

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
School of Engineering Science
Tuotantotalous

Matias Hiltunen

**SIMULOINTI KEHITYSTYÖKALUNA SISÄLOGISTIIKAN
PALVELUYRITYKSESSÄ**

Tarkastaja: Dosentti Petri Niemi

Ohjaajat: DI Jali Toivanen
Insinööri (ylempi AMK) Olli Oka

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Engineering Science
Tuotantotalouden koulutusohjelma

Matias Hiltunen

Simulointi kehitystyökaluna sisälogistiikan palveluyrityksessä

Diplomityö

2020

105 sivua, 37 kuvaa, 4 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastaja: Dosentti Petri Niemi

Ohjaajat: DI Jali Toivanen ja Insinööri (ylempi AMK) Olli Oka

Hakusanat: simulointi, tapahtumapohjainen simulointi, mallintaminen, logistiikka, sisälogistiikka, varastointi, kehitystyökalu

Työn päätavoitteena on selvittää, soveltuuko tapahtumapohjaisen simuloinnin työkalu kohdeyrityksen kehitysorganisaation käyttöön. Toisena tavoitteena on tutkia simulointiprojektin resurssivaatimuksia ja sen taloudellista kannattavuutta. Työ on toteutettu tapaustutkimuksena, jossa tutkimuskohteena oleva prosessi mallinnetaan simulointityökalulla.

Työn kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan simuloinnin teoriaa ja esitellään useita tieteellisiä julkaisuja logistiikan simuloinnista. Työn empiriaosuus alkaa nykytilan analysoinnilla, jossa henkilöstöä haastatellaan, prosessi mallinnetaan luettavaan muotoon ja datan keruu suoritetaan. Ennen simulaatiomallin rakentamista työssä vertaillaan ja testataan tapahtumapohjaisen simuloinnin ohjelmistoja ja valitaan niistä soveltuvin. Prosessin nykytila mallinnetaan valittuun simulointiohjelmistoon, minkä jälkeen data käsitellään ja syötetään malliin. Simulaatiota ajetaan, tuloksia analysoidaan ja mallin toimivuus sekä luotettavuus tarkistetaan. Validoinnin jälkeen mallia rasietaan volyymimuutoksilla ja sen layoutiin tehdään muutoksia.

Simulointityökalut mahdollistavat kehityskohteiden monipuolisen tarkastelun sekä ohjelmistosta riippuen myös lähes rajattomat mallinnusmahdollisuudet. Simulointi on mainio väline muutosten ja pullonkaulojen tutkintaan sekä erilaisiin rasiustesteihin. Simulointityökalujen skenaariotoiminnoilla systeemin toimintaa eri lähtötiedoilla voidaan tarkastella tehokkaasti. Yhteenvetona voidaan todeta, että simulointityökalut soveltuvat kohdeyrityksen kehitysorganisaation käyttöön hyvin.

Simulointiprojektin läpivienti vaatii kuitenkin paljon resursseja, jos systeemin mallintaminen aloitetaan tyhjästä ja mallinnettava prosessi koostuu ihmisten tekemästä manuaalisesta työstä. Tällöin mittauskohteiden selvittäminen, datan keruu ja simulaatiomallin rakentaminen vievät projektista eniten aikaa. Lisäksi, monipuolisimpien simulointiohjelmistojen lisenssihinnat ovat merkittäviä, mikä voi johtaa siihen, ettei lisenssejä hankita montaa ja ohjelmiston käyttöosaaminen rajautuu organisaatiossa vain muutamille henkilöille.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
School of Engineering Science
Degree Programme in Industrial Engineering and Management

Matias Hiltunen

Simulation as a Development Tool - Case In-house Logistics Service Company

Master's thesis

2020

105 pages, 37 figures, 4 tables and 3 appendices

Examiner: Docent Petri Niemi

Instructors: M.Sc. (Tech.) Jali Toivanen and M.Eng. Olli Oka

Keywords: simulation, discrete-event simulation, modeling, logistics, in-house logistics, warehousing, development tool

The main goal of this thesis is to find out whether the discrete-event simulation tool is suitable for the use of the case company's development organization. The second goal is to study the resource requirements of the simulation project and its economic profitability. The thesis has been carried out as a case study, in which the process under study is modeled with a simulation tool.

The literature review examines the theory of simulation and presents several scientific publications on the simulation of logistics. The empirical part of the thesis begins with an analysis of the current state, in which the personnel are interviewed, the process is modeled in a readable form, and data collection is performed. Before building a simulation model, the thesis compares and tests discrete-event simulation software and selects the most suitable one. The current state of the process is modeled in the selected simulation software, and after that the data is processed and entered into the model. The simulation is run, the results are analyzed, and the functionality and reliability of the model are checked. After validation, the model is stressed by the volume changes and changes are made to its layout.

Simulation tools enable versatile examination of development targets and depending on the software, also almost limitless modeling possibilities. Simulation is a great tool for examining changes and bottlenecks, as well as performing various stress tests. With the scenario functions of the simulation tools, the operation of the system with different input data can be examined efficiently. In summary, the simulation tools are well suited for the use of the case company's development organization.

However, a simulation project requires a lot of resources if the modeling of the system is started from scratch and the process to be modeled consists of manual work done by people. In this case, finding out the measurement objects, collecting data and building a simulation model take the most time in the project. In addition, the license prices for the most versatile simulation software are significant, which can lead to the fact that not many licenses are acquired and the software's usage expertise is limited to only a few people in the organization.

ALKUSANAT

Viisivuotinen opiskeluaika LUT-yliopistossa päättyy tämän diplomityön myötä. Opiskeluaika kului Lappeenrannassa todella nopeasti ja nyt onkin aika muistella menneitä ennen täysipäiväiseen työelämään siirtymistä. Kokonaisuutena ajatellen opiskeluaika oli todella rentoa ja antoisaa. Jääkiekkoharrastus Parru HT:ssa, erilaiset opiskelijatapahtumat ja lukuisat ystävät tekivät opiskelijan arjesta viihtyisää.

Tästä diplomityöstä ja sen mielenkiintoisesta aiheesta haluan aivan ensiksi kiittää esimiestäni Markkua. Hän mahdollisti koko diplomityön toteuttamisen. Työn ohjaamisesta haluan puolestaan kiittää Jalia ja Ollia. Jalin avulla työ saatiin heti alussa oikealle raiteelle ja Olli mahdollisti myöhemmin tarvittavien resurssien saamisen. Yliopiston puolelta haluan kiittää ohjaajaani Petriä, joka tarjosi tarvittavat neuvot työn läpivientiin ja antoi vapaat kädet työn toteuttamiseen.

Diplomityön läpivienti koronapandemian aikaan tuotti alkuun haasteita, mutta loppujen lopuksi etätyöskentely osoittautuikin mukavaksi työskentelytavaksi. Haluankin kiittää Roosaa siitä, että pidit etätyöskentelyseuraa koko diplomityön ajan ja jaksoit vielä omien töidesi ohella avustaa työn viimeistelyssä. Lopuksi haluan kiittää vanhempiani ja veljeäni kaikesta tuesta, jota olen opintojeni aikana saanut. He ovat mahdollistaneet ja tukeneet matkaani aina tähän päivään asti.

Vantaalla 31.7.2020

Matias Hiltunen

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	10
1.1	Työn tausta.....	10
1.2	Tavoitteet ja rajaukset	11
1.3	Työn toteutus ja menetelmät	12
1.4	Työn rakenne	14
1.5	Kohdeyrityksen esittely	16
2	MATERIAALINOHJAUS TEOLLISESSA TUOTANTOYMPÄRISTÖSSÄ	17
2.1	Teollisuusyrityksen materiaalivirrat	17
2.2	Materiaalin- ja varastonohjauksen tavoitteet teollisuudessa.....	18
2.3	Logistiikan ulkoistaminen.....	20
2.4	Varaston layout	21
3	SIMULOINTI	24
3.1	Yleistä simuloinnista.....	24
3.2	Simulointi vs. optimointi	28
3.3	Systeemin komponentit.....	29
3.4	Simulaatiomallien tyypit.....	30
3.5	Tapahtumapohjainen simulointi.....	33
3.6	Todennäköisyysjakauman valinta	34
3.7	Satunnaislukujen generointi	35
3.8	Simulointitutkimuksen vaiheet	37
3.9	Simulointityökalun soveltuvuus ja simulointitutkimuksessa onnistuminen	41
3.10	Käytännön sovelluskohteita	43
4	LOGISTIIKAN SIMULOINTI	46
4.1	Tuotannon logistiikan simulointi	46

4.2	Varastoinnin simulointi.....	47
4.3	Varastointisimulaation input ja output.....	54
4.4	Jakelun ja kuljetusten simulointi.....	57
5	VARAOSATOIMINTOJEN VASTAANOTTOPROSESSI.....	58
5.1	Nykytila.....	58
5.2	Simulaatiomalliin tehtävät oletukset.....	64
5.3	Mitattavat kohteet ja datan keruu.....	66
6	NYKYTILAN MALLINTAMINEN SIMULOINTIOHJELMISTOON.....	69
6.1	Simulointiohjelmistojen vertailu ja soveltuvimman ohjelmiston valinta	69
6.2	Systeemin komponentit.....	70
6.3	Systeemin komponenttikaavio	71
6.4	FlexSim-simulaatiomallin rakentaminen	73
6.5	Testaukset, verifiointi ja validointi	80
7	KEHITTÄMISTOIMIEN TEKEMINEN SIMULOINTIOHJELMISTOON	83
7.1	Volyymin kasvattaminen	83
7.2	Layout-muutos	89
8	SIMULOINTITYÖKALUN SOVELTUVUUDEN JA SIMULOINNIN KANNATTAVUUDEN ARVIOINTI	91
8.1	Simulointityökalun soveltuvuus teollisuuspalveluiden kehitysorganisaatioon.....	91
8.2	Simulointiprojektiin kulunut aika	93
8.3	FlexSim-ohjelmiston kustannukset	94
8.4	Yhteenveto simuloinnin kannattavuudesta	95
8.5	Jatkotoimenpiteet ja suositukset	98
9	YHTEENVETO	99
10	LÄHTEET	102

LIITELUETTELO

Liite 1. Haastattelupohjat

Liite 2. Entiteettiluettelo

Liite 3. FlexSim Experimentation Report

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Työn rakenne.....	15
Kuva 2. Perinteinen materiaalitalousajattelun mukainen kuvaus teollisuusyrityksen materiaalivirroista (mukaillen Karrus 2003, s. 21; Sakki 2003, s. 24).....	18
Kuva 3. Varastonohjauksen tuoman lisäarvon rakenne (mukaillen Hokkanen & Karhunen 2014, s. 201)	20
Kuva 4. Läpivirtauksen periaate (mukaillen Richards 2011, s. 160).....	22
Kuva 5. U-virtauksen periaate (mukaillen Richards 2011, s. 160).....	23
Kuva 6. Esimerkki palveluprosessista ja sen vaiheiden kestoista (mukaillen Robinson 2004, s. 5).....	26
Kuva 7. Systeemissä vietettävän ajan vaihteluvälin simulointi SIMUL8-ohjelmalla	27
Kuva 8. Keskinäisliitännöiden määrän kasvu (mukaillen Robinson 2014, s. 6)	28
Kuva 9. Simulaatiomallin optimointimalli (mukaillen Carson & Maria 1997).....	29
Kuva 10. Esimerkki diskreetin systeemin tilamuuttujasta (mukaillen Banks et al. 2005, s. 11)	31
Kuva 11. Jatkuva simulaatio: jatkuvan systeemin diskreetit likiarvot (mukaillen Robinson 2004, s. 25)	32
Kuva 12. Simulointitutkimuksen vaiheet (mukaillen Banks et al. 2005, s. 13).....	37
Kuva 13. Esimerkkejä simulaatiomallin input-tiedoista (mukaillen Burnett & LeBaron 2001)	55
Kuva 14. Esimerkkejä simulaatiomallin output-raporteista (mukaillen Burnett & LeBaron 2001).....	56
Kuva 15. Vastaanotto-prosessin toimintojen välinen vuokaavio	59
Kuva 16. Varaosatoimintojen toimialue palvelukeskuksen päähallissa	61
Kuva 17. Systeemin komponenttikaavio	72
Kuva 18. Varaosatoimintojen toimialue mallinnettuna FlexSimillä.....	73
Kuva 19. Mallin objektit ovat oikeissa mittasuhteissaan ja todellisissa sijainneissaan.....	74
Kuva 20. Vastapainotrukki täyttämässä rullarataa materiaalivarastossa	74
Kuva 21. Simulaatiomalliin tuotu pumppukärryn 3D-objekti	75
Kuva 22. ExpertFit vaihe 1: Datan manuaalinen syöttö	76
Kuva 23. ExpertFit vaihe 2: Tiivistelmä syötetystä datasta.....	76

Kuva 24. ExpertFit vaihe 3: Jakauman automaattinen sovittaminen.....	77
Kuva 25. ExpertFit vaihe 4: Valitun jakauman syöttäminen haluttuun kohteeseen	78
Kuva 26. Rahtikirjaseurannan datan syöttö	79
Kuva 27. Poikkeamaselvittelyyn ohjaaminen vastaanoton jälkeen	80
Kuva 28. Mittaristo vastaanottajien työskentelystä	81
Kuva 29. Mittaristo työkoneiden käytöstä	82
Kuva 30. Muuttujien valinta ja skenaarioiden luonti.....	84
Kuva 31. Suorituskyvyn mittareiden luonti	84
Kuva 32. Experiment-ajon valinnat ja seurantanäyttö.....	85
Kuva 33. Vastaanotettujen eurolavojen määrä eri skenaarioissa.....	86
Kuva 34. Vastaanotettujen pienpakettien määrä eri skenaarioilla	86
Kuva 35. Nelitien ajomatka metreissä eri skenaarioilla	88
Kuva 36. Oksahyllyjen siirto karanteenin viereen	89
Kuva 37. Simulointiprojektin kronologinen eteneminen ja käytetyt tunnit.....	94
Taulukko 1. Esimerkkejä systeemeistä ja komponenteista (mukaihen Banks et al. 2005, s. 10)	29
Taulukko 2. Systemin komponentit.....	70
Taulukko 3. Työkoneiden käyttöasteet nykyisellä ja kaksinkertaisella volyymillä.....	87
Taulukko 4. Arvioitu määrä simulointiprojektiin kuluvasta ajasta tulevaisuudessa.....	96

1 JOHDANTO

Ulkoistettua logistiikkapalvelua tarjoavan yrityksen on teollisessa tuotantoympäristössä jatkuvasti kehitettävä sekä omia että asiakkaiden prosesseja. Toiminta jatkuvasti muuttuvassa ympäristössä vaatii joustavuutta sekä yrityksen kehitysorganisaatiolta että käytössä olevilta työkaluilta. Asiakaskohteiden kehitysprojektit voivat vaihdella paljonkin, jolloin on tärkeää, että yrityksellä on oikeat työkalut käytössään kussakin tilanteessa. Nykyaikaiset teollisuusympäristöt ovat kuitenkin niin monimutkaisia, että etenkin suurissa kehitysprojekteissa kokonaisuuden tehokas tarkastelu voi olla haasteellista nykyisillä työkaluilla. Monimutkaisessa tarkastelussa voidaan hyödyntää simulointia.

Kehitysprojektin ja mallintamisen laajuus vaikuttavat siihen, onko simulointi tilanteeseen soveltuva työkalu. Joissakin tapauksissa tarkasteltava malli on riittävän yksinkertainen ”ratkaistavaksi” matemaattisilla menetelmillä (Banks, Carson II, Nelson & Nicol 2005, s. 3). Kun matemaattisin keinoin hankitaan tarkkaa tietoa, toimintaa kutsutaan analyttiseksi ratkaisuksi (Law 2015, s.1). Tällaisissa yksinkertaisissa mallinnustilanteissa simulointi voi osoittautua liian monimutkaiseksi työkaluksi. Monet reaali maailman systeemit ovat kuitenkin niin monimutkaisia, että niiden malleja on käytännössä mahdotonta ratkaista matemaattisesti. Näissä tapauksissa numeerista, tietokonepohjaista simulointia voidaan käyttää jäljittelemään systeemin käyttäytymistä ajan myötä. (Banks et al. 2005, s. 3) Tässä työssä simulointia hyödynnetäänkin juuri reaali maailman systeemin esittämiseen ajan kuluessa, ja lisäksi arvioidaan simulointityökalujen soveltuvuutta kohdeorganisaation tarpeisiin.

1.1 Työn tausta

Tämä työ on tehty LUT-yliopiston tuotantotalouden koulutusohjelman diplomityönä. Työn on teettänyt Transval, joka on Suomen suurin sisälogistiikkayhtiö ja markkinajohtaja ulkoistuslogistiikassa. Ulkoistuslogistiikalla tarkoitetaan sitä, että yritys toimii asiakkaiden omissa tiloissa; esimerkiksi varastoissa, terminaaleissa, teollisuudessa ja myymälöissä. Transvalin palvelutarjonta on monipuolinen, mutta tässä työssä keskitytään yrityksen liiketoiminta-alueista teollisuuspalveluihin. Teollisuuspalveluiden kehitysorganisaatiossa on pohdittu simuloinnin mahdollisuuksia ja simulointityökalun lisäämistä osaksi operatiivista

kehittämistä. Kehitysorganisaatiossa on vahva Lean Six Sigma -prosessikehittämisen osaaminen, minkä seurauksena työn standardoinnista ja työntutkijan hyödyntämisestä on tullut osa operatiivista kehitystoimintaa. Työntutkija on henkilö, jonka työnkuvaan kuuluu muun muassa työvaiheaikojen mittaamista. Näin ollen kehitysorganisaatiossa on vahvat lähtökohdat onnistuneelle simulointitutkimukselle.

Koska yrityksessä ei ole tehty simulointitutkimusta aiemmin, työssä lähdetään liikkeelle aivan simuloinnin perusteoriasta. Perusteellisen läpikäynnin tavoitteena on rakentaa looginen ja hyvin perusteltu polku simuloinnin teoriasta käytännön simulointiin, jotta kehitysorganisaation henkilöt sekä työn lukijat ymmärtäisivät paremmin simuloinnin kokonaisuutta. Koska simulointitutkimusta ei oltu aiemmin tehty, ei myöskään simulointiohjelmistoa oltu vielä hankittu. Siten osana diplomityötä tehdään kattava tapahtumapohjaisten simulointiohjelmistojen vertailu ja soveltuvimman ohjelmiston valinta. Vertailun lopputulemana käytettäväksi simulointiohjelmistoksi valikoitui FlexSim ja siten tämän työn simulointi tehdään kyseisellä ohjelmistolla.

1.2 Tavoitteet ja rajaukset

Työssä tutkitaan simulointia ja sen sovelluskohteita laaja-alaisesti, mutta työn päätavoitteena on selvittää, onko simulointi soveltuva työkalu juuri Transval teollisuuspalveluiden kehitysorganisaation käyttöön. Lisäksi tavoitteena on tapaustutkimuksen pohjalta tutkia simulointiprojektin resurssivaatimuksia ja sen taloudellista kannattavuutta kyseisen kehitysorganisaation näkökulmasta. Tavoitteet on jäsennetty kahdeksi tutkimuskysymykseksi:

- 1. Onko simulointi soveltuva työkalu teollisuuspalveluiden kehitysorganisaatioon?*
- 2. Millaisia resursseja simulointityökalun käyttäminen vaatii ja onko se taloudellisesti kannattavaa teollisuuspalveluiden kehitysorganisaation näkökulmasta?*

Työ on rajattu yrityksessä koskemaan liiketoiminta-alueista vain teollisuuspalveluita ja siten työssä käytettävä teoria-aineisto pohjautuu teollisen tuotantoympäristön ominaispiirteisiin ja sen materiaalivirtoihin. Rajauksen myötä myös tapaustutkimuksen kohde valitaan tästä

liiketoiminta-alueesta. Tapaustutkimuksen kohteen valinnassa tärkeimpinä valintakriteereinä ovat olleet simulointikohteen rajattavuuden helppous ja valitun prosessin olemassaolo yrityksen muissakin asiakaskohteissa. Jälkimmäisellä valintakriteerillä on haettu yrityksessä sitä, että simulointiprojektin läpivienti on helpompaa toteuttaa tämän työn jälkeen myös muissa asiakaskohteissa.

Työn tapaustutkimuksen kohteena on teollisuuspalveluiden Hyvinkään palvelukeskuksen varaosatoiminnot, joissa käsitellään ja varastoidaan pääasiassa yhden suuren teollisuusyrityksen varaosia. Mallinnettava prosessi rajataan koskemaan vain vastaanottoa eli kuorma-auton purkamisen ja hyllyttämisen välistä prosessia. Näin ollen keräily, pakkaus ja lähetys ovat tarkastelun ulkopuolella.

Rajauksia on tehty myös simuloinnin osalta. Ensinnäkin simulaatiomallien pääkategorioista keskitytään vain tapahtumapohjaiseen simulointiin, jolloin systeemidynamiikka ja agenttipohjainen simulointi jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Tämä valinta on vaikuttanut niin teorian kuin simulointiohjelmistonkin valintaan. Toiseksi, työn aikabudjetin takia simuloinnissa hyödynnetään useita oletuksia ja näin ollen useita yksityiskohtia on jouduttu rajaamaan pois simuloinnista. Simuloinnin painopiste on pyritty pitämään vastaanoton työvaiheiden ja resurssien tutkimisessa, ja oletuksia näihin on pyritty tekemään mahdollisimman vähän.

1.3 Työn toteutus ja menetelmät

Diplomityö koostuu kahdesta osasta, joista ensimmäinen on kirjallisuuskatsaus ja toinen empiirinen tutkimus. Kirjallisuuskatsauksessa tutustutaan ensin teollisen tuotantoympäristön logistisiin materiaalivirtoihin pääasiassa tieteellisiin kirjoihin pohjautuen. Tämän jälkeen keskitytään laaja-alaisesti simuloinnin teoriaan tutustumalla aiheen tieteellisiin kirjoihin ja artikkeleihin. Lisäksi kirjallisuuskatsaukseen on otettu mukaan useita simuloinnin tieteellisiä julkaisuja ja niiden tuloksia. Niin logististen materiaalivirtojen kuin simuloinninkin aiheesta on kerätty vain oleellimmat lähteet työn aiheen ja rajausten kannalta.

Työn empiriaosiossa kartoitetaan ensin varaosavaraston vastaanotto-prosessin nykytilaa pääosin vapaamuotoisten haastatteluiden pohjalta. Nykytilan toteamiseksi palvelukeskuksen henkilöstöä on haastateltu kolmelta eri organisaatiotasolta: työntekijä-, lähiesimies- ja päällikkötasolta. Haastattelut on toteutettu jokaiselle organisaatiotasolle erikseen räätälöidyillä kysymyksillä. Kaikki haastattelupohjat löytyvät liitteestä 1. Vastaanotto-prosessin vaiheet on mallinnettu haastatteluiden sekä paikan päällä tehtyjen havaintojen pohjalta visuaaliseen ja luettavaan muotoon Microsoft Visiolla. Vastaanotto-prosessin vaiheet sekä niistä mallinnettu kuva esitellään myöhemmin tässä työssä kappaleessa 5.1 ja kuvassa 15.

Prosessia havainnoimalla ja kirjallisuuskatsausta hyödyntämällä on selvitetty, millaista dataa simulaatiomalliin pitäisi kerätä. Työssä datan keruu on jakautunut kolmeen vaiheeseen: 1) työvoimaresurssien ja työvaiheiden manuaaliseen aikamittaamiseen, 2) saapuvan tavaran rahtikirjaseurantaan ja 3) poikkeamatapausten määrän selvittämiseen järjestelmädatasta. Työntutkija on suorittanut aikamittaukset työvoimaresursseista ja työvaiheista sekuntikellon avulla. Työssä aikamittaukset jatkokäsitellään joko manuaalisesti keskiarvoiksi tai ExpertFitillä todennäköisyysjakaumiksi. ExpertFit on FlexSimin mukana tuleva jakauman sovittamisohjelmisto. Aikamittausten jatkokäsittely perustuu kirjallisuuteen, jonka mukaan otoksien jatkokäsittely jakaumiksi on välttämätön osa tapahtumapohjaista simulointia. Rahtikirjaseurannassa vastaanotto-prosessin kuorma-autojen purkajat ovat keränneet noin kolmen viikon ajalta dataa saapuvan tavaran määrästä. Datan keruu on tapahtunut täyttämällä paperista taulukkoa jokaisen saapuvan kuorma-auton osalta. Saapuvan tavaran luokittelu on tehty simulaatiomalliin sopivassa muodossa. Viimeisin datan keruukohde on ollut vastaanoton poikkeamatapausten määrän selvittäminen. Tähän liittyvä data on saatu kerättyä suoraan käytössä olevista järjestelmistä.

Empiriaosion merkittävin vaihe on simulointiprojektin läpivienti ja siinä noudatetaan kirjallisuudessa esitettyä simulointitutkimuksen läpiviennin mallia. Työssä vastaanotto-prosessi mallinnetaan todellisuutta vastaavaksi FlexSimillä. Simulaatiomallin rakentamiseen on tarvittu useita etäisyysmittauksia sekä hyllyjen ja tilojen kapasiteetilaskentaa. Etäisyydet on mitattu työntutkijan toimesta lasermittarin avulla ja kapasiteetit on laskettu manuaalisesti fyysisten kohteiden viereltä. Validoituun nykytilan simulaatiomalliin tehdään kehitystoimina volyymiskenaarioita ja layout-muutos. Volyymiskenaariot suoritetaan FlexSimin

Experimenter-toiminnolla ja layout-muutos tehdään mallin rakennetta muuttamalla. Tuloksien esittämistä varten ohjelmistoon on muodostettu työn kannalta tarpeellinen mittaristo, josta simuloinnin tuloksia on mahdollista seurata. Mallinnettavan systeemin kaikista yksityiskohdista on raportoitu työn liitteisiin, jotta tämän työn lukijalla on mahdollisuus mallintaa aivan samanlainen simulaatiomalli FlexSimillä.

Simulaatiomallin rakentamisen ja sen tulosten pohjalta pohditaan, onko simulointi soveltuva työkalu teollisuuspalveluiden käyttöön. Lisäksi työssä arvioidaan tämän simulointiprojektin pohjalta simulointiprojektien resurssitarpeita ja kannattavuutta pääosin taulukkolaskennan avulla. Resurssitarpeiden arviointia varten työssä on seurattu simulointiprojektiin kuluvaan aikaan tunnin tarkkuudella. Kannattavuuslaskelmat ovat suuntaa antavia arvioita, mutta ne auttavat havainnoimaan kustannusten suuruusluokkaa.

1.4 Työn rakenne

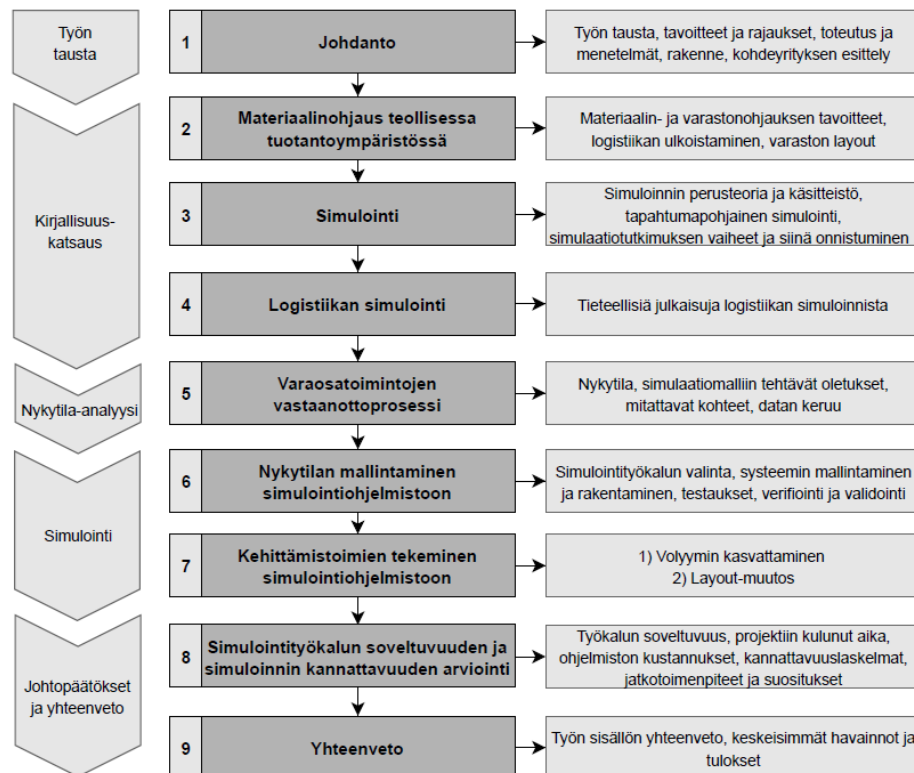
Työn raportti koostuu työn taustaa esittelevästä johdannosta, kolmesta teoriakappaleesta sekä kattavasta empiriaosiesta. Ensimmäinen kappale on johdanto, jossa lukijalle avataan työn taustaa ja läpivientä.

Kirjallisuuskatsauksessa (kappaleet 2-4) esitellään ensin lyhyesti materiaalin- ja varastonohjauksen teoriaa teollisesta tuotantoympäristöstä, minkä jälkeen avataan työn kannalta tärkeää teemaa: ulkoistamista. Mukaan on myös otettu varaston layoutiin liittyvää teoriaa, koska varastoinnin simulointiin liitetään usein erilaisia layout-muutoksia. Muuten kirjallisuuskatsauksessa keskitytään simuloinnin aiheeseen. Simuloinnista käydään ensin läpi sen perusteoriaa ja käsitteistöä, minkä jälkeen esitellään työn kannalta oleellinen simulaatiomallin tyyppi: tapahtumapohjainen simulointi. Näiden jälkeen käydään perusteellisesti läpi simulointitutkimuksen vaiheet sekä simuloinnissa onnistumiseen vaadittavia asioita. Lisäksi listataan simulointityökalun soveltuvuuskohteita ja esitellään tarkemmin kaksi käytännön sovelluskohdetta. Kirjallisuuskatsauksen viimeisessä osassa keskitytään logistiikan simuloinnin tieteellisten julkaisujen läpikäyntiin. Julkaisuja käydään kattavasti läpi, jotta simuloinnin sovelluskohteista saadaan kerättyä riittävästi tietoa työn tapaustutkimusta varten.

Nykytila-analyysi (kappale 5) on empirian ensimmäinen osa. Siinä perehdytään ensin tapaustutkimuksen vastaanottoprosessiin haastattelemalla varaosatoimintojen henkilöstöä, minkä jälkeen prosessi mallinnetaan luettavaan muotoon. Lopuksi selvitetään mitä dataa simulaatiomalli tarvitsee ja suoritetaan datan keruu.

Simulointi (kappaleet 6-7) on empirian toinen ja merkittävin osa. Siinä vastaanottoprosessi mallinnetaan kokonaisuudessaan FlexSimiin, minkä jälkeen kerätty data syötetään malliin ja mittarit otetaan muodostetaan validointia varten. Simulaatiota ajetaan, tuloksia analysoidaan ja mallin toimivuus ja luotettavuus tarkistetaan. Validoinnin jälkeen systeemille tehdään kaksi erilaista kehitystoimea: volyymin kasvattaminen ja layout-muutos.

Johtopäätökset ja yhteenveto (kappaleet 8-9) on empirian viimeinen osa. Siinä keskitytään arvioimaan simulointityökalun soveltuvuutta ja simuloinnin kannattavuutta tämän työn simulointiprojektin pohjalta, sekä esitetään jatkotoimenpiteitä ja suosituksia. Lopuksi työn sisältö tiivistetään yhteen ja lukijalle esitellään työn keskeisimmät havainnot ja tulokset. Raportin eteneminen ja sisältö on tiivistetty kuvaan 1.



Kuva 1. Työn rakenne

1.5 Kohdeyrityksen esittely

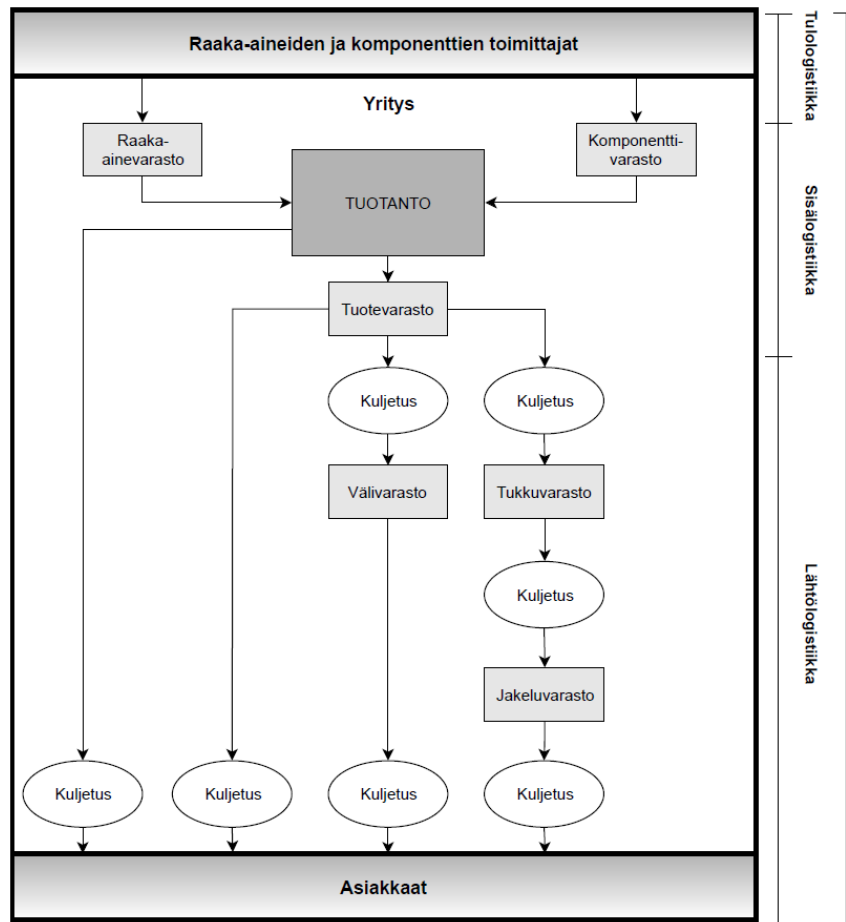
Transval on Suomen markkinajohtaja ulkoistuslogistiikassa. Yhtiöllä on toimintaa koko Suomen alueella ja sen pääkonttori sijaitsee Helsingissä. Yhtiössä työskentelee noin 4300 henkilöä ja yhtiö palvelee noin 500 asiakasta Suomessa ja Baltian maissa asiakkaiden omissa tiloissa; esimerkiksi varastoissa, terminaaleissa, teollisuudessa ja myymälöissä. Yhtiön toiminnassa muutetaan asiakkaiden sisälogistiikan kiinteitä kuluja muuttuviksi kustannuksiksi ja tarjotaan asiakkaille joustavuutta, laatua sekä kustannussäästöjä. Yhtiön palvelutarjontaan kuuluvat toimitusketjuratkaisut kuljettamisesta varastointiin, asiakkaiden tiloissa tapahtuvat sisälogistiikan ratkaisut ja logistiikan ammattiosaajien henkilöstöpalvelut. (Transval 2020)

2 MATERIAALINOHJAUS TEOLLISESSA TUOTANTOYMPÄRISTÖSSÄ

Tehokas teollinen tuotanto tarvitsee tehokkaan ja toimivan logistiikan ympärilleen. Oli sitten kyse raaka-aineiden, tuotantovälineiden, tarvikkeiden tai komponenttien valmistamisesta, logistiikan tehtävinä on varmistaa tarvittavien materiaalien oikea-aikainen saaminen tuotantoa varten, tehostaa tuotannon sisäisten tavaravirtojen hallintaa ja ohjausta sekä hoitaa valmiiden tuotteiden varastointi ja siirto ketjussa seuraavaan vaiheeseen. Teollisessa tuotantoympäristössä puhutaan usein tulologistiikasta, sisälogistiikasta ja lähtölogistiikasta. Näiden kaikkien osa-alueiden hyvä koordinointi yhdessä tuotannon kanssa on tarpeen tuotannon sujuvuuden ja tehokkuuden takaamiseksi. (Karrus 2003, s. 72)

2.1 Teollisuusyrityksen materiaalivirrat

Yrityksen perinteinen omaan tuotantoon ja tuotantotapaan vahvasti perustuva materiaalitalousajattelu kohdistaa päähuomion yrityksen sisälogistiikkaan, jolloin sisälogistiset toiminnat ja päätökset keskittyvät pitkälti tuotannon ympärille. Samaan aikaan varastoinnin tärkeys kasvaa tuotannon häiriöttömyyden takaamiseksi. (Karrus 2003, s. 21-22) Vielä vuonna 2003 Kaij E. Karrus on kirjoittanut, että markkinoiden, jakelukanavien ja logististen palveluyritysten kehittämättömyys on ajanut yritykset rakentamaan omat jakelujärjestelmänsä monivaiheisine varastoineen (Karrus 2003, s. 21-22). Tätä perinteistä materiaalitalousajattelun mukaista kuvausta teollisuusyrityksen materiaalivirroista on havainnollistettu kuvaan 2. Kuvasta voidaan havaita, kuinka tuotantoyrityksen toimintaan sisältyy materiaalivirtojen hallinta aina raaka-aineiden ja komponenttien vastaanotosta lopputuotteiden kuljettamiseen asiakkaalle saakka.



Kuva 2. Perinteinen materiaalitalousajattelun mukainen kuvaus teollisuusyrityksen materiaalivirroista (mukaillen Karrus 2003, s. 21; Sakki 2003, s. 24)

Vajaaseen kahteenkymmeneen vuoteen tilanne on kuitenkin muuttunut reilusti ja yritysten ydintoimintojen ulkopuolisten toimintojen ulkoistamisesta on noussut kasvava trendi. Tämä vaikuttaa merkittävästi siihen, mikä yritys vastaa mistäkin osasta tuotantoyrityksen materiaalivirtoja. Lisää ulkoistamisesta kappaleessa 2.3.

2.2 Materiaalin- ja varastonohjauksen tavoitteet teollisuudessa

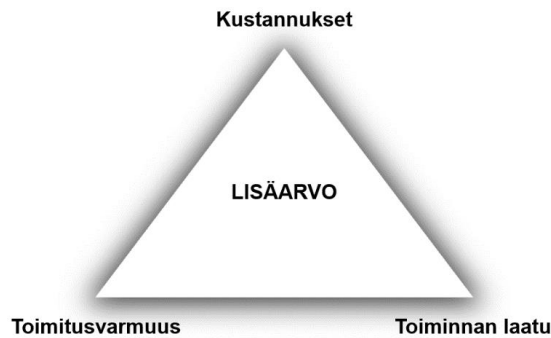
Materiaali-, puolivalmiste- ja lopputuotevarastojen palvelutaso muodostuu tuotteiden saatavuudesta sekä toimitusajan pituudesta. Materiaaliohjauksen tavoitteena on ylläpitää haluttua palvelutasoa, eli yrityksen tulee varmistaa hankittujen raaka-aineiden ja osien saatavuus sekä myytävien tuotteiden toimituskyky. Samaan aikaan materiaaliohjauksen tavoitteena on toteuttaa hankinnat tai oma valmistus mahdollisimman optimaalisesti niin, että

vaihto-omaisuudesta ja niiden hankinnasta aiheutuvat kulut jäävät mahdollisimman pieniksi. (Haverila, Uusi-Rauva, Kouri & Miettinen 2009, s. 443; Sakki 2003, s. 71) Raaka-aineita kuitenkin on hankittava aina riittävästi, ettei tuotanto joudu seisomaan puutetilanteiden takia (Gourdin 2001, s. 180). Tiivistetysti voidaan sanoa, että materiaalinohjauksella tavoitellaan työn, pääoman ja tilankäytön tehokkuutta (Haverila et al. 2009, s. 443; Sakki 2003, s. 71).

