Tampereen yliopisto

Santeri Junnila

PAPERINJALOSTUSLINJOJEN AJO-OHJELMIEN MONITAVOITEOPTIMOINTI GENEETTISEN ALGORITMIN JA SIMULOINNIN AVULLA

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastajat: Professori Minna Lanz
Yliopistotutkija Eeva Järvenpää
Huhtikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Santeri Junnila: Paperinjalostuslinjojen ajo-ohjelmien monitavoiteoptimointi geneettisen algoritmin ja simuloinnin avulla
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan diplomi-insinöörin koulutusohjelma
Huhtikuu 2024

Tässä työssä oli tarkoituksena selvittää kahta paperinjalostuslinjaa koskevien kokonaiskustannusten ja KPI-lukujen (Key Performance Indicator) yhteyksiä. Tarkasteltavia KPI-lukuja olivat tuotantotehokkuutta kuvaava OEE (Overall Equipment Effectiveness), toimitusvarmuutta ja palvelutasoa kuvaava OTIF (On Time, In Full) sekä varastotasot. Kokonaiskustannusten ja KPI-lukujen tavoitteet ovat osin ristiriitaisia. Esimerkiksi OEE:n maksimointi ajoeriä pidentämällä kasvattaa varastoon sitoutunutta pääomaa. Kiinteillä kysyntään perustuvilla ajoeräkoilla joidenkin tuotteiden ajoerät saattavat taas olla huomattavan lyhyitä huonontaen OEE:tä. Tarkoitus on selvittää kustannusten kannalta kannattavin toimintamalli, ja selvittää mitä KPI-luvut tässä olisivat. Myös toimintamallin käyttöönottamiseksi vaadittavia toimia selvitetään.

Selvitystä tehtiin haastatteluin sekä tutkimalla erilaisten tuotanto- eli ajo-ohjelmien ja eräkokojen vaikutusta toiminnan kokonaiskustannuksiin ja KPI-lukukuihin. Jotta ajo-ohjelmien tuottamien kustannusten ja KPI-lukujen arviointi olisi mahdollista, muodostettiin tarkasteltavista tuotantolinjoista ja varastosta yksityiskohtainen simulointimalli. Simulointimallille syötettyjen ajo-ohjelmien pohjalta saatiin laadittua linjakohtaiset käyttökustannukset, päiväkohtaiset varastointikulut sekä myöhästyneistä toimituksista aiheutuneet kustannukset. Myös varastotasot, OEE:t ja OTIFit pystyttiin mallintamaan, kun mallille syötettiin skenaariota kuvaava kysyntätilanne.

Linjojen tuotannonsuunnitteluun pyrittiin myös luomaan optimaalisempi toimintamalli. Tätä varten simulointimallin oheen koottiin heuristisiin algoritmeihin lukeutuva geneettinen algoritmi. Geneettisen algoritmin avulla pyrittiin hakemaan mahdollisimman optimaalisia ajo-ohjelmia eri eräkokosäännöillä. Kunkin eräkokosäännön kanssa muodostettuja parhaiden ohjelmien kokonaiskustannuksia verrattiin keskenään. Muodostettu optimointialgoritmi löysi käytetyillä mittareilla arvioitaessa pienemmän kokonaiskustannuksen sekä paremman tuotantotehokkuuden tuottavia ajo-ohjelmia.

Tutkimuksessa ei saatu muodostettua yleistettävää ajomallia. Muuttuva kysyntätilanne saattaa aiheuttaa sen, että samat suunnittelusäännöt eivät tuota eri tilanteissa optimaalisimpia tuloksia. Työssä kehitetyn algoritmin suoriutumiseen perustuen suositellaan tuotannonsuunnittelua tukevan optimointialgoritmin käyttöönottoa. Työssä esitettiin simulointipohjainen päätöksentekotyökalu tuotannonsuunnittelun tarpeisiin.

Avainsanat: Tuotannonsuunnittelu, prosessiteollisuus, geneettiset algoritmit, optimointi, simulointi, tehdassimulointi, ajojärjestys, OEE

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Santeri Junnila: Multi-object optimization of the production schedules of paper converting lines with genetic algorithms and simulation
Master's Thesis
Tampere University
Master's degree program in mechanical engineering
April 2024

The purpose of this thesis work was to study the relations between the total costs and KPIs (Key Performance Indicator) of two paper converting lines. The KPIs in question were OEE, (Overall Equipment Effectiveness), OTIF (On Time, In Full), and inventory levels. The total costs and KPIs targets would often require conflicting actions. For example, increasing lot sizes would improve OEE, but on the other hand, increase net working capital by increasing inventory levels. If the lot sizes were fixed based on demand for a certain period, some products could have very small lots which would reduce OEE. The objective is to find an approach that involves the least total costs and study the KPIs in that situation. Also, the tools to reach the approach in practice are investigated.

The review was made by applying interviews and studying the effects of different production lots and schedules on costs and KPIs. To analyze the effects of different schedules and lots, a detailed discrete event simulation (DES) model was formed based on the production lines and warehouse. The total costs consisting of the operating costs of production lines, warehousing costs, and late deliveries were calculated for production schedules entered in the model. Also, the inventory levels, OEEs, and OTIFs were modeled if the demand scenario was defined in the simulation model.

A new more optimized approach to production scheduling was studied. This included the forming of a genetic algorithm suitable for the problem. The simulation model formed before the optimization phase was included as a part of the genetic algorithm optimization run. Genetic algorithms belong to heuristic algorithms. The genetic algorithm was used to find optimal production schedules with different lot sizing policies. The best solutions for each different policy were then compared. The implemented algorithm found schedules with lesser total costs and better OEEs than those of the current schedules in use when the evaluation was based on the indicators in use.

The study failed to form general principles for planning. Varying demand scenarios make the use of different planning rules necessary. Rules providing the optimal results are different from one scenario to another. The introduction of an optimization program for production scheduling is also recommended based on the performance of the simulation-based optimizer developed in this study.

Keywords: Production planning , process industry, genetic algorithms, optimization, simulation, plant simulation, production schedule, OEE

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

ALKUSANAT

Tämä työ oli erittäin opettavainen projekti. Työstä saadut opit eivät jääneet pelkästään aiheen asioihin, vaan oppia tuli myös etenkin projektinhallinnasta, oman työn aikatauluttamisesta ja monenlaisten näkökantojen huomioon ottamisesta.

Kiitän työnantajayritystä Metsä Tissueta mahdollisuudesta kirjoittaa diplomityö todellisesta, mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta sekä mahdollisuudesta laajentaa omaa osaamistani aiheen parissa. Kiitän erityisesti Metsän ohjaajaani, Jussi Suutaria, monissa pikapalavereissa saaduista neuvoista ja palautteista. Metsälle kiitokset myös muille työhön osallistuneille, etenkin Kati Järviselle ja Karri Kauppiselle tuesta työn eri vaiheissa. Kiitokset myös yliopiston puolelle ohjaajilleni Eeva Järvenpäälle ja Minna Lanzille laadukkaasta ja hyödyllisestä palautteesta sekä ohjauksesta läpi työn.

Diplomityön mukana päätökseen tulee myös kuuden vuoden opiskelijan taipaleeni Tampereen yliopistossa. Voin olla erityisen kiitollinen, että sain tutustua lukuisiin upeisiin ihmisiin opintojen aikana erilaisissa kerhoissa ja tapahtumissa. Ystävien tuki opintojen aikana on ollut korvaamatonta. Kiitokset siis myös vanhoille ja uusille kavereille joihin sain matkan varrella tutustua.

Tampereella, 5. huhtikuuta 2024

Santeri Junnila

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto . . . 1
   1.1 Tutkimuksen tausta ja kohdeyritys . . . 1
   1.2 Tutkimuksen tavoite, tutkimuskysymykset ja rajaus . . . 2
   1.3 Tutkimusmenetelmät . . . 3
2. Tuotannonsuunnittelun ja -optimoinnin teoria . . . 5
   2.1 Tuotannonsuunnittelu osana toimitusketjun hallintaa . . . 5
      2.1.1 Keskipitkän ja lyhyen aikavälin suunnitteluprosessit . . . 6
      2.1.2 Tuotannonsuunnitteluohjelmistot . . . 7
      2.1.3 Toimintaympäristön vaikutus tuotannonsuunnitteluun . . . 8
      2.1.4 Aikataulutus ja eräkoot . . . 11
   2.2 Tuotannonsuunnittelun vaikutus tuotannon ja toimitusketjun KPI-lukuihin . . . 12
      2.2.1 Tuotantotehokkuuden seuranta - OEE . . . 13
      2.2.2 Toimitusvarmuuden seuranta - OTIF . . . 15
   2.3 Optimointimallit ja simulointi tuotannonsuunnittelussa . . . 15
      2.3.1 Optimointimallit . . . 16
      2.3.2 Ajo-ohjelman simulointi . . . 17
   2.4 Toimituserän mitoitus-aikataulutusongelmatyypit ja ratkaisumallit . . . 18
      2.4.1 Analyyttiset menetelmät . . . 18
      2.4.2 Heuristiset menetelmät - Geneettinen algoritmi . . . 19
      2.4.3 Simulointioptimointi . . . 24
3. Tutkimuksen kuvaus . . . 25
   3.1 Haastattelut . . . 25
   3.2 Tapahtumapohjainen simulointi ja data-analyysi . . . 28
   3.3 Optimointi . . . 29
4. Nykytila-analyysin tulokset . . . 30
   4.1 Tuotannonsuunnittelu . . . 30
      4.1.1 Tuotannonsuunnitteluohjelmisto . . . 32
      4.1.2 Tuotantoprosessi . . . 34
   4.2 Tapauksen simulointi . . . 35
      4.2.1 Tuotantolinjojen osamoduulit . . . 36
      4.2.2 Muut osakomponentit . . . 37
      4.2.3 Simulointimallin validointi . . . 39
5. Optimointimallin muodostaminen ja optimoinnin tulokset . . . 42
   5.1 Simulointioptimointi . . . 42

5.2 Optimointimallin parametrisointi 47
5.3 Todellisten skenaarioiden optimointi 52
5.4 Optimointimallin validointi 57
6. Tulosanalyysi 59
6.1 Nykytila-analyysin tulosten analysointi 59
6.2 Optimoinnin tulosten analysointi 60
6.3 Kehitysehdotukset tutkimuksen pohjalta 60
6.4 Tutkimuksen rajoitteet ja kehityskohteet 63
7. Yhteenveto 65
Lähteet 68

LYHENTEET JA MERKINNÄT

APS	Tuotannonsuunnitteluohjelmisto, engl. Advanced Planning System
ATP	Luvattavissa oleva määrä, engl. Available To Promise
DES	Tapahtumapohjainen simulointi, engl. Discrete Event Simulation
ELSP	Taloudellinen tuotantoerä-aikataulutusongelma, engl. Economic Lot Scheduling Problem
ERP	Toiminnanohjausjärjestelmä, engl. Enterprise Resource Planning
GA	Geneettinen algoritmi, engl. Genetic Algorithm
JIT	Juuri oikeaan tarpeeseen, engl. Just-In-Time
KPI	Suorituskykymittari, engl. Key Performance Indicator
MES	Tuotannonseurantajärjestelmä, engl. Manufacturing Execution System
MILP	Lineaarinen sekalukuohjelmointi, engl. Mixed-Integer Linear Programming
MINLP	Epälineaarinen sekalukuohjelmointi, engl. Mixed-Integer Non-Linear Programming
MIP	Sekalukuohjelmointi, engl. Mixed-Integer Programming
MPC	Tuotannonsuunnittelu ja -ohjaus, engl. Manufacturing Planning and Control
MPS	Päätuotantosuunnitelma engl. Master Production Schedule
MRP	Tarvelaskenta, engl. Material Requirements Planning

NP-vaikea	NP-vaikea, engl. NP-hard, nondeterministic polynomial time
OEE	Käytettävyys, Nopeus, Laatu, engl. Overall Equipment Effectiveness
OTIF	Ajoissa kokonaan toimitettu, engl. On Time In Full
PPC	Tuotannonsuunnittelu ja -ohjaus, engl. Production Planning and Control
S&OP	Myynnin ja tuotannon suunnittelu, engl. Sales & Operations Planning
SCM	Toimitusketjun hallinta, engl. Supply Chain Management

1. JOHDANTO

Teollisuusyritykset seuraavat suoriutumistaan monien eri KPI-mittarien (engl. Key Performance Indicator) avulla. Eri toiminnoille asetetaan eri mittareita ja niiden tavoitteet voivat olla osin myös ristiriitaisia (Harjunkoski et al. 2014). Näin on myös tuotannon tehokkuutta ja laatua kuvaavan OEE:n (engl. Overall Equipment Effectiveness), sekä toimitusvarmuuden ja varastointikustannusten kanssa. Kaikkia näistä pyritään osaltaan parantamaan, mutta tietyn pisteen jälkeen yhteen panostaminen alkaa yleensä heikentää muita. Erilaisissa kysyntätilanteissa näiden lukujen suhde optimitilanteessa voi vaihdella. Näiden lukujen suhteeseen voidaan vaikuttaa tuotannonsuunnittelulla muuttamalla tuotteen ajoerän esiintymisväliä, sekä eräkokoa. Tuotannonsuunnittelu vaikuttaa ajoerien koon ja ajojärjestyksen kautta myös tuotantotehokkuuteen ja siten OEE-mittariin. Lajinvaihtoihin kuluva aika ja vaihtojen jälkeiset säädöt ovat suoraan pois tehokkaasta tuotantoajasta, heikentäen OEE:tä. Näitä molempia voidaan minimoida oikeanlaisella tuotannon aikataulutuksella.

1.1 Tutkimuksen tausta ja kohdeyritys

Nykyajan tiukassa kilpailutilanteessa pärjätäkseen yritysten tulee tehostaa prosessejaan entisestään. Tuotantokustannusten minimointi toimintaa tehostamalla on olennainen osa näitä toimia. Tuotannon tehokkuudella on monialaisia vaikutuksia. Pienempi materiaalin, sekä energian hävikki ovat hyödyksi sekä ympäristölle että yrityksen taloudelle (Andersson ja Bellgran 2015). Nämä ovat olennaisia asioita luonnollisesti myös työn kohdeyritykselle, Metsä Tissuelle. Metsä Tissue tuottaa pehmo- ja tiivispapereita sekä koti- että suurtalouksille. Metsä Tissuella on tuotantolaitoksia Suomessa, Ruotsissa, Saksassa, Puolassa ja Slovakiassa. Yhtiö on osa suurempaa konsernia, Metsä Groupia. Metsä Tissuen Suomen tehdas sijaitsee Mänttä-Vilppulassa. Siellä pehmopaperia tuotetaan kolmella paperikoneella, sekä jalostetaan 11 jalostuslinjalla. Tehtaalla on myös yksi tiivispaperikone. Pehmopaperia tuotetaan noin 92 000 tonnia vuodessa. Tehtaan koko pehmopaperituotanto vastaa WC-paperirulliksi muutettuna noin 3 miljoonaa rullaa päivässä.

Prosessi- ja paperiteollisuudelle ovat tyypillisiä kalliit ja aikaa vievät lajinvaihdot. Ajot pyritään järjestämään siten, että perättäisten tuotteiden väliset erot olisivat kokonaisuudessaan mahdollisimman pieniä, jolloin vaihtoon ja sen jälkeiseen linjan säätämiseen kuluu

mahdollisimman vähän aikaa ja rahaa. Tämä parantaa suoraan tuotantotehokkuutta, sekä sitä kautta kannattavuutta. Todellisessa tilanteessa tuotteiden kysyntä ei aina tue tuotannon kannalta optimaalisen tuotanto- eli ajo-ohjelman rakentamista. Tuotannonsuunnittelussa pitää siis huomioida niin tuotannon rajoitteet ja tavoitteet, kuin kustannustehokas toiminta kokonaisuudessa. Optimaalinen toimintamalli voi vaihdella eri tilanteissa ja sen hahmottaminen alati muuttuvassa ympäristössä on haastavaa. Tuotannonsuunnitteluun liittyy paljon ristiriitaisia tavoitteita juuri eräkokojen ja varastotasojen, sekä tehokkuuden osalta. Se, mikä on kannattavuuden kannalta järkevintä muuttuvissa tilanteissa, ei ole itsestään selvää.

1.2 Tutkimuksen tavoite, tutkimuskysymykset ja rajaus

Tuotantoa voidaan suunnitella monen eri tavoitteen kautta. Työssä pyritään selvittämään tarkastelussa olevien jalostuslinjojen osalta optimaalinen ajomalli. Tämä tehdään tutkimalla erilaisten eräkokojen, käyttöasteiden ja tavoitevarastotasojen vaikutusta kokonaiskustannuksiin ja KPI-lukuihin. Ajomalli käsittää filosofian, jolla linjaa käytetään ja eräkokoja suunnitellaan erilaisissa tilanteissa.

