. Tällöin ongelmaksi voi muodostua pullonkaulavaiheen puskurivaraston hallitsematon kasvu.

Solu-layout

Soluvalmistus tarjoaa tuotantolinjastoon verrattuna parempaa joustavuutta ja funktionaaliseen layoutiin verrattuna parempaa tuottavuutta. Layout-vaihtoehtona se on muihin verrattuna varsin uusi, mutta toimintaympäristön muutokset kohti yhä suurempaa asiakasräätälöitävyyttä ovat tehneet vaihtoehdosta suosituksen. (Santos 2006, s. 28–29) Periaatekuva solu-layoutista on esitetty kuvassa 5.

Solu-layoutissa tuotantolaitteet ovat Halesin (2015) mukaan sijoiteltuna erillisiin tuotantosoluihin, joiden tehtävänä on valmistaa rajallinen joukko tuotteita. Koska soluvalmistuksessa yksittäisen tuoteryhmän valmistukseen käytetyt tuotantolaitteet on sijoitettu lähelle toisiaan, saavutetaan seuraavia hyötyjä:

- vähemmän materiaalien siirtelyä
- alhaisemmat vaiheajat
- vähemmän laatuongelmia
- vähentynyt tilan tarve
- helpommin ohjattava tuotanto
- parantunut henkilöstön tuottavuus.



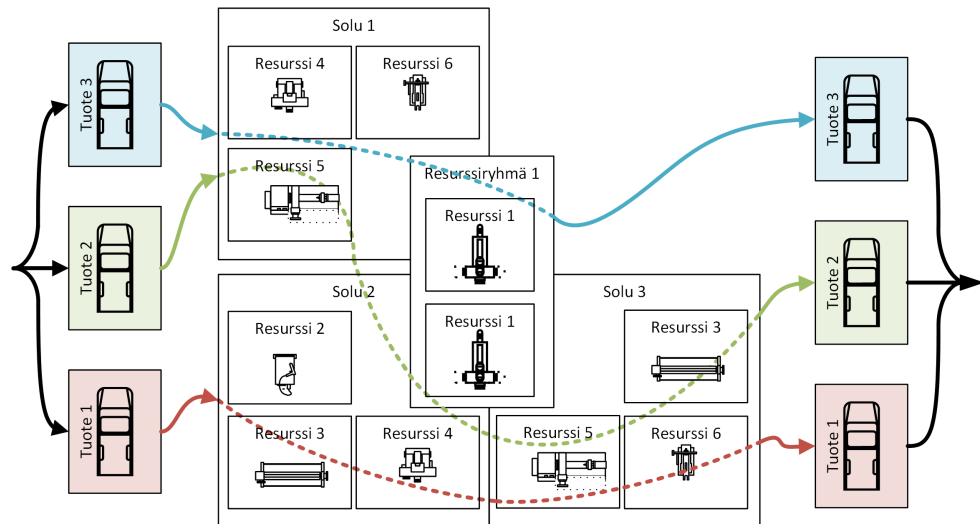
Kuva 5. Solulayout.

Soluvalmistus edellyttää kuitenkin työntekijöiltä monitaitoisuutta ja solun useiden työvaiheiden osaamista. Lisäksi soluvalmistusta suunniteltaessa työkonien sijoittelulla ja työvaiheiden tasapainotuksella on merkittävä vaikutus solun tehokkuuteen. Tuotantolinjaston tavoin myös solutuotanto soveltuu hyvin automatisoitavaksi. (Santos et al. 2006, s. 43-53)

Yhdistelmä-layout

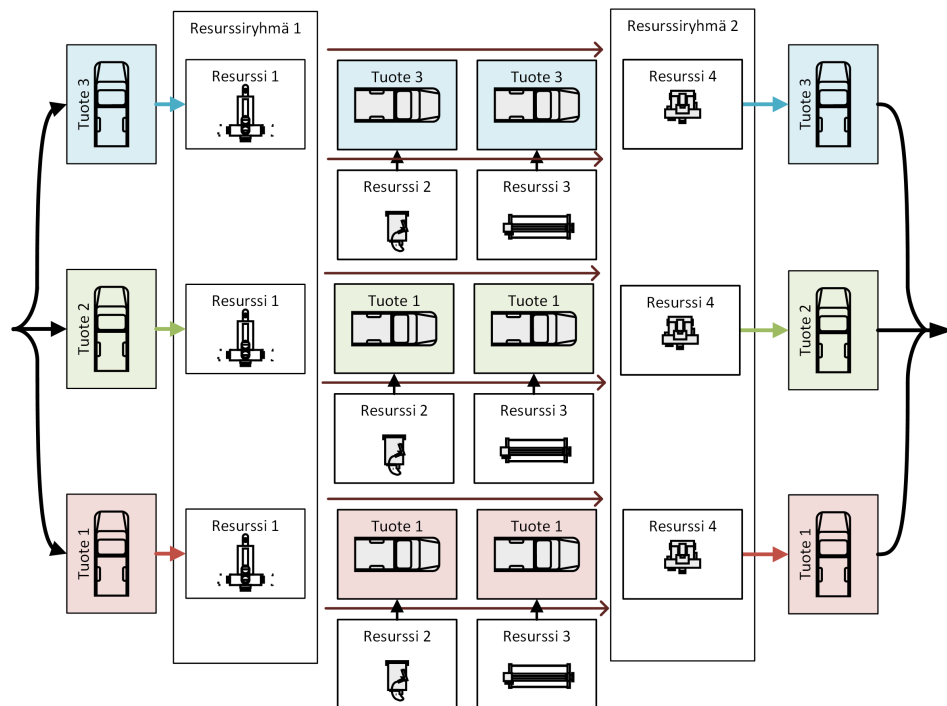
Yhdistelmä-layout muodostetaan nimensä mukaisesti yhdistelemällä eri layout-vaihtoehtoja. Yhdistelmä-layoutit muodostetaan tyypillisesti yhdistelemällä solulayoutia ja funktionaalista layoutia tai tuotantolinjastoa ja funktionaalista layoutia. (Santos et al. 2006, s. 28–29)

Joustavan soluvalmistuksen ehtona on tuotantolaitteiston monistaminen jokaiselle solulle, mikä ei ole Santosin et al. (2006, s. 28–29) mukaan aina taloudellisesti mahdollista. Tällöin solulayoutin tilalla voidaan käyttää yhdistelmälayoutia. Tällainen yhdistelmälayout voidaan muodostaa solutuotannosta sijoittamalla solut tietyn resurssin läheisyyteen, jolloin kyseinen resurssi on jaettu eri solujen kesken. Tällöin ei ole tarvetta hankkia samaa arvokasta tuotantovälinettä kaikille soluille erikseen. Toimintaperiaate tuotantosolujen ja funktionaalisen layoutin yhdistelmästä on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Tuotantosolujen ja funktionaalisen layoutin yhdistelmä.

Toinen mahdollisuus Santosin et al. (2006, s. 28–29) mukaan on tuotteen valmistusvaiheiden jaottelu linjatutannon ja prosessitutannon välillä. Tällöin voidaan yhdistää erityistä konekantaan vaativat työt ja tuotantolinjaston tehokkuus. Periaatekuva tuotantolinjaston ja funktionaalisen linjaston yhdistelmästä on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Tuotantolinjaston ja funktionaalisen linjaston yhdistelmä.

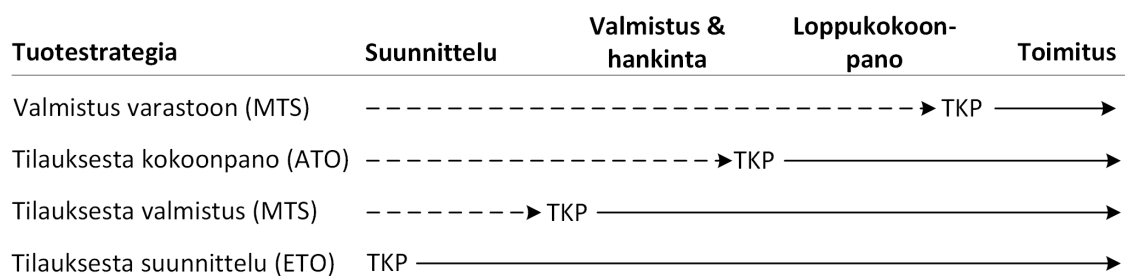
Perinteistä tuotantolinjastoa voidaan muuttaa myös muilla tavoin, jotta valmistettavien tuotevariaatioiden määrää voidaan kasvattaa. Hu & Ko (2015) esittävät kaksi erilaista ratkaisua tuotantolinjaston joustavuuden parantamiseen. Ensimmäisenä ratkaisuvaihtoehtona on muodostaa tuotantolinjasto peräkkäisistä tuotantosoluista, jotka kykenevät valmistamaan toisistaan poikkeavia tuotteita. Toisena mahdollisena ratkaisuna on sijoittaa

tuotantolinjaston rinnalle erillisiä alikokoonpanolinjastoja. Alikokoonpanolinjastojen avulla voidaan myös pienentää varsinaisen tuotantolinjaston vaiheikaa, koska aikaa vievät työvaiheet voidaan pilkkoa pienempiin osa-vaiheisiin.

2.3 Tuotannon suunnittelu- ja ohjausperiaatteet

Tehokas toiminta ja asiakasarvokeskeisyys edellyttävät valmistavan teollisuuden yrityksiltä hyvää reagointikykyä muutoksiin. Nopeiden toimitusaikojen ja asiakasräätelöityvien tuotteiden avulla yritykset hakevat kilpailukykyä kilpailluilla markkinoilla. Tavoitteiden saavuttamiseksi tuotannosuunnittelun ja -ohjauksen on kyettävä tukemaan tuotantoa sekä yrityksen liiketoiminnallista strategiaa.

Tuotantostrategia yhdessä markkinointi- ja tuotestrategian kanssa määrittelee tilauksen kytkeytymispisteen. Tilauksen kytkeytymispiste (TKP) määrittää sen vaiheen tuotannon arvoketjussa, johon asiakastilaukset kytkeytyvät. Yleisimpiä vaihtoehtoja tilauksen kytkeytymispisteelle on esitetty kuvassa 8. (Olhager 2003)



Kuva 8. Tilauksen kytkeytymispiste. (Perustuu lähteeseen Olhager 2003)

Lödding (2013, s. 9) määrittelee tuotannosuunnittelun tehtäväksi tuotantoon saapuvien ja sieltä valmistuvien töiden määrän ja tuotantojärjestyksen määrittämisen. Tuotannonohjauksen tehtävänä on Löddingin (2013, s. 2–8) mukaan huolehtia määrätyn tuotannosuunnitelman toteuttamisesta. Hän jaottelee tuotannonohjauksen tuotantotilausten generointiin ja niiden vapauttamiseen tuotantoon. Tuotantotilausten generoinnilla tarkoitetaan prosessia, jossa asiakastilaukset jalostetaan tuotantotilauksiksi ja ne aikataulutetaan tuotantoon. Tuotantotilausten generoiminen on täten luonteeltaan tuotannosuunnittelua. Poikkeuksena ovat varasto-ohjautuvassa tuotannossa käytettävät yksinkertaiset ohjausmenetelmät, joiden johdosta toiminta on tällöin lähempänä varsinaista tuotannonohjausta. Tuotantotilausten vapauttamisessa tehtävänä on käynnistää tilauksen tuotanto sopivalla ajanhetkellä.

Tuotannosuunnittelulla on Löddingin (2013, s. 85) mukaan suora vaikutus tuotannonohjaamiseen. Tarve tuotannosuunnittelun laajuudelle ja määrälle riippuu tuotannonohjauksessa käytetyistä menetelmistä. Tilausohjautuvaa tuotantoa on yleensä tarpeen ohjata enemmän kuin varasto-ohjautuvaa (Lapinleimu 2007 s. 109).

2.3.1 Tuotannosuunnittelu

Tuotannosuunnittelun tehtäviin kuuluu Löddingin (2013, s. 86–87) mukaan tuotanto-suunnitelman laatiminen ja tuotannon tarpeiden suunnittelu. Lisäksi tuotannosuunniteluun sisältyy oman yrityksen sisällä tehtävän tuotannon ja ulkopuolisten hankintojen suunnitteleminen. Tuotannosuunnitelma laaditaan määrätylle ajanhetkelle olemassa olevien ja ennakoitujen tilausten perusteella. Tuotteiden kysynnän vaihtelusta johtuvaa tuotannon kuormitusasteen vaihtelua voidaan ehkäistä tehokkaasti käyttämällä tuotannosuunnittelun apuna pitkän aikavälin myyntiennusteita ja tasapainottamalla tuotanto-ennakkotietojen perusteella. Haittapuolena tasapainottamisessa on varastojen kertyminen. Useimmiten taloudellisesti kannattava ratkaisu on kompromissi näiden väliltä. Tuotannon ja varastoinnin suunnitteluongelmia voidaan ratkaista operaatiotutkimuksen tarjoamin menetelmin (Leon 2015).

Ulkoisesti hankituille tuotteille ja komponenteille sekä oman tuotannon tuotteille on määritettävä eräkoko. Ulkoisesti hankittujen tuotteiden eräkoon valintaan vaikuttavat yleisesti toimitusaika, toimituskustannukset ja toimitustiheys sekä tuotteiden varastoinnista aiheutuvat kustannukset (Lödding 2013, s. 113–135). Omassa tuotannossa eräkokoon vaikuttavat taloudellisten seikkojen lisäksi myös operatiiviset näkökannat. Yleisimmät taloudelliset seikat eräkoon valinnassa ovat asetusajoista johtuvien kustannusten minimointi eräkokoa kasvattamalla sekä valmistuotevarastojen ja keskeneräisen tuotannon määrän pienentäminen eräkokoa pienentämällä. (Lödding 2013, s. 92–93)

Tuotteiden tarkat valmistusajankohdat voidaan määrittää jo tuotannosuunnitteluvaiheessa määrittelemällä tuotannolle hienosuunnitelma ja vaiheistus. Löddingin (2013, s. 94) mukaan tuotannon ohjaaminen hienokuormittamalla on monella tapaa ongelmallista: työnvaiheiden kestojen määrittäminen tarkasti on hankalaa, minkä vuoksi suunnitelmat eivät useinkaan toteudu tuotannon lattiatasolla. Hän esittää, että yritykset, joilla on riittävät valmiudet tuotannonohjaamiseen, voivat saavuttaa toiminnalle asetetut tavoitteet ilman tuotannon hienosuunnittelua. MacCarthy (2006) esittää päinvastaisen näkemyksen tuotannonohjauksen tarpeellisuudesta. Hänen mukaansa tarkka tuotannosuunnittelu ja aikatalutus ovat avaintekijöitä menestyvässä valmistuksessa. Myös Järvenpää et al. (2016) esittävät tuotannon hienosuunnittelun olevan eduksi tehokkuuden ja tuottavuuden kannalta.

Tuotannon hienosuunnittelussa ja aikataulutuksessa käytetään työkaluna APS (advanced planning and scheduling) -järjestelmiä (Järvenpää et al. 2016, s. 4). Järjestelmät toimivat apuvälineenä tuotannon hienokuormituksen laatimisessa ja esittävät sen visuaalisesti Gantt-kaaviona. Ohjelmistopakettit tarjoavat erilaisia ominaisuuksia eri tarpeisiin. Yleisimpiä niistä ovat työnvaiheistuksen automaattinen huomioiminen suunnitelmia aikataulutettaessa ja suunnitelmien aikataulutaminen käyttäen optimointialgoritmeja. (Lödding 2013, s. 94–95)

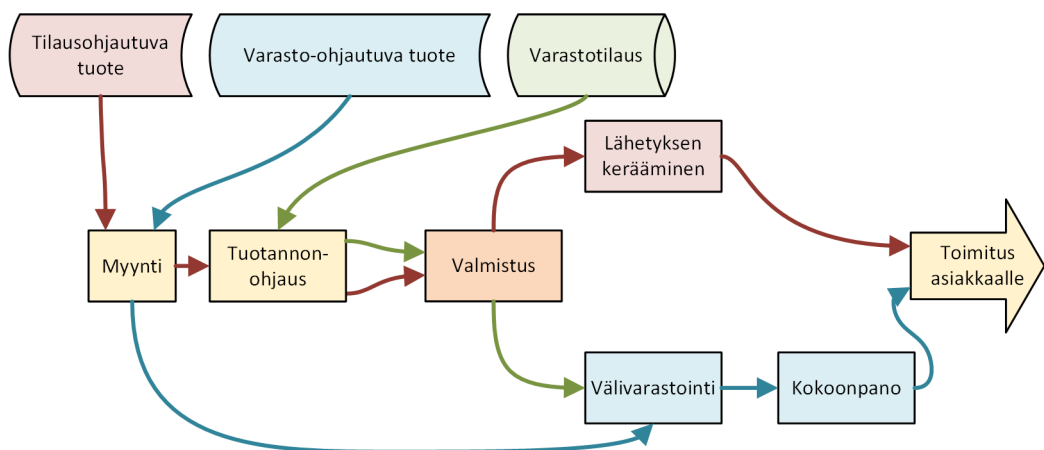
2.3.2 Tuotannonohjaus

Tuotantojärjestelmien tehokkuuden, laadukkuuden, toimitusvarmuuden ja tuotantosuunnitelmien toteutumisen takaamiseksi tuotantoa täytyy ohjata. Mitä monimutkaisempi tuotantojärjestelmä on, sitä suurempi vaikutus ohjauksella on kilpailukyvyn kannalta. Vaikka tuotannonohjaus on lyhyen aikajänteen operatiivista johtamista, on sillä merkittävä vaikutus tuotantoprosessin kokonaistehokkuuteen. (Karren 2012, s. 1–8)

Lapinleimun (2007, s. 109) ja Löddingin (2013, s. 140) mukaan tuotannonohjaamisen kaksi peruseriaatetta ovat tilausohjaus ja varasto-ohjaus. Tuotantotilauksen generoiminen aloitetaan Löddingin (2013, s. 140–143) mukaan tuotteelle valitun ohjauseriaatteen mukaan joko asiakkaalta tai varastosta tulevan signaalin perusteella.

Tilausohjautuvien tuotteiden kohdalla tuotantotilauksen generoiminen on Löddingin (2013, s. 140) mukaan käytännössä tuotannosuunnittelua. Yksinkertaisimmillaan tilausohjautuvasti valmistettavan tuotteen asiakastilaus muunnetaan suoraan tuotantotilaukseksi. Asiakastilaus voidaan tarvittaessa jakaa useampaan eri tuotantotilaukseen, tai vaihtoehtoisesti yksittäiseen tuotantotilaukseen voidaan yhdistää useampia asiakastilauksia.

Varasto-ohjautuvien tuotteiden kohdalla yhteyttä asiakastilauksen ja tuotantotilauksen välillä ei Löddingin (2007, s. 142–143) mukaan ole, koska tuotantotilaus generoidaan ennen asiakastilauksen saapumista. Varasto-ohjautuvien tuotteiden toimitusajat ovat usein paljon lyhyempiä verrattuna tilausohjautuviin tuotteisiin: parhaimmillaan tuotteet voidaan toimittaa asiakkaille välittömästi. Varasto-ohjautuva tuotanto edellyttää tuotteiden varastointia, mikä aiheuttaa kustannuksia ja peittää tuotannossa olevia ongelmia (Santos et al. 2007, s. 7). Ero tilaus- ja varasto-ohjautuvien tuotteiden tuotantoprosessissa on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Tuotantoprosessi tilaus- ja varasto-ohjautuvilla tuotteilla.

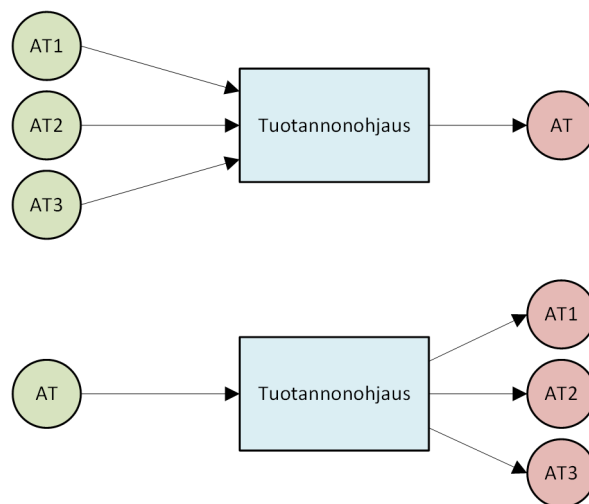
Tuotantotilauksia voidaan generoida yksitasoisesti tai monitasoisesti. Yksitasoinen tuotantotilauksen kehitys luo valmistusmääräyksen pelkästään yksittäiselle tuotteelle tai

osalle. Tuotteen valmistuksessa tarvittaville komponenteille ei tällöin generoida omia tuotantotilauksia automaattisesti. Mikäli tuotteelle on määritetty rakenne, joka sisältää tuotteeseen tarvittavat komponentit, voi yksitasoinen tuotantotilaus kuitenkin generoida tuotantotilaukset myös niille tuotteen komponenteille, jotka löytyvät tuotteen tuoterakenteesta. Monitasoisessa tuotantotilausten generoinnissa luodaan tuotantotilaukset automaattisesti määrättyille tuoterakenteen tasoille. Menetelmää käytettäessä tulee ottaa huomioon tarvittavien tuotteiden määrä, sekä ajankohta, jolloin tuotteita tarvitaan. (Lödding 2013, s. 143–146)

Uusia tuotantotilauksia generoidaan Löddingin (2007, s. 147–148) mukaan joko säännöllisin aikaväleihin tai ennalta määrättyjen tapahtumien perusteella. Ennalta määrättyjä tapahtumia ovat esimerkiksi asiakastilauksen saapuminen sekä tuotteiden ja komponenttien kuluttaminen varastosta. Muutokset ohjausmenetelmän parametreissa, esimerkiksi varmuusvaraston määrässä, voivat myös toimeenpanna tuotantotilauksen.

Tilausohjaus

Tilausohjatussa tuotannossa impulssin tuotantotilauksen generoinnille tekee asiakastilaus. Ilman asiakastilausta tuotannossa ei valmisteta mitään. Tilausohjaus soveltuu parhaiten tuotantoon, jossa tuotannon läpimenoaika on lyhyt ja tuotteen toimitusaika pärjää kilpailijoiden toimitusajoille. Muita tilausohjautuvan tuotannon tunnuspiirteitä ovat erilaisten tuotevariaatioiden suuri määrä, alhainen tuotteiden varastointiin sitoutunut pääoma sekä epäkuranttiusriskin puuttuminen. (Lapinleimu 2007, s. 109)



Kuva 10. Tilausten yhdisteleminen ja eritteleminen. (Perustuu lähteeseen Lödding 2013, s. 141)

Tilausohjatussa tuotannossa voidaan Löddingin (2013, s. 140–142) mukaan tarvittaessa yhdistää ja erottaa tuotantotilauksia. Yhdistelemällä pieniä tilauksia saadaan kasvatettua eräkokoja ja vähennettyä tilauksen käsittelyyn tuotannossa kuluvaan aikaan. Suuret tilaukset voidaan käytettävästä ohjausmenetelmästä riippuen eritellä useaksi eri tilaukseksi. Kuvassa 10 on esitetty asiakastilausten (AT) yhdistäminen ja niiden eritteleminen.

Suosituimpia ohjausmenetelmiä tilausohjautuvalle tuotannolle ovat Lapinleimun (2007, s. 109) ja Löddingin (2013, s. 140–141) mukaan:

- suunnitelmaohjaus
- syklinen ohjaus
- yhdistetty tilaus- ja varasto-ohjaus
- hierarkkinen imuimpulssiohjaus.

Suunnitelmaohjauksessa tuotantotilausten generointi tehdään suoraan valmistussuunnitelman pohjalta. Tuotantotilauksista koostetut tarvelistat voivat olla jaksottaisia tai juoksevia riippuen siitä, millä tavoin tuotantotilausten vapauttamista tuotantoon halutaan ohjata. Juoksevia tarvelistoja käytettäessä tuotteiden tuotantojärjestys on etukäteen suunniteltu ja tuotannon työpisteillä noudatetaan kyseistä järjestystä. Jaksottaisissa tuotantotilauksissa työpisteille annetaan vapaus töiden tekemiseen halutussa järjestyksessä kyseisen jakson aikana. (Lapinleimu 2007, s. 110–111)

Syklinen ohjaus on jaksottaiseen suunnitelmaohjaukseen perustuva menetelmä. Menetelmää käytettäessä tuotanto ajoitetaan vakiopituisiin jaksoihin, joihin sijoitetaan tuotantotilauksia. Asiakastilausten tulee tällöin olla valmistusajoiltaan tarpeeksi vakioituja. Tuotteissa voi kuitenkin olla variaatioita, kunhan niiden valmistusajat mahtuvat ennalta määritettyjen jaksojen sisään. (Lapinleimu 2007, s. 111)

Tapauksissa, joissa tuotannon taloudellinen eräkkö on suurempi kuin asiakkaalta saatu tilaus, sovelletaan monesti yhdistettyä tilaus- ja varasto-ohjaus -menetelmää. Menetelmässä tuotteita valmistetaan enemmän kuin asiakas on tilannut, minkä vuoksi tuotteita joudutaan myös varastoimaan. Syynä menetelmän käyttöön on usein pienestä eräkoosta johtuva suureksi jäävä kappalekohtainen asetuskustannus. Menetelmää voidaan joutua käyttämään myös silloin, kun tuotteiden toimitusajat ovat lyhyitä suhteessa valmistusaikoihin. (Lödding 2013, s. 141–142)

Hierakkisessa imuimpulssiohjauksessa tieto asiakastilauksesta lähetetään suoraan valmistusyksiköille. Valmistusyksiköt käsittelevät tilauksen itsenäisesti, kehittävät siitä tuotantotilauksen ja lähettävät tilauksen tarvitsemistaan materiaaleista omille toimittajilleen. Hierakkinen imuimpulssiohjaus muistuttaa aitoa imuohjausta sillä erotuksella, että valmistamisen aloittaminen tapahtuu toimitusketjun alkupäässä. (Lapinleimu 2007, s. 111)

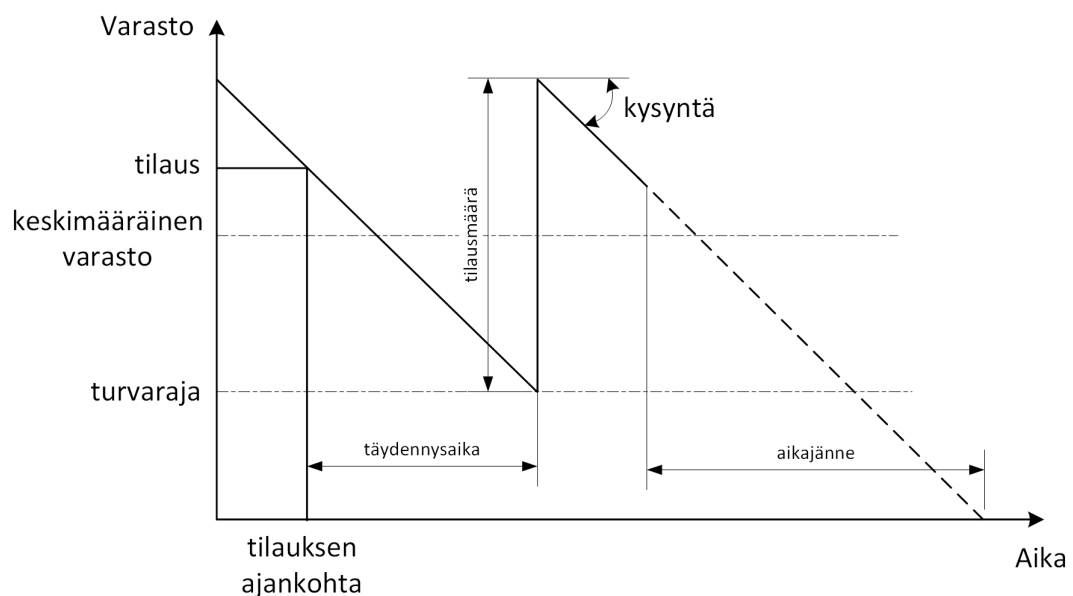
Varasto-ohjaus

Varasto-ohjatussa tuotannossa asiakkaiden tilaamat tuotteet kerätään Löddingin (2013, s. 142–143) mukaan suoraan varastoista, sillä varasto-ohjatussa tuotannossa asiakastilaus ei aiheuta tuotantotilauksen generointia, jonka valmistuessa tuote olisi valmiina toimitettavaksi asiakkaalle. Varasto-ohjauksessa on Löddingin (2013, s. 142–143) ja Lapinleimun (2007, s. 109) mukaan keskeisinä etuina nopeat toimitusajat ja matala ulkopuolisen ohjauksen tarve.

Yleisimpiä varasto-ohjatussa tuotantotilausten generoinnissa käytettäviä menetelmiä ovat Lapinleimun (2007, s. 110) ja Löddingin (2013, s. 142–143) mukaan:

- tilauspisteohjaus
- aito imuohjaus
- *Kanban*-ohjaus
- kapasiteettiperusteinen materiaalinhallinta (CORMA)
- perusvaraston jatkuva ylläpito.

Tilauspisteohjaus on yksitasoinen, tapahtumaperusteinen menetelmä ulkopuolisten hankintojen ja tuotantotilauksien ajoittamiseen. Se on yksi vanhimmista ja käytetyimmistä ohjausmenetelmistä, ja sen parametrien valitseminen onnistuu käyttäen yksinkertaisia laskukaavoja. Tilauspisteohjauksessa jokaiselle komponentille ja tuotteelle määritetään tilauspiste (hälytysraja) ja täydennyseräkoko. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää ennalta määritettyjä tilausperiodeja tilauspisteen saavuttamisen tai alittamisen sijaan, jolloin täydennyseräkoko on muuttuvana parametrina. Tällöin täydennyseräkoko riippuu tilaushetkellä olevasta varaston määrästä ja varaston maksimikoosta. Tilauspisteohjauksen periaate on esitetty kuvassa 11. (Lödding 2013, s. 153–161)



Kuva 11. Tilauspisteohjaus. (Perustuu lähteeseen Lödding 2013, s. 154)

Aito imuohjaus on menetelmä, jossa valmistusketjussa vaihetta edeltävä yksikkö ylläpitää kyseisen vaiheen imuvarastoa. Varastopaikan tyhjentyminen generoi tuotantotilauksen sitä edeltävälle vaiheelle. Aito imuohjaus toimii parhaiten osavalmistuksen ja kokoonpanon välillä, johon se tarjoaa yksinkertaisen ja selkeän ohjauksen. Aitoa imuohjausta käytettäessä tilausten toimitusaika koostuu kokoonpanon läpimenoajasta, kokoonpanon vaatiman kuormituksen tasausajasta ja lähetysajasta. Aito imuohjaus edellyttää

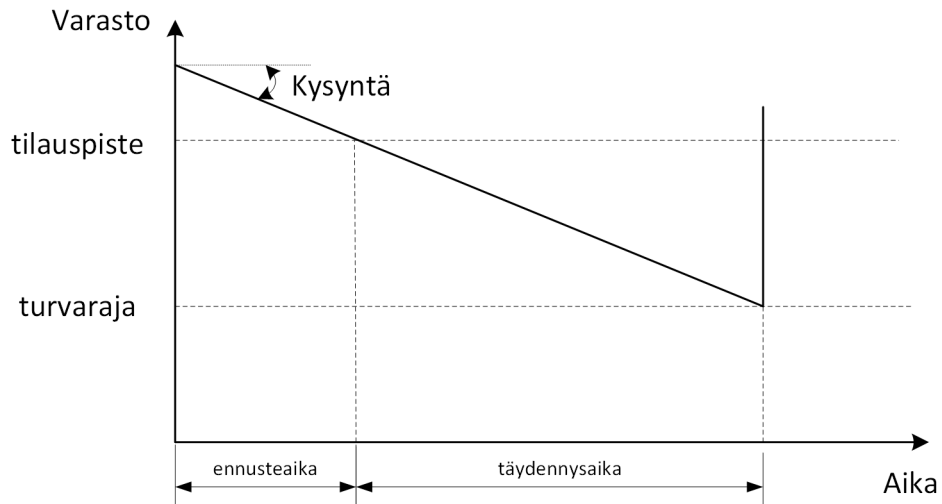
kuitenkin määrältään täydennysajan maksimituotantoa vastaavien varastojen ylläpitoa. (Lapinleimu 2007, s. 112)

Kanban-ohjaus on Löddingin (2007, s. 183–184) mukaan imuohjautuva varasto-ohjauksen menetelmä, joka on vielä nykyäänkin olennainen osa Toyotan valmistusjärjestelmää. Menetelmän tärkeimpiä ominaisuuksia on, että se yhdistää toimitusketjun eri toimijat ja määrittää ohjauksen toteutumaan aidon kysynnän perusteella. *Kanban*-ohjauksessa vastuu varastojen ylläpidosta on tuotannon työntekijöillä.

Hyvin toimivissa *Kanban*-ohjauksissa kukin vaihe tilaa edeltävältä vaiheelta tuotteita vain oman kulutuksensa mukaisesti. Tuotantotilauksia ohjataan *Kanban*-korttien avulla. Jokainen *Kanban*-kortti sisältää tuotetiedot ja tuotteen tuotantoeräköön. *Kanban*-ohjauksessa edeltävä työnvaihe ylläpitää sitä seuraavan vaiheen puskurivarastoa. Kun työnvaihe on käyttänyt yksittäisen *Kanban*-kortin määrittelemän materiaalin loppuun, siirretään kyseinen *Kanban*-kortti kyseistä tuotetta valmistavalle työpisteelle. *Kanban*-kortti toimii näin ollen tuotantotilauksena. *Kanban*-ohjauksen tehokas hyödyntäminen edellyttää tuotannolta yhden tuotteen tuotantoeräkkoa. (Lödding 2013, s. 184–188)

Lödding (2013, s. 188–192) esittelee myös tavanomaisesta yksikorttisesta *Kanban*-ohjauksesta johdettuja ohjausmenetelmiä. Kahden kortin *Kanban*-ohjauksessa on otettu huomioon materiaalien kuljetuksiin käytettävä aika hyödyntämällä puskurivarastoja. Menetelmässä *Kanban*-kortit on jaettu erikseen *kuljetus-Kanban* -kortteihin ja *tuotanto-Kanban* -kortteihin. *Tuotanto-Kanban* -kortit toimivat kuten yksikorttimenetelmässäkin, *kuljetus-Kanban* -kortilla valtuutetaan materiaalin kuljetus toimittajan lähtevän materiaalin puskurivarastosta asiakkaan saapuvan materiaalin puskurivarastoon. Toinen *Kanban*-ohjauksesta johdettu menetelmä on kaksilaatikko-ohjaus. Kaksilaatikko-ohjaus on Lapinleimun (2007, s.113) mukaan hieman imuohjausta muistuttava ohjausmenetelmä, jossa hälytysraja ja toimituseräkö ovat saman suuruisia. Kaksilaatikko-ohjauksessa sekä materiaali että *Kanban*-kortti kulkevat samassa laatikossa. Kun työpisteellä oleva laatikko tyhjenee, haetaan toimittavalta yksiköltä uusi laatikko ja jätetään tyhjentyneet laatikko toimittajalle.

Kapasiteettiperusteinen materiaalinhallinta (CORMA, capacity oriented materials management) on Löddingin (2013, s. 217–220) mukaan kehitetty ohjaamaan tuotantoa, jossa on sekä tilausohjautuvia, että varasto-ohjautuvia tuotteita. Tavoitteena menetelmässä on työpisteiden jatkuva kuormittaminen ja kuormitusten tasaaminen. Menetelmän avulla ohjataan tuotantotilausten generointia, niiden vapauttamista tuotantoon ja kriittisten tilausten valmistumista ajallaan. Tuotantotilausten generoiminen menetelmässä perustuu tilauspistemalliin, minkä lisäksi käytössä on ennusteita tulevalle kysynnälle. Etuna menetelmän käytöstä verrattuna puhtaaseen tilauspistemalliin on mahdollisuus tuotantotilausten generointiin ja vapauttamiseen etujassa, mikä auttaa tuotannon kuormituksen tasaamisessa. Esimerkki tuotantotilausten kehittämisestä on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Ennusteiden käyttö tilauspiste-mallissa. (Perustuu lähteeseen Lödding 2013, s. 218)

Kapasiteettiperusteisessa materiaalinhallinnassa tuotantotilauksia vapautetaan tuotantoon suunnitellun aloituspäivämäärän perusteella. Pullonkaulavaiheita sisältävien tuotteiden vapautus tuotantoon voidaan tehdä tarvittaessa ennakkoon näiden vaiheiden kuormituksen tasapainottamiseksi. Tuotantotilauksia voidaan myös aikatauluttaa uudelleen, mikäli tuotteiden kysyntä on muuttunut edellisestä suunnitelmasta ja niiden varastosaldot ovat täydennyksen jälkeen alle tai yli hälytysrajan. Näissä tapauksissa tuotannon aloituspäivämäärää voidaan joko aikaistaa tai viivästyttää. Tarpeen mukaan myös jo aloitettua tuotantoa voidaan suunnitella uudestaan. (Lödding 2013, s. 219–221)

Synkronoitu MRP (material requirements planning) -ohjaus on Lödding (2013, s. 229–235) mukaan yhdistelmä kaksikorttiseen *Kanban*-ohjaukseen ja tuotannosuunnitelmaan perustuvaa ohjausta. Menetelmä on kehitetty soveltuvaksi ympäristöihin, joissa tuotevariaatioiden määrä on suuri ja tuotteiden elinkaaret ovat lyhyitä. Tuotannon aloittamisen ehtoina työvaiheilla ovat *Kanban*-kortin esillä oleminen ja päiväkohtaisessa tuotanto-ohjelmassa oleva tuotantotilaus kyseiselle tuotteelle.

Tuotantotilausten vapauttaminen tuotantoon

Tuotantotilausten vapauttamisella tuotantoon määritetään ajankohta, jolloin kunkin tuotantotilauksen valmistaminen aloitetaan. Tuotantotilausten vapauttamisen yhteydessä varataan myös usein tuotantotilauksen tarvitsemat materiaalit kyseiselle tilaukselle. Tuotantotilausten generoinnin lisäksi myös tuotantotilauksia voidaan vapauttaa tuotantoon säännöllisin aikaväleihin tai ennalta määritettyjen tapahtumien perusteella. Joidenkin tuotantotilausten generointimenetelmien, kuten synkronoidun MRP -menetelmän, kohdalla tuotantotilausten vapauttamiseen ei tarvita erillistä menetelmää. Muiden varasto-ohjautuvien menetelmien kohdalla yleinen tapa on vapauttaa tuotantotilaukset välittömästi tuotantoon. (Lödding 2013, s. 305–318)

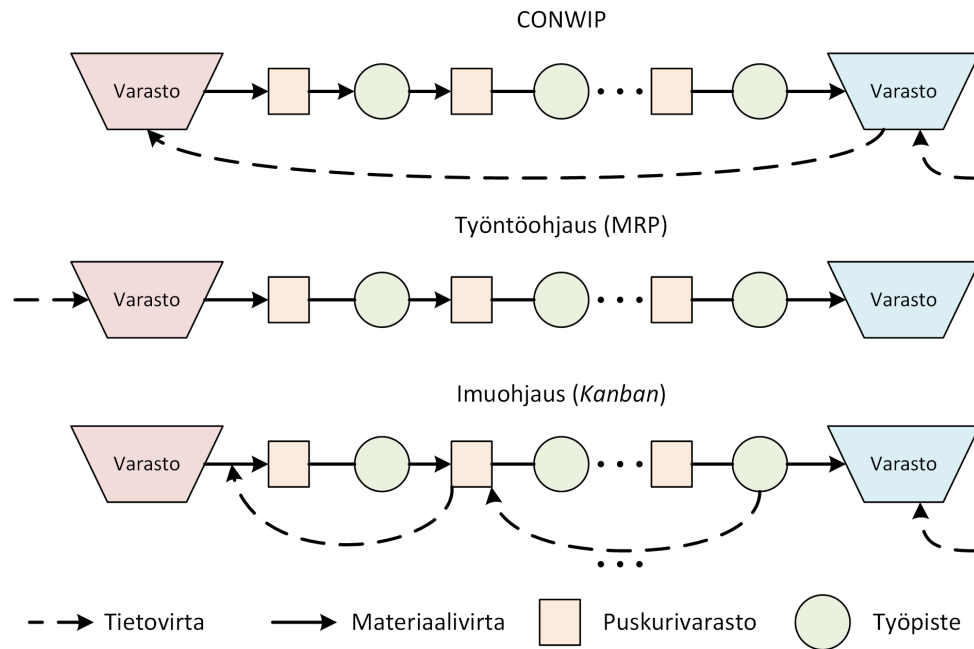
Välittömässä tuotantotilausten tuotantoon vapauttamisessa on kuitenkin omat ongelmansa. Löddingin (2013, s. 306) mukaan menetelmä soveltuu erityisen huonosti tilausohjautuvaan tuotantoon. Menetelmässä tuotantotilaukset vapautetaan tuotantoon heti niiden generoinnin jälkeen, eikä vapauttamisessa oteta erikseen huomioon tuotannossa jo olevia tilauksia. Tästä aiheutuu töiden kasautumista aikaa vieviin vaiheisiin, keskeneräisen tuotannon määrän tarpeetonta kasvua sekä läpimenoaikojen ja niiden hajonnan kasvamista.

Tilausohjautuvan tuotannon tuotantotilausten vapauttamisessa käytetään Löddingin (2013, s. 306–319) mukaan usein menetelmiä, jotka perustuvat tilauksen eräpäivästä laskettuun aloituspäivään tai keskeneräisen tuotannon määrän hallitsemiseen. Yleisesti käytettyjä menetelmiä ovat:

- eräpäivän mukainen tuotantotilauksen vapauttaminen
- jatkuvan tuotannon ylläpitäminen
- pullonkaulaohjaus.

Eräpäivän mukaisessa tuotantotilausten vapauttamisessa tilauksille lasketaan eräpäivän perusteella aloituspäivä, jolloin tuotantotilaukset vapautetaan tuotantoon. Tilauksien vapauttamisessa ei huomioida lainkaan tuotannon sen hetkistä tilaa tai valmistuksessa olevan tuotannon määrää, sillä tuotannon sen hetkinen tila ja vapaana oleva kapasiteetti tulee huomioida jo tuotantosuunnitelmaa laadittaessa. Tuotteiden tarvitsemien materiaalien ja komponenttien tulee kuitenkin olla saatavissa ennen tuotannon aloittamista. Menetelmän käyttö edellyttää tuotannon hienosuunnittelua, ja menetelmän tarkkuus ja käyttökelpoisuus riippuvat paljolti suunnittelun tarkkuudesta. Menetelmä toimii kuitenkin suoraan yhteistyössä tuotannosuunnittelun kanssa, mikä vähentää tuotannon ohjaustarvetta. (Lödding 2013, s. 321–325)

Jatkuvan tuotannon ylläpito (CONWIP, constant work in process) on menetelmä keskeneräisen tuotannon määrän ohjaamiseen. Menetelmässä keskeneräisen tuotannon maksimi kokonaismäärä pidetään vakiona, mutta sen sallitaan siirtyä vapaasti tuotannon eri pisteiden välillä. CONWIP-menetelmää käytettäessä tuotantoon vapautetaan tuotantotilaus vasta, kun keskeneräisen tuotannon määrä on laskenut ennalta määritetyn rajan alapuolelle. (Pound et al. 2014, luku 7) Löddingin (2013, s. 337) mukaan CONWIP sopii tuotantotilausten vapauttamisen menetelmäksi niin tilausohjautuvalle, kuin varasto-ohjautuvallekin tuotannolle. Periaatekuva CONWIP-ohjauksesta on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. CONWIP, työntöohjaus ja imuohjaus. (Perustuu lähteeseen Hopp & Spearman 2000, s. 351)

Hopp & Spearman (2000, s. 349–350) esittävät CONWIP-ohjauksen muodostavan tuotantoon suljetun jonoverkon. *Kanban*-ohjaukseen verrattuna CONWIP-ohjauksessa valmistusketjuun ei ole mahdollista muodostua työpisteitä, joiden tuotanto on estetty. Pound et al. (2014, luku 7) puolestaan esittävät, että CONWIP-ohjauksessa töiden loppuminen joiltain työpisteiltä on mahdollista. Tämän varalta työntekijöiden tulisi olla moniosaavia, jotta he voivat työskennellä katkeamattomasti.

Pullonkaulaohjaus puolestaan on Löddingin (2013, s. 347) mukaan yksinkertainen ja helposti toteutettava ohjausmenetelmä keskeneräisen tuotannon määrän hallitsemiseen. Ohjauksessa tuotantoon vapautetaan seuraava tilaus, kun tuotannossa ennen pullonkaulavaihetta olevan keskeneräisen tuotannon määrä laskee ennalta määritetyn arvon alapuolelle.

2.3.3 Ohjausmenetelmien valintakriteerit

Lyhyet toimitusajat edellyttävät tuotannolta tehokkuutta, joustavuutta ja soveltuvaa ohjausta. Tilausohjautuvassa tuotannossa toimitusaika koostuu tuotannon läpimenoajasta ja tuotteiden kuljetukseen asiakkaille kuluvasta ajasta. Varasto-ohjautuvassa tuotannossa kokonaistoimitusaika riippuu tilauksen kytkeytymispisteen määrittämästä tuotteen jalostusasteesta. Varasto-ohjautuvan tuotannon toimitusajat ovat näin ollen yleisesti lyhyempiä kuin tilausohjautuvan tuotannon. (Lödding 2013, s. 19-29)

Menetelmien valinnassa tulee Poundin et al. (2014, luku 7) mukaan kiinnittää huomiota siihen, että valittu menetelmä tukee yrityksen liiketoimintastrategiaa. Ymmärrys operaatiotutkimuksen keskeisistä periaatteista menetelmiä arvioidessa edesauttaa hyvien valin-

tojen tekemistä. Taulukossa 4 on esitetty yleisimpiä menetelmiä tuotantotilausten generointiin asiakastilauksista sekä vertailtu eri vaihtoehtojen vahvuuksia ja heikkouksia (Lapinleimu 2007, s.109–113; Lödding 2013, s. 140–294).

Taulukko 4. Tuotantotilausten generoinnissa käytettäviä menetelmiä.