Varastot ovat tärkeässä asemassa kysynnän ja tarjonnan vaihtelujen lieventämisessä (Khan, Dweiri & Chaabane 2016). Esimerkiksi tietyt raaka-aineet voivat saapua tehtaalle niin suurina erinä, että niitä käytetään tuotannossa pitkän aikaa. Vastaavasti joitain tuotteita voidaan valmistaa etukäteen varastoon toimitusta tai tilauksia odottamaan. Raaka-ainevarastojen tehtävänä on joko varmistaa edullinen hankintahinta tai varmistaa tuotannon häiriöttömyys. (Karrus 2003, s. 77) Tuotannon pysähtymisellä raaka-ainepuutteiden vuoksi voi olla todella korkeat kustannukset (Gourdin 2001, s. 180).

Pääsääntöisesti varastointi ei lisää tuotteen arvoa, vaan aiheuttaa vain kustannuksia. Taloudellisesta näkökulmasta logistiikan tavoite on tuottaa asiakkaalle lisäarvoa mahdollisimman alhaisilla kustannuksilla, joten ylimääräisistä varastoista on vain haittaa. (Hokkanen & Karhunen 2014, s. 125, 200) Varastojen määrä on siis syytä seurata (Khan et al. 2016).

Varastonohjauksella tavoitellaan tasapainoa kustannusten, toimituskyvyn ja laadun kesken siten, että toiminta tuottaisi parhaan mahdollisen lisäarvon sekä asiakkaille että yrityksille (kuva 3). Kuten on mainittu, teollisessa tuotantotoiminnassa kustannustaso pyritään pitämään mahdollisimman alhaisena. Alhaiset kustannukset eivät saa kuitenkaan vaikuttaa toimitusvarmuuteen negatiivisesti. Jotta toimitusvarmuus saavutetaan alhaisilla kustannuksilla, toiminnan on oltava laadukasta. Näissä kolmessa tekijässä onnistuminen tuottaa asiakkaalle haluttua lisäarvoa. (Hokkanen & Karhunen 2014, s. 201)



Kuva 3. Varastonohjauksen tuoman lisäarvon rakenne (mukaillen Hokkanen & Karhunen 2014, s. 201)

Lisäarvon tuottamisella voidaan laukaista yrityksen kannalta tuottava ketjureaktio: mitä suuremman lisäarvon asiakas saa tuotteesta, sitä halukkaampi hän on sen ostamaan. Tämä puolestaan lisää tuotteen kysyntää, jonka avulla yritys saa taloudellista kilpailuetua. Varastonohjaus saatetaan helposti mieltää toisarvoiseksi toiminnaksi, joka aiheuttaa vain kustannuksia. Varmaa on kuitenkin se, että toimivan materiaalinohjauksen avulla on mahdollisuus saavuttaa joustava ja tehokkaasti virtaava tuotanto. Siksi materiaalinohjauksen olennaisimpia toimintoja on juuri varastonohjaus. (Hokkanen & Karhunen 2014, s. 201)

2.3 Logistiikan ulkoistaminen

Logistiikan ulkoistaminen on merkittävä aihe tämän työn kannalta, koska työn toimeksiantajan päätoimialaa on ulkoistettujen logistiikkapalvelujen tuottaminen, ja työn tapaustutkimus kohdistuu ulkoistettuun teollisen tuotantoyrityksen varaosavarastointiin. Logistiikkapalvelujen ulkoistamisesta on kirjoitettu paljon ja laajasti, mutta vain työn kannalta oleellisimpia asioita on koottu tähän kappaleeseen.

Yleisesti logistiikan ulkoistamisella tarkoitetaan sitä, että kuljettaminen, varastointi, tavarankäsittely ja niitä ohjaava tietojenkäsittely siirretään näiden palvelujen tuottamiseen erikoistuneen yrityksen hoidettavaksi (Sakki 2003, s. 208). Kustannusten pienentämisen tavoite on johtanut logististen toimintojen ulkoistamiseen, jolloin kaikesta tuottamattomasta toiminnasta pyritään eroon yritysten keskittyessään ydinosaamiseensa (Ritvanen, Inkiläinen, Von Bell & Santala 2011, s. 25). Yrityksillä on mahdollisuus ulkoistaa toimintojaan eri yrityksille riippuen heidän palvelutarjonnastaan. Tuotantoyritys voi esimerkiksi hoitaa itse tulo-

ja sisälogistiikkaa samalla kun toinen yritys hoitaa tehtaan lähtölogistiikkaa ja kolmas kuljetuksia ja jakelua.

Nykyaikaisten logistiikkapalveluyrityksien luonne on edistynyt ulkoistamisessa. Asiakasyritykset odottavat kustannustehokkaiden palvelujen lisäksi myös lisäarvoa ja näin ollen logistiikkapalveluyritykset ovat laajentaneet varastointi- ja lähetyspalveluista esimerkiksi pakkaamiseen ja viimeisteleviin palveluihin. Lisäksi logistiikkapalveluyritykset voivat kehittää asiakkaan toimitusketjua erilaisten optimointi- ja simulointityökalujen avulla. Käytettävissä on valmiita, kaupallisia työkaluja sekä räätälöityjä taulukkolaskennan simulointimalleja. Esimerkiksi Excelillä voidaan optimoida varasto- ja kuljetuskustannuksia. (Ritvanen et al. 2011, s. 180)

Sakin (2003, s. 208) mukaan logistiikan ulkoistamisesta asiakkaan saama perushyöty voidaan yksinkertaisimmillaan tiivistää lauseeseen: ”Ulkoistamalla muutetaan kiinteät henkilöstö- ja tilakustannukset volyymin mukaan muuttuviksi.” Logistiikkapalveluyrityksen keskeinen menestystekijä on kyky hallita omia resursseja suhteessa asiakkaan muuttuviin volyymeihin ja käyttää henkilöstöä tehokkaasti asiakkaiden eri toiminnoissa.

Ulkoistamisen seurauksena logistiikkapalvelua tarjoava yritys toimii osana asiakkaan organisaatiota ja päinvastoin. Organisaation kehittäminen on aina yhteistyötä, jossa kokonaisuus on otettava huomioon. Logistiikan kehittämisen tarvitaan molempia osapuolia ja tällöin kommunikaation sekä tiedonkulun toimivuus nousevat tärkeään rooliin. (Sakki 2003, s. 212)

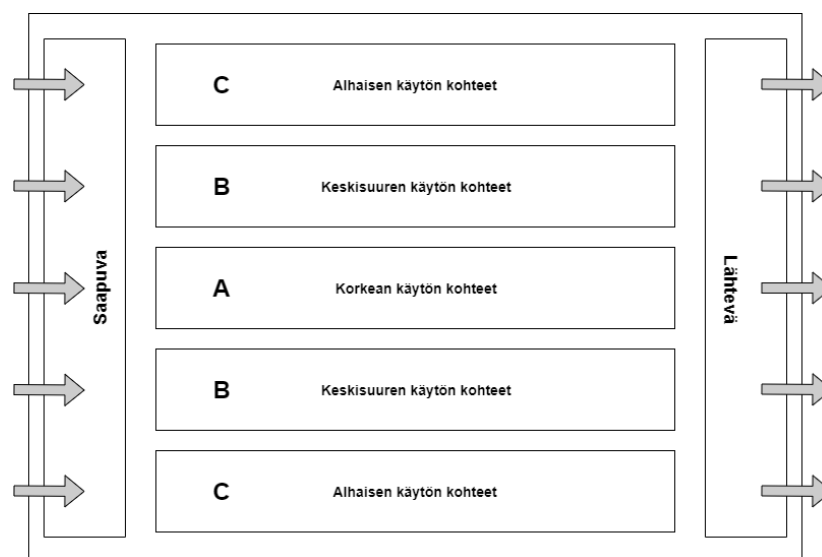
2.4 Varaston layout

Yksi tärkeimmistä päätöksistä varastoinnissa on varaston layout. Layout kuvastaa hyllyjen, lastaus- ja purkualueiden, laitteiden, toimistojen, huoneiden ja kaikkien muiden tilojen fyysistä järjestystä. Huono layout-suunnittelu johtaa tehottomaan tilankäyttöön ja sillä on merkittävä vaikutus koko varaston toiminnan tehokkuuteen. (Waters 2003, s. 292) Tehoton tilankäyttö on nykyään monien yritysten huolenaihe (Clements, Sweeney, Tremont, Muralidhara & Kuhl 2016). Jos usein käytetty tavara varastoidaan kaukana vastaanotto- ja lähetysalueista, aikaa

kuluu hukkaan joka kerta, kun yksikkö viedään varastoon tai otetaan varastosta (Waters 2003, s. 292). Varaston läpimenon ja tuottavuuden lisäämiseksi on siis vähennettävä matka-aikaa ja kosketuspisteitä sekä samalla myös pyrittävä maksimoimaan tilan käyttö (Richards 2011, s. 150).

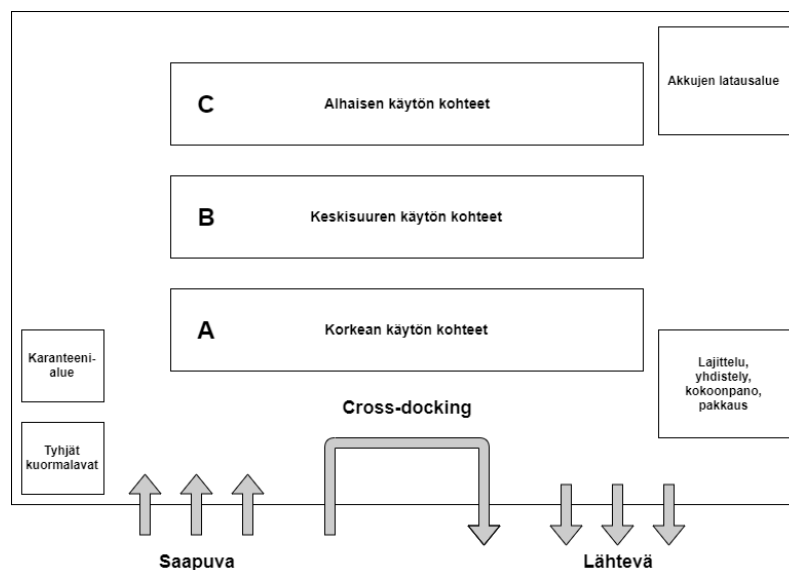
Varaston layout-suunnittelussa otetaan huomioon myös varastoitava tuotevalikoima, varastointitekniikka, tontin ja rakennuksen koko sekä muoto, ja tavaravirtauksen periaate. Nämä edellä mainitut vaikuttavat sekä varastoprosessin suunnitteluun että varaston sisäisen layoutin muodostamiseen. Toimitusajoilla on vaikutusta varaston kokoon ja liian pienet toimintatilat aiheuttavat turhaa tavaran siirtelyä ja lisäävät virheriskiä. Yksittäiset tuotteet puolestaan vaikuttavat siihen, millaiset säilytystilat ja kalusteet varastossa tulee olla, ja millaiset käytävät ja sijoittelukorkeudet vaaditaan. (Ritvanen et al. 2011, s. 84-85) Lisäksi varaston (uudelleen)suunnittelussa on otettava huomioon yrityksen todennäköinen kasvu seuraavien 5-10 vuoden aikana sekä mahdolliset muutokset tuoteprofiilissa ja myyntimäärissä (Richards 2011, s. 150).

Kirjallisuudessa (muun muassa Richards 2011 ja Ritvanen et al. 2011) layoutit jaetaan yleisiin perustyyppiltään kahteen: läpivirtaus ja u-virtaus (kuvat 4 ja 5), joista u-virtaus on suositumpi. Kuviin on lisäksi lisätty ABC-luokittelut, jotka perustuvat varastoitavien tuotteiden käyttömääriin. Alhaisen käytön tavarat varastoidaan kauemmaksi, ja päinvastoin.



Kuva 4. Läpivirtauksen periaate (mukaiillen Richards 2011, s. 160)

Läpivirtaukseen (kuva 4) verrattuna u-virtauksessa (kuva 5) vastaanotto ja lähetys ovat samalla varaston puolella, mikä varmistaa laiturin korkean käytön, helpottaa cross-docking-toimintaa ja vaatii pienemmän tonttitilan (Richards 2011, s.159). Cross-docking tarkoittaa terminaaleissa tai logistiikkakeskuksissa tapahtuvaa toimintaa, jossa yhdistellään monilta eri toimittajilta tulevia kuormia (Ritvanen et al. 2011, s. 194). U-virtauksessa nopeimmin liikkuvat tavarat ovat lähimpänä lähetyspaikkaa, mikä varmistaa mahdollisimman lyhyen matkan ja mahdollisuuden lastauksen ja purkamisen yhdistämiseen (Richards 2011, s.159).



Kuva 5. U-virtauksen periaate (mukaiillen Richards 2011, s. 160)

Kun varastointi-, hylly- ja reittiratkaisut on suunniteltu karkealla tasolla, on syytä pohtia, minne lisäarvopalveluiden tuottamiset sijoitetaan. Lisäarvopalveluita ovat esimerkiksi etiketöinti, kutistekalvopakkaaminen ja mainospaikkaaminen. Tämän alueen on oltava lähellä sekä poiminta- että lähetysaluetta, jotta vältetään liialliselta kulkemiselta ja käsittelyltä. Ylipäättään tuotteiden sijoittaminen sopivimpiin sijanteihin vähentää matkaetäisyyksiä ja työntekijöiden rasituksia, minkä seurauksena tuottavuus paranee ja kokonaiskustannukset vähenevät. (Richards 2011, s. 70-72)

3 SIMULOINTI

Perinteiset logistiikka-analyysit on laskettu suurelta osin riippumattomien algoritmien ja laskentataulukoiden avulla, missä tarkastelu on kapeaa ja keskittyy pieneen joukkoon muuttujia. Ei-simulointiin perustuvat tekniikat eivät tyypillisesti ota asianmukaisesti huomioon logistiikkayrityksen kaikkien prosessien vaikutuksia ja keskinäistä riippuvuutta. (Ingraham, Solomon & Lowe 2005) Näihin haasteisiin vastaa simulointi. Sen avulla on mahdollisuus hallita suurtakin monimutkaisuutta. Tässä kappaleessa käydään läpi simuloinnin teoriaa syvällisemmin ja esitellään simuloinnin sovelluskohteita.

3.1 Yleistä simuloinnista

Simuloinniksi kutsutaan menetelmää, jossa erilaisten reaali maailman laitteiden tai prosessien toimintaa jäljitellään ajan kuluessa. Tarkastelun kohteena olevaa laitetta tai prosessia kutsutaan systeemiksi, ja jotta sitä voidaan tutkia tieteellisesti, sen toiminnasta on usein tehtävä joukko oletuksia. Nämä oletukset, jotka ovat yleensä matemaattisten tai loogisten suhteiden muodossa, muodostavat simuloitavan mallin, jota käytetään ymmärtämään vastaavan systeemin käyttäytymistä ajan kuluessa. (Law 2015, s. 1) Todellisen prosessin täydellinen jäljittäminen on useimmissa tapauksissa hankalaa, joten simuloinnissa pyritään luomaan yksinkertaistettu malli systeemin ominaisuuksista (Hokkanen & Karhunen 2014, s. 214). Huolimatta siitä, onko simulaatio tehty käsin vai tietokoneella, systeemin historia luodaan simulaatioon keinotekoisesti, jotta johtopäätöksiä todellisen systeemin ominaisuuksista voidaan tehdä (Banks et al. 2005, s. 3).

Joissakin tapauksissa voidaan luoda malli, joka on riittävän yksinkertainen ”ratkaistavaksi” matemaattisilla menetelmillä. Tällainen ratkaisu voidaan löytää käyttämällä differentiaalilaskentaa, todennäköisyysteoriaa, algebrallisia menetelmiä tai muita matemaattisia tekniikoita. Ratkaisu koostuu yleensä yhdestä tai useammasta numeerisesta parametrasta, joita kutsutaan systeemin suorituskyvyn mittareiksi. (Banks et al. 2005, s. 3) Kun matemaattisin keinoin hankitaan tarkkaa tietoa, toimintaa kutsutaan analyttiseksi ratkaisuksi (Law 2015, s. 1). Monet reaali maailman systeemit ovat kuitenkin niin monimutkaisia, että niiden malleja on käytännössä mahdotonta ratkaista matemaattisesti. Näissä tapauksissa

numeerista, tietokonepohjaista simulointia voidaan käyttää jäljittelemään systeemin käyttäytymistä ajan myötä. Simuloinnissa dataa kerätään ikään kuin havainnoitaisiin todellista systeemiä. Tätä simuloinnin tuottamaa dataa käytetään systeemin suorituskyvyn mittareiden sekä systeemin todellisten ominaisuuksien arvointiin. (Banks et al. 2005, s. 3)

Kun malli on kehitetty ja validoitu, sitä voidaan käyttää tutkimaan monenlaisia ”mitä jos”-kysymyksiä reaali maailman systeemistä (Banks et al. 2005, s. 3). Simuloinnin suosio perustuu sen havainnollisuuteen ja edullisuuteen, koska systeemin mahdollisia muutoksia on mahdollista simuloida etukäteen, jotta voidaan ennustaa niiden vaikutusta systeemin suorituskykyyn (Hokkanen & Karhunen 2014, s. 215). Simulointia voidaan käyttää myös systeemien tutkimiseen suunnitteluvaiheessa ennen tällaisten systeemien rakentamista. Siten simulaatiomallintamista voidaan käyttää sekä analysointityökaluna ennustamaan muutoksia nykyisiin systeemeihin että suunnittelutyökaluna ennustamaan uusien systeemien suorituskykyä vaihtelevissa olosuhteissa. (Banks et al. 2005, s. 3) Lisäksi monimutkaisten systeemien kohdalla tehty käytännön kokeilu ja erehdys tulee yleensä arvokkaintakin simulaatioajoa kalliimmaksi (Hokkanen & Karhunen 2014, s. 215).

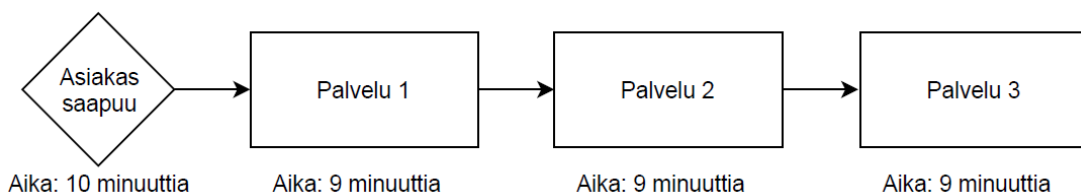
Law (2015, s. 1) kertoo yleisesimerkin simulaation käytöstä tuotantoyrityksessä. Kyseinen yritys suunnittelee rakentavansa suuren laajennuksen yhdelle tehtaistaan, mutta ei ole varma, voiko tuottavuuden mahdollisella kasvulla perustella aiheutuvat rakennuskustannukset. Ei varmastikaan olisi kustannustehokasta rakentaa laajennusta ja poistaa se myöhemmin, jos laajennus ei osoittaudukaan toimivaksi tai kannattavaksi. Huolellisella simulointitutkimuksella voidaan kuitenkin tutkia tehtaan toimintaa nykyisellään, ja myös millaista toiminta olisi, jos tehdasta laajennettaisiin. Saatuja tuloksia voidaan tämän jälkeen hyödyntää päätöksenteossa.

Lawin (2015, s. 2) mukaan simuloinnin laajempaan hyväksymiseen ja hyödyllisyyteen on kuitenkin liittynyt useita esteitä ajan kuluessa. Ensinnäkin suurten systeemien tutkimiseen käytetyillä malleilla on taipumusta olla hyvin monimutkaisia, ja tietokoneohjelmien kirjoittaminen niiden suorittamiseksi voi olla todella haastava tehtävä. Tätä tehtävää on kuitenkin huomattavasti helpottanut viime vuosina kehitetyt erinomaiset ohjelmistot, jotka tarjoavat automaattisesti monia ominaisuuksia, joita pitäisi muuten ohjelmoida käsin simulaatiomallia varten. Toinen ongelma monimutkaisten systeemien simuloinnissa on, että

niiden läpiviennin laskeminen vie tietokoneelta paljon aikaa. Tästäkin ongelmasta on jo osittain päästy irti, koska tietokoneista on tullut nopeampia ja edullisempia. Tämä mahdollistaa eri skenaarioiden nopean suorittamisen (Banks et al. 2005, s. 6). Lopuksi simulointitutkimusten osalta on havaittu, että ne koostuvat lähinnä heuristisen mallin luomisesta, ohjelmoinnista ja yhdestä ohjelman läpiajamisesta ”vastauksen” saamiseksi. Päätelmien tekeminen tutkittavasta kohteesta on jäänyt usein taka-alalle, ja tämä on johtanut väärin johtopäätösten tekemiseen. (Law 2015, s. 2)

Systeemien mallintamisessa on huomioitava niiden luonne. Mallintamiseen liittyy oleellisesti vaihtelevuus, keskinäinen riippuvuus ja monimutkaisuus. Ennakoitavalla vaihtelevuudella tarkoitetaan esimerkiksi sitä, että tietyn työpisteen työntekijämäärää muutetaan vastaamaan muuttuvaa tilannetta tai tuotanto pysäytetään suunnitellusti vuosihuollon ajaksi. Vaihtelevuus voi kuitenkin olla myös ennalta arvaamatonta. Tällaista on esimerkiksi potilaiden saapumismäärä ensiapuun tai laitteiden rikkoutuminen joustavassa solutuotannossa. Molempia vaihtelevuuden muotoja nähdään useimmissa systeemeissä. (Robinson 2004, s. 4)

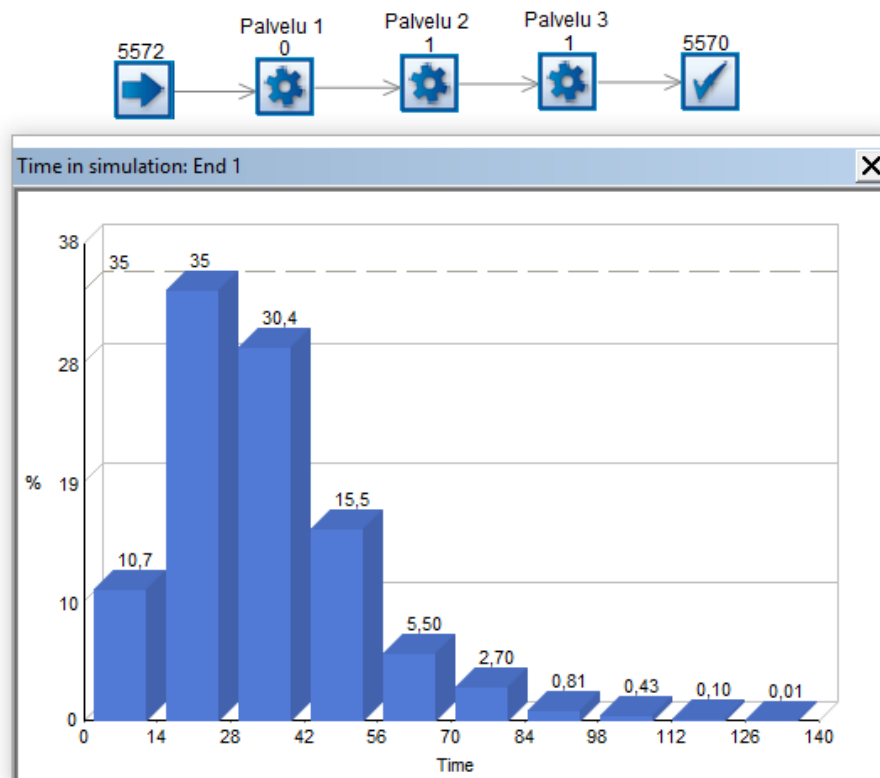
Keskinäisellä riippuvuudella tarkoitetaan sitä, etteivät systeemin komponentit toimi erillään vaan vaikuttavat toisiinsa. Systeemin yhden osan muutos johtaa muutokseen systeemin toisessa osassa. Esimerkkinä kuvan 6 mukainen palveluprosessi, jossa asiakkaita saapuu systeemiin tasan 10 minuutin välein, ja jokainen palveluvaihe kestää tasan 9 minuuttia. Tällöin jokainen asiakas viettää systeemissä tasan 27 minuuttia. (Robinson 2004, s. 5)



Kuva 6. Esimerkki palveluprosessista ja sen vaiheiden kestoista (mukailen Robinson 2004, s. 5)

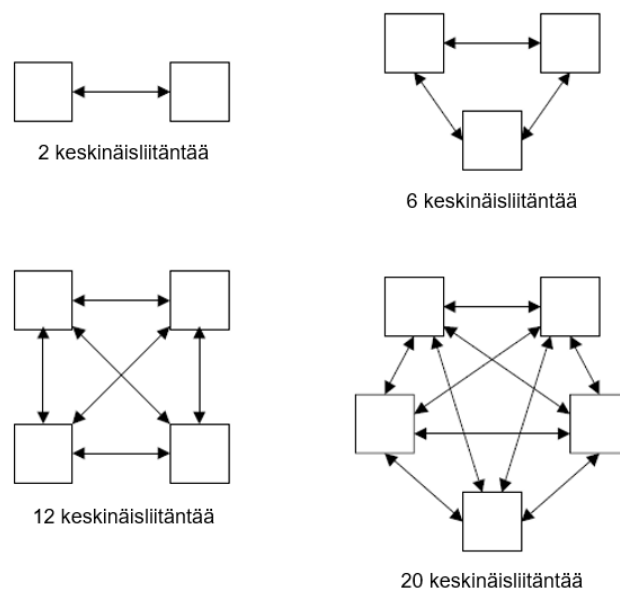
Keskinäisten riippuvuuksien vaikutuksia voi kuitenkin olla vaikeaa ennustaa, etenkin jos systeemissä esiintyy vaihtelevuutta. Edellisen kuvan esimerkissä keskimääräinen systeemissä vietettävä aika on aina tasan 27 minuuttia, kun palveluiden välisiä kulkemisia ei huomioida. Tilanne on kuitenkin toinen, jos systeemissä esiintyy vaihtelevuutta. Jos kaikki edellä mainitut

arvot ovatkin keskiarvoja, eli asiakkaita saapuu systeemin keskimäärin 10 minuutin välein ja jokainen palveluvaihe kestää keskimäärin 9 minuuttia, hankaloituu systeemissä vietetyn ajan hahmottaminen varsinkin, kun vaihtelevuuden vaihteluväli on tuntematon. Lisäksi jonojen syntyminen tulee ottaa huomioon tässä tilanteessa. Suurin osa ihmisistä arvioi systeemissä vietettävän ajan kestoksi edelleen 27 minuuttia tai hieman pidempään, mutta jos vaihteluväli oletetaan tyypilliseksi, eli eksponenttijakautuneeksi, todellisuudessa systeemissä keskimääräisesti vietettävän ajan vaihteluväli on lähellä 150 minuuttia (Robinson 2004, s. 5). Väite näin suuresta vaihteluvälistä näinkin yksinkertaisessa prosessissa voi herättää epäilyksen, joten väite on syytä tarkastaa käytännössä. Kuvassa 7 on nähtävillä edellä mainittu prosessi ja SIMUL8-simulointiohjelman tulokset eksponenttijakautuneilla lähtötiedoilla. Ohjelmalla simuloitiin 5572 asiakkaan saapuminen malliin ja lopputuloksena asiakkaan systeemissä vietettävän ajan vaihteluväli oli 0 ja 140 minuutin välillä. Keskiarvoisesti asiakas viettää tässä systeemissä 32,85 minuuttia. Kuten voidaan huomata, vaihtelevuuden ja keskinäisen riippuvuuden yhdistetty vaikutus systeemissä tekevät kokonaissuorituskyvyn ennustamisesta todella hankalaa.



Kuva 7. Systeemissä vietettävän ajan vaihteluvälin simulointi SIMUL8-ohjelmalla

Kuten aiemmin on jo mainittu, nykyaikaiset systeemit voivat olla hyvinkin monimutkaisia ja moniulotteisia. Konepajat ovat hyvä esimerkki tähän, koska niissä osat virtaavat useiden koneiden lävitse tuotantoprosessin aikana. Kun prosessointi saadaan valmiiksi yhdellä koneella, tuote siirretään seuraavalla koneelle riippuen tuotteesta ja vaadittavasta prosessista. Mitä enemmän konepajassa on koneita, sitä enemmän on mahdollisia keskinäisiä riippuvuuksia eli keskinäisliitännöitä. Keskinäisliitännöjen määrä kasvaa huomattavasti nopeammin kuin koneiden lukumäärä (kuva 8). Keskinäisliitännöjen kokonaismäärä voidaan laskea kaavan $n(n-1)$ mukaan, jossa n kuvastaa koneiden lukumäärää konepajassa. (Robinson 2004, s. 6)



Kuva 8. Keskinäisliitännöjen määrän kasvu (mukaillen Robinson 2014, s. 6)

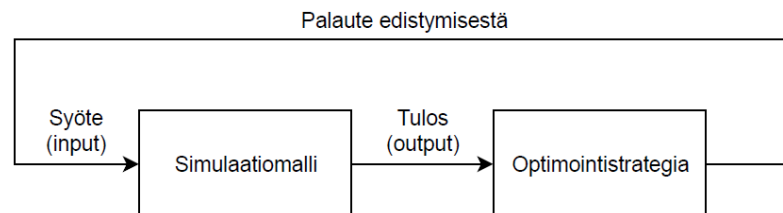
Juuri simulaatiomallit ovat kykeneviä esittämään vaihtelevuutta, keskinäistä riippuvuutta sekä monimutkaisuutta. Seurauksena on, että simuloinnilla on mahdollista ennustaa systeemin suorituskykyä, vertailla vaihtoehtoisia systeemimalleja ja määrittää vaihtoehtoisten käytäntöjen vaikutusta systeemin suorituskykyyn. (Robinson 2004, s. 7)

3.2 Simulointi vs. optimointi

Simulointi ei ole optimointia. Optimoinnissa ratkaistaan tai ainakin lähestytään optimaalista ratkaisua määriteltyjen parametrien sisällä. Optimointi keskittyy usein vain rajattuun määrään muuttujia, koska muuten siitä tulee laskennallisesti raskasta todella nopeasti. Näin ollen

optimaalinen ratkaisu voi perustua suhteellisen pienen muuttujamäärän analysointiin. Simulaatioajat voivat kyllä tarjota optimaalisen ratkaisun, mutta käyttäjä ei tiedä sitä. (Gourdin 2001, s. 130)

Carson ja Maria (1997) ovat esitelleet simulaation optimointimallin (kuva 9), jossa simulaation optimaalista ratkaisua haetaan arvioimalla tietyillä syötteillä saatuja tuloksia, ja tutkimalla kuinka tuloksista saataisiin vieläkin parempia. Tämän prosessin tavoitteena on löytää parhaat syötearvot kaikista mahdollisuuksista ilman, että arvioidaan kaikkia yksitellen. Prosessin tavoitteena on myös minimoida resurssien käyttöä samalla kun maksimoidaan tiedonsaanti simulaatiosta.



Kuva 9. Simulaatiomallin optimointimalli (mukaihen Carson & Maria 1997)

3.3 Systemin komponentit

Ymmärtääkseen ja analysoidakseen systeemiä, on määriteltävä joukko systeemiin liittyviä termejä. Entiteetti on tarkastelun kohde systeemissä. Attribuutti on entiteetin ominaisuus. Aktiviteetti kuvaa määritellyn pituista ajan kestoa. Systemin tila määritellään siten, että se on tarpeellinen kokoelma muuttujia, joilla voidaan kuvata systeemi missä ajankohdassa tahansa. Tapahtuma määritellään hetkellisenä tapahtumana, joka saattaa muuttaa systeemin tilaa. (Banks et al. 2005 s. 8-9) Taulukossa 1 on esitelty erilaisia systeemejä ja komponentteja.

Taulukko 1. Esimerkkejä systeemeistä ja komponenteista (mukaihen Banks et al. 2005, s. 10)

<i>Systemi</i>	<i>Entiteetit</i>	<i>Attribuutit</i>	<i>Aktiviteetit</i>	<i>Tapahtumat</i>	<i>Tilamuuttujat</i>
Metro	Matkustajat	Lähtöpaikka, Kohde	Matkustaminen	Saapuminen asemalle, Saapuminen kohteeseen	Odottavien matkustajien määrä jokaisella asemalla

<i>Tuotanto</i>	Koneet	Nopeus, Kapasiteetti, Vikatiheys	Hitsaaminen, Näytteenotto	Vikaantuminen	Koneiden tila (esim. varattu)
<i>Varasto</i>	Varasto- yksikkö	Kapasiteetti	Varastostaotto	Kysyntä	Varastotasot

3.4 Simulaatiomallien tyypit

Simulaatiomallin luomisessa on ymmärrettävä käsitteet systeemi ja sen raja. Systeemi koostuu niistä tekijöistä, joilla on jotain vaikutusta tavoiteltuun kokonaisuuteen. Esimerkiksi kappaletavaratuotannossa koneet, komponentit ja työntekijät muodostavat yhdessä tuotetta valmistavan tuotantolinjan. Systeemiympäristöllä tarkoitetaan systeemin ulkopuolisia tekijöitä, jotka ovat vuorovaikutuksessa systeemin kanssa. Systeemi ja sen ympäristö erotetaan toisistaan rajaamalla. Rajauksen laajuus riippuu luonnollisesti tarkasteltavan systeemin laajuudesta. (Banks et al. 2005 s. 9; Hokkanen & Karhunen 2014, s. 216)

Kirjallisuudessa (muun muassa Banks et al. 2005, Law 2015, Hokkanen & Karhunen 2014, Robinson 2004) systeemit ja niiden simulaatiomallit luokitellaan kolmeen eri ulottuvuuteen:

1. Staattinen vs. Dynaaminen
2. Deterministinen vs. Stokastinen
3. Diskreetti vs. Jatkuva

Staattinen simulaatiomalli on systeemin esitys tietyssä ajankohtana ja sitä voidaan käyttää esittämään systeemiä, jossa ajalla ei ole merkitystä. Esimerkkinä staattisesti simulaatiosta voidaan käyttää tiettyjä Monte Carlo-malleja. (Law 2005, s. 5)

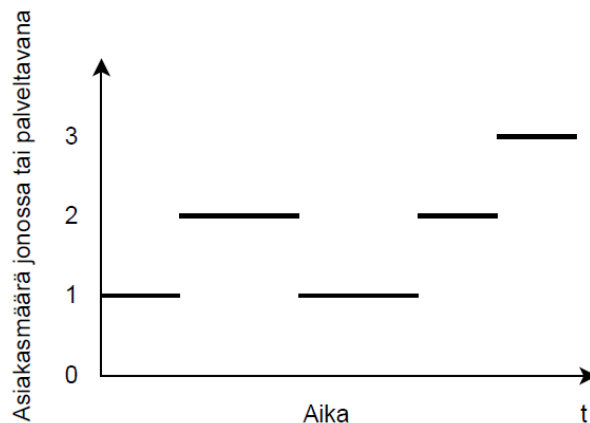
Dynaaminen simulaatiomalli edustaa puolestaan systeemiä sellaisena kuin se muuttuu ajan myötä. Pankin simulointi klo 9:00–16:00 on esimerkki dynaamisesta simulaatiosta. (Banks et al. 2005, s. 11)

Deterministinen simulaatiomalli ei sisällä mitään satunnaismuuttujia. Deterministisissä malleissa tunnetut syötteet johtavat yksikäsitteisiin tuloksiin. (Banks et al. 2005, s. 11) Esimerkiksi kemiallista reaktiota kuvaava monimutkainen ja analyttisesti hankala differentiaaliyhtälöiden systeemi voi olla deterministinen systeemi. Monia systeemeitä on

kuitenkin mallinnettava siten, että niissä on ainakin joitain satunnaismuuttujia. (Law 2015, s. 6)

Stokastinen simulaatiomalli sisältää syötteenä yhden tai useamman satunnaismuuttujan. Satunnaiset syötteet johtavat satunnaisiin tuloksiin. Koska tulokset ovat satunnaisia, niitä voidaan käyttää vain arvioina mallin todellisista ominaisuuksista. (Banks et al. 2005, s. 11-12) Suurin osa jonotus- ja varastosysteemeistä on mallinnettu stokastisesti (Law 2015, s. 6). Esimerkiksi pankin simuloinnin syötteisiin sisältyy yleensä satunnaisia saapumis- ja palveluaikoja, joten siksi stokastisen simulaation tulos, eli odottavien ihmisten keskimääräinen lukumäärä ja asiakkaan keskimääräinen odotusaika, on käsiteltävä tilastollisina arvioina systeemin todellisista ominaisuuksista (Banks et al. 2005, s. 12).

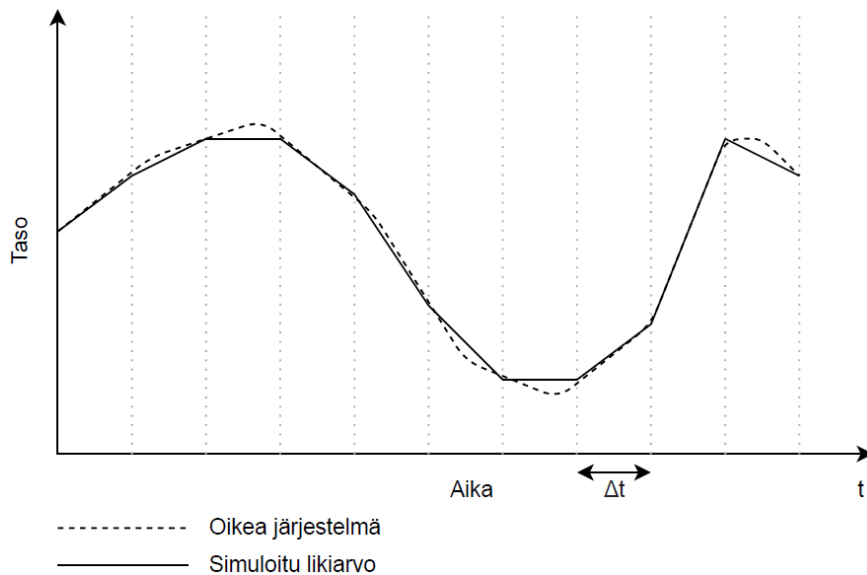
Diskreetin systeemin simulaatiomalli on sellainen, jossa tilamuuttujat muuttuvat välittömästi erillisissä ajankohdissa (Law 2015, s. 3). Kuvassa 10 on esimerkki pankin diskreetistä systeemistä. Esimerkissä tilamuuttujana on pankin asiakkaiden lukumäärää, mikä muuttuu vain asiakkaan saapuessa tai kun asiakkaalle tarjottu palvelu on saatu päätökseen ja asiakas poistuu (Banks et al. 2005, s. 11).



Kuva 10. Esimerkki diskreetin systeemin tilamuuttujasta (mukaiillen Banks et al. 2005, s. 11)

Jatkuvan systeemin simulaatiomallissa tilamuuttujat muuttuvat jatkuvasti ajan myötä (Banks et al. 2005, s. 9). Esimerkkinä jatkuvasta systeemistä on öljynjalostamo, jossa systeemin nestesäiliössä olevan nesteen määrä muuttuu jatkuvasti ajan myötä. Lisäksi jatkuvaksi systeemiksi voidaan ajatella joitain systeemeitä, joihin liittyy suuri määrä nopeasti liikkuvia

tavaroita tai asioita. Tällaiseksi voidaan ajatella toimintoja esimerkiksi ruoanvalmistuslaitoksissa ja viestintäsystemeissä. Näissä tilanteissa rakeisuuden taso, jolla systeemiä on tarkoitettu analysoida, määrittelee, pidetäänkö sitä diskreettinä vai jatkuvana. Tulee kuitenkin huomioida, että digitaaliset tietokoneet eivät voi mallintaa jatkuvia tilamuutoksia, vaan jatkuvan simuloinnin lähestymistapa lähestyy jatkuvaa muutosta ottamalla pieniä diskreettejä aika-askelia (kuva 11). Mitä pienempi aika-askel, sitä tarkempi likiarvo. Tarkemmat likiarvot tarkoittavat kuitenkin suurempaa määrää laskettavia aikapisteitä, jolloin simuloinnin ajaminen kestää pidempään. (Robinson 2004, s. 24-25)



Kuva 11. Jatkuva simulaatio: jatkuvan systeemin diskreetit likiarvot (mukaillen Robinson 2004, s. 25)

Koska tässä työssä simuloidaan logistisia toimintoja, edellä mainituista simulaatiomalleista käsitellään jatkossa diskreettiä, dynaamista sekä stokastista mallia. Nämä simulaatiomallit muuttuvat välittömästi erillisissä ajankohdissa ja ne sisältävät satunnaisia syötteitä. Yhdessä näitä kolmea simulaatiomallia kutsutaan tästä eteenpäin kirjallisuuteen pohjautuen tapahtumapohjaiseksi simuloinniksi (Discrete-Event Simulation, DES) (Banks et al. 2005, s. 12; Law 2015, s. 6). Tapahtumapohjaisessa simuloinnissa esitetään vain ajankohdat, jolloin systeemin tila muuttuu, eli toisin sanoen systeemi mallinnetaan tapahtumasarjaksi (Robinson 2004, s. 15). Tapahtumapohjaista simulointia käytetään yleisimmin juuri toiminnallisten systeemien mallintamiseen, vaikka jatkuvaakin simulointia vaaditaan toisinaan (Robinson 2004, s. 33).