Työn tavoitteena on selvittää toiminnan kannalta oleellisten mittareiden, eli OEE:n, OTIFin ja varastotasojen suhdetta toisiinsa sekä toimitusketjun kustannuksiin erilaisissa kysyntä- ja tuotantoskenaarioissa. Toiminnan kustannukset pyritään optimoitaessa minimoimaan. Ajomallin käyttöönottamiseksi tarvittavia toimenpiteitä tullaan myös tarkastelemaan.

OEE ei tavallisesti ole tuotannonsuunnittelun parissa käytettävä mittari, mutta tuotannonsuunnittelulla on huomattava vaikutus sen arvoon. Tuotannonsuunnittelun vaikutusta OEE:hen pyritään myös selvittämään.

Tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

1. Mikä on kustannusten kannalta tehokkain ajomalli jalostuskoneelle, ja mitkä ovat KPI-lukujen arvot tässä mallissa?
2. Miten KPI-luvut kehittyvät suhteessa toisiinsa eri skenaarioissa?
3. Miten käytännössä ajomallia hallitaan? Millaisille lisämittareille tai työkaluille on tarve?

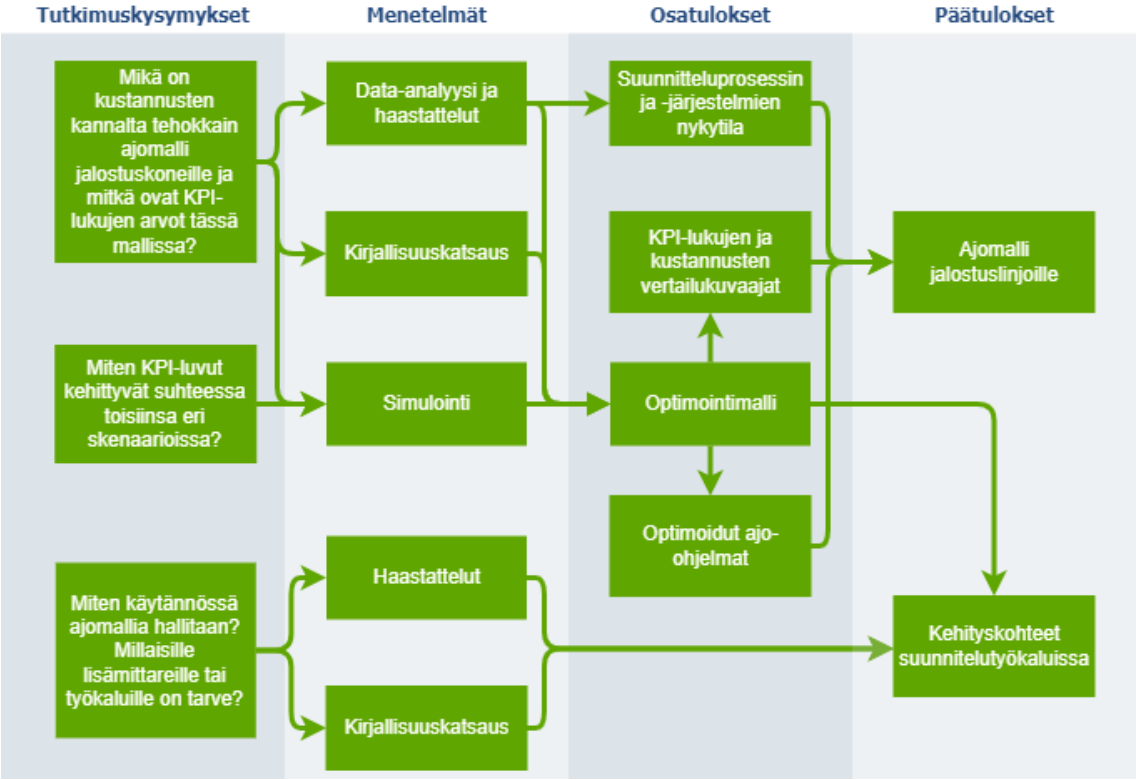
Tutkimusta tehdessä tarkastellaan myös, tuleeko työn suorituksen ohessa esiin merkittäviä pullonkauloja tai ongelmakohtia tuotanto-, tai suunnitteluprosesseissa. Näihin liittyviä aiheita käsitellään joka tapauksessa haastatteluissa myös varsinaisten tutkimuskysymysten ratkaisemiseksi.

Työn rajauksen ulkopuolelle jätetään jalostuslinjoja edeltävät tuotannon vaiheet, kuten paperikoneet ja välivarastot, sekä materiaalihankinnat. Näiden sisällyttäminen tekisi tarkastelusta tutkimuksessa käytettävällä tarkkuustasolla liian vaativaa käytettävissä olevaan

aikaan nähden. Tarkastelu keskittyy kahteen toiletti- ja talouspaperia valmistavan linjan toimintoihin, sekä niiden tuotannonsuunnitteluun ja varastointiin. Aikahorisontti tarkastelussa on muutamia viikkoja, sillä tarkastelu keskittyy ajo-ohjelmien ja -järjestysten vaikutuksiin yhdessä linjan yksityiskohtien kanssa.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Kuvassa 1.1 kuvataan päämenetelmät eri tutkimuskysymysten käsittelyssä. Pääpaino työn tarkastelussa on asetettu kuvassa ensimmäiselle tutkimuskysymykselle. Kuten kuvasta nähdään, useita tutkimuskysymyksiä käsitellään rinnakkain samoilla menetelmillä. Kuvassa mainitaan kirjallisuuskatsaus menetelmänä kahdesti kuvan selkeyttämiseksi.



Kuva 1.1. *Tutkimusongelmien ja menetelmien yhteys*

Tuotannon ja varaston simulointia varten luotiin työn tavoitteisiin soveltuva simulointimalli. Työssä toteutettava simulointi onnistuu sitä tarkemmin, mitä todenmukaisempi malli käytössä olevasta tuotannosta ja varastosta saadaan muodostettua. Todenmukaista mallia varten tarkasteltiin fyysisiä linjoja, sekä prosessia kokonaisuutena. Mallia varten tarvittiin monenlaisia tietoja linjan osista, kapasiteeteista ja nopeuksista. Näitä tietoja kerättiin yrityksen tietojärjestelmistä, sekä haastattelemalla eri osastojen asiantuntijoita. Mallin tuloksia validoitiin vertaamalla tietyillä lähtötiedoilla tehtyjä simulaatioita vastaavilla lähtötiedoilla toteutettuihin todellisiin tuotantotilauksiin. Myös työntekijöille ja insinööreille toteutettiin haastatteluja, joissa simulointimallin osatoimintoja, sekä prosessointiaikoja käytiin

läpi. Näin saatiin selvyys, vastasiko malli riittävällä tarkkuudella todellisuutta. Mallilla simuloitiin ensin nykytilannetta, jotta myöhemmin tehtäville parannuksille oli vertailukohta.

Ajo-ohjelma optimoitiin likimääräisesti käyttäen tapahtumapohjaisella simulointiohjelmistolla tehtyä mallia ja geneettistä algoritmia. Simuloinnilla luotiin tuotannolle useita skenaarioita, joissa painotettiin eri KPI-lukujen arvoja. OEE:n ja OTIFin arvojen suhteita tarkasteltiin mallintamalla erilaisia järjestelmällisesti muuttuvia ohjelmia. Näitä voitiin muuttaa muun muassa ajoerien kokoja säätelemällä. Ajoerien pituuksien ja järjestysten vaikutusta OEE:hen arvioidaan simulointimallia käyttäen. Suunnittelu- ja tuotantoprosessien kehityskohteita selvitettiin haastatteluiden tuloksia, sekä teoriassa havaittuja hyviä käytänteitä vertaamalla. Tarkastelun paino oli kuitenkin ajo-ohjelman vaikutuksissa.

Lopuksi työssä havaittujen kehityskohteiden pohjalta esitetään ajomalli ja lista tarvittavista kehitystoimista, jotta tuotannonsuunnittelussa on mahdollista päästä lähemmäs optimaalista mallia. Kaiken edellä mainitun materiaalin, sekä tehtaan järjestelmistä kerätyn datan avulla tarkasteltiin lisäksi, onko järjestelmässä tai toiminnassa jokin merkittävä pullonkaula tai kehityskohde, jota voisi parantaa.

Ensimmäisenä työssä esitetään kirjallisuuskatsaus tuotannonsuunnittelusta, aikataulutuksen optimointimalleista, sekä simulaatiosta. Seuraavaksi perehdytään käytettyihin tutkimusmenetelmiin. Tämän jälkeen esitetään nykytila-analyysi, jossa on koostettu haastatteluiden tuloksia ja kuvaus simulointimallin muodostamisesta. Sitten esitellään simulointimalliin liitetyn geneettisen algoritmin kehitysprosessi ja optimointitulokset. Tämän jälkeen tulosanalyysissä analysoidaan saatuja tuloksia. Lopuksi yhteenvedossa kootaan päähavainnot vastauksiksi tutkimuskysymyksiin.

2. TUOTANNONSUUNNITTELUN JA -OPTIMOINNIN TEORIA

Tuotannonsuunnittelu on tärkeä osa valmistavan yrityksen toimintoja. Sillä on merkittävä vaikutus tuotantotehokkuuteen ja toimitusvarmuuteen (Fuchigami ja Rangel 2018; Wacker ja Sheu 2006). Nykyajan toimintaympäristössä on tyypillistä kova kilpailu, sekä nopeat ja edulliset toimitukset (Missbauer ja Uzsoy 2022). Tuotannonsuunnittelulla määritetään milloin, kuinka paljon, ja millä resursseilla mitäkin tuotetta valmistetaan ja missä järjestyksessä. Näihin kysymyksiin ei ole olemassa yksiselitteistä ratkaisua, vaan se riippuu myös yrityksen tavoitteista; priorisoidaanko tuotantotehokkuutta vai toimitusvarmuutta. Esimerkiksi varsinaista ajo-ohjelmaa laadittaessa täytyy valita, minkä suhteen tuotantoa optimoidaan: kokonaistuotantoajan, toimitusajan vai eräpäivien perusteella (Dolgui, Ivanov et al. 2019). Eri tavoitteet ja niitä painottavat suunnitelmat ovat usein ristiriidassa keskenään (Sahin et al. 2008; Harjunkoski et al. 2014).

2.1 Tuotannonsuunnittelu osana toimitusketjun hallintaa

Tuotannonsuunnittelu on osa toimitusketjun hallintaa (engl. SCM, Supply Chain Management). Toimitusketjun suunnittelussa on erilaisia suunnitteluprosessimalleja, mutta pääpiirteittäin niiden voidaan ajatella rakentuvan hierarkkisesti monien muiden suunnitteluprosessien tapaan. Myös vertikaalisesti integroituja ratkaisuja on tutkittu (Kim et al. 2008; Vogel et al. 2017). Hierarkkinen tuotantoketjun suunnittelu koostuu karkeasti strategisesta- (pitkän aikavälin), taktisesta- (keskipitkän aikavälin), sekä operatiivisesta (lyhyen aikavälin) suunnittelusta ja tuotannon aikatauluttamisesta (Maravelias ja Sung 2009; Vogel et al. 2017). Toimintojen hierarkkinen rakenne ei ole kuitenkaan täysin yksiselitteinen ja se voi vaihdella eri toimialojen, yritysten ja käytettävien järjestelmien välillä. Tuotannonsuunnittelun hierarkkisessa prosessissa ylätason suunnittelulla asetetaan rajat, joiden sisällä alemmalla tasolla toimitaan. (Vogel et al. 2017).

Strategiseen suunnitteluun kuuluu pitkän aikavälin toimitusketjun rakenteeseen liittyvät asiat kuten tuotantolaitosten ja jakelukeskusten sijainnit sekä näiden kokonaiskapasiteettien muutokset. Suunnitteluhorisontti yltää useiden vuosien päähän. Myös esimerkiksi logistisien menetelmien suunnittelu, kuten vaikka valinta junakuljetusten tai laivausten valinnasta, voi kuulua strategiseen suunnitteluun. (Shah 2005; Stadtler 2005) Keskipitkällä

ja lyhyellä aikavälillä itse toimitusketjun rakenne säilyy vakiona ja suunnittelu keskittyy toimitusketjun osien tehokkaaseen käyttöön (Shah 2005). Tämä tarkoittaa käytännössä esimerkiksi tuottavuuden maksimointia optimaalisen ajo-ohjelman muodostamisen avulla. Keskipitkän aikavälin suunnitteluun kuuluu tehdas- ja tuotekohtaisten tuotantomäärien määrittäminen laadittuja ennusteita vastaan, sekä jakelusta päättäminen: Kenelle toimitetaan miltäkin tehtaalta (Stadtler 2005; Maravelias ja Sung 2009). Lyhyen aikavälin yksityiskohtainen suunnittelu kattaa jäljelle jäävän osan, eli suunnitteluhorisontti on nykyhetkestä viikkojen päähän. Tuotannonsuunnittelun osalta tämä tarkoittaa, että lopputuloksena saadaan konkreettiset ajo-ohjelmat tuotannolle (Maravelias ja Sung 2009).

Tämän työn rajauksen puitteissa tarkastelu keskittyy pääasiassa lyhyen aikavälin tuotannonsuunnitteluun ja ajo-ohjelmiin. Tätä varten perehdytään kuitenkin myös pintapuolisesti yhtä ylemmän tason, eli keskipitkän aikavälin suunnitteluun.

2.1.1 Keskipitkän ja lyhyen aikavälin suunnitteluprosessit

Tuotannonsuunnittelun taktisen alueen prosesseista ylimpänä on myynnin- ja tuotannonsuunnittelu, S&OP (Sales & Operations Planning) (Kim et al. 2008; Olhager ja Selldin 2007). Tuomikankaan ja Kaipian (2014) mukaan S&OP toimii tärkeänä tekijänä strategisen ja operatiivisen tason välissä tasaamassa kysynnän ja tarjonnan suhdetta sekä välittämässä informaatiota strategiselta operatiiviselle tasolle. S&OP -prosessin aikahorisontti on noin 3–18 kuukautta. Tämä jätetään kaukaisen aikahorisonttinsa osalta tarkastelun ulkopuolelle.

Tuotannon karkeasuunnittelu (engl. Master Planning & Scheduling) sijoittuu S&OP -prosessin alapuolelle. (Stadtler 2005). Päätuotantosuunnitelma (engl. MPS, Master Production Schedule) toimii pohjasuunnitelmana sekä tuotannolle että myynnille. Siinä esitetään tuotekohtaisesti alustavat tuotantosuunnitelmat, myyntiennusteet ja jakelusuunnitelmat. Sen laatimiseen voi osallistua ryhmä, joka koostuu useiden eri toimintojen avainhenkilöistä. Vaihtoehtoisesti myös yksi ihminen voi suorittaa sen automaattisen laskennan avustamana. Tavallisesti suunnitelmaa päivitetään viikoittain, ja päivittämiseen kuuluu osasuunnitelmien yhdistäminen sekä varsinaisen suunnitelman vahvistaminen. (Jonsson ja Ivert 2015) Pääsuunnittelussa ei kuitenkaan kannata mennä liian yksityiskohtaiselle tasolle (Stadtler 2005). Toimitusketjun eri toimintojen integraation ja yhteistyön on todettu parantavan tuloksia, sekä suunnitelman paikkansapitävyyttä (Barratt 2004; Ellinger 2000). Tämä osaltaan tukee monialaisen suunnittelutiimin mallia MPS:n laatimisessa. Osallistettavia osia voi olla siis esimerkiksi myynti, tuotannonsuunnittelu, operatiivinen toiminta sekä logistiikka (Oliva ja Watson 2011).

Huomattavaa on kuitenkin, että toimitusketjun hallinnan rakenteissa esiintyy eroavaisuuksia käytettävien prosessien ja järjestelmien osalta. Esimerkiksi yrityksen kokoluokka vaikuttaa käytettävien prosessien ja järjestelmien valintaan (Kristensen ja Jonsson 2018).

Pienemmät yritykset eivät Kristensenin ja Jonssonin mukaan välttämättä hyödy yhtä paljon monitasoisista ja erikoistuneemmista järjestelmistä. Myös teollisuudenala ja tuotannon tyyppi vaikuttavat käytettävään tuotannonohjauksen ja -suunnittelun rakenteeseen. Prosessi- ja kappaletavaratuotannolla on erilaisia tarpeita tuotannonohjaukselta (Missbauer ja Uzsoy 2022).

Tuotannon aikataulutus ajo-ohjelmaksi on lyhyen aikavälin toimenpide. Se tehdään tuotannon ja toiminnan piirteistä riippuen joidenkin viikkojen ajalle nykyhetkestä eteenpäin. Lyhyen aikavälin suunnittelun lopputuloksena saadaan siis konkreettinen ajo-ohjelma tuotantokoneelle (Maravelias ja Sung 2009). Ajo-ohjelman (engl. schedule) muodostamiseen käytetään karkeasuunnitelman, MPS:n sisältämää dataa (Kim et al. 2008).