Ohjausmenetelmä	Vahvuudet	Heikkoudet
Tilausohjaus	Joustavuus ja epäkuranttiusriskin puuttuminen	Toimitusnopeus ja ohjaustarpeen määrä
Suunnitelmaohjaus	Nopea ja helppo	Ei ota huomioon toimitusajkoja, tuotannon nykytilaa ja eräkokoja
Syklinen ohjaus	Yhteistyö myynnin kanssa, valmistussuunnitelma muodostuu suoraan tilauskannasta	Ei sovi tuotantoon, jossa on paljon variaatiota
Yhdistetty tilaus- ja varasto-ohjaus	Taloudellisen eräkoon valinta	Varastojen kertyminen
Hierarkkinen impulssiohjaus	Tiedon ja vastuun jakautuminen taseisesi eri yksiköiden välillä	Ei aidon imuimpulssiohjauksen nopeusetua, pitkä imuimpulssiketju on jäykkä ja häiriöherkkä
Varasto-ohjaus	Nopeat toimitukset ja ohjaustarpeen minimoituminen	Suuret varastot, pääoman sitoutuminen ja epäkuranttiusvaara
Tilauspiste	Yksinkertainen toteuttaa, vähäinen ulkoisen ohjauksen tarve	Ei sovellu tuotteille, joiden kysynnässä on paljon vaihtelua, tarve ylläpitää suuria varastoja
Aito imuohjaus	Nopea ja visuaalinen, helppo toteuttaa	Tarve tuotteiden varastoinnille, ei sovellu tapauksiin, joissa tuotevarianttien määrä on suuri suhteessa kulutukseen
<i>Kanban</i> -ohjaus	Yksinkertainen ja selkeä, itseohjautuva, KET:n määrän hallitseminen	Vaatii onnistuakseen soveltuvan tuotantoympäristön
CORMA	Soveltuu ohjaamaan tuotantoa, jossa on sekä tilausohjautuvia tuotteita ja varasto-ohjautuvia tuotteita, estää katkokset materiaalivirroissa pullonkaulavaiheille	Ei hallitse KET:n määrää
Synkronoitu MRP	KET:n määrän hallitseminen, soveltuu tuotannolle jossa on paljon variaatioita	Toteutus vaatii resursseja, tuotteiden valmistus voi estyä helposti

Tuotantotilausten tuotantoon vapauttamisessa käytettävän menetelmän valintaan vaikuttavat Löddingin (2013, s. 305–319) mukaan erityisesti tuotantotilausten kehittämisessä käytettävä menetelmä, menetelmän yksinkertaisuus ja toteutettavuus, keskeneräisen tuotannon määrän hallitseminen, tuotannon läpimenoaika sekä sen ennustettavuus. Lisäksi käytössä on menetelmiä, joiden avulla voidaan saavuttaa tasapainotettu tuotanto yhdessä säädellyn KET:n määrän kanssa.

Taulukossa 5 on vertailtu yleisimpiä tuotantotilausten vapauttamiseen käytettäviä menetelmiä (Hopp & Spearman 2000, s.349–362; Lödding 2013, s. 335–346; Pound et al. 2014, luku 7). Yhteistä kaikilla esillä olevilla menetelmillä on niiden yksinkertainen toteutettavuus (Lödding 2013, s. 315–319).

Taulukko 5. *Tuotantotilausten vapauttamisessa käytettäviä menetelmiä.*

Ohjausmenetelmä	Vahvuudet	Heikkoudet
Välitön tuotannon käynnistäminen	Yksinkertainen toteuttaa, soveltuu osalle varasto-ohjautuvaa tuotantoa	Ei hallitse KET:n määrää, ei sovellu hyvin tilausohjautuvalle tuotannolle
Eräpäivän mukainen tuotantotilauksen vaputtaminen	Soveltuu käytettäväksi monien eri tuotantotilausten generointimenetelmien kanssa	Ei hallitse KET:n määrää, ei joustoa muuttuvissa tilanteissa
CONWIP	KET:n määrän hallitseminen, KET:n siirtyminen tuotantolinjalla dynaamisesti	Jokaisella työpisteellä ei välttämättä ole tehtäviä töitä
Pullonkaulaohjaus	Säätää KET:n määrää ennen pullonkaulavaihetta	Helppo toteuttaa

2.4 Tuotantoautomaatio kokoonpanotuotannossa

Tuotantoautomaation rooli länsimaisen teollisuuden kustannustehokkuuden ja liiketoiminnallisen kannattavuuden parantamisessa on merkittävä. Tuotantoautomaatiojärjestelmien avulla voidaan useissa tapauksissa alentaa tuotannon läpimenoaikaa, mikä onkin yksi tärkeimmistä syistä automaatiojärjestelmien käyttöönotolle. (Pajunen-Muhonen et al. 2004; Chung & Tanchoco 2009)

Kappalevaratuotannossa automatisoidut työvaiheet liittyvät usein materiaalin käsittelyyn. Materiaalin käsittelyn automatisointi tukee lean-toimintaa lyhentämällä materiaalien siirto- ja käsittelyaikoja sekä vähentämällä siirtelystä ja käsittelystä aiheutuvia vaurioita. Materiaalinkäsittelyn automatisoiminen mahdollistaa lisäksi valmistuksen seurannan entistä tarkemmalla tasolla. (Chung & Tanchoco 2009)

Materiaalien käsittelyyn tehtaalla on tarjolla useita erilaisia ratkaisuja. Groover (2008, s. 289–253) esittelee yleisimpiä tapoja materiaalien kuljettamiseen tehtaan sisällä ja varastointiin. Kuljettamisessa käytettävät ratkaisut perustuvat usein joko itseohjautuviin kuljetusvaunuihin (AGV, automatisoidut ohjautuvat ajoneuvot) tai erilaisiin kuljetinratkaisuihin. Itseohjautuvat kuljetusvaunut liikkuvat tehtaassa seuraamalla tehtaan lattiaan upotettuja magneettisia ohjauskiskoja. Kuljetusvaunuissa siirrettävät materiaalit on usein pinottu joko kuormalavalle tai erityisiin kuljetusyksiköihin. Kuljettimia käytetään usein materiaalien siirtämiseen työpisteiden välillä. Tyypillisiä ratkaisuja kuljettimiksi ovat erilaiset liukuhihnat kevyemmälle tuotannolle ja kuljetinkiskot raskaammalle tuotannolle.

Automatisoidun varastoinnin tehtävänä yleisesti on lyhentää materiaalin käsittelyyn kuluva aikaa, minkä lisäksi sen avulla pyritään parantamaan tehtaan tilankäyttöä vähentämällä tarvittavien varastojen tilantarvetta. Automatisoituja varastoja käytetään usein komponenttivarastoina, materiaalien syöttämiseen kokoonpanopisteille, puskurivarastoina työnvaiheiden välillä ja loppukokoonpanoa edeltävänä varastona. (Groover 2008, s. 337–345)

Komponenttien syöttäminen kokoonpanopisteelle tehdään automatisoidussa tuotannossa usein erilaisten syöttölaitteiden avulla. Carlisle (2009) esittelee käytännön ratkaisuja kokoonpanotuotannon komponenttien joustavaan syöttämiseen, niihin tarttumiseen ja niiden paikoittamiseen. Jotta komponentti voidaan automatisoidusti siirtää paikasta toiseen, täytyy sen sijainti ja orientaatio voida määrittää tarkasti. Syöttölaitteesta riippuen komponentit ovat ennen niiden tuomista laitteeseen joko valmiiksi orientoituna, tai niiden orientointi tehdään vasta komponentteja syötettäessä. Etuna jälkimmäisellä vaihtoehdolla on komponenttien tilankäytön tehokkuus. Toisaalta komponenttien tulee tällöin olla riittävän kestäviä, eikä niiden välisen kontaktin kuljetuksen ja syöttämisen aikana tule heikentää tuotteiden laatua. Komponenttien paikoittaminen voidaan tehdä myös ilman fyysistä kontaktia: uudenlaiset 3d-konenäköjärjestelmät tarjoavat ratkaisuja ongelmiin, joissa komponentit halutaan toimitettavan tilankäytöltään mahdollisimman edullisissa toimitusyksiköissä, mutta ne eivät muotonsa tai kokonsa puolesta sovellu paikoitettavaksi mekaanisten syöttölaitteiden avulla.

Automatisoinnin mahdollisuudet eivät rajoitu pelkästään materiaalin käsittelyyn. Automaattisen tarkastuksen avulla tuotannon arvoa tuottavan toiminnan osuutta voidaan kasvattaa. Groover (2008, s. 655–657) esittää automatisoidun tarkastuksen vähentävän lähes aina tarkastukseen kuluva aikaa sekä inhimillisen virheen mahdollisuutta. Sekä manuaalisessa että automatisoidussa tarkastamisessa käytettävällä menetelmällä on suuri vaikutus tuloksiin. Yksinkertaisissa kappaleen fyysisten dimensioiden mittauksissa on mahdollista saavuttaa hyvä mittausvarmuus, mutta ihmissilmän avulla tehtävät visuaaliset tarkastukset ovat jo huomattavasti haastavampia. Visuaaliset tarkastukset automatisoidaan usein konenäköjärjestelmiä käyttäen. Tulosten varmuus riippuu tällöin tarkasteltavasta kappaleesta, valaistuksesta, kamerasta ja siihen liitetystä optiikasta, sekä kuvien prosessoinnista (Groover 2008, s. 698–704).

2.5 Muutosten hallittu toteuttaminen tuotantoympäristöissä

Onnistunut muutosten läpivienti organisaatiossa on edellytys muutosprojektin tavoitteiden saavuttamiselle. Netland (2016) väittää tutkimuksessaan suurimman osan yritysten kehitysprojekteista epäonnistuvan. Tärkeimmäksi onnistumiseen johtavaksi tekijäksi (CSF, critical success factors) hän esittää kehitysprojektien toteuttamisen yksilöllisyyden, organisaation koon ja toimintatapojen vaikuttaessa voimakkaasti muutosten läpivientiin. Tärkeää on lisäksi johdon sitouttaminen toteutettavaan kehitysprojektiin sekä koko henkilöstön kouluttaminen.

Wilsonin (2015) mukaan tuotannon kehitysprojekteissa helppo tapa epäonnistua on antaa kaikki vastuu organisaatiomuutoksesta yhdelle keskijohdon työntekijälle. Muutosten laajuus ja niiden määrä on monesti mitoitettu liian suuriksi, jotta kukaan yksittäinen henkilö kykenisi ne toteuttamaan. Lisäksi suuria muutoksia on lähtökohtaisesti vaikea saada toteutettua täydessä laajuudessaan yhdellä kerralla, epäonnistumisen mukanaan tuovat riskit kasvavat, ja pysyvien muutosten saaminen yrityskulttuuriin on vaikeaa.

Luomalan (2008) mukaan johtajien kyvykkyys muutosten läpivientiin on tärkeää. Muutosjohtajien täytyy pystyä selkeästi esittämään konkreettinen tarve tehtäville muutoksille. Sekä Luomala (2008) että Netland (2016) huomauttavat, että johtajien tulee kyetä motivoimaan muutokseen osallisia työntekijöitä ja antamaan heille tilaa ja mahdollisuuksia osallistua muutosten suunnitteluun ja toteuttamiseen. Erityisen tärkeää on tunnistaa muutosprojektin avainhenkilöt, jotta heidät voidaan ottaa mukaan muutosten suunnitteluun.

Muutosjohtaminen vaatii tuntemusta ihmisten kanssa toimimisesta, ja hyvä muutosjohtaja pystyy ottamaan huomioon ihmisten erilaiset tarpeet ja elämäntilanteet muutoksista tiedotettaessa. Hyvä muutosjohtaja osaa myös käyttää hyväkseen luontaista karismaansa perustellessaan muutostarpeen työntekijöille. Lisäksi henkilöstön mielipiteiden huomiointi ja heidän osallistamisensa muutosten suunnitteluun kuuluvat hyvän muutosjohtajan luonteenpiirteisiin. Projektin etenemisestä tulee tiedottaa oikea-aikaisesti, jotta voidaan välttyä ylimääräisiltä peloilta ja epävarmuuksilta tulevaisuuden kannalta. Muutoksen tuomien positiivisten vaikutusten lisäksi muutoksesta seuraa työntekijöille myös jossain määrin epämiellyttäviä asioita. Jotkin henkilöt kokevat pienetkin muutokset omassa työympäristössä hyvin epämiellyttäviksi. (Luomala 2008)

Ennen varsinaista muutosten toteuttamisen aloittamista on syytä laatia muutossuunnitelma. Muutossuunnitelmassa on Luomalan (2008) mukaan huomioitava, että muutosprossiin täytyy varata aikaa, jotta mukautuminen uusiin työtehtäviin onnistuu ongelmitta. Muutossuunnitelmassa otetaan huomioon muutosvastarinta, ja sen kehittyminen lievästä voimakkaaseen pyritään estämään. Lievä muutosvastarinta sisältää useimmiten tavoitteiden ja muutosten positiivisten vaikutusten kyseenalaistamista. Lievää muutosvastarintaa esiintyy melkein poikkeuksetta ja se menee useimmiten nopeasti ohi. Voimakas muutosvastarinta on kestoaltaan pidempää ja sen vaikutuksen intensiteetti on voimakkaampaa.

Voimakkaalla muutosvastarinnalla voi olla merkittäviä haittavaikutuksia työmotivaatioon sekä muutostavoitteiden saavuttamiseen.

Muutosten johtaminen on perimmäältään ihmisten johtamista. Työhönsä ja elämäänsä tyytyväiset ihmiset ovat keskimäärin motivoituneita ja kyvykkäitä työntekijöitä. Luomalan (2008) mukaan henkilöstön itseohjautuvuus työpisteiden ja työmenetelmien valinnassa edistää työntekijöiden tyytyväisyyttä. Työhyvinvoinnin kehittämisen apuvälineeksi kannattaa muutoksen aikana ottaa käyttöön työhyvinvointisuunnitelma. Yhdessä työntekijöiden kanssa laadittavaan suunnitelmaan merkitään huomioita ja toimia, joiden avulla työntekijöiden hyvinvointia voidaan parantaa päivittäisessä toiminnassa. Esimerkkinä työhyvinvoinnin kehittämisestä on kiinteässä työpisteessä työtä tekevien henkilöiden liikkuminen, jota voidaan edistää esimerkiksi taukotilojen sijoittelulla (Henkilöstöliikunta-barometri 2015).

3. TUOTANTOJÄRJESTELMIEN ANALYSOINTI JA KEHITTÄMIEN SIMULOIMALLA

Kotimaisten kielten keskuksen (2016) sanakirjan mukaisesti simuloinnilla tarkoitetaan teknillistieteellisessä kontekstissa jonkin asian jäljittelyä. Tarkemmin simuloinnin määrittelee Banks (2003), jonka mukaan simulointi on tosielämän prosessien ja systeemien jäljittelemistä määritellyn ajanjakson yli. Simulointiin kuuluu hänen mukaansa lisäksi keinotekoisien, historiatietoon perustuvan mallin luominen ja sen ominaispiirteiden vertaaminen alkuperäiseen, todelliseen systeemiin tai järjestelmään.

Simulointi voidaan jakaa kahteen perustyyppiin, jatkuvaan ja tapahtumapohjaiseen simulointiin (DES, discrete event simulation). Jatkuvapohjaisessa simuloinnissa jäljitellään järjestelmiä ja systeemeitä, jotka muuttuvat jatkuvasti ajan funktiona. Tapahtumapohjaisessa simuloinnissa malli koostuu toisistaan erillisistä, peräkkäisistä ja rinnakkaisista vaiheista. Tapahtumapohjainen simulointi on yleisesti käytössä tuotantojärjestelmien simuloinnissa, koska sen avulla voidaan analysoida laajojakin tuotantojärjestelmiä. Tapahtumapohjainen simulointi mahdollistaa myös tilastollisten jakaumafunktioiden käytön mal- leissa. (Ng et al. 2014)

Simulointimallin tulee Banksin (2003) mukaan olla riittävän monipuolinen, jotta se kykenisi tarjoamaan vastauksia esitettyihin kysymyksiin, mutta tarpeeksi yksinkertainen, jotta simulointiprojektin läpivieminen on ylipäättänsä mahdollista. Simulointimalli ei kuitenkaan koskaan vastaa täysin todellisuutta, siksi mallia rakennettaessa on tärkeää keskittyä simulointiprojektille määritettyjen tavoitteiden toteutumiseen (van der Aalst 2011, s. 30).

Tuotantojärjestelmien simulointia voidaan Carsonin (2005) mukaan käyttää moneen tarkoitukseen. Yleisimmin simulointia käytetään apuvälineenä nykyisen tuotantojärjestelmän kehittämiseen tai kokonaan uuden tuotantojärjestelmän rakentamiseen. Simulointiohjelmistojen avulla voidaan kohtuullisen helposti rakentaa samoista komponenteista ja lähtökohdista useampia erilaisia malleja ja verrata niitä keskenään. Simulointia voidaan täten käyttää myös operatiivisen päätöksenteon apuvälineenä (Ng et al. 2014). Näiden lisäksi simulointimalleja voidaan Fowler et al. (2006) mukaan käyttää myös tuotannon- suunnittelun apuvälineenä. Simuloinnin avulla tehtävät tuotannosuunnitelmat ja niiden optimoinnit kattavat useimmiten vain lyhyen aikajänteen nykyhetkestä tulevaisuuteen, eikä niissä oteta juurikaan huomioon tavanomaisissa tuotantojärjestelmien simuloin- neissa esiintyviä satunnaisuuksia.

3.1 Prosessien simuloimisen lähtökohtia

Organisaatioilla on Martinsuon & Blomqvistin (2010) mukaan tarve kilpailukyvyyn, toiminnan laadun sekä asiakaskeskeisyyden ja -tyytyväisyyden kehittämiseen. Jotta organisaatiot voisivat saavuttaa toiminnalleen asetetut päämäärät, on uusien toimintatapojen käyttöönotto monesti tarpeen. Carsonin (2005) mukaan simulointimallien avulla voidaan edesauttaa uusien toimintatapojen ja prosessien käyttöönottoa: simulointimalleja ja niiden pohjalta tehtyjä animaatiota voidaan käyttää uusien toimintatapojen kouluttamiseen organisaation eri henkilöille.

Organisaatiolle ja sen prosesseille asetettujen tavoitteiden saavuttamiseksi organisaatiot kokeilevat erilaisia prosessivaihtoehtoja ja pilotoivat niitä. Pilotointi voi olla vaihtoehtojen testaamista todellisessa tai simuloitussa ympäristössä. (Martinsuo & Blomqvist 2011) Simuloitussa ympäristössä testaaminen on useimmiten edullisempaa, eikä se aiheuta häiriötä yrityksen päivittäiseen toimintaan (Law 2015).

Ennen simulointien tekemistä on Martinsuon & Blomqvistin (2010) mukaan mallinnettava nykyiset valmistusprosessit. Prosessien mallintamista varten nykyisistä prosesseista täytyy kerätä havaintoja ja tietoa, jotta niiden nykytila voidaan määrittää riittävällä tarkkuudella.

3.2 Simulointiprosessin läpivienti

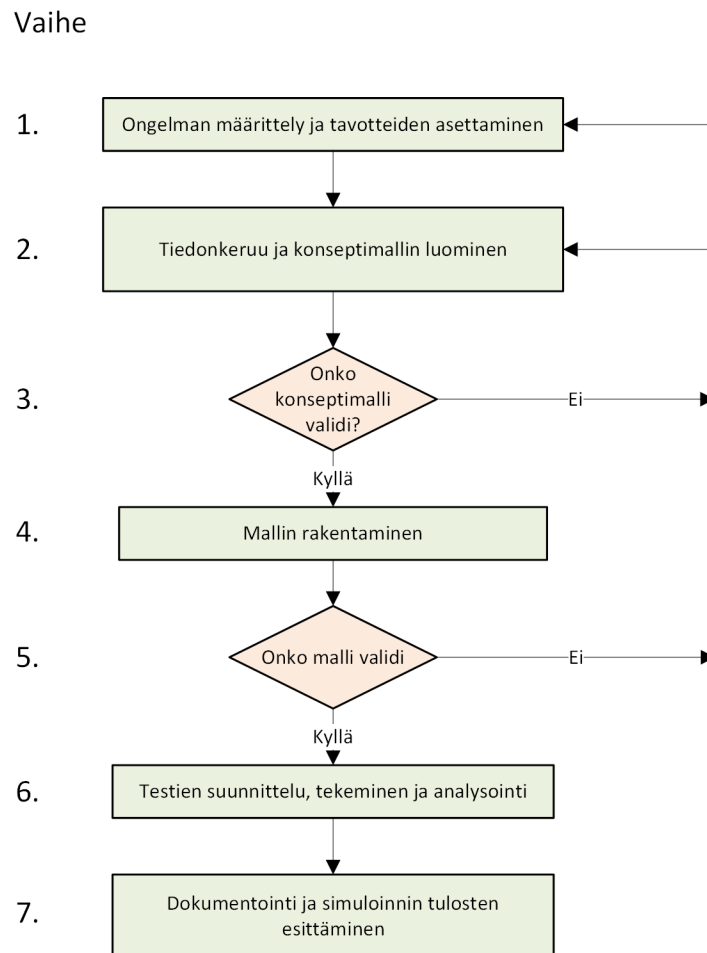
Prosessikehitystyön ensimmäisiä vaiheita on Martinsuo & Blomqvistin (2010) mukaan kehittämishankkeiden päämäärien ja rajausten määrittäminen. Rajausten ja tavoitteiden asettaminen edesauttaa projektin etenemistä haluttuun suuntaan ja tekee mahdolliseksi projektin onnistumisen (van der Aalst 2011, s. 30).

Projektin päämäärien ja rajausten asettaminen on myös Law'n (2005), Carsonin (2005) ja Banksin (2003) määrittelemissä simulointiprojektin läpivienneissä ensimmäinen vaihe. Kaikkien kolmen esittämässä simulointiprojekteissa on esillä lähestulkoon samat asiiasällöt, mutta niiden painotuksissa ja vaiheistuksissa on joitain eroavaisuuksia.

Law'n (2005) esittämässä prosessissa painotuksena on validien ja uskottavien simulointimallien rakentaminen. Avainkohtia hyvän mallin rakentamiselle ovat tarkan projektisuunnitelman luominen, vuorovaikutus muiden projektissa mukana olevien kanssa ja potentiaalisten ongelmien tunnistaminen. Kuvassa 14 on esitetty Law'n määrittelemän simulointiprojektin vaiheet.

Carsonin (2005) määrittämässä simulointiprosessissa painotuksena on projektihenkilökunnan kyvykkyys, kommunikointi ja sitoutuminen sekä kerätyn datan käsittely. Toisin kuin Law'n (2005) mallissa, Carsonin (2005) mallissa varsinainen tiedonkeruu tehdään

vasta konseptimallin luomisen ja simulointimallin rakentamisen jälkeen. Prosessissa seuraavana olevat vaiheet noudattavat hyvin pitkälti Law'n (2005) määrittämää prosessia.



Kuva 14. Simulointiprojektin vaiheiden läpiviennit. (Perustuu lähteeseen Law 2005)

Banksin (2003) esittämä malli noudattaa myös hyvin pitkälti Law'n (2005) mallia. Hänen prosessissaan varsinainen simulointimalli pohjautuu suoraan konseptimalliin. Simulointiprojektissa painottuu Banksin (2003) mukaan simulointimallin ohjelmoiminen ja mallin sopivan tarkkuuden määrittäminen.

3.2.1 Ongelman määrittely ja tavoitteiden asettaminen

Simulointimallin tehtävänä on tarjota vastauksia määritetyille ongelmille. Projektin onnistumisen kannalta on tärkeää, että projektin avainhenkilöt osallistuvat aktiivisesti simulointiprojektissa tutkittavan ongelman määrittämiseen ja projektin tavoitteiden asettamiseen. Lopulliset päätökset simulointiprojektissa tekee kuitenkin projektista vastaava simulointianalyttikko, koska hänellä on simulointiprojektien läpiviennistä parhaiten kokemusta (Carson 2005).

Simulointiprojektin ensimmäisessä vaiheessa tehtäviä päätöksiä ovat Carsonin (2005) ja Law'n (2005) mukaan:

- simulointimallin rajaukset ja laajuus
- yksityiskohtaisuus
- projektin laajuus
- mallinnettavat tuotantojärjestelmävaihtoehdot
- simulointiprojektin aikajänne ja projektiin tarvittavat resurssit.

Carsonin (2005) mukaan päätös simulointiprojektin aloittamisesta tehdään ensimmäisessä vaiheessa tehdyn aika- ja kustannusarvion pohjalta. Projektin tarkempi määrittely täsmentyy kuitenkin Law'n (2005) ja Banksin (2003) mukaan usein projektin edetessä, joten useissa tapauksissa ongelman määrittelyä ja projektin tavoitteita joudutaan muuttamaan useampaan kertaan. Simulointiprojektin keston ja kustannusten tulisi kuitenkin pysyä lähellä alun perin tehtyjä arvioita.

3.2.2 Tiedonkeruu ja konseptimallin luominen

Aineiston keruussa on Carsonin (2005) mukaan huomioitava erityisesti simulointiprojektille asetetut tavoitteet ja tiedon saatavuus. Tarvittavaa tietoa ei läheskään aina ole saatavilla, ja simulointia varten kerätty tieto tarvitsee siistimistä. Tietoa simulointimalliin saadaan usein tietokannoista, käsinkirjoitetuista muistiinpanoista, tiedonkeruujärjestelmistä ja työntutkimuksen avulla. Aineiston keruuta simulointiprojektia varten on käsitelty tarkemmin alaluvussa 3.3.

Aineiston keruun lisäksi simulointiprojektin alkuvaiheen tärkeä osa on konseptimallin kehittäminen. Konseptimallin kehittäminen aloitetaan tekemällä todellisesta systeemistä karkea malli, jota täsmennetään, kunnes haluttu yksityiskohtaisuus on saavutettu (Banks 2003). Carsonin (2005) mukaan konseptimallin tulee olla tehty niin, että se on helposti ymmärrettävä myös vähemmän asiaan perehtyneiden henkilöiden osalta. Mallista tulee selvittää simulointiprojektin tavoitteet ja simulointimalliin tulevat yksinkertaistukset.

Konseptimallin kehittämisen jälkeen sen validiteetti tarkistetaan ja siihen tehdään tarvittavat muutokset. Projektin tarkat määritykset selviävät usein vasta konseptimallia tehdessä, joten muutokset konseptimalleissa ovat yleisiä. (Law 2005)

3.2.3 Simulointimallin rakentaminen, verifiointi ja validointi

Konseptimalli muutetaan simulointimalliksi ohjelmoimalla se käyttäen tehtävään soveltuva simulointiohjelmistoa. Ohjelmoinnin aikana mallin toimintaa tulee tarkastella säännöllisesti. Tarkastelun aikana tulee varmistua siitä, että malli käyttäytyy halutulla tavalla. (Banks 2003)

Ohjelmoinnin jälkeen simulointimallin validiteetti tulee varmistaa. Validointiin käytettäväksi menetelmäksi Law (2005) esittää vertailua todellisen ja keinotekoisien systeemin välillä, mikäli se on mahdollista. Yksinkertaisimmillaan simulointimalliin syötetään samat lähtötiedot kuin todellisessa järjestelmässä ja molempien järjestelmien toteutuksia verrataan keskenään. Mallin eri komponenttien herkkyyttä muutoksille tulisi myös testata tekemällä eri komponenteille herkkyyksianalyysi.

3.2.4 Testien suunnittelu, tekeminen ja analysointi

Projektin tavoitteiden täyttämiseksi simulointimallin avulla halutaan testata erilaisia vaihtoehtoja ja niiden vaikutuksia tuotantojärjestelmään. Simulointimallilla tehtävien koejärjestelyjen suunnittelussa tulee Carsonin (2005) mukaan ottaa huomioon lähtöarvoihin tehtävät muutokset, simulointimallin ajoaika sekä yksittäisten tapahtumien toistojen määrä. Muutosten laajuus riippuu simulointiprojektin tavoitteista: halutaanko kokeilla useita, jopa satoja erilaisia vaihtoehtoja vai keskittyä yksityiskohtaisemmin muutaman ennalta valitun vaihtoehdon testaamiseen.

Lähtöarvoihin tehtävillä muutoksilla pyritään tavallisesti kokeilemaan mallin käyttäytymistä eri tilanteissa, ja lähtöarvoja muuttamalla pyritään parantamaan järjestelmän toimintaa. Tarvittava lämmitysaika ja simulointimallin ajoaika riippuvat paljon simulointimallin tyypistä ja simuloitavan järjestelmän rakenteesta. Toistojen määrä riippuu halutusta tilastollisesta tarkkuudesta. (Carson 2005)

Testien tulokset analysoidaan perustuen projektin alussa määriteltyihin mittareihin. Tarkastelussa usein käytettäviä mittareita ovat kokonaistuotantomäärä, keskeneräisen tuotannon määrä, läpimenoaika ja tuotantoresurssien käyttöaste. Mikäli toteutetut simulatiot eivät tarjoa vastauksia esitettyihin kysymyksiin, on usein tarpeen toistaa simulointeja suuremmalla tarkkuudella tai toteuttaa uusia testejä. (Carson 2005)

3.2.5 Dokumentointi ja simuloinnin tulosten esittäminen

Viimeisenä vaiheena simulointiprojektissa on sen dokumentointi ja tulosten esittäminen. Carsonin (2005) mukaan simulointiprojektin tuloksista olisi hyvä olla sekä varsinainen kirjallinen dokumentti että esittelykalvot. Banksin (2003) ja Law'n (2005) mukaan simulointimalli tulee dokumentoida, jotta rakennettua mallia voidaan käyttää tulevaisuudessa myös uudestaan.

Simulointiprojektin dokumentoinnissa on esitettävä simuloinnin lähtökohdat ja lopputulokset (Banks 2005). Lisäksi dokumentoinnin tukena tulisi olla simulointimallien animaatioita ja selvitys mallin validoinnin aikana tehdyistä työvaiheista (Law 2005).

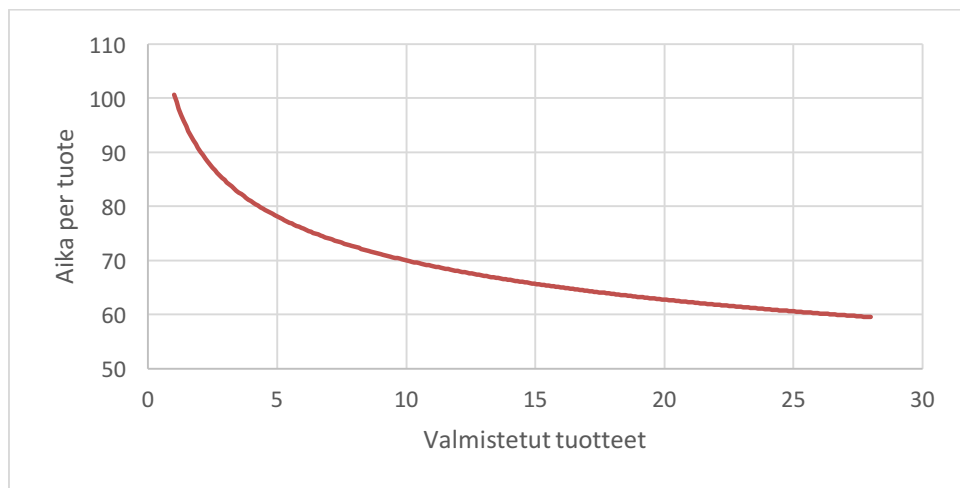
3.3 Aineiston keruun menetelmiä

Koska simulointi on todellisen imitointia keinotekoisessa ympäristössä, tarvitaan simulointien lähtötiedoiksi riittävän tarkkaa tietoa prosessin ominaisuuksista, siinä esiintyvien vaiheiden kestoista sekä niiden vaihtelusta. Lähtötietojen keruu on simulointien käyttökelpoisuuden ja tarkkuuden kannalta tärkeä työnvaihe: tarkan vertailukohteen määrittäminen mahdollistaa eri vaihtoehtojen luotettavan vertailun.

Referenssin määrittäminen ja siihen vertaaminen on mahdollista, kun tuotantoprosessi on mahdollisimman pitkälle vakioitu. Tällöin siinä esiintyvien työmenetelmien ja työnvaiheiden kestojen tulee olla vakioituja. (EK-SAK tuottavuustyöryhmä 2011)

3.3.1 Standardoidut työnvaiheiden kestot

Standardoiduilla työnvaiheiden kestoilla, standardiajoilla tai normiajoilla, tarkoitetaan Aftin (2015) mukaan tyypillisen työntekijän ennalta määrätyn tehtävän tekemiseen käyttämää aikaa. Standardiajassa huomioidaan myös työntekijöiden tavanomaiset tarpeet, kuten sosiaalityöikä käyminen ja nestetasapainon ylläpito. Tyypillisellä työntekijällä tarkoitetaan henkilöä, joka ei ole nopein tai hitain, vaan edustaa keskivertoa nopeudessa ja tehokkuudessa. Työtahti nopeutuu tavallisesti työtehtävään harjaantumisen edetessä. Kuvassa 15 on esitetty tavanomainen oppimiskäyrä tuotteita valmistettaessa.



Kuva 15. Kuvaus oppimiskäyrän vaikutuksesta työntekijän tehokkuuteen. (Perustuu lähteeseen Aft 2015)

Tavallinen työtahti edustaa nopeutta, jonka tyypillinen työntekijä kykenee ylläpitämään koko päivän. Todellisuudessa kenenkään työtahti ei ole koko päivää vakio, vaan se vaihtelee väsyneisyyden ja työmotivaation mukaisesti. (Aft 2015; EK-SAK tuottavuustyöryhmä 2011)

Standardiaikoja kehitetään mittaamalla työtä sen tekemiseen kuluvan ajan tai sen aiheuttaman kuormituksen perusteella. Useimmiten tarve standardiaikojen kehittämiseksi eri

työnvaiheille on peräisin tuotannosuunnittelun tarpeista. Jotta tilaukset voidaan aikatauluttaa tuotantoon, tarvitaan tietoa niiden kestoista. Lisäksi vakioitujen työaikojen perusteella voidaan arvioida henkilöstötarvetta tuotannon eri toiminnoissa ja tasapainottaa tuotantojärjestelmän eri resurssit suunnitelluille tuotantomäärille. Standardiaikoja käytetään myös materiaalintarpeen laskentaan, valmistuskustannusten laskemiseen ja työntekijöiden arviointiin ja palkitsemiseen. (Aft 2015) Simulointiprojektissa työnvaiheiden kestoja tarvitaan mallin komponenttien kestoaikojen määrittämiseen (Carson 2005; Bangsow 2015).

3.3.2 Työn mittaaminen

Työmittauksen tehtävänä on EK-SAK tuottavuustyöryhmän (2011) ja Aftin (2015) mukaan työtehtävien standardiaikojen kehittäminen. Työmittauksessa käytettäviä menetelmiä ovat:

- normaaliaikatutkimus
- ajankäyttötutkimus
- havainnointitutkimus
- liikeikatutkimus
- standardiaikajärjestelmät.

Edellä mainitut menetelmät perustuvat tutkimuskohteen havainnointiin tai mittaamiseen. Näiden lisäksi työntutkimusta voidaan Aftin (2015) mukaan tehdä myös pelkkään arviointiin perustuen. Arvioiminen perustuu monesti aikaisempaan tietoon tai aikaisempiin kokemuksiin vastaavanlaisista työtehtävistä. Työmittauksen tekeminen arvioimalla ei kuitenkaan ole täsmällisyyteen kykenevä menetelmä, eivätkä siitä saadut tulokset ole kovinkaan luotettavia. Parhaiten standardiaikojen määrittämiseen soveltuvat EK-SAK tuottavuustyöryhmän (2011) mukaan liikeikatutkimus ja normaaliaikatutkimus.

Havainnointiin perustuvat menetelmät, joita ovat ajankäyttötutkimus ja havainnointitutkimus, soveltuvat parhaiten ajankäytön jakautumisen selvittämiseen. Ajankäyttötutkimuksessa kerätään jatkuva-aikaisesti havainnoita yksittäisestä työstä tai työntekijästä. Tutkimuksen avulla pyritään selvittämään työtehtävien tekemisjärjestystä ja työn jakautumista eri työntekijöiden välillä sekä kehittämään standardiaikoja työtehtäviin, joissa työnvaiheiden järjestystä ei ole ennalta määritetty. (EK-SAK tuottavuustyöryhmä 2011)

Havainnointitutkimuksessa havainnointia tehdään tietyin määräväleihin. Havainnointitutkimuksessa voidaan seurata yhtä tai useampaa työntekijää tai konetta samanaikaisesti. Tehdyt havainnot kirjataan ylös ja ne jaotellaan kuuluvaksi joko tekemisaikaan, apu-aikaan, tauko-aikaan tai häiriö-aikaan. Havainnointitutkimuksen avulla voidaan verrata tapahtumien esiintymisten ja niiden kategorioiden välistä suhdetta ja näin ollen selvittää työnteon tehokkuutta tutkimuskohteessa. (EK-SAK tuottavuustyöryhmä 2011; Aft 2015)

Liikeaikatutkimus ja standardiaikajärjestelmät perustuvat EK-SAK tuottavuustyöryhmän (2011) mukaan ennalta määritettyihin, taulukoituihin arvoihin. Liikeaikatutkimuksessa kokonaisten työnvaiheiden kestot on laskettu useamman osavaiheen, yksittäisten liikkeiden, kestojen summana. Standardiaikajärjestelmissä työ on jaettu huomattavasti karkeampiin osavaiheisiin, kuten esimerkiksi kävelyyn varaston ja työpisteen välillä ja yhden kokoonpanovaiheen tekemiseen. Liikeaikatutkimusta ja standardiaikajärjestelmiä käytetään useimmiten silloin, kun muita standardiaikojen kehittämiseen käytettäviä menetelmiä ei voida käyttää (Aft 2015).

3.3.3 Normaaliaikatutkimus

Ajan mittaaminen on Aftin (2015) ja EK-SAK tuottavuustyöryhmän (2011) mukaan soveltuva menetelmä aikastandardien kehittämiseksi työlle, joka sisältää paljon toistuvuutta ja on kohtuullisen lyhytkestoista. Normaaliaikatutkimuksen läpivienti koostuu:

- työnvaiheisiin ja -menetelmiin perehtymisestä ja niiden dokumentoinnista
- parhaiden työmenetelmien valinnasta
- työn osittelusta työeriin
- työaikojen mittauksesta ja kirjauksesta
- mittausepävarmuuden arvioinnista
- tulosten julkaisemisesta.

Tutkimuksen onnistumisen kannalta on Aftin (2015) mukaan tärkeää, että tutkimuksen aikana käytettävät työmenetelmät pysyvät vakioina. Edellytyksiä hyvälle työmenetelmälle ovat sen tehokkuus ja alhainen työntekijään kohdistuva kuormitus. Ajan mittauksessa työvälineenä on usein käytössä tavanomainen sekuntikello. Mobiililaitteiden avulla käytettävien sovellusten, kuten Quetechin WorkStudy+:n, käyttäminen edesauttaa mittausten onnistumista poistamalla tarpeen kirjata tulokset paperille. Quetech WorkStudy+-sovellus tekee mahdolliseksi useista eri osavaiheista koostuvan työnvaiheen kestojen mittaamisen ja tulosten automaattisen tallentamisen. Eri osavaiheet näkyvät sovelluksessa samalla ruudulla, josta vaiheen mukaan nimettyä painiketta koskettamalla käynnistetään ja lopetetaan kunkin osavaiheen ajan mittaaminen. Yksi mittausyksiö tuottaa yhden aikahavainnon.

Mittauksissa tulee Aftin (2015) mukaan pyrkiä tasalaatuisuuteen ja siihen, että työntekijöiden työtahti olisi mahdollisimman lähellä heidän normaalia työskentelytahtia. Työtahdin ei voida kuitenkaan olettaa olevan vakio koko päivää. Työn edistymiseen vaikuttaa joutuisuuden lisäksi työntekijän tarvitsema apuaika, joka pitää sisällään työntekijän tauot sekä työntekijän päivittäin tekemät valmistelut, huoltotoimenpiteet, tarkistukset ja työpisteen siistimisen. Kun seurataan työtä koko päivän ajan, voidaan seurata työnvaiheiden kestojen ja edellä mainittujen apuaikojen lisäksi myös työntekijän väsymistä.

Standardiaikojen laskeminen

Standardiaikojen kehittämiseksi EK-SAK tutkimustyöryhmä (2011) esittää tavan laskea työlle normaaliarvo, jossa on huomioitu työnvaiheista mitattujen tulosten keskiarvot ja joutuisuus.

Yksittäisen mitatun vaiheen aikahavaintojen keskiarvo lasketaan aritmeettisena keskiarvona kaavan (1) mukaisesti

$$t_v = \frac{t_1+t_2+t_3+\dots+t_n}{n}, \quad (1)$$

missä t_v on valittu aika [min], t_n on yksittäinen aikahavainto [min] ja n on mittaussykylien lukumäärä [kpl].

Keskijoutuisuus lasketaan vastaavalla tavalla aritmeettisena keskiarvona kaavan (2) mukaisesti

$$k_j = \frac{k_{j1}+k_{j2}+k_{j3}+\dots+k_{jm}}{m}, \quad (2)$$

missä k_j on keskijoutuisuus, k_{jm} on yksittäinen joutuisuuskerroin ja m on keskijoutuisuushavaintojen lukumäärä [kpl].

Joutuisuuteen vaikuttavat työntekijän harjaantuneisuus ja työmotivaatio. Tyypillinen työntekijä työskentelee normaalijoutuisuudella. Joutuisuuskerroin arvioidaan yleensä aikahavaintojen tekemisen yhteydessä ja sen normaaliarvo on 1,00. Kertoimelle voidaan antaa muita arvoja, mikäli seurattavan työntekijän suoritustason havaitaan olevan normaalista poikkeava.

Työerien normaaliajat lasketaan kaavan (3) mukaan

$$t_n = k_j * t_v + \frac{t_{aset}}{n_{erä}}, \quad (3)$$

jossa t_n on työn normaaliaika [min], t_{aset} on tuotantoeräkohtainen asetusaika [min] ja $n_{erä}$ on valmistettavan tuotantoerän suuruus [kpl].

Työn normaaliarvo eli työerien normaaliaikojen summa lasketaan kaavan (4) mukaisesti

$$t_N = \sum t_n, \quad (4)$$

missä t_N on työn normaaliarvo [min].

Päivittäinen apuaika lasketaan kaavan (5) mukaan

$$t_a = t_{pv} + t_E, \quad (5)$$

missä t_a on apuaika [min], t_{pv} on päiväväkio [min] ja t_E on elpymisaika [min]. Päiväväkio sisältää työpisteen siistimisen, työkoneiden päivittäiset huollot, tuntikortin leimaukset ja muut pakolliset tehtävät, jotka eivät sisälly varsinaiseen arvoa tuottavaan työhön. Päiväväkion arvo määritetään mittaamalla. Päivittäisen elpymisajan ohjearvot suotuisissa lämpötilaolosuhteissa on määritetty liitteessä E.

Varsinainen apuaikalisa lasketaan kaavan (6) mukaan

$$l_a = 100 * \frac{t_a}{t - t_a}, \quad (6)$$

missä l_a on apuaikaprosentti [%] ja t on päivittäinen kokonaistyöaika [min].

Työarvo kuvaa tyypillisen työntekijän yhteen työvaiheeseen keskimäärin käyttämään aikaa. Työvaiheen työarvo, jossa on otettu huomioon työn normaaliarvo ja apuaika, voidaan laskea kaavan (7) mukaan

$$T = t_N + l_a * \frac{t_N}{100}, \quad (7)$$

missä T on työarvo [min].

Tulosten luotettavuus ja tarkkuus

Aftin (2015) mukaan mitattujen normaaliaikojen tulosten luotettavuuden takaamiseksi mittaussykliä eli yksittäisten aikahavaintojen lukumäärän tulee olla riittävän suuri. Mittattavien syklien määrä riippuu:

- tulosten halutusta luottamustasosta [%] ja
- tulosten halutusta tarkkuudesta [%].

Tarvittavien syklien määrä voidaan laskea kaavan (8) mukaisesti

$$n = \frac{s^2 z^2}{k^2 \bar{x}^2}, \quad (8)$$

missä s on mittaustulosten keskihajonta, k on haluttava tarkkuus, z on standardoitu taulukkoarvo ja \bar{x} on mittaustulosten keskiarvo. Taulukossa 6 on esitetty likimääräinen z :n arvo ja sitä vastaava luottamustaso.

Taulukko 6. Luottamustaso ja sitä vastaava z:n arvo. (Aft 2015)

Luottamustaso (%)	z:n arvo (likimääräinen)
50	0,67
60	0,84
70	1,04
75	1,15
80	1,28
85	1,44
90	1,645
95	1,96
99	2,575

Keskihajonta mittaustuloksille lasketaan kaavan (9) perusteella

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}}, \quad (9)$$

missä x on yksittäinen mittaustulos.

Mittaussyklien määrä tulee Aftin (2015) mukaan laskea jokaiselle mitatulle työvaiheelle erikseen. Ennen mittausvarmuuden laskemista tulosten luotettavuudelle ja tarkkuudelle täytyy antaa tavoitearvot. Mikäli tavoitearvojen mukainen mittaussyklien määrä ei täyty, täytyy mittauksia jatkaa, kunnes laskettu tarvittavien mittaussyklien määrä tulee täyteen. Kaavoja (8) ja (9) voidaan käyttää myös kerätyn aineiston luotettavuuden ja tarkkuuden arvioimiseen.

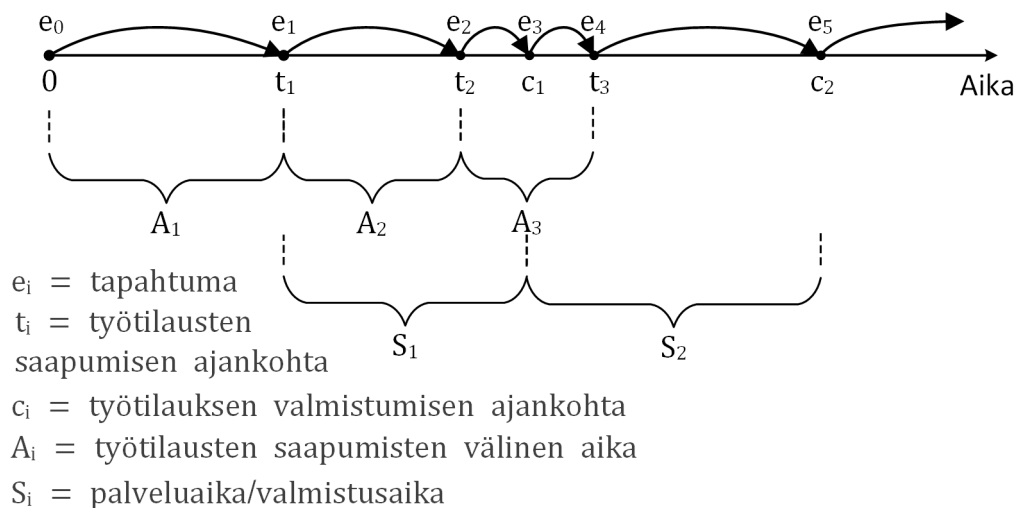
3.4 Tapahtumapohjainen simulointi

Tapahtumapohjainen simulointimalli muodostuu Banksin (2003) mukaan toisistaan erilisistä tapahtumista. Jokaiselle tapahtumalle on ennalta määrätty ajankohta ja muutoksia tilamuuttujissa tapahtuu täten ainoastaan määrättyinä ajanhetkinä. Tapahtuvat muutokset tilamuuttujissa ovat välittömiä. Rakenteensa puolesta tapahtumapohjaiset simulointimallit koostuvat dynaamisista ja staattisista entiteeteistä. Dynaamisia entiteettejä mallissa ovat systeemin läpi kulkevat entiteetit, esimerkiksi valmistettavat tuotteet ja niiden komponentit. Staattiset entiteetit, kuten työstökoneet ja työntekijät tuottavat palveluita dynaamisille entiteeteille.