3.5 Tapahtumapohjainen simulointi

Tapahtumapohjainen simulointi on mallintamista systeemeille, joiden tilamuuttujat muuttuvat vain erillisissä ajankohdissa ja siten tapahtumapohjainen simulointi sopii vain niihin systeemeihin. (Banks et al. 2005, s. 12, 60) Tapahtumapohjaisessa simuloinnissa systeemi mallinnetaan kolmessa suhteessa (Banks et al. 2005, s. 60):

1. Systeemin tilan suhteen kussakin ajankohdassa
2. Systeemin läpi kulkevien entiteettien sekä systeemiresursseja edustavien entiteettien suhteen
3. Aktiviteettien ja tapahtumien suhteen, mitkä aiheuttavat systeemin tilan muutoksen

Tapahtumapohjaisessa simuloinnissa simulaatiomalleja analysoidaan enemmän numeerisilla kuin analyttisillä menetelmillä. Analyttisissä menetelmissä käytetään matematiikan deduktiivista päättelyä mallin ”ratkaisemiseksi”. Esimerkiksi differentiaalilaskentaa voidaan käyttää laskemaan joidenkin varastomallien minimikustannuskäytäntöä. Sen sijaan numeerisissa menetelmissä käytetään laskennallisia menettelyjä matemaattisten mallien ”ratkaisemiseen”. Numeerisia menetelmiä käyttävien simulaatiomallien tapauksessa mallit ”suoritetaan” enemmän kuin ratkaistaan. (Banks et al. 2005, s. 12)

Seuraavaksi on listattu Banks et al. (2005, s. 61) mukaan tärkeimpiä tapahtumapohjaisen simuloinnin käsitteitä. Huomioitavaa on, että eri simulointipaketit saattavat käyttää eri terminologiaa samoille tai samankaltaisille käsitteille.

Systeemi	Kokoelma entiteettejä (esimerkiksi ihmiset, koneet), jotka ovat ajan myötä vuorovaikutuksessa toistensa kanssa yhden tai useamman tavoitteen saavuttamiseksi
Malli	Systeemin abstrakti esitys, joka sisältää yleensä rakenteellisia, loogisia tai matemaattisia suhteita, jotka kuvaavat systeemiä tilan, entiteettien ja niiden attribuuttien, joukkojen, prosessien, tapahtumien, aktiviteettien ja viiveiden suhteen
Systeemin tila	Kokoelma muuttujia, jotka sisältävät kaikki systeemin kuvaamiseksi tarvittavat tiedot missä vain ajanhetkessä

Entiteetti	Mikä tahansa systeemissä oleva objekti tai komponentti, joka vaatii tarkan esityksen mallissa (esimerkiksi palvelin, asiakas, kone)
Attribuutti	Tietyn entiteetin ominaisuudet (esimerkiksi odottavan asiakkaan prioriteetti)
Lista	Kokoelma (pysyvästi tai väliaikaisesti) toisiinsa liitettäviä entiteettejä, jotka on järjestetty jollain loogisella tavalla (esimerkiksi jonottavat asiakkaat järjestetään joko saapumis- tai prioriteettijärjestyksessä)
Tapahtuma	Hetkellinen tapahtuma, joka muuttaa systeemin tilaa (kuten uuden asiakkaan saapuminen)
Tapahtumailmoitus	Tietue tapahtumasta, joka tapahtuu nykyisenä tai jonain tulevana ajankohtana, sekä kaikki siihen liittyvät tiedot, jotka ovat tarpeen tapahtuman toteuttamiseksi. Tietue sisältää vähintään tapahtuman tyypin ja tapahtuma-ajan
Tapahtumalista	Lista tulevista tapahtumailmoituksista järjestettynä tapahtuma-ajan mukaan. Tunnetaan myös nimellä tulevaisuuden tapahtumaluettelo (Future Event List, FEL)
Aktiviteetti	Määritellyn pituinen ajan kesto (esimerkiksi palveluaika), joka tunnetaan sen alkaessa
Viive	Määrittelemättömän pituinen ajan kesto, jota ei tunneta ennen kuin se loppuu
Kello	Simuloitua aikaa edustava muuttuja

3.6 Todennäköisyysjakauman valinta

Lähes kaikki reaali maailman systeemit sisältävät yhden tai useamman satunnaisuuden lähteen. Jotta simulaatiota voidaan suorittaa satunnaisilla syötteillä, on ensin määritettävä niiden todennäköisyysjakaumat. (Law 2015, s. 279) Esimerkiksi varastosysteemin simuloinnissa voidaan selvittää kysynnän ja läpimenoajan jakaumat. On tärkeää kerätä dataa todellisesta systeemistä. Tämä vaatii usein huomattavasti aikaa ja resursseja. On kuitenkin huomioitava, ettei se aina ole mahdollista, jolloin on turvauduttava asiantuntijan näkemyksiin ja prosessituntemukseen. (Banks et al. 2005, s. 269)

Kun syötteiden jakaumat on selvitetty, simulointi etenee ajan kuluessa tuottamalla satunnaisarvoja näistä jakaumista (Law 2015, s. 279). Yksinkertainen esimerkki tästä löytyy kappaleen 3.1 kuvasta 7. Asianmukaisen jakauman käyttäminen on tärkeää simulaation tuloksien kannalta. Virheellisten jakaumien käyttö johtaa virheellisiin tuloksiin ja siten simulaation pohjalta tehdyt suositukset johtavat harhaan. (Banks et al. 2005, s. 269)

Todennäköisyysjakaumien valintaan löytyy useita ohjelmistoja, kuten esimerkiksi ExpertFit tai Stat::Fit. Näitä ohjelmistoja on integroitu osaksi kaupallisia simulointiohjelmistoja, jolloin jakauman selvittäminen ja valinta on vaivatonta. On kuitenkin tärkeää ymmärtää mitä todennäköisyysjakauman valintaan suunniteltu ohjelmisto tekee, jotta sitä käytetään asianmukaisesti (Banks et al. 2005, s. 270).

3.7 Satunnaislukujen generointi

Satunnaisluvut ovat välttämätön perusosa lähes kaikissa diskreeteissä systeemeissä ja siten myös tapahtumapohjaisessa simuloinnissa (Banks et al. 2005, s. 221). Minkä tahansa systeemin tai prosessin simulointi, jossa on luonnostaan satunnaisia komponentteja, vaatii menetelmän satunnaislukujen generoimiseksi tai saamiseksi (Law 2015, s. 393). Useimmissa tietokonekielissä on aliohjelma, objekti tai toiminto, joka generoi satunnaislukuja. Näin tekevät myös simulointikielet. (Banks et al. 2005, s. 221) Huomioitavaa on, että simulaatioanalyttikko ei ehkä koskaan toimi suoraan satunnaislukugeneraattorin tai satunnaislukujen testaamisen kanssa, vaan niiden generointi tapahtuu ohjelman käytön taustalla (Banks et al. 2005, s. 235).

Satunnaisluvut ovat jono numeroita, jotka esiintyvät satunnaisessa järjestyksessä. Ne esitetään joko kokonaislukuina asteikolla kokoluokassa 0-9 tai 0-99, tai yleisemmin reaalityyppinä (desimaalin tarkkuudella) asteikolla 0-1. Kokonaislukujen järjestys asteikolla 0-99 voitaisiin generoida asettamalla 100 numeroitua paperipalaa hattuun ja nostamalla numeroita hatusta. Paperinpalat korvataan joka kerta. Tätä kutsutaan Top Hat -menetelmäksi. (Robinson 2004, s. 26-27)

Mainitulla tavalla luoduilla satunnaisluvuilla on kaksi tärkeää ominaisuutta (Robinson 2004, s. 26-27):

1. Yhdenmukaisuus: kaikilla luvuilla on sama tapahtumisen todennäköisyys missä tahansa jonon kohdassa
2. Riippumattomuus: kun numero on valittu, se ei vaikuta todennäköisyyteen, että se valitaan uudelleen tai että toinen numero valitaan

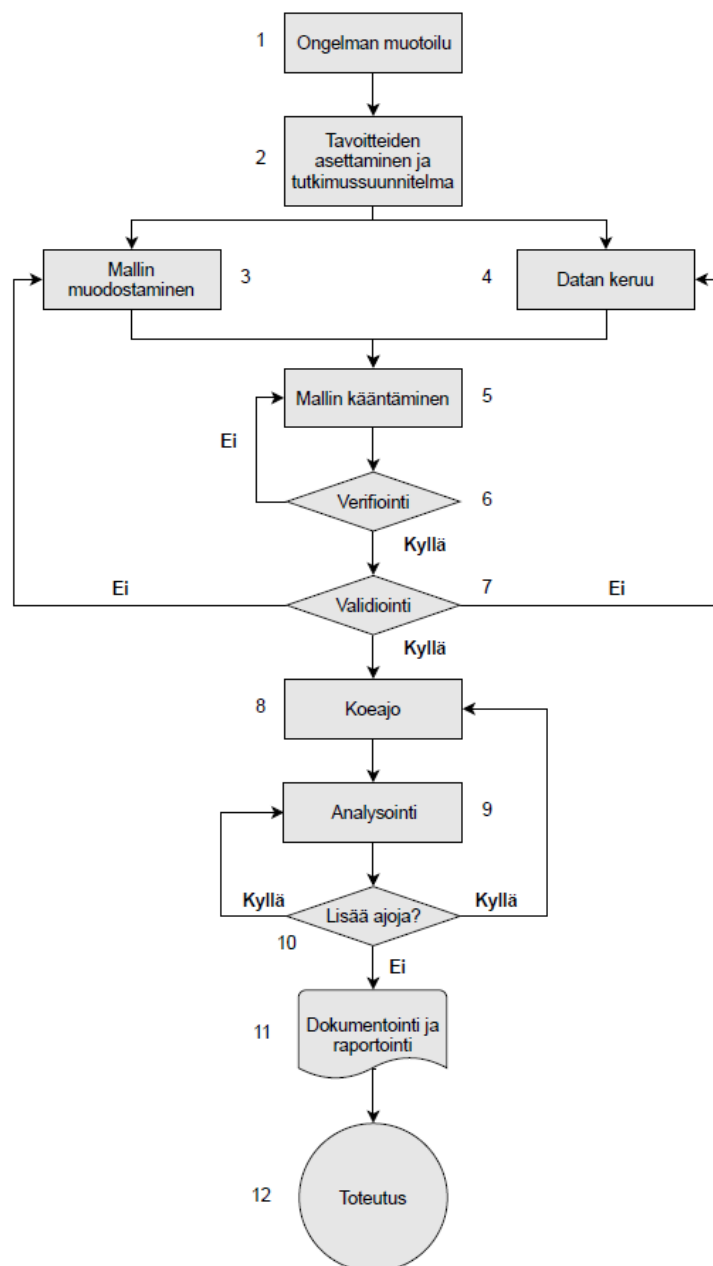
Suuren mittakaavan simulaatiomallit voivat vaatia tuhansia tai jopa miljoonia satunnaislukuja ajon aikana, joten edellä mainitun Top Hat -menetelmän käyttö ja manuaalisten numeroiden määrittäminen on selvästi epäkäytännöllistä. Tietokoneet eivät osaa luoda satunnaislukuja, joten satunnaisluvut generoidaan algoritmien avulla. Tällöin satunnaislukujen jono on ennalta määritetty, mutta se täyttää silti sattumanvaraisuudelle vaadittavat yhdenmukaisuuden ja riippumattomuuden ominaisuudet. Tällä tavoin luotuja satunnaislukuja kutsutaan pseudosatunnaisluvuiksi. (Robinson 2004, s. 31-32)

Simuloinnissa generoidaan satunnaismuuttujia. Empiirinen tai tilastollinen todennäköisyysjakauma kertoo mitä arvoja satunnaismuuttuja voi saada ja mitkä ovat arvojen todennäköisyydet. Satunnaislukugeneraattorin tehtävänä on luoda jakauman mukaisia arvoja simulaatioon. (Law 2015, s. 393)

Satunnaislukujen ja -lukujonojen peruslogiikka tulee ymmärtää simulointiohjelmistoa käyttäessä. Suurimmassa osassa simulointiohjelmistoja, kun kello asetetaan takaisin nolnaan ja simulaatio ajetaan uudelleen, asiat tapahtuvat aivan samassa järjestyksessä ja simuloinnin lopputulos on sama huolimatta siitä, että simulointi sisältää satunnaislukuja jäljitelläkseen reaali maailmaa. Tämä johtuu pseudosatunnaisluvuista, eli joka kerta kun simulaatio käynnistetään uudelleen, sama lukujono generoidaan uudelleen. Tämä on todella hyödyllistä, koska tällöin sama simulaatio voidaan ajaa tarvittaessa uudelleen täysin samoin tuloksin ilman, että luvut muuttuvat joka kerta. Simulointiohjelmitot mahdollistavat satunnaislukujonon vaihtamisen, jolloin voidaan tutkia mitä simulaatiossa tapahtuu eri satunnaisluvuilla. Lukujonoja kutsutaan simulointiohjelmissa englanninkielisin termein joko ”stream” tai ”seed”. Useimmissa simulointiohjelmissa on sisäänrakennettuna useita tuhansia erilaisia satunnaislukujonoja. (SIMUL8 2020)

3.8 Simulointitutkimuksen vaiheet

Simulointitutkimuksen vaiheet on kuvattu kuvaan 12. Kuvan vaiheet ovat Banks et al. (2005, s. 13) käsialaa, mutta simulointitutkimuksen suunnannäyttäjistä myös Law (2015 s. 67) on kuvannut vaiheet lähes samalla tavalla. Hokkanen ja Karhunen (2014 s. 217) väittävät, että kaaviossa esitettävät toiminnot pätevät kaikkien simulaatiomallien yhteydessä ja tämän lisäksi se olisi soveltuva myös useampien muiden analyttisten tutkimusten suoritusmalliksi.



Kuva 12. Simulointitutkimuksen vaiheet (mukaillen Banks et al. 2005, s. 13)

Ongelman muotoilu

Ongelma muotoillaan ja kuvaillaan selkeästi. Joissain tapauksissa ongelmaa joudutaan muotoilemaan uudestaan tutkimuksen edetessä. (Banks et al. 2005, s. 12)

Tavoitteiden asettaminen ja tutkimussuunnitelma

Tässä vaiheessa on päätettävä, onko simulointi sopiva menetelmä muotoilulle ongelmalle ja esitetyille tavoitteille (Banks et al. 2005, s. 12-14). Jos on, tutkimukselle määritellään yleiset tavoitteet sekä pohditaan mihin yksityiskohtaisiin kysymyksiin tutkimuksella voidaan vastata. Mittarit tutkittaville kohteille määritellään ja systeemin rakenne mallinnetaan, jotta tiedetään, millainen simulointiohjelmisto tarvitaan. Lisäksi määritellään tutkimuksen aikataulu ja tarvittavat resurssit. Lopuksi valitaan ohjelmisto mallin simulointia varten. (Law 2015, s. 68)

Mallin muodostaminen

Mallin muodostaminen on parasta aloittaa yksinkertaisella mallilla ja monimutkaistaa sitä ajan kuluessa tavoiteltavaan tasoon asti. Mallin ei tarvitse olla yksi yhteen oikean systeemin kanssa, vaan riittää, että mallinnetaan oikean systeemin ydin. Liian monimutkainen malli lisää kustannuksia. Yhteistyö mallinnettavan systeemin avainhenkilöiden kanssa on tärkeää tässä vaiheessa. (Banks et al. 2005, s. 14; Law 2015, s. 68)

Datan keruu

Datan keruu vie simulointitutkimuksessa paljon aikaa, joten se tulee aloittaa mahdollisimman pian, eli usein samaan aikaan kuin mallin rakentaminen aloitetaan (Banks et al. 2005, s. 14). Lisäksi Sadowskin ja Grabaun (2000) mukaan tämä vaihe simulointitutkimuksessa tunnetaan sen vaikeudesta, pitkäväteisyydestä ja riskialttiudesta. Huomioitavaa on, että kun mallin monimutkaisuus kasvaa, vaadittavat dataelementit voivat myös muuttua. Tutkimuksen tavoitteet sanelevat suurelta osin millaista dataa kerätään. (Banks et al. 2005, s. 14) Huolimatta siitä, mitä tutkitaan ja kerätään, kerätystä datasta määritetään mallin parametrit sekä datatyypien todennäköisyysjakaumat (Law 2015, s. 68).

Mallin kääntäminen

Malli voidaan kääntää tietokoneella tunnistettavaan muotoon käyttäen ohjelmointikieliä (esimerkiksi C, C++ tai Java) tai käyttäen simulointiohjelmistoja (esimerkiksi Arena, FlexSim,

SIMUL8 tai WITNESS). Ohjelmointikielien käyttö vaatii luonnollisesti niiden osaamista ja reilusti ohjelmointiaikaa, joten käyttämällä markkinoilta saatavia simulointiohjelmistoja on mahdollisuus säästää paljon mallin kehittämiseen kuluva aikaa, kunhan ohjelmisto on joustavuutensa suhteen soveltuva kyseisen systeemin mallintamiseen. On kuitenkin huomioitava, että simulointiohjelmiston hankkiminen lisää kustannuksia projektin alussa. (Banks et al. 2005, s. 14; Law 2015, s. 69)

Verifiointi

Verifiointi eli todentaminen. Toimiiko tietokoneohjelma oikein? Monimutkaisissa malleissa on vaikeaa, ellei mahdotonta, kääntää malli onnistuneesti kokonaisuudessaan ilman suurta määrää virheenkorjausta. Jos mallin syöttöparametrit ja looginen rakenne esiintyvät oikein tietokoneessa, todentaminen on suoritettu. (Banks et al. 2005, s. 14)

Validointi

Validointi eli kelpuutus. Mallia ja sen suorituskykymittareita verrataan olemassa olevaan systeemiin ja eroavaisuuksia hyödynnetään mallin parantamiseen. (Banks et al. 2005, s. 15; Law 2015, s. 69) Mallista tulee tunnistaa ne tekijät, joilla on suuri vaikutus suorituskykymittareihin, koska niiden tulee olla mallinnettuna huolellisesti (Law 2015, s. 69).

Koeajo

Simuloinnin kohteelle määritetään simulaatioajon ja tarvittavan alustusajan (warm up) pituudet sekä lukumäärä itsenäisille simulaatioajoille, jotka käyttävät eri satunnaislukuja (Law 2015, s. 69).

Simulaation ajaminen ja analysointi

Systeemin suorituskykyä arvioidaan simulaatioajojen ja niiden analyysien pohjalta (Banks et al. 2005, s. 15).

Lisää ajoja?

Analyytikko määrittää, tarvitaanko lisääajoja ja mitä suunnitelmaa näiden lisäkokeiden tulisi seurata (Banks et al. 2005, s. 15).

Dokumentointi ja raportointi

Dokumentointiin sisällytetään tehdyt oletukset, simuloinnin sisältö ja tutkimuksen tulokset nykyistä sekä tulevaisuuden käyttöä varten (Law 2015, s. 70). Simuloinnin sisältö on tärkeää sisällyttää dokumentointiin varsinkin, jos ohjelman käyttäjä vaihtuu myöhemmin. Täten uuden käyttäjän on helpompaa ymmärtää, millaisilla syötteillä saadaan tietynlaisia tuloksia, ja miten simuloitava systeemi ylipäättänsä toimii. (Banks et al. 2005, s. 15)

Raporttiin on syytä sisällyttää mallin määrittäykset, vertailuja eri vaihtoehtoista, dokumentaatiota ohjelmasta, tutkimuksen edistysaskeleita, läpikäyntiä mallin rakentamisesta ja sen validointivaiheista sekä suositukset pääongelman ratkaisuun (Banks et al. 2005, s. 15-16). Lisäksi raporttiin olisi hyvä lisätä animaatiota, jotta henkilöt, jotka eivät tunne kyseisen simulaation yksityiskohtia, ymmärtäisivät sen toimintaa paremmin (Law 2015, s. 70).

Toteutus

Toteutus riippuu pitkälti simuloinnin tuloksista ja siitä, kuinka hyvin simuloinnin toteuttajat ymmärtävät simuloinnin ja todellisen systeemin välisen yhteyden (Hokkanen & Karhunen 2014, s. 220). Tiivistetysti voidaan sanoa, että toteutuksessa onnistuminen riippuu siitä, kuinka hyvin kaikki edelliset vaiheet on suoritettu (Banks et al. 2005, s. 16).

Edellä mainitun simulointitutkimuksen vaiheet voidaan tiivistää neljään eri osa-alueeseen. Ensimmäisessä vaiheessa (kuva 12, kohdat 1-2) ongelma on vielä epäselkeä ja tavoitteita hiotaan, jotta oikea suunta löytyisi. (Banks et al. 2005, s. 16) Toisessa vaiheessa (kuva 12, kohdat 3-7) malli luodaan sellaiseksi, että käytössä olevaa dataa voidaan hyödyntää simuloinnissa. Tämän vaiheen lopussa simulointityökalu on käyttövalmis, joten se on samalla myös kriittisin vaihe tutkimuksen onnistumisen kannalta, koska tässä vaiheessa syntyneitä virheitä ei voida enää korjata jatkossa. (Hokkanen & Karhunen 2014, s. 220) Kolmas vaihe (kuva 12, kohdat 8-10) on varsinaisen simuloinnin vaihe. Tässä vaiheessa tulee huomioida, että diskreetin tapahtuman stokastinen simulointi on tilastollinen koe ja sen tulokset sisältävät satunnaisvirhettä, joten myös analysoinnissa vaaditaan asianmukaista tilastollista analyysia. Päätelmiä ei tehdä yhden ajon perusteella yksittäisestä datapisteestä. (Banks et al. 2005, s. 16) Neljäs vaihe (kuva 12, kohdat 11-12) sisältää dokumentoinnin, raportoinnin ja toteutuksen. Toteutettavan mallin valinta riippuu analyysien tuloksesta. Mikäli tulokset osoittavat, ettei

vaihtoehtoisilla malleilla saavuteta nykyistä toimintaa parempia tuloksia, voidaan toimintaa jatkaa muutoksitta. Samoin muutoksia ei tulisi tehdä, mikäli muutosten kustannukset nousevat suuremmaksi kuin saavutettavissa oleva hyöty. (Hokkanen & Karhunen 2014, s. 220)

3.9 Simulointityökalun soveltuvuus ja simulointitutkimuksessa onnistuminen

Banks et al. (2005, s. 4) toteavat, että simuloinnista on tullut yksi yleisimmin käytetyistä ja hyväksytyistä työkaluista operaatiotutkimuksessa ja systeemianalyysissä. Heidän mielestään tähän ovat vaikuttaneet erityiskäyttöön tarkoitettujen simulointikielten ja yhä edullisemmän laskentakapasiteetin saatavuus sekä simulointimenetelmien yleiset edistysaskeleet. Heidän mukaansa simulointia voidaan käyttää seuraaviin tarkoituksiin:

1. Monimutkaisen systeemin tai sen osien sisäisten vuorovaikutusten tutkimiseen ja kokeiluun
2. Informaation, organisaation ja ympäristön muutosten simulointiin ja havainnoimaan muutosten vaikutusta simulaatiomallin käyttäytymisessä
3. Simulaatiomallin suunnittelun aikana saadulla tiedolla voi olla suuri arvo, kun tutkittavaan systeemiin ehdotetaan kehitystoimenpiteitä
4. Kokeilemalla simulaatiossa eri parametrejä ja tarkastelemalla niiden vaikutuksia voidaan tuottaa arvokasta tietoa siitä mitkä muuttujat ovat tärkeimpiä ja kuinka muuttujat ovat vuorovaikutuksessa keskenään
5. Simulointia voidaan käyttää pedagogisena välineenä vahvistamaan analyyttisiä ratkaisumenetelmiä
6. Simulointia voidaan käyttää kokeilemaan uusia malleja tai käytäntöjä ennen niiden käyttöönottoa, jotta voidaan valmistautua siihen mitä voi tapahtua
7. Simulointia voidaan käyttää analyyttisten ratkaisujen todentamiseen
8. Koneen eri kyvykkyyksien simulointi voi auttaa määrittämään koneelle asetettavat vaatimukset
9. Koulutukseen suunnitellut simulaatiomallit tekevät työn oppimisen mahdolliseksi ilman kustannuksia ja ilman, että häiritään oikeaa ympäristöä, jossa systeemi sijaitsee
10. Animaatio näyttää systeemin simuloidussa toiminnassa niin, että suunnitelma voidaan visualisoida

11. Modernit systeemit ovat niin monimutkaisia, että niiden sisäisiä vuorovaikutuksia voidaan esittää vain simuloimalla

Edellä mainitun listan pohjalta voidaan helposti kuvitella, että simulointi soveltuu lähes mihin vain tilanteeseen ja on aina järkevä päätös toteuttaa. Simulointitutkimuksessa onnistuminen on kuitenkin monen tekijän summa, eikä onnistumista pidä pitää itsestäänselvytenä. Onnistuminen vaatii asiantuntevaa määrällisten ja laadullisten taitojen yhdistämistä, paljon tukea organisaation eri alueilta, sekä tekniikoita ja työkaluja, jotka mahdollistavat työn tekemisen. Tekniikoiden ja työkalujen valinta voi kuitenkin olla haasteellista, koska erilaisia mallinnus- ja analysointitekniikoita on tutkittu paljon ja puolestaan simulointiohjelmistoja on kehitelty lukuisia. Pelkällä tekniikan ja työkalun valinnalla ei todennäköisesti saavuteta parasta lopputulosta, vaan onnistumisen mahdollisuutta parannetaan täydentävien näkökulmien avulla. (Sadowski & Grabau 2000)

Simulointitutkimus voi epäonnistua monella tapaa. Banks ja Gibson (1997) esittelevät artikkelissaan kymmenen sääntöä, jolloin simulointia ei ole soveliaista käyttää:

1. Ongelma voidaan ratkaista maalaisjärjellä
2. Ongelma voidaan ratkaista analyyttisesti
3. On helpompaa muuttaa tai suorittaa kokeiluja todellisessa systeemissä
4. Simuloinnin kustannukset ylittävät mahdolliset säästöt
5. Simulointiprojektiin ei ole saatavilla riittävästi asianmukaisia resursseja
6. Liian kireä aikataulu, jolloin mallin hyödyntämiseen ei jää aikaa
7. Dataa tai arvioita ei ole saatavilla
8. Mallia ei voida todentaa ja validoida
9. Projektin odotuksia ei voida täyttää
10. Systeemin käyttäytyminen on liian monimutkaista tai sitä ei voida määritellä

Edellä mainittua listaa on hyvä täydentää vielä Sadowskin ja Grabaun (2000) artikkelin seikoilla, joilla simulointitutkimus voi mennä pieleen. Ensiksi on syytä mainita tärkein, eli väärän ongelman ratkaiseminen. Joskus suurin virhe tehdään simulointitutkimuksen alussa, kun tutkimuksen kohde on epäselvä ja aloitetaan väärän ongelman tutkiminen. Toiseksi vaikka lähdetään ratkomaan oikeaa ongelmaa, on tärkeää pohtia, onko tutkittavaa kohdetta tutkittu

tarpeeksi kauan eri näkökulmista ja onko simulointi osoittautunut parhaaksi menetelmäksi ongelman ratkaisuun. Lisäksi ongelman tulisi olla lopullisessa muodossaan ennen simulointitutkimuksen aloitusta, jotta mallin turhilta muokkauksilta vältyttäisiin. Kolmas seikka on datan oikea määrä. Edellä mainitussa listassa mainittiin, ettei simulointia ole soveliasta käyttää, jos dataa tai arvioita ei ole saatavilla. Ongelmaksi muodostuu myös datan tai arvioiden liiallinen määrä, jolloin relevantin datan etsimiseen kuluu turhaan aikaa. Neljäs seikka liittyy vahvasti simulointitutkimuksen aikataulutukseen ja ajan käyttöön:

- Tulee osata arvioida saatavilla olevien resurssien pohjalta, miten yksityiskohtainen malli simulointiin tulee tehdä
- Analysointia ei tule jättää projektin loppuun, vaan simulointia tulee ajaa läpi aika ajoin sen kehittymisen myötä ja sen tuloksia tulee analysoida
- Tulee varoa kuluttamasta liikaa aikaa animaation hienosäätöön

Yhteenvetona voidaan todeta, että simulointia voidaan hyödyntää monin eri tavoin ja lisäksi se soveltuu lukuisiin käyttökohteisiin eri toimialoilla. Ennen simulointiprojektin aloittamista tulee kuitenkin ottaa huomioon simuloinnin läpiviennin riskit, jotta simulointiprojektilla on mahdollisuus onnistua siihen varatuilla resursseilla. Seuraavaksi esitellään käytännön sovelluskohteita simuloinnista.

3.10 Käytännön sovelluskohteita

Tietokonesimuloinnista on tullut yhä suosittumpaa, koska tämän päivän suuret konetehot tarjoavat ihmisille mahdollisuuden simuloida ympäristöjä paljon nopeammin kuin missään todellisessa ympäristössä. Simuloinnissa suoritettavat kokeilut tarjoavat tuloksia minuutteja, tunteja, päiviä tai joskus jopa viikkoja, kuukausia tai vuosia ennen, mitä sama kokeilu tarjoaisi todellisessa maailmassa. (Kotusevski & Hawick 2009)

Sovellusalueita simulointiin on lukuisia ja erilaisia. Alla on Lawin (2015, s. 2) listaus erityyppisistä simuloinnin sovellusalueista, joissa simuloinnin on havaittu olevan hyödyllinen ja tehokas työkalu:

- Tuotantosysteemien suunnittelu ja analysointi
- Armeijan asejärjestelmien tai niiden logististen vaatimusten arviointi

- Viestintäverkkojen laitteistovaatimusten tai protokollien määrittäminen
- Tietokonesysteemien laitteisto- ja ohjelmistovaatimusten määrittäminen
- Liikennesysteemien, kuten lentokenttien, moottoriteiden, satamien ja metrojen suunnittelu ja käyttö
- Palveluorganisaatioiden, kuten puhelinkeskusten, pikaruokaravintoloiden, sairaaloiden ja postitoimistojen mallien arviointi
- Liiketoimintaprosessien uudelleensuunnittelu
- Toimitusketjujen analysointi
- Varastojärjestelmän tilauskäytäntöjen määrittäminen
- Kaivostoiminnan analysointi

Seuraavaksi esitellään kaksi käytännön sovelluskohdetta hieman syvällisemmin. KONE on suomalainen hissejä, liukuportaita ja ovia valmistava yhtiö. Yhtiö julkaisi vuonna 2000 tutkimuksen, jossa matkustajaliikennettä simuloitiin korkeissa rakennuksissa. Tutkimuksen taustana oli, että hissiliikennettä on mahdollista laskea analyttisesti vain silloin kun matkustajat saapuvat aulaan ja matkustavat ylempiin kerroksiin. Monimutkaisemmissa tilanteissa, kuten sekalaisessa lounasliikenteessä, tarvitaan avuksi simulointia. Simulaatiota varten tarvitaan suuri määrä parametreja rakennuksesta, hisseistä, liukuportaista sekä matkustajaliikenteestä. Muutamina esimerkkeinä parametreista voidaan mainita kerrosten lukumäärä ja niiden korkeus, hissien lukumäärä ja niiden kiihtyvyydet, rullaportaiden määrä ja niiden pituudet, sekä matkustajaliikenteen saapumisajat ja niiden erilaiset ryhmittelyt, kuten rakennuksessa työskentelevät tai siellä vierailevat. Simuloinnin lopputuloksena tutkimusryhmä oli sitä mieltä, että animaatio helpottaa mallin tarkastelua ja on helpompi huomata ongelmat visuaalisesta kuin tilastollisesta muodosta. Lisäksi se helpottaa asioiden kertomista henkilöille, jotka eivät ole perehtyneet hissiliikenteen laskelmiin. Samaan aikaan simulaatio luo tilastollisia tuloksia numeerisen datan perusteella ja kykenee kertomaan muun muassa, kuinka nopeasti rakennus saadaan evakuoitua hätätilanteessa (pois lukien tulipalot) tai kuinka lounasajan hissiliikenne järjestetään, jos jotkin hissit ovat poissa käytöstä. (Siikonen, Susi & Hakonen 2000)

Toinen käytännön sovelluskohde liittyy puhelinkeskuksen mallin arviointiin. Yksinkertaisuudessaan puhelinkeskuksen toiminta perustuu asiakkaan ja puhelinkeskuksen

henkilön väliseen kommunikointiin, mutta tarkempi tarkastelu avaa sen monimuotoisuuden. Puhelinkeskuksen entiteetteinä ovat soittavat asiakkaat ja resursseina puolestaan puhelimeen vastaavat henkilöt, jotka tarjoavat jotain palvelua. Puhelinkeskukseen saapuvat puhelut luokitellaan puhelutyypeittäin eri reiteille odottamaan puhelimeen vastausta. Odottamisen aikana asiakkaat ovat yhdessä tai useammassa jonossa ja puhelujen hylkäykset muuttavat kaikkien odottavien henkilöiden jonotustilannetta. Simuloinnin avulla on mahdollista rakentaa todellisuutta vastaava puhelinkeskus, jossa puheluita saapuu todennäköisyysjakauman mukaan ja puhelut ohjataan tietyille määrälle eri ryhmiä. Ryhmien sisällä yksittäisten palveluhenkilöiden palveluajat voidaan simuloida heidän osaamisensa mukaan. Lopuksi simuloinnilla voidaan tutkia kolmea tärkeää suorituskyvyn mittaria: asiakkaan systeemissä viettämää kokonaisaikaa, resurssien käyttöastetta sekä resurssien kokonaiskustannuksia. (Bangsow 2012, s. 13-16)

4 LOGISTIIKAN SIMULOINTI

Tässä kappaleessa käydään läpi logistiikan eri osa-alueiden simulointiin liittyviä julkaisuja ja käytännön kokemuksia. Painotus materiaalin keruussa on ollut varastointiin liittyvissä julkaisuissa, mutta myös toimitusketjun muita osia on otettu mukaan. Julkaisujen ja käytännön kokemusten läpikäynnillä pyritään syventymään logistiikan simulointiin entistä enemmän, ja näitä tietoja pyritään hyödyntämään tämän työn tapaustutkimuksessa sekä mahdollisesti myös muissa yrityksen simulointikohteissa tulevaisuudessa.

Simulointitutkimuksien tuloksia arvioitaessa on huomioitava, että ne perustuvat mallilla tehtyihin kokeisiin. Tuloksiin vaikuttavat merkittävästi mallin todenmukaisuus ja miten kokeiden satunnaistapahtumat ovat toteutuneet. Simulaatioajojen suunnittelu ja niistä saatujen tulosten tulkinta vaikuttavat merkittävästi johtopäätösten luotettavuuteen. (Haverila et al. 2009, s. 488)

4.1 Tuotannon logistiikan simulointi

Jayaraman ja Gunal (1997) tutkivat tapahtumapohjaisen simuloinnin soveltamista autojen voimansiirtolinjan tuotantoympäristössä. Auton voimansiirtolinjan komponenttien (koneet, vaihteistot) valmistus on monimutkainen kokoonpanotehtävä, johon sisältyy satojen eri komponenttien yhdistämistä. Simulointi on yleisesti käytetty väline tällaisten tuotantosysteemien suunnittelussa ja toteutuksessa. Voimansiirtolinjan kokoonpanon luonne on monimutkainen, mutta prosessin lisäksi variaatiot muun muassa aikatauluissa, manuaalisen työn suorittamisessa, työntekijöiden saatavuudessa ja materiaalinkäsittelylaitteiden suorituskyvyssä ovat vain muutamia tekijöitä, jotka vaikuttavat toiminnan satunnaisuuteen. Juuri simuloinnilla kyetään tutkimaan satunnaisuuden vaikutuksia tarkasteltavaan systeemiin. Lisäksi simuloinnin avulla on mahdollista muuttaa avainparametreja ja suorittaa erilaisia herkkyyksianalyseja. Eräs käytännön esimerkki mainitun kokoonpanolinjan simuloinnista on kuormalavojen optimaalinen määrä. Kuormalavat kiertävät tällaisissa kokoonpanotehtaissa suljetussa silmukassa. Liian suuri määrä lavoja tukehduuttaa testauspaikat, kun taas liian vähäinen määrä lavoja aiheuttaa puutteita asemilla ja sitä kautta tuotannon menetystä. Tällaisissa tehtaissa kuormalavojen hinnat ovat 5000 ja 25000 dollarin välillä, joten esimerkiksi

kymmenen lavan säästämällä voidaan saavuttaa huomattavia rahallisia säästöjä ja jossain tapauksissa jo kahden kuormalavan säästäminen kattaa simuloinnista aiheutuneet kustannukset.

Edellisessä tutkimuksessa tarkasteltiin simuloinnin yksittäistä sovelluskohdetta, mutta Semini, Fauske ja Strandhagen (2006) ovat tehneet kattavan kirjallisuuskatsauksen tapahtumapohjaisen simuloinnin soveltamisesta tuotannon logistiikan päätöksenteossa. Heidän kirjallisuuskatsauksessansa on läpikäyty 52 Winter Simulation Conferencen (WSC) julkaisua kyseisestä aiheesta vuosilta 2002–2005. WSC on kansainvälinen foorumi, jossa julkaistaan ja levitetään ajankohtaisia simulointitutkimuksia ja edistysaskelia. Foorumia on pidetty vuosittain vuodesta 1967 asti muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta (WSC 2019), ja vuosittaisten foorumeiden julkaisuja on luettavissa internetissä esimerkiksi LUT-yliopiston lukuoikeuksilla. Semini et al. (2006) kirjallisuuskatsauksessa havaittiin seuraavia asioita:

- Suurin osa simuloinnin soveltamiskohteista liittyy tuotantolaitosten suunnitteluun ja tuotannon käytäntöjen, eräkokojen, keskeneräisen työn määrän sekä tuotantosuunnitelmien/aikataulujen arviointiin. Tapahtumapohjainen simulointi on suosittua näillä osa-alueilla ja yleiskäyttöiset tapahtumapohjaisen simuloinnin työkalut soveltuvat useimpiin näihin tapauksiin.
- Yhdessäkään julkaisussa simulointia ei sovellettu liiketoimintaprosessien suunnitteluun
- Monitasoisen (multi-echelon) toimitusketjun päätöksentekoa on tutkittu reaali maailman ympäristössä todella vähän
- Suosituimmat teollisuudenalat julkaisuissa ovat olleet puolijohde- ja autoteollisuus. Suosiota selittää näiden teollisuudenalojen ominaispiirteet, eli tuotanto on toistuvaa linjat tuotantoa, jossa prosessit ovat vakaita ja automatisoituja.
- Useissa julkaisuissa simulointiin on yhdistetty optimointia

4.2 Varastoinnin simulointi

Jakelukeskusten ja varastojen operointi vaatii paljon muutakin kuin varastointi- ja keräilymenetelmän valintaa. Huomioon tulee ottaa muun muassa millaisia hyllyjä ja koneita tarvitaan, ja onko esimerkiksi kuljettimia hankittava. Lisäksi tulee pohtia, mihin varastointipaikkoihin mitkäkin tuotteet sijoitetaan. Näiden päätösten tavoitteena on antaa varastointisysteemeille mahdollisuus vastata nopeasti asiakkaiden vaatimuksiin, ja tehdyillä

valinnoilla on tärkeä tehtävä toimitusketjun onnistumisessa. Nämä päätökset voivat olla haastavia tehdä ja käytettävissä olevat analyttiset mallit kattavat vain tiettyjä osia ongelmasta. Simulaatiomallit ovat ratkaisu tähän ja niiden avulla johtajat voivat arvioida erilaisten varastointi- ja keräilymenetelmien suorituskykyä sekä varastopaikkojen allokoinnin tehokkuutta. (Gagliardi, Renaud & Ruiz 2007)

Simulaatiomallin rakentaminen ei-automatisoituun varastoon on yleisesti paljon hankalampaa verrattuna automatisoituun, koska materiaalinkäsittely on ei-automatisoidussa varastossa paljon monimutkaisempaa (Takakuwa, Takizawa, Ito & Hiraoka 2000). Yritysten tavoitteena on suoriutua kilpailijoita paremmin tehokkuudessa ja kustannuksissa, joten vaikka simulointi olisi hankalaa, sen avulla on mahdollista saavuttaa merkittävää kilpailuetua. Lisäksi, kun Burinskiené (2015) arvioi, että 75 % varastoista noutaa tuotteensa manuaalisesti, manuaalivaraston simuloinnilla on mahdollista saavuttaa merkittävää kilpailuetua suhteessa kilpailijoihin.