2.1.2 Tuotannonsuunnitteluohjelmistot

Tuotantoketjun hallinnassa IT-järjestelmillä on tärkeä rooli. Niin sanotut tuotannonsuunnittelu ja -ohjausjärjestelmät (engl. PPC, Production Planning and Control) helpottavat tuotantoketjun suunnittelussa käytettävän informaation ja materiaalivirtojen hallintaa. Missbauerin ja Uzsoyn (2022) mukaan PPC-järjestelmien tärkeys ja vaikutukset kilpailukykyyn on hyvin laajalti todistettu. PPC -termin alle voidaan koostaa useampia erilaisia järjestelmärakenteita. (Missbauer ja Uzsoy 2022) Työn rajauksen puitteissa rajataan tarkastelu APS-järjestelmiin (engl. Advanced Planning and Scheduling) ja etenkin tuotannonsuunnittelun osa-alueisiin. APS on osamoduuleista koostuva kehittynyt suunnitteluohjelmisto, joka perustuu luvun 2.1 alussa esiteltyyn hierarkkiseen rakenteeseen. Rakenne on pääosin samanlainen myös eri järjestelmätoimittajia vertaillessa. (Stadtler 2005)

APS luo suunnittelijalle MPS:ään pohjautuvia ehdotuksia ja suunnitelmia tuotekohtaisista tuotantomääristä ja aikatauluista. Se luo automaattisesti ennusteisiin ja ylätason suunnitelmiin pohjautuvat tuotanto- ja tilausehdotukset kaikille toimitusketjun osille, jotka on sisällytetty APS:ään. Hierarkkiset tuoterakenteet ja tuotekohtaiset osaluettelot tekevät tämän mahdolliseksi. APS luo siis tuotannon joka vaiheeseen tilauksen komponentille, joka tarvitaan seuraavassa vaiheessa lopputuotteen valmistamiseksi. Toisin kuin tarvelaskenta (MRP, engl. Material Requirements Planning), APS ottaa myös läpimenoajat ja eräkoot huomioon ja luo siten käyttökelpoisia aikatauluja. Aikatauluissa otetaan siis prosessin sisäinen viive ja MPS huomioon, jolloin tilaukset eivät kasaannu tarvehetkelle toteutuskelvottomaksi suunnitelmaksi, kuten MRP:n toimintalogiikalla. (Missbauer ja Uzsoy 2022) APS:n muodostamat suunnitellut tilaukset voidaan muuntaa varsinaisiksi tilauksiksi. Tuotannonsuunnittelija voi myös tarvittaessa muokata suunniteltua tilausta ennen sen vahvistamista.

Nykyhetkestä katsottuna lähipäivien ohjelma pyritään pitämään muuttumattomana, sillä nopeat muutokset lisäävät kustannuksia ja aiheuttavat epävarmuutta eri toimintoihin. Vaikutukset voivat olla negatiivisia niin varastointikustannuksiin kuin palvelutasoonkin. (V.

Sridharan ja Berry 1990) Esimerkiksi tuotannossa tarvittavat materiaalit saattavat muutoksen takia myöhästyä, tai vastaavasti toteutumattoman tuotantoerän raaka-aineiden varasto-osuus voi kasvaa liian suureksi.

APS:ään voidaan integroida eri suunnittelutehtäviä vastaavat moduulit: strateginen verkostosuunnittelu (engl. Strategic Network Planning), karkeasuunnittelu (engl. Master Planning), kysynnän suunnittelu (engl. demand planning), ostojen- ja materiaalitarpeiden suunnittelu (engl. Purchasing & material requirements planning), tuotannonsuunnittelu (engl. production planning), ajo-ohjelmasuunnittelu/aikataulutus (engl. scheduling), jakelun suunnittelu (engl. distribution planning) sekä kysynnän täyttyminen ja ATP (Available To Promise) (engl. demand fulfillment & ATP) (Stadtler 2005).

Karkeasuunnittelua alemmalle tasolle sijoittuvat tuotannonsuunnittelu ja aikataulutus ovat tehdas- tai osastokohtaisia toimintoja. (Stadtler 2005) Käytettävät suunnittelumenetelmät ovat myös hyvin tapauskohtaisia ja ne voivat vaihdella tuotannon piirteitten mukaan. (Stadtler 2005) Kirjallisuudessa keskitytään pääosin eri menetelmien mallintamiseen vain yksinkertaisilla esimerkeillä (Harjunkoski et al. 2014).

MPS prosessin kypsyydellä on suuri vaikutus sen hyötyihin. Mikäli ihmiset eivät esimerkiksi ole sitoutuneet suunnittelussa käytettävän tietojärjestelmän oikeanlaiseen käyttöön, ei järjestelmästä saada kaikkia hyötyjäkään irti. (Jonsson ja Ivert 2015) Esimerkiksi datan ylläpitäminen on kriittistä järjestelmien oikeanlaisen toiminnan kannalta, ja tässä on havaittu Jonssonin ja Ivertin esittelemien tutkimusten mukaan puutteita. Pitkälle kehitettyjen järjestelmien käyttö MPS:n laatimisessa on myös perusteltua. Tällaisilla järjestelmillä tehtyjä suunnitelmia saadaan hyödynnettyä operatiivisessa suunnittelussa huomattavasti paremmin. Yksinkertaisemmilla järjestelmillä tehtyjä suunnitelmia hyödynnettiin vähemmissä osin ajo-ohjelmien laatimisessa. Tällöin linjan tuotannon tasapainottaminen kysynnän kanssa tehtiin todennäköisemmin manuaalisesti, huomioimatta optimaalisia varastotasoja ja tilauskantoja. (Jonsson ja Ivert 2015)

2.1.3 Toimintaympäristön vaikutus tuotannonsuunnitteluun

Toimitusketjun hallinnassa käytettävät strategiat riippuvat monista eri muuttujista. Työn rajauksen puitteissa keskitytään yksittäisen tuotantolaitoksen ja sille kohdistuvan kysynnän vaikutuksiin. Strategioiden kategorisointiin on Hilletofthin (2009) mukaan useita erilaisia jaottelumalleja. Martin et al. (2006) esittelevät jaottelun, jossa toimitusketjun ja tuotteiden vaikutuksia arvioidaan kolmen eri perusominaisuuden perusteella: minkä tyyppisiä ovat tuotteiden, kysynnän ja tilausten läpimenoaikojen piirteet. Martinin et al. mallissa tuotteet jaetaan erityisiin tai tavanomaisiin. Tavanomaiset tuotteet ovat esimerkiksi yksinkertaisia vakiintuneita kulutushyödykkeitä, kun taas erityistuotteet innovatiivisia ja korkeateknologisia. Kysyntää voi kuvata vakaaksi ja ennustettavaksi, tai epätasaiseksi ja arvaamattomaksi. Tuotteiden ja kysynnän jaottelun voidaan katsoa liittyvän vahvasti toisiinsa.

Erityislaatuiset tuotteet ovat usein elinkaareltaan lyhyempiä, ja uusia innovaatioita tulee suhteellisen tiheästi. Tämä lisää tuotteen kysynnän heilahtelua ja arvaamattomuutta. Vakiintuneissa tuotteissa taas päinvastoin. Läpimenoajat voidaan jaotella lyhyisiin ja pitkiin. Globaalit toimitusketjut pidentävät läpimenoaikoja entisestään ja aiheuttavat aikoihin epävarmuutta. (Martin et al. 2006)

Toimitusketjun strategiat voidaan jaotella Leaneihin tai ketteriin (Hilletofth 2009; Martin et al. 2006). Lean-filosofian mukaisessa tuotannossa minimoidaan ylimääräiset hukat. Esimerkiksi tuotevariaatiot ja kustomoitavuus pyritään minimoimaan, jotta vältytään ylimääräisiltä asetusajoilta ja varastoilta. Nämä katsotaan arvoa tuottamattomiksi elementeiksi. JIT (Just-In-Time) -toimitukset pienentävät varastoon sitoutunutta pääomaa, mutta voivat nostaa kokonaiskustannuksia toimitusketjussa. Varastointikulut saattavat siirtyä toimitusketjussa aiemmaksi toimittajalle. (Martin et al. 2006) Toimitusketjun eri osapuolien välisen tiedon jaon tärkeys tiedostetaan yleisesti, mutta tästä huolimatta teollisuusyrityksissä laaditaan tuotanto-ohjelmia toimitusketjun kannalta epäoptimaalisesti. Toimittajille luodaan suunnitelmaa optimoitaessa yksitellen ostotilauksia, mikä vastaavasti vaikeuttaa toimittajan tekemää suunnittelua heikentäen toimitusketjun kokonaissuorituskykyä. Tämä korostuu jatkuvan horisontin suunnittelussa. (Sahin et al. 2008) Martinin et al. mukaan ”ketteryys” voidaan katsoa tietyllä tavalla Lean-tuotannon vastakohdaksi. Ketteryydellä mahdollistetaan tuotteiden sekä tuotannon suurempi kustomoitavuus. Tämä lisää Lean-filosofian mukaisia hukkia, mutta joustaa ja sopeutuu muuttuviin markkinoihin ja tuotteisiin paremmin (Hilletofth 2009). Ketteryydellä tarkoitetaan nimenomaan toimitusketjun kykyä sopeutua muutoksiin reagoimalla. Epävarmuustekijöiden ennustamista ja niihin varautumista ennakoivasti ei siis katsota ketteryydeksi. Tosiasiassa toimitusketjuissa harvemmin noudatetaan puhtaasti jompaa kumpaa filosofiaa, vaan pikemminkin yhdistelmää niistä. (Martin et al. 2006) Hilletofth toteaa yhdistelmän toimivan siitäkin syystä, että tavoite niillä on sama: asiakastarpeiden täyttäminen pienimmillä kokonaiskustannuksilla. Hilletofth esittelee tutkimuksessaan laajan kriteeristön näiden filosofioiden, sekä niiden yhdistelmän välillä valitsemiseen.

Kysynnän vaihtelevuus vaikuttaa suurelta osin tuotannonsuunnitteluun ja tuotannonohjausmallin valintaan. Suurivolyymisten tuotteiden valmistamiseen voidaan käyttää varastoohjautuvaa tuotantomuotoa. (engl. MTS, Make-To-Stock) Suhteellisen tasaisella kysynnällä tuotanto voidaan lisäksi perustaa ennusteisiin. (Harjunkoski et al. 2014)

Ennusteiden ja tulevaisuudennäkymien epävarmuuksien vuoksi monet teollisuusyritykset käyttävät jatkuvan horisontin suunnittelua. Jatkuvan horisontin suunnittelussa suunnitelma laaditaan jäädytysajanjaksosta alkaen suunnitteluhorisontiksi kutsutun ajanjakson loppuun. Suunnitelmaa päivitetään jonkin ajan päästä siten, että se jatkuu jälleen suunnitteluhorisontin mittaisen ajan päähän. Suunnitelmaa ei pelkästään jatketa, vaan sitä myös päivitetään jäädytysajanjaksoa lukuun ottamatta tuoreemman datan perusteella. Näin alustavat suunnittelupäätökset muokkautuvat suunnitelmassa käsiteltävän hetken

lähestyessä. Suunnitelman alustavat päätökset on siten tehty jo aiemmin epävarmemmalla tiedolla. (Sahin et al. 2008) Tämä suunnitelmien toistuva muuttaminen aiheuttaa kuitenkin epävakautta ja lisäkustannuksia toimitusketjussa. (S. V. Sridharan et al. 1988) Sahin et al. havaitsivat tutkimuksessaan, että lyhytnäköisesti vain valmistuksen kannalta huomioiduilla MPS:n jatkuvan horisontin suunnittelun parametreilla vaihtoehtoiset kulut saattoivat olla jopa 900 % suuremmat koko ketjua optimoiviin lukuihin verrattuna. Tutkimus käsitteli myös toimittajille tehtävien tilaussitoumussääntöjen määrittämistä (Sahin et al. 2008).

MPS:n jäädyttämisellä on suunnittelua vakauttava vaikutus, ja se helpottaa etenkin toimittajan tuotannonsuunnittelua. (Sahin et al. 2008) Tällä taas on todettu olevan yritysten välisen toimitusketjun suorituskyvyn kannalta laajempia positiivisia vaikutuksia (Martin et al. 2006). Jäädytysajanjakson pituuden määrittäminen on tavallisesti tehokkain tapa tasapainotella suunnitelman alhaisten kustannuksen ja vakauden välillä. Epävarman kysynnän ympäristöissä suunnitelman jäädyttämisen on havaittu parantavan sekä suunnitelman kustannuksia että vakautta. Jäädytetyn ajanjakson osuus suunnitteluhorisontista riippuu muun muassa aiemman toimitusketjun joustavuudesta ja reagointikyvystä. (Sahin et al. 2008) Sahin et al. tutkivat juuri optimaalisen jäädytysajanjakson ja suunnitteluhorisontin pituuksia sekä päivitystahtia MPS:lle. V. Sridharan ja Berry (1990) havaitsivat varasto-ohjautuvaa suunnittelua tutkittaessa, että jäädytysjakson ollessa alle 50 % vakaus lisääntyi, mutta kustannukset eivät kohonneet merkittävästi. Tämän yli mennessä kustannukset nousivat huomattavasti ohjelman joustamattomuudesta. Sama havainto tehtiin myös tilausohjautuvaa tuotantoa tutkittaessa (S. V. Sridharan et al. 1988). Varasto-ohjautuvan tuotannon tapauksessa suunnitelman päivitysintervalleilla ja jäädytysjakson pituudella havaittiin olevan huomattavasti suunnitteluhorisontin pituutta merkittävämpi vaikutus kuluihin ja vakauteen (V. Sridharan ja Berry 1990). Wacker ja Sheu (2006) havaitsivat laajassa 768 valmistavan teollisuuden yrityksen dataa käsittelevässä tutkimuksessa MPS:n jäädyttämisen huonontavan sekä toimitusaikaa, että asiakkaalle luvatussa aikataulussa pysymistä, mikä toisaalta tuottaa lisäkustannuksia.

Fuchigami ja Rangel (2018) kertovat tuotannon aikataulutuksesta olevan teoreettista tutkimusta hyvin kattavasti monenlaisille ympäristöille ja tuotantomuodoille. Fuchigami ja Rangel toteuttivat tutkimuksen, joka keskittyi käytännönläheisten case-tutkimusten tulosten kokoamiseen. Tutkimuksessa havaittiin, että case-tutkimukset käsittelivät tapauksia deterministisestä näkökulmasta, mikä on usein vastoin yleistä käsitystä markkinan käyttäytymisestä. S&OP ja karkeatuotannonsuunnittelun (MPS) on Olhagerin ja Selldinin (2007) tutkimuksen mukaan todettu merkittävästi parantavan tuotannon suorituskykyä epävarmoilla markkinoilla. Ne sovittavat ja tasoittavat vaihtelevaa ja muuttuvaa kysyntää tuotannon kapasiteettiin sopivaksi pidemmällä aikavälillä (Olhager ja Selldin 2007).

Karkean tason kokonaisennusteista laaditaan liiketoimintakohtaisia ennusteita. Näitä käytetään kokonaissuunnitelman laatimiseen. Kokonaissuunnitelmaa käytetään kysynnän-

hallinnassa yhdessä ennusteiden ja MPS:n kanssa. (Wacker ja Sheu 2006) Stadtler (2005) kertoo karkeasuunnitelman, eli MPS:n, sijoittuvan ennusteiden ja tuotantosuunnitelman väliin. Näin se toimii vaimentimena tasapainottaessaan ennusteiden heilunnan aiheuttamia muutoksia (Stadtler 2005).

2.1.4 Aikataulutus ja eräkoot

Tuotannon aikataulutuksessa ajoitetaan ajoerät ja päätetään erien välinen järjestys, sekä koneet/linjat, joilla kukin erä tuotetaan. Ajoeräkoon määrittäminen on kirjallisuudessa usein erillinen ongelma, mutta näitä kahta ongelmaa voidaan myös tarkastella samanaikaisesti. (Fuchigami ja Rangel 2018) Myös Harjunkoski et al. (2014) selittävät, että eräkoon määrittäminen voi olla myös aikataulutustasolla oleva tehtävä, mikäli sitä ei tehdä jo ylemmän tason suunnittelussa.