Simulointimalli tarvitsee tietoa todellisesta järjestelmästä, jotta se voidaan kuvata simulointimallin avulla. Simulointiprojektia varten kerätty tieto täytyy jalostaa muotoon, joka voidaan antaa lähtötietona simulointimallille. Todellisesta ympäristöstä kerätty tieto on usein tarkoituksenmukaista esittää tilastollisina jakaumina. Tällöin kyse on stokastisesta

simuloinnista. (Law & Kelton 2000, s. 292) Stokastisilla malleilla viitataan simulointimalleihin, jotka sisältävät komponentteja, jotka on mallinnettu tilastollisina jakaumina (Carson 2005). Suurin osa tapahtumapohjaisista simulointimalleista, joita käytetään teollisessa ympäristössä, on Carsonin (2006) ja Hendersonin & Nelsonin (2006) mukaan stokastisia.

Tuotantojärjestelmissä esiintyviä satunnaisuuksia voidaan mallintaa jatkuvina ja diskreetteinä todennäköisyysjakaumina, esittävät Law & Kelton (2000, s. 292–328). Tällöin yksittäisistä havainnoista koostuvaan otossarjaan sovitetaan tilastollinen jakauma. Käyttökelpoisia jatkuvia jakaumia ovat esimerkiksi normaalijakauma, eksponentiaalijakauma, gamma-jakauma ja Weibull-jakauma. Diskreetteistä jakaumista Bernoulli-jakauma, binomi-jakauma ja Poisson-jakauma ovat yleisesti käytettyjä jakaumia tuotantojärjestelmien simulointiohjelmassa.



Kuva 16. Tapahtumapohjainen simulointi. (Perustuu lähteeseen Law & Kelton 2000, s. 9)

Stokastisuuden lisäksi tapahtumapohjaiset simulointimallit ovat Banksin (2003) mukaan dynaamisia. Dynaamisissa simulointimalleissa systeemien muuttumista seurataan Law'n & Keltonin (2000, s. 5–9) mukaan ajan funktiona. Ajan seuraamiseen simulointimalleissa tarvitaan erityinen komponentti, simulointikello. Yleisimmin simuloinneissa käytettävä kello siirtyy tapahtumasta toiseen ja jättää niiden välissä olevan ajan huomioitta. Tapahtumien välissä olevan ajan laskeminen olisi tapahtumapohjaisessa simuloinnissa tarpeetonta, koska muutoksia tilamuuttujiin tehdään vain tapahtumien kohdalla. Periaatekuva tapahtumapohjaisesta simuloinnista ja simulointikellon käyttäytymisestä on esitetty kuvassa 16.

3.5 Simuloinnin käyttäminen lean-menetelmien hyötyjen arvioinnissa

Lean-menetelmien käyttöönotto vaatii usein suuria muutoksia nykyiseen tuotantojärjestelmään. Muutoksista aiheutuvat kustannukset ja positiiviset vaikutukset täytyy kyetä perustelemaan yrityksen ylimmälle johdolle. Muutosten käyttöönoton positiivisten vaikutusten perusteleminen simuloimalla on Czarneckin & Loydin (2001) ja Tokolan et al. (2015) mukaan tarkoituksenmukaista ja kustannustehokasta. Simulointi on myös hyvä apuväline tuotannon nykytilan ja sen ongelmien kartoittamiseen.

Tokola et al. (2015) vertailevat tutkimuksessaan eri tutkimusartikkeleita, joissa käsitellään lean-valmistusta yhdessä tuotantojärjestelmien simuloinnin kanssa. Tutkimuksessa keskitytään lean-menetelmien ja simuloinnin yhteiskäytön vaikutuksiin ja niiden yhteiskäytöstä saatavien hyötyjen arviointiin. Yleisimmät vertailluissa tutkimuksissa käytetyistä lean-menetelmistä olivat VSM (value stream mapping), *Kanban* ja layout-suunnittelu. Merkittävimpiä vaikutuksia käytetyillä menetelmillä oli keskeneräisen tuotannon määrään, tuotannon läpimenoaikaan ja työvoiman tarpeeseen. Menetelmien käytön vaikutusten havaittiin olevan helposti todennettavissa simulointien avulla.

Arvovirtojen analysoiminen (VSM) on useille yrityksille ensimmäisiä askelia kohti lean-valmistusta (Womack & Jones 2003). Simulointien avulla pystytään Gurumurthy & Kodalin (2011) mukaan perehtymään Arvovirta-analyysiä tarkemmin tuotantojärjestelmien todellisiin ominaisuuksiin. Arvovirta-analyysissä tuotantojärjestelmiä käsitellään staattisina kokonaisuuksina, kun taas simuloiminen mahdollistaa todellisuudessa esiintyvien vaihteluiden ottamisen huomioon analysoinnissa. Gurumurthy & Kodali (2011) tutkivat simuloimalla kahta eri arvovirta-analyysiin pohjautuvaa tuotantojärjestelmää: nykyistä ja tulevaisuuteen suunniteltua. Tutkimuksessa simuloinnilla pystyttiin osoittamaan toteutettavien muutosten mukanaan tuomat hyödyt ja välttämään useita lean-implementoinnin ongelmia, joihin pelkkä arvoketjujen analysointi ei tarjoa ratkaisuja. Yksi merkittävimmistä ratkaistuista ongelmista oli muutoksista seuraavien hyötyjen perusteleminen.

Hyviä tuloksia simuloinnin avulla tehdyistä tuotannon kehitysprojekteista lean-menetelmiä hyödyntäen esittelevät myös Detty & Yingling (2000) sekä Schroer (2004). Detty & Yingling (2000) onnistuivat vähentämään osien keskimääräistä tuotannossa viettämää aikaa 55 % sekä vähentämään varastotasoja yli 60 % parantamalla tuotteiden virtausta ja vähentämällä niiden käsittelyyn kuluvaan aikaa. Hyödyt saavutettiin muuttamalla tuotantotilojen layoutia, lyhentämällä asetusaikoja ja pienentämällä puskurivarastojen kokoa. Schroer (2004) esittää simuloinnin olevan apukeino keskeneräisen tuotannon määrän vähentämiseen *Kanban*-ohjauksen avulla. Simulointien avulla voidaan tarkastella tuotantomäärien ja KET:n määrän keskinäistä suhdetta, kun tuotannossa esiintyy tavanomaista vaihtelua.

4. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO

Tässä diplomityössä käsiteltävä tuotantojärjestelmän kehittämiseen tähtäävä tutkimus jakautuu neljään osaan. Tutkimuksen teoriapohjan kartoittamiseksi tehtiin tutkimusalueen rajausten perusteella kirjallisuuskatsaus. Kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin olemassa olevaan teoria-aineistoon, joka sisälsi myös eri näkökantojen vertailua. Kirjallisuuskatsaus tarjosi pohjatiedot tutkimuksen muiden osioiden, tutkimuskohteeseen perehtymisen, kyselytutkimuksen ja simulointitutkimuksen, tekemiseen.

Tutkimuksessa käytettävät tutkimusmenetelmät valittiin niiden käyttökelpoisuuden perusteella: käytettävien menetelmien tuli mahdollistaa tutkimuksen tavoitteiden täyttämisen kustannustehokkaasti. Tutkimusta varten kohdeyrityksen toiminnasta kerättiin aineistoa, jota hyödynnettiin arvovirta-analyysissä, simuloinneissa ja kehitysehdotusten muodostamisessa. Muu tutkimuksessa käytettävä aineisto koostuu kirjallisuusaineistosta ja kohdeyrityksen tutkimusta varten tarjoamasta aineistosta. Kirjallisuuskatsauksen aineisto on koottu Tampereen teknillisen yliopiston kirjaston, Kone- ja tuotantotekniikan laitoksen kirjaston sekä kirjaston verkkojulkaisujen tarjoamista materiaaleista. Lisäksi jotkin käytetyistä lähdeeteoksista löytyivät avoimina verkkomateriaaleina. Kirjallisuuskatsauksen aineistoa kerätessä pyrittiin varmistamaan lähdeeteosten luotettavuus ja niissä esitetyn tiedon tieteellinen oikeellisuus.

4.1 Kirjallisuuskatsaus

Työn teoreettinen pohja perustuu aiheesta kirjoitettuihin tutkimus- ja konferenssiartikkeleihin sekä aihepiiriä käsittelevään kirjallisuuteen. Tutkimuksessa käytettävät kirjat jakautuvat alan perusteoksiin sekä tuorempiin julkaisuihin, ja niiden joukossa on sekä yksittäistä aihepiiriä käsitteleviä teoksia että suurempia kokonaisuuksia käsitteleviä käsikirjoja. Niin ikään tutkimus- ja konferenssiartikkelien ikä vaihtelee tuoreesta tiedosta hievan vanhempaan tietoon. Kirjallisuuskatsauksessa käsiteltäviä tärkeimpiä aihepiirejä ovat lean, tuotantotilojen layout-suunnittelu, tuotannonohjaus ja tuotantojärjestelmien simulointi.

Lean-valmistuksen kansainvälinen tutkiminen sai alkunsa MIT-yliopiston tutkimushankkeesta, jossa selvitettiin Toyotan tuotantojärjestelmän vahvuuksia verrattuna perinteisiin massatuotantomenetelmiin (Brockberg 2008). Tutkimusprojektin myötä julkaistiin teos *The Machine That Changed the World*, joka saavutti maailmanlaajuisen suosion. Teoksen kirjoittivat tutkimuksen johtaja James P. Womack yhdessä tutkimukseen osallistuneiden Daniel T. Jonesin ja Daniel Roosin kanssa. Kyseisen teoksen ilmestymisen jälkeen on julkaistu lukuisia muita lean-valmistuksen periaatteita ja käytäntöjä käsitteleviä teoksia. Merkittävimpiä tässä tutkimuksessa käytettäviä lean-valmistusta käsitteleviä teoksia ovat

Womackin & Jonesin (2003) *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*, Wilsonin (2015) *How to Implement Lean Manufacturing, Second Edition* sekä Santosin et al. (2006) *Improving Production with Lean Thinking*.

Kirjallisuuskatsauksessa on mukana myös tuotantojärjestelmien suunnittelemista ja kehittämistä käsitteleviä teoksia, jotka eivät varsinaisesti lukeudu lean-kirjallisuudeksi, mutta joissa käsiteltävät aiheet vähintäänkin sivuavat eri lean-teorioita. Gengin (2015) *Manufacturing Engineering Handbook* on kattava kokoelma alan asiantuntijoiden kirjoittamia tekstejä. Löddingin (2013) teoksessa *Handbook of Manufacturing Control – Fundamentals, description, configuration* puolestaan perehdytään laajasti tuotannonohjauksen eri menetelmiin. Tuotannonohjauksen teorioiden kartoittamisessa on käytetty lisäksi Hoppin & Spearmanin (2000) teosta *Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management*.

Tutkimuksessa käytettiin useita tuotantotilojen layout-suunnittelua käsitteleviä teoksia. Suuri osa näiden teosten esittelemistä teorioista pohjautuu Mutherin (1968) teokseen *Systematic layout planning*. Mutherin (1968) teos käsittelee layout-suunnittelua yleisesti, kun taas muut tutkimuksessa käytetyt lähde-tekstit ovat sisällöltään keskittyneempiä johonkin tiettyyn sovellusalueeseen. Hu & Ko (2015) käsittelevät tekstissään *Assembly System Design* kokoonpanotuotannon layout-suunnittelua, Schenk et al. (2010) esittelevät teoksessaan *Factory Planning Manual - Situation Driven Production Facility Planning* erilaisia vaihtoehtoja tehtaiden suunnitteluprosessiin.

4.2 Perehtyminen yrityksen päivittäiseen toimintaan

Perehtyminen yrityksen päivittäiseen toimintaan tehtiin heti diplomityöprosessin alussa. Perehtyminen tapahtui osallistumalla yrityksen päivittäiseen toimintaan tekemällä tavanomaisia työtehtäviä. Perehtymisen aikana työntekijöitä myös haastateltiin epävirallisesti. Tämänkaltainen osallistuminen organisaation päivittäiseen toimintaan ei kuitenkaan Järvisen & Järvisen (2004, s. 128–131) mukaan täytä tapaustutkimuksen kriteereitä: osallistumisen kesto oli lyhyt, eikä sen aikana pyritty aktiivisesti kehittämään tutkittavaa organisaatiota.

Tutkimuskohteeseen perehtymisen avulla tutkimuskohteesta kerättiin tietoa tuotantojärjestelmän kehittämistä ja simulointia varten. Perehtymisen aikana pyrittiin saamaan laaja peruskäsitys tehtaan toiminnasta, siinä esiintyvistä materiaali- ja virroista sekä eri tehtävien ongelmakohdista.

4.3 Kyselytutkimus

Kyselytutkimuksen avulla kerättiin tietoa yrityksen tuotannosta, sen ohjauksesta ja siitä kerättävästä tiedosta. Kyselytutkimus kohdennettiin yrityksen toimihenkilöille, ja siinä

esitettävät kysymykset valikoitiin LeanMES-projektissa (Järvenpää et al. 2014) käytetyistä kysymyksistä. Kyselytutkimuksessa henkilöstölle esitettiin avoimia kysymyksiä, ja niiden avulla pyrittiin saamaan mahdollisimman realistista tietoa yrityksen senhetkisestä kyvykkyydestä johtaa tuotantoa.

Kyselytutkimus soveltuu Järvisen & Järvisen (2004) mukaan aineiston keruun menetelmäksi silloin, kun kyselyn laajuus on kohtuullisen pieni. Toisaalta sähköisesti toteutettava kyselytutkimus mahdollistaa suuren osallistujamäärän. Kyselytutkimuksen painoarvo koko tutkimuksen osalta oli kuitenkin varsin pieni. Kyselytutkimukseen saatiin ainoastaan kolme vastausta, ja yksi vastauksista oli kahden työntekijän yhteistyössä laatima. Pienen osallistujamäärän vuoksi tiedonkeruumenetelmäksi olisi soveltunut myös haastattelututkimus. Haastattelututkimuksen sijaan kyselytutkimukseen päädyttiin kuitenkin kysymysten haasteellisuuden vuoksi: osallistujille annettiin aikaa perehtyä kysymyksiin ja koostaa niihin vastaukset. Monet kysymykset edellyttivät osallistujilta tarkempaa perehtymistä asiaan.

4.4 Simulointitutkimus

Tutkimuksen simulointiosio voidaan Järvisen & Järvisen (2004, s. 47-54) mukaan määrittellä teorioita testaavaksi tutkimukseksi: kirjallisuudessa esitettyjä teorioita sovelletaan todellisiin ympäristöihin ja niiden vaikutuksia tutkitaan simulaatiomallien avulla. Simuloinnin avulla tutkittiin kokoonpanolinjaston kehitysehdotusten kelpoisuutta vertaamalla niitä nykytilaa kuvaavaan malliin.

Tutkimusmenetelmänä päädyttiin käyttämään simulointia, koska simulointien toteuttaminen tuli edulliseksi: eri ratkaisuvaihtoehtoja voitiin kokeilla ilman, että siitä aiheutui haittaa tuotannolle. Simulointiprosessissa noudatettiin Law'n (2005) mallia. Prosessi ei kuitenkaan edennyt täysin mallin mukaisesti, sillä testattavat skenaariot ja konfiguraatiot valittiin vasta nykytilaa kuvastavan simulointimallin valmistumisen jälkeen. Lisäksi mallin yksinkertaistuksia ja abstraktioita jouduttiin paikoin muuttamaan, jotta mallista saatiin tehtyä mahdollisimman todenmukainen ja mahdollisimman vähän laskentatehoa kuluttava.

Simulointiprojektille asetetut ongelmat, tavoitteet ja rajaukset noudattavat pääosin tälle diplomityölle asetettuja tutkimusongelmia, tavoitteita ja rajoituksia. Myös simulointiprojektissa tavoitteena oli tutkia keinoja tehtaan materiaalivirtojen kehittämiseksi. Simulointien avulla tutustuttiin lisäksi tehtaan ominaispiirteisiin ja tutkittiin toteutettavien muutosten vaikutuksia.

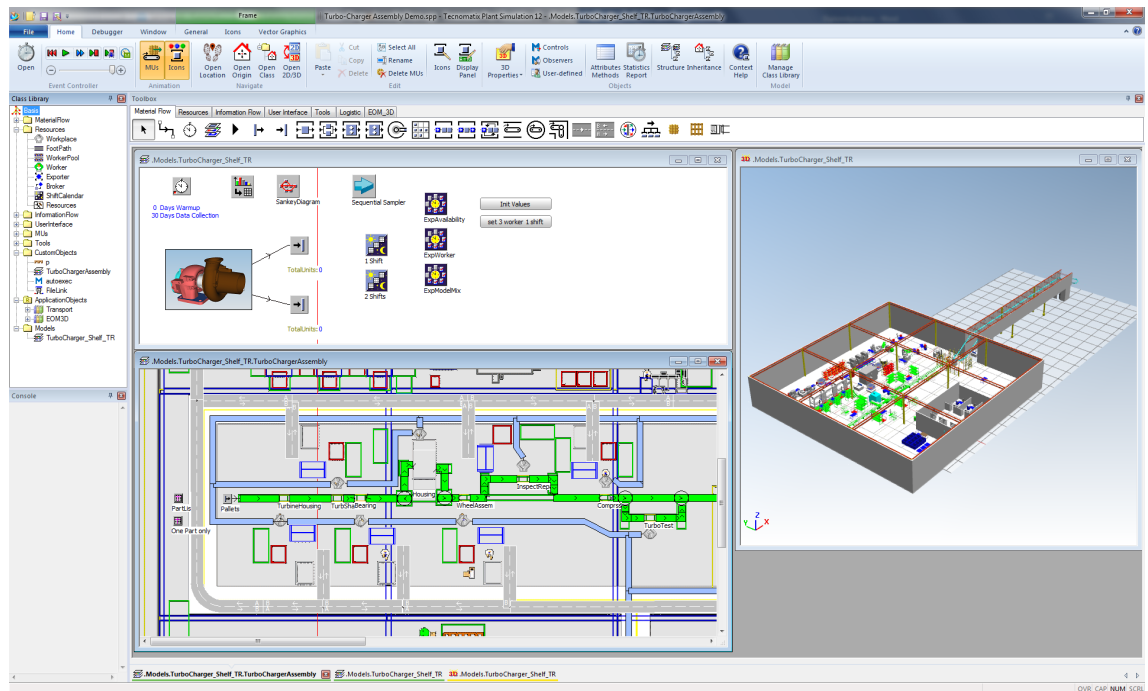
4.4.1 Simulointi käyttäen Plant Simulation -ohjelmistoa

Simulointiohjelmistoksi valittiin Siemensin Tecnomatix Plant Simulation 12 -ohjelmisto. Muita mahdollisia vaihtoehtoja olivat Visual Componentsin 3DCreate 2014 sekä MATLAB R2016a -ohjelmiston SimEvents-kirjasto. Plant Simulation -ohjelmistoon päädyttiin sen helppokäyttöisyyden vuoksi, ja sen havaittiin lisäksi soveltuvan hyvin tarkasteltavan tuotantojärjestelmän simuloimiseen. Lisäksi laaja saatavilla oleva tukimateriaali puolsi päätöstä Plant Simulationin suuntaan. Laajimman ja kattavimman tukimateriaalin tutkimusta tehdessä tarjosivat Bangsowin (2015) teos *Tecnomatix Plant Simulation – Modeling and Programming by Means of Examples* sekä Siemens PLM:n Plant Simulation -verkkoyhteisö. Lisäksi ohjelman oma dokumentaatio toimi hyvänä tukimateriaalina erityisesti vianetsinnässä, tarjoten hyödyllistä tietoa ohjelman eri toiminnoista ja niiden toimintaperiaatteista.

Plant Simulation -ohjelmiston toimintaperiaate edustaa tapahtumapohjaista simulointia (Siemens 2015). Ohjelmassa simulointikellosta käytetään nimitystä *Event Controller*, ja se sijoitetaan johonkin simulointimallissa käytettävään kehykseen, joista ohjelmassa käytetään nimitystä *Frame*. Useimmiten tarkoituksenmukaisin sijoituspaikka on mallin juuressa. Ohjelmiston simulointikello mahdollistaa myös simulointimallin ajamisen jatkuva-aikaisesti, mikä mahdollistaa yksityiskohtaisemmat animaatiot mallissa. Tällöin myös simulointiajon kuluttama laskentateho kasvaa, mikä voi lisätä simulointikokeiden kestoa merkittävästi.

Tapahtumapohjaisuuden lisäksi Plant Simulation -ohjelmisto toimii olio-ohjelmoinnin periaatteiden mukaisesti (Siemens 2016). Simulointimalli koostuu Bangsowin (2015, s. 11-14) mukaan luokista, jotka toimivat niistä johdettujen olioiden tietotyyppeinä. Plant Simulation -ohjelmistossa luokat tarjoavat oletusarvoisen rakenteen kullekin oliolle. Luokista voidaan myös periyttää aliluokkia, jotka perustuvat olemassa oleviin luokkiin. Käytännössä periyttäminen mahdollistaa useiden samanlaisten luokkien luomisen, joista kustakin on useita ilmentymiä, olioita. Jokaisen luokkaan kuuluvan ilmentymän parametreja pystytään tällöin muokkaamaan keskitetysti, ilman että jokaisen olion parametreja täytyy muuttaa. Periytyminen on tuotu vahvasti mukaan myös Plant Simulation -ohjelmiston käyttöliittymään, jossa periytymistä ilmentävät parametrien vieressä olevat valintaruudut, joiden väri riippuu parametrin periytyvyydestä.

Ohjelmiston käyttöliittymä mukaillee Microsoft Office -tuoteperheen käyttöliittymämallia, jossa ohjelmiston tärkeimmät työkalut on ryhmitelty käyttöliittymän yläosassa sijaitsevaan valintanauhaan. Valintanauhan sisältö muuttuu dynaamisesti aktiivisena olevasta ikkunasta riippuen tarjoten käyttäjälle ainoastaan tarpeellisia työkaluja. Oletuksena käyttöliittymä sisältää lisäksi luokkakirjaston (*Class library*) sekä muokattavan työkaluvalikon (*Toolbox*), johon käyttäjän on mahdollista sijoittaa eniten tarvitsemiaan luokkia ja työkaluja luokkakirjastosta. Plant Simulation -ohjelmiston käyttöliittymä on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Siemens Tecnomatix Plant Simulation –ohjelmiston käyttöliittymä.

Simulointimallin perusrakenne koostuu kehyksistä, niihin sijoitetuista objekteista eli oli-oista sekä liikkuvista entiteeteistä (*Mobile Unit*). Objektien välille on mahdollista tehdä liitäntöjä, jotka osaltaan ohjaavat materiaalien virtausta objektien välillä. Kehysten sisälle on mahdollista sijoittaa myös muita kehyksiä, mikä mahdollistaa monipuolisten hierarkiatasojen luomisen malliin. Malliin luotavat hierarkiatasot tulisi ottaa huomioon jo konseptimallissa, sillä hierarkiatasojen tarkoituksenmukainen hyödyntäminen edesauttaa simulointimallin rakentamista ja helpottaa sen muokkaamista jälkikäteen.

Plant Simulation -ohjelmistossa on myös mahdollista käyttää lausekielistä ohjelmakoodia mallin toiminnan määrittämiseen. Materiaalien virtauksia, objektien parametreja, objekteja ja liitäntöjä voidaan luoda ja muokata käyttäen SimTalk-ohjelmointikielellä luotavia metodeja. Metodien käyttäminen on useimmissa tapauksissa välttämätöntä, ja lisäksi niiden avulla voidaan automatisoida monia mallien alustukseen ja palauttamiseen liittyviä toimenpiteitä. Metodien suoritus aktivoidaan kutsumalla sitä joko toisesta metodista tai mallissa olevasta objektista.

Plant Simulation sisältää mallin rakentamisen lisäksi työkaluja mallin analysointiin, kokeiden tekemiseen ja mallin optimointiin. Siderskan (2016) mukaan tärkeimpiä näistä ovat geneettiseen optimointiin perustuvat työkalut *GA Wizard* ja *Layout Optimizer*, syöte- ja ulostuloparametrien yhteyksiä tunnistava *Neural Network* -työkalu sekä *Experiment Manager* -työkalu. Työkalujen avulla on mahdollista luoda automatisoituja koejärjestelyjä, joiden avulla voidaan tutkia määrättyjen parametrien arvojen muutoksien vaikutuksia ulostuloparametrien arvoihin. Bangsowin (2015, s. 273-281) mukaan *Experiment Ma-*

nager -työkalu soveltuu parhaiten yksitasoisten kokeiden tekemiseen, toisin kuin geneettisen optimoinnin työkalut, jotka soveltuvat myös monitasoisten optimointitehtävien ratkaisuun.

4.4.2 Tiedonkeruu ja konseptimallin luonti

Simuloitavasta tuotantojärjestelmästä kerättiin tietoa jo ennen varsinaisen simulointiprojektin aloittamista tutustumalla yrityksen päivittäiseen toimintaan. Varsinainen numeerisen tiedon keruu alkoi kuitenkin vasta projektin ongelmien, tavoitteiden ja rajausten asettamisen jälkeen. Numeerisen tiedon keruumenetelmänä käytettiin työntutkimusta. Työntutkimuksen menetelmäksi valittiin normaaliaikatutkimus, koska menetelmän käyttö mahdollisti työvaiheajojen määrittämisen. Normaaliaikatutkimuksen arveltiin lisäksi olevan helposti toteutettavissa sekä tarjoavan laadukasta tietoa kohteen senhetkisestä tilanteesta.

Normaaliaikatutkimuksen tärkeimmäksi tavoitteeksi määritettiin simulointeja varten tarvittavan tiedon kerääminen. Alun perin tarkoituksena oli kerätä kattavasti tietoa eri tuotteiden valmistuksessa esiintyvistä vaiheajoista, mutta tavoitteesta jouduttiin pian luopumaan, koska tarvittavien tuotevariaatioiden valmistusaikojen mittaamiseen olisi tarvittu huomattavasti arvioitua enemmän aikaa. Tiedonkeruun aikana pyrittiin kuitenkin saamaan kasaan tarpeellinen määrä riittävän luotettavaa tietoa eri työvaiheiden kestoista.

Tiedonkeruun aikana aloitettiin myös nykytilan arvovirtakaavioiden ja simuloinneissa käytettävän konseptimallin luominen. Konseptimallin sekä arvovirtakaavioiden kehittämisessä käytettiin hyödyksi myös aiemmin kerättyä aineistoa.

4.4.3 Työvaiheajojen keruu

Työvaiheajojen keruu toteutettiin mittaamalla työntekijöiden päivittäistä työskentelyä tavanomaisissa olosuhteissa. Mittaamisen toteuttamisessa sovellettiin normaaliaikatutkimukselle alaluvussa 3.3.3 esitettyä prosessimallia.

Työväiheisiin ja -menetelmiin perehtymisen jälkeen aloitettiin mittauspöytäkirjoina toimivien lomakkeiden suunnittelu. Suunnittelun aikana kukin työ ositeltiin mitattaviin työeriin. Sekä lomakkeiden suunnittelussa, että työerien osittelussa pyrittiin ottamaan huomioon mahdollisuus muutoksiin työn vaiheistuksessa. Tämän vuoksi työ jaettiin aluksi mahdollisimman pieniin osiin, jotta työvaiheita pystyttäisiin mittaamaan mahdollisimman joustavasti. Haittapuolena yksityiskohtaisessa osittamisessa havaittiin kuitenkin turhan lyhyiksi muodostuvat työerien kestot, mistä aiheutui merkittävä mittausepävarmuuden lähde mittauksiin. Mittausepävarmuuden alentamiseksi joitain mitattavia työeriä jouduttiin yhdistämään. Tämä puolestaan heikensi mittauksen joustavuutta, eikä kaikkia mittauksia voitu hyödyntää standardiaikojen määrittämisessä.

Edellä mainittu aiheutui prosessimallin osin puutteellisesta noudattamisesta: ennen mitausten aloittamista ei tehty yhdessä työntekijöiden kanssa valintaa parhaista työmenetelmistä, joita noudatettaisiin täsmällisesti mittauksien aikana. Olettamuksena oli, että työntekijät noudattavat tekemällensä työlle osoitettuja standardityökaavioita, mikä ei todellisuudessa pitänyt paikkaansa. Vaihtelua työn vaiheistuksessa yritettiin vähentää mittauksien aikana sopimalla työntekijöiden kanssa asiasta, mutta sovitun vaiheistuksen noudattaminen osoittautui odotettua vaikeammaksi.

Letkuasennelmien kokoonpano		Tuotenumero:												
Muutos letkussa?	<input type="radio"/> Kyllä	<input checked="" type="radio"/> Ei	Letkunvaihdon asetusaika:		<input type="text" value="K"/>	<input type="text" value="P"/>	Tallenna & Tyhjennä							
Työmääräimen ja komponenttien poimiminen hyllystä:			<input type="text" value="K"/>	<input type="text" value="P"/>										
Katkaisumitan asetus:	<input type="text" value="K"/>	<input type="text" value="P"/>	Muu asetus:		<input type="text" value="K"/>	<input type="text" value="P"/>								
Puristimen asetus:	<input type="text" value="K"/>	<input type="text" value="P"/>	Katkaisumitan tarkistus:		<input type="text" value="K"/>	<input type="text" value="P"/>								
Vaihe:			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Lomakkeen täyttö ja käsittely:	<input type="text" value="K"/>	<input type="text" value="S"/>												
Letkun katkaisu (ja harjaus):	<input type="text" value="K"/>	<input type="text" value="S"/>												
Letkun kuorinta (ja harjaus):	<input type="text" value="K"/>	<input type="text" value="S"/>												
Tulppaus ja merkkkaus:	<input type="text" value="K"/>	<input type="text" value="S"/>												
Liittimien asennus ja puristus:	<input type="text" value="K"/>	<input type="text" value="S"/>												
Letkunsuojan asennus:	<input type="text" value="K"/>	<input type="text" value="S"/>												
Kapsuulien asennus:	<input type="text" value="K"/>	<input type="text" value="S"/>												
PTS-tarran asennus:	<input type="text" value="K"/>	<input type="text" value="S"/>												

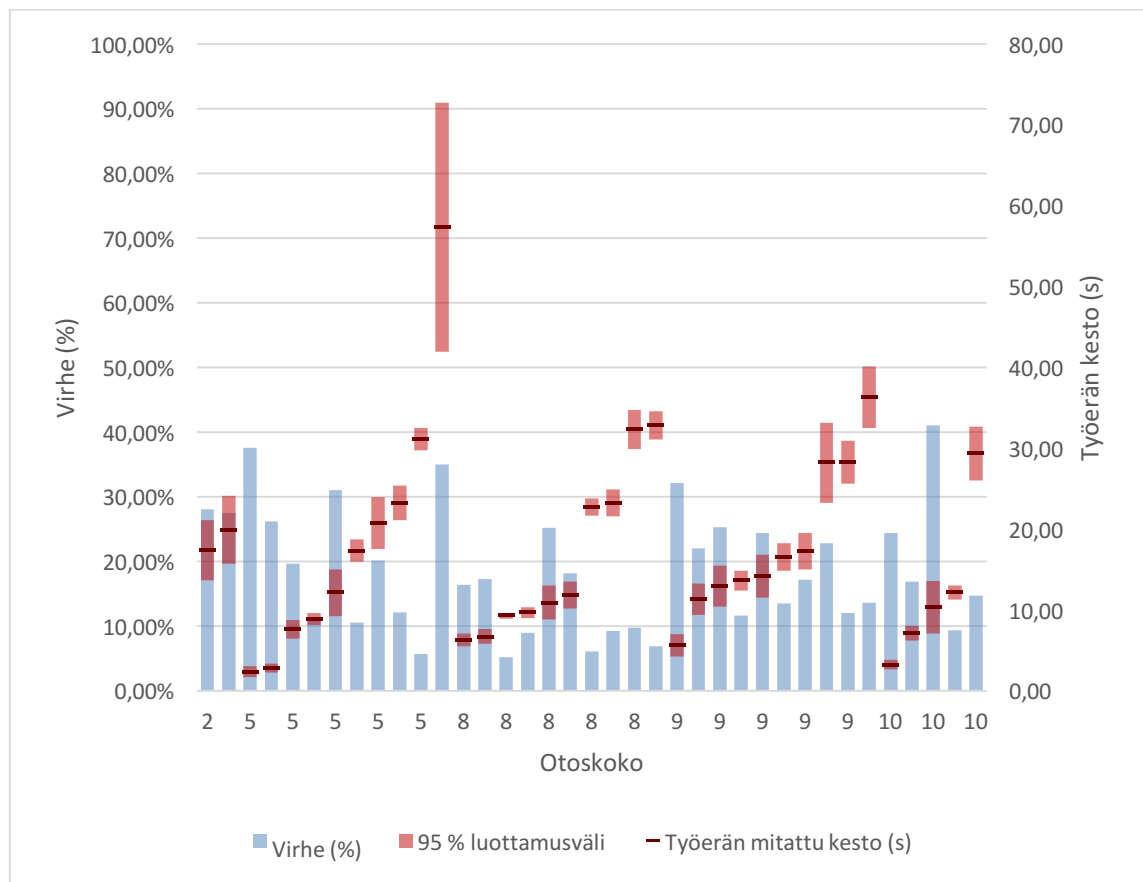
Kuva 18. Normaalialikatutkimuksessa käytetty mittauspöytäkirja.

Mittauksissa käytettiin tarkoitusta varten kehitettyjä mittauspöytäkirjoja, jotka tehtiin käyttäen Microsoftin Excel -taulukkolaskentaohjelmistoa. Sähköiset mittauspöytäkirja-sovellukset muodostettiin liitteessä D olevien lomakkeiden pohjalta. Sähköisten mittauspöytäkirjojen käyttäminen mahdollisti tulosten automaattisen kirjaamisen, mikä oli tarpeen koska useimmat mitatut syklit olivat niin lyhyitä, että tulosten manuaalinen kirjaus ei olisi ollut mahdollista. Esimerkki mittauksissa käytetystä mittauspöytäkirjasta on esitetty kuvassa 18.

Kullekin mitattujen aikahavaintojen keskiarvolle laskettiin luottamusväli, jonka sisään oikea tulos sijoittuu luottamustasoa vastaavalla todennäköisyydellä (Tilastokeskus 2016). Luottamusväli määritettiin laskemalla mittaustulosten tarkkuus yhtälöstä (8) johdetun kaavan (10) perusteella

$$k = \sqrt{\frac{s^2 z^2}{n \bar{x}^2}}. \quad (10)$$

Tarkkuuden, ja täten myös luottamusvälin laskennassa käytettiin 95 %:n luottamustasoa. Kaava (10) ei ota kuitenkaan huomioon mittauksissa esiintyviä satunnaisia virheitä, jotka aiheutuvat mittaajan kyvystä havainnoida mitattavan työntekijän liikkeitä. Satunnaisvirheen voidaan nähdä olevan suurimmillaan silloin kun otoskoko on pieni ja työerien kesto on lyhyt. Työntutkimuksessa tyypillisesti mitattavien erien voidaan kuitenkin olettaa olevan verrattain suuria, jolloin satunnaisten mittaustulosten vaikutus mittaustulosten keskiarvoon jää vähäiseksi, eikä vaikutusten arviointi ole tutkimuksen kannalta tarpeellista. Kuvassa 19 on esitetty mittaustulosten perusteella lasketut työerien kestot, tulosten tarkkuudet sekä mittaustulosten suhteelliset virheet. Kuvassa on huomioitu ainoastaan ne mittaustulokset, joissa mitattiin yksittäisiä työeriä useamman kuin yhden syklin verran.



Kuva 19. Lasketut työerien kestot ja niiden luottamusvälit.

Hydrauliikkaletkujen valmistuksesta mitatuille työerien kestoille laskettiin myös apuaikalisän sisältävät standardiajat. Apuajat ja apuaikalisä on esitetty taulukossa 7. Apuajoissa otettiin huomioon yrityksen ilmoittamat tauot, yhteensä 30 minuuttia, mihin lisättiin päivittäistä elpymisaikaa 15 minuuttia. Apuaikalisää laskettaessa työpäivän kestonä käytettiin 7,5 tuntia. Elpymisaika määritettiin liitteen E mukaan.

Taulukko 7. Apuajat ja apuaikalisä.

Apu aika:	Tauot	Siistiminen	Muut tehtävät
Päivävakio:	30 min	15 min	10 min
Elpymisaika:	15 min	0 min	0 min
Lisäaika:	5 min	0 min	0 min
Yhteensä:	75 min		
Apuaikalisä:	20 %		

Laskettuja standardiaikoja verrattiin ERP:ssä (enterprise resource planning) oleviin standardiaikoihin. ERP:ssä olevissa standardiajoissa on eritelty yksittäisen asennelman valmistukseen tarvittava aika, sekä eräkohtainen asetus aika. Asetusajaksi jokaiselle erälle on asetettu 5 minuuttia. Taulukossa 8 on esitetty työntutkimuksen tuloksia asennelmien valmistuksen osalta. Tuloksista on nähtävissä, että mitatut ja ERP:ssä olevat standardiajat vaihtelevan melko paljon keskenään. Tulosten keskiarvon mukaan erotus ajoissa on kuitenkin melko pieni. ERP:ssä olevat ajat ovat keskimäärin 1,15 minuuttia mitattuja aikoja suurempia. Kovin suuria johtopäätöksiä tuloksista ei voi kuitenkaan tehdä, koska mitattujen sarjojen määrä jäi kohtalaisen pieneksi.

Taulukko 8. Mitattujen standardiaikojen vertailu ERP:ssä oleviin standardiaikoihin.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ERP / kappale (min)	1.6	1.1	1.1	1.1	1.3	1.3	1.3	1.6	1.3	1.3
Mitattu (min)	2.4	1.2	1.2	0.9	1.1	0.8	0.8	1.7	0.8	0.9
Mitattu, sis. asetusajan (min)	4.8	2.5	1.6	1.3	1.6	1	1.1	1.9	1.2	1.4
Erä koko	5	5	10	13	18	9	5	19	15	20
ERP kokonaisaika, sis. asetusajan (min)	13	10.5	16	19.3	28.4	16.7	11.5	35.4	24.5	31
Kokonaisaika, sis. asetusajan (min)	24	12.5	16	16.9	28.8	9	5.5	36.1	18	28
Erotus	-11	-2	0	2.4	-0.4	7.7	6	-0.7	6.5	3

Työntutkimuksen loppuvaiheessa hydraulikkaletkuasennelmien tuotantoon tuli muutos: asennelmiin kiinnitettävä tarra vaihtui hankalammin kiinnitettävään malliin. Mittauksia tehdessä työntekijöillä oli jo kokemusta tarran asentamisesta useamman kymmenen asennelman verran, eivätkä mittaukset täten sijoittuneet työn tekemisessä oppimiskäyrän alkuun. Työmenetelmissä oli kuitenkin vielä paljon kehittämisen varaa, jotta tarrojen liimaus olisi sujunut mahdollisimman nopeasti. Taulukossa 9 on esitetty työntutkimuksen tuloksia muutoksen jälkeen. Taulukon perusteella ERP:ssä olevat työajat ovat keskiarvoltaan 1,58 minuuttia mitattuja aikoja alhaisempia.

Taulukko 9. Työntutkimuksen tuloksia tuotannon muutosten jälkeen.

	1	2	3	4
ERP / kappale (min)	1.7	1.3	1.3	1.7
Mitattu (min)	2.2	1.7	1.7	1.4
Mitattu, sis. asetusajan (min)	2.6	2	2	2.6
Eräkoko	9	8	8	9
ERP kokonaisaika, sis. asetusajan (min)	20.3	15.4	15.4	20.3
Kokonaisaika, sis. asetusajan (min)	23.4	16	16	23.4
Erotus	-3.1	-0.6	-0.6	-3.1

Työntutkimusta tehtiin letkuasennelmien valmistuksen lisäksi myös muille tuotannossa tehtäville töille. Aikataulun rajallisuuden vuoksi kaikkia tehtaalla tehtäviä työsuorituksia ei ehditty mittaamaan, eikä kaikista mitatuista töistä ehditty keräämään tilastollisesta näkökulmasta riittävästi havaintoja. Lisäksi työssä havaittiin esiintyvän melko paljon vaihtelua niin työn sisällön kuin kestonkin puolesta. Tuloksia kerättiin kuitenkin lähtökohtaisesti simulointitutkimusta varten. Työnvaiheiden kestoja, sekä työajoissa esiintyviä satunnaisuuksia uskottiin pystyttävän mallintamaan simulointeja varten ilman huomattavaa määrää tuotannosta kerättyjä mittaustuloksia.

Työntutkimuksessa kerätyistä työajoista laskettiin keskiarvo ja keskihajonta, ja niitä hyödynnettiin simulointimallissa likimain sellaisenaan. Poikkeuksen muodosti asennelmien valmistus, jossa valmistusajat kerättiin ERP:stä. Työntutkimuksen avulla kerättyjen vaiheajojen avulla laskettiin työnvaiheiden keskimääräiset osuudet valmistusajasta.

4.4.4 Suunnittelutuotteiston valinta

Suunnittelutuotteistoksi valittiin jokaista tuotantosolua kohden 10 eniten toukokuussa 2016 valmistettua tuotetta, poikkeuksena solu 2, johon valittiin 10:n sijasta 11 tuotetta. Kaiken kaikkiaan simulointitutkimukseen valikoitui yhteensä 101 eri tuotetta. Valittujen tuotteiden osuus kokonaistuotannosta oli tällöin noin 33 % ja osuus kokonaistuotteistosta on noin 5 %.

Valittu suunnittelutuotteisto jaoteltiin tuoteperheisiin. Jaottelu tulee Rotherin & Shookin (1999, s.6) mukaan tehdä tuotteiden reititysten perusteella. Reitityksiä tulee tarkastella asiakkaan puolelta toimitusketjua. Reitityksen perusteella tuotanto jaettiin neljään tuoteperheeseen:

1. tilausohjautuva tuotanto
2. tilausohjautuva tuotanto, jossa tehdään solun ulkopuolisia asennustöitä
3. varasto-ohjautuva tuotanto
4. varasto-ohjautuva tuotanto, jossa tehdään solun ulkopuolisia asennustöitä.

Tuotanto voitaisiin jaotella vielä tarkemmin erittelemällä tuotantosolussa tehtävät asennusvaiheet, mutta tämän ei katsottu olevan kokonaisuuden kannalta oleellista. Taulukossa 10 on esitetty tuotteiden jaottelu tuoteperheisiin.

Taulukko 10. Tuoteperhematriisi.

Tuotenimike		1. Letkun katkaisu	2. Letkun harjaus	3. Letkujen kuorinta	4. Tulppaus	5. Liittimien asennus	6. Liittimien puristus	7. Letkusuojan asennus	8. Kapsuulin asennus	9. Tarran liimaus	10. Muu asennus
1.	461LT033V100808-1150-K11	x	x		x	x	x	x	x	x	
	461LT3906060606-1720-K11	x	x		x	x	x		x	x	
	H313906060604-1300-K11	x	x	x	x	x	x		x	x	
	811-12-1000	x	x		x				x	x	
2.	HLB13GK020202-475-SPEC	x	x		x	x	x	x	x	x	x
3.	371LT0606161616-2250-SG	x	x		x	x	x	x	x	x	
	7316N6A162016-2950-SP	x	x		x	x	x	x	x	x	
	H313906060604-1200-K11	x	x	x	x	x	x		x	x	
4.	IH36522310-2680-K11	x	x		x					x	x

Mahdollisia variaatioita on enemmän kuin taulukossa 10 on esitetty. Taulukkoon kerätyt tuotteet on poimittu simulointitutkimusta varten valitusta suunnittelutuotteistosta, joten taulukossa olevat tuotteet edustavat tarkastelujaksolla eniten valmistettuja tuotteita.

4.4.5 Arvovirta-analyysi

Rother & Shook (1999) esittävät monia hyväksi havaittuja periaatteita ja menettelytapoja arvovirtakaavioiden tekemiseen: kaaviot piirretään käyttäen kynää ja paperia ja seuraten tuotteen valmistusketjua materiaalien saapumisesta valmiiden tuotteiden lähettämiseen asiakkaille. Heidän mukaan arvovirta-analyysi tulee aloittaa nykytilan arvovirtakaavion piirtämisellä, mutta painopisteenä on kuitenkin tulevaisuuden arvovirtakuvaus.

Tässä työssä tehdyn tiedonkeruun pohjalta luotiin tuotannon nykytilaa sekä tulevaisuuden tavoitetilaa esittävät arvovirtakaaviot. Arvovirta-analyysissä käytetty materiaali kerättiin tuotantoon perehtymisen, kyselytutkimuksen, työntutkimuksen ja epävirallisten haastattelujen pohjalta. Nykytilan arvovirtakaavion runko tehtiin tuotantoon tutustumisen jäl-

keen, mutta tarvittavat vaiheajat ja varastossaoloajat saatiin selvitettyä vasta simulointiprojektin valmistuttua. Myös tulevaisuudentilan arvovirtakaaviot valmistuivat vasta simulointiprojektin lopuksi.

Arvovirtakaavioita laatiessa ei kuitenkaan täysin noudatettu Rotherin & Shookin (1999) ohjeistusta. Arvovirtakaavioita ei piirretty tehtaan lattialla tuotteen etenemistä valmistusketjussa seuraten, eikä arvovirta-analyysin painopisteenä ollut tulevaisuudentilan arvovirtakaavioiden luominen. Arvovirta-analyysiä tehdessä tavoitteena oli visualisoida tulevaisuudentilan simulointimalleissa kehitetyt materiaalivirrat ja tarjota työkalu niiden vertaamiseen nykytilan materiaalivirtoihin. Arvovirta-analyysin tulokset on esitetty liitteessä A.

4.4.6 Konseptimallin luominen

Simulointiprojektia varten luotiin konseptimalli nykytilan ja tulevaisuuden tavoitetilan simulointikokeille. Konseptimalleihin määritettiin yhdessä kohdeyrityksen kanssa simulointiprojektin tavoitteet ja simulointimallien karkean tason rakenteet. Konseptimalliin kirjattiin lisäksi mallin yksinkertaistukset, mallien validointiperusteet sekä malleja varten tarvittavat lähtötiedot. Konseptimalli on esitetty liitteessä C.

Konseptimallissa simulointiprojekti jaettiin kahteen osavaiheeseen, nykytilan simulointiin ja tulevaisuudentilan simulointiin. Tarkastelun painopisteiksi asetettiin materiaalin virtaus tehtaassa, tuotannon läpimenoajat, keskeneräisen tuotannon määrä sekä valmis-tuotevarastojen varastotasot.

4.5 Tulosten analysointi

Tutkimustulosten analysointi voidaan Hirsjärven et al. (2007) mukaan toteuttaa joko selittämiseen tai ymmärtämiseen pyrkivillä lähestymistavoilla. Selittämiseen pyrkivässä analyysissä käytetään menetelmänä usein tilastollista analyysiä, kun taas ymmärtämiseen pyrkivässä analyysissä käytetään usein laadullista analyysiä. Tässä tutkimuksessa kerätyn aineiston perusteella pyrittiin sekä ymmärtämään että selittämään tutkimuskohteen toimintaa. Tutkimuksessa käytetyt tutkimusmenetelmät tuottivat sekä laadullista että määrällistä aineistoa, ja tutkimustulosten analysointiin käytettiin sekä tilastollisia että laadullisia menetelmiä.