Ei-automatisoitujen varastojen yleisin materiaalinkäsittelyyn käytettävä laite on trukki (Šaderová, Marasová & Galliková 2018), ja ne ovat usein myös varaston kalleimmat laitteet, mutta vain 3,7 % varastoasioita analysoineista tutkijoista on kiinnittänyt huomiota trukkeihin (Burinskiené 2015). Šaderová et al. (2018) tutkivat varastossa olevien trukkien sopivaa määrää tapaustutkimuksena hyödyntäen simulointia. Tutkimuksen taustana mainitaan varastoinnin tuttu ominaispiirre eli materiaalinkäsittely on kustannuserä, mutta se ei tuota materiaaleille lisäarvoa. Näin ollen materiaalivirtauksen hallinnan ensisijainen tarkoitus on minimoida materiaalien käsittely ja siitä aiheutuvat kustannukset. Tapaustutkimuksen varasto on perinteinen sisältäen tavaroiden vastaanottoa, varastointia, keräilyä asiakkaiden noutoa varten sekä lähettämistä asiakkaille. Työtä tehdään kahdessa vuorossa, joista ensimmäisessä on seitsemän trukkia ja toisessa kolme. Tapaustutkimuksen simulointi keskittyi ensimmäisen vuoron seitsemän trukin simulointiin ja niistä mitattiin seuraavia asioita: toiminta-aika, seisonta-aika, työskentelyaika, kuljetettu määrä, keskimääräinen kuljetusetäisyys. Mittausten lopputuloksena trukkien käyttöasteet olivat 34 % ja 53 % välillä. Trukkien käyttöasteet haluttiin nostaa yli 75 %, joten tutkimuksessa tehtyjen laskelmien perusteella toimintaan tarvittiin todellisuudessa vain neljä trukkia, jolloin kolme voitiin poistaa. Laskelmien tulokset haluttiin varmistaa vielä simuloinnin avulla. Simulaatioon määriteltiin muun muassa trukkien oikeat

kulkureitit, jotta malli olisi mahdollisimman todenmukainen. Laskelmat pitivät paikkaansa ja kolmen trukin vähentämisellä trukkien käyttöasteet saatiin nostettua 81,45 prosenttiin. Lisäksi kustannustehokkuutta saatiin parannettua käyttämällä pienempää trukkimäärää.

Kuten jo kappaleessa 2.4 mainittiin, varaston layout on yksi varastoinnin tärkeimmistä päätöksistä ja siten myös sen simuloinnin tärkeys korostuu. Layout-suunnittelun tulee olla järkevää, koska lähtökohtaisesti huono layout-suunnittelu johtaa tehottomaan tilankäyttöön. Simulointi tarjoaa mahdollisuuden tutkia erilaisia layout-vaihtoehtoja. Tähän liittyen Clements et al. (2016) tutkivat kuinka simulointia voidaan hyödyntää bulkkivaraston hyllyjen syvyyksien ja koko varastotilan ABC-luokitellun allokoinnin arvioinnissa. Kertauksena kappaleesta 2.4: ABC-luokittelu tarkoittaa, että nimikkeet jaetaan kiertonopeuksien tai käyttömäärien mukaan eri luokkiin, jolloin nopeasti liikkuvat ovat A-luokkaa ja hitaammin liikkuvat B- ja C-luokkaa. Tutkimuksen taustana oli, että varasto on jatkuvan muutoksen alla johtuen muun muassa tuotannon ja varastoitavien nimikkeiden muutoksista, jolloin varastointistrategiaa tulisi muuttaa samaan aikaan, jotta varastointi ja tilankäyttö olisivat tehokasta. Simulointi tarjoaa tehokkaan tavan tutkia materiaalien dynaamisia saapumis- ja lähtömääriä, niiden luontaista vaihtelevuutta sekä myös niiden dynaamista varastointia ja varastosta hakua.

Tutkimuksessa simuloinnin pohjatiedoksi saapuville tavaroille määritettiin seuraava hyllyttämisen prioriteettijärjestys:

1. Sama nimike tietyllä hyllyvälillä ja siellä on vielä tilaa
2. Tyhjä hyllyväli kyseisen nimikkeen ABC-luokan alueella
3. Tyhjä hyllyväli alemman ABC-luokan alueella (järjestys $A \rightarrow B \rightarrow C$)
4. Tyhjä hyllyväli ylemmän ABC-luokan alueella (järjestys $C \rightarrow B \rightarrow A$)
5. Ylivuotosijoittaminen (muualle kunnes varastotilaa vapautuu)

Puolestaan keräiltäville ja lähetettäville tavaroille määritettiin, että ne haetaan omilta varastopaikoiltaan niin, että aloitetaan tyhjimästä syvyysuuntaisesta hyllyvälistä.

Tutkimuksessa käytetyllä simulointisovelluksella mallinnettiin ja analysoitiin erilaisia layout-malleja päämääränä minimoida kuljetusmatkat sekä muualle kuin omaan ABC-luokkaan varastoitujen nimikkeiden määrä. Simulointisovellukseen syötettiin nimikkeiden saapumistodennäköisyydet, eräkoot, ABC-luokitus ja kysyntämäärät. Sovellusta testattiin

oikeassa varastoympäristössä ja eri muuttujien arvoilla suoritettiin viisi eri skenaariota. Skenaarioiden pohjalta saatiin kattava kuva kuinka eri ABC-luokat ja hyllyjen syvyysratkaisut vaikuttavat varaston toimintaan ja tehokkuuteen.

Varaston allokoointia ja layout-suunnittelua simuloinnin avulla ovat tutkineet myös Macro ja Salmi (2002). Heidän tutkimuksessaan simuloitiin varaston kapasiteettia ja hyllyjen käyttöastetta kahdessa erilaisessa teollisuuden lopputuotevarastossa, joissa molemmissa on keskisuuri volyyymi (250–300 lavaa/päivä), mutta ensimmäisessä on vähän (88) varastointinimikkeitä ja toisessa puolestaan paljon (~3000). Molempien varastojen huolena on ollut kasvava varastoinnin tarve. Tutkimuksessa esitettyä simulaatiomallia voitiin hyödyntää ainakin seuraavissa huolenaiheissa:

- Varastoinnin kapasiteetti yrityksen kasvaessa
- Varastointimenetelmän tehokkuus
- Laitteiden/resurssien rajoitteet
- Keräilymenetelmän suorituskyky
- Tuotantojakson koon vaikutus

Tutkimuksessa simulaatiomallia ajettiin yhden kuukauden ajan, jotta systeemi oli riittävän ”lämmin” ja siitä saatiin kerättyä tilastollisesti hyvälaatuista dataa. Esimerkiksi ensimmäisen varaston kohdalla hyllyjen täyttöaste oli simulaatiomallissa 70 % ja todellisuudessa 71 %, mutta tämäkin pienoinen muutos johtui vain siitä, että simulaatiomalliin kerätty data oli hieman aiemmalta ajalta kuin todellisuuden havainnot. Ensimmäisen varaston simuloinnin tuloksena nykyisten hyllyjen maksimikapasiteettia saatiin nostettua 9 prosenttiyksikköä (76 % → 85 %), kun syväkuormaushyllyt ja lattiavarastot muutettiin läpivirtaushyllyiksi. Maksimikapasiteetti ei ensimmäisessä varastossa voi olla 100 % johtuen käytettävästä varastonhallintajärjestelmästä. Sen vuoksi simuloinnin tuloksena esitettiin myös tuloksia, joissa parhaaseen hyllyratkaisuun yhdistettiin varastonhallintajärjestelmä monimutkaisemmilla paikoitussäännöillä. Tällöin maksimikapasiteetti saatiin nostettua 96 % tasolle. Toisen varaston kohdalla esiteltiin, kuinka nykyiseen varastoon saadaan paljon enemmän lavapaikkoja, kun nykyinen lattiapaikoituksen ja kuormalavahyllyjen varastointimenetelmä muutettiin joko täysin kuormalava-, läpivirtaus- tai pushback-hyllyiksi. Simuloinnin tuloksena tutkimuksen

kohdeyritykselle esiteltiin eri hyllyratkaisujen tarjoamat lavapaikkojen kokonaismäärät sekä arvioidut kustannukset eri ratkaisuista.

Varaston layoutiin ja trukkeihin liittyen simulointitutkimusten kohteina ovat olleet myös varastojen erilevyiset käytävät ja kuinka trukilla kuljettavia matkoja voidaan eri käytäväratkaisuissa minimoida. Burinskienė, Davidavičienė, Raudeliūnienė ja Meidutė-Kavaliauskienė (2018) ovat tutkineet simulointia ja tilausten keruuta erittäin kapeiden käytävien varastossa, ja Burinskienė (2015) on itsenäisesti tutkinut trukkitoimintojen optimointia leveäkäytäväisessä varastossa. Yleisesti keräilyssä kuljettavaa matkaa on mahdollista optimoida kehittämällä reititysstrategiaa ja jakamalla varaston hyllyjä eri alueluokkiin aiemmin mainitun ABC-luokittelun tavalla. Optimointi on tärkeää, koska kuljettavalla kokonaismatka-ajalla on suora vaikutus tarvittavaan työyksiköiden määrään. (Burinskienė 2015) Lisäksi huolimatta käytävien leveyksistä ja toteutetusta keräilymenetelmästä, etenkin suuren volyymin jakeluvarastoissa on syytä tarkastaa saapuvan tavaran tiedot etukäteen, jotta toimittajilta saapuvat kuorma-autot ohjataan oikeille laitureille purkua varten (Burinskienė 2015). Tällä voi olla huomattava vaikutus trukilla kuljettaviin matkoihin varaston sisällä.

Kapeakäytäväisessä varastossa tulee lisäksi huomioida, että vain yksi truckki voi olla kerrallaan hyllyvälissä. Näissä varastoissa voidaan Burinskienė et al. (2018) mukaan hyödyntää tekniikkaa, jossa yhdistellään keräilylistalla olevien tilauksien nimikkeitä suuremmiksi eriksi toisin kuin perinteisessä tilauskohtaisessa keräilyssä. Tämä tarkoittaa käytännössä, että kun useissa eri tilauksissa on sama nimike, nimikettä haetaan hyllystä suurempi määrä lattialla olevalle lajittelupisteelle. Jos keräily toteutettaisiin tilauskohtaisesti, samaa nimikettä haettaisiin hyllystä useita kertoja päivän aikana ja hyllykäytävä olisi aina silloin varattuna muulta liikenteeltä. Tämä tekniikka vaatii kuitenkin varastohallintajärjestelmän, jossa keräilylista voidaan muodostaa useista tilauksista. Tätä tekniikkaa ovat tutkineet myös Ma, Yin ja Liu (2011). Heidän tutkimuksessaan jakeluvaraston keräilyä simuloitiin ensin tilauskohtaisesti ja sen jälkeen tilauksia yhdistelemällä eräkohtaisesti. Keräilytehtäviin kuluva simulaatioaika saatiin alle puoleen suorittamalla eräkohtaista keräilyä. Tuloksia tulee kuitenkin tarkastella kriittisesti, koska tutkimusta ei suoritettu simulaation jälkeen todellisessa ympäristössä eikä eräkeräily ei kaikissa ympäristöissä ole tehokkaampi keräilymenetelmä. Eräkeräily on hyvä

menetelmä, jos tilaukset ovat fyysiseltä kooltaan ja rivimäärältään pieniä, mutta sen huonoina puolina ovat lajittelumäärän lisääntyminen ja virheherkkyyden kasvu (Frazelle 2002, s. 156).

Gagliardi et al. (2007) tutkivat simuloinnin mahdollisuuksia todellisessa korkean läpivirtauksen varastossa, joka käsittelee yli 12 miljoonaa tapausta vuodessa. Tutkimuksen tarkoituksena oli arvioida, voidaanko erilaisilla varastotilan allokoinneilla vähentää toiminnan kustannuksia ilman, että palvelutaso laskee. Simulaatiomallin toiminnot olivat keskittyneet tilausten keräilyyn ja hyllyjen täydentämiseen. Simulaatiomallin avulla vertailtiin neljää eri allokointisääntöä:

1. **Homogeeninen allokointi.** 1012 sijoituspaikkaa jaetaan tasaisesti 253 tuotteelle.
2. **Tuotteen kysyntätiheys.** Allokaatiot jaetaan tuotteille niiden suosion mukaan. Suosio arvioidaan jakamalla tuotetta sisältävien tilausten lukumäärä tarkasteltavien tilausten kokonaismäärällä ja tuotteelle tähän mennessä allokoitujen sijoituspaikkojen lukumäärällä.
3. **Tuotteen kysyntämäärä.** Allokaatiot jaetaan tuotteille niiden suosion mukaan. Suosio arvioidaan tässä jakamalla kahdeksan viikon kokonaiskysyntä tuotteelle tähän mennessä allokoitujen sijoituspaikkojen lukumäärällä.
4. **Tuotteen keräilymäärä.** Allokaatiot jaetaan tuotteille niiden keskimääräisen keräilykoon mukaan. Keskimääräinen keräilykoko arvioidaan jakamalla tuotteen kysyntä tuotteen tilausten lukumäärällä ja tuotteelle tähän mennessä allokoitujen sijoituspaikkojen lukumäärällä.

Tutkimuksen tulokset jäivät vajavaisiksi ja alustavat tulokset osoittivat, että toiminnan kustannuksia voidaan vähentää minimoimalla keräilyn puutetilanteita, eli tuotteiden hyvällä allokoinnilla kaikkia tuotteita on mahdollisimman oikea määrä hyllyssä ja niitä täydennetään riittävällä tahdilla. Neljän allokointisäännön vertailussa ei löytynyt yhtä voittajaa, mutta sääntö numero kaksi suoriutui muita paljon huonommin.

Keräilyä tulee pohtia prosessin lisäksi myös talouden näkökulmasta. Keräilyn osuus jakeluvaramon kokonaistyövoimasta on yleisin noin 60 % (Burinskiené et al. 2018; Ma et al. 2011), joten sen simuloinnilla ja kehittämisellä on mahdollisuus vaikuttaa tarvittavaan työvoiman määrään ja siitä aiheutuviin kustannuksiin. Tulee kuitenkin huomioida, että

vallitseva palkkataso on suuri tekijä, kun pohditaan erilaisia varastointi- ja keräilymenetelmiä (Burinskienè et al. 2018). Tietynlainen keräilymenetelmä voi olla taloudellisesti järkevää suorittaa halvemman työvoimakustannuksen maissa verrattuna esimerkiksi Suomeen. Näin ollen myös tieteellisiä julkaisuja tulee lukea kriittisesti ja tunnistaa missä toimintaympäristössä tietty keräilymenetelmä on osoittautunut kannattavaksi.

Simulaatiomallien hyödyntäminen voi olla osa palvelutarjontaa. Goodsell ja Van Kley (2000) ovat julkaisseet kuinka Caterpillar Logistics Services, Inc (Cat Logistics) on hyödyntänyt simulointia palvelutason ja varastojen kiertonopeuksien ylläpitämisessä sekä kehittämisessä. Tiiviin yhteistyön ja simulointityökalun avulla asiakkaalle voidaan ehdottaa parannuksia tai vaihtoehtoisesti asiakas voi itse pyytää muutoksia palvelustrategioihin tai haluta testata ehdotettujen muutosten vaikutusta ennen kuin ne otetaan käytäntöön. Asiakkaalle voidaan ehdottaa esimerkiksi varastointimenetelmiin tai minimiostomääriin liittyviä asioita, ja vaihtoehtoisesti asiakas voi itse ehdottaa esimerkiksi uusiin tuotteisiin tai läpimenoaikoihin liittyviä asioita.

Huolimatta siitä, mitä tarkalleen ottaen simuloidaan, on tärkeää, että simulaatiomalli on riittävän joustava. Burnett ja LeBaron (2001) ovat tutkineet varastolle kehitetyn joustavan simulaatiomallin mahdollisuuksia liiketoiminnan kehittämisessä. Tutkimuksessa esitettiin kolme käytännön simulointimahdollisuutta ja niistä saatuja tuloksia:

1. **Simulointimahdollisuus:** Korkean teknologian ilmailu- ja avaruusteollisuuden yrityksen liiketoiminnan vaatimuksena on toimittaa kriittiset varaosat asiakkaalle välittömästi vikaantumisen jälkeen. Kyky suoriutua tästä palvelusta arvioidaan lisäämällä tilausmäärään todella suuri variaatioaste ja tarkastamalla suoriutuuko yritys tilauksen käsittelystä ennalta määritetyssä ajassa.

Simulaatiotulokset: Tilauksia voidaan siirtää saapumaan milloin tahansa päivän mittaan ja samaan aikaan vaihdella niiden suurusluokkaa. Kyky tehdä tätä tarjoaa keinot erittäin tehokkaalle esitykselle, ja se ehkä myös tarjoaa tarvittavan kilpailuedun asiakkuuden voittamiseksi.

2. **Simulointimahdollisuus:** Asiakas kyseenalaistaa ja väittää, että heidän tilausmääränsä kuun lopussa on paljon suurempaa kuin malli esittää.

Simulaatiotulokset: Esityksen aikana asiakas on antanut syöttötiedot, joiden avulla tilausmäärät on mallinnettu vastaamaan kuun viimeisen päivän tilannetta. Mallin tulokset ovat osoittaneet, että resurssit ja ehdotettu prosessi pystyvät käsittelemään loppukuun määrät. Tuloksien pohjalta asiakas, jolla on vain vähän aiempaa kokemusta simuloinnista, on saatu vakuutettua ja se on nopeuttanut mallin validointia.

3. **Simulointimahdollisuus:** Tutkimuksen kohdeyrityksen eräällä liiketoiminta-alueella keskitytään kuluttajatuoteteollisuuden ratkaisuihin. Naisten urheiluvaatteiden toimittaja vaatii, että suurin osa asiakastilauksista tulee toimittaa lomakauden aikana.

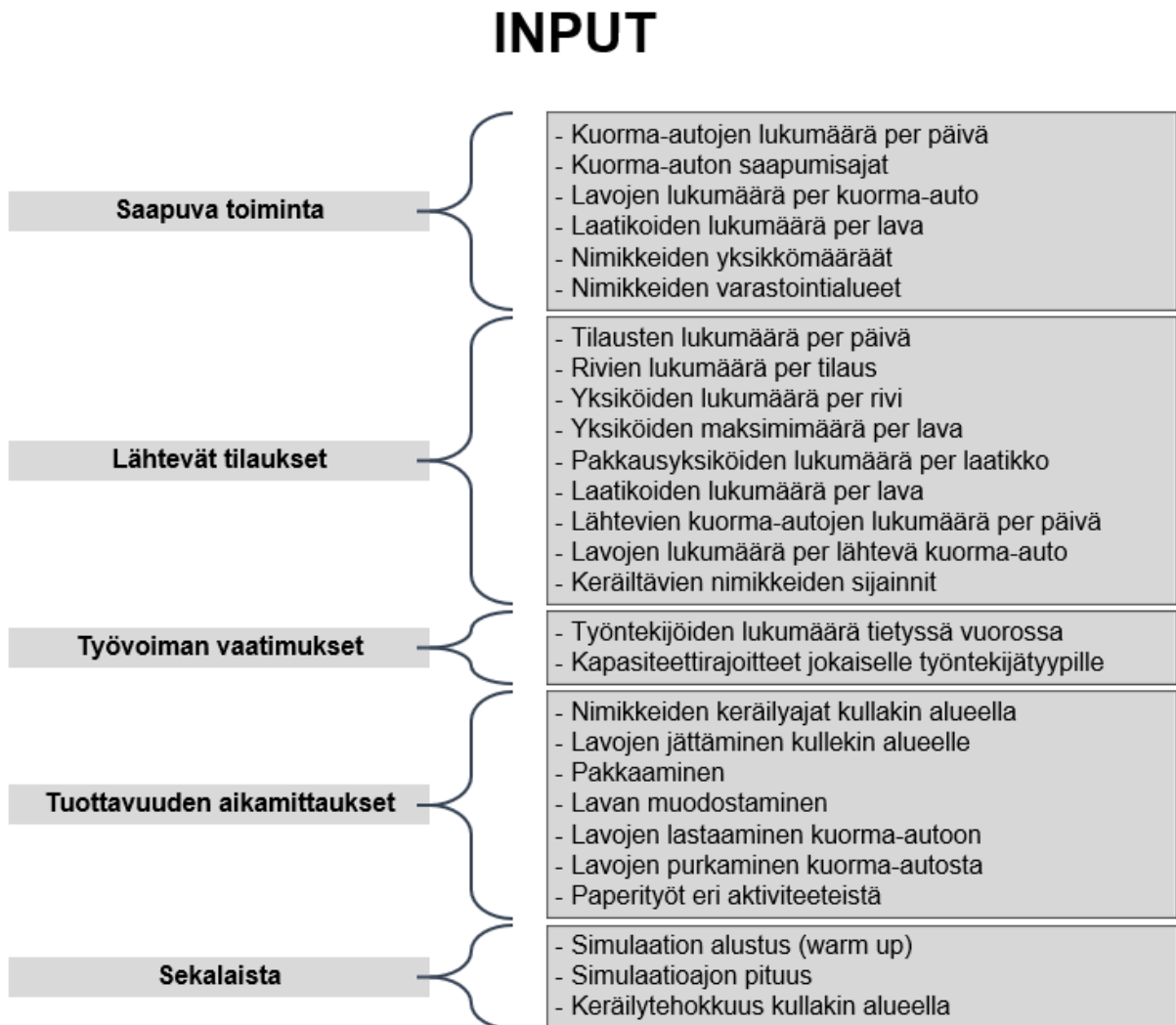
Simulaatiotulokset: Joustavuus mallin ajoituksessa, resursseissa ja aktiivisuustasoissa mahdollistaa asiakkaan huippusesongin simuloinnin muuttamalla syöttöparametreja keskimääräisen kuukauden simulaatioskenaariosta. Tämä on lisännyt asiakkaiden luottamusta yrityksen kykyyn suunnitella tarvittavat resurssit hyvissä ajoin etukäteen, koska työvoiman saatavuus on yleinen huolenaihe jakelukeskuksissa ja varastoympäristöissä ylipäätään, ja etenkin lomien huippusesonkien aikaan.

Lisäksi Burnett ja LeBaron (2001) toteavat, että simuloinnin on todistettu olevan tehokas työkalu resurssitarpeiden suunnittelussa, joten sillä voidaan perustella myös ulkoistamisen tarvetta. Lisäksi he toteavat, kuinka arvokkaaksi 3D-animaatio on osoittautunut. Heidän mukaansa asiakkaiden sitoutumiset ovat nousseet dramaattisesti, kun asiakkaat ovat nähneet oman toimintansa animaatiolla. Mallin avulla voidaan erottaa asiakkaan tuotteet värillä, jolloin he näkevät omat volyyminsä suhteessa muiden asiakkaiden määriin.

4.3 Varastointisimulaation input ja output

Varastoinnin simuloinnissa, kuten muissakin simuloinneissa, määritetään tarkasti mitä tietoa simulaatiomalliin syötetään (input) ja mitä tietoa simulaatiomallista halutaan ulos (output). Burnett ja LeBaron (2001) ovat tutkimuksessaan luoneet joustavan simulaatiomallin, jota voi hyödyntää suunnittelutyökaluna automaattisten varastojen suunnittelussa, resurssitarpeiden ennakoimisessa ja operatiivisen suorituskyvyn määrittämisessä. Vaikka tämä diplomityö ei keskity automaattisen varaston suunnitteluun, edellä mainitussa tutkimuksessa on esitetty useita

yleismallisia varaston input- ja output-tietoja. Kuvaan 13 on listattu, millaista tietoa simulaatiomalliin on mahdollista syöttää varastoinnin simuloinnissa.



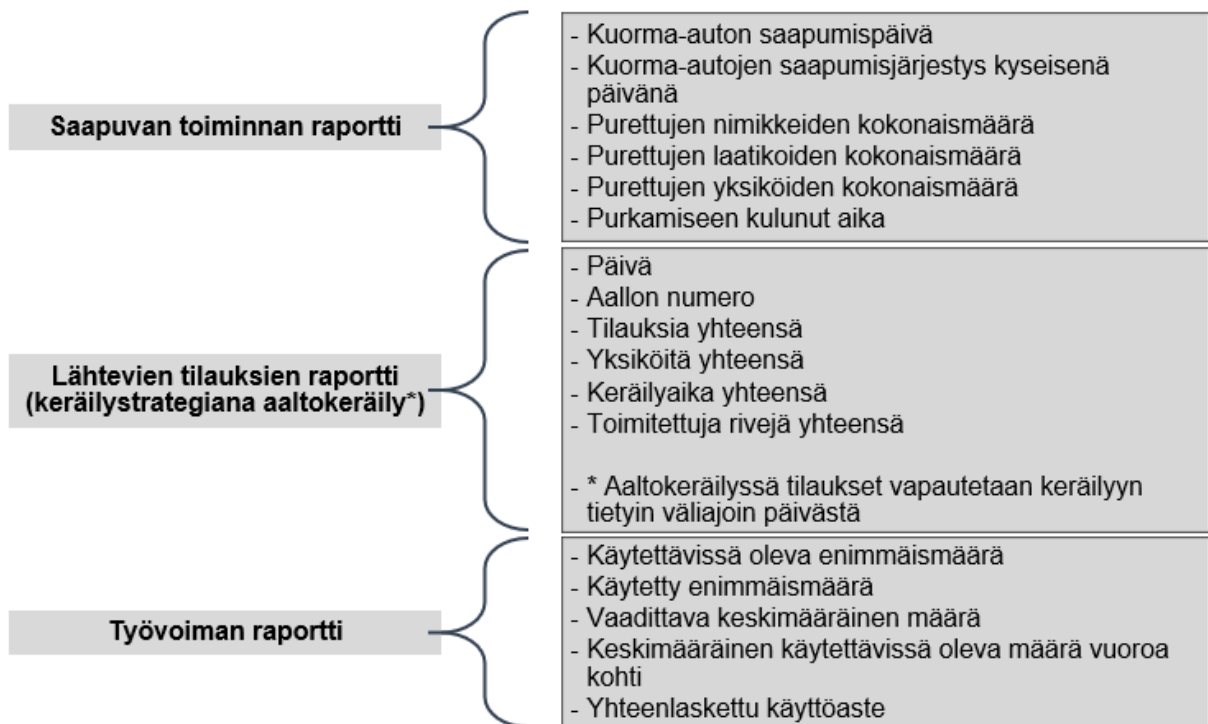
Kuva 13. Esimerkkejä simulaatiomallin input-tiedoista (mukaillen Burnett & LeBaron 2001)

Kuten kappaleessa 3.6 mainittiin, raakadatan syöttämisessä on huomioitava, että satunnaisuus syntyy simulaatiomalliin todennäköisyysjakaumien avulla. Näin ollen muuttujien kohdalla on valittava, mitä todennäköisyysjakaumaa ne minkäkin muuttujan kanssa käyttävät. Kaupallisiin simulointiohjelmistoihin on sisällytetty ohjelmistopaketteja, jotka arvioivat syötettyä raakadataa ja tarjoavat luettelon parhaimmista satunnaisjakaumista valmiiksi käyttäjälle (Burnett & LeBaron 2001).

Ennen datan syöttämistä on lisäksi huomioitava, että dataa ei aina ole saatavilla kaikista tarvittavista kohteista tai tarvittavalta aikaväliltä, ja lisäksi data voi olla osittain käyttökelvotonta. Ennen kuin kerättyä dataa aletaan syöttämään simulaatiomallille, tulee se tarvittaessa puhdistaa epätäydellisestä ja epä johdonmukaisesta datasta. Puhdistamisvaihe voi kuluttaa suuren osan koko simulointiprosessista. Etenkin asiakasyhteistyössä tehdyissä simuloinnissa on tärkeää, että asiakas varmistaa ja hyväksyy dataan tehdyt muutokset ennen simulointia. (Goodsell & Van Kley 2000)

Simulaatiomallit tarjoavat monipuolisia raportteja simuloinnin tuloksista. Kuvaan 14 on listattu, millaisia raportteja simulaatiomallista on mahdollista saada ulos varastoinnin simuloinnissa.

OUTPUT



Kuva 14. Esimerkkejä simulaatiomallin output-raporteista (mukailen Burnett & LeBaron 2001)

4.4 Jakelun ja kuljetusten simulointi

Malliesimerkkinä jakelusta toimii sanomalehtien jakelu. Garcia, Centeno ja Penaloza (1999) ovat rakentaneet simulaatiomallin sanomalehden painatuksen, pakkauksen ja jakelun prosesseihin tavoitteenaan määrittää keinot, jolla vaadittuihin toimitusaikoihin päästään, mutta myös samalla kehittää toimintaa. Alan suurimpana haasteena pidetään oikea-aikaista toimitusta ja se määrittääkin yrityksen tarjoaman palvelun suurimmilta osin. Sanomalehden julkaisijan tulee pohtia mikä painos lehdestä julkaistaan milloinkin, jotta painokset kerkeävät tuotannon ja jakelukeskusten kautta tiettyihin maantieteellisiin sijainteihin. Maailman tapahtumat ja uutiset voivat syntyä lähellä julkaisuhetkiä, jolloin myöhemmin painatukseen menevissä painoksissa voi olla enemmän uutistietoa. Tutkimuksen simuloinnin kohteena oli tutkia, millaisella kahden tehtaan tuotantoaikataululla maantieteelliset painokset julkaistaan ja minkä viiden eri jakelukeskuksen kautta ne kulkevat, jotta taataan varhainen toimitusaikataulu kaikkialle. Kolme eri skenaariota tehtiin ja niitä toistettiin viisi kertaa. Parhaalla skenaariolla saavutettiin 13 % kehitys lehden kotiintoimituksissa, ja lisäksi kaksi jakelukeskusta voitiin sulkea, koska näiden kautta kulkevat lehdet on tehokkaampaa jakaa toisesta painotalosta suoraan. Jakelukeskusten supistamisella saavutettiin myös huomattavia taloudellisia etuja. Tutkimus osoitti, kuinka jakeluverkon uudelleensuunnittelulla voidaan saada konkreettisia ja mitattavissa olevia etuja aiheuttamatta laitekustannuksia tuotantosyklin nopeuttamiseksi.

5 VARAOSATOIMINTOJEN VASTAANOTTOPROSESSI

Tämän työn tapaustutkimus kohdistuu Transval teollisuuspalveluiden Hyvinkään palvelukeskukseen. Palvelukeskus on alkuvuodesta 2019 käyttöön otettu varastoinnin ja logistiikan keskus, jossa palvelut räätälöidään vastaamaan kunkin asiakkaan tarpeita. Keskuksen palvelut kattavat teollisuuden tarvitsemat kokoonpano-, konepaja-, pakkaus- ja projektilogistiikkapalvelut, varaosatoiminnot sekä varastointipalvelut. Palvelukeskuksen toimintamalli on teollisuuden logistiikassa täysin uudenlainen. (Transval 2019)

Tässä tapaustutkimuksessa keskitytään palvelukeskuksen varaosatoimintojen vastaanottoprosessiin. Vastaanottoprosessilla tarkoitetaan tässä yhteydessä varaosien materiaalivirtaa kuorma-auton purkamisesta hyllytykseen. Varaosatoiminnoissa käsitellään ja varastoidaan pääasiassa yhden suuren teollisuusyrityksen varaosia. Käsiteltäviä nimikkeitä on noin 12 000 kappaletta. Varaosatoiminnot keskittyvät palvelukeskuksen sisällä pääasiassa materiaalivarastoksi kutsuttuun varastoon. Kaikki varaosat eivät kuitenkaan kokonsa puolesta mahdu materiaalivaraston hyllyihin, jolloin niitä paikoitetaan palvelukeskuksen päähallissa sijaitsevan telihallin tiloihin. Noin 10 % saapuvasta rivivolyyymistä ohjautuu materiaalivaraston ulkopuolelle. Varaosatoiminnot työllistävät kokonaisuudessaan 24–26 henkilöä, josta vastaanoton tehtäviin tarvitaan 10–12 henkilön resursseja.

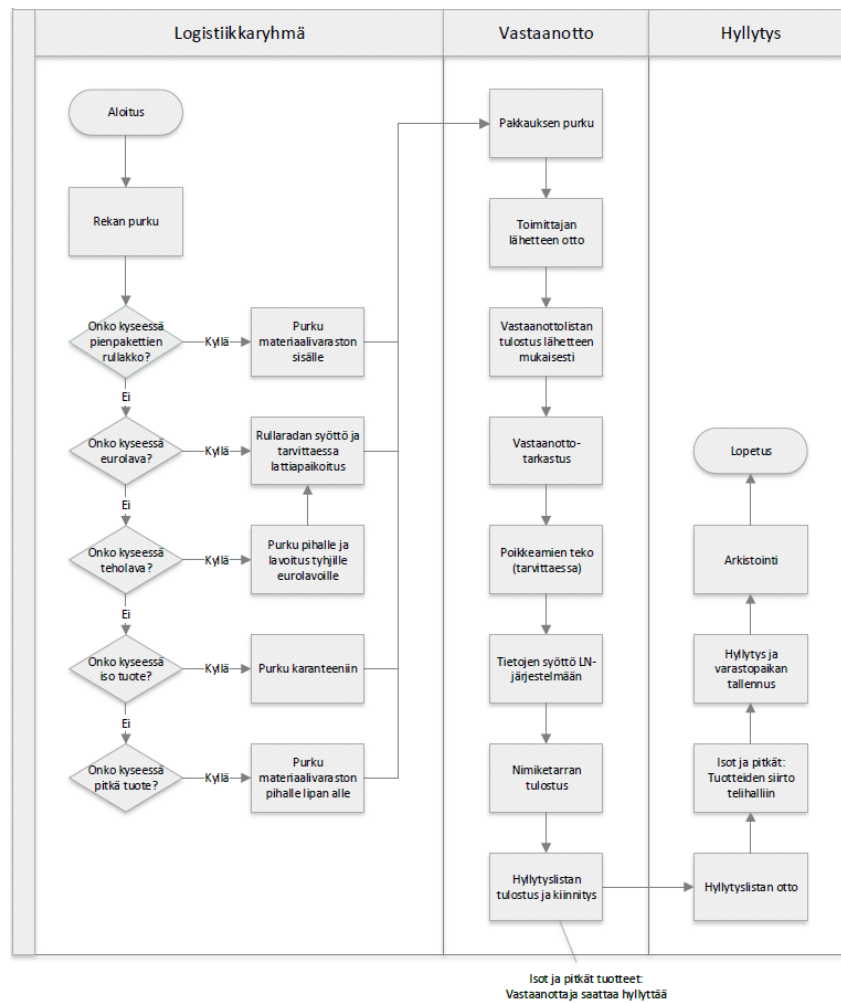
5.1 Nykytila

Vastaanottoprosessin nykytilan toteamiseksi varaosatoimintojen henkilöstöä haastateltiin kolmelta eri organisaatiotasolta: työntekijä-, lähiesimies- ja päällikkötasolta. Haastattelut toteutettiin jokaiselle organisaatiotasolle erikseen räätälöidyllä kysymyksillä. Haastattelupohjat löytyvät liitteestä 1. Haastattelut kolmelle eri organisaatiotasolle olivat tehokas keino tunnistaa nykytilan ongelmia monesta eri näkökulmasta. Samalla tunnistettiin myös hyviä käytäntöjä sekä kohteita, jotka eivät vaadi akuuttia kehittämistä.

Ennen vastaanottoprosessin tarkempaa läpikäyntiä on syytä mainita muutamia perusasioita varastoinnin nykytilasta. Varaosatoiminnoissa vastaanotetaan keskiarvolta 170–190 riviä ja keräilyn puolella pakataan noin 300 riviä päivässä. Lähettämön työtä ja lähetettyjä rivimääriä

ei vielä tutkimushetkellä seurattu, joten niiden määrästä ei ole tietoa. Yleisesti varastolla on suhteellisen tasainen materiaalivirta päivästä ja viikosta toiseen, joten työvoimaresursointi on helppoa toteuttaa. Materiaalivaraston ulkopuoliset varastointitilat palvelukeskuksen telihallissa ovat suuret, mutta ne ovat yllättävän täynnä jo nykyisellä volyymillä, koska lavoja ja paketteja varastoidaan paljon lattioille. Hyllysuunnitelmia on kuitenkin vireillä. Työkoneet ja laitteet ovat varastolla pääsääntöisesti tehtäviin soveltuvia ja vain harvoissa tilanteissa konetta pitää vaihtaa kesken työsuorituksen. Sen sijaan haasteita saattaa ilmetä työkoneiden riittävydessä. Välillä yksittäinen kone on käyttämättä pitkän aikaa ja välillä sitä tarvitsee moni henkilö.

Huolimatta saapuvan tavaran koosta ja niiden hyllytyssijainneista, vastaanotto-prosessin toiminnot voidaan varaosatoiminnoissa jakaa yleisesti kolmeen vaiheeseen: kuorma-auton purkuun (logistiikkaryhmä), vastaanottoon sekä hyllytykseen (kuva 15).



Kuva 15. Vastaanotto-prosessin toimintojen välinen vuokaavio

Työntekijätason haastattelussa oltiin sitä mieltä, että työmäärät eri vaiheiden välillä ovat jakautuneet tasaisesti, koska lähtökohtaisesti autetaan muita, kun omat työt on saatu tehtyä.

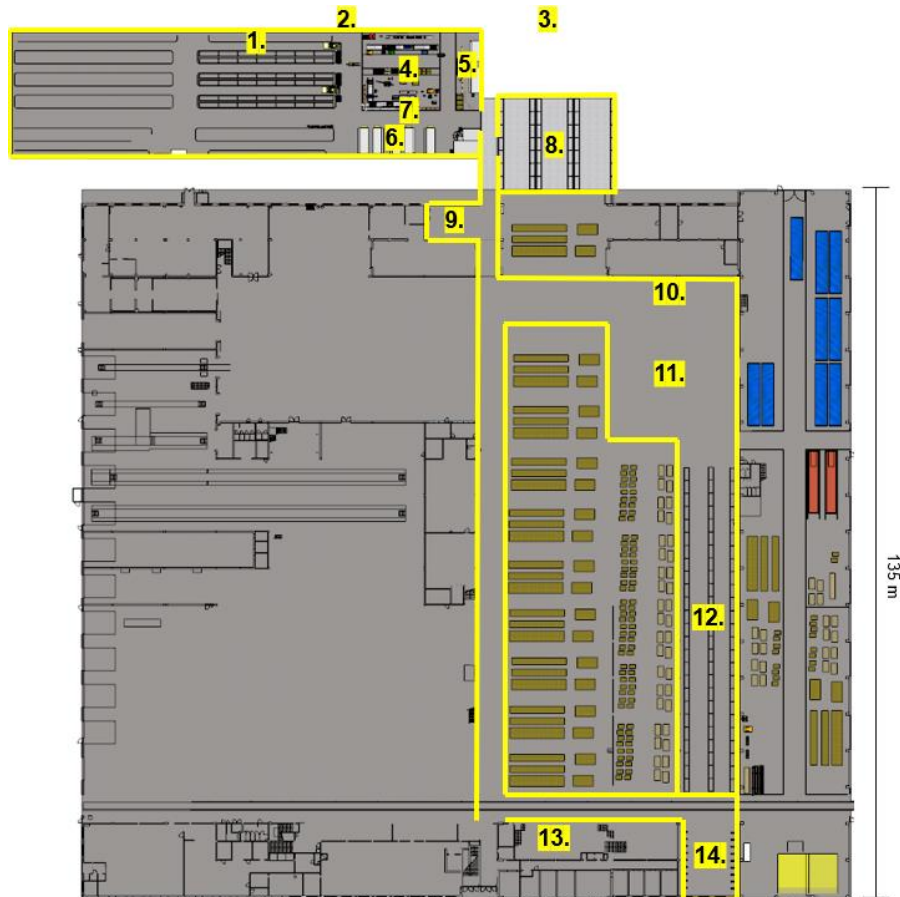
Työnjako ja henkilöstömäärä eri vaiheissa on seuraavanlainen:

- Kuorma-autojen purussa työskentelee yksi (1) henkilö kerrallaan, koska on vain yksi vastapainotrukki. Tämä henkilö tekee myös muun muassa kuorma-autojen lastaamista ja muuta materiaalien siirtoa.
- Vastaanotossa työskentelee viisi (5) henkilöä, joista yksi henkilö selvittää pääasiassa epämääräisten lavojen poikkeamatapauksia ja tekee palautteita niistä.
- Materiaalivaraston hyllytyksessä työskentelee neljä (4) henkilöä, joista kolme työskentelee kolmella eri hyllyvälillä korkeakeräilijän kanssa ja yksi henkilö puolestaan pienen tuotteiden ja paternoster-varastoautomaattien parissa. Kaikki hyllytyksen henkilöt työskentelevät myös keräilijöinä.
- Telihallin isojen ja pitkien tuotteiden hyllytyksien tekijöistä ei ole yksiselitteistä lukumäärää, koska myös vastaanottajat saattavat hyllyttää niitä. Varmaa on kuitenkin se, että kahta (2) henkilöä vaaditaan näiden kahden tuoteryhmän hyllytykseen, koska ne tehdään eri työkoneilla.