Eräkokoa määritettäessä vaikutetaan varastotasoon ja sitä kautta palvelutasoon (Glock et al. 2014). Pitkien ajojen toteuttaminen vähentää lajien välisiä vaihtoja, mutta tuottavat ylimääräisiä varastointikuluja. Varasto-ohjautuvassa tuotannossa pitkät ajot kasvattavat riskiä tuotepuutoksille muissa kuin ajossa olevissa tuotteissa. (Rahman et al. 2015) Tuotantoa uudelleensuunnittelemalla voidaan toisinaan reagoida muuttuneisiin tilauksiin. Tällä voidaan toisinaan saavuttaa parannuksia tuotannon käyttöasteessa. (Rahman et al. 2015) Varastointiin kuluu resursseja niin suorien varastointikustannusten, kuin varastoon sitoutuneen pääoman kautta. Tilauskantaan nähden liian pienen varaston ylläpitäminen voi taas aiheuttaa toimitusvarmuuden heikkenemistä, mikäli kysyntä osoittautuukin odotettua suuremmaksi tai tuotannossa tulee odottamattomia ongelmia. Istokovicin et al. (2020) mukaan eräkoon pienentäminen kuitenkin kasvattaa lajinvaihdoista aiheutuvia kustannuksia tuotannon keskeytyessä useammin. Suuremmat eräkoot siis kasvattavat varastointikustannuksia, mutta pienentävät tuotannon kustannuksia. Eräkokoa pienentäessä nämä menevät luontaisesti päinvastoin. (Istokovic et al. 2020)

Aikatauluttamisessa tehtävänä on siis mahdollistaa tuotannon tehokas hyödyntäminen muun muassa optimaalisen ajojärjestyksen kannalta. Myös toimitusvarmuuden varmistaminen on yksi päätehtävistä. Tuotteita pitää siis olla saatavilla silloin kun niitä on asiakkaille luvattu. Aikataulutukseen vaikuttaa muun muassa tuotannonohjauksen tyyppi. Varastoohjauksessa tuotetta valmistetaan varastoon, joten asiakas voi tilata hyvin lyhyellä toimitusajalla tuotetta. Tuotetta on siis tilauksen tullessa jo valmiiksi olemassa. Tilausohjautuvassa tuotannossa vasta asiakkaan luoma tilaus käynnistää tilausta varten olevan tuotteen tuotannon suunnittelun. Tämä soveltuu muun muassa pienivolyymisille ja satunnaisesti tilattaville tuotteille. (Harjunkoski et al. 2014)

Perinteinen suunnittelu on tehty kynällä ja paperilla, eli tuotannonsuunnittelija on järjestänyt ajoja manuaalisesti. Nykyäänikin suunnittelija usein tarkastelee ja muokkaa suunnitelmaa manuaalisesti ennen sen toteuttamista käyttäen suunnittelujärjestelmiä. Nykyiset

ohjelmistot mahdollistavat kyllä automaattisen optimoinnin hyvin pitkälle, mutta aivan kaikkia näkökulmia tai prioriteetteja ne eivät pysty vielä ottamaan huomioon. Nykyajan laajat tuoteportfoliot, sekä asiakkaiden vaatima joustavuus tekevät optimaalisen ratkaisun löytämisestä manuaalisesti käytännössä mahdotonta. Suunnitteluskenaariosta kasvaa hyvin monimutkainen monine eri muuttujineen. (Harjunkoski et al. 2014) Suunnittelussa tarvitaankin siis ihmisen ja ohjelmiston yhteistoimintaa.

Yleisesti tuotanto-ohjelmaa laadittaessa voidaan kuvata alkuarvoja, rajoitteita ja ehtoja, jotka koskevat tuotantolinjaa ja ohjelmaa. Tuotantolinjalla, sekä sen varastoilla on rajalliset kapasiteetit, ja ne soveltuvat eri tuotteille mahdollisesti eri tavalla. Tuotannon parametreilla on myös tuotekohtaisia ominaisuuksia. Esimerkiksi valmistusajat, hyötysuhteet sekä materiaalivaatimukset vaihtelevat tuotteittain. Joitakin tuotteita voi mahdollisesti myös valmistaa osittain samanaikaisesti. Tuotannon ja varastoinnin kulurakenne on myös oleellisessa osassa. Tilausmäärät ja -ennusteet sekä asiakkaille luvatut toimitusajat asettavat luonnollisesti myös raja-arvoja. Tuotantoerien minimi- ja maksimikokoja voi myös rajoittaa jokin tuotantoprosessiin tai -koneeseen liittyvä ominaisuus. Lisäksi vielä tuotannon kulurakenne tulee ottaa huomioon; kustannuksia aiheutuu asetuksista, toisin sanoen vaihdoista ja puhdistuksista eri tuotteiden välillä, raaka-aineista, ja itse tuotantoprosessin käyttämisestä. (Harjunkoski et al. 2014) Lisäksi varastointikustannukset (Copil et al. 2017) ja luvatusta toimitusajasta myöhästymisestä aiheutuvat kulut pitää ottaa huomioon, mikäli mallista halutaan todenmukainen. Optimaalista ajo-ohjelmaa tehdessä pitää ottaa siis edellä mainitut rajoitteet huomioon, ja muodostaa ne toteuttava ajo-ohjelma, jolle muodostuu pienimmät kustannukset, kun sille lasketaan edellä mainittujen kulujen mukainen kokonaiskustannus (Harjunkoski et al. 2014). Muita tavoitteita voi Harjunkosken et al. mukaan olla muun muassa kokonaistuotantoajan tai toimitusviiveen minimointi, tai kokonaistuotannon tai tuloksen maksimointi. Se mitä näistä hyödynnetään, riippuu esimerkiksi kysynnästä. Mikäli tuotannolla on vapaata kapasiteettia, kannattaa mahdollisesti minimoida kokonaiskustannukset. Mikäli taas kapasiteetista on pulaa, voivat kokonaistuotannon tai tuloksen maksimointi olla parempia suunnittelulähtökohtia kokonaisuuden kannalta. (Harjunkoski et al. 2014) Suuressa kuvassa toimitusketjun hallinnan päätarkoituksiin kuuluu eri tasojen strategioiden linjaaminen. Tällä vältetään ristiriitaiset toiminnot eri osastojen välillä.

2.2 Tuotannonsuunnittelun vaikutus tuotannon ja toimitusketjun KPI-lukuihin

Tuotannonsuunnittelu asettaa tietyt raamit sille, kuinka tehokas tuotannosta voidaan saada. Mikäli tuotantolinja toimisi moitteetta tavoitenopeutta, niin suunnittelussa määritetyt vaihdot eri tuotteiden välillä laskevat tehokkuutta (Kumar et al. 2014). Tässä työssä tarkastellaan eri suunnittelutavoitteiden ja tunnuslukujen vaikutuksia toisiinsa. Näistä eten-

kin OTIF (engl. On Time, In Full) ja sen kuvaama toimitusvarmuus, sekä tuotannon tehokkuutta kuvaava OEE ovat tarkastelussa. OEE kuvaa hyvin kokonaisvaltaisesti tuotannon suoriutumista, ja on työssä siksi tärkeässä asemassa.

Kumar et al. (2014) kuvaavat julkaisussaan, miten ajoerien yhdistely suuremmiksi voi parantaa huomattavasti tuotantokoneiden käyntiasteita ja siten OEE:tä. Tämän takia OEE tulee ottaa huomioon jo tuotantoerien suunnittelussa. Tunnusluvut saattavat kuitenkin olla ristiriidassa keskenään. Pienempimenekkisen tuotteen ajoerän kasvattaminen OEE:n maksimoinnin takia voi olla kokonaisuudessa haitallisempaa kuin pienemmän ajoerän tuottaminen OEE:n kustannuksella. Ajoerän pidentäminen vähentää lajinvaihtoihin kuluvaa aikaa, mutta lisää varastoinnin kustannuksia ja varastoon sitoutunutta pääomaa (Istokovic et al. 2020; Copil et al. 2017).

Suunnittelun vaikutuksia arvioivat KPI-luvut on usein määritetty puutteellisesti. Aikataulutuksesta tulevia vaikutuksia on vaikea arvioida puutteellisilla mittareilla, sekä eri järjestelmiin hajaantuneella datalla. Näin ollen järjestelmiin ja toimintoihin tehdyt parannukset eivät selkeästi tule välttämättä esille. (Harjunkoski et al. 2014)

2.2.1 Tuotantotehokkuuden seuranta - OEE

Tuotannon tehokkuutta voidaan kuvata OEE-tunnusluvulla (engl. Overall Equipment Effectiveness). Tunnusluku kattaa kolme osa-aluetta: käytettävyyden, tehokkuuden ja laadun. (Andersson ja Bellgran 2015; Muchiri ja Pintelon 2008) Tunnusluvun avulla voidaan siis seurata melko laaja-alaisesti tuotannon suorituskykyä ja sen kehitystä. Monet OEE:n painottamista seikoista auttavat myös parantamaan tuottavuutta (Kumar et al. 2014). OEE:tä ei kuitenkaan yksistään voida käyttää kuvaamaan tuottavuutta, sillä se ei ole puhtaasti tuottavuuden mittari. Se ei esimerkiksi ota kantaa läpimenoaikaan, jota lyhentämällä voidaan parantaa tuottavuutta. (Andersson ja Bellgran 2015). OEE on alun perin kehitetty kunnossapidon tarpeisiin, ja sen osa-alueet ovat hyvin tuotantokonelähtöisiä. (Muchiri ja Pintelon 2008)

Muchiri ja Pintelon esittelevät kuusi erilaista hukkaa, joita OEE:n avulla pyritään eliminoimaan. Hukat ovat toimintoja, jotka kuluttavat resursseja, mutta eivät tuota lisäarvoa yritykselle. OEE:n käsittelemät hukat voidaan jakaa kolmeen edellä mainittuun kategoriaan (Muchiri ja Pintelon 2008):

Seisakkiajoista aiheutuvat hukat:

1. Rikkoontumisesta aiheutuvat seisakit
2. Lajinvaihdoista ja säädöstä aiheutuvat seisakit

Tuotantonopeuden hukat:

3. Lyhyet häiriöistä aiheutuvat tuotantokatkot ja koneen seisottaminen

4. Nopeuserot linjan tai tuotantokoneen tavoitenopeuden, sekä käytetyn nopeuden välillä

Laadun hukat:

5. Laatuvirheiden takia menetetty tuotanto
6. Koneen tai linjan käynnistymisessä ennen laatutavoitteisiin pääsyä menetetty tuotanto

Ongelmien jaottelu eri osa-alueille auttaa selvittämään huonon tuottavuuden juurisyitä. Näin toimenpiteitä pystytään kohdentamaan osa-alueille, jotka tarvitsevat huomiota. (Muchiri ja Pintelon 2008) OEE ei kuitenkaan suoraan kerro, onko ongelmien syy tarkasteltavassa koneessa, vai tarkastelualueen ulkopuolella muissa prosesseissa. Mikään tuotantokone ei ole täysin irrallaan muusta prosessista ja OEE:ssä näkyvät ongelmat voivat heijastua muun tuotannon lisäksi muista toiminnoista ja resurssien virheellisestä koordinoinnista. (Muchiri ja Pintelon 2008)

Muchiri ja Pintelon esittelevät seuraavat kaavat OEE:n laskemiseksi:

$$OEE = K \times N \times L \tag{2.1}$$

$$\text{Käyntiaika}(\mathbf{h}) = \text{Kuormitusaika}(\mathbf{h}) - \text{Seisokkiajat}(\mathbf{h}) \tag{2.2}$$

$$\text{Aikatehokkuus } \mathbf{K} = \frac{\text{Käyntiaika}}{\text{Kuormitusaika}(\mathbf{h})} \tag{2.3}$$

$$\text{Nopeustehokkuus } \mathbf{N} = \frac{\text{Teoreettinen läpimenoaika}(h) \times \text{Todellinen tuotanto (yksikköä)}}{\text{Käyntiaika}(\mathbf{h})} \tag{2.4}$$

$$\text{Materiaalitehokkuus } \mathbf{L} = \frac{\text{Kokonaistuotanto} - \text{Hylätyt}}{\text{Kokonaistuotanto}} \tag{2.5}$$

Kuten OEE:n muodostavista kaavoista 2.1–2.5 havaitaan, menestyminen jollakin osa-alueella ei takaa korkeaa OEE:tä. Edellä käsiteltyjen tuotannonsuunnittelun toimintojen mukaan OEE:hen voi vaikuttaa käytettävyyden kautta. Mikäli lajinvaihtojen määrää saadaan vähennettyä, myös niihin kuluva aika vähenee. Tämä kasvattaa käyntiaikaa yhtälössä 2.3, minkä seurauksena aikatehokkuus kasvaa.

OEE:n muodostamiseen tarvittavan datan keräämiseen tulee kiinnittää huomiota. Muchiri ja Pintelon kertovat, että täysin manuaalinen tiedonkeräys on käytännössä mahdotonta ja se tuottaisi hyvin epätarkkaa dataa. Automaatiota tulisi hyödyntää, ja manuaalisten tietojen kohdalla tarjota käyttäjäystävällisiä valmispohjia (Andersson ja Bellgran 2015). MES

(engl. Manufacturing Execution System) ja ERP (engl. Enterprise Resource Planning) mahdollistavat datan keräämisen ja esittämisen automaattisesti ja reaaliajassa (Muchiri ja Pintelon 2008). Harjunkoski et al. (2014) toteavat, että tuotannonsuunnittelussa käytettävän optimointimallin ratkaisu pitäisi saada integroitua helposti järjestelmiin, joilla saadaan määritettyä sen pohjalta OEE ja alustava kustannukset.

2.2.2 Toimitusvarmuuden seuranta - OTIF

Toimitusvarmuutta voidaan kuvata OTIFin (engl. On Time, In Full) avulla. Luvulle ei ole kirjallisuudessa määritettyä standardia, eikä sen koostumuksesta löydy vertaisarvioitua tutkimusta. Nimensä mukaisesti se kuitenkin käytännössä tarkoittaa ajallaan täysimääräisenä toimitettujen tilausten määrää suhteessa kaikkiin tilauksiin. Narayananin ja Ishfaqin (2022) mukaan useat vähittäistavarakaupat ovat ottaneet tietyn OTIFin tason vaatimuksekseen toimittajilleen. Tällöin myös toimittajien kannattaa luonnollisesti seurata kyseistä lukua toimitustensa toteutumisessa. Myöhästyneistä toimituksista voi aiheutua sakkoja toimittajille sovitun OTIFin tason alituttua (Narayanan ja Ishfaq 2022).

Wacker ja Sheu (2006) totesivat julkaisussaan, että MPS:n jäädyttäminen huonontaa sekä toimitusaikaa, että asiakkaalle luvatussa aikataulussa pysymistä. Se voi siis vaikuttaa negatiivisesti myös OTIFiin. Tämä voi aiheutua siitä, että muuttuvaan tilauskantaan ei pystytä tuotantosuunnitelmaa muokkaamalla vastaamaan. Wacker ja Sheu käyttivät kyseisessä tutkimuksessaan 768 valmistavan teollisuuden yrityksestä kerättyä dataa. Toimitushäiriöiden välttämiseksi tuotantoa voi joutua kysyntäennusteen epätarkkuuden takia uudelleensuunnittelemaan, mitä MPS:n jäädyttäminen rajoittaa.

2.3 Optimointimallit ja simulointi tuotannonsuunnittelussa

Optimaalisen eräkoon määrittämistä on tutkittu pitkään, ja aiheesta löytyy tutkimuksia monelta eri teollisuudenalalta erityyppisistä tuotannoista. (Glock et al. 2014; Nobil et al. 2016; Bahl et al. 1987). Eräkoon ja aikataulutuksen ratkaiseminen voidaan sisällyttää yhteiseen tarkastelumalliin (Fuchigami ja Rangel 2018). Beckin ja Glockin (2022) mukaan nämä toisistaan riippuvat ongelmat täytyy ratkaista yhdessä, jotta optimaalisimpaan tulokseen päästäisiin. Yleisesti tutkimuksissa käytetään matemaattisia ja heuristisia metodeja ongelman ratkaisuun. Ratkaisussa pyritään minimoimaan jokin ennalta määritetty parametri, kuten tuotannon ja varastoinnin kokonaiskustannukset tai läpimenoaika. (Harjunkoski et al. 2014; Istokovic et al. 2020) Fuchigamin ja Rangelin mukaan teorian ja käytännön sovellusten välisissä yhteyksissä on selkeä aukko. Teoreettisissa tutkimuksissa oli tehty huomattavia yleistyksiä ja yksinkertaistuksia todellisiin tilanteisiin nähden (Fuchigami ja Rangel 2018). Myös Harjunkoski et al. (2014) tunnistavat kuilun teorian ja käytännön välissä etenkin aikataulutuksessa. Nykyajan tietokoneet ja ohjelmistot tarjoavat kuitenkin

mahdollisuudet melko tarkkaankin analyysiin ja optimointiin.