Normaaliaikatutkimuksen tulosten analysoinnissa sovellettiin teoriaosuudessa esitettyjä menettelytapoja normaaliaikatutkimuksen tulosten tilastolliseen analysointiin. Tulosten analysoinnissa painopisteenä oli tulosten käyttökelpoisuuden ja todenmukaisuuden arviointi.

Kyselytutkimuksen tulosten avulla pyrittiin syventämään ymmärrystä tutkimuskohteesta. Tutkimuksessa kerättyjä vastauksia vertailtiin keskenään, minkä lisäksi kyselytutkimuksen tuloksia verrattiin tutkimuskohteesta kerättyihin havaintoihin. Kyselytutkimuksen tuloksia käytettiin nykytilan analysoimisessa sekä tulevaisuuden ratkaisuvaihtoehtojen kehittämässä ja arvioinnissa.

Simulointitutkimuksen tuottama aineisto koostui määrällisistä simulointimallin tuottamista tuloksista sekä empiirisistä havainnoista. Simulointitutkimuksessa kerättyä määrällistä aineistoa verrattiin tutkimuskohteesta kerättyyn määrälliseen aineistoon. Lisäksi eri simulointikokeiden tuloksia vertailtiin keskenään.

Ratkaisuehdotusten analysoinnissa arvioitiin ratkaisujen vaikutuksia nykytilaan sekä niiden taloudellista kannattavuutta. Vaikutuksien arvioinnissa käytettiin teoriaosuudessa esitettyjä mittareita sekä arviointikriteereitä. Mittareina ja ratkaisujen arviointikriteereinä tutkimuksessa päädyttiin käyttämään asennelmien ja tilausten läpimenoaikoja sekä tuotannon ja toimitusten edellyttämiä varastotasoja.

Ratkaisuehdotusten taloudellisen kannattavuuden arvioinnissa käytettiin takaisinmaksuaikaa. Takaisinmaksuaika voidaan Vierroksen (2009) mukaan yksinkertaisimmillaan laskea kaavan (11) avulla

$$Takaisinmaksuaika = \frac{Hankintahinta}{Investoinnin nettotulot} . \quad (11)$$

Sallituksi takaisinmaksuajaksi investoinneille määritettiin 3 vuotta. Investoinnin suurin sallittu hankintahinta voidaan laskea kaavan (12) avulla

$$Hankintahinta = Takaisinmaksuaika * Investoinnin nettotulot . \quad (12)$$

Investointilaskelmien avulla haettiin tällöin arvioita investoitavien järjestelmien suurimmista mahdollisista hankintahinnoista, jolloin investointi on taloudellisesti kannattava.

5. KOHDEYRITYKSEN LÄHTÖTILANNE

Tutkimuksen kohde on Yhdysvalloissa vuonna 1918 perustettu yritys, jonka päätoimialana ovat liikkeenhallintatekniikat sekä -järjestelmät. Kohdeyritys valmistaa tuotteita mobile-, teollisuus- ja ilmailualalla toimivien yritysten käyttöön. Suomessa kohdeyrityksen toiminta käynnistyi vuonna 1971, jonka jälkeen toiminta on laajentunut lukuisten yritystalojen ja uusien tehtaiden rakentamisen myötä. Suomessa kohdeyrityksen valmistamia tuotteita ovat erilaiset suodattimet ja suodatinjärjestelmät, hydraulikan venttiililohkot, elektroniset ohjausjärjestelmät sekä hydraulikkaletkuasennelmat.

Tässä tutkimuksessa keskitytään yrityksen Suomessa sijaitsevaan hydraulikkaletkuasennelmia valmistavaan yksikköön. Yksikkö on osa Euroopan laajuista toimitusverkostoa, mutta keskittyy pääosin Pohjoismaiden alueella tehtäviin toimituksiin. Suurin osa yksikön valmistamasta tuotannosta toimitetaan Suomeen, osa tilauksista toimitetaan myös Ruotsiin ja Viroon.

5.1 Valmistettavat hydraulikkaletkuasennelmat

Kohdeyritys valmistaa lukuisia erilaisia hydraulikkaletkuasennelmia, joiden asiakasräätälöintiaste on korkea. Valittavia ominaisuuksia asennelmissa ovat pituus, sisähalkaisija, letkumateriaali ja liittimet. Kuvassa 20 on esitetty tyypillisimpiä yrityksen valmistamia hydraulikkaletkuasennelmia.



Kuva 20. Valmistettavia hydraulikkaletkuasennelmia. (Parker 2015)

Asennelmien käyttökohteina ovat sekä raskaat, ulkokäyttöön suunnitellut työkonet, että kevyemmät sisäkäyttöön suunnitellut laitteet. Erilaiset käyttötarpeet edellyttävät asennelmilta yksilöllisiä ominaisuuksia, joiden painoarvo vaihtelee käyttökohteesta riippuen.

Yleisesti haluttuja ominaisuuksia ovat käytetyn letkumateriaalin joustavuus sekä tuotteiden korkea laatu. Lisäksi osaan ulkokäyttöön tarkoitetuista asennelmista asennetaan letkunsuoja suojaamaan letkua kulumiselta ja rikkoutumiselta erilaisissa käyttötilanteissa.

Vaatimukset asennelmien laadukkuudelle asettavat vaatimuksia tuotannon laaduntuottokyvyille. Vaatimuksia tuotteille asettavat yrityksen asiakkaat, ja lisäksi yrityksellä on omat vaatimuksensa tuotteiden ja toiminnan laadukkuudelle. Tuotannon laaduntuottokykyä mitataan seuraamalla tuotteiden spesifikaationmukaisuutta, johon kuuluu asennelmien tekniset laatuvaatimukset sekä niiden vastaavuus asiakkaan määrittämiin spesifikaatioihin. Asennelmien tekniset laatuvaatimukset koostuvat asennelmien pituuksien mittatoleransseista, niiden puhtausvaatimuksista sekä asennustyön laadukkuudesta.

Letkuasennelmien pituuksien mittatarkkuuksille asetetut toleranssit riippuvat niiden pituudesta ja sisähalkaisijasta. Valmistettavien asennelmien pituudet vaihtelevat muutamista senttimetreistä aina kymmeneen metriin asti. Hydraulikkaletkuasennelmien pituuksien toleranssit on määritetty SFS-EN 854 (2015) -standardissa, jota kohdeyrityksessä noudatetaan. Taulukossa 11 on esitetty standardin mukaiset letkuasennelmien pituustoleranssit.

Taulukko 11. Hydraulikkaletkujen pituustoleranssit. (SFS-EN 854 2015)

	Sisähalkaisija		
	Suurempi tai yhtä suuri kuin 25	Yli 25 ja sisältäen 50	Yli 50
Asennelman pituus mm	Toleranssi	Toleranssi	Toleranssi
Pienempi tai yhtä pieni kuin 630	+ 7 mm - 3 mm	+ 12 mm - 4 mm	+ 25 mm - 6 mm
Yli 630 ja sisältäen 1250	+ 12 mm - 4 mm	+ 20 mm - 6 mm	
Yli 1250 ja sisältäen 2500	+ 20 mm - 6 mm	+ 25 mm - 6 mm	
Yli 2500 ja sisältäen 8000		+ 1,5 % - 0,5 %	
Yli 8000		+ 3 % - 1 %	

Mittatoleranssien lisäksi letkuille on asetettu puhtausvaatimuksia. Huhturin (2015) mukaan asennelmien ja niissä käytettävien komponenttien valmistuksessa ja käsittelyssä on tärkeää kiinnittää huomiota lopputuotteeseen keräytyviin epäpuhtauksiin, jotta niitä ei päätyisi järjestelmiin, joissa asennelmia käytetään. Asennelmien valmistuksessa epäpuhtauksia syntyy liittimien käsittelystä ja letkun katkaisusta. Katkaisussa muodostuvia epä-

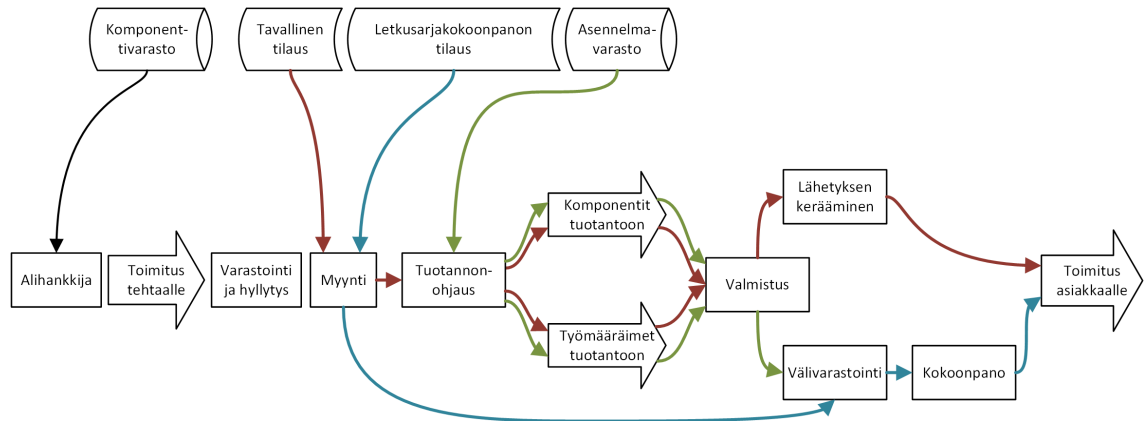
puhtauksia voidaan poistaa harjaamalla letkujen päät katkaisun jälkeen ja ampumalla erityinen puhallustulppa paineilman avulla letkun läpi. Katkaisussa muodostuviin epäpuhtauksiin vaikuttaa lisäksi letkun katkaisussa käytetty terä: sileä katkaisuterä tuottaa keskimäärin vähemmän epäpuhtauksia verrattuna hammastettuun terään. Hammastetun terän käyttäminen on kuitenkin tarpeen joidenkin letkumateriaalien katkaisemisessa.

5.2 Nykyisen tuotantoprosessin kuvaus

Tehtaan tuotantoprosessi alkaa tuotantotilauksen generoimisella. Signaali tuotantotilauksien generoimiseen tulee joko varastosta tai suoraan asiakkaalta. Asiakkaalta tulevat tilaukset saapuvat pääosin konserniin kuuluvan, valtakunnallisen myyntiyhtiön kautta. Tehdas pääsee käsiksi avoimeen tilauskantaan konsernin yhteiskäytössä olevan toiminnanohjausjärjestelmän avulla. Myös varastonhallinta toteutetaan konsernin laajuisesti käytössä olevan ERP-järjestelmän avulla.

Tuotteita valmistetaan tilausohjautuvasti ja varasto-ohjautuvasti (KIT). Tärkeimmät erot varasto-ohjautuvien ja tilausohjautuvien tuotteiden välillä ovat niiden valmistuserien koot sekä joidenkin asiakkaiden kohdalla myös toimitusajat. Tilausohjautuviksi määritellyillä tuotteilla valmistuserien koko on suoraan asiakastilauksessa määritelty, kun taas varasto-ohjautuvien tuotteiden valmistuserien koot riippuvat avoimesta tilauskannasta ja tuotteiden odotetusta menekistä. Varasto-ohjautuvien tuotteiden tilauskohtaiset valmistusmäärät ovat keskimäärin merkittävästi alhaisempia kuin tilausohjautuvalla tuotannolla: varasto-ohjatussa tuotannossa tuotteiden keskimääräinen lukumäärä tilausta kohden toukuussa 2016 oli 19 tuotetta ja tilausohjautuvina käsiteltävien asiakastilausten kohdalla puolestaan 32 tuotetta. Varasto-ohjautuvassa tuotannossa pienten eräkokojen aiheuttamaa kasvua tuotekohtaisissa asetusajoissa pyritään kompensoimaan valmistamalla suurempia eriä kuin asiakkaat ovat tilanneet. Menettelyn seurauksena valmistuotevarastoon kertyy tuotteita.

Tuotantotilausten generointi edustaa teoriaosuudessa esitettyä Löddingin (2013, s.141-142) määrittämää yhdistettyä tilaus- ja varasto-ohjausta, jossa tilausohjautuvan tuotannon tuotantotilaukset generoidaan suoraan asiakastilausten perusteella. Varastoitavien tuotteiden tuotantotilaukset puolestaan generoidaan tuotteiden menekin ja tuotannonsuunnitelijan arvion perusteella. Tehtaan tuotantoprosessi on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Tehtaan tuotantoprosessi.

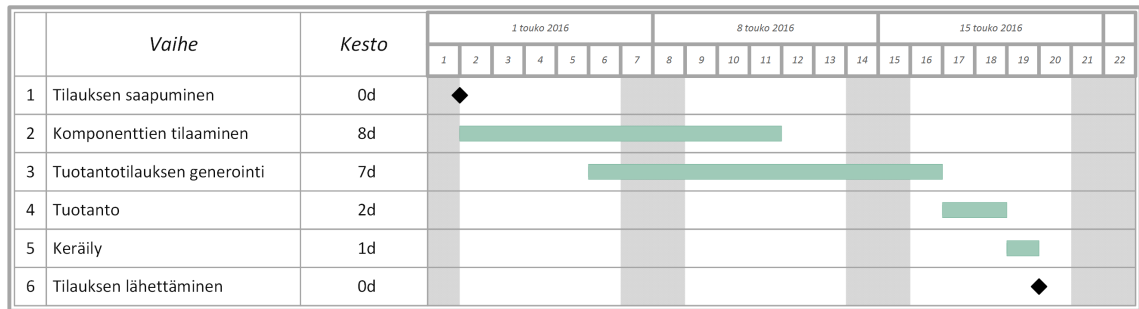
Tilausohjautuvassa tuotannossa tuotteiden toimitusajat ovat noin 3-4 viikkoa. Asiakstilausten käsittely aloitetaan asennelmiin tarvittavien komponenttien tilaamisella toimittajilta. Suuri osa komponenteista tulee konsernin omista yksiköistä, osa yrityksen ulkopuolisilta alihankkijoilta. Komponenttien tilauksessa tavoitteena on ajoittaa tilaukset siten, että tuotteet saapuvat tehtaalle viikkoa ennen suunnitellun tuotannon aloittamista. Tuotannon suunniteltu aloitusajankohta pyritään ajoittamaan noin viikkoa ennen tilaukselle määrättyä toimituspäivää. Tavoitteena on, että viimeisetkin tuotteet valmistuisivat noin kahta päivää ennen toimituspäivää. Kuvassa 22 on esitetty tilaus-toimitusprosessi tilausohjautuvassa tuotannossa.

Vaihe	Kesto	1 touko 2016							8 touko 2016							15 touko 2016					22 touko 2016						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1 Tilauksen saapuminen	0d	◆																									
2 Komponenttien tilaaminen	8d																										
3 Tuotantotilauksen generointi	11d																										
4 Tuotanto	4d																										
5 Keräily	3d																										
6 Tilauksen lähettäminen	0d																										◆

Kuva 22. Tilaus-toimitusprosessi tilausohjautuvassa tuotannossa.

Varasto-ohjautuvan tuotannon tilaus-toimitusprosessissa erona tilausohjautuvaan on tilausten vaihteleva toimitusaika sekä prosessiin sisältyvä valmiiden tuotteiden keräily varastosta. Varasto-ohjautuvan tuotannon toimitusaika vaihtelee suurimmaksi osaksi kahden ja kolmen viikon välillä, mutta joillain asiakkailta tyypillinen toimitusaika on 2-3 päivää. Lyhyiden toimitusaikojen onnistuminen edellyttää, että toimitettavat tuotteet löytyvät varastosta.

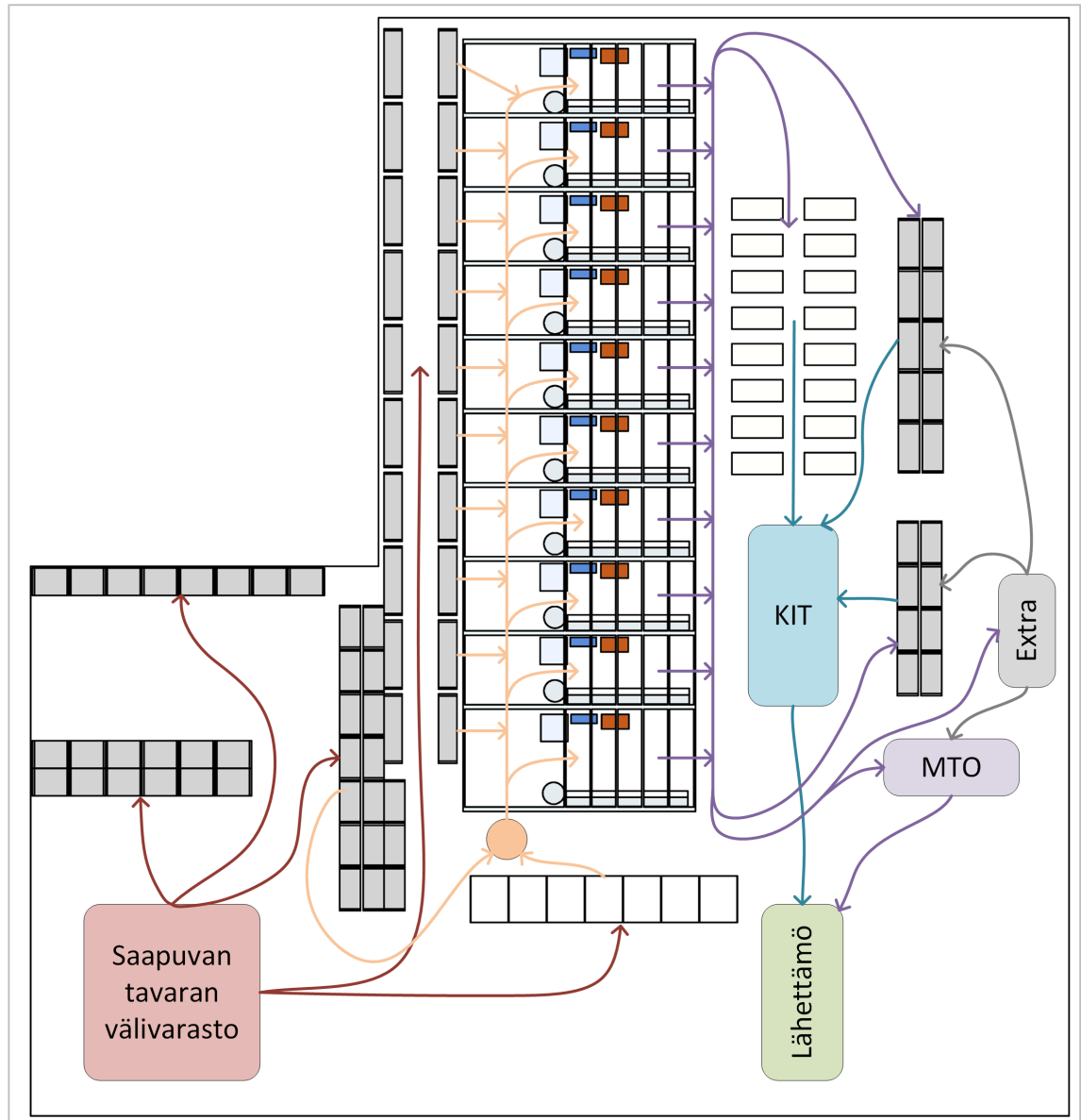
Oletuksena varastonhallinnassa on se, että varastonhallintajärjestelmässä olevat tuotteet löytyvät varastosta. Tämä ei aina pidä paikkaansa, vaan todelliset varastosaldot voivat poiketa huomattavasti järjestelmässä olevista. Ongelmaa pyritään vähentämään vuosittaisilla inventoinneilla ja reagoimalla aktiivisesti ongelmatilanteisiin. Kuvassa 23 on esitetty varasto-ohjautuvan tuotannon tilaus-toimitusprosessi.



Kuva 23. Tilaus-toimitusprosessi varasto-ohjautuvassa tuotannossa.

Tuotantotilausten generoinnin jälkeen tuotannosuunnittelija vapauttaa tuotantotilaukset tuotantoon. Tuotantotilauksien vapauttamisessa tuotannosuunnittelijan tavoitteena on rakentaa tuotantojärjestys kullekin solulle siten, että tuotannon asetajat muodostuvat mahdollisimman alhaisiksi. Tuotannosuunnittelijan tehtävänä on osaltaan myös pitää huolta tilausten valmistumisesta ajoissa. Tuotanto-ohjelman laatiminen aloitetaan siirtämällä ERP-järjestelmässä oleva avoin tilauskanta Excel-taulukkoon. Tuotanto-ohjelma muodostetaan Excel-taulukkolaskentaohjelmiston avulla jokaiselle solulle. Tuotanto-ohjelmat suunnitellaan pääosin tuotannon aloittamista edeltävänä päivänä. Hyvän tuotanto-ohjelman muodostaminen on usein melko vaativaa, koska käytössä ei ole tehokkaita visualisointikeinoja, kuten esimerkiksi Gantt-kaavioita, joiden avulla tuotanto-ohjelman silmämääräinen arviointi onnistuisi. Tuotanto-ohjelman kapasiteetintarve lasketaan ERP-järjestelmässä olevien valmistusaikojen, tuotannosta kerätyn tiedon ja suunnittelijan oman kokemukseräisen tiedon perusteella. Valmistettavien tuote-erien kapasiteetintarpeen perusteella määritetään kullekin tuotantosolulle päivittäinen tuotantotavoite.

Tuotannosuunnittelun ja toimitusketjun hallinnan lisäksi osana tehtaan tuotantoprosessin hallintaa on myös tehtaan fyysisten materiaaliavirtojen ohjaus. Materiaaliavirtojen ohjauksen tavoitteena on tehokkuuden saavuttaminen materiaalien varastoinnissa ja siirtämisessä. Materiaalin siirtämisessä pyritään minimoimaan työntekijöiden fyysinen kuormitus käyttämällä tarkoituksenmukaisia työvälineitä työtehtävien tekemiseen. Työvälineiden käyttämisellä pyritään lisäksi parantamaan materiaalinkäsittelyn tehokkuutta.



Kuva 24. Tehtaan nykyiset materiaalivirrat.

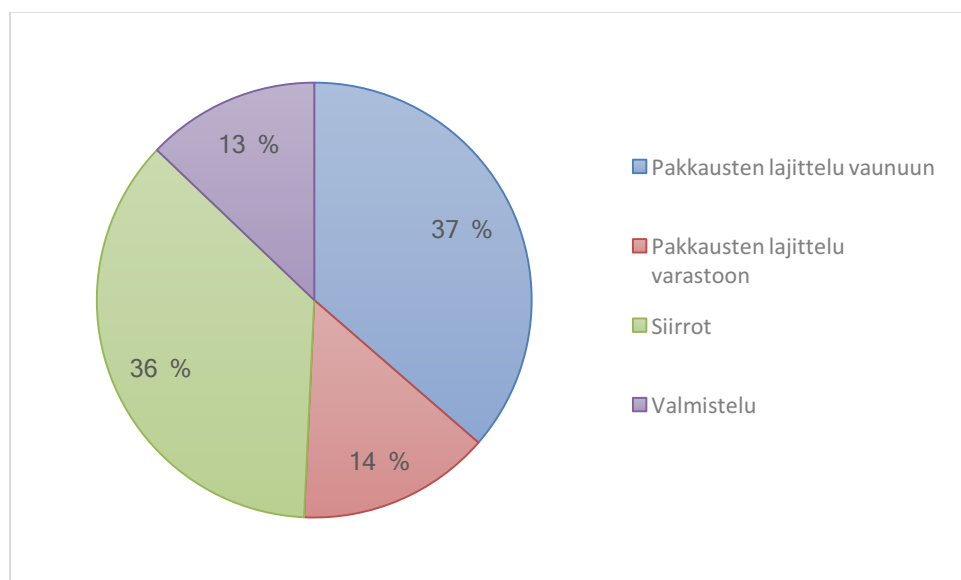
Tehtaallesi saapuva materiaali siirretään ensimmäiseksi saapuvan tavaran välivarastoon, ja tuotannon läpi kulkenut materiaali poistuu lähettämön kautta. Kuvassa 24 on esitetty tehtaalla materiaalivirtojen tyypilliset reitit tuotantojärjestelmässä. Kuvassa termillä MTO (made to stock) viitataan tilaus-ohjautuvaan tuotantoon ja termillä KIT viitataan varasto-ohjautuvaan tuotantoon. Kuvassa on lisäksi merkitty työpiste (Extra), jossa tehdään tuotantosolujen ulkopuolisia asennustöitä. Liitteessä A on esitetty materiaalivirtauksia kuvaavat arvovirrat. Nykytilan arvovirtakaavioissa esitetyt materiaalien virtausnopeudet jäävät paikoin merkittävästi tavoiteltavia virtausnopeuksia alhaisemmaksi. Lieveilmiöinä tästä ovat varastopaikkojen täyttyminen ja materiaalien tarpeeton seisominen tehtaalla. Tulevaisuudentilan arvovirtakaavioissa on merkittynä tavoiteltavat virtausnopeudet eri varastopaikoissa.

5.2.1 Saapuneen tavaran vastaanotto ja hyllytys

Tehtaalle toimitettavat kuormat saapuvat kuormalavoille lastattuina. Jokainen saapunut kuormayksikkö sisältää paperisen lähetylistan, jonka perusteella saapuneet tuotteet kirjataan ERP-järjestelmään. Saapuvalla tavaralla on toimipisteessä yksi kuormaussilta, jonka kautta materiaalit siirretään vastapainotrukin tai pumppukärryn avulla auton kuormatilasta tehtaan sisälle. Tuotteesta ja sen varastopaikasta riippuen tuotteet siirretään suoraan sille määritettyyn varastopaikkaan tai välivarastoon odottamaan lopullista kuorman purkamista. Välivarastoinnin tarve riippuu myös tuotteiden varastopaikkojen kapasiteetista, ja varastopaikkojen ollessa täysiä saapuneille tuotteille joudutaan etsimään vaihtoehtoisia säilytyspaikkoja.

Liittimet siirretään vastaanoton jälkeen välivarastoon odottamaan hyllytystä. Kuormayksiköt on sijoitettu välivarastoon siten, että niiden purkaminen hyllyihin tapahtuu kuormien saapumisjärjestyksessä. Tuotteita hyllyttäessä työntekijän tulee olla erityisen huolellinen tuotteiden sijoittamisessa oikeisiin varastopaikkoihin. Pitkät ja osittain toisiaan lähellä olevat tuotenimet lisäävät riskiä tuotteiden hyllyttämiseen väärille paikoille. Ongelmia liittimien hyllyttämisessä aiheuttaa lisäksi varastopaikkojen saatavuus. Varastopaikat voivat joiltain tuotteilta loppua, jolloin pakkaukset joudutaan siirtämään väliaikaiseen varastoon.

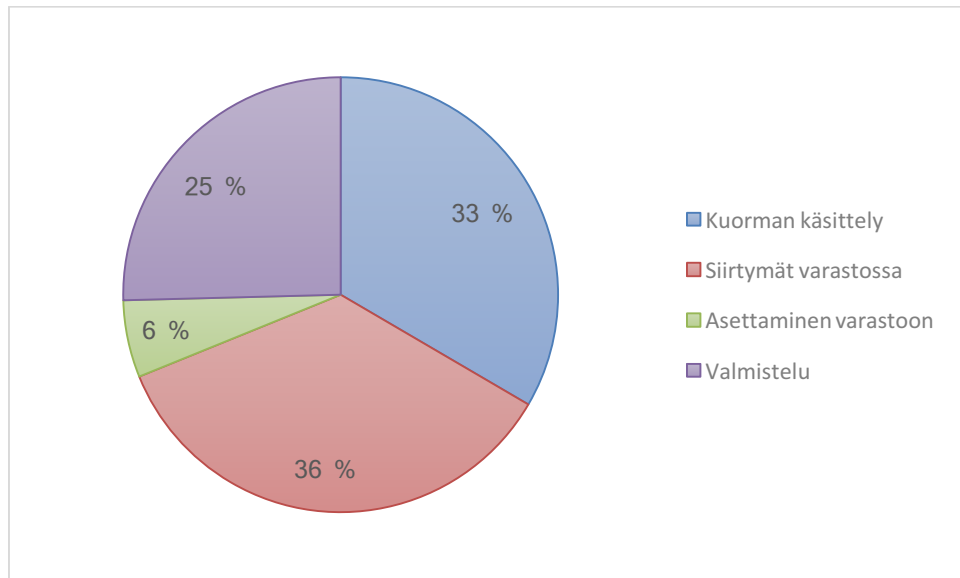
Kuvassa 25 on esitetty työajan jakautuminen liittimien hyllyttämisessä. Kuvasta on nähtävissä, että noin puolet työajasta kuluu valmisteluun ja siirtymisiin, ja toinen puolikas liittinpakkausten käsittelyyn ja lajitteluun. Vain noin 14 % työajasta on varsinaista liittinpakkausten hyllyttämistä.



Kuva 25. Työajan jakautuminen liittimien hyllyttämisessä.

Hydrauliikkaletkumateriaali saapuu tehtaalle metritavarana keloissa. Kelat siirretään varastoon usein sellaisenaan, mutta kelojen kuormausta voidaan myös joutua muuttamaan,

jotta ne voidaan varastoida. Myös hydraulikkaletkut siirretään ensimmäiseksi välivarastoon, josta ne siirretään tämän jälkeen varsinaisiin varastopaikkoihin. Hydraulikkaletkuille on kaksi varastoa pakkauksen koosta riippuen. Suuremmat pakkaukset sijoitetaan pääsääntöisesti etäämmällä sijaitsevaan varastoon ja pienemmät pakkaukset kapeakäytävävarastoon tuotantosolujen viereen.

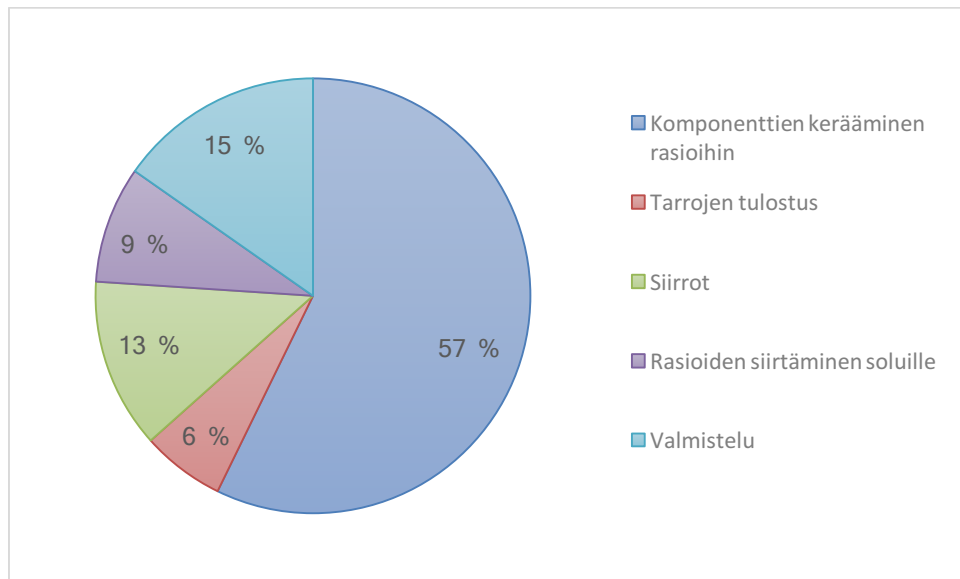


Kuva 26. Työajan jakautuminen letkujen hyllyttämisessä.

Kuvassa 26 on esitetty työajan jakautuminen hydraulikkaletkujen hyllyttämisessä. Kuvasta on nähtävissä, että suurin osa työajasta kuluu saapuneen kuorman käsittelyyn sekä siirtymiin varastossa.

5.2.2 Materiaalin keräily ja toimitus tuotantosoluille

Materiaali toimitetaan tuotantosoluille keskitetysti. Toimitettavaan materiaaliin kuuluvat asennelmissa käytettävät liittimet, letkut, tarrat sekä työmääräimet. Vaiheen työntekijät ovat vastuussa oikeiden materiaalin ja työmääräimien toimittamisesta soluille ajoissa. Oikeellisuuden varmistamiseksi työntekijöiden tulee tarkistaa kerättävien letkujen vastavuus työmääräimessä olevaan tietoon, sillä tarkistamatta jättämisen on havaittu johtavan satunnaisiin virheisiin komponenttien keräilyssä. Työntekijöiden työtehtäviin kuuluu myös seurata tuotantosolujen tilasta kertovia majakoita, solujen taakse siirrettyjä tyhjiä laatikoita, joihin työntekijät pyrkivät reagoimaan mahdollisimman nopeasti. Työnvaiheen työntekijät pitävät lisäksi huolta asennelmien ja niiden sisältämien komponenttien jäljitettävyydestä kirjaamalla käytettävien liittinten jäljitettävyydestä kunkin työmääräimen kohdalle ERP-järjestelmään. Tiedot kirjataan käyttäen viivakoodinlukijaa ja taulutietokoneita. Komponenttien keräilyn ja toimituksen lisäksi työnvaiheen työntekijät tekevät myös joitain erikoistöitä, kuten esimerkiksi pienten liittinten stanssauksia ja letkujen leikkauksia, joita varsinaisilla valmistussoluilla ei voida tehdä.

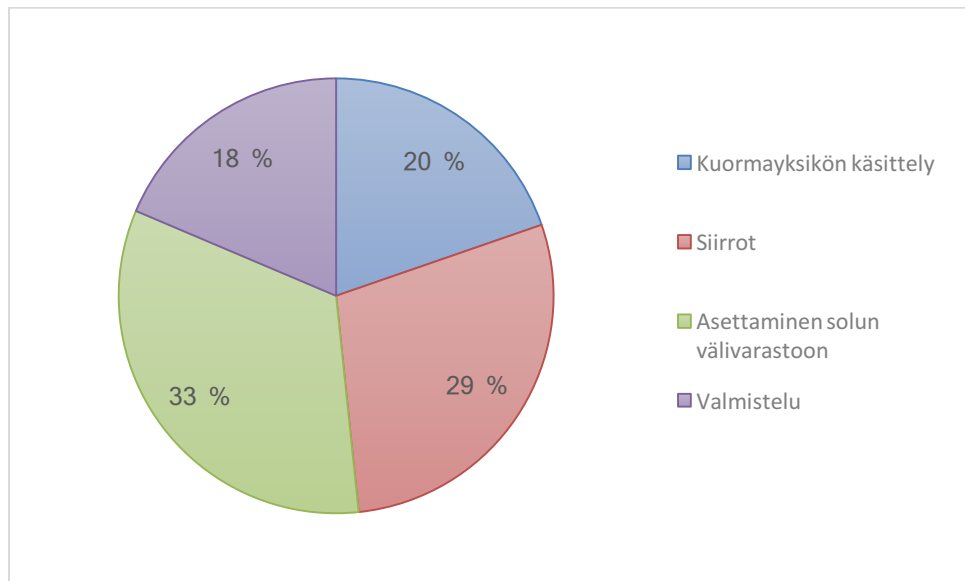


Kuva 27. Työajan jakautuminen liittinten, tarrojen ja työmääräimien toimittamisessa tuotantosoluille.

Tuotantosoluille toimitettavien liittinten keräys alkaa yhdellä kerralla käsiteltävien työmääräimien valitsemisella. Työmääräimet ovat työpisteellä lajiteltuina solukohtaisiin lokeroihin, joista kukin työntekijä poimii omaan vastuualueeseensa kuuluvia työmääräimiä parhaaksi katsomansa määrän yhdellä kertaa kerättäväksi. Sopivan määrän päätettyään työntekijä poimii hyllyltä tarvittavan määrän muovisia keräysastioita sekä niissä käytettäviä välilevyjä, ja asettelee ne keräilyvaunun päälle. Tämän tehtyään työntekijä siirtyy työpisteellä sijaitsevan tietokoneen äärelle ja tulostaa asennelmiin liimattavat tarrat. Tarrojen tulostuksen jälkeen työntekijä aloittaa liittimien keräämisen kullekin tilaukselle. Liittimiä sijaitsee tehtaalla useassa eri varastopaikassa, minkä vuoksi materiaalin keräilyt joutuvat kulkemaan melko paljon eri varastopaikkojen välillä. Työntekijät kokevat liikkumisen pääasiallisesti positiivisena asiana.

Kuvassa 27 on esitetty työntekijöiden ajankäyttöä materiaalin keräyksessä ja toimituksessa soluille. Kuvasta on nähtävissä, että liittimien toimittamisessa tuotantosoluille suurin osa ajasta kuluu komponenttien keräämiseen rasioihin. Siirtymien ja valmistelun osuus kokonaistyöajasta on hieman vajaa 30 %.

Letkujen toimittaminen solujen välivarastoon on liittinten ja komponenttien solujen välivarastoon toimittamista suoraviivaisempi työtehtävä. Letkujen siirtäminen solujen välivarastoon tehdään käyttäen samaa kapeakäytävätrukkia kuin millä ne on varastoon siirretty. Työntekijä siirtää välivarastossa olevan tyhjän kuormalavan pois, jonka jälkeen hän hakee varastosta täyden letkukelan ja siirtää sen välivarastoon. Kaikille käytetyille letkutyypeille ei kuitenkaan ole nimettyä välivarastopaikkaa, jolloin ne joudutaan siirtämään solujen läheisyydessä sijaitseviin nimeämättömiin välivarastopaikkoihin.

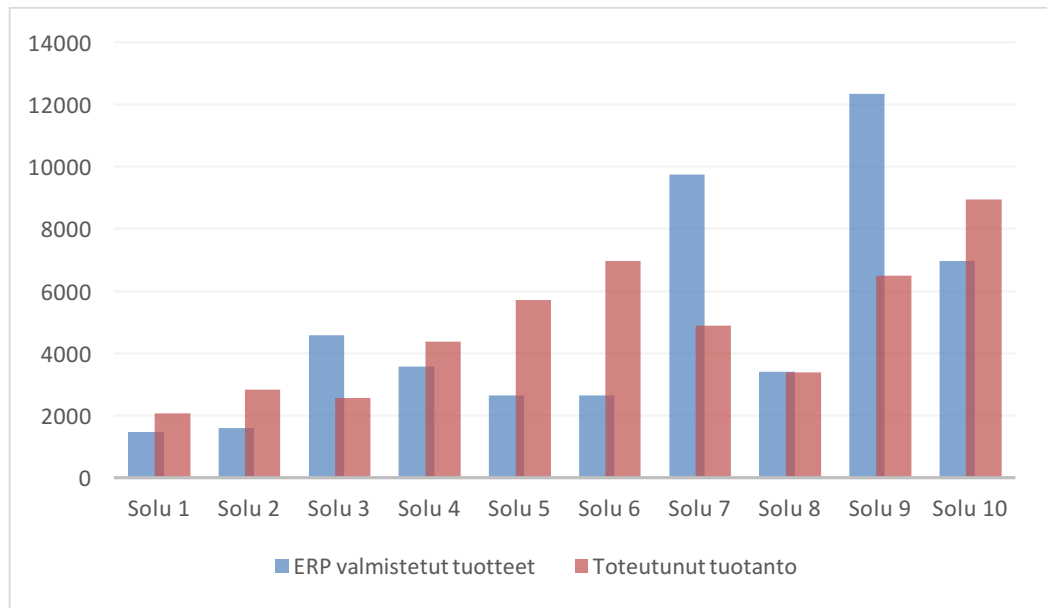


Kuva 28. Työajan jakautuminen letkujen toimittamisessa tuotantosoluille.

Suurin osa ajasta letkujen toimittamisessa tuotantosoluille menee kuorman käsittelyyn, valmisteluun ja siirtoihin, joiden osuus työnvaiheen kokonaiskestosta on keskimäärin hieman yli 65 %. Kuvassa 28 on esitetty työajan jakautuminen letkujen keräämisessä tuotantosolujen välivarastoon.

5.2.3 Letkuasennelmien valmistus tuotantosoluilla

Letkuasennelmien valmistusta varten tehtaalla on kymmenen tuotantosolua. Jokaisella valmistettavalla tuotteella on nimetty valmistussolu, jossa niiden valmistus oletusarvoisesti tapahtuu. Solujen käytössä olevasta konekannasta riippuen monia asennelmia voidaan valmistaa useammassa kuin yhdessä solussa. Tuotannossa on myös asennelmia, joita voidaan valmistaa ainoastaan tietyssä solussa. Solujen konekanta on täten kohtalaisen homogeeninen, ja eroja solujen välillä on pääasiassa letkuliitinpuristimissa ja niissä käytetyissä puristusleuoissa. Lisäksi kahdessa valmistussolussa on erillinen letkujen kuorimiseen tarkoitettu laite. Ensimmäinen tuotantosolu poikkeaa myös hieman muista soluista, sillä sen valmistus keskittyy sisähalkaisijaltaan suurten asennelmien valmistamiseen ja solun konekanta on täten räätälöity kyseiseen tarpeeseen. Kuvassa 29 on havainnollistettu tuotantosolujen toteutuneiden valmistusmäärien ja ERP-järjestelmässä olevien tuotantomäärien eroja toukokuussa 2016. Kuvasta on selkeästi nähtävissä, että tuotteiden todelliset valmistussolut poikkeavat niiden oletusarvoisista valmistussoluista.



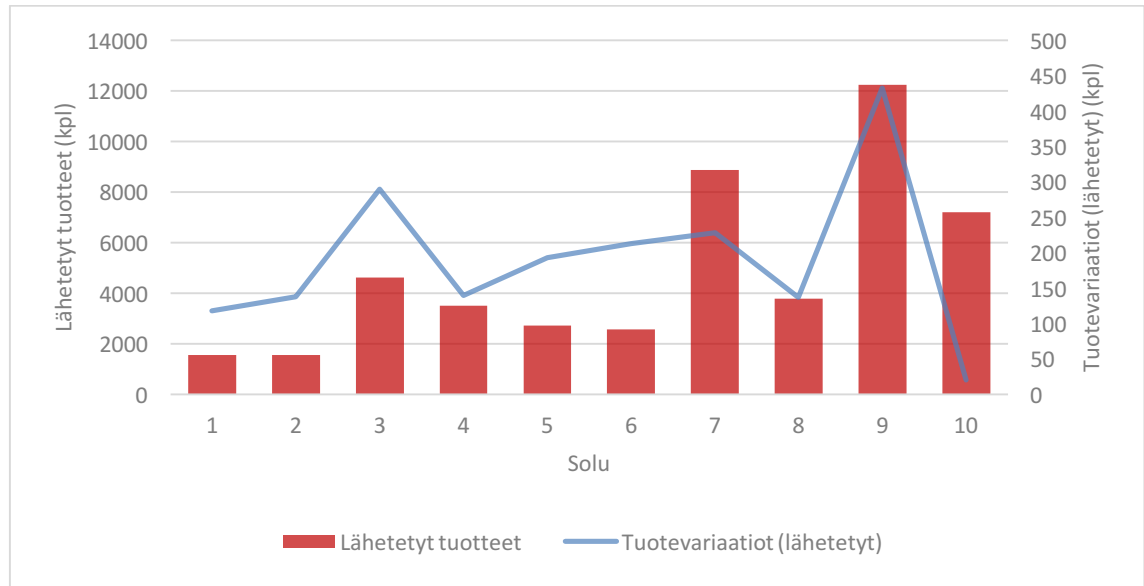
Kuva 29. Valmistuneen tuotannon väliset erot ERP:n ja tuotannosta manuaalisesti kerätyn tiedon välillä.

Yhteenlasketuissa tuotantomäärissä ero jää kuitenkin kohtuullisen pieneksi: toteutunut tuotanto on kokonaisuudessaan noin 1,5 % alhaisempi kuin ERP:iin kirjautunut valmistunut tuotanto. Kuvissa 30 ja 31 on lisäksi esitetty ERP:iin kirjautunut lähetetty tuotanto ja solukohtaisten tuotevariaatioiden määrä sekä lähetetyssä että valmistuneessa tuotannossa.

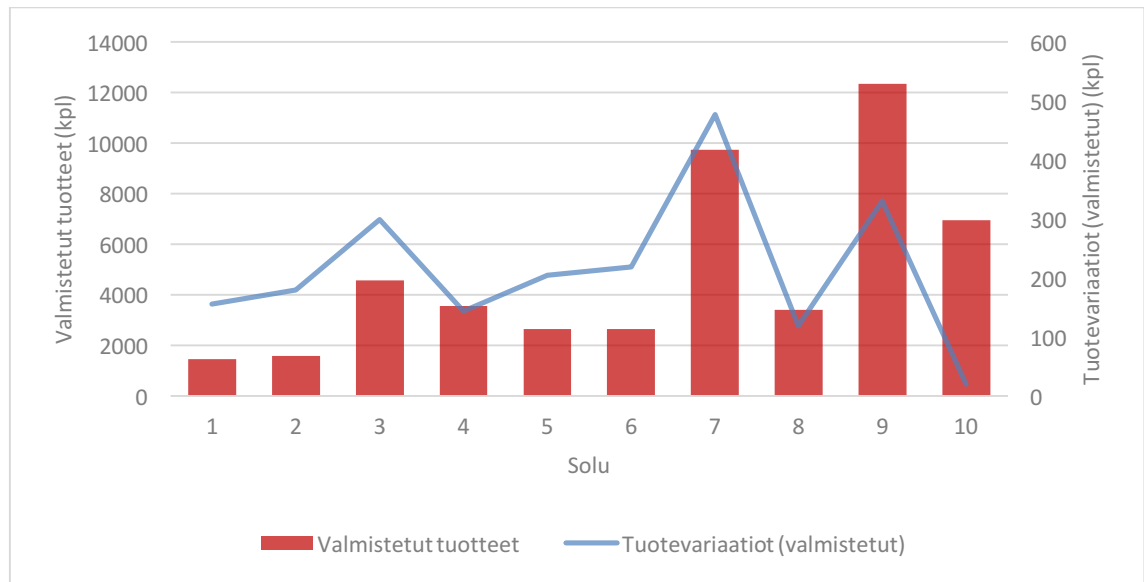
Tuotantosoluilla tehtävä työ alkaa tuotantoeräkohtaisen työmääräimen ja erään kuuluvien komponenttien poimimisella solun takaosaan sijoitetusta hyllystä. Tämän tehtyään työntekijä aloittaa tarvittavien asetusten tekemisen. Tuotantoerien välinen asetus koostuu:

- letkun vaihdosta
- letkun katkaisumitan asettamisesta ja tarkistamisesta
- letkun kuorintatyökalun vaihdosta
- puristusleukojen ja stanssausmerkinnän vaihtamisesta
- puristusarvojen asettamisesta
- puhdistustulpan ja suuttimen vaihdosta.

Letkun katkaisumitan tarkistaminen tehdään aina ensimmäisen asennelman valmistumisen jälkeen. Kaikkia vaiheita ei kuitenkaan ole tarpeellista tehdä, mikäli muutokset asennelmien ominaisuuksissa erien välillä ovat pieniä. Asetustyötä joudutaan tarvittaessa tekemään myös tuotantoerän valmistuksen aikana.