Varaosatoimintojen toimialuetta on havainnollistettu kuvaan 16 keltaisilla rajoilla. Rajauksen tarkoituksena on havainnollistaa toimialueen kokoluokkaa ja eri varastointipaikkojen sijainteja. Kuvaan ei ole havainnollistettu lattiatilan varastoinnin nykyistä täyttöastetta tai muita yksityiskohtia. Kuvan numeroinnit tarkoittavat seuraavia:

1. Materiaalivarasto ja sen eurolavahyllyt
2. Pihan oksahylly (pitkien välivarastointi ja vastaanotto)
3. Pihan purku- ja lastausalue
4. Pienpakettien vastaanotto
5. Paternoster-varastoautomaatit 2 kpl (pienpaketit)
6. Vastaanoton tietokone ja paternoster-varastoautomaatit 5 kpl (pienpaketit)
7. Rullarata ja eurolavojen vastaanotto
8. Lähtevän tavaran varasto (eurolavat)
9. Karanteeni (isojen välivarastointi ja vastaanotto)
10. Lähtevän tavaran lattiatila (muut kuin eurolavat)
11. Lattiatila sekalaiselle varastoinnille ja pakkaamiselle

12. Telihallin hyllyt (isojen loppuvarastointi)
13. Taukotila
14. Telihallin oksahyllyt (pitkien loppuvarastointi)



Kuva 16. Varaosatoimintojen toimialue palvelukeskuksen päähallissa

Vastaanotto-prosessin tarkemmassa läpikäynnissä saapuva tavara on syytä jakaa kolmeen eri luokkaan riippuen niiden koosta, koska eri kokoisia lavoja ja tuotteita varastoidaan eri puolilla palvelukeskuksen päähallia. Jokaisen luokan yhteyteen on lisätty karkea purkamisen matkaetäisyys pihan purkualueelta (kuva 16, kohta 3):

- **Luokka 1:** Euro- ja teholavat sekä pienpakettirullakot. Purkumatka materiaali-varaston sisälle noin 35 metriä. (kuva 16, kohta 7)
- **Luokka 2:** Suuremmat lavat ja isommat tuotteet. Purkumatka karanteeniin noin 50 metriä. (kuva 16, kohta 9)
- **Luokka 3:** Pitkät pakkaukset. Purkumatka pihan oksahyllyyn noin 30 metriä. (kuva 16, kohta 2)

Euro- ja teholavat sekä pienpakettirullakot (*Luokka 1*) edustavat noin 90 % saapuvasta rivivolyymistä ja ne varastoidaan materiaalivarastoon (kuva 16, kohta 1). Täten materiaalivarasto on varaosavarastoinnin ydin. Muu varastoinnin tarve johtuu saapuvan tavaran liian suuresta lava- tai tuotekoosta, ettei niitä voida varastoida materiaalivarastoon. Materiaalivarasto sijaitsee lähellä piha-aluetta, jossa kuorma-autot puretaan (kuva 16, kohta 3). Logistiikan työntekijät purkavat kuorma-autojen eurolavat noin metrin korkuiselle eurolavojen rullaradalle (kuva 16, kohta 7) materiaalivarastossa, mistä alkavat vastaanottajien työtehtävät. Rullaradan tullessa täyteen eurolavoja puretaan lattialle rullaradan viereen. Logistiikkaryhmän henkilö täydentää rullarataa trukilla sitä mukaa kun vastaanotto etenee. Teholavat puretaan puolestaan pihalle, minkä jälkeen purkaja lavoittaa ne trukilla tyhjille eurolavoille. Lavoitus joudutaan tekemään, koska lavojen hyllytys tapahtuu materiaalivarastossa ainoastaan eurolavoilla. Pienpakettirullakot tuodaan trukilla materiaalivaraston sisälle, josta pienpakettien vastaanottotyö alkaa (kuva 16, kohta 4). Vastaanoton jälkeen pienpaketit hyllytetään paternoster-varastoautomaatteihin (kuva 16, kohdat 5 ja 6).

Materiaalivaraston vastaanotossa ei tällä hetkellä ole suuria ongelmia, koska siellä on hiljattain tehty suuri layout-muutos ja hyllytyskin nähdään tehokkaana. Vastaanotto-prosessin työläimmäksi vaiheeksi nähdään vastaanoton lavojen purkaminen, tuotteiden tarkastaminen ja kappalemäärien laskeminen. Haasteita ilmenee myös rullaradan yhteydessä, jossa kaksi eri työvaihetta kohtaavat. Vastaanottajat toivoisivat, että kaikki lavat mahtuisivat rullaradalle, koska he joutuvat välillä itse täydentämään rullarataa. Pidennettyä tai toista rullarataa on pohdittu ongelman vuoksi. Lisäksi rullaradan yhteyteen on pohdittu uusia toimintamalleja, joilla teholavojen siirtoa eurolavoille voitaisiin tehostaa. Yksiselitteistä ja taloudellisesti kannattavaa toimintamallia ei ole vielä löydetty.

Vastaanotto-prosessi luokille 2 ja 3 on työläämpää, koska tuotteet vastaanotetaan väliaikaisessa paikassa, jonka jälkeen ne siirretään kauas telihalliin. Suuremmat lavat ja isommat tuotteet (*Luokka 2*) edustavat noin 5 % saapuvasta rivivolyymistä. Näitä ovat lavakoot ja tuotteet, jotka eivät mahdu materiaalivaraston hyllyihin, jolloin ne varastoidaan toiseen isoon hyllyjen kokonaisuuteen telihallin sisällä (kuva 16, kohta 12). Näitä lavoja ei pureta suoraan kuorma-autoista hyllyihin, koska välimatka on niin pitkä ja saapuvalla tavaramalle tulee tehdä vastaanottotarkastus. Täten lavat puretaan materiaalivaraston läheisyydessä olevaan

karanteeniin (kuva 16, kohta 9), jossa vastaanotto suoritetaan. Tämän jälkeen lavat siirretään hyllyihin. Haasteet tässä luokassa liittyvät välimatkaan karanteenin ja telihallin hyllyjen välillä (90–145 metriä), sekä epätasaiseen ajoreittiin. Matkalla joudutaan ylittämään junaraiteita trukilla, mikä hidastaa etenemistä etenkin, kun kyydissä on vastaanotettu lava ilman pakkausta. Lisäksi karanteenista puuttuu tietokone, joten vastaanottaja joutuu kävelemään karanteenista materiaalivaraston tietokoneelle (kuva 16, kohta 6) tekemään tarvittavat toimenpiteet.

Pitkät tuotteet (*Luokka 3*) edustavat myös noin 5 % saapuvasta rivivolyymistä. Nämä tuotteet puretaan sään suojaan pihan oksahyllyyn (kuva 16, kohta 2) ja vastaanotto suoritetaan oksahyllyn läheisyydessä ulkona. Myös pitkien tuotteiden vastaanotossa tietokoneella joudutaan käymään materiaalivarastossa (kuva 16, kohta 6). Vastaanoton työvaiheiden jälkeen tuotteet viedään nelitietrukilla päähallin toiseen päähän telihallin oksahyllyihin (kuva 16, kohta 14). Koska ajomatka telihallin oksahyllyille sisäkautta on noin 225 metriä, nelitietrukin haarukoihin pyritään keräämään useampi pitkä tuote kerralla. Haasteet tässä luokassa liittyvät välimatkaan pihan oksahyllyn ja telihallin hyllyjen välillä sekä varastotilojen puutteeseen. Telihallin oksahyllyt ovat yleisin täynnä, jolloin hyllyttäjät etsivät jostain päin telihallia sopivan lattiatilan tuotteille. Avattuja ja vastaanotettuja paketteja ei voida jättää ulos. Lattiatilat ovat kuitenkin pitkälti käytössä lähtevälle tavaralle, joten pitkille tuotteille on välillä haasteellista löytää lattipaikkaa. Paikoituksen jälkeen tuotetta ei siirretä enää minnekään, vaan se jää sille paikalleen. Tämä pitkien tuotteiden vastaanotto ja paikoittaminen nähdään sekä työntekijöiden että työnjohdon näkökulmasta varaosatoimintojen vastaanoton suurena haasteena ja sen nähdään syövän paljon resursseja. Suunnitelmia oksahyllyjen paremmasta sijainnista ja määrästä on kuitenkin pohdittu.

Kaikkien luokkien lisäksi varastoon saapuu pieniä määriä epämääräisiä lavoja niin materiaalivarastoon kuin muuallekin. Materiaalivarastossa epämääräisille lavoille on selvityksen ajaksi riittävästi tilaa, mutta muualla ne paikoitetaan sopivaan vapaaseen paikkaan lattialla. Työntekijäpuolen haastattelussa toivottiin, että epämääräisille lavoille olisi telihallissa kiinteä paikka, jolloin ne olisi helppo paikoittaa ja ne löytyisivät aina samasta paikasta.

Volyymien suhteen on huomioitava, että rivivolyymit jakautuvat luokkien suhteen prosentuaalisesti 90-5-5, mutta tonni- ja työmääräisesti jakaumat ovat erilaiset. Luokissa 2 ja 3

vastaanotetaan suurempia ja painavampia tuotteita sekä niiden vastaanotto on työläämpää, koska lavapakkaukset ovat järeämpiä. Materiaalivaraston lavapakkaukset ovat helpommin purettavissa, koska lavoista poistetaan lähinnä vannenauhat ja kannet. Isompien, ja etenkin pitkien pakkausten, kohdalla tarvitaan usein sorkkarautaa ja akkuporakoneita, jolloin työmäärä saattaa kasvaa moninkertaiseksi.

Tulevaisuudessa tilankäytön ja vastaanottoprosessin tulee olla tehokkaampaa, jos volyymeitä halutaan kasvattaa suuremmiksi. Jo nyt varaosavarastointiin on tulossa uusi iso asiakkuus, joten kehittämistoimet ovat ajankohtaisia. Päällikön haastattelussa nousi esille useita isompia kehitysehdotuksia, joilla tehokkuutta voitaisiin lisätä toiminnassa. Ensinnäkin, telihallin vastaanotto tulisi siirtää lähemmäksi hyllytystä tai päinvastoin hyllyt siirrettäisiin lähemmäksi vastaanottoa, ja ylipäätään vastaanottotyöpisteet tulisi sijoittaa paremmin. Toiseksi, materiaalivaraston hallin korkeutta pitäisi hyödyntää paremmin eli kuutiot tulisi ottaa parempaan käyttöön. Kolmanneksi, lähtevä virtaus olisi hyvä olla toisella puolella varastoa kuin missä vastaanotto sijaitsee. Näin välttyttäisiin muun muassa risteävältä liikenteeltä.

5.2 Simulaatiomalliin tehtävät oletukset

Tiettyjä oletuksia ja luokitteluja täytyy tuotetasolla tehdä, jotta simulointiprojekti saadaan vietyä maaliin asti budjetoidussa aikataulussa. Vastaanottoprosessi mallinnetaan kokonaisuudessaan, mutta tuotteiden fyysisiin olemuksiin tehdään useita oletuksia. Tämä eriyttää simulaatiomallia todellisuudesta etenkin materiaalivarastoon saapuvan tavaran (*Luokka 1*) kohdalla. Oletuksia joudutaan tekemään, koska riittävän tarkkaa dataa ei mallintamishetkellä ole saatavilla, eikä datan keruuta voida suorittaa diplomityöhön budjetoidussa aikaikkunassa. Näin ollen mallissa oletetaan, että vastaanotto tapahtuu hyllytavarassa lavatasolla ja pientavarassa pakettitasolla. Reaalimaailmassa hyllytavara vastaanotetaan kappale- tai pituusmääräisenä ja pientavara kappalemääräisenä. Lisäksi reaalimaailmassa hyllyissä olevilla yksittäisillä lavoilla voi olla monia eri nimikkeitä, jolloin kun keräilytilanteessa lavalta otetaan esimerkiksi vain yhtä nimikettä, lavapaikka ei vapaudu. Pituusmääräisten tuotteiden keräilyssä leikataan tietty pituus tuotetta lavalta, jolloin myöskään tässä tilanteessa lavapaikka ei vapaudu keräilyn yhteydessä.

Myös muiden tuotteiden (*Luokat 2 ja 3*) kohdalla oletukset tehdään tuotteiden fyysisiin mittoihin, jotta hyllytys ja tilantarve voidaan mallintaa mahdollisimman realistisesti. Myöskään näistä tuotteista ei ole saatavilla fyysisiä mittoja, joten molemmissa luokissa nimikkeiden kokoluokista määritellään yksiselitteiset oletuskoot ja simulointi suoritetaan näiden mukaan. Tiedot simulaatiomalliin syötettävistä tuotteiden fyysisistä mitoista löytyvät liitteen 2 kohdasta ”Source”.

Nämä edellä mainitut oletukset tehdään siksi, koska varaosatoiminnoissa varastoidaan yhteensä noin 12 000 eri nimikettä, ja kaikkien nimikkeiden nykyiset sijainnit sekä fyysiset mitat tarvittaisiin, jos simulointi haluttaisiin viedä nimiketasoiselle hyllytykselle ja keräilylle. Lopputulemana tästä, jokaisesta tuotetyypistä saapuu varastoon vain tuotetyypin yhtä oletuskokoa, ja vastaanoton jälkeen hyllytys tapahtuu kaikkien tuotteiden kohdalla näiden oletuskokojen mukaan. Keräilyä ei suoriteta ollenkaan simulaatiomallissa.

Hyllyjen ja muiden tilojen kapasiteettien kohdalla joudutaan tekemään myös merkittäviä oletuksia. Varaosatoiminnoissa varastoitavien tavaroiden koot vaihtelevat suuresti etenkin isojen ja pitkien tuotteiden kohdalla (*Luokat 2 ja 3*), ja kun niille oletetaan simulaatiomalliin tietyt fyysiset mitat, pitää niiden hyllystä viemä tila vastata mahdollisimman hyvin reaali maailmaa. Reaali maailmassa esimerkiksi telihallin hyllyihin varastoitavia isoja lavoja tai tuotteita on yhdestä kolmeen kappaletta per hyllyvälin hyllytaso, joten simulaatiomalliin oletetaan kapasiteetin olevan näissä kaksi. Tiedot hyllyjen ja muiden tilojen kapasiteeteista löytyvät liitteen 2 kohdista ”Queue” ja ”Rack”.

Myös työpäivän kestosta ja henkilöstöstä tehdään oletuksia. Tapaustutkimuksen aikaan varaosatoimintoja pyöritettiin kahdessa vuorossa johtuen koronapandemiasta, mutta normaalisti työtä tehdään klo 7 ja 18 välillä porrastuksia hyödyntäen. Tämä porrastus on haasteellinen rakentaa simulaatiomalliin, koska reaali maailmassa porrastuksien aikaan henkilöt voivat olla eri tehtävissä. Näin ollen simulaatiomallissa oletetaan, että työpäivät ovat 08:00–16:30 ja henkilöt tekevät vain yhtä tehtävää työssään. Taukoja kaikki työntekijät pitävät 10:00–10:10, 12:00–12:30 ja 14:00–14:10. Työntekijät lähtevät tauolle vasta, kun aloitettu työ on saatu päätökseen. He viettävät taukoa silti kiinteän määrän.

Simulaatiomallissa työvoimaresurssit tekevät työaikanaan vain vastaanoton työtehtäviä. Useilla resursseista olisi reaali maailmassa myös erilaisia keräilyyn tai pakkaamiseen liittyviä tehtäviä.

Työvoimaresursseja simuloitavassa vastaanotto prosessissa on yhteensä 11 kappaletta:

- Vastaanottaja 1 (Eurolavojen vastaanotto materiaalivarastossa)
- Vastaanottaja 2 (Pienpakettien vastaanotto materiaalivarastossa)
- Vastaanottaja 3 (Isojen vastaanotto karanteenissa)
- Vastaanottaja 4 (Pitkien vastaanotto pihan oksahyllyjen läheisyydessä)
- Hyllyttäjä (Pienpakettien hyllytys paternoster-varastoautomaatteihin)
- Vastapainotrukki (Kuorma-autojen purkaminen)
- Korkeakeräilijä 1 (Eurolavojen hyllytys materiaalivaraston hyllyihin C1-4)
- Korkeakeräilijä 2 (Eurolavojen hyllytys materiaalivaraston hyllyihin D1-4)
- Korkeakeräilijä 3 (Eurolavojen hyllytys materiaalivaraston hyllyihin E1-4)
- Nelitietrukki (Pitkien siirto ja hyllytys)
- Työntömastotrukki (Isojen siirto ja hyllytys)

5.3 Mitattavat kohteet ja datan keruu

Simulaatiomallia varten tarvittiin dataa useista kohteista. Valmista dataa ei ollut lähestulkoon ollenkaan, joten datan keruu tuli suorittaa tätä työtä varten. Datan keruu koostui kolmesta erillisestä osiosta:

1. Työvoimaresurssien ja työvaiheiden manuaalinen aikamittaaminen
2. Rahtikirjaseuranta saapuvan tavaran määrästä
3. Poikkeamatapausten määrän selvittämien järjestelmädatasta

Työvoimaresurssien ja työvaiheiden manuaalinen aikamittaaminen oli eniten aikaa vievä tehtävä edellä mainituista kolmesta osiosta. Varaosatoimintojen vastaanotto prosessissa työkoneet ovat manuaalisia ja saapuvan tavaran vastaanotot tehdään täysin manuaalisesti ihmisvoimin, joten data työvaiheiden kestoista oli mahdollista saada vain manuaalisten aikamittausten avulla. Aikamittaukset suoritti yrityksessä työskentelevä työntutkija, jonka työnkuvaan kuuluu juuri tämäntyyppiset mittausprojektit.

Aikamittauksia kerättiin kaikista olennaisista työvoimaresursseista sekä työvaiheista. Työvoimaresursseille (työkoneet, vastaanottajat) jouduttiin tekemään useita erillisiä mittauksia. Työkoneiden kohdalla se tarkoitti aikamittauksia liikkumisnopeudesta, lastamisesta ja purkamisesta. Puolestaan vastaanottajien kohdalla tarvittiin tietoa muun muassa siitä, kuinka nopeasti eurolavojen vastaanottaja siirtää lavan vastaanottamisen jälkeen läpivirtaushyllyihin, tai kuinka nopeasti isojen ja pitkien tuotteiden vastaanottajat kävelevät materiaalivaraston tietokoneelle. Työvaihemittaukset olivat edellisiin verrattuna selkeämpiä tehdä. Työvaihemittauksia tehtiin kaikille tarkasteltaville vastaanottopisteille, lavoitukselle sekä tietokoneella tehtävien työvaiheiden kestolle.

Eri kohteista saatiin resurssien puitteessa eri määrä otoksia ja siten datan laatu vaihtelee. Lähtökohtaisesti otokset olivat pieniä, kun pienin otos oli 2 ja suurin 14. Eri mittauskohteita oli kuitenkin sen verran paljon, että manuaalisiin aikamittauksiin kului otosten pienistä määristä huolimatta reilusti aikaa. Kaikkien mittausten ja otosten pohjalta jokaiselle mittauskohteelle määriteltiin parametrit. Jos otoksia oli alle 10 kappaletta, niistä otettiin keskiarvo. Jos otoksia oli 10 tai yli, niistä tehtiin ExpertFitin avulla tilastollinen jakauma. Syötetyt yksityiskohtaiset parametrit työvoimaresursseille ja työvaiheille löytyvät liitteen 2 kohdista ”Operator”, ”Transporter” ja ”Processor”.

Rahtikirjaseuranta saapuvan tavaran määrästä oli vajaan kolmen viikon kestoinen manuaalinen seuranta, jossa logistiikkaryhmän työntekijät keräsivät tietoa saapuvan tavaran määrästä. Yksikköinä kaikista kerättävistä kohteista käytettiin kokonaisia lavoja tai paketteja. Reaalimaailmassa saapuvilla lavoilla voi olla useita kolleja ja useita ostotilauksia, mutta tässä sitä ei huomioitu. Jokaisesta saapuneesta kuormasta merkattiin seuraavat tiedot listalle:

- Aikaleima
- Eurolavojen lukumäärä
- Lavoitettavien lavojen lukumäärä (teholavat)
- Isojen lavojen/tuotteiden lukumäärä
- Pitkien pakettien lukumäärä
- Rullakoiden lukumäärä ja pienpakettien lukumäärä rullakossa

Listalle saatiin merkintöjä 13 arkipäivästä, mutta kahden päivän merkinnät olivat epäselviä, joten lopulliseen käsittelyyn otettiin 11 arkipäivää. Rahtikirjan seurannalle jouduttiin tekemään pientä käsittelyä, jotta se saatiin yhteensopivaan muotoon FlexSimin kanssa. Esimerkiksi kaikki aikaleimat tuli muuttaa sekuntimääräisiksi ensimmäisestä päivästä alkaen. Rahtikirjaseurannan arvot kaikille tuotetyypeille löytyvät liitteen 2 kohdasta ”Source”.

Poikkeamatapausten määrä selvitettiin järjestelmädatasta, jotta simulaatiomalliin saatiin tehtyä logiikka, jossa vastaanotettu tuote menee tietyllä prosentilla odottamaan poikkeamaselvitystä. Tammi-maaliskuussa 2020 vastaanottopalautteita oli tehty 417 kappaletta ja tuona aikana oli vastaanotettu kaiken kaikkiaan 12 819 riviä. Näin ollen 3,3 % (417/12819) saapuvasta rivimäärästä sisältää epäselvyyksiä ja ne vaativat poikkeamaselvittelyä.

6 NYKYTILAN MALLINTAMINEN SIMULOINTIOHJELMISTOON

Varaosatoimintojen vastaanottoprosessi ja siihen liittyvät työvoima- ja työkoneresurssit sekä fyysiset tilat mallinnetaan mahdollisimman todellisuutta vastaaviksi valittuun simulointiohjelmistoon. Mallintamisen jälkeen simulointiohjelmistoon syötetään kaikki kerätty data, minkä jälkeen mallin toimintaa testataan ja tuloksia seurataan, kunnes malli voidaan verifioida ja validoida.

6.1 Simulointiohjelmistojen vertailu ja soveltuvimman ohjelmiston valinta

Kohdeyrityksellä ei diplomityön tekohetkellä ollut käytössään mitään simulointiohjelmistoa, joten tämän työn rinnalla tehtiin kattava tapahtumapohjaisten simulointiohjelmistojen vertailu ja soveltuvimman ohjelmiston valinta. Vertailun ja valinnan vaiheita ei kuitenkaan tarkemmin raportoida työhön, koska se ei ole olennaista työn rajauksen kannalta. Simulointiohjelmiston valintaprosessissa varaston simulointiin soveltuvia ohjelmistoja löydettiin seitsemän kappaletta, joista viidestä (AnyLogic, FlexSim, Simio, SIMUL8 ja WITNESS) pyydettiin kokeiluversiot ohjelmistojen tarjoajilta. Kaikkien ohjelmistojen kokeiluversioilla tehtiin samantyyppinen yksinkertainen simulaatiomalli ja mallintamisen yhteydessä ohjelmistojen toimintoja pisteytettiin arviointitaulukon mukaan. Simulointiohjelmistot, niiden toiminnot sekä pisteytykset esiteltiin osaston johdolle ja esittelyn päätteeksi kahdeksi potentiaalisimmaksi ohjelmistoksi valittiin yhteisymmärryksessä FlexSim ja SIMUL8. Näille kahdelle ohjelmistolle pyydettiin kattavammat esittelyt ja tarjoukset ohjelmistojen tarjoajilta. Esittelyiden jälkeen suoritettiin lopullinen arviointi ja potentiaalisemmaksi ohjelmistoksi valittiin FlexSim.

Valinta oli hyvä, koska FlexSim mahdollistaa hyvin yksityiskohtaisen systeemimallintamisen ja sen visuaalisuustekniikat tarjoavat kattavat tilastolliset esitystavat sekä monipuoliset 3D-animaatiot. Näiden avulla simuloinnin tuloksia ja etenemistä voidaan esittää ymmärrettävästi eri kohderyhmille aina työntekijöistä ylempiin johtajiin saakka.

6.2 Systeemin komponentit

Kappaleessa 3.3 esiteltiin systeemin komponentit Banks et al. (2005) esittelemällä jaolla. Yhtäläistä jakoa käytetään myös tämän systeemin komponenttijaossa. FlexSimillä mallinnetun systeemin komponentit on listattu taulukkoon 2 ja siinä entiteetit on nimetty FlexSimin omin termein. Kertauksena kappaleesta 3.3: ”*Entiteetti on tarkastelun kohde systeemissä. Attribuutti on entiteetin ominaisuus. Aktiviteetti kuvaa määritellyn pituista ajan kestoa. Systeemin tila määritellään siten, että se on tarpeellinen kokoelma muuttujia, joilla voidaan kuvata systeemi missä ajankohdassa tahansa. Tapahtuma määritellään hetkellisenä tapahtumana, joka saattaa muuttaa systeemin tilaa.*”

Taulukko 2. Systeemin komponentit

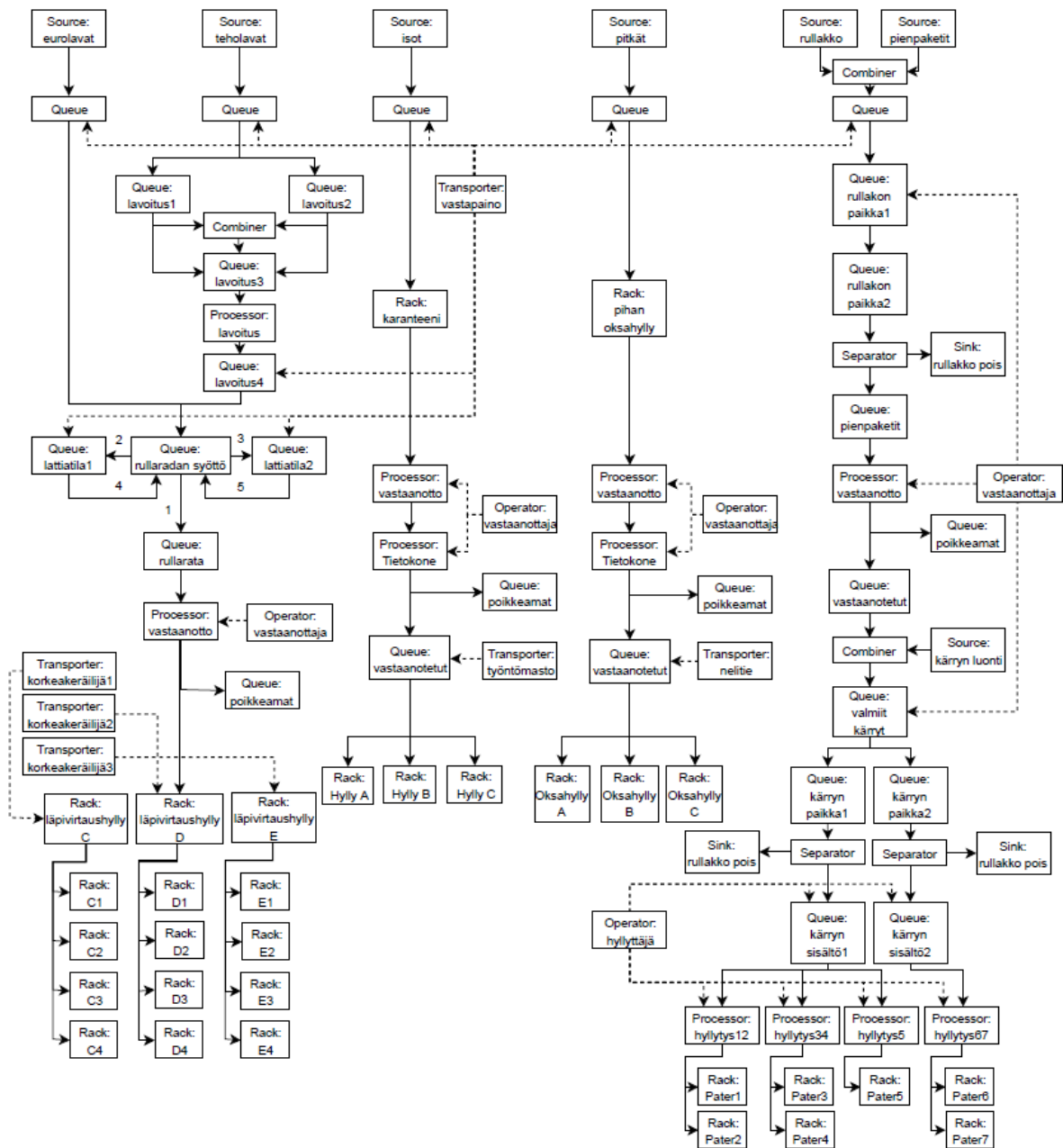
<i>Entiteetit</i>	<i>Attribuutit</i>	<i>Aktiviteetit</i>	<i>Tapahtumat</i>	<i>Tilamuuttujat</i>
Source	Kohteen luominen systeemiin	Kohteen luominen valinnan mukaan: Saapumisten välinen aika/ Saapumisaikataulu/ Saapumisjärjestys	Kohteen luominen	Luotujen kohteiden lukumäärä
Queue	Kapasiteetti	Kohteen hetkellinen säilöminen, Erän kokoaminen kohteista	Täydentäminen, Tyhjentäminen	Kohteiden lukumäärä
Rack	Kapasiteetti, Hyllyjen rakenne: hyllypaikkojen lukumäärä, hyllypaikkojen leveys, kohteiden lukumäärä per hyllypaikka, tasojen lukumäärä, tasojen korkeus	Kohteiden sijoittaminen hyllyyn valitun hyllytysstrategian mukaisesti	Kohteen hyllyttäminen, Kohteen poistaminen hyllystä	Kohteiden lukumäärä
Processor	Nopeus, Kapasiteetti	Työtehtävän suorittaminen	Työtehtävän aloittaminen ja valmistuminen	Työpisteiden tila (esim. varattu)
Combiner	Kohteiden yhdistely, Nopeus, Kapasiteetti	Pakkaaminen, Liittäminen, Erän kokoaminen	Työtehtävän aloittaminen, Tavoitemäärän saavuttaminen	Työpisteen tila (esim. varattu)

<i>Separator</i>	Kohteiden erottelu, Nopeus, Kapasiteetti	Pakkauksen purku, Kohteiden jakaminen	Työtehtävän aloittaminen, Tavoitemäärän saavuttaminen	Työpisteen tila (esim. varattu)
<i>Operator</i>	Kapasiteetti, Liikkumisnopeus, Nostonopeus, Purkunopeus	Määriteltyjen työtehtävien suorittaminen, Kohteiden siirto	Prioriteettina tärkeämpien tehtävien suorittaminen, Kohteiden siirtely, Työpäivä ja tauot	Resurssin tila (esim. varattu), Käsiteltyjen kohteiden lukumäärä, Työskentelyaika, Kuljettu matka
<i>Transporter</i>	Kapasiteetti, Liikkumisnopeus, Nostonopeus, Purkunopeus	Määritettyjen työtehtävien suorittaminen, Kohteiden siirto	Prioriteettina tärkeämpien tehtävien suorittaminen, Kohteiden siirtely, Työpäivä ja tauot	Resurssin tila (esim. varattu), Käsiteltyjen kohteiden lukumäärä, Työskentelyaika, Kuljettu matka
<i>Sink</i>	Kohteen poistaminen systemistä	Kohteen poistaminen	Kohteen poistaminen, Kierrätys tarvittaessa	Poistettujen kohteiden lukumäärä

Luotu simulaatiomalli sisältää lukuisia kohteita jokaisesta yllä mainitusta entiteetistä ja useille niistä on määritelty yksityiskohtaisia arvoja. Listaus koko simulaatiomallin yksityiskohdista on pitkä ja se löytyy liitteestä 2. Seuraavassa kappaleessa havainnollistetaan systeemiä komponenttikaavion avulla.

6.3 Systeemin komponenttikaavio

Mallinnettava systeemi sisältää useita edellisessä kappaleessa mainittuja entiteettejä. Kuvaan 17 on havainnollistettu systeemin komponenttikaavio FlexSimin termin. Kuvassa kiinteät nuolet ovat FlexSimin A-yhteyksiä ja katkoviivat S-yhteyksiä. A-yhteydessä edellisen entiteetin lähtöportti yhdistetään seuraavan entiteetin tuloporttiin. S-yhteydessä yhdistetään kahden entiteetin keskiportit. Kaikki komponenttikaavion yksityiskohdat löytyvät liitteestä 2.



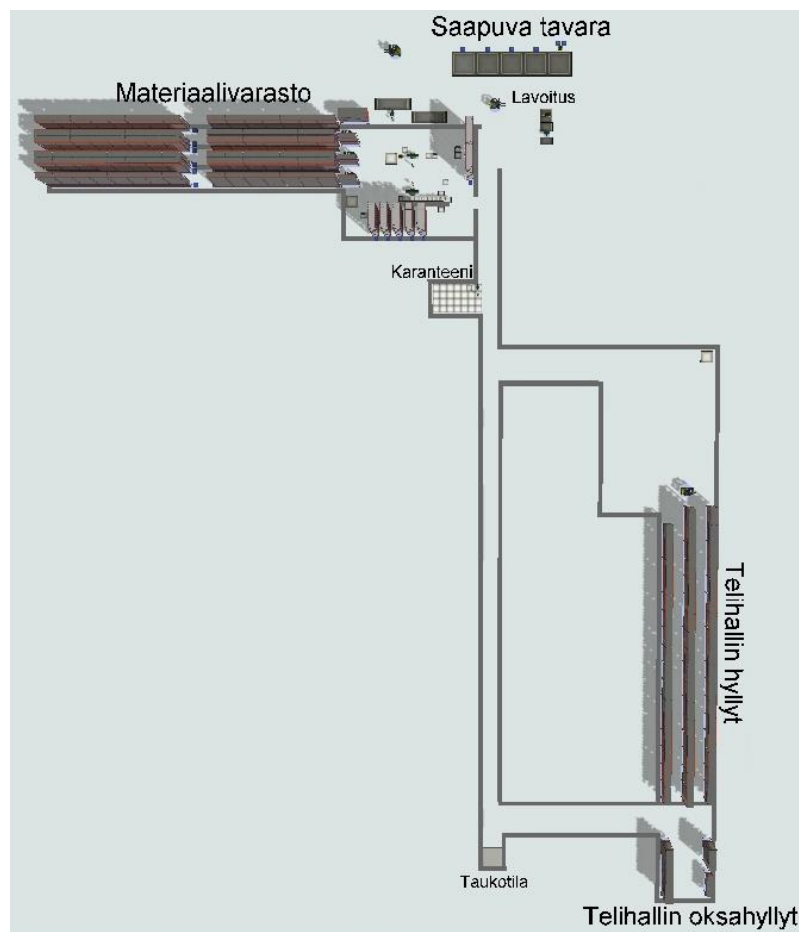
Kuva 17. Systemin komponenttikaavio

Systemin komponenttikaavioon ei ole lisätty eurolavojen ja pienpakettien vastaanotossa tapahtuvaa tietokoneella käyntiä, koska reaali maailmassa tietokone sijaitsee niin lähellä vastaanotopistettä, ettei ylimääräistä siirtymistä synny. Täten näissä kahdessa vastaanotossa mitatut vastaanottoajat sisältävät tietokoneella käynnin. Komponenttikaavioon ei ole myöskään lisätty hyllyjen aloitustäyttömääriä. Visuaalisuuden vuoksi ajanhetkellä $t=0$ simulaatiossa täytetään kaikki loppuvarastoinnin hyllyt 50 % täyttöasteella. Hyllyt täytetään vain 50 % täyttöasteelle, jotta 11 päivän saapuvat tavarat mahtuvat niihin, koska reaali maailmassa

tapahtuvaa keräilyä ei suoriteta simuloinnin aikana. Hyllyt täytetään satunnaiseen järjestykseen (pois lukien oksahyllyt), jotta simulointi vastaisi paremmin reaalia maailmaa. Oksahyllyt joudutaan täyttämään järjestyksessä seinästä pois päin.

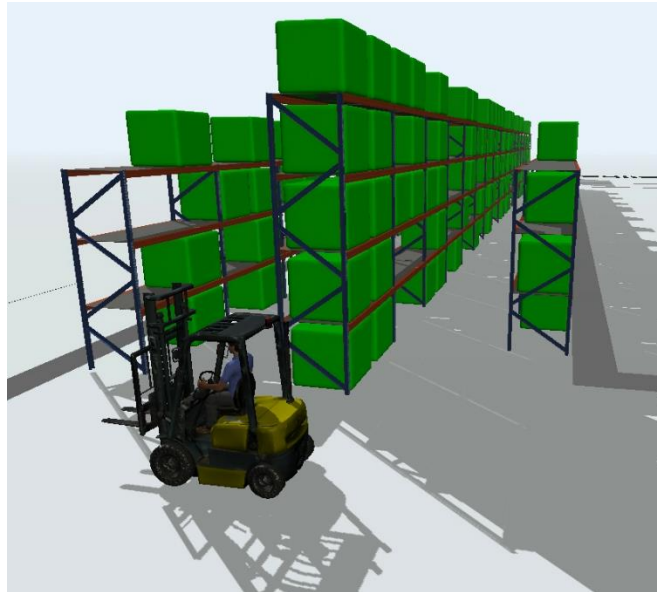
6.4 FlexSim-simulaatiomallin rakentaminen

Simulaatiomallin rakentaminen aloitettiin tuomalla koko palvelukeskuksen .dwg-tiedostomuotoinen (AutoCAD) pohjapiirustus FlexSimiin. Pohjapiirustuksen avulla kaikki fyysiset tilat ja objektit saatiin mallinnettua oikeille paikoille ja oikean kokoisiksi. Tätä on havainnollistettu kuvaan 18, jossa varaosatoimintojen toimialue on kuvattu ylhäältä päin. Pohjapiirustuksen hyödyntämisen vuoksi voidaan olla varmoja, että simulaatiomallin matkaetäisyydet vastaavat reaalia maailmaa. Pohjapiirustus poistettiin kuitenkin mallin rakentamisen jälkeen, koska se sisälsi visuaalisesti turhia yksityiskohtia.



Kuva 18. Varaosatoimintojen toimialue mallinnettuna FlexSimillä

Fyysisten tilojen ja objektien mallinnus onnistui FlexSimillä todella yksityiskohtaisesti. Kuvasta 19 voidaan havaita kuinka mallissa käytetyt objektit ovat oikeissa mittasuhteissaan ja todellisissa sijainneissaan. Puolestaan kuvassa 20 on nähtävillä kuinka yksityiskohtaisesti mallin työvaiheet voidaan suorittaa FlexSimillä. Kuvassa vastapainotrukki purkaa eurolavan kokoisia pakkauksia materiaalivaraston rullaradalle.