Tässä työssä käsiteltävää kokonaisongelmaa vastaava nimitys kirjallisuudessa on taloudellinen tuotantoerä-aikataulutusongelma (engl. ELSP, Economic Lot Scheduling Problem) Perinteisessä yksinkertaisessa ongelmanasettelussa tutkitaan yhtä tuotantokonetta. (Beck ja Glock 2020) Razan ja Akgunduzin (2008) mukaan ELSP:n ongelmanasettelussa on perinteisesti tiettyjä rajauksia: Tuotannossa ei voi olla samanaikaisesti useita eri tuotteita, eli valmistuserät eivät voi lomittua. Kysynnän oletetaan olevan tuotekohtaisesti vakio ajanhetkestä toiseen sekä deterministinen. Tuotantolaitoksen myös oletetaan pystyvän vastaamaan kysyntään. Varastointikulut käyttäytyvät täysin lineaarisesti varastoitavien tuotteiden määrään nähden. Lajinvaihtokustannukset sekä -ajat katsotaan myös riippumattomiksi ajojen järjestyksestä. Nämä rajaukset rajoittavat yksinkertaisempien ratkaisumallien käyttöä todellisissa tilanteissa (Sun et al. 2009; Chatfield 2007).

2.3.1 Optimointimallit

ELSP -tyyppistä ongelmaa on kuitenkin tutkittu ahkerasti, ja alkuperäistä ongelmanmäärittelyä on laajennettu ja tarkennettu monilla erikoistuneilla malleilla. Dolgui, Eremeev et al. (2010) tutkivat ongelmaa, jossa on useita rinnakkaisia tuotantokoneita. Löhndorf et al. (2014) ehdottavat simulaatiopohjaista ratkaisumallia ongelmaan, jossa vaihtoajat ovat ajojärjestysriippuvaisia ja kysyntä on stokastista. Ghosh Dastidar ja Nagi (2005) käsittelevät tapaustutkimuksessaan mallia, jossa on järjestysriippuvaisten vaihtoaikojen lisäksi mallinnettu kustannukset tilausruuhkan (engl. backlog) aiheuttamille jälkitoimituksille sekä varastoinnille. Näin myös varastointikustannukset ja toimitusvarmuus saadaan osaksi mallia. Absi et al. (2011) esittelevät mallin, jolla eräkokoa voidaan optimoida minimoimalla kokonaiskulua, johon kuuluu myös jälkitoimituksista sekä menetetyistä myynneistä aiheutuneet kulut. Malli siis salli myös myyntien peruuntumisen, mikäli se olisi taloudellisesti muista syistä kannattavaa.

Optimointimallit voidaan kategorisoida muutamalla eri tavalla. Oikeantyyppisen mallin valintaan vaikuttaa käytössä olevan tuotannon tyyppi, sekä suunnitteluprosessi. Puhtaaseen aikatauluttamiseen on omat mallinsa, mikäli eräkoot ovat siis jo tiedossa ohjelmaa laadittaessa. Yleistetympiin malleihin siirryttäessä mallit voidaan jaotella aluksi karkeasti ketjutetun ja verkottuneen tuotannon välillä. Ketjutetussa mallissa kukin raaka-aine-erä etenee tuotannossa järjestyksessä vaiheesta toiseen yhtenäisenä, eli aiemmassa tuotantovaiheessa ollut tuotantoerä ei jakaudu seuraavassa vaiheessa useammalle koneelle tai linjalle. (Harjunkoski et al. 2014) Tämä malli soveltuu siis esimerkiksi erilaisille kemiallisille prosesseille, joissa käsiteltävä materiaali ei eriydy eri tuotantolinjoille. Harjunkoski et al. ovat antaneet esimerkkinä tästä esimerkiksi lääketeollisuuden vaikuttavan aineen tuotannon. Toinen päätyyppi on verkottunut tuotanto. Tässä tuotantoerät voivat jakaantua eri linjoille tai kahden eri edeltävän vaiheen erät voivat yhdistyä seuraavassa vaihees-

sa. Tästä Harjunkoski et al. antoivat esimerkkinä eri vaikuttavista aineista valmistettavien tablettien tuotannon. Yksi lääke voi sisältää useampaa vaikuttavaa ainetta (Harjunkoski et al. 2014).

Malleja voidaan jaotella myös sen mukaan, ovatko ne deterministisiä vai stokastisia. Deterministinen malli olettaa olosuhteet muuttumattomiksi, eli lähtöarvoissa, kuten kysynnässä ei ole epävarmuutta. Stokastiset mallit huomioivat myös epävarmuustekijöitä, kuten kysynnän heilahtelua. (Glock et al. 2014)

Simuloinnin ja optimoinnin integroiminen yhdistää molempien toimintojen hyödyt. Simuloinnilla voidaan tarkastella olemassa olevaa järjestelmää tarkallakin digitaalisella mallilla. Optimointijärjestelmät taas keskittyvät tuotannon järjestämiseen algoritmien avulla. Simulointimalleilla näitä ratkaisuja pystytään vertailemaan ja sovittamaan tuotantoon ottamatta sitä kuitenkaan heti reaalimaailmassa käyttöön. (Istokovic et al. 2020)

2.3.2 Ajo-ohjelman simulointi

Tuotannon mallintamisessa yksi yleisimmin käytetyistä menetelmistä on tapahtumapohjainen simulointi (engl. DES, Discrete Event Simulation). Digitaalisen mallin avulla pystytään tarkastelemaan tuotantoa ja siihen tehtyjä muutoksia ilman todelliseen tuotantojärjestelmään vaikuttavia muutoksia. Näin voidaan turvallisesti ja vaivattomammin kokeilla ja hakea parasta ratkaisua. Malliin pystytään myös sisällyttämään todellisen järjestelmän satunnaista käyttäytymistä kuten vikaantumisia. (Istokovic et al. 2020) Sekä Harjunkoski et al. (2014) että Istokovic et al. (2020) mainitsevat, että jo käytössä olevan tuotantoohjelman analysoinnin mahdollisuus optimointimallilla on erittäin hyödyllinen ominaisuus. Näin ohjelmaa voidaan verrata uuteen, optimoituun ohjelmaan.

Harjunkoski et al. kertovat yrityksen käytössä olevasta mallinnusjärjestelmästä ja sen vaatimuksista. Mallinnusta varten pitää olla tarkkaa ja ajantasaista dataa tuotannosta, sekä tilauksista. Lähdedatan pitää olla myös helposti saatavissa ja päivitettävissä. Se pitää saada tuotua esimerkiksi ERP-järjestelmästä. Monissa kaupallisissa järjestelmissä taulukoiden ja tietokantojen yhdistäminen on tehty mahdolliseksi, mikä helpottaa tietojen tuontia. Myös tulokset pitää olla selkeästi esitettyjä tuotannonsuunnittelijan käyttöliittymän kautta. Datan saatavuuden onkin havaittu olevan usein pullonkaula. (Harjunkoski et al. 2014). Eräkoon ja aikataulutuksen optimoivassa mallissa lähtödataksi tarvitaan tuotteiden reititykset (engl. routing), tuotteille sopivat valmistuslinjat, tuotekohtaiset tuotantonopeudet, sekä tilaukset eräpäivineen ja määrineen. (Harjunkoski et al. 2014)

2.4 Toimituserän mitoitus-aikataulutusongelmatyypit ja ratkaisumallit

Aikataulutus ja eräkoko-ongelman määrityksessä aikataulutusperiaatteet (engl. scheduling policy) voidaan Santander-Mercadon ja Jubiz-Diazin (2016) mukaan jakaa karkeasti neljään ryhmään:

1. Toistuvasykliset ohjelmat (engl. CC, Common Cycle)

   Toistuvasyklisissä malleissa muodostetaan ohjelma, jossa on samanlaisena toistuva sykli, jossa erät ovat tietyssä järjestyksessä. Erät ovat syklistä toiseen samoilla paikoilla, ja samankokoisia.

2. Perusjaksolliset ohjelmat (engl. BP, Base Period)

   Perusjaksollisessa mallissa on nimensä mukaisesti perusjakso, jonka monikerran välein jokainen erä toistuu. Ohjelma ei ole jaksosta toiseen samanlainen, mutta tuotekohtaiset erät ovat aina yhtä suuria. Erien valmistustiheys siis vaihtelee eri tuotteiden välillä.

3. Muuttuvaeräiset ohjelmat (engl. TVLS, Time Varying Lot Sizes)

   Ajoerän koko voi syklien välillä muuttua ohjelmassa, mutta jokainen sykli on järjestykseltään samanlainen.

4. Jaksottomat ohjelmat

   Jaksottomissa malleissa ajo-ohjelmassa ei ole toistuvaa järjestystä. Tämä asettaa vähiten rajoituksia mallilla tehden siitä myös vaikeimmin ratkaistavan.

Toimituserän mitoitus- ja aikataulutusongelmaa varten on kehitetty monia malleja. Sopivan mallin valinta riippuu mallinnettavan tuotannon ja ympäristön ominaisuuksista sekä tarkastelussa olevasta aikahorisontista. Tuotannon ja ympäristön vaikutukset liittyvät muun muassa kysynnän, varaston sekä tuotannon rakenteeseen. (Harjunkoski et al. 2014)

2.4.1 Analyyttiset menetelmät

Analyyttisistä menetelmistä suosituimpiin kuuluu sekalukuohjelmointi (jatkossa MIP, engl. Mixed-Integer Programming) (Harjunkoski et al. 2014), joka on matemaattisen ohjelmoinnin alalaji. MIP:n avulla voidaan kuvata monia erityyppisiä tuotanto- ja tehdasasettelumuotoja. MIP:n voi jakaa kahteen alalajiin, lineaariseen (MILP) ja epälineaariseen (MINLP). Näistä jälkimmäinen on huomattavasti vaativampi ratkaisualgoritmien ja laskentatehon kannalta. MILP:n avulla pystytään kuvaamaan yksinkertaisempia tilanteita, mutta epälineaarisuudet ratkaistavissa muuttujissa vaativat MINLP-mallien käyttöä. (Harjunkoski et al. 2014)

Analyyttiset menetelmät tuottavat järjestelmällisesti optimaalisen ratkaisun, mikäli sellainen on löydettävissä. Mallien ratkaisu analyyttisesti on usein käytännön sovelluksissa haastavaa. Ongelmia kuvaavissa malleissa on niin paljon tuntemattomia muuttujia, että niiden ratkaisu ilman huomattavia yksinkertaistuksia on usein laskennallisesti liian vaativaa käytännön sovelluksiin. Tämä riippuu kuitenkin tarkasteltavasta kohteesta. (Harjunkoski et al. 2014; Dolgui, Ivanov et al. 2019) Yleistykset taas muuttavat mallia suhteessa todelliseen, mikä vaikuttaa myös saatuun vastaukseen. Näin voidaan kyseenalaistaa myös saadun ratkaisun optimaalisuus. Santander-Mercadon ja Jubiz-Diazin (2016) mukaan monissa ratkaisumalleissa käytetään esimerkiksi olettamusta syklisistä samoina toistuvista ajo-ohjelmista ja tasakokoisista eristä. Nämä olettamat eivät vastaa välttämättä todellisuutta. Jotkin mallit myös ehdottavat uutta erää vasta kun varastosaldo on nolla (0). Vaihtelevia eräkokoja tuottavia metodeja on Santander-Mercadon ja Jubiz-Diazin mukaan kehitetty vuodesta 1987 lähtien. Yksinkertaistetut mallit ovat matemaattisen ohjelmoinnin avulla ratkaistavissa. Matemaattinen ohjelmointi on eksakti analyyttinen menetelmä, joka tuottaa mallille optimaalisen ratkaisun (Santander-Mercado ja Jubiz-Diaz 2016). Jo perinteisen yksinkertaisen ELSP-optimointiongelman on kuitenkin todistettu olevan NP-vaikea, mikä tekee siitä laskennallisesti vaativan ratkaistavan. Kun siirrytään yleistetympiin ja vähemmän rajattuihin ongelmiin, kirjallisuudessa esitetyt ratkaisumenetelmät perustuvat lähinnä heuristisiin, eli likiarvoisiin ratkaisumenetelmiin. (Raza ja Akgunduz 2008; Santander-Mercado ja Jubiz-Diaz 2016) NP-vaikeus lisäksi kasvaa tuotannon käyttöasteen kasvaessa (Raza ja Akgunduz 2008).

Laskentateho, sekä ratkaisualgoritmien kehittyminen toisaalta mahdollistavat nykyään monimutkaisempien mallien käytön. Tästä esimerkkinä kymmenessä vuodessa tapahtunut kehitys vuosien 1993–2003 välillä. 1993 eräs malli ratkaistiin eksaktilla tietokonelaskennalla 908 sekunnissa, kun 2003 kyseiseen ratkaisuun kului 0,45 sekuntia. (Harjunkoski et al. 2014). Tästäkin esimerkistä on jo aikaa, eikä kehitys ole tietenkään jäänyt tähän. Tämä toimii kuitenkin mittakaavaa antavana tapauksena.

2.4.2 Heuristiset menetelmät - Geneettinen algoritmi

Lähdekirjallisuudessa suositaan useamman tuotantokoneen sisältävän mallin ratkaisussa heuristisia ratkaisumalleja laskennallisen vaativuuden takia (Santander-Mercado ja Jubiz-Diaz 2016). Santander-Mercadon ja Jubiz-Diazin tekemän katsauksen mukaan noin 90 % tutkimuksista, jotka käsittelivät monilinjaista mallia, hyödynsivät heuristiikkaa tai hybridimenetelmiä mallin ratkaisemisen. Myös kokonaiskustannusten minimointi oli tavoitteena 90 % kootuista tutkimuksista. Santander-Mercadon ja Jubiz-Diazin laatimassa katsauksessa oli mukana 126 artikkelia vuosilta 1958–2015.

Tuotannonsuunnittelun ongelmaan on monimutkaisuutensa vuoksi sovellettu monenlaisia eri heuristia menetelmiä. Näitä ovat muun muassa tabuhaku (engl. TS, Tabu Search),

simuloitu jäähdytys (engl. SA, Simulated Annealing), geneettiset algoritmit (engl. GA, Genetic Algorithms), muurahaiskolonnaoptimointi (engl. ACO, Ant Colony Optimisation), diskreetti keinotekoinen mehiläiskolonna, (engl. discrete artificial bee colony) ja hiukkasparvioptimointi (engl. PSO, Particle Swarm Optimisation) (Raza ja Akgunduz 2008; Santander-Mercado ja Jubiz-Diaz 2016) Algoritmien nimistäkin voi päätellä, että monet niistä perustuvat luonnossa esiintyviin ilmiöihin. Ratkaisualgoritmit voivat olla myös hybridisiä. Ne hyödyntävät ratkaisun etsimisessä sekä analyyttisiä että heuristisia menetelmiä. Heuristinen menetelmä voi esimerkiksi tehdä ratkaisun hakua laajemmalla alueella ja analyyttinen menetelmä hakea tarkempaa lokaalia optimia. (Rahman et al. 2015; Santander-Mercado ja Jubiz-Diaz 2016).

Geneettiset algoritmit ovat laajasti eri alueilla hyödynnettyjä heuristisia menetelmiä. Niitä käytetään myös tuotannonsuunnittelun ongelmissa. Ne soveltuvat hyvin monimutkaisiin ja laajoihin ongelmiin, joiden kaikkien ratkaisujen systemaattinen läpikäyminen olisi liian vaativaa. (Raza ja Akgunduz 2008) Geneettisiä algoritmeja voi hyödyntää monenlaisissa ongelmissa. Kim et al. (2008) minimoivat algoritmilla monivaiheisen tuotannon vaihdoista, varastoinnista ja myöhästymisistä aiheutuvia kokonaiskuluja. Nobil et al. (2016) tutkivat algoritmilla usean tuotantolinjan tilauksien allokointia ja optimaalista ohjelman kiertoaikaa ottamalla huomioon käyttöasteista, vaihdoista, varastoinnista, tuotannosta sekä hävikistä aiheutuvat kulut.