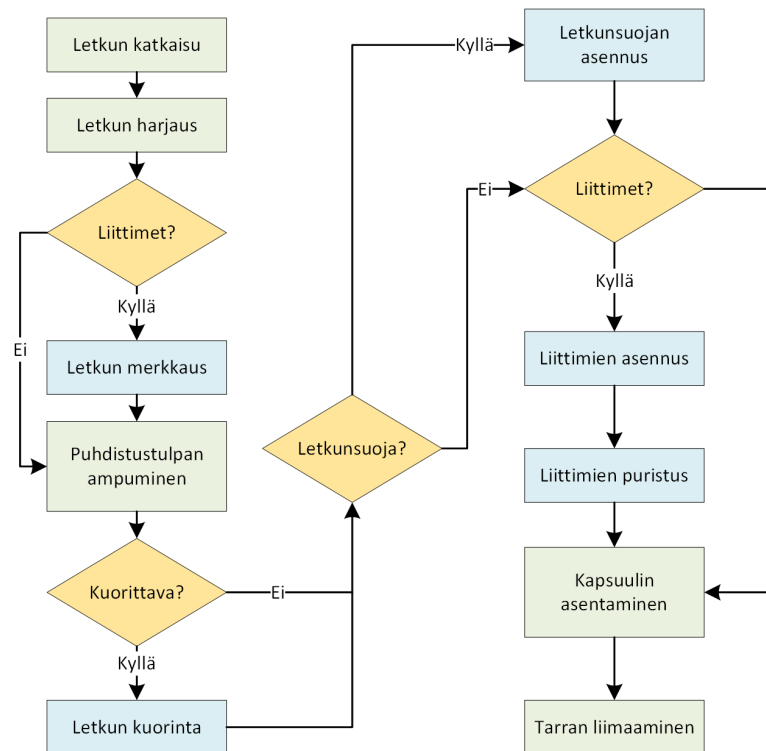


Kuva 30. Asiakkaille lähetettyjen asennelmien määrät ja tuotevariaatiot.



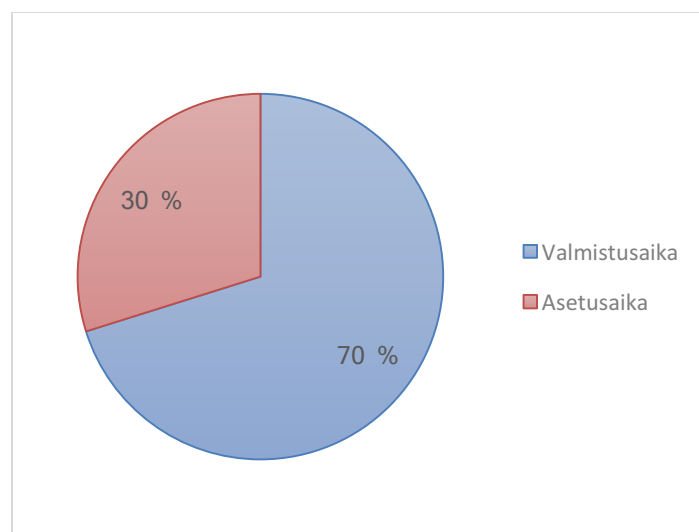
Kuva 31. Valmistettujen asennelmien määrät ja tuotevariaatiot.

Kuvassa 32 on esitetty asennelmien valmistuksen työn vaiheistus. Kuvassa sinisellä merkatus vaiheet ovat asennelmasta riippuvia työvaiheita, ja vihreällä merkatus vaiheet tehdään jokaisen asennelman kohdalla. Varsinaisen asennustyön lisäksi asennelmien valmistuksessa huomioidaan tuotteiden puhtaus ja niille asetetut mittatoleranssit. Letkun harjaus ja tulppaus tehdään tuotteiden puhtauden varmistamiseksi. Ensimmäisen asennelman valmistumisen jälkeen sen pituus tarkistetaan mittaamalla ja katkaisumittaa muutetaan, mikäli tulos ei mahdu toleranssirajojen väliin. Laadun vuoksi tehtävät työvaiheet aiheuttavat kuitenkin ongelmia valmistukseen. Tulppien ampumisessa käytettävät työmenetelmät sotkevat lattiaa, koska tulppien tähtääminen roskakoriin on välillä haasteellista. Lisäksi tulpan läpimenosta varmistuminen on vain silmämääräistä. Katkaisumittan tarkistus haittaa työn edistymistä erityisesti silloin, kun solulla on kaksi työntekijää.



Kuva 32. Asennelmien valmistuksen työn vaiheistus.

Johtuen erillisestä materiaalien toimituksesta soluille, tuotantosolujen työntekijät voivat keskittyä asennelmien valmistukseen. Asennelmien valmistukseen kuluva ajasta kuluu kuitenkin noin 30 % asettamiseen, mikä vastaa yhden työpäivän aikana kahta tuntia tehokasta työaikaa. Kuvassa 33 on esitetty työajan jakautuminen valmistusajaksi ja asetusaajaksi letkuasennelmien valmistuksessa tuotantosoluilla.



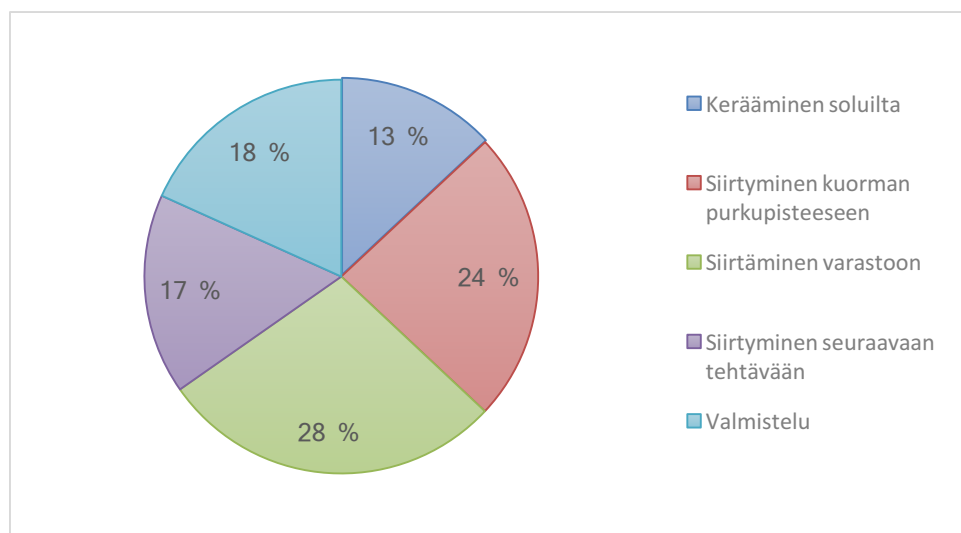
Kuva 33. Työajan jakautuminen letkuasennelmien valmistuksessa tuotantosoluilla.

Työntekijöiden määrä vaihtelee yhdestä kahteen työntekijään tuotantosolua kohden. Kahden työntekijän käyttäminen tuotantosolussa lisää tuottavuutta noin 50 %:lla niissä soluissa, joiden eräkoot ovat kohtalaisen suuria. Lyhyitä eräkokoja tehdessä tuottavuuden

parantuminen kahden työntekijän solussa jää melko pieneksi, sillä asetustyötä ei voida jakaa tasapuolisesti kahdelle työntekijälle.

5.2.4 Asennelmien keräily tuotantosoluilta välivarastoon ja lähetettävälle kuormalavoille

Kun asennelmat ovat valmistuneet, siirretään ne seuraavaan vaiheeseen tuotteen valmistusketjussa. Tilausohjautuva tuotanto siirretään valmistussolulta tilausohjautuvan tuotannon välivarastoon, jossa tuotteet lajitellaan kuormalavoille tilauksien mukaan. Tilauksien valmistuttua ne siirretään lähtevän tuotannon varastoon odottamaan kuljetusta. Pieni osa tuotannosta kerätään suoraan lähtevän tuotannon varastoon, joko kuormalavalle tai muuhun pakkausyksikköön. Varasto-ohjautuva tuotanto kerätään valmistussoluilta joko varastohyllyillä sijaitseviin kuormalavoihin tai erityisiin ripustinnauhoilla varustettuihin telineisiin, räkkeihin. Letkujen siirtämiseen käytetään apuvälineenä keräilyvaunua, siirrettävää telineitä tai kuormalavaa. Korkealla sijaitseville lavapaikoille siirrettäessä joudutaan lisäksi käyttämään apuvälineenä pinoamistrukkia.



Kuva 34. Työajan jakautuminen asennelmien keräilyssä soluilta.

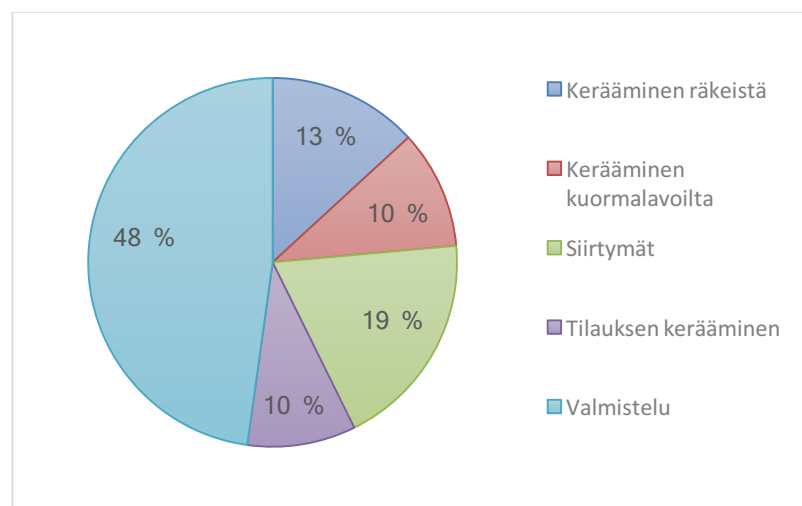
Työajan jakautuminen asennelmien keräilyssä soluilta on esitetty kuvassa 34. Työajan jakautuminen työnvaiheessa koostuu pääosassa valmiiden asennelmien käsittelystä ja niiden siirtämisestä tehtaalla. Lisäksi työaikaa kuluu erinäisiin valmisteleviin töihin, kuten kuormalavojen käsittelyyn ja valmistuneiden työmääräimien kuittaamiseen järjestelmään. Kuormalavojen ja raskaiden letkujen käsitteleminen on fyysisesti kuormittavaa, mikä edellyttää työnvaiheen työntekijältä hyvää fyysistä kuntoa ja hyvän työskentelyergonomian osaamista. Valitettavasti kaikille työtehtäville ei kuitenkaan ole tarkoituksenmukaisia työpisteitä, jolloin myöskään työskentelyergonomia ei aina ole paras mahdollinen.

Työnvaiheen työntekijät tekevät myös monia asennelmien valmistukseen liittyviä töitä, joita ei tehdä valmistussoluilla. Näihin työtehtäviin lukeutuvat esimerkiksi muovisten letkunsuojien asennus, tankkausletkujen valmistus sekä tarrojen liimaus valmiisiin asennelmiin.

5.2.5 Asennelmasarjojen keräily varastosta

Varasto-ohjautuvan tuotannon asiakastilausten materiaali kerätään varastosta. Koska pääosa tuotannosta on varasto-ohjautuvaa, myös pääosa asiakkaille toimitettavista tuotteista kiertää varaston kautta. Materiaali kerätään asiakastilauksista muodostettujen kittilistojen mukaisesti omiin kuljetusyksikköihin. Suurin osa kerättävistä tilauksista, kiteistä, kerätään suoraan kuormalavoille. Osa tilauksista kerätään puolestaan pienikokoisiin pahvilaitikoihin, jotka kootaan kuormalavoille lähettämistä varten. Koska tuotteet kiertävät varaston kautta, käy usein niin, että varastoon asetettuja tuotteita kerätään sieltä pois vain minuutteja varastoon asettamisen jälkeen.

Räkkeihin varastoitu materiaali kerätään pääsääntöisesti keräysvaunuun, josta materiaali siirretään lopulliseen kuormayksikköön. Myös kuormalavoille varastoitu materiaali kerätään keräilyvaunuun ja korkeilla varastopaikoilla olevien tuotteiden keräämisessä joudutaan käyttämään apuvälineenä samaa pinoamistrukkia, jota käytetään letkuja varastoon asettaessa. Ongelmia korkealla sijaitsevien asennelmien keräyksessä ja varastoinnissa aiheuttaa kapea väli hyllyjen välissä sekä yhteiskäytössä olevan pinoamistrukin saataavuus. Ongelmia aiheuttaa lisäksi nimettyjen varastopaikkojen vähäinen määrä verrattuna varastoitaviin tuotteisiin, mikä johtaa asennelmien varastointiin satunnaisiin sijainteihin, joista niiden löytäminen keräilyvaiheessa on aikaa vievää.



Kuva 35. Työajan jakautuminen asennelmasarjojen keräämisessä varastosta.

Työajan jakautuminen asennelmasarjojen keräämisessä varastosta on esitetty kuvassa 35. Yli puolet päivittäisestä työajasta asennelmasarjojen keräilyssä kuluu valmisteluun ja siirtoihin. Valmisteluun työvaiheessa kuuluvat kuormalavojen käsittely, kuormayksiköiden

valmistelu, papereiden käsittely ja muu toiminta, joka ei suoranaisesti edistä tuotannon valmistumista.

5.3 Nykytilan simulointitutkimus

Nykytilan tarkastelua syvennettiin simulointimallin avulla. Simulointimallin avulla syvennettiin ymmärrystä erityisesti nykyisen prosessin eri osien vaikutussuhteista toisiinsa. Nykytilan simulointimallia oli myös tarpeen käyttää vertailukohtana tulevaisuudentilan simulointimallien tuloksille. Vertailukohdan saaminen oli erityisen olennaista niiden tulosten kohdalla, joista ei ollut saatavilla todellisesta järjestelmästä kerättyä tietoa.

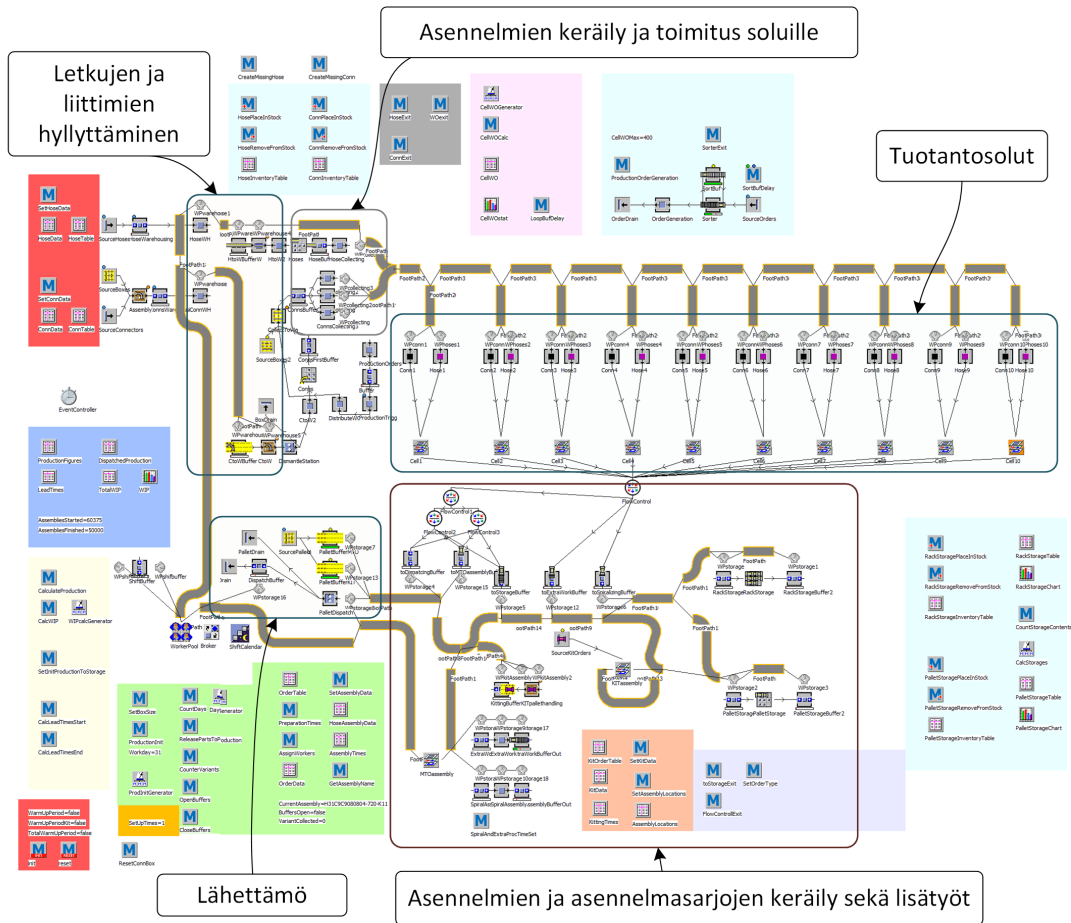
Nykytilan simulointimallista pyrittiin tekemään mahdollisimman monipuolisesti konfiguroitava, jotta tulevaisuudentilan simulointimallit olisivat mahdollisimman helposti rakennettavissa nykytilan simulointimallin pohjalle. Mallit haluttiin pitää mahdollisimman samanlaisina keskenään, jotta kontrollin määrä tutkimuksessa pystyttiin pitämään mahdollisimman suurena. Mallien vertailukelpoisuuden säilyttämiseksi nykytilan mallia jouduttiin muuttamaan jälkikäteen vielä tulevaisuudentilan mallien rakentamisen aikana, koska niitä rakennettaessa huomattiin joitain perustavanlaatuisia epäkohtia, jotka täytyi korjata.

5.3.1 Nykytilan simulointimallin esittely

Simulointimalli rakennettiin noudattaen konseptimallissa määritettyä rakennetta. Simulointimallia rakennettaessa päädyttiin alusta asti hyödyntämään ohjelmiston tukemaa laajaa oliomaisuutta: malli koostuu viidestä pienemmästä kehyksestä ja yhdestä pääkehyksestä, johon myös simulointikello sijoitettiin. Kaikki kehykset luotiin luokkakirjastoon, jolloin niistä voitiin luoda haluttu määrä ilmentymiä simulointimalliin. Sijainti luokkakirjastossa mahdollisti myös useiden luokista luotujen ilmentymien parametrien muokkaamisen yhdellä kerralla. Luokkakirjastoon luotiin myös omat luokat jokaiselle useampaan kertaan toistuvalla objektilla sekä omat luokkansa kaikille mallin liikkuville entiteeteille. Liikkuviksi entiteeteiksi malliin luotiin tuotteissa käytettävät liittimet ja letkut, valmiit asennelmat sekä kuljetusyksikkö tuotteiden siirtämiseen tehtaan sisällä. Simulointimallin pääkehys on esitetty kuvassa 36.

Nykytilan ja samalla myös tulevaisuudentilan simulointimalleissa hyödynnettiin laajasti simulointiohjelmiston tarjoamaa työntekijöiden mallinnusta, sillä tehtaan tuotanto on kokonaisuudessaan manuaalista. Tämän lisäksi simulointikokeiden avulla haluttiin tutkia työntekijöiden liikkumista tehtaalla, koska projektin alussa tehdyn tuotantoon perehtymisen aikana havaittiin työntekijöiden liikkuvan paljon tehtaan sisällä työtehtäviä tehdesään. Työntekijöiden mallinnuksesta tulikin simulointimallin rakentamisen kannalta aikaa vievin ja haastavin vaihe. Työntekijöiden mallinnus osoittautui kuitenkin kannattavaksi, koska sen avulla kyettiin syventämään ymmärrystä työnvaiheiden kuluttamista

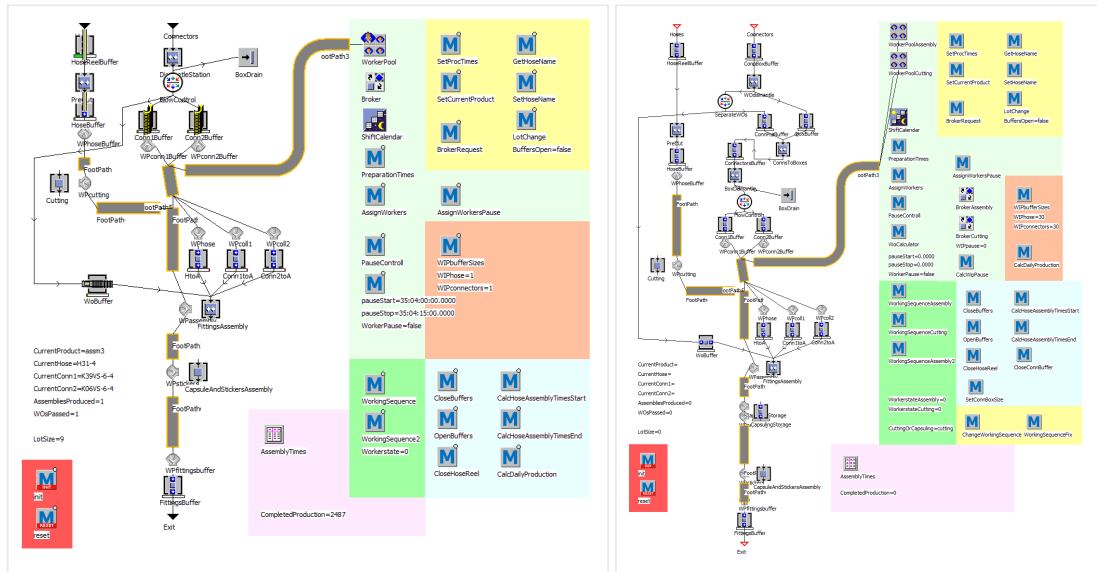
ajoista. Simulointimallissa työntekijöiden reitit mallinnettiin melko karkealla tasolla, mutta reittien pituudet ovat pääsääntöisesti lähellä todellisia välimatkoja.



Kuva 36. Nykytilan simulointimallin tuotantolinjasto.

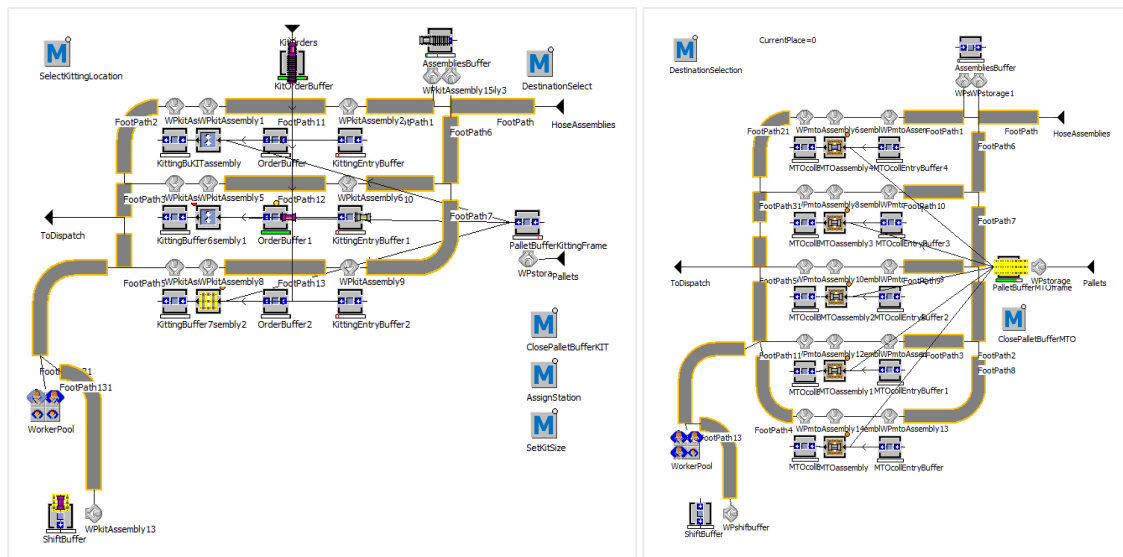
Erityisen tarkasti simulointimalleihin mallinnettiin tuotantosolujen toiminta, koska niillä katsottiin olevan yksittäisistä mallinnettavista elementeistä suurin vaikutus mallien validiteetille, mikä osoittautui simuloiteja tehdessä paikkaansa pitäväksi. Tuotantosolut mallinnettiin luokkakirjastoon omiksi kehyksikseen, joista luotiin pääkehykseen tarpeellinen määrä ilmentymiä.

Tuotantosoluilla tehtävä työ jaettiin konseptimallin mukaisesti työpisteiksi, jotka sisältävät määrättyt työnvaiheet. Kuvassa 37 on esitetty simulointimalliin mallinnetut yhden ja kahden työntekijän tuotantosolut.



Kuva 37. Tuotantosolut 1 (vas.) ja 10 (oik.) nykytilan simulointimallissa.

Valmiiden tuotteiden kerääminen asiakkaille lähetettäväksi sarjoiksi tehdään nykytilan simulointimallissa erillisissä loppukokoonpanosoluissa, jotka vastaavat todellisen tuotantojärjestelmän vastaavia työpisteitä. Sekä tilausohjautuvalle että varasto-ohjautuvalle tuotannolle mallinnettiin omat loppukokoonpanosolut. Myös loppukokoonpanosoluista tehtiin omat luokat luokkakirjastoon. Loppukokoonpanosolujen toteutus on esitetty kuvassa 38.



Kuva 38. Varasto-ohjautuvan (vas.) ja tilausohjautuvan (oik.) tuotannon loppukokoonpano nykytilan simulointimallissa.

Simulointimallin tarvitsemat lähtötiedot perustuvat tuotannosta kerättyyn tietoon. Nykytilan mallia varten jouduttiin lisäksi tekemään arvioita joidenkin ilmiöiden, kuten esimerkiksi tuotannon häiriöiden, esiintymisestä. Todellisesta tuotantojärjestelmästä kerättyä ja

simulointimalliin sovitettua tietoa ovat työvaiheiden kestot, työn vaiheistus sekä käytävissä oleva tuotantokapasiteetti. Tuotanto-ohjelmaksi simulointimalliin muodostettiin todellisen tiedon perusteella keinotekoinen, sykleittäin toistuva tuotanto-ohjelma. Tuotanto-ohjelmassa yhden syklin pituus on yksi päivä ja se sisältää kaikki suunnittelutuotteisiin valitut tuotteet, joita oli yhteensä 101.

Simulointikokeiden tuloksien keräämistä varten simulointimalliin rakennettiin laaja tiedonkeruu, jonka avulla kerättiin tietoa tuotantomääristä, valmistuksen läpimenoajoista, varastotasosta sekä keskeneräisen tuotannon määrästä. Simulointimallista kerättävää tietoa ovat:

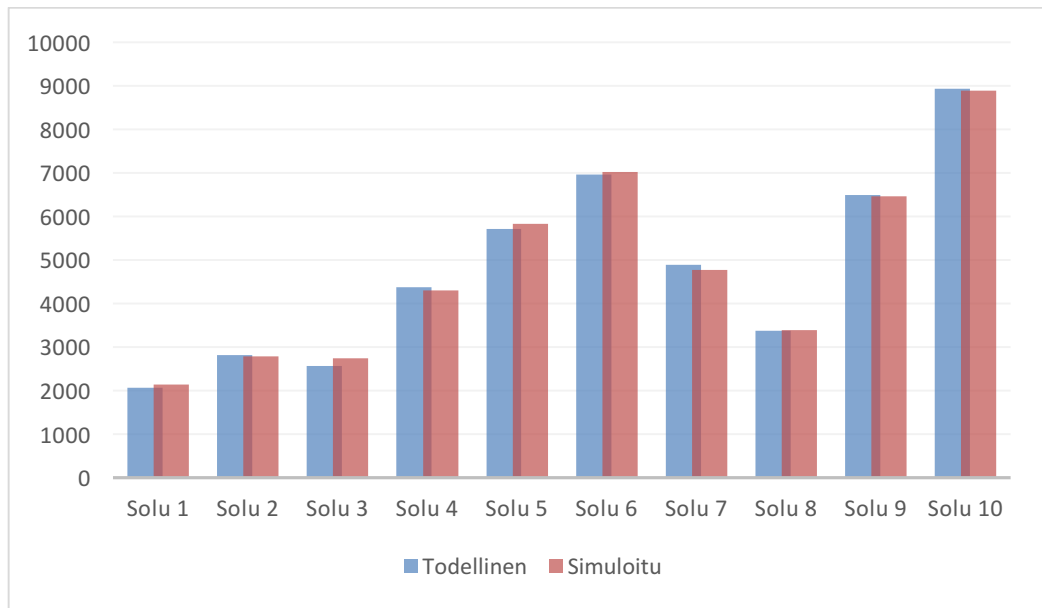
- tuotantomäärät valmistuneelle ja lähetetylle tuotannolle
- tuotteiden valmistusajat tuotantosoluilla
- tuotannon läpimenoaika
- valmistuneen tuotannon varastotasot
- keskeneräisen tuotannon määrä.

Tuotannon läpimenoajalla tarkoitetaan tässä tapauksessa aikaa, joka kuluu tuotantotilauksen generoinnista tuotteen siirtymiseen lähtevän tuotannon varastoon. Simulointimallin avulla ei valitettavasti pystytty selvittämään koko tuotannon läpimenoaikaa tilauksesta toimitukseen. Syy tähän on mallin yksinkertaistuksissa: tuotantotilauksia ei sidottu määrättyihin asiakastilauksiin.

5.3.2 Nykytilan simulointitutkimuksen tulosten esittely

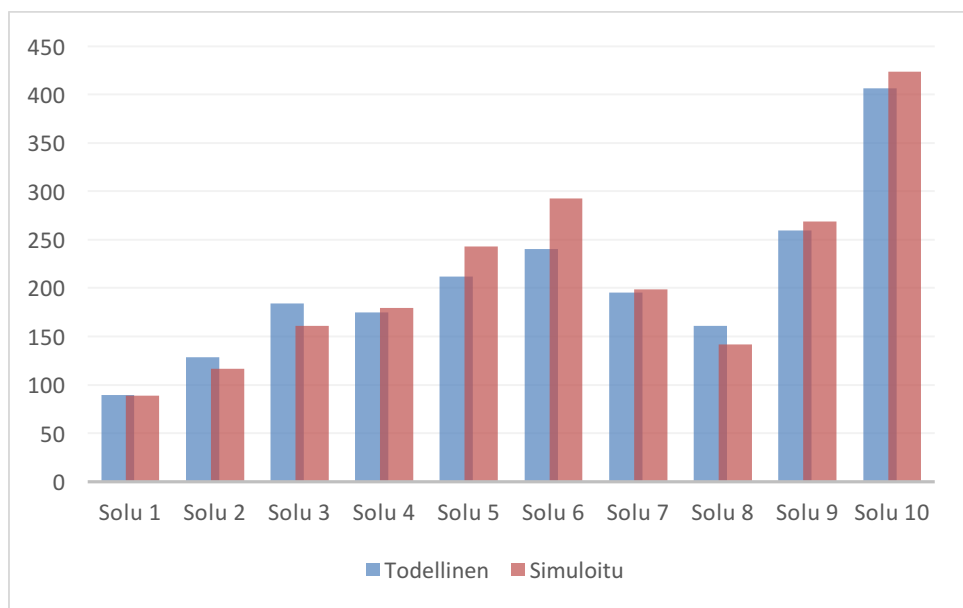
Nykytilan simulointimallin avulla tehdyistä simulointikokeista kerätyt tulokset ovat kokonaisuudessaan malliin rakennetun tiedonkeruun tuottamia. Simulointiohjelmasta kerätyt tiedot kopioitiin taulukkoon, jossa niistä muodostettiin halutut kuvaajat. Joitain kuvaajia saatiin muodostettua myös suoraan simulointiohjelman avulla, mikä helpotti mahdollisten virheiden havainnointia.

Simulointimallin tuottamasta tiedosta ainoastaan tuotteiden valmistus- ja toimitusmääriä päästiin vertailemaan todelliseen tuotantojärjestelmään. Kuvassa 39 on esitetty yhden kalenterikuukauden aikana valmistunut tuotanto soluihin tuotannosta kerätyn sekä simulointimallista kerätyn tiedon perusteella. Kuvasta on nähtävissä solukohtaisten tuotantomäärien olevan hyvin lähellä toisiaan. Yhteenlasketuissa tuotantomäärissä simulointimallin kuukausittainen tuotantomäärä on vain 0,25 % todellista suurempi.



Kuva 39. Kuukauden tuotantomäärä nykytilan simulointimallissa.

Nykytilan simulointimallin avulla tarkasteltiin myös tuotantosolujen työntekijöiden määrän vaikutusta tuotantomääriin. Yhden työntekijän lisäämisen seurauksena tuotantomäärien havaittiin kasvavan noin 40-50 % niissä soluissa joissa, joissa keskimääräinen erä koko on yli 20 kappaletta.

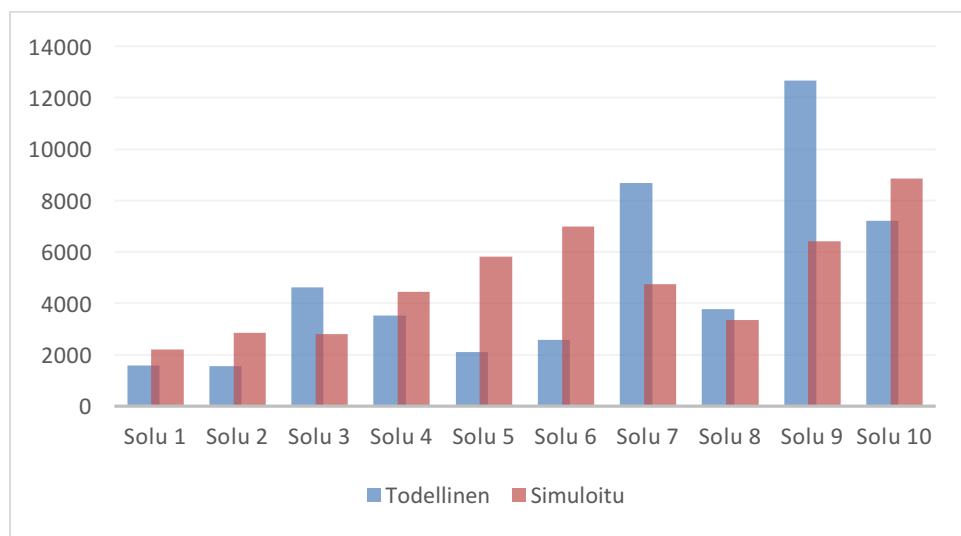


Kuva 40. Päivittäinen tuotantomäärä nykytilan simulointimallissa.

Tarkasteltaessa keskimääräisiä tuotantomääriä päivittäisellä tasolla ero tuotannosta ja simulointimallista kerättyjen tuotantomäärien kohdalla on hieman suurempi. Päivittäiset tuotantomäärät simulointimallissa eivät millään tuotantosolulla kuitenkaan ylittäneet todellisen tuotannon suurimpia päivittäisiä tuotantomääriä. Erot tuotantomäärissä johtuvat

pääosin ylimääräisten, viikonlopuille sijoittuvien työpäivien tekemisestä todellisessa tuotannossa. Yritys haluaa kuitenkin välttää ylimääräisten työpäivien teettämistä ja koska tulevaisuudentilan simulointimallien tuotantokapasiteetti haluttiin pitää identtisenä nykytilan mallissa olevaan, ei ylimääräisiä työpäiviä mallinnettu nykytilan simulointimalliin, sillä ne olisivat tällöin periytyneet myös tulevaisuudentilan simulointimalleihin. Päivittäiset tuotantomäärät nykytilan simulointimallissa on esitetty kuvassa 40.

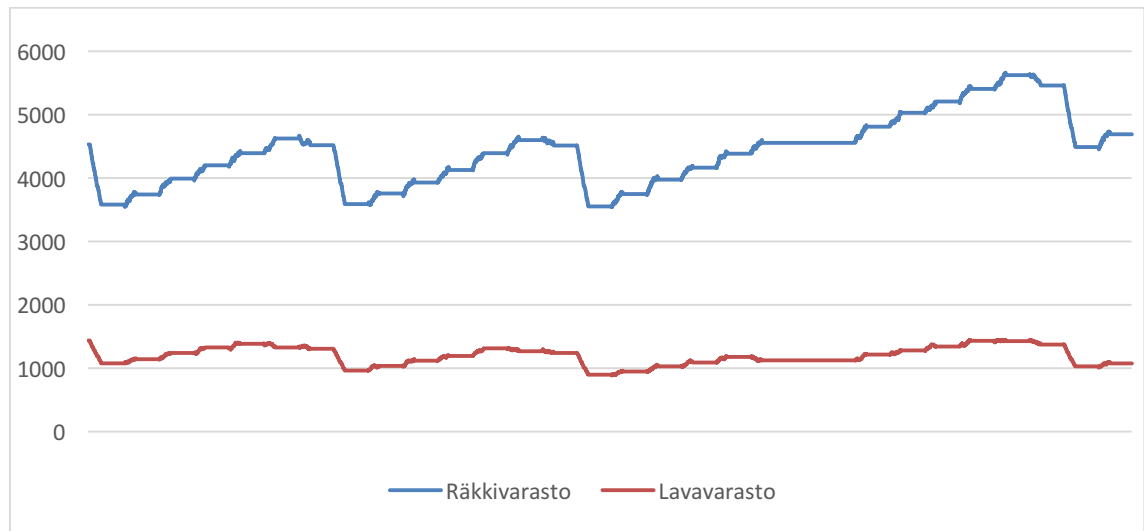
Myös lähetetyn tuotannon määrää seurattiin simulointimallissa solukohtaisesti. Kuvassa 41 on esitetty kuukauden lähetetty tuotanto. Kuvaajasta on nähtävissä suuria eroja solukohtaisissa lähetetyn tuotannon määrissä todellisen ja simuloitun järjestelmän välillä. Yhteenlasketuissa määrissä simulointimallin lähetetty tuotanto on kuitenkin vain noin 0,41 % todellista määrää suurempi.



Kuva 41. Kuukauden lähetetty tuotanto nykytilan simulointimallissa.

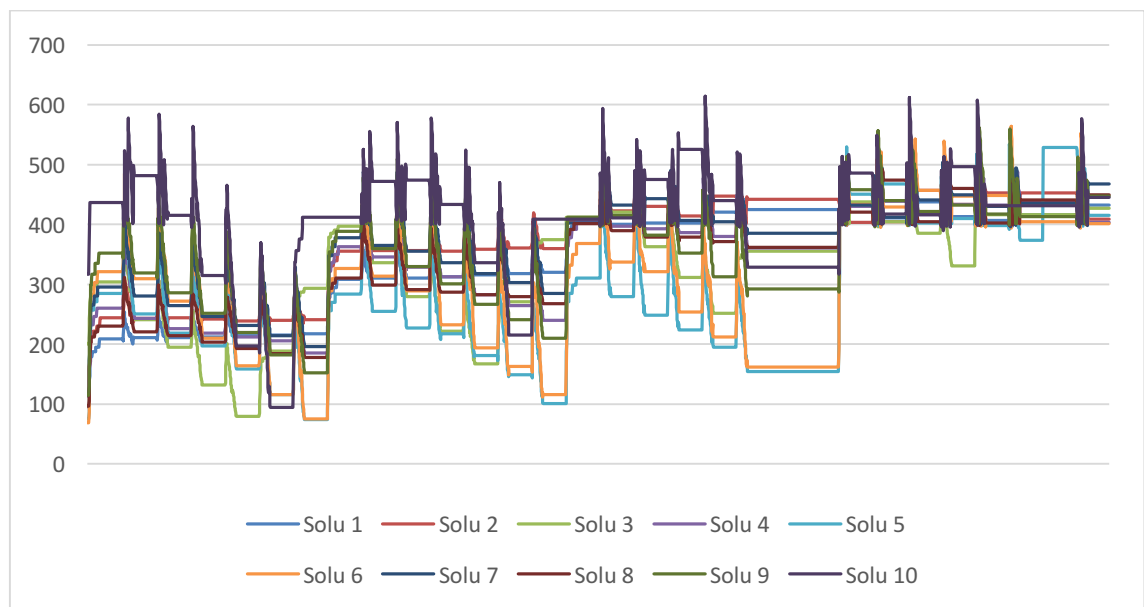
Simulointimallissa varastotasot laskettiin erikseen kevyemmille, rakkivarastossa oleville tuotteille sekä raskaammille, kuormalavahyllyllä kuormalavoilla varastoitaville tuotteille. Varastotasoissa ei näy valmistunut, mutta lähettämöön siirrettävä tilausohjautuva tuotanto. Varastojen yhteenlasketuksi keskimääräiseksi tasoksi saatiin 5608 tuotetta. Kuvassa 42 on esitetty nykytilan simulointimallissa esiintyvät varastotasot. Kuvaajassa esiintyvät vaakasuuntaiset yhtäjaksoiset viivat esittävät aikaa, jolloin tuotanto ei ole ollut käynnissä.

Simulointimallissa esiintyvät varastotasot eivät perustu todellisiin varastotaseihin, sillä todellisten varastotasojen saavuttaminen olisi vaatinut nykyistä huomattavasti pidemmän lämmitysajan. Lisäksi simulointikokeen kesto olisi noussut merkittävästi nykyistä korkeammaksi. Koska nykytilan simulointimallin varastotasoja haluttiin etupäässä hyödyntää vertailukohtana tulevaisuudentilan malleja varten, ei todellisten varastotasojen käyttäminen simuloinneissa ollut tarpeen.



Kuva 42. Varastotasot nykytilan mallissa.

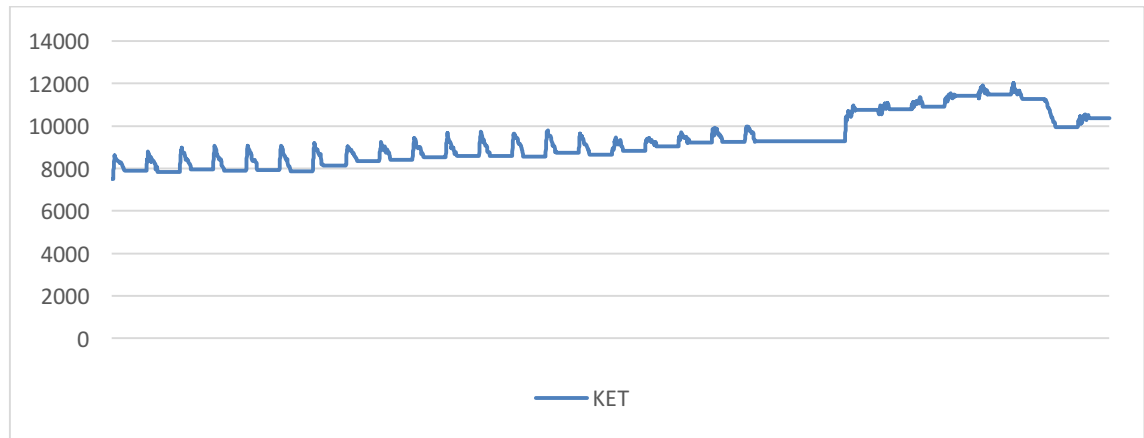
Avoimien tuotantotilauksien määrä tuotantosoluilla vertautuu suoraan keskeneräisen tuotannon määrään ja tuotannon läpimenoaikaan. Simulointimallissa avoimen tuotannon määrä rajoitettiin solukohtaisesti noin 400:n asennelmaan. Kuvassa 43 on esitetty tuotannossa avoimina olevat tuotantotilaukset solukohtaisesti. Kuvasta on havaittavissa avoimien tilauksien määrän kasvaminen simuloinnin loppua kohti. Tämä johtuu syklisestä tuotanto-ohjelmasta, jossa tuotantotilauksia generoituu tarkastelujaksolla enemmän kuin tuotantojärjestelmä kykenee niitä valmistamaan.



Kuva 43. Avoimet tuotantotilaukset soluilla nykytilan simulointimallissa.

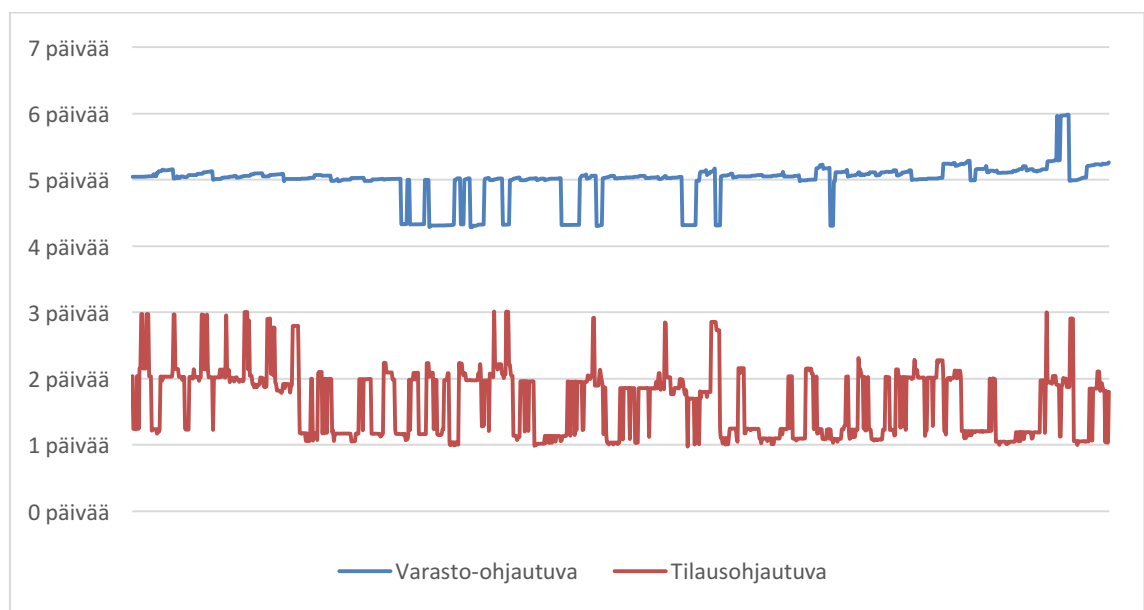
Keskeneräisen tuotannon määrä on merkittävässä osassa ratkaisuehdotusten analysoinnissa, joten sen määrästä kerättiin tietoa nykytilan mallista. Nykytilan mallin keskeneräisen tuotannon määrä ei perustu todellisuuteen, vaan toimii vertailukohtana tulevaisuudentilan simulointimallien tuloksille. Simulointimallien keskeneräisen tuotannon määriä

ei toisaalta edes kyettäisi vertaamaan todellisuuteen, koska todellisen järjestelmän keskeneräisen tuotannon määrästä ei kerätä tietoa. Kuvassa 44 on esitetty keskeneräisen tuotannon määrä nykytilan simulointimallissa. Keskeneräisen tuotannon määrän keskiarvoksi saatiin noin 9280 kappaletta.



Kuva 44. Keskeneräisen tuotannon määrä nykytilan simulointimallissa.

Tuotannon läpimenoajat mitattiin erikseen tilausohjautuvalle sekä varasto-ohjautuvalle tuotannolle. Kuvassa 45 ja taulukossa 12 on esitetty tuotannon läpimenoajat nykytilan simulointimallissa.



Kuva 45. Tuotannon läpimenoajat nykytilan simulointimallissa.