Kuva 19. Mallin objektit ovat oikeissa mittasuhteissaan ja todellisissa sijainneissaan



Kuva 20. Vastapainotrukki täyttämässä rullarataa materiaalivarastossa

Lisäksi FlexSimin 3D-objektien mallintaminen on lähes rajatonta. Ohjelmistosta löytyy kattava määrä eri 3D-objekteja ja niitä on mahdollisuus muokata myös itse. Lisäksi malliin voidaan tuoda ulkopuolisia 3D-objekteja, kuten kuvassa 21 näkyvä pumppukärky.

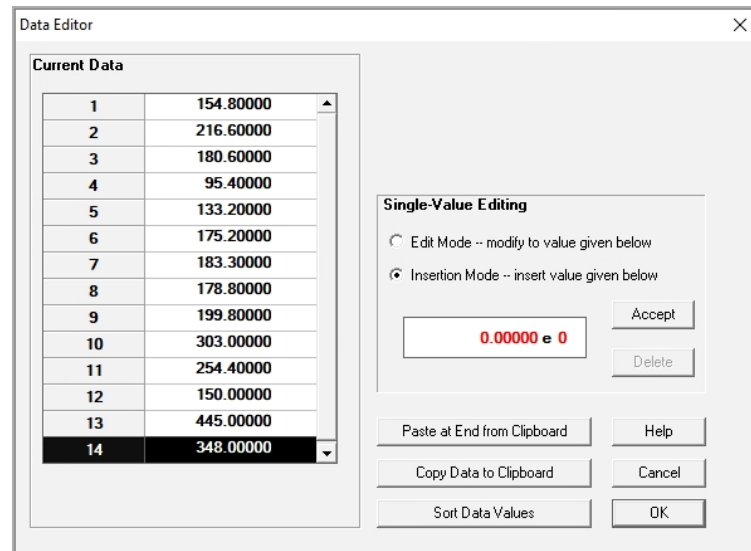


Kuva 21. Simulaatiomalliin tuotu pumppukärryn 3D-objekti

Kun simulaation fyysiset tilat ja kaikki objektit oli saatu mallinnettua, aloitettiin logiikan mallintaminen. Mallin logiikka perustuu täysin aiemmin mainittuun systeemin komponenttikaavioon (kuva 17). Fyysisten tilojen, objektien ja logiikan todellisuutta vastaava mallintaminen vaati huomattavan määrän yksityiskohtaisia arvoja ja niiden syöttämistä. Yksityiskohdat löytyvät liitteestä 2. Simulaatiomalli ei kuitenkaan vielä tässä vaiheessa ollut valmis, koska se ei sisältänyt vielä reaaliworldista kerättyä dataa.

Näin ollen yksityiskohtaisten arvojen syöttämisen jälkeen mallin syötettiin kaikki kerätty data. Työvoimaresurssien ja työvaiheiden manuaalisesta aikamittaamisesta saatu data syötettiin aiemmin mainitun mukaan joko keskiarvon tai valitun jakauman mukaan. Jakauman valitsemisessa käytettiin FlexSimistä löytyvää ExpertFitä. Kuvissa 22–24 esitetään vaiheet, jotka mittauskohteiden otoksille tehdään ExpertFitillä.

Kuvassa 22 yksittäisen mittauskohteen mittausarvot syötetään manuaalisesti Data Editoriin. Manuaalisen syöttämisen lisäksi on mahdollista myös lukea tietoja suoraan tiedostosta.



Kuva 22. ExpertFit vaihe 1: Datan manuaalinen syöttö

Datan syötön jälkeen ohjelma avaa tiivistelmän juuri syöteistä arvoista (kuva 23). Näitä tuloksia ei tarvitse ottaa talteen.

The screenshot shows the 'Data-Summary Table' window. It contains a table with two columns: 'Data Characteristic' and 'Value'. To the right of the table are buttons for 'Copy', 'Print', 'Help', and 'Done'.

Data Characteristic	Value
Source file	<edited>
Observation type	Real valued
Number of observations	14
Minimum observation	95.40000
Maximum observation	445.00000
Mean	215.57857
Median	181.95000
Variance	8,772.41874
Coefficient of variation	0.43446
Skewness	1.32456

Kuva 23. ExpertFit vaihe 2: Tiivistelmä syötetystä datasta

Datan syöttämisen jälkeen ohjelmalla tehdään joko automaattinen tai manuaalinen jakauman sovittaminen. Kuvasta 24 nähdään automaattisen sovittamisen tulokset aiemmin syötetylle datalle. Valitaan parhaat suhteellisuuspisteet saanut jakauma eli tässä tilanteessa Log-Logistic ja sen parametrit.

Automated-Fitting Results

Relative Evaluation of Candidate Models

Model	Relative Score	Parameters	
1 - Log-Logistic(E)	99.17	Location	62.24308
		Scale	130.33502
		Shape	3.05631
2 - Pearson Type V(E)	90.00	Location	8.60178
		Scale	1,147.53960
		Shape	6.52590
3 - Pearson Type V	87.50	Location	0.00000
		Scale	1,328.38809
		Shape	7.15273

31 models are defined with scores between 0.00 and 99.17

Absolute Evaluation of Model 1 - Log-Logistic(E)

Evaluation: Good
 Suggestion: Additional evaluations using Comparisons Tab might be informative.
 See Help for more information.

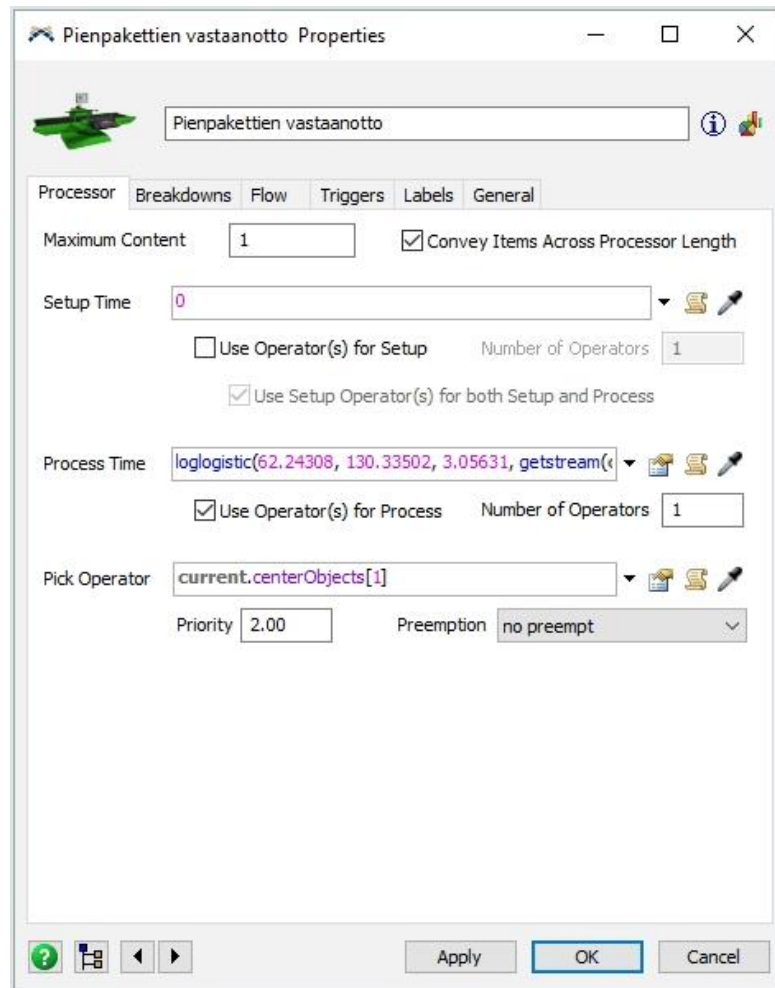
Additional Information about Model 1 - Log-Logistic(E)

"Error" in the model mean
 relative to the sample mean -3.13381 = 1.45%

Copy
 Print
 Help
 Done

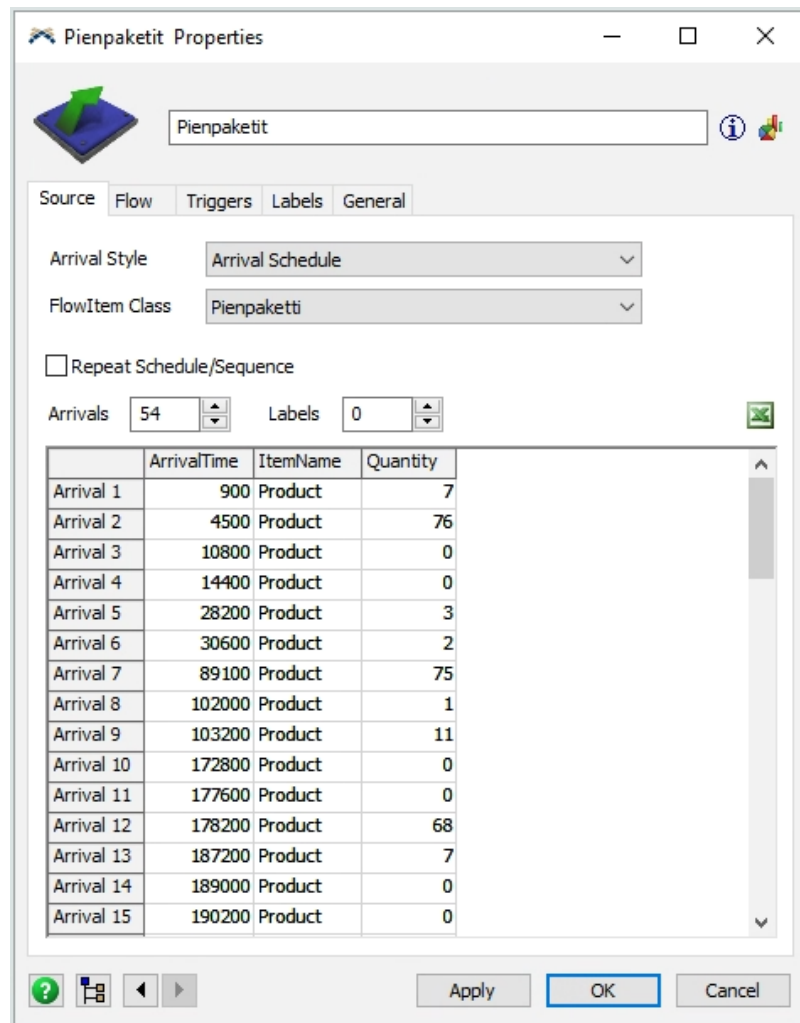
Kuva 24. ExpertFit vaihe 3: Jakauman automaattinen sovittaminen

Lopuksi valittu jakauma syötetään parametreineen haluttuun kohteeseen. Kuvassa 25 Log-Logistic-jakauma on syötetty parametreineen pienpakettien vastaanoton prosessiajaksi.



Kuva 25. ExpertFit vaihe 4: Valitun jakauman syöttäminen haluttuun kohteeseen

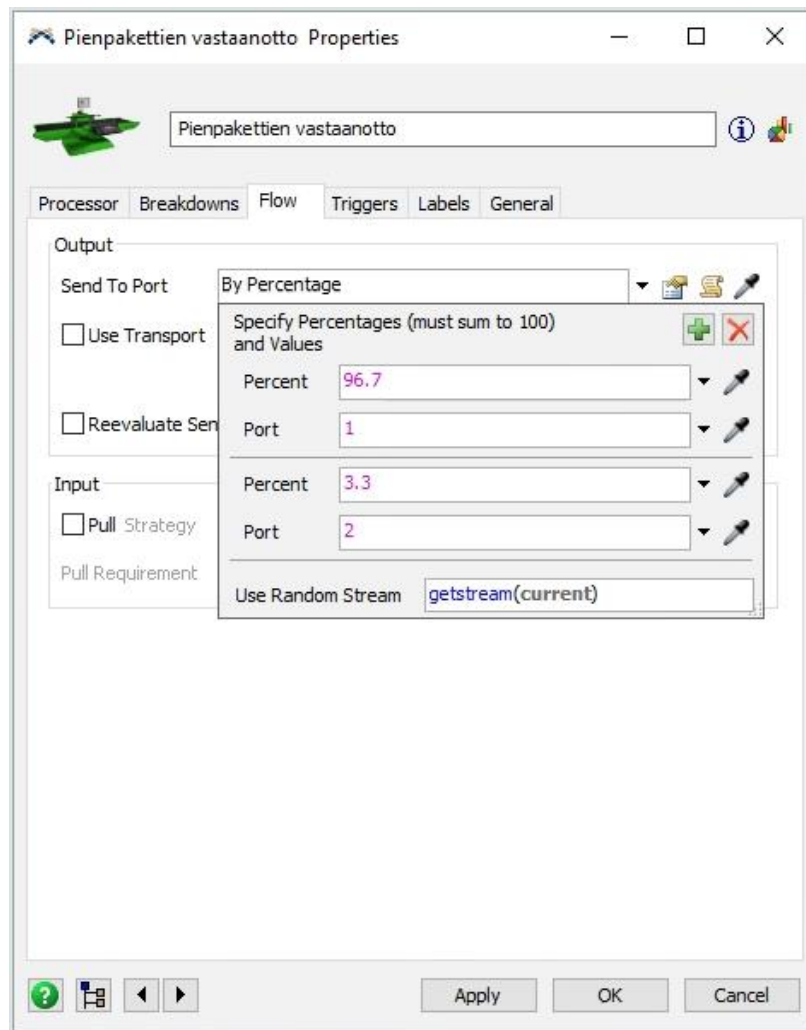
Kun työvoimaresurssien ja työvaiheiden arvot oli syötetty niille kuuluviin entiteetteihin joko keskiarvoisina tai todennäköisyysjakaumina parametreineen, siirryttiin rahtikirjaseurannan pariin, jossa data syötettiin ensin paperilta Exceeliin ja sitten FlexSimiin. Kuvassa 26 on nähtävillä pienpakettien Source, joka sisältää pienpakettien saapumisajat ja määrät koko rahtikirjaseurannan ajalta. Kuvasta tulee havaita, että saapuvan tavaran aikataulu on syötetty sekunneissa.



Kuva 26. Rahtikirjaseurannan datan syöttö

Kuvan ArrivalTime-sarakkeen ajat alkavat rahtikirjaseurannan ensimmäisestä päivästä kello 8. Täten ajanhetkellä $t=900$ (08:15) simulaatiomalliin syntyy seitsemän pienpakettia, ajanhetkellä $t=4500$ (09:15) syntyy 76 pakettia ja niin edelleen. Rahtikirjaseurannan viimeinen ArrivalTime on 894 600, joka tarkoittaa 11. päivän ajanhetkeä 16:30.

Datan syötön lopuksi syötettiin vielä poikkeamatapausten logiikka. Logiikka mallinnettiin niin, että 3,3 % todennäköisyydellä vastaanotettava kohde ohjautuu poikkeamaselvittelyyn (kuva 27). Poikkeamaselvittelyä ei suoriteta simulaatiomallissa, joten selvittelyyn ohjautuneet kohteet jäävät odottamaan omille lattiapaikoilleen.



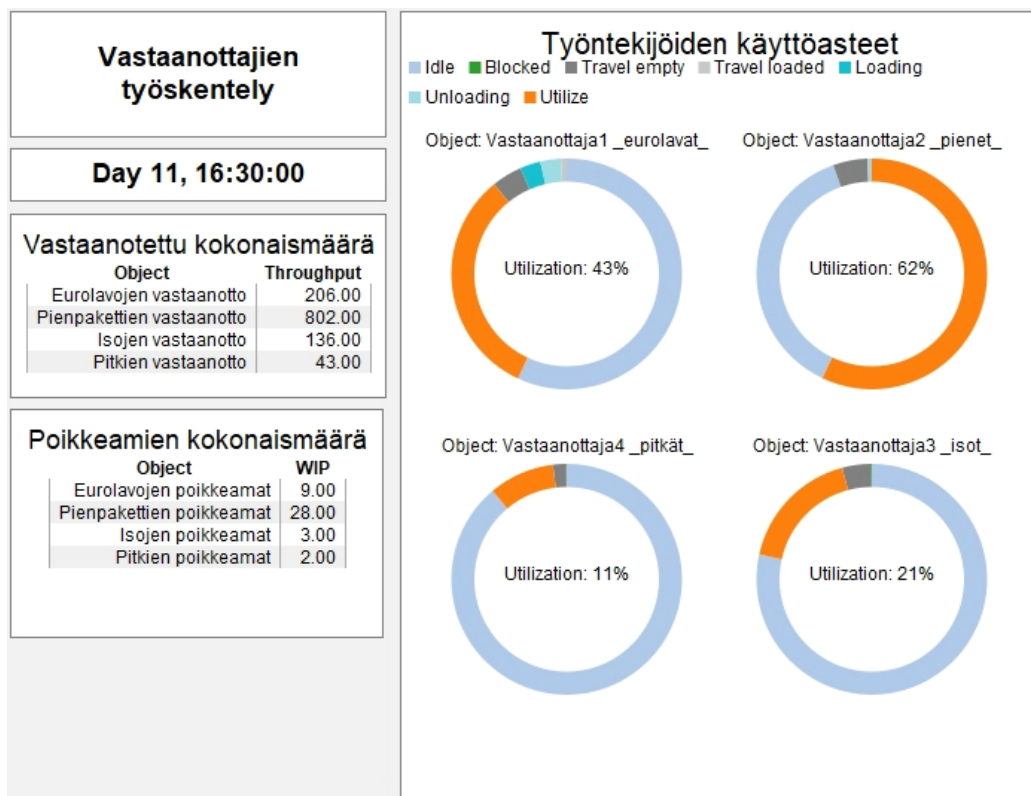
Kuva 27. Poikkeamaselvittelyyn ohjaaminen vastaanoton jälkeen

6.5 Testaukset, verifiointi ja validointi

Simulaatiomallin rakentaminen ja verifiointi vaativat paljon manuaalista testaamista ja virheenkorjausta. Kun mallin looginen rakenne alkoi esiintymään oikein, siihen voitiin syöttää todellisia lähtöparametreja. Lähtöparametrien syöttö on FlexSimissä pääosin yksinkertaista, mutta malliin jouduttiin tekemään vielä useita virheenkorjauksia lähtöparametrien syötön jälkeen, koska logiikassa ilmeni virheitä. Simulaatiota ajettiin aina samalla satunnaislukujonolla, jotta kaikki asiat ja virheet tapahtuisivat samoissa kohdissa ja näin virheiden tunnistaminen ja korjaaminen olisi loogisempaa ja helpompaa. Simulaatioajo oli pitkä (11 työpäivää), joten logiikan tarkastaminen ja virheiden löytäminen vei aikaa. Lopuksi

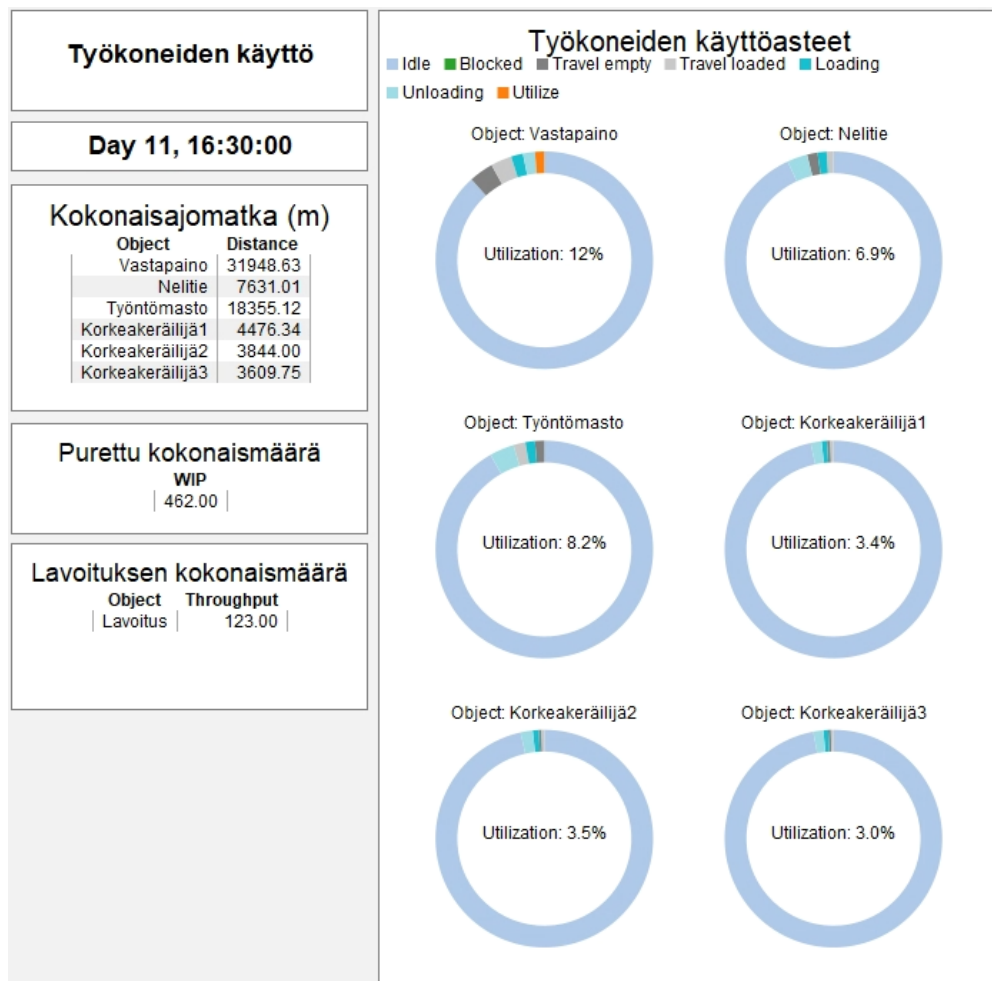
simulaatiomallin logiikka saatiin vastaamaan reaalia maailmaa riittävän hyvin ja verifiointi oli valmis.

Verifiointin jälkeen simulaatiomallia alettiin tutkimaan tarkemmin tulosten suhteen. Simulaatioajon rinnalle luotiin monipuoliset mittaristot (kuvat 28 ja 29), joiden tuloksien pohjalta validointi voitaisiin tehdä. Vastaanottajien työskentelyn mittaristoon (kuva 28) sisällytettiin vastaanottajien käyttöasteet sekä vastaanotettu kokonaismäärä. Näiden lisäksi seurattiin poikkeamien määrää, jotta voitiin varmistua, että poikkeamaselvittelyyn menee suhteessa oikea määrä tavaraa.



Kuva 28. Mittaristo vastaanottajien työskentelystä

Työkoneiden käytön mittaristoon (kuva 29) sisällytettiin myös käyttöasteen mittarit kaikille työkoneille. Lisäksi työkoneista seurattiin niiden ajomatkaa sekä vastapainotrukin purku- ja laivoitusmääriä.



Kuva 29. Mittaristo työkoneiden käytöstä

Nykytila oletuksineen, mittaristoineen ja tuloksineen esiteltiin osaston kehitystiimin johdolle. Simulaatiomallista ei tarkemmassa läpikäynnissä tunnistettu merkittäviä rakenteellisia tai tuloksellisia virheitä, joten validointi oli valmis. FlexSimin tarjoama monipuolinen animaatio ja visuaalisuus auttoivat niin verifiointissa kuin validoinnissa. Tulee kuitenkin huomioida, että malliin on tehty useita merkittäviä oletuksia, ja lisäksi mittausdata sisältää pienten otosten takia heikkolaatuista dataa, joten validointia ei ollut helppo tehdä. Voidaankin todeta, ettei näillä syöttötiedoilla voida päästä täysin todellisuutta vastaavaan lopputulemaan. Riittävän lähelle niillä kuitenkin päästään. Lisää validoinnin tuloksia saadaan seuraavassa kappaleessa, kun kehitystoimien tuloksia analysoidaan. Eli esimerkiksi, jos saapuvan tavaran määrää kasvatetaan, pitäisi jonojen pituuksien kasvaa ja samaan aikaan vastaanottajien sekä vastaanottopisteiden käyttöasteiden kasvaa.

7 KEHITTÄMISTOIMIEN TEKEMINEN SIMULOINTI-OHJELMISTOON

Nykytilan validoinnin yhteydessä kehitystiimin johdon kanssa pohdittiin, millaisia kehitystoimia FlexSimillä haluttaisiin tehdä varaosatoimintoihin ja kaksi teemaa nousi esille: volyymin kasvattaminen ja layout-muutos. Kuten kappaleen 5.1 lopussa mainittiin, varaosatoimintoihin on jo nyt tulossa uusi iso asiakkuus, joten volyymin kasvun simulointi on ajankohtaista. Tämän lisäksi haluttiin simuloida pitkien tuotteiden vastaanottoprosessia uudella layoutilla, jossa oksahyllyt siirretään lähemmäksi vastaanottoa. Pitkien tuotteiden vastaanotto on ollut vastaanottoprosessin ongelmakohta jo pidemmän aikaa johtuen oksahyllyjen kaukaisesta sijainnista telihallin toisessa päässä.

7.1 Volyymien kasvattaminen

Volyymien kasvattamisen simulointi aloitettiin tekemällä muutamia muutoksia mallin yksityiskohtiin. Kaikkien loppuvarastointihyllyjen kapasiteettia nostettiin reilusti ylös, jotta kasvavat tavaramäärät mahtuvat hyllyihin. Tilantarpeen vuoksi aloitustäyttöasteet poistettiin. Tämän jälkeen rahtikirjaseurannan saapuvan tavaran määrästä tehtiin laajempi taulukko FlexSimin Experimenter-toimintoon, missä saapuvan tavaran määrää kerrottiin eri kertoimilla. Kertoimiksi ja simulaatioajon skenaarioiksi valittiin 1,0x, 1,5x, 2,0x, 2,5x ja 3,0x (kuva 30). Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi pienpakettien kohdalla seuraavaa: jos nykytilassa pienpaketteja syntyy ajanhetkellä $t=4500$ (09:15) 76 kappaletta, 1,5-kertoimella niitä saapuu 114 kappaletta ja 2,0-kertoimella 152 kappaletta ja niin edelleen. Eli tavara saapuu samoina ajanhetkinä kuin rahtikirjaseurannassa, mutta nyt suurempina määrinä.

Simulation Experiment Control

Scenarios Performance Measures Experiment Run Optimizer Design Optimizer Run Optimizer Results Advanced

Variables [+] [-] [↑] [↓] Scenarios [+] [-] [←] [→] Choose default reset scenario: None

Variable	Variable	1,0x	1,5x	2,0x	2,5x	3,0x
Variable 271	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 1/Quantity	7	11	14	18	21
Variable 272	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 2/3	76	114	152	190	228
Variable 273	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 3/3	0	0	0	0	0
Variable 274	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 4/3	0	0	0	0	0
Variable 275	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 5/3	3	5	6	8	9
Variable 276	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 6/3	2	3	4	5	6
Variable 277	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 7/3	75	113	150	188	225
Variable 278	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 8/3	1	2	2	3	3
Variable 279	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 9/3	11	17	22	28	33
Variable 280	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 10/3	0	0	0	0	0
Variable 281	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 11/3	0	0	0	0	0
Variable 282	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 12/3	68	102	136	170	204
Variable 283	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 13/3	7	11	14	18	21
Variable 284	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 14/3	0	0	0	0	0
Variable 285	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 15/3	0	0	0	0	0
Variable 286	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 16/3	8	12	16	20	24
Variable 287	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 17/3	46	69	92	115	138
Variable 288	MODEL:/Pienpaketit>variables/schedule/Arrival 18/3	4	6	8	10	12

Kuva 30. Muuttujien valinta ja skenaarioiden luonti

Skenaarioiden jälkeen Experimenter-toimintoon luotiin erilaisia suorituskyvyn mittareita (kuva 31).

Simulation Experiment Control

Scenarios Performance Measures Experiment Run Optimizer Design Optimizer Run Optimizer Results Advanced

Name: Vastaanotettujen eurolavojen lkm

Label for Y-axis: Value

Performance Measure: Statistic by individual object

Select an object and statistic

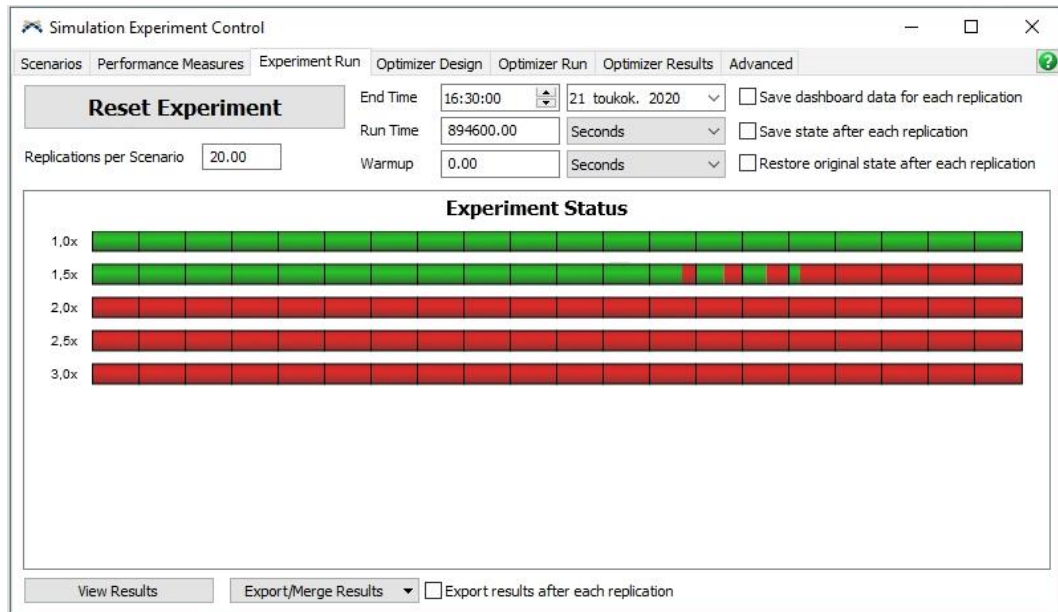
Object: Eurolavojen vastaanotto

Statistic: Output

- Vastaanotettujen eurolavojen lkm
- Vastaanotettujen pienpakettien lkm
- Vastaanotettujen isojen lkm
- Vastaanotettujen pitkien lkm
- Vastapainon ajomatka
- Työntömasson ajomatka
- Nelinten ajomatka
- Eurolavojen poikkeamat
- Pienpakettien poikkeamat
- Isojen poikkeamat
- Pitkien poikkeamat

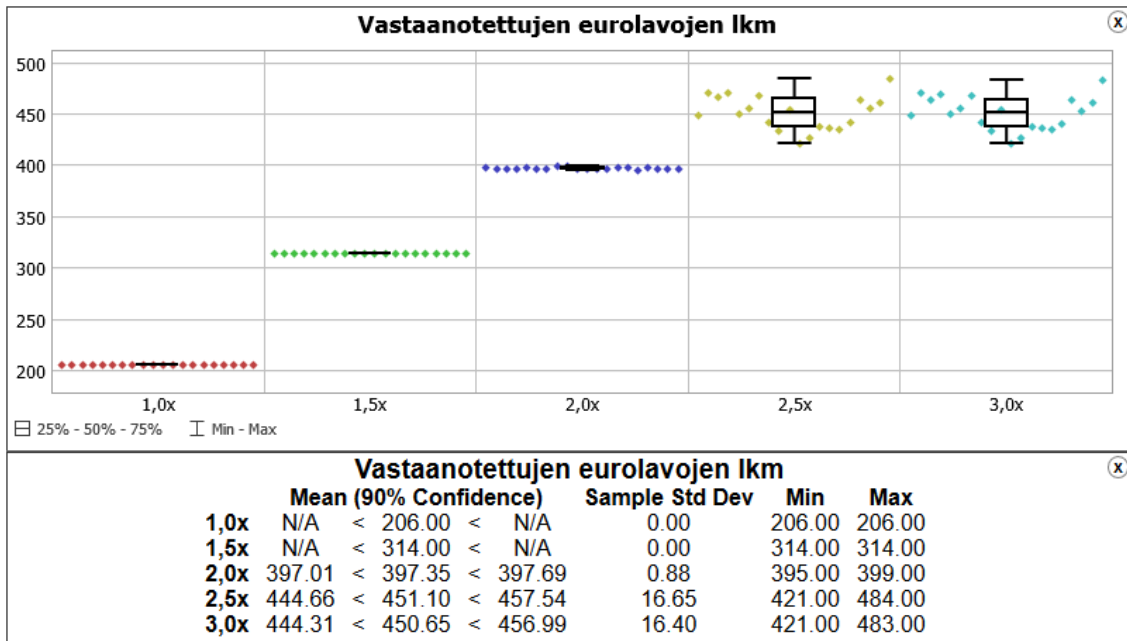
Kuva 31. Suorituskyvyn mittareiden luonti

Lopuksi valittiin ajon pituus ja kuinka monta kertaa eri skenaarioita toistetaan. Skenaarioajoissa kaikissa toistoissa on käytössä eri satunnaislukujen jonot, jotta vaihtelua ilmenisi lopputuloksissa. Tässä tilanteessa Experiment-ajon pituudeksi valittiin sama 11 työpäivän kokonaisuus eli 894 600 sekuntia ja toistomääräksi valittiin 20 toistoa (kuva 32).



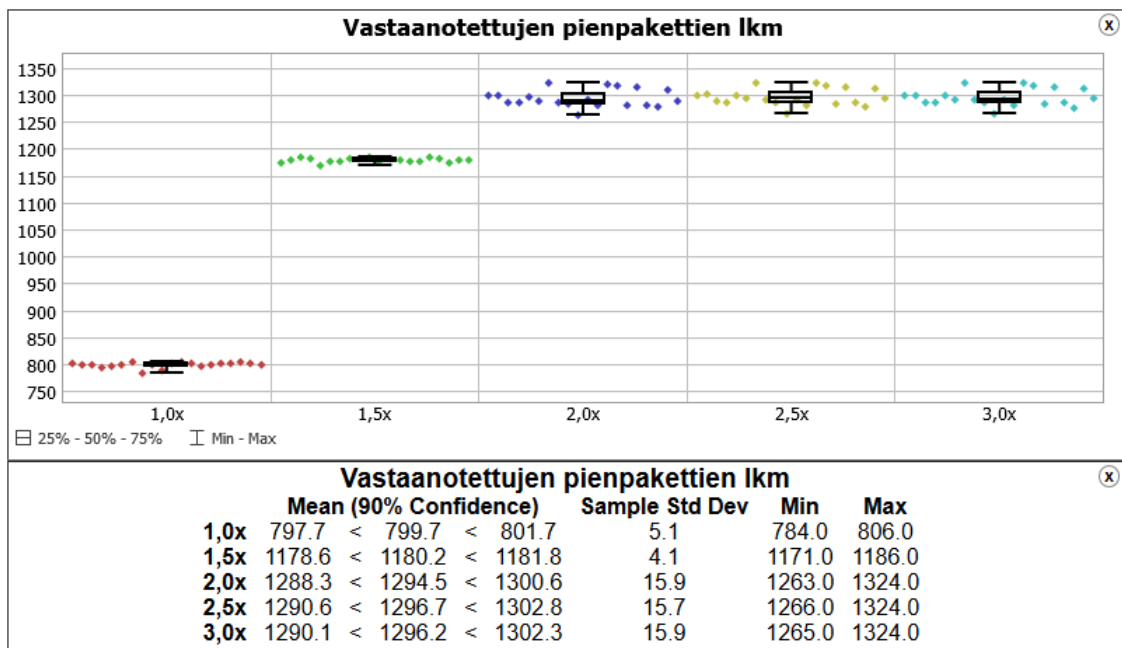
Kuva 32. Experiment-ajon valinnat ja seurantanäyttö

Experiment-ajon olennaisimmat löydökset käydään seuraavaksi lävitse, mutta kattavampi raportti on löydettävissä liitteestä 3. Liitteessä on huomioitava, että työkoneiden ajomatkat ovat metreissä ja muiden mittareiden yksiköt ovat kappalemääriä. Kuvassa 33 on vastaanotettujen eurolavojen määrä eri skenaarioissa. Kuvan y-akseli kuvastaa vastaanotettua määrää ja x-akseli eri volyymien skenaarioita. Kuvasta voidaan havaita, kuinka kutakuinkin kaikki eurolavat saadaan vastaanotettua vielä 2,0-kertoimen volyymillä ja variaatiota ei pääse syntymään. Puolestaan 2,5 ja 3,0-kertoimissa nähdään lähes identtiset tilanteet, joissa vastaanottopisteellä alkaa syntymään variaatiota ja kapasiteettiraja saavutetaan.



Kuva 33. Vastaanotettujen eurolavojen määrä eri skenaarioissa

Pienpakettien kohdalla tilanne on kuitenkin edellistä herkempi. Variaatiota alkaa syntyä jo 2,0-kertoimen volyymissä, joten kapasiteettiraja saavutetaan pienemmällä volyymin kasvulla (kuva 34). Kuvan y-akseli kuvaa vastaanotettujen pienpakettien määrää ja x-akseli eri volyymien skenaarioita.



Kuva 34. Vastaanotettujen pienpakettien määrä eri skenaarioilla

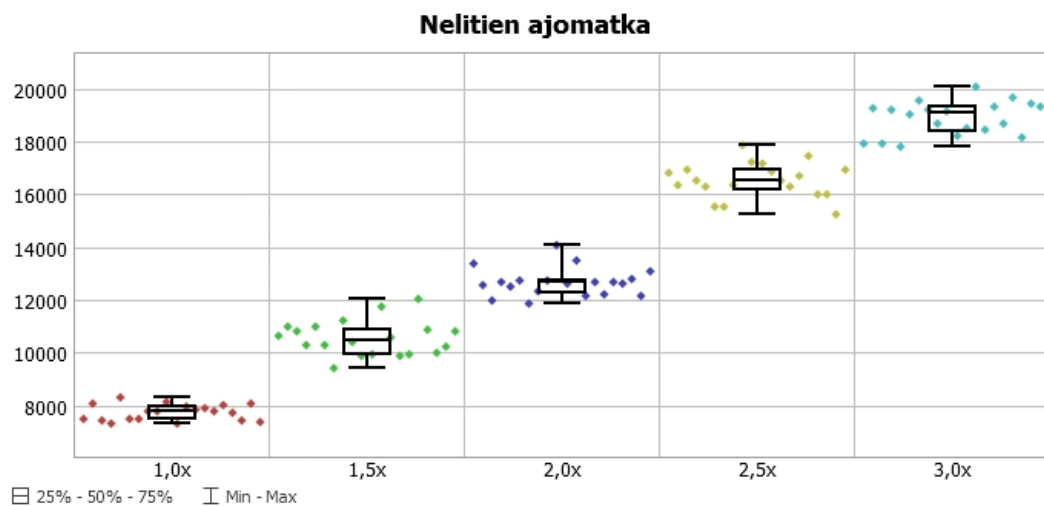
Yhteenvetona edellisistä voidaan todeta, että jo kaksinkertaisen volyymin kohdalla on tarve miettiä työvoiman resurssijärjestelyitä. Kaksinkertaisen volyymin tilanteessa esimerkiksi eurolavojen vastaanottaja (käyttöaste 88 %) voisi tukea pienpakettien vastaanottoa (käyttöaste 100 %). Käyttöasteet ovat kaksinkertaisella volyymillä kuitenkin jo teorian tasolla niin suuret, että materiaalivaraston vastaanottoihin (eurolavat, pienpaketit) tarvittaisiin kiinteästi lisää työvoimaa.