Geneettinen algoritmi on saanut inspiraationsa luonnossa esiintyvästä evoluutiosta. Algoritmeja on jatkokehitetty eri tilanteisiin, mutta ne jakavat silti seuraavanlaisen perusmekaniikan:

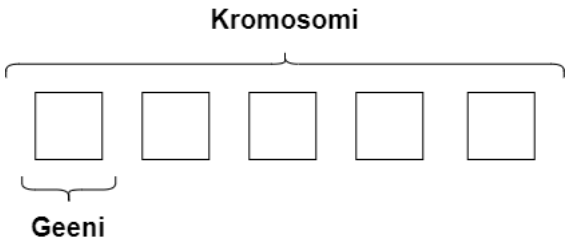
1. Algoritmi muodostaa yksittäisistä ratkaisuista, eli yksilöistä muodostuvan alkupopulaation. Perinteisesti ensimmäinen sukupolvi muodostetaan satunnaisesti, mutta myös ohjattua alkupopulaation luomista käytetään (Rahman et al. 2015).
2. Algoritmi pisteyttää populaation kunkin yksilön erikseen perustuen ratkaisun laatuun ennalta määritellyn sopivuusfunktion avulla. (Raza ja Akgunduz 2008)
3. Populaation yksilöistä parhaiten menestyvät risteytetään, jolloin saadaan uusi sukupolvi. Tämän uuden sukupolven populaation yksilöt perivät edeltävän sukupolven populaation piirteitä. (Raza ja Akgunduz 2008)
4. Näistä jälleen parhaat risteytetään. Tätä kaavaa jatkettaessa vain parhaat ratkaisut risteytyvät, joten ratkaisut paranevat sukupolvesta toiseen. (Khouja et al. 1998; Raza ja Akgunduz 2008)
5. Algoritmin suoritus pysäytetään, kun ennalta-asetettu määrä sukupolvia on analysoitu, tai jokin muu pysäytyskriteeri saavutetaan. (Rahman et al. 2015)

Ennen algoritmin suorittamista määritetään sukupolven koko. Tämä määrittää siis, kuinka monta yksilöä yhdessä sukupolvessa on. Sukupolven koko riippuu ongelman laskennal-

lisesta vaativuudesta ja laajuudesta. Pienellä sukupolven koolla algoritmi saattaa päätyä helpommin lokaaliin optimiratkaisuun. Se ei siis ole välttämättä globaali, eli aidosti paras mahdollinen optimiratkaisu. Pieni sukupolvikoko löytää optimin kuitenkin suurta kokoa vähemmillä sukupolvilla. Ratkaisu siis suppenee kohti optimia nopeammin. Suuri populaatiokoko löytää todennäköisemmin paremman ratkaisun, mutta laskennan monimutkaisuus ja kesto kasvavat huomattavasti. (Qian et al. 2018) Rahman et al. käyttivät tutkimuksessaan resetointioperaatiota, mikäli ratkaisu ei kehittynyt 10 sukupolven aikana. Tämä mahdollisti poistumisen lokaalin optimin parista ja laajentamaan hakua toisaalle. Qian et al. (2018) käyttivät tutkimuksessaan säätyvää populaatiokokoa, mikä mahdollisti populaatiokoon automaattisen kasvattamisen 20:stä 200:aan ongelman laajetessa. Kyseisessä tutkimusasetelmassa alkupopulaation koko oli kuitenkin rajattu arvoon 20.

Toinen määritettävä parametri on sukupolvien maksimimäärä. Algoritmille voidaan asettaa sukupolvien maksimimäärä, jonka saavutettaessa suoritus viimeistään pysähtyy. Myös muita pysäyttämistä koskevia sääntöjä voidaan asettaa. Algoritmin suoritus voidaan pysäyttää esimerkiksi, mikäli ratkaisu ei ole parantunut viimeisen 200 sukupolven aikana. (Rahman et al. 2015) Myös ratkaisun kehittymisen merkittävä hidastuminen voi toimia pysäytyksen merkkinä (Khouja et al. 1998).

Geneettisessä algoritmissa kukin sukupolvi koostuu yksilöistä, joissa on yksi tai useampi kromosomi. (Khouja et al. 1998; Qian et al. 2018) Esimerkiksi Rahmanin et al. (2015) mallissa kromosomilla kuvataan tuotettavien erien järjestystä ajo-ohjelmassa. Istokovic et al. (2020) käyttävät yksilöitä, joissa on 6 kromosomia. 3 näistä kuvaa eräkokoa ja 3 järjestystä. Kromosomi koostuu edelleen geeneistä (Kuva 2.1). Edellä mainitussa Rahmanin et al. mallissa yksittäinen geeni kuvaa siis yksittäistä ajoerää.



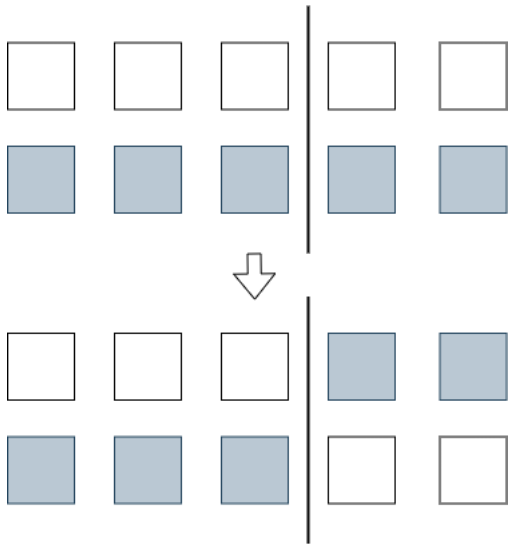
Kuva 2.1. *Kromosomi, mukaillen lähteestä Khouja et al. (1998)*

Algoritmia suoritettaessa jokainen käsiteltävä yksilö pisteytetään suoriutumisensa perusteella sopivuusfunktiolla. Algoritmilta yksilölle valikoituneet arvot syötetään varsinaiselle ongelmaa kuvaavalle mallille, joka käsittelee alkuperäistä ongelmaa. Kun malli on suoritettu yksilön arvoilla, tarkastelussa olevat tulokset syötetään sopivuusfunktiolle. Tämä laskee kyseisen yksilön suoriutumista kuvaavat sopivuuspisteet (engl. fitness). Sopivuusfunktio voi ottaa huomioon useita eri parametreja. (Nobil et al. 2016) Esimerkiksi Nobil et al. laskevat sopivuusfunktiollaan tuotannon kuluja. Myös monitavoiteoptimointi on mahdollista yhdistämällä eri tavoitteita sopivuusfunktiossa. Huang ja Süer (2015) käyttävät

mallissaan algoritmin yksilöiden arvioinnissa simulointimallin tuottamaa kokonaistuotantoaikaa, läpimenoaikaa, sekä myöhästyneisyyttä. Sopivuusfunktiota varten kyseiset luvut muunnetaan paloittain määritellyn jäsenyysfunktion avulla sumean logiikan (engl. fuzzy logic) mukaisiksi muuttujiksi. Sumeat totuusarvot ovat perinteisen logiikan sijaan jatkuvia reaalilukuja välillä [0,1]. Näiden avulla useita erityyppisiä suureita pystytään vertailemaan yksilön arvioinnissa. (Huang ja Süer 2015)

Sopivuusfunktiossa voidaan myös asettaa rangaistus epätoivottujen ominaisuuksien seurauksena (Nobil et al. 2016). Epätoivottujen ja toteuttamiskelvottomienkin ratkaisujen pitäminen populaatiossa voi Sunin et al. (2009) mukaan auttaa ratkaisujen monimuotoisuuden säilyttämisessä. Tämä ehkäisee ratkaisujen suppenemista tiettyyn lokaaliin minimiin. Chatfield (2007) käyttää toteuttamiskelvottomien ratkaisujen pisteytyksessä ongelmaan verrannollista sakkoa. Lisäksi hän painottaa hyviä ratkaisuja korottamalla ratkaisun pisteytyksen toiseen potenssiin. Mikäli huonoja ratkaisuja ei pisteytettäisi tai niille annettaisiin kiinteä sakko, ei algoritmi löytäisi niiden parista parempiin ratkaisuihin. Se ei pystyisi vertailemaan huonoja ratkaisuja valitakseen niistä parhaimpia parannettaviksi. Chatfield välttää liian aikaista suppenemista myös lisäämällä ensimmäisille 100 sukupolvelle asteittain pienenevän sakon.

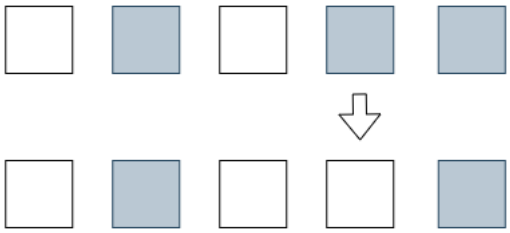
Kun sukupolven kaikki yksilöt on analysoitu ja pisteytetty, parhaat yksilöt valikoidaan ja risteytetään. Näin muodostuu uusi sukupolvi. Risteytyksessä uuden polven yksilöt saavat satunnaisesti ominaisuuksia molemmilta vanhemmiltaan. Kuvassa 2.2 1-pisteristeytys, jossa kromosomi leikataan yhdestä pisteestä, ja uudet kromosomit muodostuvat leikattujen palojen yhdistyessä uusiin kromosomeihin. Kromosomeja voidaan risteyttää myös leikkaamalla ja yhdistämällä ne useammasta eri pisteestä. (Khouja et al. 1998).



Kuva 2.2. *1-pisteristeytys, mukaillen lähteestä Khouja et al. (1998)*

Toinen yleinen kromosomien muokkausoperaatio on sekin luontaisesta evoluutiosta tunnettu mutaatio. Mutaation perustarkoitus on tuottaa vaihtelua tuloksiin ja ohjata uusien

ratkaisujen pariin. (Chatfield 2007) Mutaatio on esitelty kuvassa 2.3. Mutaatio muokkaa yksilön olemassa olevia geenejä. Muokkaus voidaan toteuttaa useilla eri tavoilla kromosomin tietorakenteenkin mukaan (Qian et al. 2018). Mutaatiolle asetetaan jokin suhteellisen pieni todennäköisyys, eikä se tapahdu automaattisesti joka kromosomille. (Khouja et al. 1998) Qian et al. havaitsivat tutkimuksessaan, että mutaatio-operaattorin käyttö vähensi optimiratkaisuun tarvittavien iteraatioiden, eli sukupolvien ja yksilöiden kokonaismäärää oikein käytettynä. Optimaalinen todennäköisyys kyseisen tutkimuksen tapauksessa oli 0,009. Nostettaessa todennäköisyyttä arvoon 0,017, ratkaisut lakkasivat suppenemasta, eivätkä ne saavuttaneet enää optimia. Verrokkina Chatfield (2007) käytti omassa tapauksessaan niin ikään 0,01 todennäköisyyttä mutaatiolle. Mutaation todennäköisyys voidaan sitoa myös kromosomin kokoon (Khouja et al. 1998). Mutaatio mahdollistaa sen, että algoritmi löytää pois lokaalista optimista tuottamalla lokaalista optimiratkaisusta poikkeavia ratkaisuja. Mutaation todennäköisyyttä kasvatettaessa algoritmin suppeneminen kuitenkin hidastuu, sillä ratkaisut eivät hakeudu niin nopeasti kohti optimia. (Qian et al. 2018)



Kuva 2.3. *Mutaatio-operaatio, mukaillen lähteestä Khouja et al. (1998)*

Monet kaupalliset järjestelmät sekä hyödyntävät olemassa olevia ratkaisumalleja että mahdollistavat mallien muodostamisen suhteellisen helposti analyyttistä mallintamista muistuttavilla lausekkeilla. Kaupallisia optimointiohjelmia on tarjolla laaja valikoima. (Harjunkoski et al. 2014)

Geneettistä algoritmia käytetään etenkin yhdessä perusjaksollisen eräkokomallin kanssa (Rahman et al. 2015; Chatfield 2007). Chatfieldin mukaan geneettisen algoritmin kanssa hyvin yhteensopiva perusjaksollinen malli kuitenkin rajoittaa liikaa ratkaisujen ominaisuuksia pärjätäkseen kilpailevien ratkaisumallien kanssa. Perusjaksollisessa eräkokomallissa eräkoko säilyy samana eri erien välillä, mutta erien ilmenemisväli vaihtelee. Tämä rajoittaa ratkaisuja. ELSP:n alkuasettelussa oletetaan perinteisesti myös ajojärjestyksestä riippumattomat vaihtoajat, sekä deterministinen kysyntä. Näistä poikkeavat esioletukset rajoittavat myös perusjaksollisen mallin käyttöä, sillä perusjaksosta ennalta määrätty vakiosuuruinen osa varataan vaihtoajalle. (Chatfield 2007)

Chatfield käyttää algoritminsa kanssa laajennettua perusjaksollista mallia, jossa kuitenkin ratkaisun toteuttamiskelpoisuus ja ajojen päällekkäisyys vaatii lisätarkastelua perusjaksolliseen malliin verrattuna. Tuotannon kysynnän ja kapasiteetin suhteen lähestyessä korkeaa tasoa (> 95 %), muuttuvan eräkoon mallit tuottavat parempia ratkaisuja vakioeräkokomalleihin nähden. Vakioeräkokoiset mallit alkavat tuottaa toistuvasyklisiä ohjelmia,

jotka eivät ole välttämättä yhtä optimaalisia kuin muuttuvan eräkoon ohjelmat. Muuttuvan eräkoon mallit saattavat kuitenkin erien kasvaessa luoda hyvin pitkiä syklejä, mikä voi aiheuttaa hyvin kankeita ja kysyntävaihtelulle alttiita ohjelmia. (Chatfield 2007)

2.4.3 Simulointioptimointi

Simulointia voidaan käyttää yhdessä optimoinnin kanssa todenmukaisen datan tuottamiseksi arviointia varten. Istokovic et al. (2020) esittelevät mallin, jossa geneettinen algoritmi on sisällytetty osaksi tapahtumapohjaisen simuloinnin mallia. Tuotannosta on luotu simulaatiomalli, jossa on määritetty tilauskanta sekä tuotantokoneet ominaisuuksineen. Mallin sisällä on geneettinen algoritmi, joka generoi toistuvalla syklillä tuotantoerät sekä järjestyksen kunnes tyydyttävä ratkaisu on löydetty. Kullekin yksilölle suoritetaan simulointi geneettisen algoritmin optimoimilla lähtöarvoilla. Pisteytys tehdään yksilön simulaation tuottaman kokonaiskustannusarvion perusteella. Kustannuksissa otettiin huomioon työstövälineet, tuotantokulut, varastointikulut, raaka-aineista ja hylätystä tuotannosta aiheutuvat kulut sekä energiakulut ja viivästyneet toimitukset. Lopuksi parhaan yksilön parametreilla voidaan tarkastella tarkemmin sen suoriutumista simulaation avulla. Myös Huang ja Süer (2015) on hyödyntänyt tapahtumapohjaista simulointia yhdessä geneettisen algoritmin kanssa. Kyseisessä tutkimuksessa simulointimalli on toteutettu, jotta geneettisen algoritmin muodostamia parametreja vastaavat tuotannon tunnusluvut saadaan selville.

Istokovicin et al. mukaan simulointimallin käyttäminen optimoinnin kanssa mahdollistaa eri toimintamallien ja tuotannon konfiguraatioiden vaikutuksen tutkimisen. Mallilla pystytään myös ottamaan epävarmuustekijöitä huomioon. Simulointimalli ei itsessään kuitenkaan optimoi mitään, joten optimointialgoritmin liittäminen siihen tukee molempia toimintoja. (Istokovic et al. 2020)

Geneettisen algoritmin suoritus ei itsessään ole kovin aikaa vievä operaatio. Chatfield (2007) suoritti 30 yksilön sukupolven koolla noin 1000 sukupolvea sekunnissa määrittelemättömällä testivälineistöllä. Sukupolvia oli testissä kokonaisuudessaan 10 000. 10 000 sukupolven arviointiin kului aikaa siis noin 10 sekuntia. Chatfield ei kuitenkaan käyttänyt mallinsa arviointiin simulointia, sillä kyseessä oli vertailuanalyysi yleisesti käytetyllä ongelmalla. Istokovic et al. käyttivät stokastisia ominaisuuksia sisältävää simulointimallia optimoinnin osana. Käytetyssä populaatiossa oli 50 yksilöä, jolloin 50 sukupolven arviointiin kului 59 minuuttia. Simulaation käyttämä osuus optimoinnin kestosta on siten huomattava, kun verrataan Chatfieldin toteuttamaan algoritmiin.

3. TUTKIMUKSEN KUVAUS

Työ toteutetaan tapaustutkimuksena (engl. case study). Tapaustutkimuksen tutkimusasetelmassa voi olla esimerkiksi yksittäinen tapaus, jonka ympärille tutkimus rakennetaan (Vuori n.d.). Tapaus voi olla esimerkiksi prosessi tai projekti. Tapaustutkimuksessa pyritään saamaan mahdollisimman kokonaisvaltainen käsitys tapauksesta. Tämän saavuttamiseksi käytetään monesti useita eri tutkimusaineistoja, kuten haastatteluja, tilastoja, asiakirjoja ja havainnointia. (Vuori n.d.) Tutkimusstrategiana tapaustutkimus on kvalitatiivinen, eli luonteeltaan laadullista tutkimusta. Laadullinen tutkimus on puhtaasti deduktiivisen tai induktiivisen sijaan analyysivetoista. Tällöin empiirinen aineisto on merkittävässä roolissa, mutta sitä tarkastellaan jonkin tietyn teorian tai menetelmän avulla. (Juhila n.d.)

Työn alussa suoritettiin kirjallisuuskatsaus, joka käsittelee tuotannonsuunnittelua, KPI-lukuja, sekä erilaisia optimointimalleja ja tapahtumapohjaista simulaatiota. Kirjallisuuskatsauksessa tuodaan esille tarkastelunäkökulman kannalta oleellisia suunnittelun piirteitä. Simulointia ja optimointia koskevassa kirjallisuuskatsauksen osassa pääpaino on työssä käytössä olevissa menetelmissä.