Asennelmien tarkkoja läpimenoaikoja ei kuitenkaan kyetty selvittämään kohdeyrityksen tuotannosta keräämän datan perusteella. Arvion mukaan tilausohjautuvan tuotannon asennelmien läpimenoaika on melko lähellä totuutta, sillä kyseinen aika, kaksi päivää, varataan keskimäärin tuotannon valmistumiseen. Varasto-ohjautuvan tuotannon osalta tulos on selkeästi alhaisempi verrattuna todelliseen läpimenoaikaan, sillä jo pelkästään

nykytilan valmistusvaraston kiertonopeus on noin 10 päivää. Simulointimallin tuottama tulos antaa kuitenkin hyvän arvion varasto-ohjautuvan tuotannon ideaalista läpimenoajasta nykytilassa.

Taulukko 12. Tuotannon läpimenoajat nykytilan simulointimallissa.

	Varasto-ohjautuva tuotanto	Tilausohjautuva tuotanto	Varasto- ja tilausohjautuva tuotanto
Läpimenoaika	06:08:17:31.56	02:03:19:48.00	05:07:57:16.02
Tuotteiden määrä	37872	12029	49901

Taulukossa 12 esitetty yhteenlaskettu lähetettyjen tuotteiden määrä on hieman suurempi kuin simuloinnin tuloksiin kirjattu lähetettyjen tuotteiden määrä. Tämä johtuu siitä, että läpimenoajan laskemisessa käytettiin aineistona myös mallin lämmitysajan aikana tehtyä tuotantoa.

5.3.3 Simulointimallin validointi

Simulointiprojektissa käytettyjen lähtötietojen epätarkkuus edellytti mallin validiteetin tarkistukselta erityistä tarkkuutta. Nykytilan simulointimallin validiteetti tarkistettiin vertaamalla simulointimallin kuukausittaista ja päivittäistä tuotantoa todellisesta tuotantojärjestelmästä mitattuihin arvoihin. Kaikkia simulointimallin tuottamia tuloksia ei kuitenkaan pystytty vertaamaan todellisuuteen. Kyseisten tulosten todenmukaisuutta pystyttiin pelkästään arvioimaan. Simulointimallin todettiin olevan validi, koska se tuotti annetuilla lähtöarvoilla varsin samankaltaisia tuloksia kuin todellinen järjestelmä.

Mallin eri komponenteille ja parametreille toteutettiin lisäksi herkkyysanalyysi, jossa selvitettiin eri tekijöiden vaikutuksia koko mallin validiteettiin. Alkuperäisen arvion mukaan tuotantosoluilla olisi suurin vaikutus kokonaisuuteen, minkä havaittiin pitävän hyvin paikkaansa. Lisäksi valmiiden tuotteiden keräilyn ja käsittelyn toteutus sekä työajat vaikuttivat oleellisesti lähetetyn tuotannon määrään.

6. TUOTANTOPROSESSIN KEHITTÄMINEN

Kohdeyrityksestä tehdyssä nykytilan analyysissä tuotannosta paljastui useita kehityskohdeita, joista nykytilan simulointitutkimuksen avulla pystyttiin valikoimaan potentiaalisimmat parannuskohteet syvempää tarkastelua varten. Kuten nykytilan analysoinnissa, myös tulevaisuudentilan kehitysehdotusten laatimisessa hyödynnettiin vahvasti simulointia. Simulointitutkimus tuotti paikoin tuloksia, jotka eivät vastanneet ennen tutkimuksia tehtyjä oletuksia, mikä osaltaan osoitti simulointitutkimuksen olleen arvokas lisä kehitysehdotusten tarkastelemiseen.

6.1 Prosessien arvovirtojen analysoiminen ja kehittäminen

Nykytilanteen arvovirtakaavioista, jotka on esitetty liitteessä A, on nähtävissä arvoa tuottavan toiminnan vähäinen osuus läpimenoajasta. Huomionarvoisia ovat tuotteiden ja komponenttien varastointiajat. Arvovirtakaavioissa olevia läpimenoaikoja voidaan täten alentaa tehokkaimmin lyhentämällä varastointiaikoja. Ilman merkittävää kysyntä- ja siitä seuraavaa tuotantonopeuden kasvua tehokkain keino varastointiaikojen lyhentämiseen on varastotasojen alentaminen.

Varastotasojen alentamiseen vaikuttaa lähdekirjallisuuden (Allahverdi & Soroush 2006; Wilson 2015, luku 13) mukaan erityisesti tuotantoerien eräkokojen alentaminen. Lisäksi tuotannonohjausta kehittämällä voidaan saavuttaa alhaisemmat tuotannon varastotasot (Lödding 2013). Tulevaisuudentilan arvovirtakaavioiden kehittämisessä perehdyttiin edellä mainittujen seikkojen lisäksi tuotannossa tapahtuvan materiaalin siirtelyn tarpeen vähentämiseen layout-suunnittelun keinoin, mikä nähtiin lähdekirjallisuudessa (Santos et al. 2006; Hales 2015) potentiaalisena kehityskohteenä. Kehitystyössä perehdyttiin myös automaation vaikutuksiin tehtaan tuotantoprosessissa.

Tulevaisuudentilan arvovirtakaavioissa tuoteperheiden määrä vähennettiin neljästä kahteen. Syynä tuoteperheiden määrän vähentämiselle oli tuotteiden reitityksen yhdenmu-kaistaminen. Tulevaisuudentilan arvovirtakaavioiden tuoteperheet ovat:

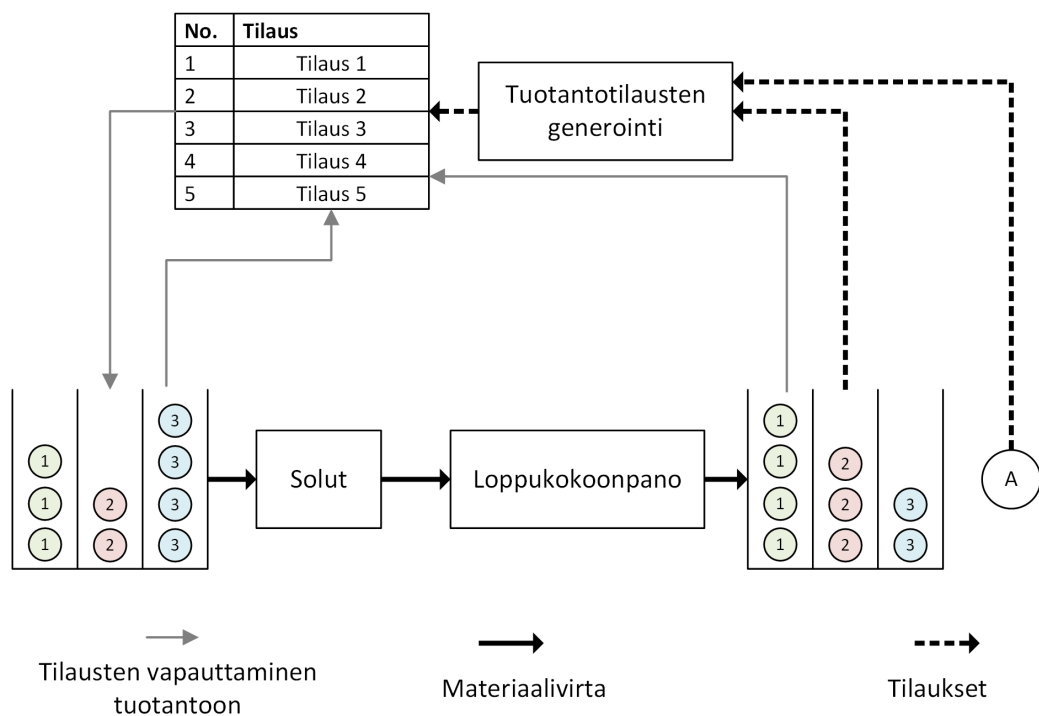
1. tuotanto, joka ei sisällä solun ulkopuolisia asennustöitä
2. tuotanto, joka sisältää solun ulkopuolisia asennustöitä.

Tulevaisuuden arvovirtakaaviot muodostettiin kuvaamaan pitkän aikavälin tavoitetilaa, eikä niissä esille tulevia muutoksia ole tarkoitettu toteutettavaksi yhdellä kerralla. Tulevaisuudentilan arvovirtakaaviot on esitetty liitteessä A.

6.1.1 Tuotannon ohjaustavan muuttaminen

Tuotannon ohjaustavan valinnan kriteereinä olivat helppo toteutettavuus ja soveltuvuus nykyiseen tuotantoprosessiin. Ohjaustavaksi valikoitui CONWIP-ohjaus, jonka eduiksi katsottiin helppo ja mukautettava toteutettavuus sekä menetelmän soveltuvuus tilaus- ja varasto-ohjautuvan tuotannon ohjaukseen. Kuten teoriaosuudessa on mainittu, CONWIP-ohjaus ei sovellu Löddingin (2013, s.337) mukaan käytettäväksi tilausohjautuvan tuotannon tuotantotilausten generointiin, vaan menetelmää käyttäen ohjataan tuotantotilausten vapauttamista tuotantoon. CONWIP-ohjausmenetelmä tarjoaa kuitenkin varasto-ohjautuvan tuotannon tuotantotilausten generointiin tilauspisteohjauksen, mikä nähtiin merkittävänä etuna ohjausmenetelmässä. Potentiaalinen kilpailija CONWIP-ohjaukselle olisi ollut CORMA-ohjaus, mutta sen heikkoutena nähtiin tuotantosolujen jatkuvasta kuormituksesta aiheutuva varastotasojen kasvu. Tilanne ei täten eroaisi merkittävästi nykytilanteesta.

Toteutettava ohjausmenetelmä ei kuitenkaan noudata täysin CONWIP-ohjauksen periaatteita. Löddingin (2013, s.335-338) esittämässä CONWIP-ohjauksessa rajoitetaan ainoastaan tietyn tuotantolinjan keskeneräisen tuotannon määrää. Simuloimalla kyseistä ohjaustapaa havaittiin, että avoin tuotanto joillain tuotantosoluilla kasvoi hallitsemattomasti. Ohjausta päädyttiin täten kehittämään siten, että myös avointen tuotantotilausten määrää rajoitetaan. Tämän johdosta myös tuotannon läpimenoaika aleni. Kuvassa 46 on esitetty toteutettavan tuotannonohjausmenetelmän periaate.



Kuva 46. Mukautettu CONWIP-ohjaus. (Perustuu lähteeseen Lödding 2013, s. 336)

Varasto-ohjauksessa käytettävä tilauspisteohjaus muistuttaa Löddingin (2013, s. 337) mukaan CORMA-ohjauksessa käytettyä tilauspisteohjausta: molemmissa hyödynnetään tulevan kysynnän ennusteita tuotantotilausten generoinnissa ja vapauttamisessa tuotantoon ennakoidusti. Varasto-ohjautuvien tuotteiden tuotantotilauksia generoidaan yhtälön (13) mukaisesti

$$DPS = TPL_0 + \frac{SL + \sum SO_{open} - SOP}{RDMD_m}, \quad (13)$$

missä DPS on tilauksen suunniteltu aloitusajankohta [työpäivä], TPL_0 on suunnittelun ajanhetki [työpäivä], SL on varastotaso [kpl], SO_{open} on avoimet tuotantotilaukset [kpl], SOP on tilauspiste [kpl] ja $RDMD_m$ on keskimääräinen kysyntänopeus [kpl/työpäivä].

Uusi tuotannonohjausmenetelmä implementoitiin kaikkiin tulevaisuudentilan simulointimalleihin. Simulointikokeita tehdessä yhtenä muutettavana lähtöarvona käytettiin ohjauksen parametrien arvoja. Tarkastelussa huomattiin suuria eroja tuotannon mittareissa pelkästään CONWIP-ohjauksen parametreja muuttamalla. Kokeita tehtäessä huomattiin myös, että hyvien ohjausarvojen etsimisessä kannattaa edetä väljemmistä rajoituksista tiukempiin.

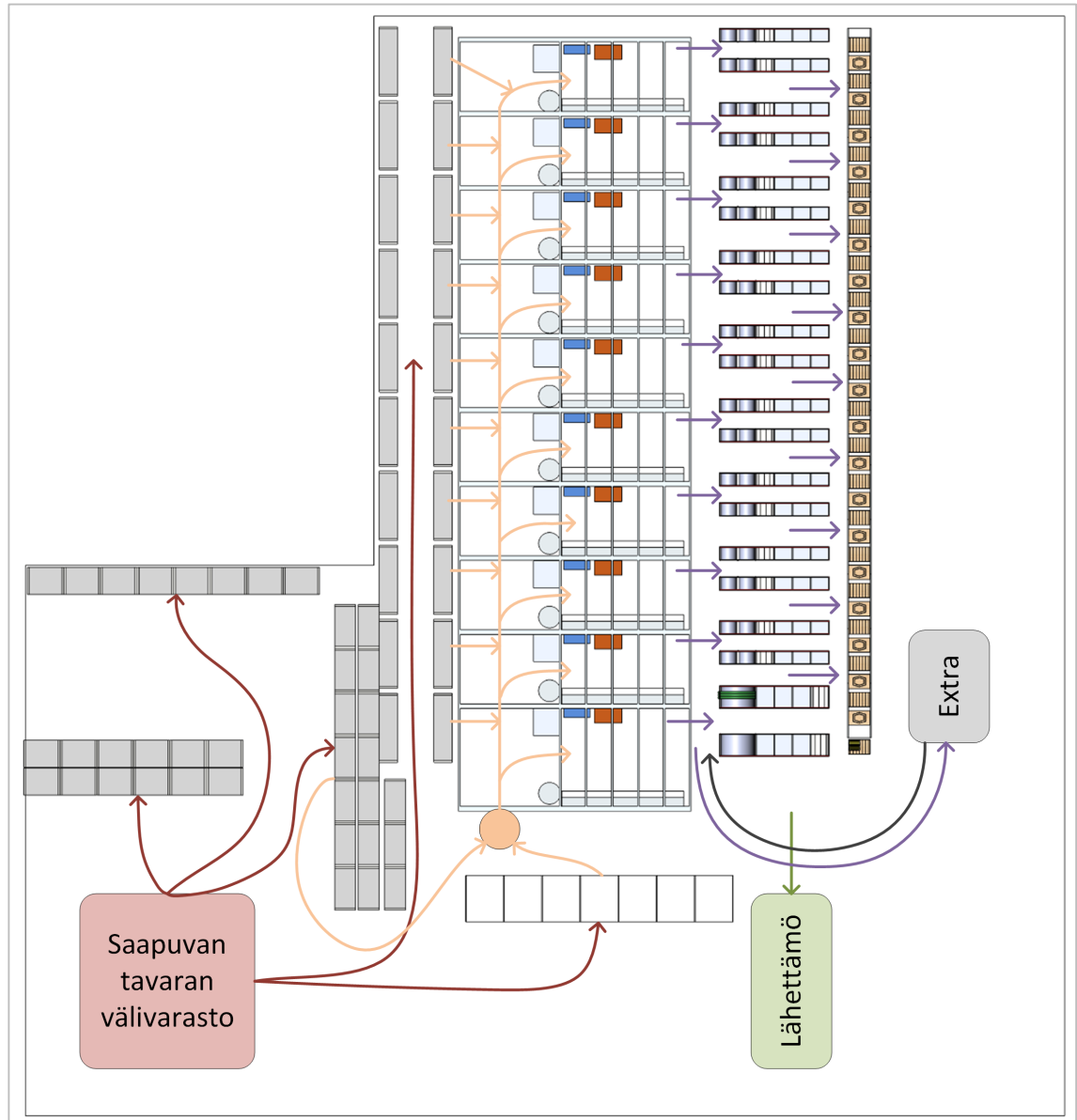
6.1.2 Tulevaisuudentilan materiaaliwirrat

Tuotannon layout-suunnittelun tavoitteena oli ensisijaisesti minimoida materiaalien siirtoetäisyydet sekä siirtämiseen käytettävä aika. Layout-muutosta suunniteltaessa pyrittiin lisäksi vähentämään tuotannon tarvitseman lattiapinta-alan määrää. Suunnitteluvaiheessa tavoitteena oli aikaansaada mahdollisimman suuri vaikutus mahdollisimman vähillä muutoksilla. Tulevaisuudentilan layout, joka on esitetty kuvassa 47, poikkeaa täten melko vähän kuvassa 24 esitetystä nykytilan layoutista. Suurimmat erot nykytilan ja tulevaisuudentilan layoutin välillä ovat valmistuotevaraston sijoittelu sekä tehtaaseen rakennettu loppukokoonpanolinja. Loppukokoonpanolla viitataan valmiiden tuotteiden pakkaamiseen tilauskohtaisiin kuljetusyksiköihin.

Ratkaisussa on kuitenkin omat huonot puolensa. Loppukokoonpanolinja on herkkä häiriölle niin linjaa edeltävissä vaiheissa kuin linjalla esiintyvissä ongelmatilanteissa. Pahimmillaan koko linjaston materiaalivirtaus voi pysähtyä, mikäli häiriön kesto ja vaikutus ovat riittävän suuria. Tämän vuoksi tuotantoprosessin vakauden tulee olla riittävällä tasolla ennen loppukokoonpanolinjan implementointia. Huonoina puolina linjassa ovat myös sen aiheuttamat rajoitukset materiaalien siirtoreitteihin: linjaston ohi on vaikea saada kulkemaan risteäviä materiaalivirtoja.

Osana linjaston implementointia on myös linjaston tasapainottaminen. Tasapainotuksessa linjasto jaetaan kullekin työntekijämäärälle sopiviin työalueisiin, jotta kunkin työntekijän kuormitus saadaan tasapainotettua. Vaihtoehtoisesti työntekijät voitaisiin myös allokoida tilauskohtaisesti, jolloin kukin työntekijä tekisi yksittäisen tilauksen loppukokoonpanon

alusta loppuun. Menettely olisi kuitenkin turhan hankala toteuttaa käytännössä, koska tilausten tuotemäärät vaihtelevat huomattavasti.

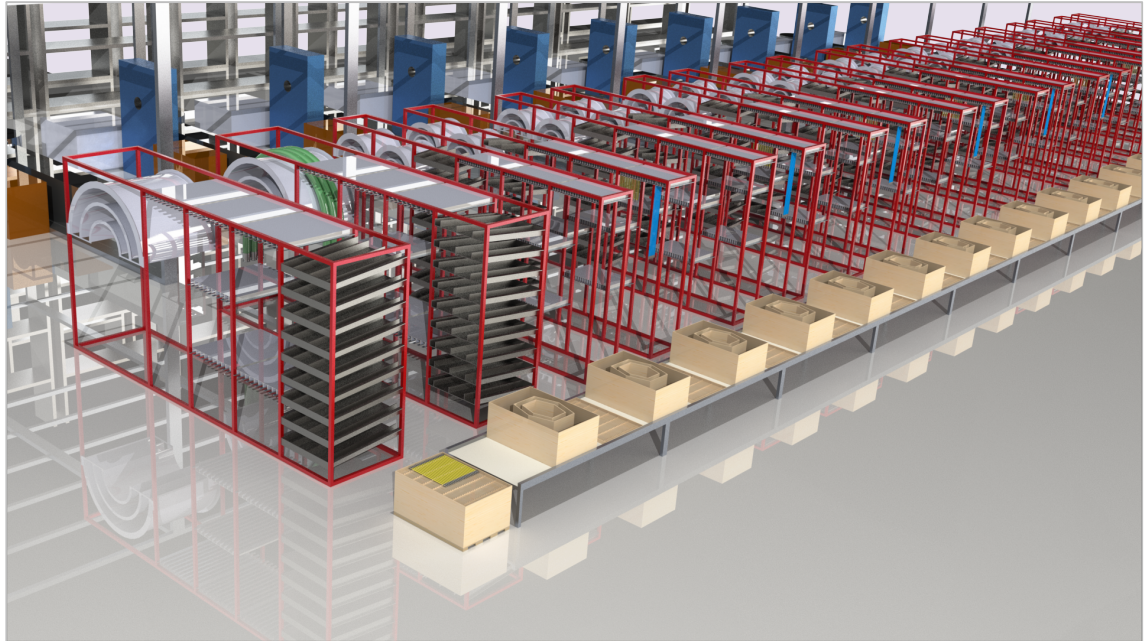


Kuva 47. Tulevaisuudentilan tuotannon layout.

Osana layout-suunnittelua oli myös varastoinnin kehittäminen, joka asetettiin jo kehitysprojektin alkuvaiheesta lähtien projektin yhdeksi tärkeimmäksi tavoitteeksi. Varastoinnin katsottiin kuluttavan liian paljon aikaa ja resursseja, mutta varastoitavien tuotteiden määrän alentamista ei aluksi koettu tarpeelliseksi, koska varasto-ohjautuvan tuotannon eräkojoja ei haluttu pienentää.

Varastoinnin kehittämisen yhteydessä suunniteltiin muutoksia myös valmiiden tuotteiden pakkaamiseen. Uusien pakkauksien avulla pyrittiin parantamaan työn ergonomisuutta sekä vähentämään pakkaamisesta aiheutuvia suoria ja epäsuoria kustannuksia. Asiak-

kaille kerättyjen tuotesarjojen pakkauksina päädyttiin käyttämään aaltopahvista valmistettuja pakkausyksiköitä, mutta myös muoviset pakkaukset olisivat olleet potentiaalinen vaihtoehto. Kuvassa 48 on esitetty ehdotuksia tuleviksi pakkauksiksi. Kuvassa on näkyvissä ehdotuksia myös loppukokoonpanolinjaston sekä valmistuotevarastojen toteutuksesta.



Kuva 48. *Valmistuotevarasto ja loppukokoonpanolinja.*

Materiaalivirtojen kehittämisen yhteydessä perehdyttiin myös tuotantoautomaation implementointiin ja sen vaikutusten arviointiin. Automaation vaikutuksia tutkittiin sekä materiaalien kuljettamisessa että asennelmien valmistuksessa. Kummassakaan tapauksessa tuotannon layoutiin ei tehty muutoksia.

Materiaalivirtojen lisäksi tehtaan tietovirroissa havaittiin olevan kehityspotentiaalia. Eri-tyisen silmiinpistävää oli manuaalisesti tehtävien kirjausten määrä: varastoinnissa ja materiaalin käsittelyssä tehdään huomattavan paljon manuaalisia kirjauksia yrityksen ERP-järjestelmään. Kirjausten tekemisen automatisoinnin havaittiin kuitenkin olevan mahdollista suurimmilta osin. Tietovirtojen kehittämistä ei kehitysprojektin rajausten vuoksi kuitenkaan otettu mukaan projektiin, eikä aiheeseen täten perehdytty sen tarkemmin.

6.1.3 Asennelmien valmistuksen kehittäminen

Asennelmien valmistuksen suurimpia ongelmia havaittiin olevan korkeaksi muodostuvat asetusajat tuotantoerien välillä. Asetusajan osuutta kokonaistyöajasta on jo aikaisemmin toteutettujen muutosten avulla vähennetty valmistamalla pienissä eräkoissa tilattavia tuotteita suuremmissa erissä varastoon. Menettelyn havaittiin kuitenkin heikentävän tuotannon joustavuutta ja aiheuttavan tuotantojärjestelmään ylimääräisiä ongelmia.

Ongelmia nähtiin aiheutuvan myös kysynnän vaihtelevuuden takia. Kysynnän vaihteluita on kompensoitu solukohtaista tuotantokapasiteettia lisäämällä ja vähentämällä. Kapasiteetin tarvetta on täydennetty kasvattamalla kiireellisten tuotantosolujen työntekijämäärää väliaikaisesti, ja alhaisemmassa kysyntätilanteessa solujen työntekijöitä on joko siirretty toisiin tuotantosoluihin tai solut ovat valmistaneet tuotteita varastoon. Menettely on ollut mahdollinen, koska työtehtävät asennelmien valmistuksessa ovat kohtalaisen yksinkertaisia.

Tehokkaimmaksi keinoksi asennelmien valmistuksen kehittämiseen nähtiin automaation käyttöönotto. Kun perehdyttiin markkinoilla olevaan tarjontaan, havaittiin siellä olevan muutamia eri toimijoita, jotka tarjoavat automatisoituja ratkaisuja hydraulikkaletkuasennelmien valmistukseen. Tarjolla olevat tuotteet on kuitenkin pääosin suunniteltu tekemään yksittäisiä työvaiheita, jolloin lopulliset automaatoratkaisut täytyisi suunnitella tapauskohtaisesti.

6.2 Ratkaisuvaihtoehtojen analysointi simuloimalla

Potentiaalisimpien kehityskohteiden perusteella muodostettiin konseptimalliin neljä skenaariota: layout-muutos, pienempi taloudellinen tuotantoeräkkö, materiaalinkuljetuksen automatisointi ja automaattiosolu. Jokainen skenaario sisältää sitä aikaisemmissa skenaarioissa tehdyt muutokset, jolloin ratkaisuehdotusten hyödyntäminen todellisessa tuotantojärjestelmässä tulee aloittaa ensimmäisen skenaarion implementoinnilla.

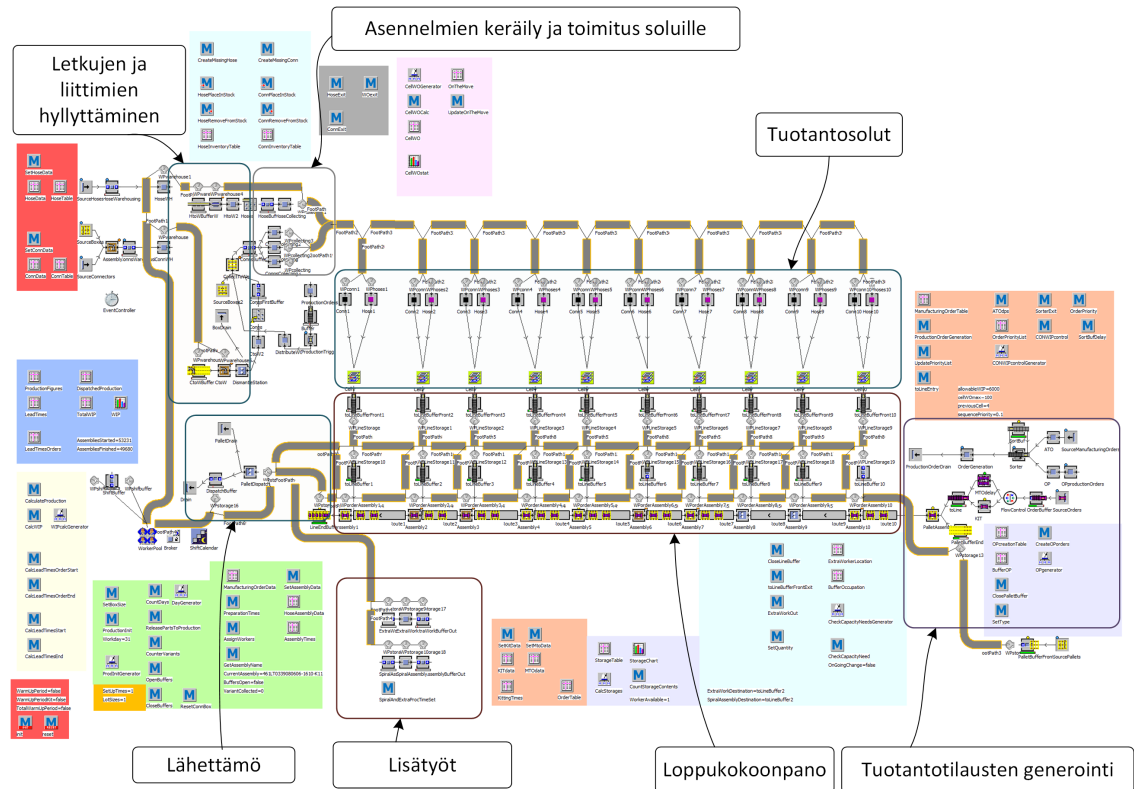
Tulevaisuudentilan simulointimallien validiteetin perustana ovat nykytilan simulointimallista periytyvät komponentit: tulevaisuudentilan malleissa olevat tuotantosolut ovat nykytilan malliin verrattuna täysin ekvivalentteja. Uusien malliin rakennettujen komponenttien kohdalla pyrittiin arvioimaan työn vaiheajat mahdollisimman realistisesti, jotta tulokset olisivat mahdollisimman paikkaansa pitäviä. Vaiheajojen tarkka arviointi oli kuitenkin melko haastavaa, eikä tuloksien todenmukaisuutta voida varmistaa ennen työmenetelmien kokeilemistä todellisessa ympäristössä.

6.2.1 Skenaario 1: layout-muutos

Ensimmäisessä skenaariossa toteutettiin muutos valmiiden tuotteiden välivarastointiin sekä loppukokoonpanoon. Skenaariossa muutettiin lisäksi tuotannon ohjausperiaate muokatuksi CONWIP-ohjaukseksi. Toteutettujen muutosten johdosta tuotannon loppukokoonpanosta voitiin vähentää yhteensä kaksi työntekijää, joista toinen sijoitettiin liikkuvaksi työvoimaksi tuotantosoluille. Kuvassa 49 on esitetty skenaario 1:n simulointimallin tuotantolinjasto.

Simulointimallin uuteen loppukokoonpanolinjastoon ei ollut saatavilla valmiita vaiheajoja todellisesta tuotantojärjestelmästä, joten ne jouduttiin muodostamaan arvioiden

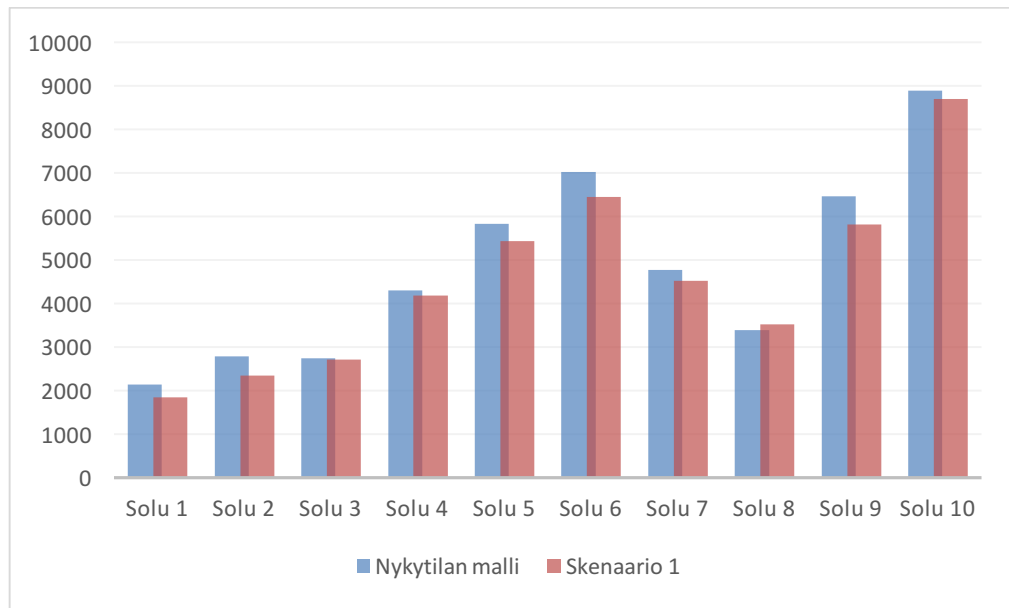
perusteella. Loppukokoonpanolinjastolla yhden työpisteen työajaksi määritettiin keskimäärin 40 sekuntia, jossa ei ole huomioitu siirtymiä. Kunkin asennelmasarjan loppukokoonpanoaika riippuu täten asennelmien määrästä ja kokoonpanon tarvitsemien työpisteiden lukumäärästä.



Kuva 49. Skenaario 1:n ja 2:n simulointimallien tuotantolinjasto.

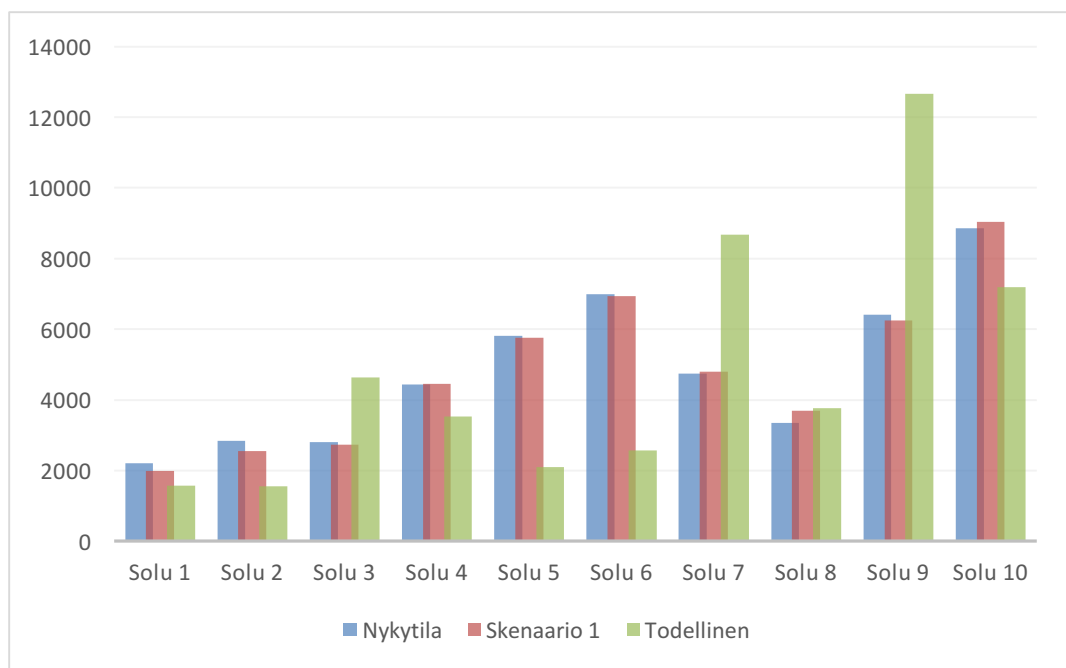
Tuotannon ohjausperiaatteen muutoksen myötä asennelmien kuukausittaiset ja päivittäiset valmistusmäärät alenivat hieman nykytilan malliin verrattuna. Päivittäisten tuotantomäärien suhde kuukausittaisiin pysyi kuitenkin muuttumattomana, sillä työpäivien määrä ei muuttunut.

Syynä valmistusmäärien alenemiseen on tuotteiden valmistus vain todelliseen tarpeeseen: varastoon ei valmisteta tuotteita ilman tarvetta. Kuvassa 50 on esitetty skenaario 1:n simulointimallin kuukausittainen tuotantomäärä. Kuvasta käy ilmi tuotantosolu 8:n hieman nykytilan mallia suurempi valmistusmäärä. Poikkeama selittyy nykytilan malliin verrattuna paremmalla tuotantojärjestyksellä, jonka seurauksena asetusajojen osuus erien työajoista aleni.



Kuva 50. Kuukauden tuotantomäärä skenaario 1:n simulointimallissa.

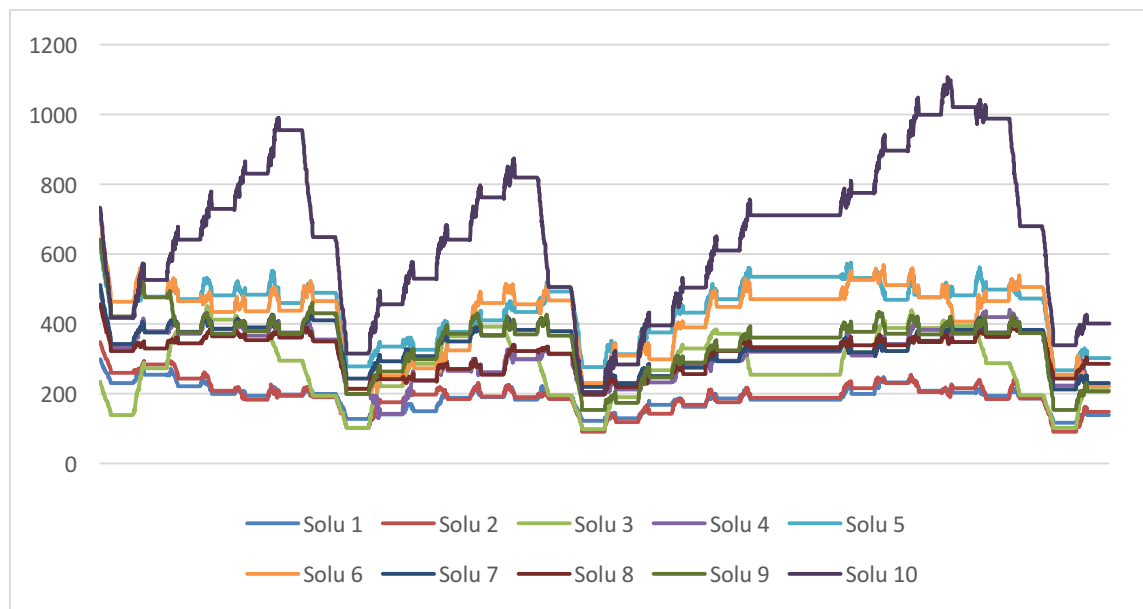
Kuten nykytilan simulointimallissa, myös skenaario 1:n mallissa lähetetyn tuotannon kokonaismäärä on hyvin lähellä todellista. Loppukokoonpanolinjan työvaiheajat arvioitiin ensimmäisissä skenaario 1:n mallilla tehdyissä simulointikokeissa turhan paljon alakanttiin. Arvioituja vaiheajoja korotettiin, jotta tulokset saatiin mahdollisimman lähelle todellisia arvoja. Lähetetyn tuotannon määrä skenaario 1:n simulointimallissa on esitetty kuvassa 51.



Kuva 51. Kuukauden lähetetty tuotanto skenaario 1:n simulointimallissa.

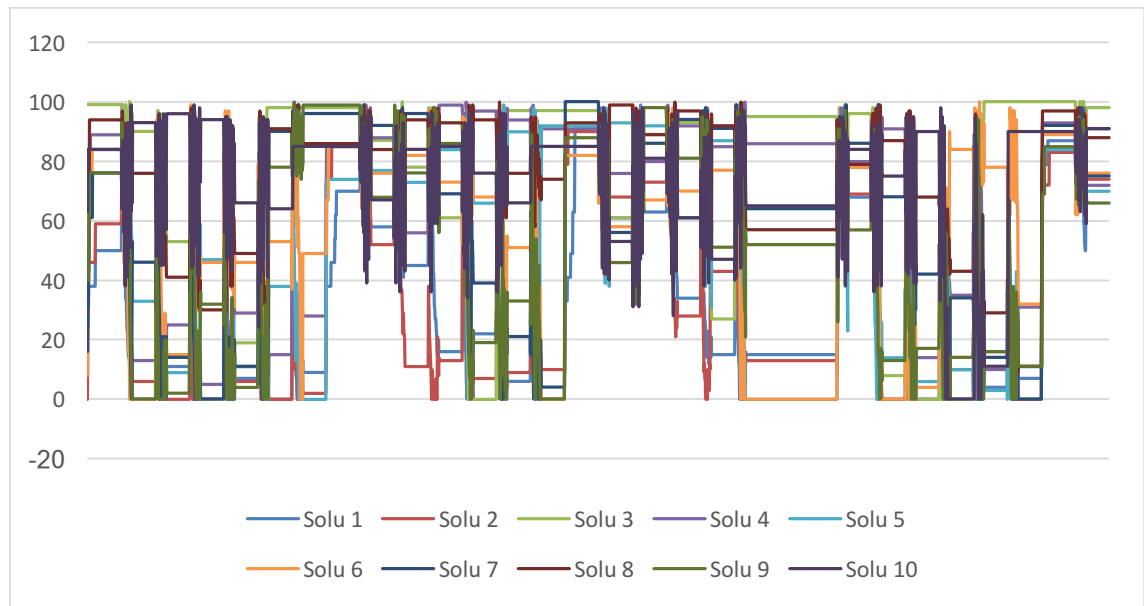
Varastoinnin toteuttaminen skenaario 1:n mallissa poikkeaa merkittävästi nykytilan mallista. Skenaario 1:n simulointimallissa jokainen valmistettava tuote kulkee solun jälkeisen varaston kautta. Tilausohjautuvat tuotteet sijoitetaan kullekin tilaukselle allokoituun hyllyyn, ja varasto-ohjautuvan tuotannon tuotteet eritellään tuotteittain omiin varastopaikoihinsa.

Koska CONWIP-ohjauksen takia tuotteita valmistetaan vain tarvittaessa, pysyvät myös varastotasot alhaisempina. Varastotasojen määrään vaikuttaa kuitenkin kysynnän ja siitä seuraavan tuotannon kuormitusasteen vaihtelu. Ongelmia varastonohjauksen kannalta aiheuttaa erityisesti tilanne, jossa tuotteita kulutetaan päivinä, joina niitä ei valmisteta. Tällöin joudutaan turvautumaan tarpeettoman korkeisiin varastotasoihin. Kuvassa 52 on esitetty tuotannon varastotasot skenaario 1:n simulointimallissa. Varastotasojen keskiarvoksi saatiin tarkastelujaksolle noin 2800 kappaletta, minkä seurauksena varastotasot lasivat noin 50 % verrattuna nykytilan mallin keskimääräisiin varastotasoihin.



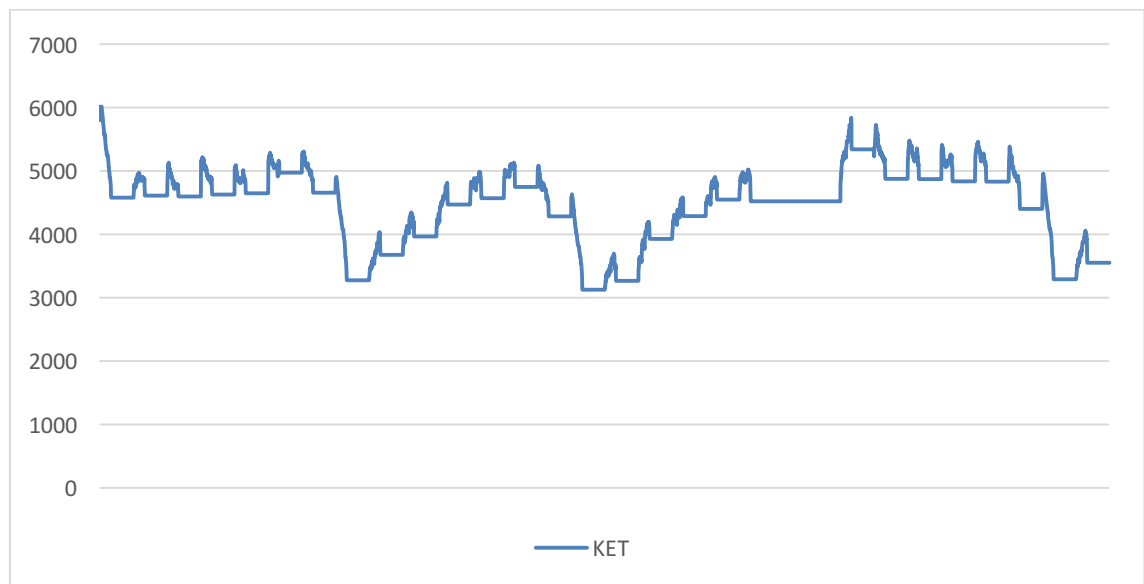
Kuva 52. Varastotasot skenaario 1:n simulointimallissa.

Varastotasojen lisäksi myös avointen tuotantotilausten määrä tuotantosoluilla haluttiin laskea mahdollisimman alhaiseksi. Avointen tuotantotilausten määrä soluilla asetettiin maksimissaan 100 kappaleeseen. Kuvassa 53 on esitetty tuotantosolujen avoimet tuotantotilaukset skenaario 1:n simulointimallissa. Kuvasta on selkeästi nähtävissä solukohtaisen kuormitusasteen vaihtelu tarkastellun ajanjakson sisällä. Kuormitusmäärän vaihtelut johtuvat suurilta osin tuotteiden kysynnän vaihtelusta.



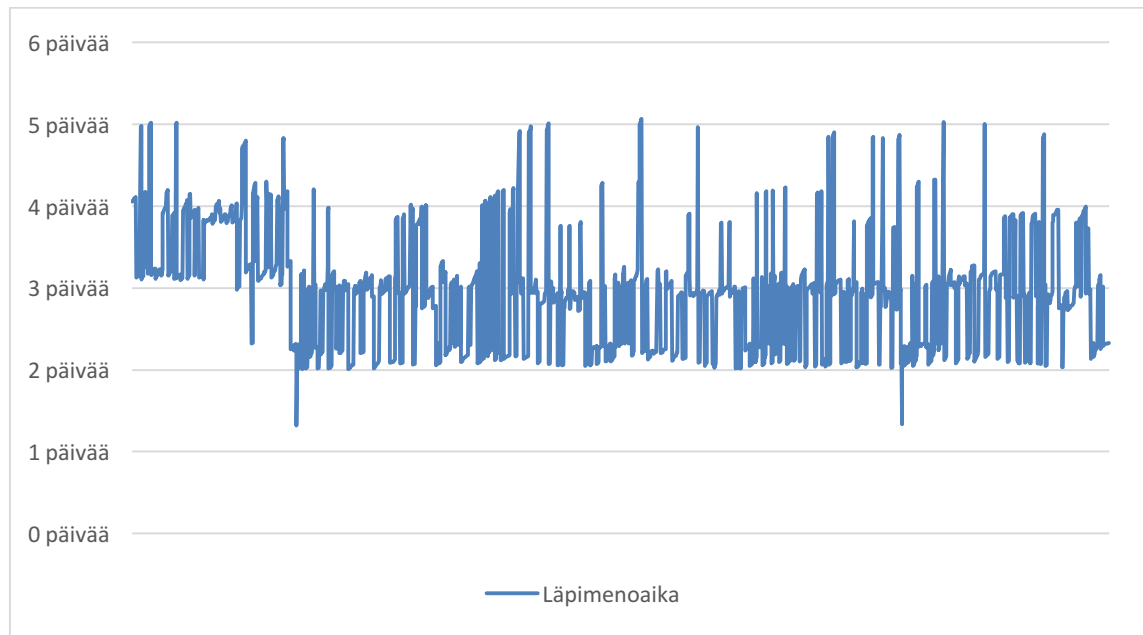
Kuva 53. Avoimet tuotantotilaukset soluilla skenaario 1:n simulointimallissa.

Simulointimallin avulla kokeiltiin myös sitä, millaisia tuloksia keskeneräisen tuotannon määrän rajoittaminen aiheuttaa tuotantojärjestelmään. Tarkastelu aloitettiin asettamalla rajoitus 12 000 kappaleeseen, jonka jälkeen rajoitusta laskettiin kerralla aina 1 000 kappaleella. Tuotannon havaittiin toimivan parhaiten, kun rajoitukseksi asetettiin 6 000 kappaletta. Kuvassa 54 on esitetty keskeneräisen tuotannon määrä skenaario 1:n simulointimallissa. Keskeneräisen tuotannon määrän keskiarvoksi tarkastelujaksolla saatiin noin 4450 kappaletta ja määrä laski nykytilan malliin verrattuna noin 52 %.