Työkoneiden kohdalla resurssit eivät voi täytyä näillä volyymien kasvuilla, koska reaali maailmassa niitä käytetään vastaanoton työtehtävien lisäksi paljon muihinkin tehtäviin, ja siksi niiden käyttöasteet ovat lähtökohtaisesti alhaisempia kuin vastaanottajien. Volyymien kasvu aiheuttaa kuitenkin poikkeavaa käyttöasteen kasvua eri konetyyppien välillä. Taulukkoon 3 on merkitty vastapainon, nelitien ja työntömaston käyttöasteet nykyisellä ja kaksinkertaisella volyymillä, sekä muutosprosentti. Huomioitavaa taulukosta on, että sen tulokset ovat yhdestä simulaatioajosta, jolloin käytössä on ollut vain yksi satunnaislukujono. Taulukosta voidaan kuitenkin havaita, kuinka volyymien kaksinkertaistuksessa vastapainon käyttöaste kasvaa reilusti yli kaksinkertaiseksi. Tämä johtuu teholavojen kasvavasta määrästä, joka puolestaan lisää laivoitustyötä merkittävästi. Toisin kuin vastapainon kohdalla, nelitien ja työntömaston kohdalla nähdään laskua. Laskua tapahtuu näiden kahden kohdalla myös ajomatassa, joten lasku käyttöasteessa selittyy etenkin nelitien kohdalla sillä, että kuljetetaan kerralla enemmän tuotteita väliavarastointipaikoista loppuvarastohyllyihin. Työntömaston kohdalla laskua selittää myös hyllytyksen nopeampi suoriutuminen. Hyllytyksen nopeampi suoriutuminen tarkoittaa, että työntömaston hyllytysajan tilastollinen jakauma on tuottanut nopeampia aikoja tässä kaksinkertaisen volyymien simulaatioajossa.

Taulukko 3. Työkoneiden käyttöasteet nykyisellä ja kaksinkertaisella volyymillä

	1,0x	2,0x	Muutos-%
Vastapaino	12,0 %	26,0 %	117 %
Nelitie	6,9 %	12,0 %	74 %
Työntömasto	8,2 %	15,0 %	83 %

Tarkasteltavilla työkoneilla (vastapaino, nelitie, työntömasto) ajomatkat kasvavat melko tasaisesti volyymin kasvun myötä, mutta nelitien ajomatkoissa on havaittavissa kahteen muuhun poiketen enemmän variaatiota. Tämä variaatio johtuu siitä, että nelitielle on määritetty suurempi kapasiteetti (4 kpl), ja skenaarioiden variaatioista voidaan nähdä, kuinka kapasiteettia on saatu hyödynnettyä kussakin ajossa (kuva 35). Kuvan y-akseli kuvaa nelitien ajomatkaa metreissa ja x-akseli eri volyymien skenaarioita. Nykytilassa (kerroin 1,0x) pitkiä tuotteita saapuu sen verran vähän ja sen verran harvoin, että usein viedään vain saapuneet 2-3 kappaletta kerralla, jolloin kapasiteettia ei saada hyödynnettyä täysin. Vastapainon ja työntömaston tiedot on löydettävissä liitteestä 3.

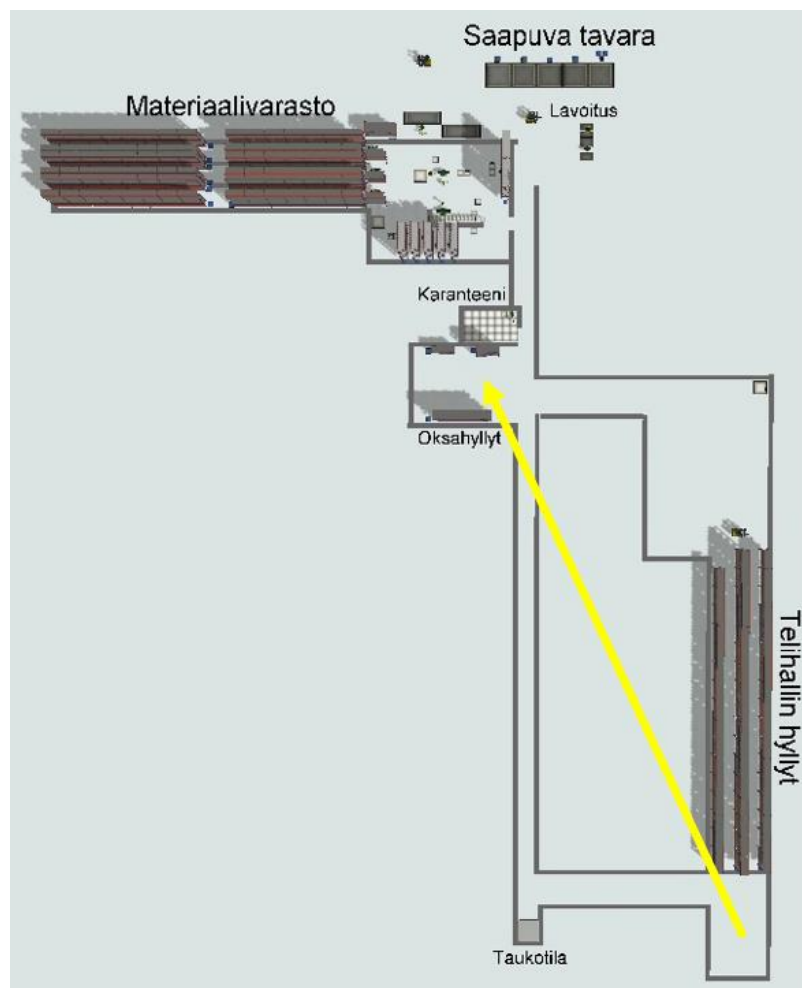


Kuva 35. Nelitien ajomatka metreissa eri skenaarioilla

Volyymin kasvun simulointia tulee kuitenkin peilata kriittisesti reaali maailmaan. Todellisuudessa kaikki väli- ja loppuvarastointitilat eivät riittäisi, jos volyymi todellisuudessa moninkertaistuisi. Esimerkiksi kaksinkertaisen volyymin simuloinnissa eräänä päivänä saapuu 40 isoa lavaa, vaikka karanteenin kapasiteetti on vain 28. Simuloinnilla voidaan kuitenkin tutkia saapuvan tavaran virtausta parametrimuutosten avulla ja näin voidaan tunnistaa todelliset pullonkaulat. Tämän jälkeen voidaan tutkia varastointikapasiteettien muutostarpeita.

7.2 Layout-muutos

Layout-muutoksessa oksahyllyt siirretään nykyisestä sijainnista karanteenin alapuolelle (kuva 36). Reaalimaailmassa siellä on 20 metriä syvä ja 15 metriä leveä tila, jonne oksahyllyt olisi mahdollista sijoittaa. Layout-muutoksen simuloinnista toivottiin, että nähtäisiin kuinka nelitien käyttöaste ja ajomatka muuttuvat layoutin muutoksen myötä.



Kuva 36. Oksahyllyjen siirto karanteenin viereen

Layout-muutoksen myötä 11 työpäivän ajomatkat putoavat 7,6 kilometristä 2,8 kilometriin, mikä tarkoittaa 63 % laskua. Nelitien käyttöaste ei kuitenkaan putoa aivan samassa suhteessa. 11 työpäivän simulaatioajossa käyttöaste on nykytilassa 6,9 % ja layout-muutoksen jälkeen se on 5,0 %, mikä tarkoittaa 28 % laskua. Nykytilaan verraten käyttöasteen putoaminen ei ole niin rajua, koska pääosa koneen käyttöajasta menee muuhun kuin ajamiseen. Uudessa layoutissa

(nykytilan arvot ilmoitettuna suluissa) nelitiellä menee 85 % (62 %) käyttöajasta pakettien kyytiinnostoon ja hyllyttämiseen, jolloin ajamisen osuus on vain 15 % (38 %).

Layout-muutos on kuitenkin pitkässä juoksussa järkevä kehitystoimi. Layout-muutoksen myötä nelitien ajomatka vähenee 439 metriä ja käyttöaika 9 minuuttia työpäivää kohden. Jos tämä kerrotaan 243 työpäivällä, vuositason säästöä tulee 107 kilometriä ja 4,6 työpäivää. Tämän lisäksi layout-muutos tulee tuomaan kehitystä ja säästöjä myös keräilyn ja lähetyksen puolelle.

Layout-muutoksen simuloinnin jälkeen tehtiin vielä yksi kokeilu. Volyymiä kaksinkertaistettiin ja tulokset toivat tärkeitä piirteitä esiin uudesta layoutista. Myös uuden layoutin kanssa kokonaisajomatka pienenee suhteessa volyymin kasvuun, koska nelitie voi kuljettaa kerralla enemmän. Nelitien kantokapasiteetin paremmalla hyödyntämisellä ei uudessa layoutissa kuitenkaan voiteta käyttöasteen suhteen paljoo. Nykyvolyymillä nelitien käyttöaste olisi uudessa layoutissa 5,0 % ja kaksinkertaisella volyymillä 9,8 %. Muutos olisi 96 %, eli vain hieman alle kaksinkertaisen määrän. Käyttöaste ei putoa, koska ajamisessa voitettu aika menee kyytiin nostoon, lattialle laskuun hyllyjen edessä ja itse hyllytykseen. Yhteenvetona voidaan todeta, että jos oksahyllyt ovat näinkin lähellä vastaanottoa, käyttöastetta tulkittaessa on melkein sama viedä pitkät paketit yksitellen hyllyyn, kuin pyrkiä viemään kerralla enemmän. Työkoneen käyttövoiman kustannukset pitäisi kuitenkin tutkia ennen lopullisen johtopäätöksen tekemistä.

8 SIMULOINTITYÖKALUN SOVELTUVUUDEN JA SIMULOINNIN KANNATTAVUUDEN ARVIOINTI

Tässä kappaleessa arvioidaan simulointityökalun soveltuvuutta ja simuloinnin kannattavuutta tämän diplomityön simulointiprojektin pohjalta. Kappaleessa arvioidaan ensin simulointityökalun soveltuvuutta teollisuuspalveluiden kehitysorganisaation käyttöön keskittymällä simulointityökalujen ominaisuuksiin ja mahdollisuuksiin. Tämän jälkeen paneudutaan simuloinnin kannattavuuteen. Simulointiprojektin kaikista vaiheista on kerätty niihin käytetyt työtunnit, jotta nähtäisiin kuinka paljon simulointiprojektin läpivienti vie todellisuudessa resursseja. Kerätyt työtunnit eivät sisällä diplomityön kirjoittamiseen käytettyä aikaa. Lisäksi kappaleessa esitellään FlexSim-ohjelmiston lisenssikustannukset, koska ne ovat työtuntien rinnalla merkittävässä osassa, kun arvioidaan simulointiprojektin läpiviennin kannattavuutta yrityksen näkökulmasta. Tuloksia arvioitaessa tulee huomioida, että simulointiprojekti vietiin läpi ensikertalaisen toimesta, jolloin projektin läpiviennille ei ollut valmista pohjaa eikä FlexSim-sovelluksesta ollut sen suurempaa käyttökokemusta.

8.1 Simulointityökalun soveltuvuus teollisuuspalveluiden kehitysorganisaatioon

Teollisuuspalveluiden kehitysorganisaatiossa oli pohdittu simuloinnin mahdollisuuksia ja simulointityökalun lisäämistä osaksi operatiivista kehittämistä. Kehitysorganisaatiossa on vahva Lean Six Sigma -prosessikehittämisen osaaminen, minkä seurauksena työn standardoinnista ja työntutkijan hyödyntämisestä on tullut osa operatiivista kehitystoimintaa. Henkilöstöllä on siis jo valmiiksi osaamista, jota simulointiin vaaditaan. Tähän lukeutuvat muun muassa tilastolliset menetelmät ja niiden analysointi. Kehitysorganisaatiolla on siten vahvat lähtökohdat aloittaa erilaisten simulointiprojektien läpivienti.

Simulointityökalun avulla kehitysorganisaatiossa olisi mahdollisuus tarkastella kehityskohteita monipuolisemmin. Simulointi mahdollistaa monimutkaistenkin systeemien tehokkaan mallintamisen. Nykyisillä työkaluilla tarkastelu voi olla kapeaa ja keskittyä vain pieneen määrään eri muuttujia. Kaikkien keskinäisriippuvuuksien ja monimutkaisuuden mallintaminen nykyisillä työkaluilla voi olla hankalaa, ja analyysiä saattaa ymmärtää vain itse tekijä. Simulointityökalujen avulla monimutkaisuus on paremmin hallittavissa.

Nykyaikaiset simulointityökalut mahdollistavat lähes rajattomat mallinnusmahdollisuudet. Esimerkiksi FlexSimissä toimintoja on lähtökohtaisesti todella paljon, mutta käyttäjä voi lisäksi rakentaa omia aliprosesseja tai kirjoittaa omaa koodia, minkä seurauksena mallintamisen skaala voidaan nähdä lähes rajattomana. Tämä vaatii kuitenkin vahvaa osaamista sekä FlexSimistä että sen käyttämästä C++ -ohjelmointikielestä.

Teollisuuspalveluiden kehitysorganisaation ja teollisen tuotantoympäristön näkökulmasta simulointi mahdollistaa tehokkaan mallintamisen ainakin layout-, resurssi- ja volyymimuutoksissa. Simulointi on siten mainio väline erilaisiin rasiustesteihin ja pullonkaulojen tutkimiseen. Varastosimulaation kohdalla simulointi mahdollistaa muutosten kokeilun esimerkiksi hyllyjen järjestykseen, henkilöstön lukumäärään tietyssä vuorossa tai saapuvan tavaran määrään tietyssä aikana. Lisäksi simulointi mahdollistaa suurempien kokonaisuuksien, kuten uusien varastotilojen ja työvaiheiden, mallintamisen. Nykytilan pohjalta mallinnettuun rakenteeseen voidaan tehdä muokkauksia täysin riskittä, kunhan toimivasta nykytilasta validoitu simulaatiomalli on varmuuskopioitu ennen muokkauksia.

Simulointityökaluista saatavien tulosten esittely ei rajaudu vain yhden ajon tuloksiin, vaan työkaluista löytyvillä skenaariotoiminnoilla tarkasteluun voidaan ottaa useita skenaariovaihtoehtoja ja niitä voidaan ajaa niin monta kertaa kuin käyttäjä haluaa. Ainakin FlexSimillä skenaariotoiminnon ajaminen on ketterää ja kattavia tuloksia saadaan nopeallakin aikataululla. Jokaisen skenaarion jokaisessa ajossa käytetään eri satunnaislukujonoa, jolloin tulokset ovat lähtökohtaisesti aina toisistaan poikkeavia. Näin ollen tulokset sisältävät reaali maailmassakin tapahtuvaa vaihtelua. Skenaarioajojen vaihtelu voidaan esittää esimerkiksi Box plot -kuvaajien avulla, mikä on tuttua muun muassa Lean Six Sigma -prosessikehittämisestä.

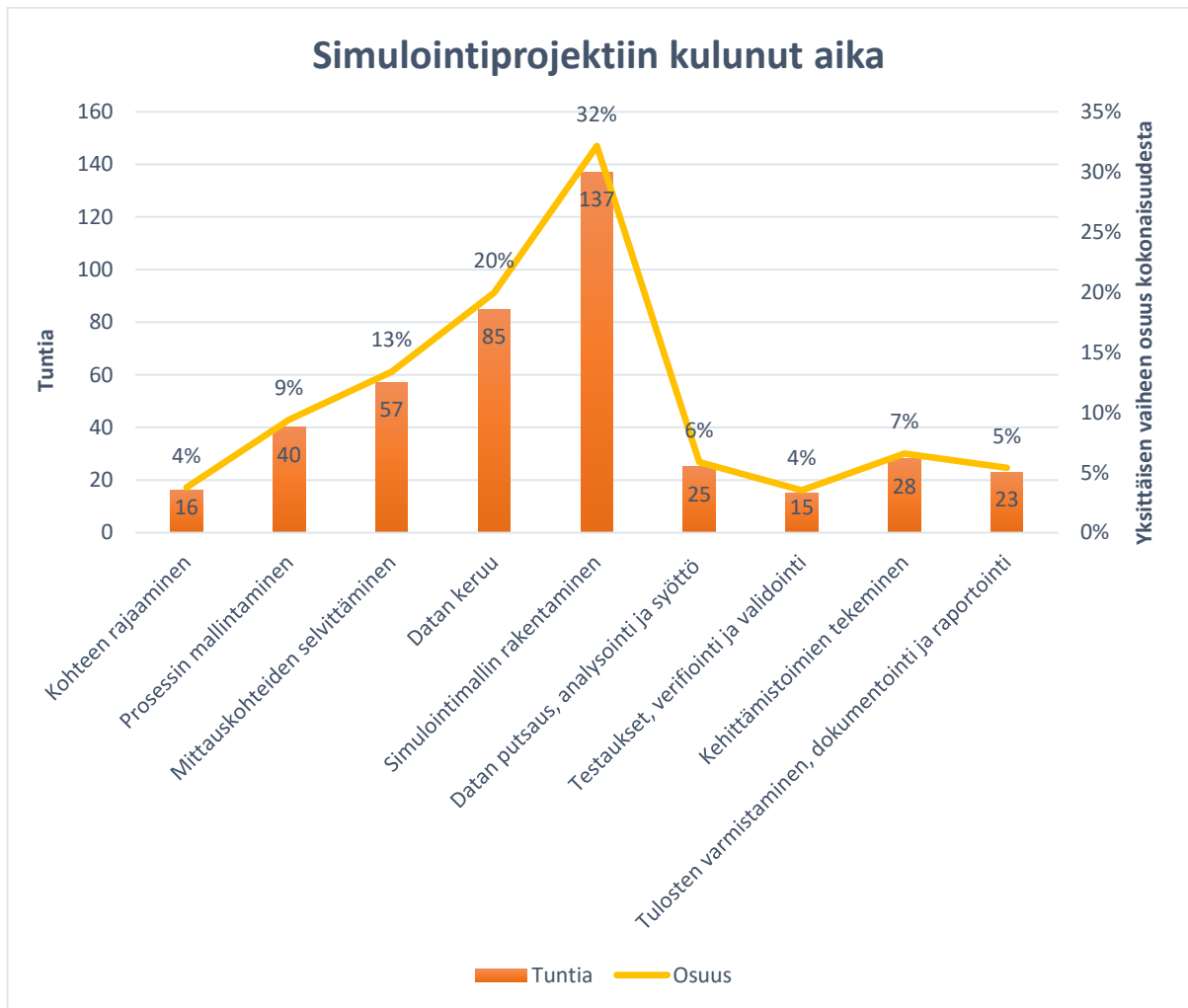
Oikean simulointityökalun valinta riippuu siitä, millaisia simulointiprojekteja kehitysorganisaatiossa halutaan tehdä. Markkinoilta löytyy useita juuri teollisuuspalveluiden käyttöön sopivia tapahtumapohjaisen simuloinnin työkaluja. Tässä työssä käytetty FlexSim on yksi monipuolisimmista tähän käyttöön sopivista työkaluista. Etenkin sen visuaalisuustekniikat hakevat vertaistaan. Tulee kuitenkin vieläkin tarkemmin tutkia, mitä ominaisuuksia simulointityökalulta halutaan. Markkinoilta löytyy useita edullisempia työkaluja, joissa

simulointi ja skenaarioiden tutkiminen onnistuu lähes samalla tavalla, mutta visuaalisuuteen ei ole panostettu FlexSimin tavoin. Teollisuuspalvelut toimivat tiiviissä yhteistyössä asiakkaiden kanssa, joten työkalulla tulee pystyä esittämään tuloksia vakuuttavasti ja yksinkertaisesti. Asiakkaan ei tarvitse ymmärtää simulaatiomallin logiikkaa, mutta tulokset tulee olla helposti esitettävissä ja niiden luotettavuus tulee olla helposti todistettavissa. Muut visuaalisuustekniikat, kuten 3D-mallintaminen, on hyvä lisä, muttei välttämättömyys.

Simulointityökalun käyttö ja sen osaaminen saattavat helposti rajautua vain muutamille henkilöille, jos käytössä olevan työkalun lisensointivaihtoehto ja hinta ovat FlexSimin kaltaisia. FlexSimissä yhden lisenssin hankinta oikeuttaa käyttöön yhdellä tietokoneella. Voi toki olla mahdollista käyttää yhtä lisenssiä eri aikaan eri tietokoneilla, mutta lähtökohtaisesti jokaisella käyttäjällä olisi hyvä olla oma lisenssi. Lisenssin hinta voi kuitenkin olla rajoittava tekijä. Hinnasta kerrotaan lisää kappaleessa 8.3. Toimintamalli, jossa vain yksi henkilö käyttää tiettyä työkalua, poikkeaa kehitysorganisaation nykyisestä toiminnasta, jossa kaikki käyttävät samoja työkaluja ja henkilöillä on mahdollisuus neuvoa toisiaan työkalujen käytössä. FlexSimin tilanteessa ohjelmiston käyttöosaaminen saattaa rajautua pahimmassa tapauksessa vain yhdelle henkilölle, mikä on huono tilanne tiimityöskentelyn kannalta.

8.2 Simulointiprojektiin kulunut aika

Simulointiprojektiin kulunutta aikaa seurattiin tunnin tarkkuudella reilun kolmen kuukauden ajalta. Projektiin käytetty aika toimii hyvänä suuntaviivana resurssitarpeista, kun simulointiprojektia viedään yrityksessä ensimmäisen kerran lävitse. Suurimmat resurssit kuluivat tässä simulointiprojektissa mittauskohteiden selvittämiseen, datan keruuseen ja simulaatiomallin rakentamiseen. Luonnollisesti projektiin käytettävä aika lyhenee jatkossa, kun projektin läpivienti on selkeää ja FlexSimin käyttö on tuttua. Kuvasta 37 nähdään projektin kronologinen etenemisjärjestys ja eri osa-alueisiin käytetyt tunnit sekä niiden osuus kokonaistuntimäärästä. Kokonaisuudessaan tämä simulointiprojekti vei 426 tuntia.



Kuva 37. Simulointiprojektin kronologinen eteneminen ja käytetyt tunnit

8.3 FlexSim-ohjelmiston kustannukset

FlexSim-ohjelmiston lisensoinnille on erilaisia vaihtoehtoja riippuen lisenssien määrästä ja sopimuksen pituudesta. Karkeasti voidaan sanoa, että lisenssin hintahaarukka on 12 500 ja 21 500 euron välillä vuodessa. Tämän tarkemmat hintatiedot eivät ole julkista tietoa. Ilmoitettu hintahaarukka on peräisin FlexSimin Pohjoismaiden jakelijalta vuodelta 2020.

Kuten voidaan huomata, ohjelmistolisenssi on yritykselle merkittävä hankinta. Simulointia aloittava yritys aloittaa luultavimmin yhdellä lisenssillä ja lyhyellä sopimuksella, jolloin hinta on hintahaarukan yläpäästä. Simulointitoiminnan laajentuessa lisenssejä saatetaan tarvita lisää, jolloin yksittäisen lisenssin hinta halpenee.

8.4 Yhteenveto simuloinnin kannattavuudesta

Kuten jo edellä ilmeni, simulointiprojektiin kului tässä diplomityössä 426 tuntia. Simuloinnin kohteena ei ollut investointikohde tai muu yksittäinen kehityskohde, vaan simulointiprojektin tavoitteena oli tutkia simulointityökalun soveltuvuutta ja simulointiprojektin vaatimuksia. Näin ollen tämän simulointiprojektin tuloksia ei ole syytä peilata kannattavuuden kanssa, vaan on syytä pohtia, millaisia simulointiprojekteja kohdeyrityksen kannattaisi jatkossa tehdä, jotta toiminta olisi taloudellisesti järkevää.

Ennen simuloinnin kannattavuuden pohdintaa on syytä jakaa simulointiprojektit kahteen tyyppiin:

1. Manuaalisen prosessin simulointi, joka vaatii manuaaliset mittaukset, koska järjestelmädataa ei ole saatavilla
2. Automatisoidun (tai standardoidun) prosessin simulointi, joka vaatii vain osittain manuaalisia mittauksia, koska järjestelmädataa voidaan hyödyntää suurelta osin

Edellä mainittu jako on tärkeää tunnistaa, jotta simulointiprojektin resursseihin ja tuloksiin osataan varautua oikein. Ensimmäinen simulointiprojektityyppi on samanlainen, joka tässä diplomityössä suoritettiin, eli pääosa työvaiheista on ihmisten suorittamaa. Haasteena tässä simulointiprojektityypissä on, että ihmisten tekemä manuaalinen työ sisältää paljon vaihtelua ja data voi olla helposti epäluotettavaa, koska kaikkea vaihtelua ei saada tapahtua datan keruuhetkellä. Ylipäätään tässä simulointiprojektityypissä datan keruu vie paljon aikaa, ja otokset jäävät herkästi pieniksi, koska mittaaminen syö paljon resursseja. Pienet otokset vaihtelevuutta sisältävistä mittauskohteista tekevät datasta huonolaatuista ja se näkyy simuloinnin epäluotettavina ja vaihtelevina tuloksina. Tämän tyyppisissä simulointiprojekteissa resurssitehokkuuteen tulee kiinnittää huomioita.

Toisessa simulointiprojektityypissä prosessit ovat reaali maailmassa vakaita eivätkä sisällä epämääräistä vaihtelua. Lisäksi data on pitkälti saatavilla valmiiksi järjestelmistä, jolloin sitä on enemmän saatavilla ja sen keruu on helpompaa toteuttaa. Jos datan keruussa säästetään aikaa, toiminnasta saadaan resurssitehokkaampaa. Koska prosessit ovat tässä tyyppisissä vakaita ja dataa on lähtökohtaisesti enemmän, simuloinnin tuloksia voidaan pitää luotettavimpina ja

niitä voidaan käyttää päätöksenteossa tehokkaammin. Esimerkkinä tästä tyyppistä voisi olla kuljettimilla varustettu pakettien automaattinen lajittelu.

Lisäksi, huolimatta kumman tyyppistä simulointiprojektia kohdeyritys harkitsee tekevänsä, simulointi tulee jatkossa tehdä tarkemmin rajatusta kohteesta, jolloin pienimmätkin yksityiskohdat simuloidaan tarkasti ja oletuksia tehdään mahdollisimman vähän. Tällöin myös datan keruukohteita on vähemmän, jolloin yksittäisistä mittausotoksista saadaan suurempia ja tarkempia. Tämän diplomityön simulointiprojekti oli liian laaja simuloitavaksi täydellisesti annetuilla resursseilla, ja siksi useita oletuksia jouduttiin tekemään ja otokset jäivät pieniksi. Näillä on suora vaikutus lopputuloksen laatuun.

Seuraavaksi vertaillaan näiden kahden simulointiprojektityypin vaatimia resursseja, kun simulointiprojekti viedään läpi tulevaisuudessa (taulukko 4). Huomioitavaa on, että taulukon tuntimäärät ovat tekijän omia arvioita. Lähtötietoina simulointiprojektin vertailulle on, että suorittavalla henkilöllä olisi vastaavat taidot kuin tämän diplomityön simulointiprojektin itsenäisestä läpiviennistä kehittyä. Taulukon läpikäynnin jälkeen pohditaan simulointiprojektin kannattavuutta kokonaisuutena.

Taulukko 4. Arvioitu määrä simulointiprojektiin kuluva ajasta tulevaisuudessa

Vaihe	Alkuperäinen	Manuaalinen prosessi	Automatisoitu (tai standardoitu) prosessi
Kohteen rajaaminen	16	16	16
Prosessin mallintaminen	40	35	35
Mittauskohteiden selvittäminen	57	40	40
Datan keruu	85	115	55
Simulaatiomallin rakentaminen	137	90	90
Datan putsaus, analysointi ja syöttö	25	20	20
Testaukset, verifiointi ja validointi	15	15	15
Kehittämistoimien tekeminen	28	20	20
Tulosten varmistaminen, dokumentointi ja raportointi	23	23	23
Yhteensä tuntia	426	374	314
Muutos		-12,2 %	-26,3 %

Taulukosta voidaan havaita kuinka useimmissa vaiheissa tuntimäärät ovat joko samoja tai vain hieman pienempiä, kun verrataan alkuperäisiä tunteja näihin kahteen tyyppiin. Eroa syntyy kuitenkin juuri eniten aikaa vievissä vaiheissa eli mittauskohteiden selvittämisessä, datan keruussa ja simulaatiomallin rakentamisessa. Mittauskohteiden selvittäminen helpottuu sitä mukaa kun kokemusta simulointiprojekteista karttuu. Näin käy myös simulaatiomallin rakentamisen kanssa, kun FlexSimin käyttötaidot kehittyvät. Datan keruu on puolestaan poikkeus kahteen edelliseen. Jos jatkossa halutaan tehdä laadukas simulointiprojekti, tulee se manuaalisen prosessin kohdalla viemään paljon enemmän aikaa kuin nyt läpiviedyssä simulointiprojektissa. Puolestaan automatisoidun (tai standardoidun) prosessin kohdalla tilanne on päinvastainen ja datan keruuseen tulee kulumaan huomattavasti vähemmän aikaa.

Karkeana yhteenvetona resurssitarpeista voidaan todeta, että hieman kokemusta kerryttänyt simulointiasiantuntija voi viedä kattavan simulointiprojektin lävitse noin kahdessa kuukaudessa riippuen manuaalisen mittaamisen määrästä. Kannattavuuden näkökulmasta simulointiprojektin taloudellinen tulos tulee täten olla suurempi kuin työntekijän kahden kuukauden palkkakulut sekä simulointiohjelmiston lisenssin hankintahinta kyseiselle ajalle. Palkkakulut kahden kuukauden ajalle voisivat karkeasti arvioituna olla 10 000 €. Summa sisältää kahden kuukauden kuukausipalkan (4000 €/kk) sekä arvioidun työnantajakulujen kertoimen 1,25. Tähän lisätään simulointiohjelmiston lisenssin hankintahinta, joka esimerkiksi FlexSimin kohdalla on kahden kuukauden ajalta hintahaarukan 2083 € ja 3583 € väliltä (vuosihinta 12 500–21 500 €). Näin ollen yhteissummaksi saadaan 12 083–13 583 €.

Yllä olevista luvuista voidaan huomata, että ohjelmistolisenssin osuus yhteissummasta on suhteellisen pieni (17–26 %), ja FlexSim on kuitenkin yksi markkinoiden monipuolisimmista tapahtumapohjaisen simuloinnin ohjelmistoista. Lisäksi simulointiohjelmiston investoinnilla kehitysprojekteista voidaan saada paljon monipuolisempia ja tehokkaampia, ja samalla myös huomattavasti tuottoisampia. Investoinnit ovat kuitenkin aina tapauskohtaisia, joten jää kohdeyrityksen omalle vastuulle tehdä siihen liittyvät kannattavuus- ja elinkaarilaskelmat.

Simulointiprojektin kesto voi olla huomattavasti lyhyempi ja resurssitehokkaampi, jos kohteen aiempaa simulaatiomallia voidaan käyttää uudestaan. Aiemmin mallinnettua rakennetta voidaan muokata sitä mukaa kun muutoksia tapahtuu reaali maailmassa tai vaihtoehtoisesti

mallilla voidaan simuloida erilaisia muutoksia. Kun systeemi on mallinnettuna valmiiksi, siihen voidaan kokeilla muutoksia nopeallakin aikataululla eikä aikaa kulu mallin perusteelliseen rakentamiseen. Tämä on tärkeä asia teollisuuspalveluiden kehitysorganisaation näkökulmasta, koska asiakkuudet ovat pitkiä ja lähtökohtaisesti suuria. Tällöin hyvin mallinnettua systeemiä voidaan kehittää jatkuvasti ajan myötä ja tarvittavia muutoksia voidaan tehdä nopeallakin aikataululla, jolloin tuloksiakin saadaan nopeasti.

Lisäksi on hyvä huomioida, että aina ei simuloida pieniä kehitysprojekteja, vaan välillä on tarve simuloida suurempia kokonaisuuksia kuten esimerkiksi uutta varastoinvestointia. Tällöin simulointiprojekti kestää pidempään, mutta myös sen tuomat taloudelliset säästöt voivat kasvaa suuremmiksi. Ja kuten teoriassakin mainittiin, monimutkaisten systeemien kohdalla tehty käytännön kokeilu ja erehdys tulee yleensä arvokkaintakin simulaatioajoa kalliimmaksi.

8.5 Jatkoimenpiteet ja suositukset

Jos teollisuuspalveluiden kehitysorganisaatio päättää ottaa simulointityökalut osaksi muita kehitystyökaluja, simuloinnista tulee tehdä jonkun henkilön pääasiallinen työtehtävä. Tällä tavoin lisenssikustannukselle saadaan vastinetta, asiakaskohteiden simulaatiomalleja mallinnetaan enemmän ja simulaatio-osaaminen kehitysorganisaatiossa kasvaa. Huolimatta siitä, mikä simulointityökalu valitaan, tulee sillä tehdä simuloiteja niin manuaalisiin kuin automaattisiin prosesseihin, jotta työssä esitetyille väitteille näiden eroavaisuudesta saadaan varmistusta. Jatkokehitysehdotuksena olisi hyvä tutkia, miten simulointia voisi käyttää tulevaisuudessa uusien teknologioiden (AI, Big Data, IoT, RPA) tukemana.

9 YHTEENVETO

Teollisuuspalveluiden kehitysorganisaatiossa oli pohdittu simuloinnin mahdollisuuksia ja simulointityökalun lisäämistä osaksi operatiivista kehittämistä. Tämän työn päätavoitteena oli selvittää, onko simulointi soveltuva työkalu juuri Transval teollisuuspalveluiden kehitysorganisaation käyttöön. Lisäksi tavoitteena oli tapaustutkimuksen pohjalta tutkia simulointiprojektin resurssivaatimuksia ja sen taloudellista kannattavuutta kyseisen kehitysorganisaation näkökulmasta.

Työn teoriaosuudessa käsiteltiin kahta erillistä teemaa: teollisen tuotantoympäristön materiaalinohjausta ja simulointia. Teollisen tuotantoympäristön materiaalinohjauksen ominaispiirteet esiteltiin ensin lyhyesti, minkä jälkeen avattiin logistiikan ulkoistamista ja varaston layout-suunnittelua. Tämän jälkeen kirjallisuuskatsaus keskittyi kokonaisuudessaan simuloinnin aihepiiriin. Simuloinnin perusteorian ja käsitteistön lisäksi työssä esiteltiin useita tieteellisiä julkaisuja logistiikan simuloinnista. Näiden julkaisujen tarkoituksena oli avata simuloinnin monimuotoisuutta ja sovellettavuutta työn tapaustutkimusta varten.

Työn empiriaosuudessa keskityttiin simuloitavaan kohteeseen, tarkemmin sanottuna teollisuuspalveluiden Hyvinkään palvelukeskuksen varaosatoimintojen vastaanottoprosessiin. Empiriaosuus koostui nykytilan analysoinnista, simuloinnista ja tulosten pohjalta tehdyistä johtopäätöksistä. Nykytilan analysoinnissa varaosatoimintojen henkilöstöä haastateltiin ja kohteena oleva vastaanottoprosessi mallinnettiin luettavaan muotoon. Tämän jälkeen selvitettiin mitä dataa simulaatiomalli tarvitsee ja suoritettiin datan keruu. Koska yrityksessä ei oltu hyödynnetty simulointia aiemmin, osana diplomityötä tehtiin kattava tapahtumapohjaisten simulointiohjelmistojen vertailu ja soveltuvimman ohjelmiston valinta. Käytettäväksi ohjelmistoksi valikoitui FlexSim. Simulointivaiheessa vastaanottoprosessi mallinnettiin kokonaisuudessaan FlexSimiin, minkä jälkeen kerätty data käsiteltiin ja syötettiin malliin. Malliin muodostettiin myös mittaristo validointia varten. Seuraavaksi simulaatiota ajettiin, saatuja tuloksia analysoitiin ja mallin toimivuus sekä luotettavuus tarkistettiin. Validoinnin jälkeen malliin tehtiin kaksi erilaista kehitystoimea: volyymin kasvattaminen ja layout-muutos. Volyymien kasvattamisessa hyödynnettiin FlexSimin skenaariotoimintoa ja layout-muutos tehtiin muuttamalla nykytilan layout-rakennetta.

Työn tärkein johtopäätös on lähtökohtaisesti se, että simulointityökalut soveltuvat teollisuuspalveluiden käyttöön hyvin. Simulointityökalut mahdollistavat kehityskohteiden monipuolisen tarkastelun sekä ohjelmistosta riippuen myös lähes rajattomat mallinnusmahdollisuudet. Teollisuuspalveluiden kehitysorganisaation ja teollisen tuotantoympäristön näkökulmasta simulointi mahdollistaa tehokkaan mallintamisen ainakin layout-, resurssi- ja volyymimuutoksissa. Simulointi on siten mainio väline muutosten ja pullonkaulojen tutkintaan sekä erilaisiin rasiustesteihin. Simulointityökalujen tulosten esittely ei rajaudu vain yhden ajon tuloksiin, vaan työkaluista löytyvillä skenaariotoiminnoilla tarkasteluun voidaan ottaa useita eri skenaariovaihtoehtoja. Skenaarioajoissa työkalut hyödyntävät eri satunnaislukujonoja, joten mitä enemmän ajoja suoritetaan, sitä enemmän tuloksiin saadaan reaali maailmassakin tapahtuvaa vaihtelua.

Markkinoilta löytyvien tapahtumapohjaisen simuloinnin työkalujen välillä on eroja niin ominaisuuksissa kuin hinnoissakin, ja oikean simulointityökalun valinta riippuu siitä, millaisia simulointiprojekteja kehitysorganisaatiossa halutaan jatkossa tehdä. Teollisuuspalvelut toimivat tiiviissä yhteistyössä asiakkaiden kanssa, joten työkalulla tulee pystyä esittämään tuloksia vakuuttavasti ja yksinkertaisesti. Asiakkaan ei tarvitse ymmärtää simulaatiomallin logiikkaa, mutta tulokset tulee olla helposti esitettävissä ja niiden luotettavuus tulee olla helposti todistettavissa. Muut visuaalisuustekniikat, kuten 3D-mallintaminen, on hyvä lisä, muttei välttämättömyys.

Simulointityökalun tehokas käyttäminen vaatii paljon resursseja teollisuuspalveluiden kehitysorganisaatiolta. Eniten resursseja kuluu työajan muodossa itse simulointiprojektiin, jossa suurin osa ajasta kuluu mittauskohteiden selvittämiseen, datan keruuseen ja simulaatiomallin rakentamiseen. Simulointiprojektiin kuluvaan aikaan vaikuttaa merkittävästi se, simuloidaanko manuaalista vai automatisoitua prosessia. Manuaalisessa prosessissa pääosa työvaiheista on ihmisten suorittamaa ja se sisältää paljon vaihtelua. Tämä lisää datan keruun työtä, koska keruu joudutaan suorittamaan manuaalisesti mittaamalla ja siihen kuluu väistämättä paljon aikaa. Riskinä on, että mittauskohteiden otokset jäävät pieniksi ja mittauskohteiden kaikkea vaihtelua ei tapahdu mittausten aikana. Näin ollen data on huonolaatuista ja simuloinnin tulokset ovat epäluotettavia. Automatisoidun (tai standardoidun) prosessin simulointi poikkeaa edellisestä merkittävästi. Siinä prosessit ovat lähtökohtaisesti

vakaita eivätkä sisällä epämääräistä vaihtelua. Lisäksi data on pitkälti saatavilla valmiiksi järjestelmistä, jolloin sitä on enemmän saatavilla ja sen keruu on helpompaa toteuttaa. Jos datan keruussa säästetään aikaa, toiminnasta saadaan resurssitehokkaampaa. Koska prosessit ovat tässä tilanteessa vakaita ja dataa on lähtökohtaisesti enemmän, simuloinnin tuloksia voidaan pitää luotettavimpina ja niitä voidaan käyttää päätöksenteossa tehokkaammin.

Karkeana yhteenvetona resurssitarpeista voidaan todeta, että hieman kokemusta kerryttänyt simulointiasiantuntija voi viedä kattavan simulointiprojektin lävitse noin kahdessa kuukaudessa riippuen kohteen rajauksesta sekä manuaalisen mittaamisen määrästä. Kannattavuuden näkökulmasta simulointiprojektin taloudellinen tulos tulee täten olla suurempi kuin työntekijän kahden kuukauden palkkakulut sekä simulointiohjelmiston lisenssin hankintahinta kyseiselle ajalle. Tulee kuitenkin huomioida, että simulointiin ei aina kulu näin paljon aikaa, jos kohteen aiempaa simulaatiomallia voidaan käyttää uudestaan. Aiemmin mallinnettua rakennetta voidaan muokata sitä mukaa kun muutoksia reaali maailmassa tapahtuu tai vaihtoehtoisesti mallilla voidaan simuloida erilaisia kehityskohteita. Kun systeemi on mallinnettuna valmiiksi, siihen voidaan kokeilla erilaisia muutoksia nopeallakin aikataululla eikä aikaa kulu mallin perusteelliseen rakentamiseen. Huolimatta siitä, kauan simulointiprojekti kestää, FlexSimin kohdalla simulointiohjelmiston lisenssin osuus palkkakulujen ja lisenssin yhteissummasta on 17–26 % riippuen lisenssien määrästä ja sopimuksen pituudesta. Osuus on suhteessa pieni, vaikka kyseessä on yksi markkinoiden monipuolisimmista tapahtumapohjaisen simuloinnin ohjelmistoista.