3.1 Haastattelut

Kirjallisuuskatsauksen jälkeen esitellään nykytila-analyysi, jota varten käytiin haastattelujen ja simuloinnin avulla tuotannon, toimitusketjun sekä tuotannonsuunnitteluprosessin nykytilaa läpi. Nykytila-analyysiä varten suoritettiin teemahaastatteluja eri tahoille. Työn näkökulma kattoi tuotannon ja suunnitteluorganisaation toimia, joten haastatteluja päätettiin pitää sekä toimitusketjun että tuotannon henkilöstölle.

Haastattelujen avulla saadaan tietoa jostakin asiasta yksilön kokemuksien ja käsityksien kautta. Haastattelijalla on huomattava rooli siihen liittyen, millaista tietoa haastattelussa tulee esille. Tämä ei liity pelkästään kysymysasetteluun vaan haastattelun luonteeseen ja vuorovaikutuksen laatuun. (Hyvärinen et al. n.d.) Ruusuvuori et al. mukaan haastattelun vuorovaikutukseen vaikuttaa muun muassa se, mitä haastateltava pitää merkittävänä haastattelun kannalta. Haastattelija vaikuttaa tähän käsitykseen muun muassa kysymysmuotoilulla. Haastattelut voidaan esiasettelun perusteella jaotella karkeasti kolmeen tyyppiin: Strukturoituihin, puolistrukturoituihin ja strukturoimattomiin. (Ruusuvuori et al. 2005) Strukturoiduissa haastatteluissa sekä kysymykset että vastausvaihtoehdot ovat tarkas-

ti ennalta määritettyjä. Puolistrukturoiduissa, toisin sanoen teemahaastatteluissa, kysymykset liittyvät tiettyihin aihealueisiin. Niitä ei esitetä välttämättä kaikille haastateltaville samassa muodossa tai järjestyksessä. Tämä tekee haastattelutilanteesta luontevamman. Vastaukset saavat olla myös vapaamuotoisia. Tämä tuo paremmin esiin haastateltavan näkökulmat asiaan liittyen. Strukturoimaton haastattelu muistuttaa vapaamuotoista keskustelua haastateltavan ja haastattelijan välillä. Haastattelu voi edetä suuntaan jos toiseenkin kummankin ohjatessa keskustelua vapaamuotoisesti. (Ruusuvuori et al. 2005) Tässä työssä toteutettiin pääosin puolistrukturoituja haastatteluita kasvotusten sekä videoviestimien välityksellä. Myös sähköpostilla esitettiin yksinkertaisempia kysymyksiä eri tahoille.

Teemahaastatteluissa käytettiin eri haastateltaville erilaisia kysymysrunkoja. Kysymyksiä ei esitetty suoraan rungossa olevien kysymysten mukaisesti, tai välttämättä lainkaan, mikäli keskustelu ohjautui itsestään kyseiseen aihepiiriin. Runko oli olemassa, jotta kaikki alueet tulivat varmasti käsitellyiksi.

Taulukko 3.1. *Haastattelujen tiedot*

Haastateltava	Kesto	Viittaus
Production Planner	65 min	Haastattelu 1
Planning Manager	70 min	Haastattelu 2
Prosessinhoitaja	105 min	Haastattelu 3
Customer Service Manager	40 min	Haastattelu 4
Mill Controller	65 min	Haastattelu 5
Key Account Manager	25 min	Haastattelu 6
Production Engineer	60 min	Haastattelu 7

Haastattelut on esitelty taulukossa 3.1. Näistä haastattelujen 1–3 ja 7 kysymysrungot esitellään seuraavaksi. Haastattelut 4,5 ja 6 sisälsivät kustannusrakenteeseen liittyviä kysymyksiä simulointimallin kulumallin ja tavoitteiden selvittämiseksi. Näiden kysymyksiä ei julkaista luottamuksellisista syistä.

Haastattelussa 1 käsitellyt kysymykset:

1. Millainen tuotannonsuunnitteluprosessi on linjan tuotantoa suunnitellessa? Mitä siihen sisältyy?
2. Mitä eri sidosryhmiä tuotannonsuunnitteluun osallistuu tai liittyy?
3. Mitä työkaluja tuotannonsuunnitteluun käytetään?
4. Tukevatko käytössä olevat järjestelmät tuotannonsuunnitteluprosessia? Kattavatko ne kaikki tarpeet?
5. Mitkä tunnusluvut ja päämäärät ovat tuotannonsuunnittelun kannalta tärkeimpiä?
6. Miten tunnuslukujen toteutumista voi seurata ja miten niihin voidaan vaikuttaa?
7. Mitkä asiat ohjaavat eräkoon määrittämistä? Miten eräkoko lopuksi määräytyy?

8. Mitkä ovat suurimmat haasteet tuotannonsuunnittelun kannalta?

Haastattelussa 2 käsitellyt kysymykset:

1. Millaiset ominaispiirteet vaikuttavat tehtaan tuotannonsuunnitteluun? Millaisia vaatimuksia toimintaympäristö asettaa?
2. Millainen tehtaan tuotannonsuunnitteluprosessi on kokonaisuudessaan? Mitä siihen sisältyy?
3. Mitä eri sidosryhmiä tuotannonsuunnitteluun osallistuu tai liittyy?
4. Tukevatko käytössä olevat järjestelmät tuotannonsuunnitteluprosessia? Kattavatko ne kaikki tarpeet?
5. Mitkä tunnusluvut ja päämäärät ovat tuotannonsuunnittelun kannalta tärkeimpiä?
6. Miten tunnuslukujen toteutumista voi seurata ja miten niihin voidaan vaikuttaa?
7. Millaisena näet toimitusketjun nykytilanteen? Onko joissain toiminnoissa kehitettävää?

Haastattelussa 3 käsitellyt kysymykset:

1. Onko toiminnassa jotakin kehitettävää? Esimerkiksi jonkin tuotteen, linjan osan tai toimintatavan osalta?
2. Miten OEE:n positiiviseen kehitykseen voidaan vaikuttaa?
3. Onko linjan ajojen järjestys pääsääntöisesti luonteva? Mihin tässä tulisi erityisesti kiinnittää huomiota?
4. Onko lajinvaihtoihin yleensä riittävästi työvoimaa? Miten lajinvaihdon työvaiheet suoritetaan useammalla henkilöllä?
5. Mitä asioita lajinvaihtoja tehdessä tulisi painottaa niiden sujuvoittamiseksi?
6. Kysymyksessä käsiteltiin mahdollisen linjaan tehtävän muutoksen vaikutusta tuotantotehokkuuteen ja lajinvaihtoihin sekä ajojärjestykseen.

Haastattelun 3 lopuksi käytiin fyysisten linjojen toimintaa läpi kävelyhaastattelun muodossa. Tällä kerättiin tietoa linjan todellisesta toiminnasta simulointimallia varten sekä ongelmakohtien selvittämiseksi.

Haastattelussa 7 käsitellyt kysymykset:

1. Mitkä tunnusluvut ja päämäärät ovat tuotannon kannalta tärkeimpiä? Mitä tuotannon toiminnoissa priorisoidaan?
2. Onko toiminnassa jotakin kehitettävää? Esimerkiksi jonkin tuotteen, linjan osan tai toimintatavan osalta?
3. Millaisia rajoitteita tuotannon tavoitteet ja rajoitteet asettavat tuotannon suunnittelulle?

4. Millaisissa tilanteissa tuotannonsuunnittelun kanssa ollaan vuorovaikutuksessa?
5. Onko linjan ajojen järjestys pääsääntöisesti luonteva? Mihin tässä tulisi erityisesti kiinnittää huomiota?
6. Mitä asioita lajinvaihtoja tehdessä tulisi painottaa niiden sujuvoittamiseksi?
7. Kysymyksessä käsiteltiin mahdollisen linjaan tehtävän muutoksen vaikutusta tuotantotehokkuuteen ja lajinvaihtoihin sekä ajojärjestykseen.

Haastattelun 7 yhteydessä tarkasteltiin myös simulointimallin toimintaperiaatteita sekä parametreja simulointimallin parissa.

3.2 Tapahtumapohjainen simulointi ja data-analyysi

Nykytila-analyysin osana myös muodostettiin tarkasteltavasta kokonaisuudesta tapahtumapohjaista simulointia hyödyntävä malli. Simuloinnin hyödyistä tuotantoa tutkittaessa on kerrottu luvussa 2.3.2. Luvussa kerrotaan, kuinka käytännön tutkimuskohteesta voidaan laatia sitä kuvaava malli, jolla pystytään tutkimaan sen käyttäytymistä vaikuttamatta todellisen maailman tutkimuskohteeseen. Näin eri skenaarioita voidaan testata häiritsemättä todellisen kohteen prosessia ja toimintaa.

Simulointimalli katsottiin käytännössä ainoaksi vaihtoehdoksi ajo-ohjelman, kokonaiskustannusten ja OEE:n välisten suhteiden tutkimiseksi. Työkalua OEE:n mallintamiseen ei ollut valmiina. Aiheesta ei myöskään löytynyt tilannetta vastaavaa tutkimusta. OEE:tä mitataan käytännössä toteutuneesta tuotannosta, eikä todellisen linjan käyttäminen ajo-ohjelmien intensiiviseen testaamiseen ole mahdollista. Tästä syystä OEE:n mallintamisen mahdollistava simulointi valikoitui pääasialliseksi menetelmäksi. OEE:n mallintaminen asettaa mallin tarkkuudelle ja todenmukaiselle laatimiselle melko suuret vaatimukset. OEE:n osana oleva nopeustehokkuus riippuu esimerkiksi linjan osien välisistä tuotantokapasiteettien suhteista. Linja piti mallintaa tästäkin syystä melko yksityiskohtaisella tasolla.

Simulointimallista tehtiin alusta alkaen sen laajuudesta ja selkeistä erillisistä toiminnoista johtuen modulaarinen. Malli koostui siis eri komponenteista, kuten linjaa, varastoa ja KPI-laskentaa käsittelevistä osamoduuleista. Simulointimallin linjaa kuvaavaa moduulia varten linjan toiminnasta kerättiin dataa niin haastatteluin, sähköpostein lähetetyin kyselyin kuin yrityksen sisäisten linjaa käsittelevien dokumenttien avulla. Myös fyysistä linjaa ja sen käyntidataa tarkasteltiin laadullisen data-analyysin keinoin. Haastatteluissa käytiin läpi linjan oleellisia parametreja ja toimintamalleja niin haastattelutilassa kuin tuotantolinjan äärellä. Linjan moduulin mallia validoitiin havainnoimalla todellista valmistuslinjaa ja sen käyttäytymistä. Kustannuslaskentamoduulin logiikan kehittämistä varten järjestettiin lyhyehköjä haastatteluita sähköpostilla, videoviestimillä ja kasvotusten niin myynnin, talouden kuin asiakaspalvelun parissa työskenteleville. KPI-laskentamoduulia varten haas-

tateltiin niin ikään insinöörejä ja asiakaspalvelun henkilöstöä.

Mallia varten kerättiin skaalattua, pyöristettyä ja yleistettyä dataa luottamuksellisista syistä. Datan uskotaan olevan riittävän lähellä todellisuutta tuottaakseen suuntaa antavia ja todellisuudessa sovelluskelpoisia tuloksia. Simulointimallin validiteettia testattiin eri menetelmin sitä laadittaessa ja sen valmistuttua. Validointia on käyty tarkemmin läpi alaluvussa 4.2.3.

Tutkimuksen nykytila-analyysiä varten luotu simulaatiomalli tehtiin Siemensin Technomatix Plant Simulation -ohjelmalla. Näin tehtaalla toteutuneiden ajo-ohjelmien tunnuslukuja pystyttiin vertaamaan myöhemmässä vaiheessa muodostettavien optimoitujen ajo-ohjelmien tunnuslukuihin.

3.3 Optimointi

Nykytila-analyysin jälkeen keskityttiin optimoimaan ajo-ohjelmia, ja tarkkailemaan tunnuslukujen käyttäytymistä eri skenaarioissa. Nykytila-analyysin osana laadittua simulointimallia käytettiin myös osana optimointia, jotta algoritmin kehittämiä ajo-ohjelmia saatiin arvioitua optimointiprosessin aikana.

Optimointia varten käytettiin geneettistä algoritmia. Plant Simulationissa on valmis toteutus geneettisen algoritmin peruslogiikalle. Tämän toimintaa jatkokehitettiin ja parametrisoitiin ongelmaan soveltuvaksi. Optimointimallin kehitys tehtiin soveltaen kirjallisuuskatsauksessa luvussa 2.3 esiteltyjä menetelmiä. Geneettisen algoritmin parametrisointi perustui alaluvussa 2.4.2 koostettuun teoriaan. Optimointia varten simulaatiomalliin määritettiin lisää muutamia kustannuksia sekä varastoa koskevia raja-arvoja. Nämä selvitettiin haastatteluissa 2 ja 4.

Optimointimallia kehitettiin vaiheittain lisäten siihen ominaisuuksia tarpeen tullessa ilmi. Testauksen ja tutkimusskenaarioiden suorittamiseksi optimointia ajettiin usean kuukauden aikana noin 600 tunnin ajan. Optimointi- ja simulointimalleja kehitettiin ja ajettiin noin neljän kuukauden ajan. Kokonaisuudessaan mallissa on yli 500 objektia. Nämä objektit kattavat koodilohkoja, taulukoita, muuttujia ja materiaalivirtaa ohjaavia objekteja. Mallille spesifejä lisättyjä koodirivejä simulointioptimointimallin käsittävässä kokonaisuudessa on yli 3000.

Optimoinnin jälkeen työn tuloksia tarkastellaan luvussa 6 ottaen huomioon tutkimuksen eri vaiheissa saadut tulokset. Tuloksien merkitystä sekä kehityskohteita käsitellään kokonaisuutena. Luvussa 6 käydään läpi myös tutkimuksen rajoitteet, reliabiliteetti ja jatkotutkimuskohteet.

4. NYKYTILA-ANALYYSIN TULOKSET

Toimitusketjun suunnittelun tarkastelemiseksi haastateltiin toimitusketjun ja tuotannonsuunnittelun parissa työskenteleviä henkilöitä. Suunnitteluprosessin läpikäynnissä painotetaan alemman tason prosesseja työn rajauksen ja tarkastelunäkökulman mukaisesti. Tarkasteluun sisällytettiin kuitenkin kokonaiskuvan saamiseksi ylempiä tasoja, joista tarkastelu aloitetaan.

4.1 Tuotannonsuunnittelu

Tehdasyksikössä tapahtuvasta suunnittelusta ylimmällä tasolla on S&OP -prosessi. Siinä S&OP -tiimi suunnittelee toimintaa liiketoiminta-alueen ylemmän tason strategian mukaisesti. S&OP -prosessissa laaditaan kuukausittain suunnitelma 3–9 kuukaudeksi eteenpäin. Tämä suunnitelma asettaa rajoja ja tavoitteita seuraavan tason suunnittelulle. (Haastattelu 2)

Demand revieweissä vahvistetaan tulevien kuukausien kysyntäennusteet. Tähän osallistuvat muun muassa myynti ja demand plannerit, jotka laativat kysyntäennusteita. Myös tuotehallinta osallistuu tuoteportfoliomuutosten ja näitä koskevien elinkaarien ja jakelualueiden osalta. Plannerin kannalta demand reviewissä vahvistetaan ennusteet, joita vastaan tuotannonsuunnittelua ja aikataulutusta loppujen lopuksi tehdään. (Haastattelu 2)

Demand reviewin jälkeen järjestettävässä supply reviewissä laaditaan suunnitelma, miten vahvistettuun kysyntään vastataan. Tämä käsittää muun muassa tuotesortimenttien allokointia eri valmistuslinjoille sekä eri linjojen työaikamuotojen suunnittelua. Myös karkeat tavoitetuotantomäärät ja -varastotasot määritetään tässä vaiheessa. Vahvistettu kysyntä pyritään siis täyttämään hyödyntämällä resursseja mahdollisimman tehokkaasti. Tuotantolinjan tuotannonsuunnittelijan kannalta supply reviewissä asetetaan rajat koskien työaikamuotoa, linjan tavoitevarastoja ja kokonaistuotantomääriä sekä tuotesortimenttia, jota linja valmistaa. (Haastattelu 2) Tuotannonsuunnittelija seuraa suunnittelun aikana suunnitelman noudattavan näitä rajoja ja sääntöjä. Tuotannonsuunnittelija esimerkiksi asettaa sovitut työaikamuodot suunnittelujärjestelmään. Tällä saadaan rajoitettua linjalle suunniteltavaa kapasiteettia automaattisesti.