Kuva 54. Keskeneräisen tuotannon määrä skenaario 1:n simulointimallissa.

Alhaisemmista varastotasoista johtuen myös tuotannon läpimenoaikaa saatiin pienennettyä merkittävästi verrattuna nykytilan malliin. Kuvassa 55 ja taulukossa 13 on esitetty tuotannon läpimenoajat skenaario 1:n mallissa.



Kuva 55. Tuotannon läpimenoaika skenaario 1:n simulointimallissa.

Läpimenoajan laskemisessa ei eritelty tilaus- ja varasto-ohjautuvaa tuotantoa, koska molempien reititys tuotannon läpi on samanlainen. Myös lisätyötä solujen ulkopuolella tarvitsevat tuotteet on otettu huomioon läpimenoaikaa laskettaessa, mikä näkyy korkeina piikkeinä kuvassa 55.

Taulukko 13. Tuotannon läpimenoajat skenaario 1:n simulointimallissa.

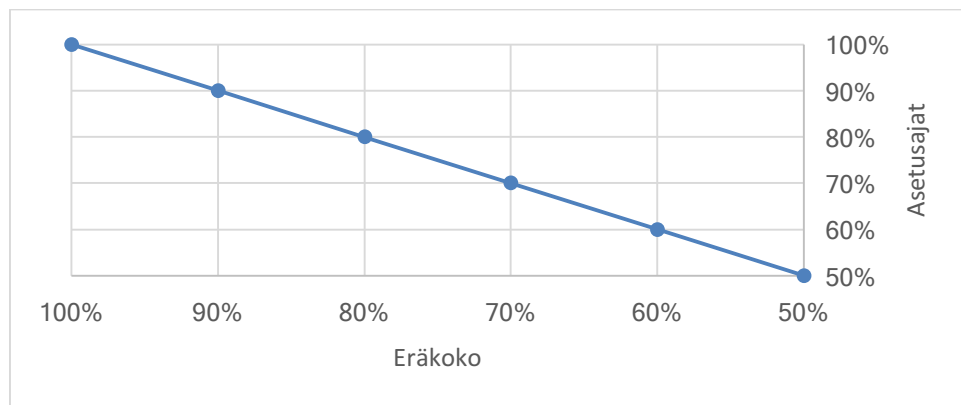
	Läpimenoaika
Nykytila	05:07:57:16.02
Skenaario 1	02:23:51:01.16
Erotus	02:08:06:14.86
Muutos	43,85 %

Tuotannon läpimenoaikaan saatiin merkittävä parannus verrattuna nykytilan malliin. Tuotannon läpimenoaika laski kahdella päivällä, mikä tarkoittaa noin 44 % parannusta verrattuna nykytilan mallin läpimenoaikaan.

Muiden hyötyjen lisäksi skenaario 1:ssä esitettyjen parannusten käyttöönotto tuo mukanaan tuotannon henkilöstöntarpeen alenemisen. Skenaario 1:n simulointimallissa asennelmien lähettämisestä asiakkaille voitiin vähentää yhteensä 2 työntekijää, joista toinen sijoitettiin tuotantosoluille joustavaksi työvoimaksi. Tuotannosta voitiin vähentää täten yksi työntekijä muihin tehtäviin. Investoinnin maksimisumma laskettiin käyttäen kaavaa (12), johon sijoitettiin takaisinmaksuajaksi 3 vuotta ja investoinnin nettotuloiksi yhden työntekijän vuotuiset työllistämiskustannukset. Investoinnin maksimisummaksi ohjaustavan ja layoutin muutokselle saatiin tällöin 117 000 €.

6.2.2 Skenaario 2: pienempi taloudellinen tuotantoeräkoko

Toisessa skenaariossa tarkoituksena oli tutkia eräkoon ja asetusajojen vaikutuksia tuotantomääriin. Simulointeja tehdessä havaittiin erityisesti tuotantosolu 10:n tuotantomäärien olevan erityisen herkkiä asetusajojen kasvulle. Eräkokojen pienentämistä varten jouduttiin täten pienentämään tuotantoeräkohtaisia asetusajoja. Kuvassa 56 on esitetty tuotannon eräkoon muuttumisen vaikutus tuotantoerien asetusajoihin. Riippuvuuden eräkoon ja asetusajojen välillä havaittiin olevan melko lineaarinen eräkokojen ollessa välillä 50-100 % alkuperäisistä eräkoista. Kuvasta on nähtävissä, että eräkoon puolittaminen edellyttää asetusajojen puolittamista.



Kuva 56. Eräkoon vaikutus tuotannon asetusajoihin.

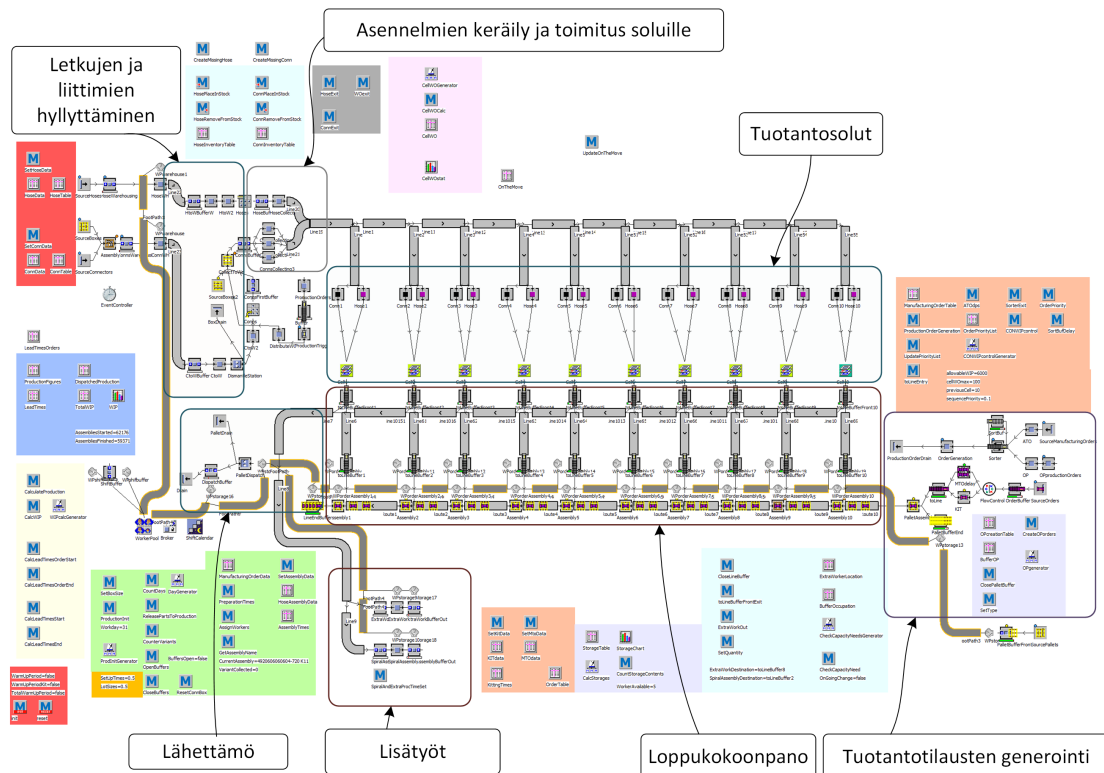
Simulointimallin rakenteesta johtuen eräkokojen vaikutuksia tilausten läpimenoaikaan ja tuotannon varastotasoihin ei pystytty selvittämään. Tieto olisi tutkimuksen kannalta ollut hyvin mielenkiintoista, mutta sen saaminen olisi vaatinut simulointiprojektin aikataulun muuttamista merkittävästi. Eräkokojen alentaminen on kuitenkin lähdekirjallisuudessa (Allahverdi & Soroush 2006; Pound et al. 2014, luku 3; Wilson 2015, luku 13) nähty hyödylliseksi sekä varastotasojen, että tilausten läpimenoaikojen kannalta, jolloin hyödyllisyyden osoittamista simuloinnin avulla ei koettu välttämättömäksi.

Eräkoon pienentäminen ja asetusajojen alentaminen edellyttäisivät huomattavia investointeja tuotantoautomaatioon. Investoinnista saatavat hyödyt tulisivat varastointikustannusten alenemisesta sekä tuotannon joustavuuden paranemisesta. Näille ei kuitenkaan pystytty laskemaan taloudellisia lukuja, eikä asetusajojen pienentämiseen tarvittavalle tuotantotekniikalle pystytty sen vuoksi määrittämään investoinnin maksimisummaa.

6.2.3 Skenaario 3: materiaalikuljetuksen automatisointi

Kolmannessa skenaariossa tutkittiin materiaalikuljetuksen automatisoinnin vaikutuksia tuotantojärjestelmään. Materiaalin kuljettaminen automatisoitiin komponenttien hyllyttämisessä, niiden siirtämisessä varastosta soluille sekä valmiiden tuotteiden siirtämisessä välivarastosta loppukokoonpanolinjastolle. Materiaalikuljetuksen automatisoinnista

saatavat hyödyt painottuvat tarkastellussa tilanteessa lähinnä henkilöstökustannusten alentamiseen. Kuvassa 57 on esitetty skenaario 3:n simulointimallin tuotantolinjasto.



Kuva 57. Skenaario 3:n ja 4:n simulointimallien tuotantolinjasto.

Helpoimmaksi kohteeksi materiaalinkuljetuksen automaatiolle nähtiin saapuneiden letkuliittimien hyllytys. Pahvilaatikossa kuljetettavan materiaalin lajitteluun olisi mahdollista rakentaa yksinkertainen automaatiojärjestelmä ilman suuria taloudellisia panostuksia (kts. Agrawal & Singh 2013). Investoinnin kannattavuus järjestelmälle on laskelmien mukaan hyvä: kolmen vuoden takaisinmaksuajalla pakettien lajitteluun käytettävälle järjestelmälle laskettiin yhtälöä (11) käyttäen maksimihinnaksi 58 800 €. Laskelmassa nettotuotoiksi katsottiin yhden työntekijän puolikkaan työpäivän työpanoksen siirtyminen automaatiojärjestelmän tehtäväksi.

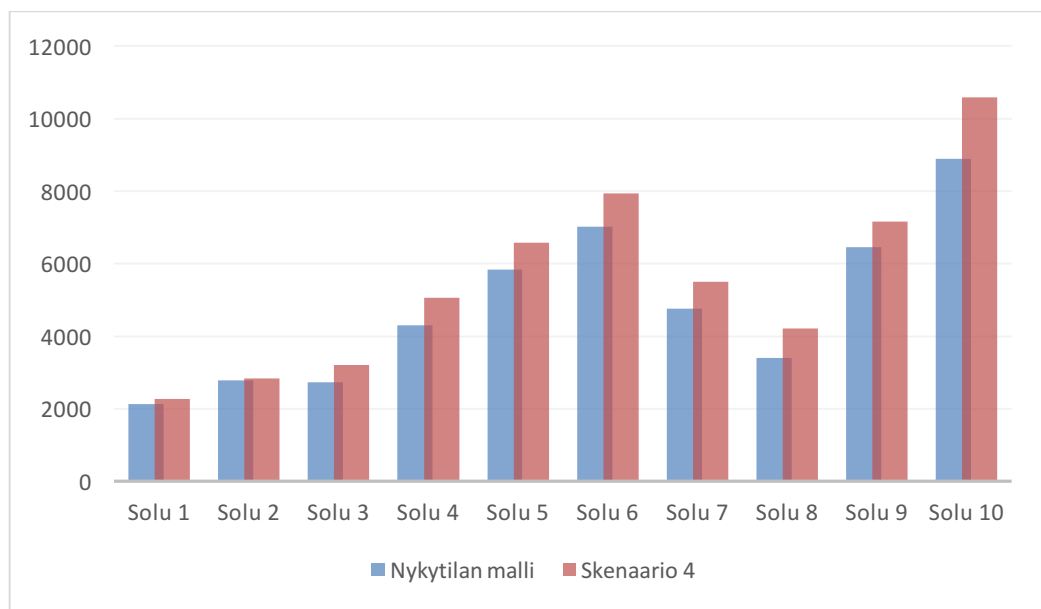
Jotta komponenttien soluille toimittamisen voi automatisoida, on siirrettävät komponentit kuljettamisen lisäksi paikoitettava ja orientoitava. Letkujen syöttäminen tuotantosoluille voidaan tehdä käyttäen motorisoituja syöttölaitteita: esimerkkejä mahdollisista ratkaisuista on esitetty Markenin (2015) katalogissa. Letkukelojen siirtäminen varastohyllystä solujen välivarastoon vaatisi erikseen suunniteltavan järjestelmän, jonka hankintakustannukset tulisivat olemaan merkittävästi letkunsyötön automatisointia korkeammat. Liittimien syöttäminen soluille voitaisiin toteuttaa käyttäen yksinkertaisia syöttölaitteita, joissa materiaali siirretään ja orientoidaan kulhosta syöttölinjaan, josta materiaali lopuksi poimitaan. Tämä ei kuitenkaan ole asennelmien puhtausvaatimusten kannalta hyvä asia, sillä liittimien hankautuessa toisiaan vasten syntyy partikkeleita, jotka heikentävät asennel-

mien puhtautta, mikä heikentää tuotteen asiakkaalle tuottamaa arvoa (Huhturi 2015). Letkuliittimet olisi näin ollen hyvä pystyä eristämään toisistaan jo ennen niiden toimitusta tehtaalle. Mikäli tämä ei onnistu, tulisi erottelun tapahtua viimeistään ennen liitinten syöttämistä soluille. Parhaimmillaan automatisointi kuitenkin mahdollistaa työn tekemisen täysin ilman ihmisen läsnäoloa. Yhtälöä (11) käyttäen investoinnin maksimisummaksi komponenttien soluille toimittamisen automatisoinnissa saatiin 351 000 €. Laskelmassa nettotuotoiksi katsottiin kolmen työntekijän koko työpäivän työpanoksen siirtyminen automaatiojärjestelmän tehtäväksi.

Tuotteiden siirtäminen soluilta kokoonpanolinjastolle nähtiin vaikeimmaksi toteuttaa automaation avulla, koska käsiteltävät tuotteet ovat elastisia hydraulikkaletkuasennelmia. Ratkaisun löytäminen vaatisi merkittävän investoinnin automaatiotekniikkaan. Investoinnin maksimisummaksi saatiin tällöin kaavaa (12) käyttäen 234 000 €. Laskelmassa nettotuotoiksi katsottiin kahden työntekijän koko työpäivän työpanoksen siirtyminen automaatiojärjestelmän tehtäväksi.

6.2.4 Skenaario 4: automaatio solu

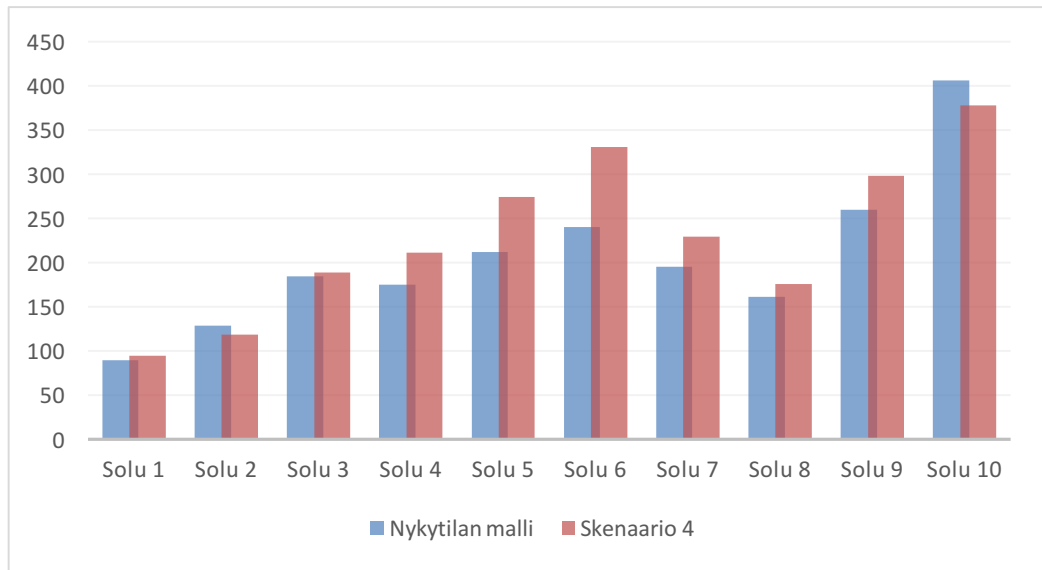
Neljännessä skenaariossa lisättiin automaatioastetta ottamalla käyttöön automaatio solu, jonka avulla lähdettiin tavoittelemaan aiempaa suurempaa tuotantokapasiteettia. Automaatio soluksi valikoitui tuotantosolu 10. Kuvassa 58 on esitetty kuukauden tuotantomäärät skenaario 4:n simulointimallissa.



Kuva 58. Kuukauden tuotantomäärä skenaario 4:n simulointimallissa.

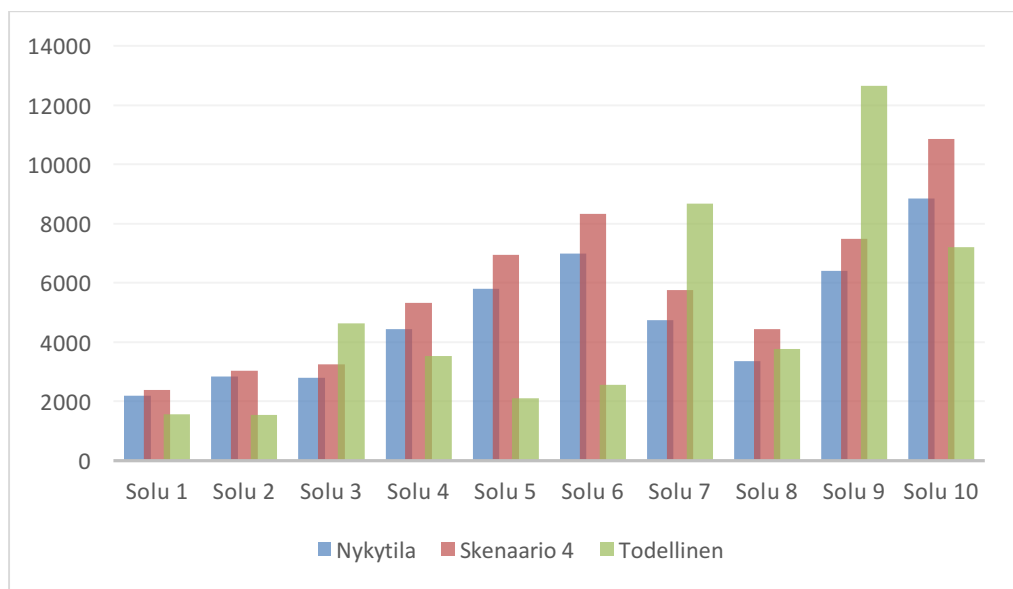
Päivittäiset tuotantomäärät ovat skenaario 4:n mallissa jonkin verran korkeammat kuin nykytilan mallissa. Poikkeuksena on tuotantosolu 10, jossa tuotanto on käynnissä aina

silloin, kun tehtaalla on työntekijöitä paikalla. Kuvassa 59 on esitetty päivittäinen tuotantomäärä skenaario 4:n simulointimallissa.



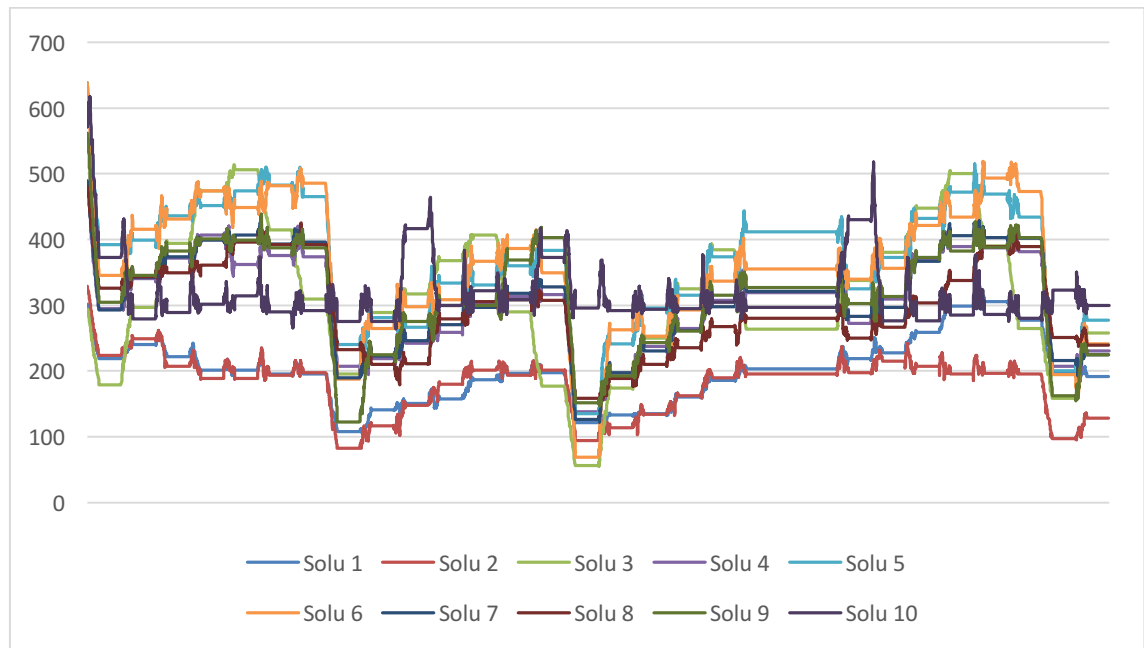
Kuva 59. Päivittäinen tuotantomäärä skenaario 4:n simulointimallissa.

Tuotantokapasiteetin kasvun lisäksi asiakkaille lähetettyjen tuotteiden määrä kasvoi. Kasvua saavutettiin noin 19 % verrattuna nykytilan malliin. Kuukauden lähetetyn tuotannon määrä skenaario 4:n simulointimallissa on esitetty kuvassa 60.



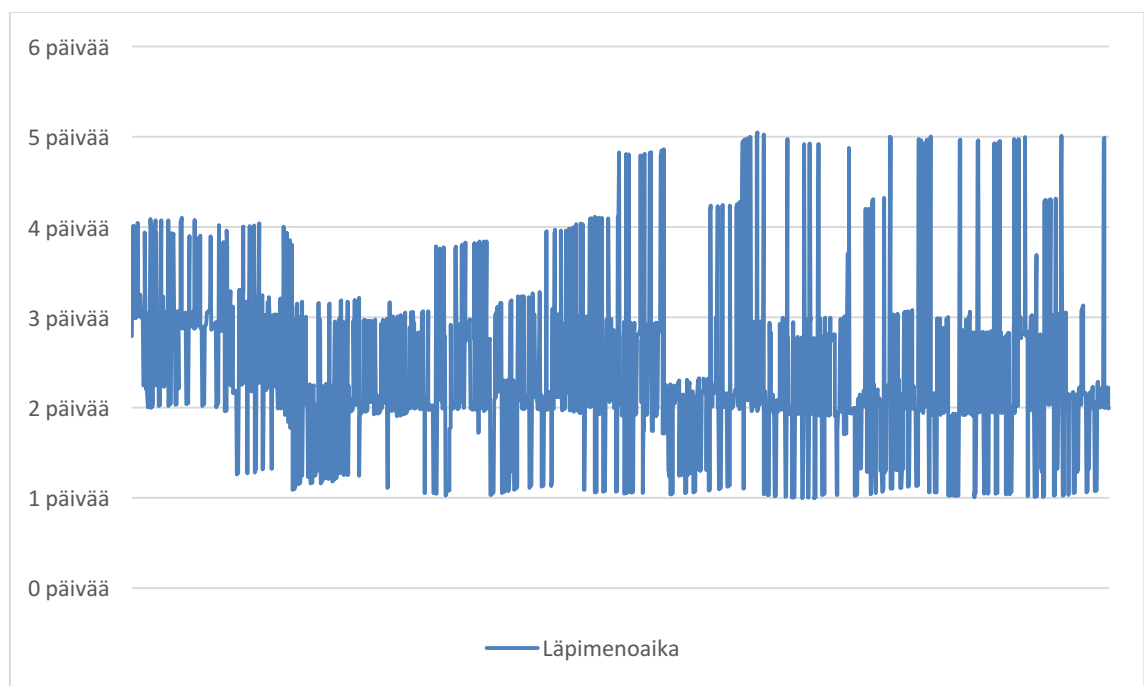
Kuva 60. Kuukauden lähetetty tuotanto skenaario 4:n simulointimallissa.

Lisäksi varastotasoa saatiin alennettua, vaikka tuotantomäärät kasvoivat. Varastotasojen keskiarvoksi saatiin tarkastelujaksolle noin 2630 kappaletta, minkä seurauksena varastotasot laskivat noin 53 % verrattuna nykytilan malliin. Ero skenaario 1:n varastotasoihin on 1 prosenttiyksikköä. Skenaario 4:n simulointimallin varastotasot on esitetty kuvassa 61.



Kuva 61. Varastotasot skenaario 4:n simulointimallissa.

Varastotasojen alenemisen lisäksi tuotannon läpimenoaikaa saatiin lyhennettyä verrattuna nykytilan malliin ja skenaario 1:n simulointimalliin. Kuvassa 62 ja taulukossa 14 on esitetty tuotannon läpimenoajat skenaario 4:n simulointimallissa.



Kuva 62. Tuotannon läpimenoaika skenaario 4:n simulointimallissa.

Läpimenoaika laski noin 58 % verrattuna nykytilan malliin ja noin 14 prosenttiyksikköä verrattuna skenaario 1:n simulointimalliin. Läpimenoajan alenemisen voidaan katsoa ainakin osittain johtuneen valmistevaraston kiertonopeuden paranemisesta.

Taulukko 14. Tuotannon läpimenoajat skenaario 4:n simulointimallissa.

	Läpimenoaika
Nykytila	05:07:57:16.02
Skenaario 4	02:05:56:43.07
Erotus	03:02:00:32.94
Muutos	57.84 %

Tuotantokapasiteetin lisäämiseksi myös muiden tuotantosolujen kapasiteettia oli tarpeen kehittää. Tuotantosoluille lisättiin yhteensä viisi soluilta toiselle tarpeen mukaan siirtyvää työntekijää. Kokonaisuudessaan voitiin täten vähentää yksi työntekijä verrattuna nykytilan malliin. Investoinnin maksimisummaksi tuotantosolun automatisoinnille saatiin kaavaa (12) käyttäen 117 000 €.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOKEHITYSEHDOTUKSET

Kehitysprojektista saadut tulokset olivat monin tavoin kannustavia. Tutkimuksessa löydettiin käyttökelpoisia keinoja tuotantojärjestelmän kehittämiseen ilman tarvetta suuriin investointeihin tai muutoksiin nykyisessä tuotantojärjestelmässä. Lisäksi tutkimuksessa käytettyjen tutkimusmenetelmien havaittiin tukevan hyvin tutkimuksen tavoitteiden täyttymistä. Erityisesti simuloinnin koettiin olevan hyödyllinen tutkimusmenetelmä tuotantojärjestelmän kehitysprojektissa, mikä on tuloksena yhteneväinen lähdemateriaalissa (Detty & Yingling 2000; Czarneck & Loyd 2001; Schroer 2004; Gurumurthy & Kodali 2011; Tokola et al. 2015) esitettyjen tulosten kanssa. Esitiedot joidenkin tutkimusmenetelmien käyttämiseen olivat kuitenkin puutteelliset. Työntutkimuksen toteutus ei täyttänyt kaikkia asetettuja tavoitteita osittain aikaisemman kokemuksen puutteen vuoksi. Myös simulointitutkimuksen läpivienti olisi ollut huomattavasti sujuvampi, mikäli tuotantojärjestelmien simuloinnista olisi ollut aiempaa enemmän käytännön kokemusta.

Tutkimuksen tavoitteet saavutettiin pääosin. Tuotannon läpimenoaika pystyttiin lyhentämään enemmän kuin tavoitteissa asetettu 30 %. Varastotasojen alentamiselle asetettuun tavoitteeseen ei kuitenkaan päästy, vaan varastotasojen osuus jäi parhaimmillaankin noin 114 % päivittäisen tuotannon määrästä. Varastotasoja onnistuttiin kuitenkin laskemaan noin 50 % verrattuna tuotannon nykytilaa kuvaavan simulointimallin tuloksiin. Tutkimuksen aikana ei aikataulullisista syistä johtuen päästy kokeilemaan tutkimustulosten todellisia vaikutuksia tutkimusympäristössä, joten tulokset ovat arvioita, vaikkakin perusteltuja sellaisia. Simulointitutkimuksen tulokset on esitetty taulukossa 15. Taulukossa esitettyjen tuloksien, joissa tuotannon eräkoot ovat puolet nykytilan mallin eräkoista, voidaan lähdekirjallisuuden (Allahverdi & Soroush 2006; Santos et al. 2006; Lödding 2013; Pound et al. 2014; Wilson 2015) perusteella olettaa olevan todellisessa tuotantojärjestelmässä parempia kuin simuloidut tulokset.

Taulukko 15. Simulointitutkimuksen tulokset.

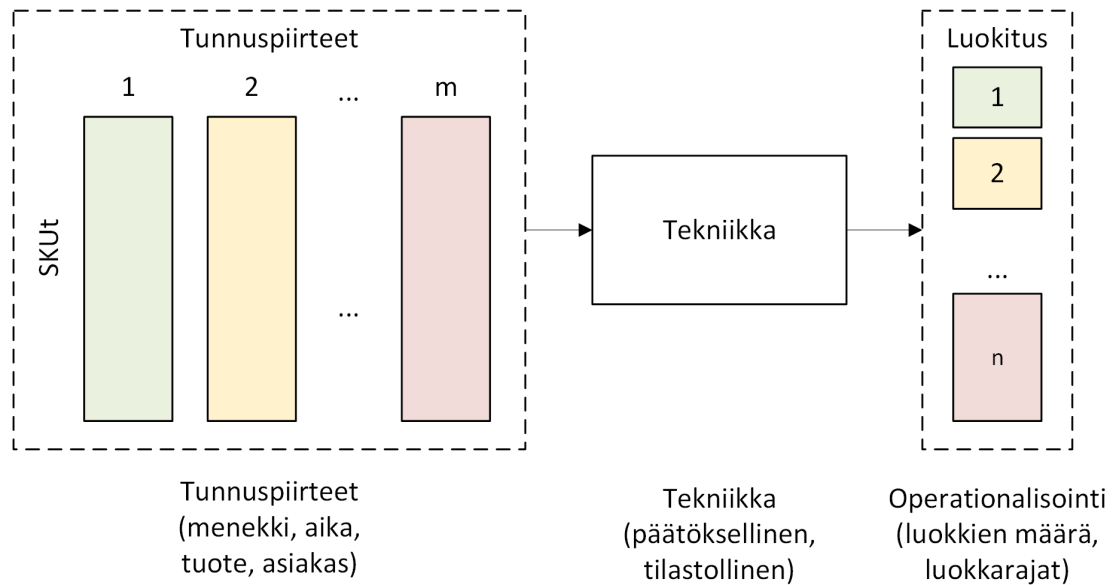
	Läpimenoaika		Varastotasot		KET	
	Aika	Muutos	Kpl	Muutos	Kpl	Muutos
Nykytila	5 p 8 h	0 %	5608	0 %	9280	0 %
Skenaario 1	3 p	44 %	2800	50 %	4450	52 %
Skenaario 2	3 p	44 %	2800	50 %	4450	52 %
Skenaario 3	3 p	44 %	2800	50 %	4450	52 %
Skenaario 4	2 p 5 h	58 %	2630	53 %	3940	58 %

Tutkimustuloksia saatiin myös simulointitutkimuksen ulkopuolelta. Kyselytutkimuksen tuloksista saatiin tietoa työntekijöiden näkemyksistä nykyisestä tuotantojärjestelmästä. Tuloksista selvisi, että eri työtehtäviä tekevillä henkilöillä on ristiriitaisia käsityksiä tuotannon nykytilasta, tilausten käsittelystä sekä varastohallinnasta. Henkilöiden tulisi täten parantaa keskinäistä kommunikointiaan, jotta tulevaisuuden kehitystoimista keskusteleminen onnistuu sujuvammin. Lisäksi jotkin kyselytutkimuksen vastauksista eivät vastanneet tutkimuksen aikana tutkimusympäristöstä kerättyjä havaintoja. Tuotantojärjestelmää kehitettäessä olisi kuitenkin osattava suhtautua mahdollisimman realistisesti sen vahvuuksiin ja heikkouksiin.

Tutkimustulosten perusteella tuotantojärjestelmän kehittäminen tulee aloittaa tuotannon layoutin muuttamisella. Layoutin ja ohjausperiaatteen muutos voidaan toteuttaa kohtuullisella takaisinmaksuajalla. Kohtuullisen takaisinmaksuajan takia taloudelliset ja operatiiviset hyödyt tulevat nopeasti näkyviin toiminnan tunnusluvuihin. Layout-muutoksen johdosta myös tehtaan pinta-alan tarve vähenee ja tilaa säästyy mahdolliseen muuhun tulevaan toimintaan.

Tutkimusta tuotantojärjestelmän parantamiseksi tulisi jatkaa perehtymällä tarkemmin valmiiden tuotteiden varastointiin sekä loppukokoonpanolinjan toteutukseen. Jatkotutkimuksen tulisi edetä skenaarioiden mukaisessa järjestyksessä, alkaen ohjaustavan ja layoutin muutoksesta. Myös automaatiotekniikan hyödyntämiseen tulee tulevaisuudessa perehtyä tarkemmin, siitäkin huolimatta, että sen implementoinnista tehtaalle koituu merkittäviä kustannuksia, joiden takaisinmaksuaika muodostuu kohteesta riippuen pitkäksi. Potentiaalisimmiksi kohteiksi automaatiolle nähtiin pahvilaatikoissa kuljetettävien letkuliintien kuljettaminen ja käsittely.

Tulevan varastointiratkaisun kehittämisessä on huomioitava käytettävissä olevan tilan ja varastoitavien nimikkeiden määrä. Tulevaisuudentilan layout-ratkaisussa varastointiin käytettävissä olevan tilan määrä edellyttää varastoitavien nimikkeiden (SKU, stock keeping unit) määrän vähentämistä. Varastonimikkeiden valinnassa on tarpeen huomioida kunkin tuotteen tarvitsema tila ja merkitys yrityksen liiketoiminnassa. Varastonimikkeiden merkitystä yrityksen liiketoiminnassa voidaan arvioida luokittelemalla ne. Van Kampen et al. (2012) esittelevät varastohallinnan työkaluna käytettäviä menetelmiä varastonimikkeiden luokitteluun ja esittävät varastonimikkeiden luokitteluun käytettävän käsitteellisen viitekehyksen, joka on esitetty kuvassa 63.



Kuva 63. Varaston luokittelun käsitteellinen viitekehys. (Perustuu lähteeseen van Kampen et al. 2012)

Varastointiratkaisun tarkemman suunnittelun lisäksi loppukokoonpanolinjaston yksityiskohtaisempi toteutus tulee selvittää. Linjaston suunnittelussa on tarkoituksenmukaista käyttää työkaluna simulointia (McMullen & Frazier, 2009; Peltokorpi et al. 2012; Peltokorpi et al. 2014). Tutkimuksessa saavutettujen hyötyjen kannalta ei ole oleellista onko lopullinen toteutus tavanomainen tuotantolinjasto vai toteutetaanko se käyttäen joustavampia ratkaisuja. Samalla tulee ratkaista solun ulkopuolisten lisätöiden työpisteiden tarkempi sijoittelu, jossa pyrkimyksenä tulee olla vaiheiden sijoittaminen mahdollisimman lähelle tuotantosoluja.

8. YHTEENVETO

Tuotantojärjestelmä on enemmän kuin sen eri osa-alueiden summa. Mikäli järjestelmän halutaan olevan mahdollisimman tehokas, on sen komponenttien oltava keskenään yhteensovitetuja. Tuotannon tehokkuutta rajoittaa yleensä pullonkaulavaihe. Muutokset pullonkaulavaiheen ulkopuolella eivät useinkaan lisää järjestelmän tehokkuutta, mutta voivat silti parantaa järjestelmän toimintaa.

Tässä työssä kehitystoimia kohdistettiin pääosin pullonkaulatyönvaiheen ulkopuolelle. Ratkaisuehdotuksia arvioitiin ja kehitettiin simulointitutkimuksen avulla. Lähtötiedot simulointitutkimusta varten kerättiin kohdeyrityksen toimintaan perehtymällä sekä työn-
tutkimuksen avulla. Lähtötietoja jouduttiin jonkin verran sovittamaan simulointimalliin, jotta niistä saatiin käyttökelpoisia.

Diplomityön tuloksissa saavutettiin ja osittain jopa ylitettiin työlle asetetut tavoitteet, joskin tavoite varastotasojen alentamiselle ei täytynyt. Tutkimuksen aikana selvisi, että alussa asetettu tavoite varastotasojen alentamiselle oli epärealistinen. Tutkimuksen voidaan täten katsoa onnistuneen odotuksia vastaavasti, sillä tutkimusongelmiin esitettiin käyttökelpoisia ratkaisuja. Ratkaisuehdotusten arviointi ja yhteenveto on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Ratkaisuehdotusten arviointi ja yhteenveto.

Ratkaisuvaihtoehto	Tärkeys	Toteutettavuus	Taloudellinen kannattavuus
CONWIP-ohjaus	Suuri	Hyvä	Hyvä
Layout-muutos	Suuri	Hyvä	Erinomainen
Asetusaikojen lyhentäminen	Erittäin suuri	Huono	Huono
Hyllytyksen automatisointi	Kohtalainen	Erinomainen	Hyvä
Komponenttien käsittelyn automatisointi	Suuri	Hyvä	Huono
Tuotantosolun automatisointi	Vähäinen	Kohtalainen	Erittäin huono

Tulosten lisäksi diplomityön aikana tuotantojärjestelmästä kerättiin arvokasta tietoa sen nykyisistä toimintatavoista tulevaisuuden kehitystoimia varten. Käytetyt menetelmät ja tulokset dokumentoitiin riittävän kattavasti, jotta niitä voidaan käyttää myös tulevaisuudessa tuotantojärjestelmän kehittämiseen ja arviointiin.

LÄHTEET

van der Aalst, W. (2011). *Process Mining – Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes*, Springer Berlin Heidelberg, Germany, 352 p.

Aft, L. (2015). *Work Measurement*, in: Geng, H., (ed.), *Manufacturing Engineering Handbook*, Second Edition, McGraw-Hill Education, USA.

Agrawal, N., Singh, S. (2013). *Low Cost Parcel Sorting System with BCR: An Automated Approach*, *International Journal of Engineering, Business and Enterprise Applications*, Vol. 3(2), pp. 85-88. Saatavissa (viitattu 1.12.2016): <http://iasir.net/IJEBEApapers/IJEBEA12-339.pdf>.

Allahverdi, A., Soroush, H.M. (2006). *The significance of reducing setup times/setup costs*, *European Journal of Operational Research*, Vol. 187(3), pp. 978-984. Saatavissa (viitattu 30.11.2016): <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.09.010>.

Arora, J.S. (2004). *Introduction to Optimum Design (Second Edition)*, Elsevier Academic Press, California, USA, 728 p.

Averill, D. (2011). *Lean Sustainability: Creating Safe, Enduring, and Profitable Operations*, CRC Press, Florida, USA, 206 p.

Bangsow, S. (2015). *Tecnomatix Plant Simulation – Modelling and Programming by Means of Examples*, Springer International Publishing, Germany, 724 p.

Banks, J. (2003). *Discrete Event Simulation*, in: Bidgoli, H., (ed.), *Encyclopedia of Information Systems*, Elsevier, pp. 663-671. Saatavissa (viitattu 27.5.2016): <http://dx.doi.org/10.1016/B0-12-227240-4/00045-9>.

Brockberg, K.H. (2008). *Origins and Elements of Lean: A Brief Review of the Literature*, PAWLEY Learning Institute, California, USA, 5 p.

Carlisle, B. (2009). *Flexible and Precision Assembly*. in: Nof, S.Y., (ed.), *Springer Handbook of Automation*, Springer Berlin Heidelberg, Germany, pp. 881-890.

Carson, J.S. (2005). *Introduction to modelling and simulation*, *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, Orlando, Florida, USA, pp. 16-23. Saatavissa (viitattu 30.5.2016): <http://dx.doi.org/10.1109/WSC.2005.1574235>

Chung, J., Tanchoco, J.M.A. (2009). *Material Handling Automation in Production and Warehouse Systems*. in: Nof, S.Y., (ed.), *Springer Handbook of Automation*, Springer Berlin Heidelberg, Germany, pp. 961-979.

Czarnecki, H., Loyd, N. (2001). Simulation of Lean Assembly Line for High Volume Manufacturing, Proceedings of the 2001 Huntsville Simulation Conference, California, USA, 6p.

Detty, R.B., Yingling, J.C. (2000). Quantifying benefits of conversion to lean manufacturing with discrete event simulation: A case study, *International Journal of Production Research*, Vol. 38(2), pp. 429-445. Saatavissa (viitattu 4.7.2016): <http://dx.doi.org/10.1080/002075400189509>.

EK-SAK tuottavuustyöryhmä (2011). Työntutkimuksen käsitteitä, menettelytapoja ja käyttökohteita, Teknologiateollisuus ry, Helsinki, Suomi, 48 s. Saatavissa (viitattu 1.6.2016): http://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/file_attachments/tyomarkkinat_kannustava_palkkaus_palkkaustapoja_tyontutkimuksen_menettelytavat.pdf.

Fowler, J.W., Mönch, L., Rose, O. (2006). Scheduling and Simulation, in: Herrmann, J.W., (ed.), *Handbook of Production Scheduling*, Springer US, USA, pp. 109-133.

Groover, M.P. (2008). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing* (3rd Edition), Pearson Education Inc., New Jersey, USA, 831 p.

Gurumurthy, A., Kodali, R. (2011). Design of lean manufacturing systems using value stream mapping with simulation, *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 22(3), pp. 444-473. Saatavissa (viitattu 20.5.2016): <http://dx.doi.org/10.1108/17410381111126409>.

Hales, L.H. (2015). Work Cell Design, in: Geng, H., (ed.), *Manufacturing Engineering Handbook*, Second Edition, McGraw-Hill Education, USA.

Henderson, S.G., Nelson, B.L. (2006). Stochastic Computer Simulation, *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol. 13, pp. 1-18. Saatavissa (viitattu 31.5.2016): [http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)13001-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0507(06)13001-7).

Henkilöstöliikuntabarometri. (2015). Valtakunnallinen liikunta- ja urheiluorganisaatio Ry, 51 s. Saatavissa (viitattu 1.6.2016): <http://www.sport.fi/system/resources/W1siZiIsIjIwMTUvMTEvMDYvMTFf-MzhfMDhfODgyX0hbmtpbF9zdF9iYXJvbWV0cmllVmFsb18yMDElLnBkZiJ-dXQ/Henkil%C3%B6st%C3%B6barometri%20Valo%202015.pdf>.

Hirsjärvi, S., Remes, P., Sajavaara, P. (2007). *Tutki ja kirjoita*, Tammi, Helsinki, Suomi, 448 s.

Hopp, W.J., Spearman, M.L. (2000). *Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management*, Second Edition, Irwin/McGraw-Hill, New York, USA, 698 p.

Hu, J.S., Ko, J. (2015). Assembly System Design, in: Geng, H., (ed.), Manufacturing Engineering Handbook, Second Edition, McGraw-Hill Education, USA.

Huhturi, J. (2015). Hydrauliiikkaletkuasennelman puhtausmittaukset, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, Suomi, 79 s. Saatavissa (viitattu 2.11.2016): <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201511231743>.

Izumi, T. (2015). Lean Manufacturing, in: Geng, H., (ed.), Manufacturing Engineering Handbook, Second Edition, McGraw-Hill Education, USA.

Järvenpää, E., Lanz, M., Toivonen, V., Tokola, H., Seilonen, I., Salonen, T., Puro, R., Nieminen, H. (2016). Tuottavuusloikka tuotannossa: Digitaalista tuotantoa MES:n avulla, MANU P5 LeanMES, FIMECC, Tampere, Suomi, 35 s.

Järvenpää, E., Lanz, M., Tokola, H., Salonen, T., Koho, M., Backman, J., Katajisto, K., Reinilä, H. (2014). Tuotannosuunnittelu- ja ohjaus suomalaisissa valmistavan teollisuuden yrityksissä – Nykytila, haasteet ja tarpeet, MANU LeanMES – projektin raportti, Tampere, Suomi, 38 s. Saatavissa (viitattu 25.5.2016): https://wiki.tut.fi/pub/LeanMES/Reports/LeanMES_Tuotannosuunnittelu_ja_ohjaus_suomalaisissa_yrityksiss_julkinen_FINAL.pdf.

Järvinen, P., Järvinen, A. (2004). Tutkimustyön metodeista, Tampereen yliopisto, Tampere, Suomi, 211 s.

van Kampen, T., Akkerman, R., van Donk, D.P. (2012). SKU classification: a literature review and conceptual framework, International Journal of Operations & Production Management, Vol. 32(7), pp. 850-876. Saatavissa (viitattu 1.12.2016): <http://dx.doi.org/10.1108/01443571211250112>.

Karrer, C. (2012). Engineering Production Control Strategies - A Guide to Tailor Strategies that Unite the Merits of Push and Pull, Springer Berlin Heidelberg, Germany, 176 p.

Kotimaisten kielten keskus. (2016). Kielitoimiston sanakirja, Kotimaisten kielten keskus & Kielikone Oy. Saatavissa (viitattu 30.5.2016): <http://www.kielitoimistonsanakirja.fi/>.

Lapinleimu, I. (2007). Ideaalitehdas – Tehtaan suunnittelun teorian kiteytys, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tuotantotekniikan laitos, Tampere, Suomi, 197 s.

Law, A.M. (2005). How to build valid and credible simulation models, Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, Orlando, Florida, USA, pp. 16-23. Saatavissa (viitattu 30.5.2016): <http://dx.doi.org/10.1109/WSC.2005.1574235>.

Law, A.M., Kelton, W.D. (2000). Simulation Modelling and Analysis, McGraw-Hill, USA, 760 p.

Leon, J.V. (2015). Operations Research in Manufacturing, in: Geng, H., (ed.), Manufacturing Engineering Handbook, Second Edition, McGraw-Hill Education, USA.

Luomala, A. (2008). Muutosjohtamisen ABC – Ajatuksia muutoksen johtamisesta ja ihmisten johtamisesta muutoksessa, Tutkimus- ja koulutuskeskus Synergos, Tampereen yliopiston kauppakorkeakoulu, 30 s. Saatavissa (viitattu 23.5.2016): www.uta.fi/jkk/synergos/tyohyvinvointi/oppaat/muutoskirja.pdf.

Lödning, H. (2013). Handbook of Manufacturing Control – Fundamentals, description, configuration, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 577 p.

MacCarthy, B. (2006). Organizational, Systems and Human Issues in Production Planning, Scheduling and Control, in: Herrmann, J.W., (ed.), Handbook of Production Scheduling, Springer US, USA, pp. 59-90.