Ohjelmistolisenssin hinta voi kuitenkin olla rajoittava tekijä, koska siitä aiheutuu vuositasolla merkittävä kustannus. FlexSimissä yhden lisenssin hankinta oikeuttaa käyttöön yhdellä tietokoneella, joten lisenssejä ei voida hankkia kaikille. Toimintamalli, jossa vain yksi henkilö käyttää tiettyä työkalua, poikkeaa kehitysorganisaation nykyisestä toiminnasta, jossa kaikki käyttävät samoja työkaluja ja henkilöillä on mahdollisuus neuvoa toisiaan työkalujen käytössä. FlexSimin tilanteessa ohjelmiston käyttöosaaminen saattaa rajautua pahimmassa tapauksessa vain yhdelle henkilölle, mikä on huono tilanne tiimityöskentelyn kannalta. Kehitysorganisaation tulee täten punnita, panostetaanko simulointiin kunnolla vai jatketaanko kehitysprojektien läpivientiä ilman simulointia.

10 LÄHTEET

Bangsow, S. 2012. Use Cases of Discrete Event Simulation: Appliance and Research. Springer. Berlin. 373 s.

Banks, J., Carson II, J. S., Nelson, B. L., Nicol, D. M. 2005. Discrete-Event System Simulation. 4th edition. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River (NJ). 608 s.

Banks, J. & Gibson, R. 1997. Don't simulate when...10 rules for determining when simulation is not appropriate. *IIE Solutions*. Vol. 29, nro. 9, s. 30-32.

Burinskienė, A. 2015. Optimising Forklift Activities in Wide-Aisle Reference Warehouse. *International Journal of Simulation Modelling*. Vol. 14, nro. 4, s. 621-632.

Burinskienė, A., Davidavičienė, V., Raudeliūnienė, J., Meidutė-Kavaliauskienė, I. 2018. Simulation and order picking in a very-narrow-aisle warehouse. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*. Vol. 31, nro. 1, s. 1574-1589.

Burnett, D. & LeBaron, T. 2001. Efficiently modeling warehouse systems. *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*. s. 1001-1006.

Clements, K., Sweeney, K., Tremont, A., Muralidhara, V., Kuhl, M. 2016. Evaluation of warehouse bulk storage lane depth and ABC space allocation using simulation. *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*. s. 2239-2249.

Frazelle, E. 2002. World-Class Warehousing and Material Handling. McGraw-Hill Education. New York. 256 s.

Gagliardi, J., Renaud, J., Ruiz, A. 2007. A simulation model to improve warehouse operations. *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*. s. 2012-2018.

Garcia, M. L., Centeno, M. A., Penaloza, G. 1999. A simulation of the product distribution in the newspaper industry. *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*. s. 1268-1271.

Carson, Y. & Maria, A. 1997. Simulation optimization: methods and applications. *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*. s. 118-126.

Goodsel, C. A. & Van Kley, T. J. 2000. Inventory management simulations at cat logistics. *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. s. 1185-1190.

Gourdin, K. 2001. Global Logistics Management: A Competitive Advantage for the New Millennium. Reprinted. Blackwell Publishers Ltd. Oxford. 299 s.

Haverila, M., Uusi-Rauva, E., Kouri, I. & Miettinen, A. 2009. Teollisuustalous. Infacs Oy. Tampere. 498 s.

Hokkanen, S. & Karhunen, J. 2014. Johdatus logistiseen ajatteluun. 7. painos. Sho Business Development Oy. Kangasniemi. 434 s.

Ingraham, L., Solomon, C., Lowe, B. 2005. Analysis and Improvement of Enterprise Logistics Processes using Simulation-Based Methodologies. *IEEE Autotestcon*. s. 690-697.

Jayaraman, A., Gunal, A. 1997. Applications of discrete event simulation in the design of automotive powertrain manufacturing systems. *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*. s. 758-764.

Karrus, K. 2003. Logistiikka. 3.-4. painos. WS Bookwell Oy. Juva. 419 s.

Khan, S., Dweiri, F., Chaabane, A. 2016. Managing warehouse inventory: A simulation based case study. *11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM'16*.

Kotusevski, G. & Hawick K. 2009. A Review of Traffic Simulation Software. *Res. Lett. Inf. Math. Sci.* Vol. 13, s. 35-54.

Law, A. 2015. *Simulation Modeling and Analysis*. 5th edition. McGraw-Hill Education. New York. 776 s.

Ma, X., Yin, Y., Liu, T. 2011. The simulation and optimizing of different distribution strategies for the distribution centre based on Flexsim. *2011 IEEE International Conference on Automation and Logistics*. s. 201-204.

Macro, J. & Salmi, R. 2002. A simulation tool to determine warehouse efficiencies and storage allocations. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*. s. 1274-1281.

Richards, G. 2011. *Warehouse Management: A complete guide to improving efficiency and minimizing costs in the modern warehouse*. Kogan Page Ltd. London. 324 s.

Ritvanen, V., Inkiläinen, A., Von Bell, A. & Santala, J. 2011. *Logistiikan ja toimitusketjun hallinnan perusteet*. Saarijärven Offset Oy. Saarijärvi. 252 s.

Robinson, S. 2004. *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester. 316 s.

Šaderová, J., Marasová, D., Galliková, J. 2018. Simulation as Logistic Support to Handling in the Warehouse: Case Study. *TEM Journal*. Vol. 7, nro. 1, s. 112-117.

Sadowski, D., & Grabau, M. 2000. Tips for successful practice of simulation. *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. s. 26-31.

Sakki, J. 2003. *Tilaus-toimitusketjun hallinta: Logistinen B-to-B -prosessi*. 6. painos. Hakapaino Oy. Espoo. 216 s.

Semini, M., Fauske, H., Strandhagen, J. 2006. Applications of discrete-event simulation to support manufacturing logistics decision-making: a survey. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*. s. 1946-1953.

Siikonen, M.-L., Susi, T., Hakonen, H. 2000. Passenger traffic flow simulation in tall buildings. *IFHS, International Conference on Multi-Purpose High-Rise Towers and Tall Buildings*.

SIMUL8. Accuracy of Results. [WWW-dokumentti]. [viitattu 7.4.2020]. Saatavissa: <https://www.simul8.com/support/help/doku.php?id=gettingstarted:techguide:accuracy>

Takakuwa, S., Takizawa, H., Ito, K., Hiraoka, S. Simulation and analysis of non-automated distribution warehouses. 2000. *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. s. 1177-1184.

Transval. 2019. Transvalin teollisuuden palvelukeskus Hyvinkäällä on Pohjoismaiden monipuolisin. [WWW-dokumentti]. [viitattu 8.4.2020]. Saatavissa: <https://www.transval.fi/2019/02/08/transvalin-teollisuuden-palvelukeskus-hyvinkaalla-pohjoismaiden-monipuolisin/>

Transval. 2020. Kirjallinen perehdytysmateriaali.

Waters, D. 2003. *Logistics: An Introduction to Supply Chain Management*. Palgrave Macmillan. Houndmills. 354 s.

WSC. 2019. Past conferences. [WWW-dokumentti]. [viitattu 30.3.2020]. Saatavissa: <https://meetings2.informs.org/wordpress/wsc2019/past-conferences/>

Liite 1. Haastattelupohjat

Haastattelupohja, Senior Manager, 23.4.2020

Teema 1: Yleiset kysymykset

1. Miten suuri varaosavaraston volyyymi on? (esim. vastaanotetut rivit ja toimitetut rivit päivässä)
2. Miten volyyymi jakautuu karkeasti seuraavien kesken (%-osuudet)?
 - a. Varaosavarastolle menevät lavat ja rullakot
 - b. Telihallin hyllyihin menevät lavat
 - c. Telihallin oksahyllyihin menevät pitkät pakkaukset
3. Kuinka paljon nimikkeitä on ja onko niitä ryhmitelty?
4. Kuinka paljon varaosavarastolla ja sen toiminnoissa työskentelee henkilöitä?

Teema 2: Nykytilanne ja ongelmat

1. Millainen vastaanottoprosessin virtaus on tällä hetkellä? Onko selviä pullonkauloja havaittavissa?
2. Onko vastaanotossa mainittavia ongelmakohtia? Mistä ongelmat mielestäsi johtuvat?
3. Onko vastaanotossa yksittäisiä työvaiheita, jotka syövät paljon resursseja suhteessa muihin?
4. Millaisia kehitystoimia vastaanottoprosessiin on tehty viime aikoina?

Teema 3: Kehitysehdotukset ja tulevaisuus

1. Millainen vastaanottoprosessi ja varaston layout olisivat ideaalitulanteessa?
2. Onko varaosavaraston toimintoihin suunnitteilla isompia muutoksia?
3. Onko varaosavarastolle suunnitteilla muiden asiakkaiden varaosien varastointia?
4. Mitä ehdottaisit simuloitavaksi kehityskohteeksi?

Haastattelupohja, Työnjohtaja, 14.4.2020

Teema 1: Yleiset kysymykset

1. Mihin vaiheisiin vastaanotto prosessi jakautuu?
2. Kuinka monta henkilöä työskentelee kussakin prosessin vaiheessa?
3. Minkä verran työkoneita on käytössä?
4. Millaista hyllytysstrategiaa käytetään?

Teema 2: Nykytilanne ja ongelmat

1. Millainen vastaanotto prosessin virtaus on tällä hetkellä? Onko selviä pullonkauloja havaittavissa?
2. Onko vastaanoton toiminta vakaata päivästä ja viikosta toiseen? Millaista vaihtelua vastaanotossa ja hyllytyksessä ilmenee?
3. Miten työvoimaresurssien sovittaminen onnistuu muutostilanteissa?
4. Millaisia haasteita vastaanotossa koetaan ja onko jotakin toistuvaa ongelman aiheuttajaa?
5. Millaisia kehitystoimia vastaanotto prosessiin on tehty viime aikoina?

Teema 3: Kehitysehdotukset ja tulevaisuus

1. Mitä ehdottaisit simuloitavaksi kehityskohteeksi?

Haastattelupohja, Työntekijä, 15.4.2020

Teema 1: Yleiset kysymykset

1. Onko työkoneita ja työkaluja riittävästi?
2. Ovatko koneet ja laitteet työtehtäviin soveltuvia eli rajoittaako jokin työkone tai työkalu työvaiheen etenemistä?
3. Ovatko työtilat riittävän kokoiset?

Teema 2: Nykytilanne ja ongelmat

1. Miten vastaanotto kuorma-auton purkamisesta aina hyllyyn asti onnistuu? Millaisia haasteita esiintyy matkalla?
2. Onko hyllytys toteutettu järkevästi? Mitä haasteita ilmenee?
3. Ovatko työt jakautuneet tasaisesti eri vaiheiden välille? Onko jossain jatkuvasti kiire ja jossain puolestaan hiljaista?

Teema 3: Kehitysehdotukset ja tulevaisuus

1. Onko sinulla kehitysehdotuksia parempaan ja tehokkaampaan vastaanottoon sekä hyllytykseen?

Liite 2. Entiteettiluettelo

Aika (s)	Eurolavat	Teholavat	Isot lavat	Pitkät tuotteet	Rullakot	Pienpaketit
900					1	7
4500	8	12	2	2	2	76
10800	1	1				
14400	2	3				
28200					1	3
30600					1	2
89100	5	22	4	3	2	75
102000	1			4	1	1
103200		1	3	2	1	11
172800			2			
177600			7			
178200	6	8			1	68
187200				2	1	7
189000			1	2		
190200				1		
203400			1		1	8
264000	7	14	7	5	1	46
266400					1	4
275400		1			1	3
277200					1	8
280800			6		1	7
289800			2		1	11
345600		1		1	1	5
347400					1	8
352800	5	13	3		1	37
358200			2		1	6
363600		4	2		1	4
369000					1	3
372600					1	5
435600	5	4	11	1	1	44
438600		1				
442800			1		1	7
451800	3				1	4
457200			8	3	1	3
459000	1	2			1	14
521100	14	4	5		1	51
522600	1				1	10
532800					1	3
534600					1	2

(Jatkuu)

538200			5			
543600	1	2	5	2		
609300	3	20			2	74
630000	1	2			1	7
633600			20	4	1	9
691200			6		1	1
695700	4	12	14	6		
708000	1					
716400			3		1	7
718200		2	1		1	6
782100	8	14			1	45
792000		1			1	46
868500	6	10	15	5	1	2
878400					2	81
894600						

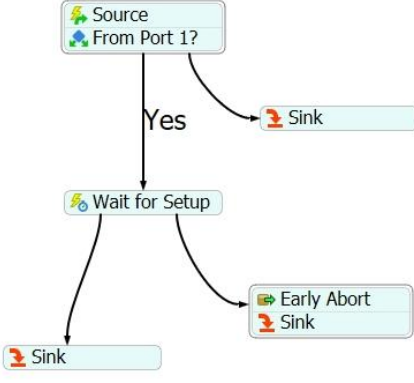
Nimi	Yksityiskohdat
Source	
Eurolavat	FlowItem: Europakkaus (0.80 x 1.20 x 0.60) Trigger OnCreation: Set Item Type = 0, Set Object Color = Orange
Teholavat	FlowItem: Tehopakkaus (0.80 x 0.60 x 0.60) Trigger OnCreation: Set Item Type = 0, Set Object Color = Orange
Isot lavat	FlowItem: Iso pakkaus (1.50 x 1.35 x 1.30) Trigger OnCreation: Set Item Type = 0, Set Object Color = Orange
Pitkät tuotteet	FlowItem: Pitkä pakkaus (0.40 x 6.00 x 0.40) Trigger OnCreation: Set Item Type = 0, Set Object Color = Orange
Rullakot	FlowItem: Tote (1.20 x 0.90 x 1.80) Trigger OnCreation: Set Item Type = 0, Set Object Color = Orange
Pienpaketit	FlowItem: Pienpaketti (0.30 x 0.30 x 0.30) Trigger OnCreation: Set Item Type = 0, Set Object Color = Orange
Täyttöaste 21	Telihallin hyllyjen keskimmäinen hylly. Aikahetkellä t=0 asetetaan 50 % täyttöaste eli 85 kpl. FlowItem: Iso pakkaus Trigger OnCreation: Set Item Type = 1, Set Object Color = Lime
Täyttöaste 22	Telihallin hyllyjen oikeanpuoleinen hylly. Aikahetkellä t=0 asetetaan 50 % täyttöaste eli 68 kpl. FlowItem: Iso pakkaus Trigger OnCreation: Set Item Type = 1, Set Object Color = Lime
Täyttöaste 23	Telihallin oksahyllyjen vasemmanpuoleinen hylly. Aikahetkellä t=0 asetetaan 50 % täyttöaste eli 28 kpl. FlowItem: Pitkä pakkaus Trigger OnCreation: Set Item Type = 1, Set Object Color = Lime
Täyttöaste 24	Telihallin oksahyllyjen ylempi oikeanpuoleinen hylly. Aikahetkellä t=0 asetetaan 50 % täyttöaste eli 14 kpl. FlowItem: Pitkä pakkaus

	Trigger OnCreation: Set Item Type = 1, Set Object Color = Lime
Täyttöaste 25	Telihallin oksahyllyjen alempi oikeanpuoleinen hylly. Aikahetkellä t=0 asetetaan 50 % täyttöaste eli 6 kpl. FlowItem: Pitkä pakkaus Trigger OnCreation: Set Item Type = 1, Set Object Color = Lime
Queue	
Purkualue eurolavat	Maximum Content = 1000 (oletus) Output: Use Transport = Yes (Transporter: Vastapaino) Priority 4.00, no preempt.
Purkualue teholavat	Maximum Content = 1000 Output: Send To Port: Round Robin Use Transport = Yes (Transporter: Vastapaino) Priority 3.00, no preempt.
Purkualue isot	Maximum Content = 1000 Output: Use Transport = Yes (Transporter: Vastapaino) Priority 2.00, no preempt.
Purkualue pitkät	Maximum Content = 1000 Output: Use Transport = Yes (Transporter: Vastapaino) Priority 1.00, no preempt.
Purkualue rullakot	Maximum Content = 1000 Output: Use Transport = Yes (Transporter: Vastapaino) Priority 5.00, no preempt.
Lavoitus1	Maximum Content = 1000 Output: Send To Port: Round Robin
Lavoitus2	Maximum Content = 1000 Output: Send To Port: Round Robin
Lavoitus3	Maximum Content = 1000
Lavoitus4	Maximum Content = 1000 Output: Use Transport = Yes (Transporter: Vastapaino) Trigger OnEntry: Set Size (1.20 x 0.80 x 0.60) Batching: Perform Batching = Yes, Target Batch Size = 6, Max Wait Time = 600
Rullaradan syöttö	Maximum Content = 1
Rullarata	Maximum Content = 7
Rullaradan lattiatila1	Maximum Content = 6 Batching: Perform Batching = Yes, Target Batch Size = 7, Max Wait Time = 3000 Output: Use Transport = Yes (Transporter: Vastapaino)
Rullaradan lattiatila2	Maximum Content = 6 Batching: Perform Batching = Yes, Target Batch Size = 7, Max Wait Time = 2000 Output: Use Transport = Yes (Transporter: Vastapaino)
Eurolavojen poikkeamat	Maximum Content = 1000
Rullakkojen lattipaikka1	Maximum Content = 1000 Output: Use Transport = Yes (Transporter: Vastapaino)

Rullakkojen lattiapaikka2	Maximum Content = 1000
Vastaanottamattomat pienpaketit	Maximum Content = 1000
Pienpakettien poikkeamat	Maximum Content = 1000
Vastaanotetut pienpaketit	Maximum Content = 1000
Valmiit kärryt	Maximum Content = 1000 Output: Send To Port = Random Available Port Use Transport = Yes (Transporter: Vastaanottaja2) Priority 2.00, no preempt. Trigger OnEntry: Close and Open Ports: Action = closeinput, Object = current.inObjects[1], Condition = current.subnodes.lenght == getvarnum(current, "maxcontent") Trigger OnExit: Close and Open Ports: Action = openinput, Object = current.inObjects[1], Condition = true
Kärryn paikka1	Maximum Content = 1000
Kärryn sisältö1	Maximum Content = 1000 Output: Send To Port = Random Available Port Use Transport = Yes (Transporter: Hyllyttäjä1) Priority 1.00, no preempt.
Kärryn paikka2	Maximum Content = 1000
Kärryn sisältö2	Maximum Content = 1000 Output: Use Transport = Yes (Transporter: Hyllyttäjä1)
Vastaanotetut isot	Maximum Content = 1000 Batching: Perform Batching = Yes, Target Batch Size = 2, Max Wait Time = 1800 Output: Send To Port = By Percentage (Port1 = 33.3 %, Port2 = 33.4 %, Port3 = 33.3 %) Use Transport = Yes (Transporter: Työntömasto)
Isojen poikkeamat	Maximum Content = 1000
Vastaanotetut pitkät	Maximum Content = 1000 Batching: Perform Batching = Yes, Target Batch Size = 4, Max Wait Time = 3600 Output: Send To Port = By Percentage (Port1 = 58 %, Port2 = 29 %, Port3 = 13 %) Use Transport = Yes (Transporter: Nelitie)
Pitkien poikkeamat	Maximum Content = 1000
Processor	
Eurolavojen vastaanotto	Eurolavojen vastaanoton työvaihe. Maximum Content = 1 (oletus) Number of Operators = 1 (oletus) Process Time = pearsont6(108.50143, 58108.659, 0.63099, 88.44528, getstream(current)) Use Operator(s) for Process = Yes (Operator: Vastaanottaja1) Priority 1.00, preempt only Output: Send To Port: By Percentage (Port1 = 32.3 %, Port2 = 32.2 %, Port3 = 32.2 %, Port4 = 3.3 %)

	<p>Use Transport = Yes (Operator: Vastaanottaja1)</p> <p>Priority 2.00, preempt only</p> <p>Trigger OnProcessFinish: Set Item Type = 1, Set Object Color = Lime</p>
Pienpakettien vastaanotto	<p>Pienpakettien vastaanoton työvaihe.</p> <p>Maximum Content = 1</p> <p>Number of Operators = 1</p> <p>Process Time = loglogistic(62.24308, 130.33502, 3.05631, getstream(current))</p> <p>Use Operator(s) for Process = Yes (Operator: Vastaanottaja2)</p> <p>Priority 2.00, preempt only</p> <p>Output: Send To Port: By Percentage (Port1 = 96.7 %, Port2 = 3.3 %)</p> <p>Trigger OnProcessFinish: Set Item Type = 1, Set Object Color = Lime</p>
Isojen vastaanotto	<p>Isojen vastaanoton työvaihe.</p> <p>Maximum Content = 1</p> <p>Number of Operators = 1</p> <p>Process Time = 157.4</p> <p>Use Operator(s) for Process = Yes (Operator: Vastaanottaja3)</p> <p>Priority 3.00, preempt only</p> <p>Trigger OnProcessFinish: Set Item Type = 1, Set Object Color = Lime</p>
Pitkien vastaanotto	<p>Pitkien vastaanoton työvaihe.</p> <p>Maximum Content = 1</p> <p>Number of Operators = 1</p> <p>Process Time = 439</p> <p>Use Operator(s) for Process = Yes (Operator: Vastaanottaja4)</p> <p>Priority 3.00, preempt only</p> <p>Trigger OnProcessFinish: Set Item Type = 1, Set Object Color = Lime</p>
Hyllytys12	<p>Pienpakettien hyllytys patereihin 1 ja 2.</p> <p>Maximum Content = 1</p> <p>Number of Operators = 1</p> <p>Process Time = 60</p> <p>Use Operator(s) for Process = Yes (Operator: Hyllyttäjä1)</p> <p>Priority 0.00, preempt only</p> <p>Output: Send To Port: Random Available Port</p>
Hyllytys34	<p>Pienpakettien hyllytys patereihin 3 ja 4.</p> <p>Maximum Content = 1</p> <p>Number of Operators = 1</p> <p>Process Time = 60</p> <p>Use Operator(s) for Process = Yes (Operator: Hyllyttäjä1)</p> <p>Priority 0.00, preempt only</p> <p>Output: Send To Port: Random Available Port</p>
Hyllytys5	<p>Pienpakettien hyllytys pateriin 5.</p> <p>Maximum Content = 1</p> <p>Number of Operators = 1</p> <p>Process Time = 60</p>

	Use Operator(s) for Process = Yes (Operator: Hyllyttäjä1) Priority 0.00, preempt only
Hyllytys67	Pienpakettien hyllytys patereihin 6 ja 7. Maximum Content = 1 Number of Operators = 1 Process Time = 60 Use Operator(s) for Process = Yes (Operator: Hyllyttäjä1) Priority 0.00, preempt only Output: Send To Port: Random Available Port
Tietokone1	Isojen vastaanotossa käytettävä tietokone FlexSim-mallissa. Todellisuudessa vain yksi tietokone. Maximum Content = 1 Number of Operators = 1 Process Time = inversegaussian(55.97546, 145.52454, 43.79657, getstream(current)) Use Operator(s) for Process = Yes (Operator: Vastaanottaja3) Priority 3.00, preempt only Output: Send To Port: By Percentage (Port1 = 96.7 %, Port2 = 3.3 %) Trigger OnEntry: Set Size (0.10 x 0.10 x 0.05) Trigger OnExit: Set Size (1.50 x 1.35 x 1.30)
Tietokone2	Pitkien vastaanotossa käytettävä tietokone FlexSim-mallissa. Todellisuudessa vain yksi tietokone. Maximum Content = 1 Number of Operators = 1 Process Time = inversegaussian(55.97546, 145.52454, 43.79657, getstream(current)) Use Operator(s) for Process = Yes (Operator: Vastaanottaja4) Priority 3.00, preempt only Output: Send To Port: By Percentage (Port1 = 96.7 %, Port2 = 3.3 %) Trigger OnEntry: Set Size (0.10 x 0.10 x 0.05) Trigger OnExit: Set Size (0.40 x 6.00 x 0.40)
Lavoitus	Maximum Content = 1 Number of Operators = 1 Process Time = 34 Use Operator(s) for Process = Yes (Transporter: Vastapaino)
Combiner	
Pienpaketit rullakkoon	Process Time = 0 Combine Mode = Pack, Target Quantity 72 (From Input Port 2) Process Flow: Combinerlogiikka1 Use Max Wait Timer = Yes (10)
Pienpaketit kärryyn	Process Time = 0 Combine Mode = Pack, Target Quantity 20 (From Input Port 2) Process Flow: Combinerlogiikka2 Use Max Wait Timer = Yes (7200)
Teholavojen yhdistäjä	Process Time = 0 Combine Mode = Join, Target Quantity 1 (From Input Port 2)

Process Flow: Lavoituslogiikka1	
Use Max Wait Timer = Yes (120)	
 <p>Kaikkia kolmea Combineria yhdistävä erillinen logiikka. Logiikassa Combiner vapauttaa kohteet tietyn ajan kuluttua, jos Target Quantity ei ole täyttynyt ennen sitä.</p>	
Separator	
Rullakoiden ja pienpakettien erotus	Process Time = 0 Separator = Unpack
Kärryn erotus1	Process Time = 0 Separator = Unpack
Kärryn erotus2	Process Time = 0 Separator = Unpack
Rack	
Läpivirtaushylly C	Läpivirtaushylly materiaalivaraston C1 hyllyn edessä. Maximum Content = 16, Column Spacing = 4 Number of Bays = 4; Width of Bays = 0.93; Number of Levels = 4; Height of Levels = 2.00 Output: Send To Port: Random Available Port Use Transport = Yes (Transporter: Korkeakeräilijä1)
Läpivirtaushylly D	Läpivirtaushylly materiaalivaraston D1 hyllyn edessä. Maximum Content = 16, Column Spacing = 4 Number of Bays = 4; Width of Bays = 0.93; Number of Levels = 4; Height of Levels = 2.00 Output: Send To Port: Random Available Port Use Transport = Yes (Transporter: Korkeakeräilijä2)
Läpivirtaushylly E	Läpivirtaushylly materiaalivaraston E1 hyllyn edessä. Maximum Content = 16, Column Spacing = 4 Number of Bays = 4; Width of Bays = 0.93; Number of Levels = 4; Height of Levels = 2.00 Output: Send To Port: Random Available Port Use Transport = Yes (Transporter: Korkeakeräilijä3)
C1, C2, D1, D2, E1, E2	Materiaalivaraston lähemmät kuusi hyllyä. Maximum Content = 252, Column Spacing = 4 Place in Bay: Random Bay if Available (Maximum items per cell = 1) Place in Level: Random Level if Available (Maximum items per cell = 1) Number of Bays = 28; Width of Bays = 0.93; Number of Levels = 9; Height of Levels = 1.00
C3, C4, D3, D4, E3, E4	Materiaalivaraston kauemmat kuusi hyllyä. Maximum Content = 288, Column Spacing = 4

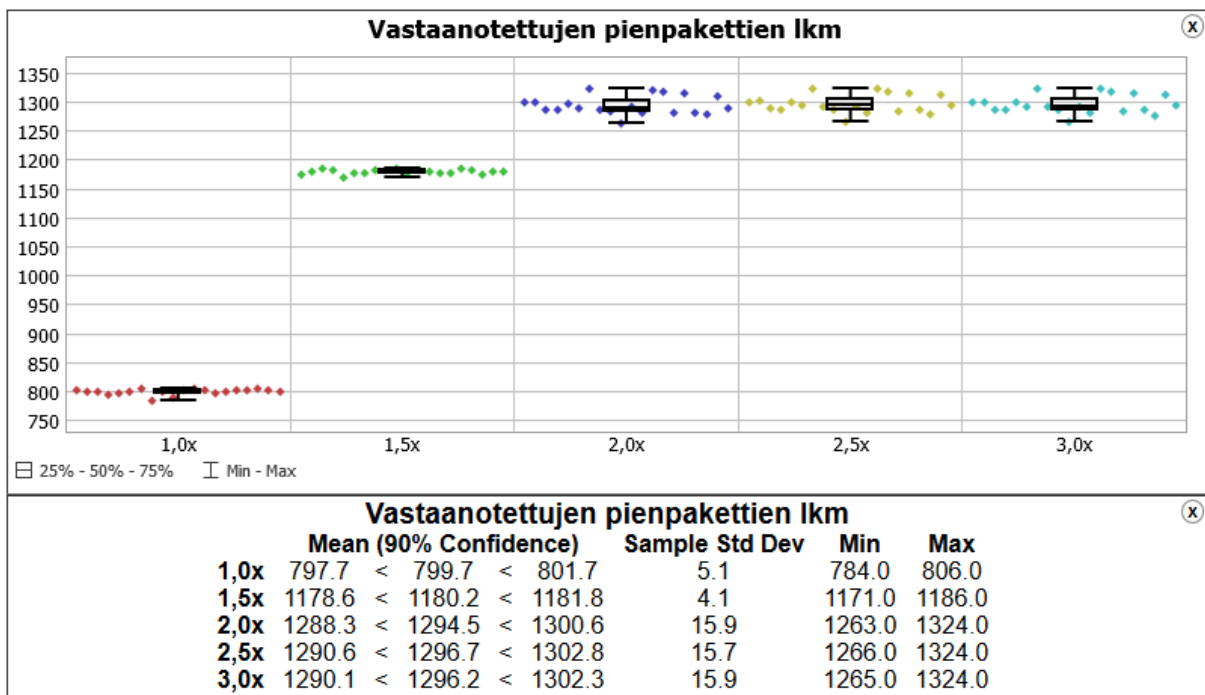
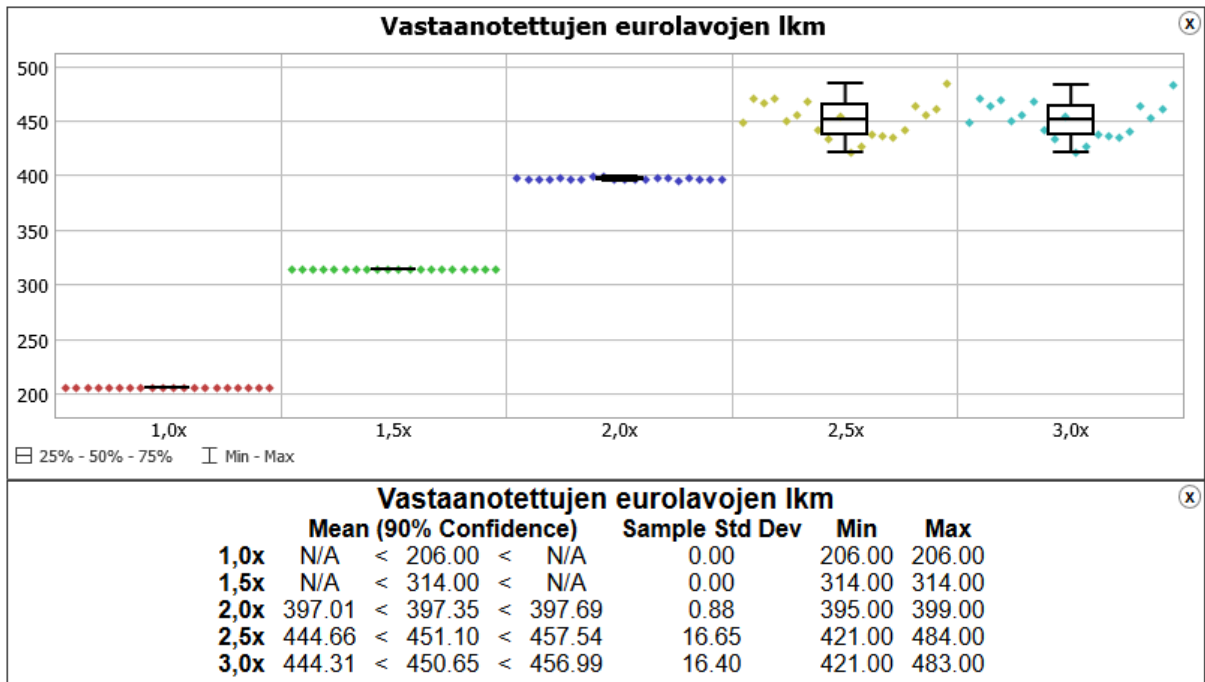
	Place in Bay: Random Bay if Available (Maximum items per cell = 1) Place in Level: Random Level if Available (Maximum items per cell = 1) Number of Bays = 32; Width of Bays = 0.92; Number of Levels = 9; Height of Levels = 1.00
Pater 1-7	Materiaalivaraston paternoster-varastoautomaatit, 7 kpl. Maximum Content = 600, Column Spacing = 1 Place in Bay: Random Bay if Available (Maximum items per cell = 5) Place in Level: Random Level if Available (Maximum items per cell = 5) Number of Bays = 10; Width of Bays = 0.50; Number of Levels = 12; Height of Levels = 0.80
Karanteeni	Lattiapaikoitus. Floor Storage = Yes Maximum Content = 28, Column Spacing = 1 Number of Bays = 7; Width of Bays = 1.50; Number of Levels = 4; Height of Levels = 1.50
Hylly A	Telihallin hyllyjen vasemmanpuoleinen hylly. Maximum Content = 128, Column Spacing = 2 Place in Bay: Random Bay if Available (Maximum items per cell = 1) Place in Level: Random Level if Available (Maximum items per cell = 1) Number of Bays = 32; Width of Bays = 1.85; Number of Levels = 4; Height of Levels = 1.50
Hylly B	Telihallin hyllyjen keskimäinen hylly. Maximum Content = 170, Column Spacing = 2 Place in Bay: Random Bay if Available (Maximum items per cell = 1) Place in Level: Random Level if Available (Maximum items per cell = 1) Number of Bays = 34; Width of Bays = 1.85; Number of Levels = 5; Height of Levels = 1.50
Hylly C	Telihallin hyllyjen oikeanpuoleinen hylly. Maximum Content = 136, Column Spacing = 2 Place in Bay: Random Bay if Available (Maximum items per cell = 1) Place in Level: Random Level if Available (Maximum items per cell = 1) Number of Bays = 34; Width of Bays = 1.85; Number of Levels = 4; Height of Levels = 1.50
Pihan oksahylly	Purkualueen läheisyydessä oleva oksahylly. Maximum Content = 20, Column Spacing 4 Number of Bays = 4; Width of Bays = 0.50; Number of Levels = 5; Height of Levels = 1.00
Oksahylly A	Telihallin oksahyllyjen vasemmanpuoleinen hylly. Maximum Content = 56, Column Spacing = 4 Place in Bay: First Available Bay (Maximum items per cell = 2) Place in Level: Random Level if Available (Maximum items per cell = 2) Number of Bays = 4; Width of Bays = 0.42; Number of Levels = 7; Height of Levels = 1.00
Oksahylly B	Telihallin oksahyllyjen ylempi oikeanpuoleinen hylly. Maximum Content = 28, Column Spacing = 4 Place in Bay: First Available Bay (Maximum items per cell = 1) Place in Level: Random Level if Available (Maximum items per cell = 1) Number of Bays = 4; Width of Bays = 0.42; Number of Levels = 7; Height of Levels = 1.00
Oksahylly C	Telihallin oksahyllyjen alempi oikeanpuoleinen hylly. Maximum Content = 12, Column Spacing = 3 Place in Bay: First Available Bay (Maximum items per cell = 1)

	Place in Level: Random Level if Available (Maximum items per cell = 1) Number of Bays = 3; Width of Bays = 0.42; Number of Levels = 4; Height of Levels = 1.00
Operator	
Vastaanottaja1	Eurolavojen vastaanottaja. Capacity = 1; Max Speed = 1.00; Acceleration = 1.00; Deceleration = 1.00 Load Time = 42.5; Unload Time = 42.5
Vastaanottaja2	Pienpakettien vastaanottaja. Capacity = 1; Max Speed = 1.00; Acceleration = 1.00; Deceleration = 1.00 Load Time = 3.0; Unload Time = 3.0
Vastaanottaja3	Isojen vastaanottaja. Capacity = 1; Max Speed = 1.50; Acceleration = 1.00; Deceleration = 1.00 Load Time = 0; Unload Time = 0
Vastaanottaja4	Pitkien vastaanottaja. Capacity = 1; Max Speed = 1.00; Acceleration = 1.00; Deceleration = 1.00 Load Time = 0; Unload Time = 0
Hyllyttäjä1	Pienpakettien hyllyttäjä. Capacity = 1; Max Speed = 1.00; Acceleration = 1.00; Deceleration = 1.00 Load Time = 1.0; Unload Time = 1.0
Transporter	
Vastapaino	Kuorma-auton purkuun ja rullaradan täyttämiseen käytettävä trukki. Lift Speed = 1.00; Capacity = 1; Max Speed = 1.45; Acceleration = 1.00; Deceleration = 1.00 Load Time = 8.0; Unload Time = 8.0 Trigger OnResourceAvailable: Travel to Location (66.19, 25.05, 0.00)
Korkeakeräilijä1	Materiaalivaraston hyllyttäjä. Lift Speed = 1.00; Capacity = 1; Max Speed = 1.55; Acceleration = 2.00; Deceleration = 2.00 Load Time = 37.2; Unload Time = 74.7 Trigger OnResourceAvailable: Travel to Location (34.19, 11.04, 0.00)
Korkeakeräilijä2	Materiaalivaraston hyllyttäjä. Lift Speed = 1.00; Capacity = 1; Max Speed = 1.55; Acceleration = 2.00; Deceleration = 2.00 Load Time = 37.2; Unload Time = 74.7 Trigger OnResourceAvailable: Travel to Location (34.19, 15.31, 0.00)
Korkeakeräilijä3	Materiaalivaraston hyllyttäjä. Lift Speed = 1.00; Capacity = 1; Max Speed = 1.55; Acceleration = 2.00; Deceleration = 2.00 Load Time = 37.2; Unload Time = 74.7 Trigger OnResourceAvailable: Travel to Location (34.19, 19.31, 0.00)
Työntömastero	Isojen siirtäjä ja hyllyttäjä telihallissa. Lift Speed = 1.00; Capacity = 2; Max Speed = 1.90; Acceleration = 1.00; Deceleration = 1.00 Load Time = beta(17.35832, 49.09326, 0.66491, 0.73468, getstream(current)) Unload Time = loglogistic(0.01466, 63.26926, 2.93947, getstream(current)) Trigger OnResourceAvailable: Travel to Location (105.19, -54.84, 0.00)

Nelitie	<p>Pitkien siirtäjä ja hyllyttäjä telihallissa.</p> <p>Lift Speed = 1.00; Capacity = 4; Max Speed = 1.15; Acceleration = 1.00; Deceleration = 1.00</p> <p>Load Time = 99.5; Unload Time = 207.5</p> <p>Trigger OnResourceAvailable: Travel to Location (43.57, 37.00, 0.00)</p>
Sink	
Rullakot pois	Recycling Strategy: Do Not Recycle Flowitems
Kärryn poisto1	Recycling Strategy: Do Not Recycle Flowitems
Kärryn poisto2	Recycling Strategy: Do Not Recycle Flowitems
Others	
BasicFR	Taukotila
Timetable1	<p>Vastaanottajat 1-4, Hyllyttäjä1</p> <p>Down Function = Travel To Object, Delay Until Down Time Complete (Taukotila)</p> <p>Resume Function = Do Nothing</p> <p>Työaika 08:00-16:30</p> <p>Tauot 10:00-10:10, 12:00-12:30, 14:00-14:10</p>
Timetable2	<p>Nelitie, Työntömassto, Korkeakeräilijät 1-3, Vastapaino</p> <p>Down Function = Stop Object</p> <p>Resume Function = Resume Object</p> <p>Työaika 08:00-16:30</p> <p>Tauot 10:00-10:10, 12:00-12:30, 14:00-14:10</p>
Timetable3	<p>Eurolavojen, pienpakettien, isojen ja pitkien vastaanotto, tietokoneet 1 ja 2, lavoitus</p> <p>Down Function = Stop Input and Output</p> <p>Resume Function = Resume Input and Output</p> <p>Työaika 08:00-16:30</p>

Liite 3. FlexSim Experimentation Report

Number of Scenarios: 5
 Number of Replications Per Scenario: 20
 Warmup Time: 0



(Jatkuu)