Manos, T. (2006). Lean Lessons: Value Stream Mapping—an Introduction, Quality Progress, Vol. 39(6), pp. 64-69. Saatavissa (viitattu 29.6.2016): <http://faculty.washington.edu/apurva/502/Readings/Lean/value-stream-mapping--an-introduction%20lean.pdf>.

Marken. (2015). Flexible Assembly Technology: for hose and cable, Marken Manufacturing, Inc., Plymouth, USA, 32 p. Saatavissa (viitattu 30.11.2016): <https://www.markenmfg.com/wp-content/uploads/2016/10/Marken-Manufacturing-Brochure.pdf>.

Martinsuo, M., Blomqvist, M. (2010). Prosessien mallintaminen osana toiminnan kehittämistä, Tampereen teknillinen yliopisto, Teknis-taloudellinen tiedekunta, Tampere, 23 s. Saatavissa (viitattu 25.5.2016): <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201012131381>.

McCalley, B.W. (1994). Model T Ford: The Car that Changed the World, Krause Publications, Michigan, USA, 614 p.

McMullen, P.R., Frazier, G.V. (1999). Using Simulation and Data Envelopment Analysis to Compare Assembly Line Balancing Solutions, Journal of Productivity Analysis, Vol. 11(2), pp. 149-168. Saatavissa (viitattu 24.5.2016): <http://dx.doi.org/10.1023/A:1007732016717>.

Muther, R. (1968). Systematic layout planning, Industrial Education Institute, Boston, USA, 360 p.

Netland, T.H. (2016). Critical success factors for implementing lean production: the effect of contingencies, International Journal of Production Research, Vol. 54(8), pp. 2433-2448. Saatavissa (viitattu 1.6.2015): <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2015.1096976>.

Ng, Y.W., Jie, J.C.R., Kamaruddin, S. (2014). Analysis of Shop Floor Performance through Discrete Event Simulation: A Case Study, *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 2014, 10 p. Saatavissa (viitattu 30.5.2016): <http://dx.doi.org/10.1155/2014/878906>.

Niemi, E. (2009). Worker allocation in make-to-order assembly cells, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 25(6), pp. 932-936. Saatavissa (viitattu 24.5.2016): <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2009.04.008>.

Olhager, J. (2003). Strategic positioning of the order penetration point, *International Journal of Production Economics*, Vol. 85(3), pp. 319-329. Saatavissa (viitattu 9.6.2016): [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00119-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00119-1).

Pajunen-Muhonen, H., Korpiharju, P., Sylvänne, O. (2004). *Kartoitus tuotantoautomaation teknologisista kehittämistarpeista*, TEKES, Helsinki, Suomi, 53 s.

Parker. (2015). *Hydraulic Hoses, Fitting and Equipment – Catalogue*, Literature Number: CAT4400UK, Parker Hannifin Ltd, Warwick, United Kingdom, 576 p. Saatavissa (viitattu 23.5.2016): http://www.parker.com/literature/Hose%20Products%20Division%20Europe/Literature_2014/Catalogs/CAT4400UK_Hydraulic_Hoses_Fittings_Equipment.pdf.

Peltokorpi, J., Tokola, H., Niemi, E. (2012). Comparison of Balancing Policies in Multi-item Assembly, *International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM)*, Helsinki, Finland, 8 p. Saatavissa (viitattu 24.5.2016): https://www.researchgate.net/publication/274255861_Comparison_of_Balancing_Policies_in_Multi-item_Assembly.

Peltokorpi, J., Tokola, H., Niemi, E. (2014). Worker coordination policies in parallel station systems: performance models for a set of jobs and for continuous arrival of jobs, *International Journal of Production Research*, Vol. 53(6), pp. 1625-1641. Saatavissa (viitattu 24.5.2016): <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2014.918290>

Pound, E.S., Bell, J.H., Spearman, M.L. (2014). *Factory Physics for Managers: How Leaders Improve Performance in a Post-Lean Six Sigma World*, McGraw-Hill Education, USA, 384 p.

Rother, M., Shook, J. (1999). *Learning to See - Value Stream Mapping to Create Value and Eliminate Muda*, Lean Enterprise Institute, Inc, Massachusetts, USA, 102 p.

Rother, M. (2005). *Value-Stream Mapping in Make-to-Order Environment*, Lean Enterprise Institute, Cambridge, USA, 3 p. Saatavissa (viitattu 14.7.2016): http://www.lean.org/library/value-stream_mapping_in_a_make_to_order_environment.pdf.

Santos, J., Wysk, R.A., Torres, J.M. (2006). *Improving Production with Lean Thinking*, Wiley, Somerset, USA, 264 p.

Schenk, M., Wirth, S., Müller, E. (2010). *Factory Planning Manual – Situation-Driven Production Facility Planning*, Springer Berlin Heidelberg, Germany, 410 p.

Schroer, B.J. (2004). Simulation as a Tool in understanding the Concept of Lean Manufacturing, *Simulation*, Vol. 8(3), pp. 171-175. Saatavissa (viitattu 23.6.2016): <http://sim.sagepub.com/content/80/3/171.full.pdf>.

SFS-EN 854. (2015). Rubber Hoses and hose assemblies. Textile reinforced hydraulic type. Specification, Suomen Standardoimisliitto SFS ry, Helsinki, 18 p.

Siderska, J. (2016). Application of Tecnomatix Plant Simulation for Modeling Production and Logistics Processes, *Business, Management and Education*, Vol. 14(1), pp. 64-73. Saatavissa (viitattu 4.11.2016): <http://dx.doi.org/10.3846/bme.2016.316>.

Siemens. (2016). Plant Simulation. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., Saatavissa (viitattu 4.11.2016): http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml.

Singh, B.J., Khanduja, D. (2009). SMED: For quick changeovers in foundry SMEs, *International Journal of Productivity and Performance Management*, Vol. 59(1), pp. 98-116. Saatavissa (viitattu 28.6.2016): <http://dx.doi.org/10.1108/17410401011006130>.

Tilastokeskus. (2016). Luottamusväli, Tilastokeskuksen verkkosivut. Saatavissa (viitattu 7.12.2016): <http://www.stat.fi/meta/kas/luottamusvali.html>.

Tokola, H., Niemi, E., Väistö, V. (2015). Lean manufacturing methods in simulation literature: Review and association analysis, 2015 Winter Simulation Conference, Huntington Beach, California, USA, pp. 2239-2248. Saatavissa (viitattu 24.5.2016): <http://dx.doi.org/10.1109/WSC.2015.7408336>.

Vaughn, A., Fernandes, P., Shields, T.J. (2002). *Manufacturing System Design Framework Manual*, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA, 64 p.

Vierros, T. (2009). Investointilaskelmat, Tuotantotalouden peruskurssi, Aalto University Wiki. Saatavissa (viitattu 1.12.2016): <https://wiki.aalto.fi/display/TU22/8.+Investointilaskelmat>.

Ward, S.W., Poling, S.R., Nash, M.A. (2015). Six Sigma and Lean Manufacturing, in: Geng, H., (ed.), *Manufacturing Engineering Handbook*, Second Edition, McGraw-Hill Education, USA.

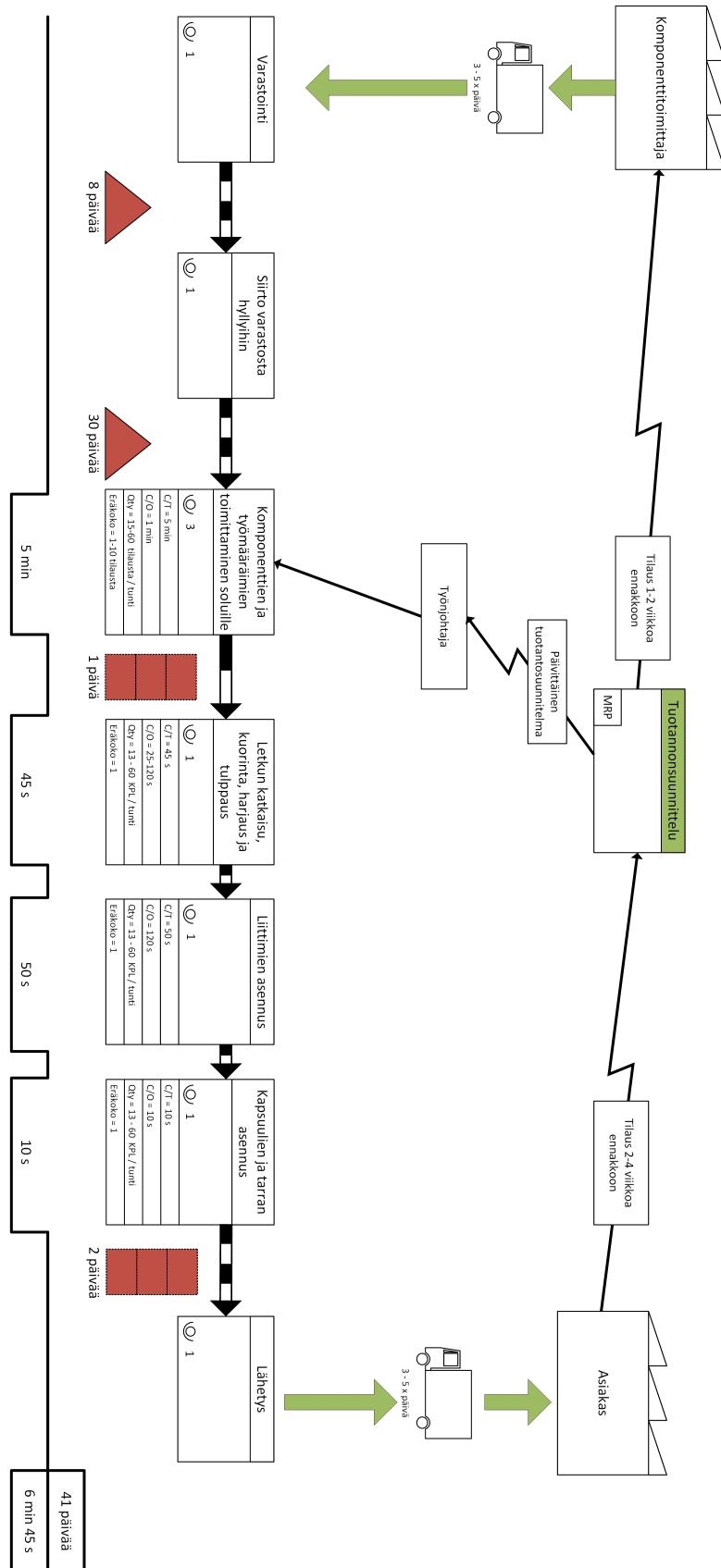
Wilson, L. (2015). *How to Implement Lean Manufacturing, Second Edition*, McGraw-Hill Education, New York, USA, 416 p.

Womack, J.P., Jones, D.T. (2003). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*, Free Press, New York, USA, 396 p.

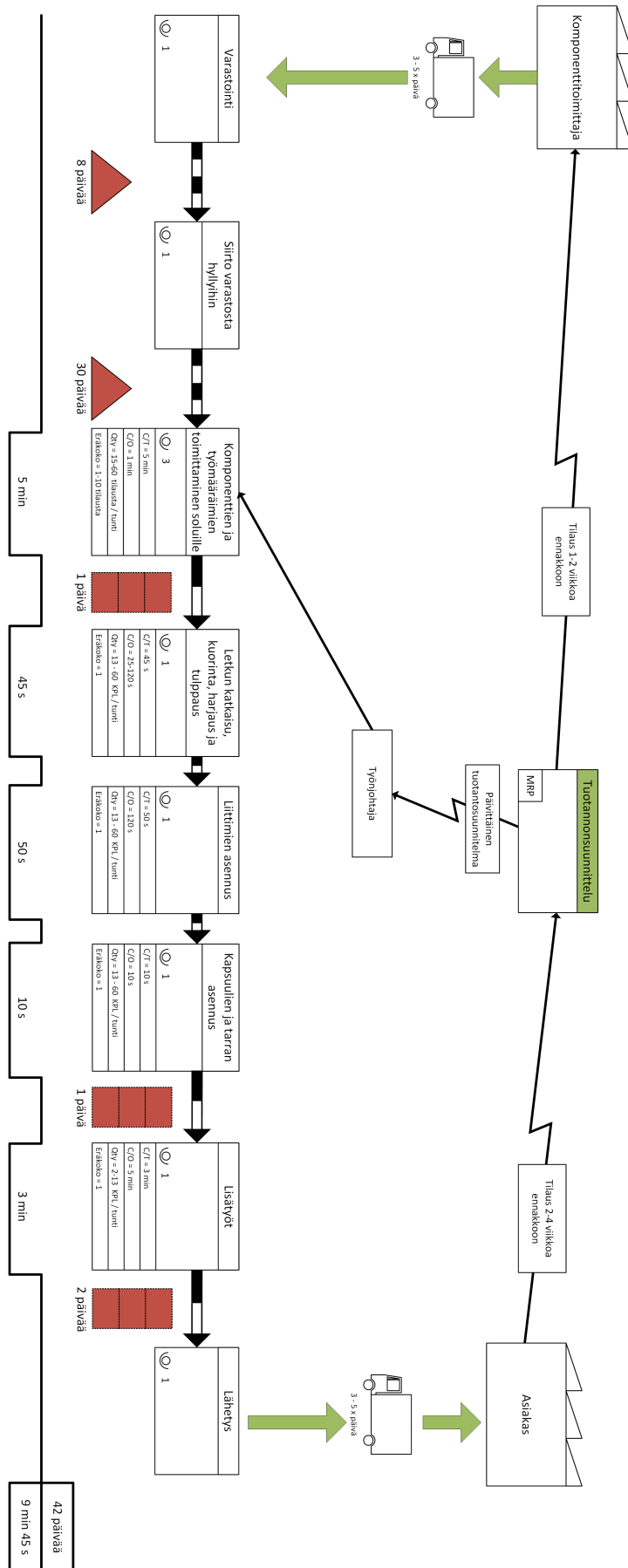
Zandin, K.B. (2001). *Maynard's Industrial Engineering Handbook, Fifth Edition*, McGraw-Hill Professional, USA, 2688 p.

LIITE A: ARVOVIRTA-ANALYYSIN TULOKSET

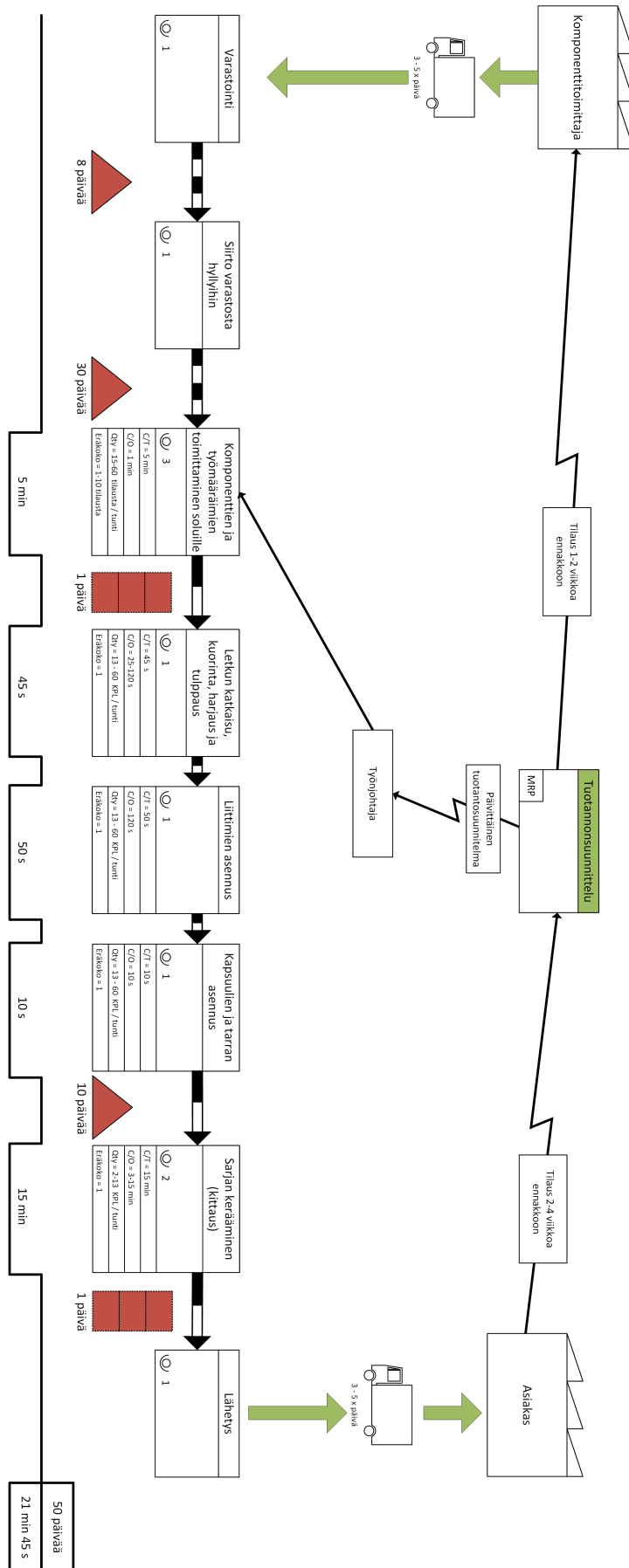
Kuva 64. Nykytilan arvovirtakaavio tuoteryhmälle 1.



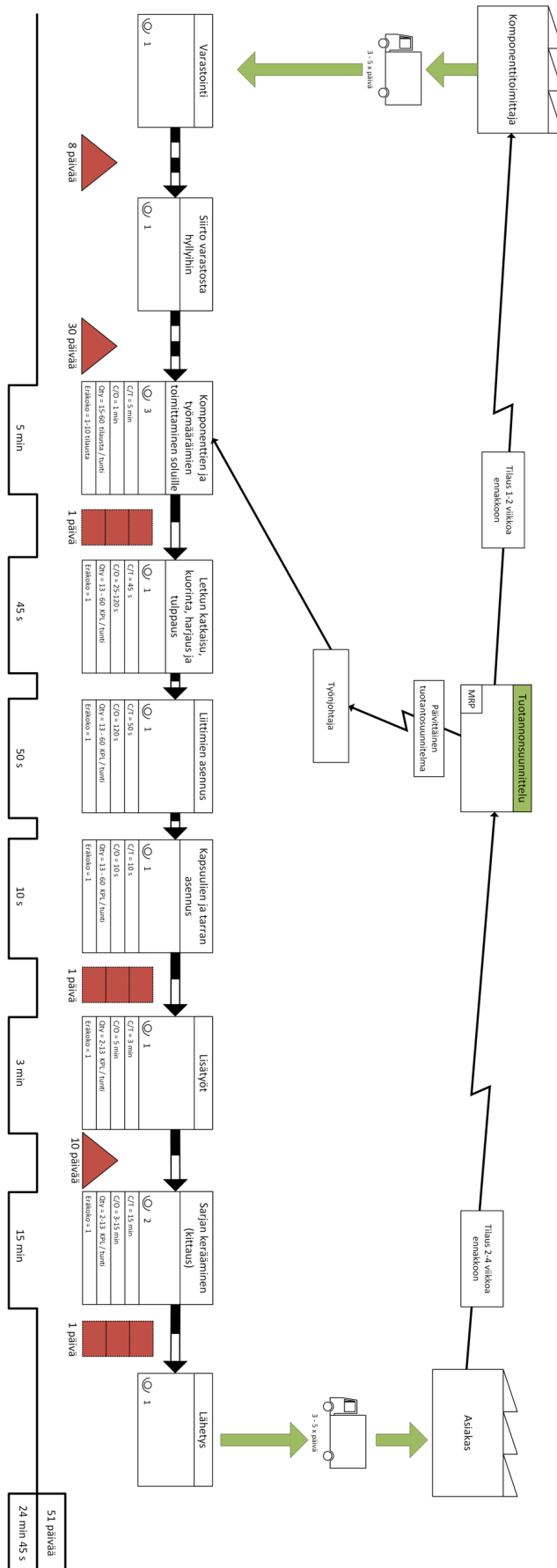
Kuva 65. Nykytilan arvovirtakaavio tuoteryhmälle 2.



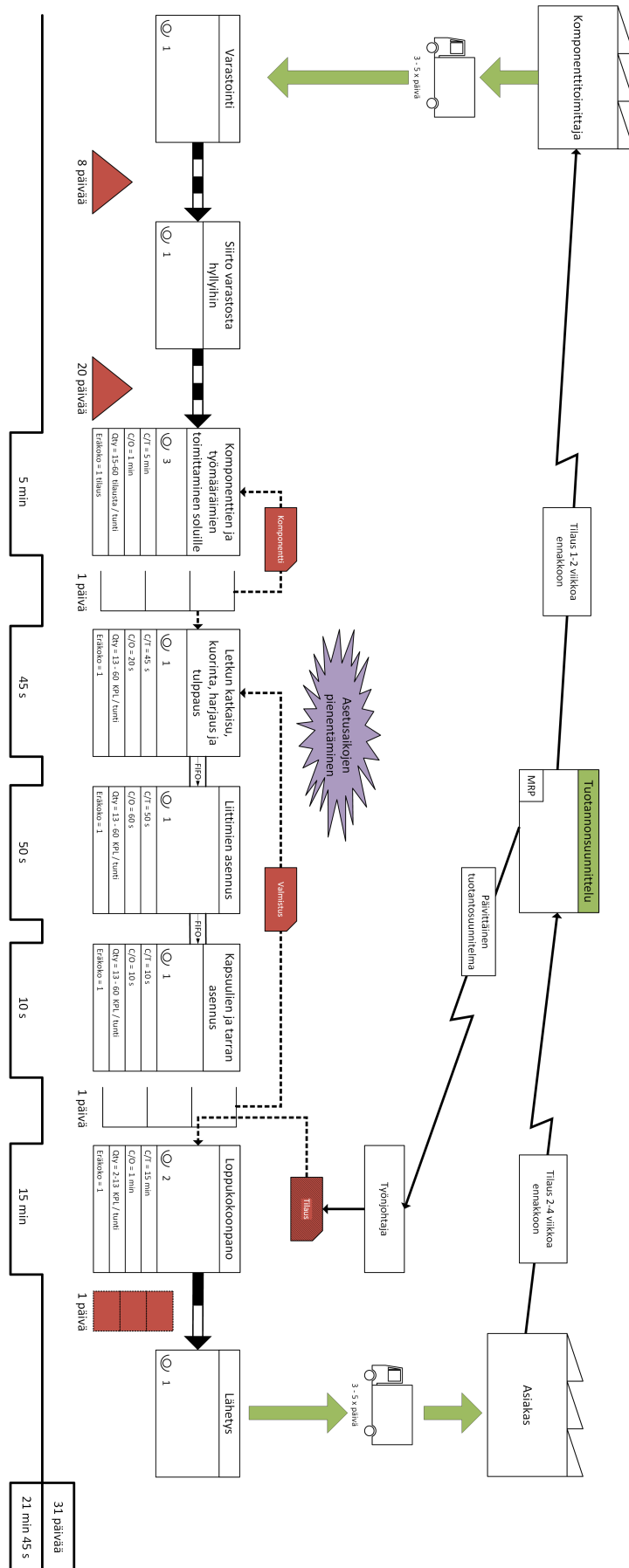
Kuva 66. Nykytilan arvovirtakaavio tuoteryhmälle 3.



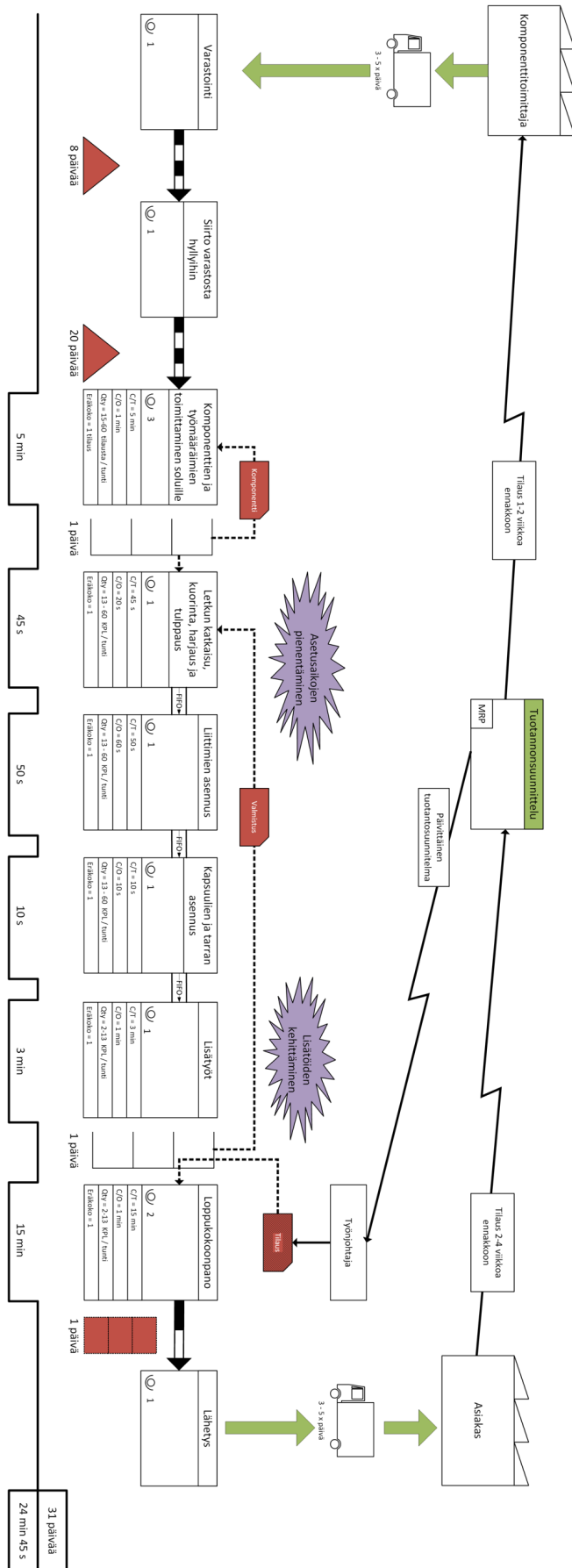
Kuva 67. Nykytilan arvovirtakaavio tuoteryhmälle 4.



Kuva 68. Tulevaisuudentilan arvovirtakaavio tuoteryhmälle 1.



Kuva 69. Tulevaisuudentilan arvovirtakaavio tuoteryhmälle 2.



LIITE B: KYSELYTUOKSIMUKSESSA KÄYTETTY KYSELYLOMAKE

Taulukko 17. Kyselytutkimuksessa käytetyt kysymykset. (Perustuu lähteeseen Järvenpää et al. 2014)

Kysymys	
1	Miten materiaali- ja tuotevirtoja seurataan ja miten logistisia tietoja kerätään/hallitaan
2	Millä tarkkuudella tuotantojärjestelmän kapasiteetti ja kuormitus tunnetaan?
3	Kuinka paljon ja miten yritys jakaa asiakkaiden tai toimittajien ja alihankkijoiden kanssa reaaliaikaista tietoa koskien tilausten statusta, varastotasoa, kapasiteettia,...?
4	Minkälaisia haasteita liittyy toimitusvarmuuteen? (oma ja toimittajien)
5	Käytetäänkö aika- ja/tai materiaalipuskureita tuotannossa toimitusvarmuusongelmien eliminoinimiseksi? Muuta?
6	Miten kiiretilaukset käsitellään? Mikä on kiiretilauksien toimitusaika verrattuna normaaliin toimitusaikaan? Mitä kiiretilaukset aiheuttavat yrityksessä? (ylitöitä, ...) Tuotantotyöntekijä: Mitä tehdään jos tulee kiiretilaus?
7	Miten asiakasräätelöityihin tuotteisiin varaudutaan? Miten poikkeuksellisen suuriin tilauksiin varaudutaan?
8	Onko prosesseista tiedossa esim. standardiaikoja? Minkälaista tietoa missäkin pisteessä on tarjolla standardiajoista?
9	Vaihtelevatko työvaiheiden kestot paljon standardiajoista tai ennusteista? Seurataanko toteutuneita aikoja? Päivitetäänkö standardiaikoja/ennusteita toteutuneiden mukaan?
10	Miten räätelöidyt tilaukset hallitaan tuotannossa? Mitä tietoa tuotantotyöntekijä tarvitsee ja miten se hänelle tarjotaan?
11	Miten ketterästi työntekijöitä voidaan siirtää työvaiheesta tai työkoneelta toiselle? Onko esim. ongelmia osaamisen kanssa?
12	Miten varastoja ohjataan? Milloin osat/komponentit tilataan (imuohjaus vai tilaus/varasto-ohjaus)? Miten varmuusvarastot lasketaan? IT-vastaava: Miten varastojenhallinta tapahtuu?
13	Minkälaisia mittareita (Key Performance Indicators) yrityksessä on tällä hetkellä käytössä tuotantoon liittyen? Listaa tärkeysjärjestyksessä.
14	Mitkä ovat tuotannon tavoitteet? Mitä tuotannon tunnuslukuja ja parametreja (KPI) yrityksessä halutaan optimoida? [] Kustannukset, [] läpimenoaika (virtaustehokkuus), [] toimitustarkkuus/-varmuus, [] tuottavuus, [] resurssitehokkuus, [] resurssien käyttöaste, [] laaduntuottokyky, [] ekologinen jalanjälki...?
15	Miten mittareiden laskentaan tarvittava data kerätään? Minkälaisia työkaluja ja menetelmiä käytetään? (Automaattinen tiedonkeruu, manuaalinen syöttö taulukkoon, manuaalinen mittaus, työkalut?)
16	Mistä tuotantoresursseista (koneista ja laitteista) kerätään dataa automaattisesti? Mitä?

17	Kuinka pitkälle standardoituja yrityksen prosessit ovat? Onko eri prosessivaiheista työku- vaukset eli miten ne pitäisi suorittaa (valmistusprosessit, laatu- prosessit, toimintatavat eri tilanteissa)? Onko laatukäsikirjaa?
----	--

LIITE C: SIMULOINTIPROJEKTIN KONSEPTIMALLI

Simulointiprojekti

Projektin tavoitteet

- Ongelmien tunnistaminen nykyisestä tuotantojärjestelmästä
- Ratkaisuvaihtoehtojen kehittäminen, jotta tuotannon läpimenoaikaa voidaan lyhentää ja varastojen määrää alentaa
- Ratkaisuvaihtoehtojen vertailu päätöksenteon tueksi

Data

- Projektia varten kerätty data
 - o Vaiheajat
 - o Materiaalien reitit
- Olemassa oleva data
 - o Tuotannosuunnittelussa käytettävät standardiajat

Mallin lämmitysaika

- Yhden viikon mittainen lämmitysaika, mikä koostuu neljästä vaiheesta
 - o 1. vaiheessa täytetään liitin ja letkuvarastot
 - o 2. vaiheessa täytetään solujen avoin tilauskanta
 - o 3. vaiheessa valmistetaan asennelmia varastoon
 - o 4. vaiheessa käynnistetään muu tuotanto
- Lämmittelyvaiheen päätyttyä tuotannon voidaan katsoa toimivan tavanomaisesti

Nykytilan simulointimalli

Mallin rakenne

- Mallissa kuvattavat materiaali- ja tietovirrat:
 - o Materiaalien virtaus niiden ensimmäisistä varastopaikoista (*source*) lähtevien tuotteiden varastoon (*drain*)
 - o Tuotantojärjestyksen määräytyminen perustuu tuotantosuunnitelmaan, jota toteutetaan syklisesti simuloinnin ajan

Mallin yksinkertaistukset

- Jokainen tuotantosolu luodaan malliin
 - o Solun tuotannosta valitaan n. 10 nimikettä, joita käytetään simuloinnissa
 - o Standardiajat mitataan osalle tuotteista, niitä verrataan työmääräimissä oleviin standardiaikoihin ja tiedon pohjalta tehdään päätelmiä myös muun tuotannon vaiheaikojen suhteen

- Tarkkoja siirtoreittejä on vaikea kuvata täsmällisesti, koska ne vaihtelevat
 - Käytetään keskimääräisiä siirtoreittejä
- Solujen tuotantokapasiteetti
 - Solujen tuotantokapasiteetti määritetään vaiheaikojen, työn vaiheistuksen ja käytävissä olevan työajan perusteella.
 - Mallista saatavia tuloksia verrataan todellisesta tuotannosta kerättyihin tuloksiin ja mallia korjataan tarpeen mukaan.
- Tilausten käsittely
 - Tilauksiin ei merkitä spesifejä tuotteita, koska projektin laajuus ei kata täsmällistä tilausten läpimenoaikojen arviointia

Mallin validointi

- Vertaaminen todelliseen tilanteeseen
 - Valmistusmäärät, lähetettyjen tuotteiden määrät.
- Herkkyysanalyysi
 - Tunnistetaan vaiheet, joilla on suurin merkitys mallin toiminnan kannalta
- Mallin toiminnan seuraaminen
 - Työsuoritusten vertaaminen todellisuuteen

Tulevaisuudentilan simulointimallit

Skenaariot

- **Skenaario 1: Layout-muutos**
 - *Tavoitteet:*
 - Vähentää varastoinnin tarvitsemaa pinta-alaa
 - Vähentää varastointiin kuluvaa aikaa
 - Pienempi keskeneräisen työn määrä
 - Varastosta aito FiFo
 - *Edellytykset:*
 - Varastoinnin kehittäminen
 - Varastoitavien tuotteiden määrän vähentäminen (priorisointi, optimointi)
 - Tuotannon ohjausperiaatteen muutos
 - Sovellettu CONWIP
- **Skenaario 2: Pienempi taloudellinen tuotantoeräkoko**
 - *Tavoitteet:*
 - Joustavampi tuotanto, parempi reagointikyky
 - Nopeampi tuotannon läpimenoaika
 - *Edellytykset*
 - Asetusaikojen pienentäminen

- **Skenaario 3: Materiaalinkuljetuksen automaatio**
 - *Tavoitteet:*
 - Automatisoitu materiaalin kuljetus
 - *Edellytykset*
 - *Automaatio*
- **Skenaario 4: Automaatiosolu**
 - *Tavoitteet:*
 - *Suurivolyymisen ja kohtalaisen homogeenisen tuotannon automatisointi*
 - *Edellytykset*
 - *Kokoonpanoautomaatio*

Mallien rakenne

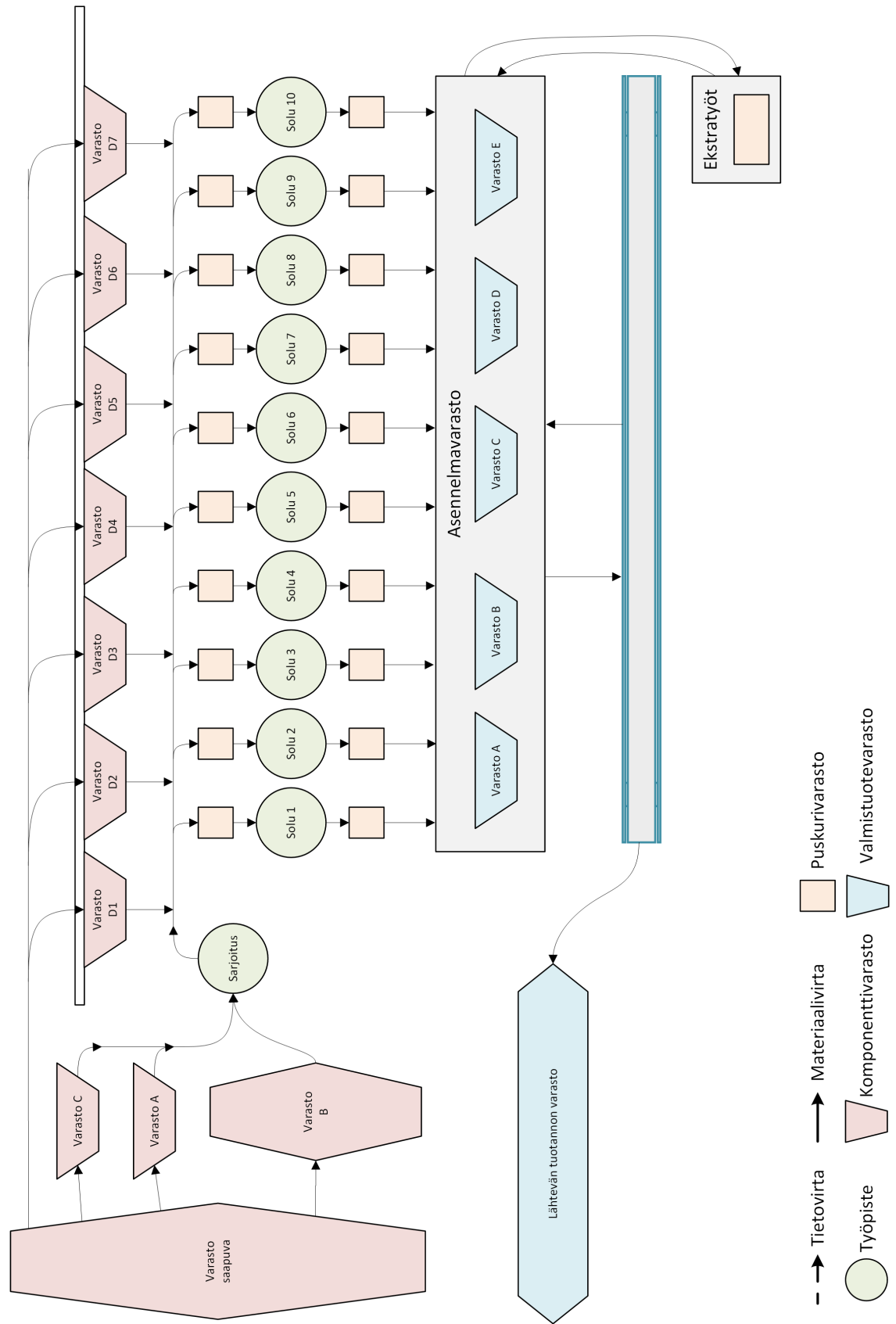
- Muutosten määrä nykytilan mallin ja tulevaisuudentilan simulointimallien välillä pidetään mahdollisimman pieninä

Mallien yksinkertaistukset

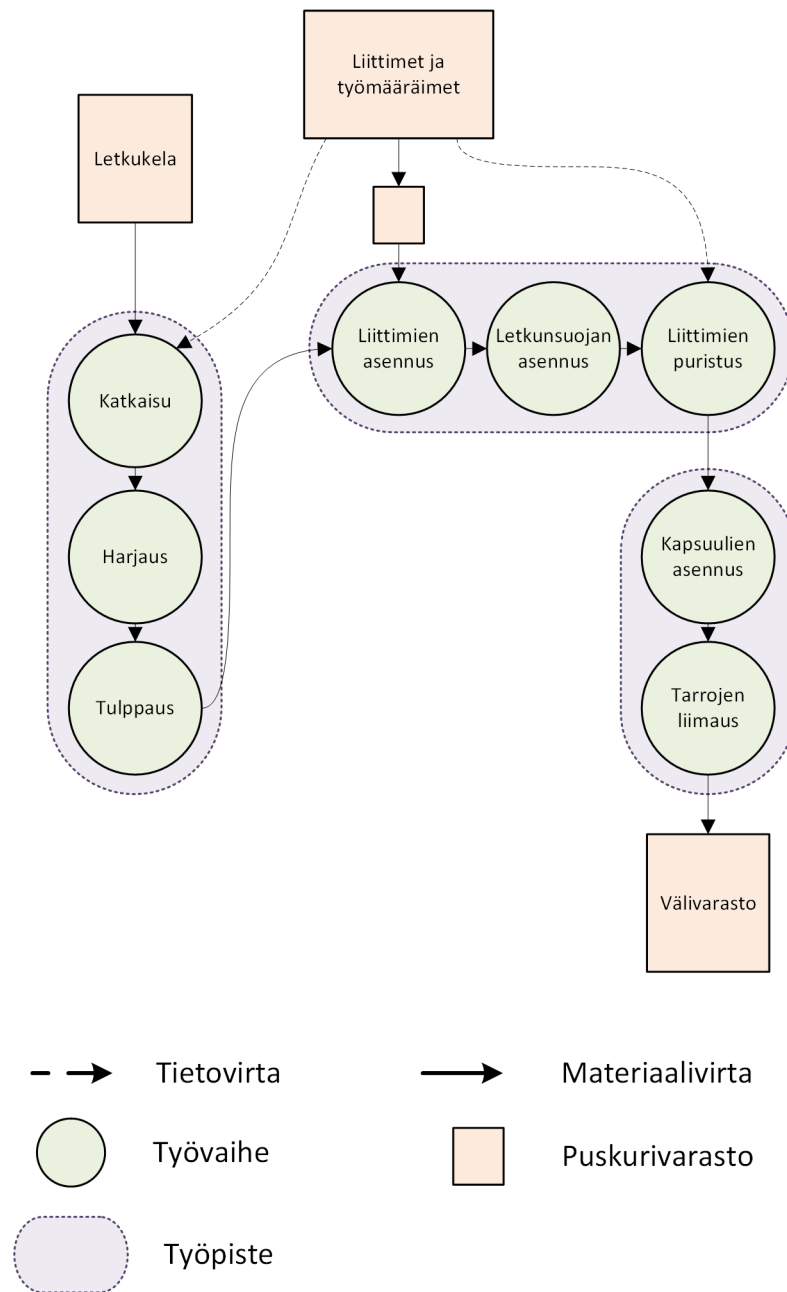
- Automaatiotoimilaitteita ei mallinneta tarkasti, vain tarpeelliset komponentit rakennetaan malliin

Mallien validointi

- Mallin validiteetin pohjana on nykytilan simulointimalli
- Muutoskohteiden validointi joudutaan toteuttamaan perustuen arvioon



Kuva 71. Tulevaisuudentilan simulointimallin konsepti.



Kuva 72. Simulointimallin tuotantosolu.

Taulukko 20. Komponenttien keräileminen soluille.

Komponenttien kerääminen soluille				Yhden tuotantotilauksen kerääminen						
Valmistelu-aika:				Liittimien lukumäärä:						
Vaihe:	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Komponenttien kerääminen rasioihin:										
Tarrojen tulostus:										
Siirrot:										
Rasioiden siirtäminen soluille:										

Taulukko 21. Letkuasennelmien keräily soluilta.

Letkuasennelmien keräily soluilta	Yhden letkutyyppin siirtäminen varastoon	
Letkun tunnus:	Räkkiin / Lavalle	Tarve pinkkarille: KYLLÄ / EI
Letkujen määrä:	Eri tuotteiden määrä:	
Varastoon / Toimitukseen		
Valmistelu-aika:		
Kerääminen soluilta:	Siirtyminen kuorman purkupisteeseen:	
Siirtäminen varastoon:	Siirtyminen seuraavaan tehtävään:	

Taulukko 22. Kokoonpanoaikojen mittaus.

Letkuasennelmien kokoonpano	Tuotenumero:									
Muutos letkutyypissä? KYLLÄ / EI	Letkunvaihdon asetus aika:									
Työmääräimen ja komponenttien poimiminen hyllystä:										
Katkaisumitan asetus:	Puristimen asetus:									
Vaihe:	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Lomakkeen täyttö ja käsittely:										
Letkun katkaisu (ja harjaus):										
Letkun kuorinta (ja harjaus):										
Tulppaus ja merkkkaus:										
Liittimien asennus ja puristus:										
Letkunsuojan asennus:										
Kapsuulien asennus ja tarran asennus:										

Taulukko 23. Letkuasennelmasarjojen keräily.

Letkuasennelmasarjojen keräily (kittaus)	Yhden tilauksen valmistaminen
Tilausnumero:	
Eri tuotteiden määrä:	Tarve pinkkarille: KYLLÄ / EI
Letkujen kokonaismäärä:	Valmistelu aika:
Kerääminen räkeistä:	Kerääminen kuormalavoilta:
Siirtymät:	Tilauksen kerääminen:

LIITE E: ELPYMISAJAT

Taulukko 24. *Elpymisajat fyysisestä (määritelmä A) ja henkisestä (määritelmä B) kuormituksesta. (Perustuu lähteeseen EK-SAK tuottavuustyöryhmä 2011)*

Kuormitusluokka	Vaihtoehtoinen määritelmä	Elpymisaika min/ 8 h
1A	Työssä ei esiinny fyysistä ponnistusta.	25
2A	Kevyt työ: käsiteltävät esineet ovat keveitä tai liikevastus pieni. Työtä tehdään istuen tai vaihtelevasti istuen ja seisten.	35
2B	Työ vaatii normaalia tarkkaavaisuutta, valppautta ja keskittymistä.	
3A	Pääasiassa seisten tehtävä kevyt työ. Työ, jossa ajoittain mutta pitkäköin väliajoin joudutaan käsittelemään keskiraskaita esineitä. Työ on muuten kevyttä ja sitä tehdään yleensä istuen. Kevyt työ, jossa joudutaan kävelemään yli puolet työajasta.	45
3B	Työ vaatii tavanomaista suurempaa tarkkaavaisuutta ja keskittymistä. Yksitoikkoinen työ, jossa samankaltaiset lyhyehköt työvaiheet toistuvat koko työpäivän ajan.	
4A	Työssä esiintyy lyhyin väliajoin keskiraskaita ponnistuksia, muu osa työstä seisten tehtävää kevyttä työtä. Työ sisältää jatkuvaa liikkeessä oloa, ajoittain portaissa nousua ja keskiraskaiden taakkojen kantamista.	55
4B	Työ vaatii tarkkaavaisuutta ja jatkuvaa valmiutta rajoitettuun toimintaan. Työ koostuu samanlaisina toistuvista lyhyistä työvaiheista koko päivän ajan ja sidonnaisuusaste on korkea.	
5A	Keskiraskas työ, käsiteltävät esineet tai liikevastus keskiraskasta tai työajasta korkeintaan 25 % raskasta nostamista, työntämistä tai vetämistä. Työ tehdään koko ajan seisten ja liikuteltavat esineet ovat keskiraskaita, työasennon ollessa korkeintaan 25 % työajasta kuormittava.	70
5B	Työ vaatii melko kuormittavaa tarkkaavaisuutta ja keskittymistä. Työ vaatii alituista valmiutta nopeaan toimintaan tarkkailun kohteena olevalla alueella. Työ koostuu samanlaisina toistuvista lyhyistä työvaiheista ja on täysin sidottua.	

6A	<p>Raskas ruumiillinen työ: työajasta korkeintaan 50 % raskasta nostamista, kantamista, työntämistä tai vetämistä.</p> <p>Korkeintaan 50 % työajasta on suoritettava kuormittavassa työasennossa ja liikutellen keskiraskaita esineitä.</p>	85
6B	Työ edellyttää jatkuvaa herpaantumaton tarkkaavaisuutta ja keskittymistä.	
7A	<p>Hyvin raskas työ: työajasta yli 50 % raskasta nostamista, kantamista, työntämistä tai vetämistä.</p> <p>Raskasta työtä poikkeuksellisen epämukavissa asennoissa.</p>	100
7B	Työ vaatii kuormittavaa keskitettyä tarkkaavaisuutta siinä määrin, että sitä voidaan suorittaa yhtäjaksoisesti vain lyhyehkön ajan työn tuloksen kärsimättä.	