Yrityksessä on käytössä varasto-ohjautuva tuotantomalli. Järjestelmään tuleva tilaus toi-

mitetaan usein jo saman päivän aikana. Tuotannonsuunnittelu tehdään siis vahvasti ennustettua kysyntää vasten. Suunnitelmaa tehdään suhteellisen lyhyelle ajanjaksolle kerrallaan, rullaavaa suunnittelua käyttäen. Suunnitelmamuutosten tekemistä lähipäiville pyritään välttämään, mutta rullaavassa suunnittelussa käytettävää ehdotonta jäädytysajanjaksoa ei ole käytössä. Suunnitelmaa päivitetään normaalitilanteessa noin viikon välein, noin viikolla eteenpäin, sen hetkisestä suunnitelman loppumisajankohdasta. Suunnitelmaa ei kannata tehdä liian pitkälle tulevaisuuteen, sillä muutokset toteutuneessa tuotannossa ja kysynnässä aiheuttavat tällöin muutospainetta tuotantosuunnitelmalle. (Haastattelut 1 ja 2)

Suunnitteluprosessiin osallistuvat tuotannonsuunnittelijan lisäksi myös monet sidosryhmät eri tilanteissa. Suunnittelijan kannalta oleellisia tapahtumia ovat tuotannon aamupalaverit, joissa käydään läpi tuotannon sekä tuotevaraston yleistilanne kuluneilta sekä tulevilta päiviltä. Myös niin sanotuista maanantai- ja tiistaipalavereista saa informaatiota linjojen sekä niihin liittyvän kysynnän muutoksista ja kokonaistilanteesta. Maanantain palaverissa lähiviikkoja tarkastellaan tuotannonsuunnittelijoiden ja tuotannon insinöörien sekä varaston kanssa ja tiistaina toimitusketjun ja myynnin kanssa. (Haastattelut 1 ja 2)

Suunnittelua tehtäessä eri tahoihin ollaan yhteydessä myös erikseen. Suunniteltavan linjan käyttöinsinöörin kanssa käydään toisinaan läpi ajojen järjestelyyn liittyviä yksityiskohtia, jotta vaihtoja saadaan tehostettua. Tuotannon puolelta myös vuoromestarit ovat toisinaan apuna ajojen loppuaikojen määrittämisessä, mikäli pysäyttäminen passataan johonkin tiettyyn ajankohtaan. Tuotannon puolella olevaa prosessiin perehtynyttä tukea pidettiin tärkeänä. Asiakaspalvelun kanssa käsitellään toimitusaikoja ja ajojen priorisointia tuotepuutosten kohdalla. Muiden tuotannonsuunnittelijoiden kanssa ollaan myös toisinaan tekemisissä esimerkiksi paperikoneiden suunnittelua tehdessä. Varaston ja logistiikan asiantuntijat ovat tukena varaston kapasiteettia määritettäessä. (Haastattelu 1) Haastatteluissa 3 ja 7 todettiin myös, että toisinaan tuotantolinjalta ollaan yhteydessä insinöörin kautta suunnittelijaan ajojärjestyksen hienosäätämiseksi. Tuotannon näkökulmasta ajojärjestys on kuitenkin yleensä prosessilähtöisesti kohdallaan. Joskus tulee kuitenkin tilanteita, joissa varastotilanteen takia joudutaan tekemään epäoptimaalisempia ajoja ja vaihtoja. (Haastattelut 3 ja 7)

Tuotantotilauksia suunnitellaan pääsääntöisesti tuoteperheittäin. Ajoerien kokojen määrittämistä ohjaa pääosin tuotannonsuunnittelijalle näkyvä ennuste. Järjestelmään on asetettu kullekin tuotteelle eräkoko, joka vastaa tuotteen ennustettua kysyntää tietylle ajanjaksolle. Tuotantoerien syklin pituus määräytyy suunnitellun varaston riitosta päivissä. (Haastattelu 2) Ajoerien koot eivät kuitenkaan vastaa aina ennalta-asetettuja kysynnän muutosten, kampanja-ajojen sekä tuotannon asettamien rajoitteiden vuoksi. Tuoteperheiden ajoista yritetään saada mahdollisimman pitkiä siten, että seuraavien ajojen tuotteet ehtivät vielä ajallaan. Varaston tulevaisuuden kapasiteetin hahmotus perustuu haastattelun perusteella suurelta osin suunnittelijan kokemukseen. (Haastattelu 1)

Jotkin tietyt tuotteet pitäisi ajaa kiinteällä syklillä, mutta muut tuotteet eivät vaihtelevan kysynnän takia useinkaan sovi tähän sykliin. Tämä tuottaa epäoptimaalisia ajojärjestyksiä näiden kiinteällä paikalla ajettavien tuotteiden yhteydessä. Myös niiden materiaalien hallinta ja varastointi voivat toisinaan olla haastavaa tai tehotonta. (Haastattelut 1 ja 2)

Rajoitusten suunnittelu koettiin myös haastavaksi. Rajoitukset pitäisi saada suunniteltua siten, että linjoja saataisiin kuitenkin hyödynnettyä mahdollisimman tehokkaasti. Näiden keston ja ajankohdan sovittaminen yhteen huoltojen ja ajojen kanssa on haastavaa (Haastattelut 1 ja 2)

Haastatteluissa toimitusketjun suunnittelussa tärkeimmäksi KPI-luvuksi nousi OTIF. OTIFin toteutumista seurataan viikkotasolla sekä mahdollisten poikkeamien yhteydessä. OTIFin roolia painotettiin muun muassa asiakastyytyväisyyden takia. Tuotannonsuunnittelijan työtä ohjaa myös ajoerien pituuksiin ja järjestyksiin liittyvät ohjeistukset. Näiden todettiin haastattelussa olevan yhteydessä OEE:hen, mutta kyseinen luku ei ole tuotannonsuunnittelun tarkassa seurannassa. Maanantain ja tiistain palavereissa tähän liittyen käydään kuitenkin toisinaan keskustelua. OEE:n kannalta huonojen, eli esimerkiksi pienen menekin, tuotteiden osalta voidaan tarvittaessa ehdottaa tuotemuutoksia. (Haastattelut 1 ja 2) Myös ennustetarkkuuden ja varastotasojen toteutumista seurataan aktiivisesti. OTIF kertoo välillisesti myös näiden toteutumisesta ja kuvaa hyvin monen eri toiminnon yhteistä suorituskykyä. (Haastattelu 2)

4.1.1 Tuotannonsuunnitteluohjelmisto

Tuotannonsuunnitteluun ja ajo-ohjelmien laatimiseen käytetään SAPin toimittamaa järjestelmää. Järjestelmällä voidaan tehdä rullaavaa suunnittelua linjakohtaisessa aikataulunäkymässä, jossa erilliset tuotantoerät, eli ajot, esitetään graafisesti vaakasuuntaisina palkkeina. Ajoista ja tuotteista saadaan esiin lisätietoa helposti tämän näkymän sisältämien linkitysten kautta. Suunnittelun tukena käytetään myös monia muita näkymiä, joissa kuvataan tuotteiden saldoja, tilauksia sekä kysyntäennusteita. Suunnitteluun käytetään näiden ohella myös muita ohjelmistoja.

Tuotannonsuunnitteluun käytettävä järjestelmä vastaa haastatteluiden ja järjestelmän tarkastelun perusteella perustoiminnoiltaan suunnittelijan tarpeita. Tietyillä osa-alueilla, sekä tietyissä erityistilanteissa järjestelmässä on kuitenkin kehitettävää. Masterdatan oikeellisuus pitää varmistaa, jotta järjestelmä toimii oikein. (Haastattelut 1 ja 2)

Suunnitteluun vaikuttaa keskeisesti tuotannonsuunnittelijalle SAPissa näkyvä ennuste. Tuotanto suunnitellaan ennustetta vasten, ennen varsinaisten tilausten saapumista. (Haastattelut 1 ja 2) Pääosin kaikkia tuotteita pitää siis olla koko ajan varastossa. Järjestelmän tavassa käsitellä ennustetta havaittiin kehitettävää. Haastattelussa 1 ilmeni, että viikkotasolla tehtävien kysyntäennusteen muutosten huomaaminen voi olla haastavaa. Järjes-

telmä ei erikseen huomauta muutoksista, ja niitä täytyy manuaalisesti tarkastaa kullekin tuotteelle erikseen erillisestä järjestelmän näkymästä. Suurella määrällä tuotteita tähän menee tarpeettoman paljon aikaa. Myös yli ennusteen tapahtuva myynti aiheuttaa haasteita tuotannonsuunnittelussa järjestelmän osalta. Etenkin kampanjoiden kohdalla ylitsemyynti jää järjestelmän toimintalogiikasta johtuen helposti huomaamatta. Mikäli jollekin viikolle on asetettu kampanjoista johtuva suurempi kysyntäennuste, järjestelmä jakaa kysynnän tasan koko viikolle. Jos esimerkiksi alkuviikosta onkin enemmän kampanjaan liittymätöntä kysyntää, vähentää se kampanjalta peräisin olevaa ennustetta automaattisesti loppuviikolta. Mikäli tuon kampanjan toimitukset on ajoitettu tuolle loppuviikolle, voi ilmetä yllättäviä tuotepuutoksia, joita on ollut vaikea havaita etukäteen. Järjestelmä ei erittele, eikä ilmoita, onko ennustetta vähentänyt tilaus ollut ennustettu vai ei.

Tuotannonsuunnittelussa on otettu kehitysaskeleita eri raporttien hyödyntämisessä muun muassa IBP:n (engl. Integrated Business Planning) lukuihin pohjautuen. IBP tuo paljon yksityiskohtaista ohjaukseen liittyvää dataa tarjolle. Tuotannonsuunnittelijalla ei kuitenkaan ole käytössä kunnollista dashboardia, josta saisi yhdellä silmäyksellä olennaiset asiat tarkistettua nopeasti. Tieto on hajallaan monessa eri järjestelmässä ja taulukossa. Tuotepuutostilanteissa päätöksentekoa tukeva priorisointityökalu katsottiin myös tarpeelliseksi. (Haastattelu 2) Muutokset vaikuttavat niin moneen asiaan, että kokonaisvaikutusten hahmottaminen on haastavaa.

Haastattelussa 1 ilmeni myös, että linjan suunnittelunäkymä ei tue rinnakkaisten tuotantoerien suunnittelua. Linjalla voidaan tuottaa rinnakkain useampaa tuotetta, mutta nykyisellään näkymä ei varsinaisesti ota huomioon rinnakkaisten tuotantoerien vaikutusta. Linjalle suunnitellaan järjestelmän näkökulmasta kapasiteetin ylittävää tuotantoa. Tämä aiheuttaa epätäsmällisyyttä muun muassa ajojen kestoihin ja päättymisaikoihin.

Joidenkin vahvistettujen tilausten kohdalla järjestelmässä ilmoitettu päivämäärä on toimituspäivämäärä, mutta suurimmalle osalle tilauksista tuo päivämäärä vastaa lähtöpäivämäärää. Tilauksesta ei ilman tarkempaa tutkimista selviä kumpi päivä tässä on kyseessä. Tämä voi aiheuttaa tilanteita, joissa erhe huomataan vasta lähellä toimitusta, ja tuotantolinjalla joudutaan toimitusvarmuuden varmistamiseksi tekemään tehokkuuden ja muun ajo-ohjelman kannalta epäedullisia tuotteenvaihtoja. (Haastattelu 1)

Suunnitteluun käytettävä järjestelmä ei myöskään tue tuotannon valmisvaraston suunnittelua kovin hyvin. Yksittäisten tuotteiden varastosaldot ja niiden kehityksen näkee helposti, mutta kokonaisuuden hahmottaminen muuttuvan kysynnän sekä toisinaan tuotannonkin kanssa on haastavaa. Varastosaldojen hallinta suunnittelussa perustuu suurelta osin suunnittelijan kokemukseen sekä hetkittäisiin tilannetietoihin, jotka saadaan kolmesti viikossa palavereissa. Yksittäisten linjojen tuotteille tai tuoteryhmille ei ole osoitettu tiettyä tilaa varastosta, vaan varaston kapasiteettia jaetaan tilanteen mukaan. Tämä vaikeuttaa käsityksen muodostamista käytössä olevasta tilasta, sillä se riippuu myös suunnittelijan

vastuun ulkopuolella olevista linjoista ja niiden sen hetkisestä kysynnästä ja tilanteesta. Haastatteluissa tuli ilmi myös useita tämän työn tarkastelualueen ulkopuolelle jääviä asioita varastoinnista tuotantoketjun aiemmissa vaiheissa. (Haastattelu 1) Kysynnän sekä tuotannon viikkovaihtelut ovat toisinaan suuria, ja toisinaan pitää kasvattaa normaalitilanteeseen nähden merkittäviä puskurivarastoja, mikä osaltaan haastaa suunnittelua. (Haastattelu 2)

Myös materiaalien osalta varastonhallinta on haastavaa. Tilaa materiaaleille on hyvin rajallisesti, mikä vaikeuttaa muutosten tekemistä ohjelmaan. Ohjelman jäädyttäminen pidemmälle helpottaisi tätä tilannetta, mutta tämä on joillakin tuoteryhmillä hyvin haastavaa kysynnän muutosten takia. (Haastattelu 2) Tuotannonsuunnittelijat tilaavat myös suurimman osan suunnittelemansa linjan tuotekohtaisista tarvikkeista, joista ei pidetä merkittäviä varmuusvarastoja.

4.1.2 Tuotantoprosessi

Haastattelun 3 perusteella ajo-ohjelmat ovat pitkällä aikavälillä kehittyneet huomattavasti tuotannon sujuvuuden näkökulmasta optimaalisemmiksi. Ajot ovat tuotantotehokkuuden kannalta pääsääntöisesti hyvällä mallilla. (Haastattelut 3 ja 7) Ajo-ohjelman määrätoleransseilla on huomattava vaikutus. Mikäli linjojen aukirullausten käyttöä ei saada sovitettua siten, että lajinvaihdolle alettaessa raakapaperit on kulutettu loppuun, menee raakapaperirullien vaihtamiseen huomattavasti enemmän aikaa. Vanhat rullat täytyy kuljettaa nosturilla yksitellen rullanvaihtoalueelle, josta trukin pitää hakea ne pois ja toimittaa uudet tilalle. Aikaa linjan alkupään vaihtoon voi kulua liki kaksinkertainen määrä, mikäli rullia joudutaan kuljettamaan edestakaisin. Jos ajon lopetusta saadaan tarvittaessa ajoitettua tietyn toleranssin sisällä, pystytään lajinvaihto suorittamaan huomattavasti tehokkaammin. (Haastattelu 3)

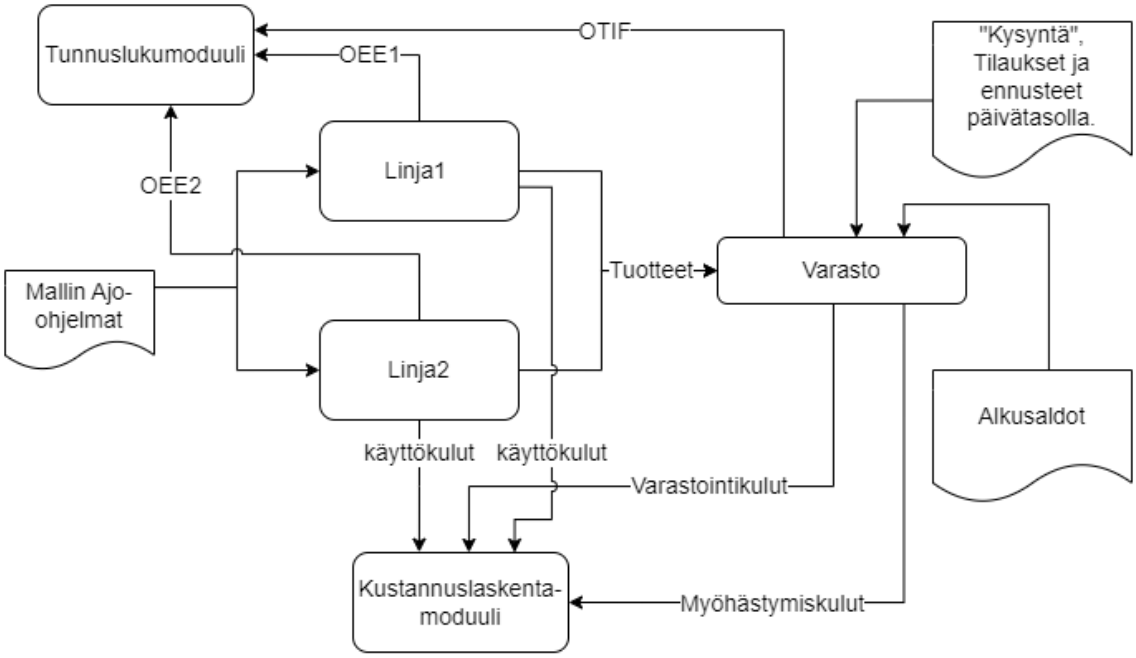
Tuotantolinjalla tiedostettiin yksi selkeä kehityskohde nykyisen tehokkuuden parantamiseksi. Molemmilla tutkittavilla linjoilla on tunnistettu häiriöherkempi kohta linjan alkupäässä. Tämä hidastaa pysähtelyjen vuoksi tuotantoa. Ongelma linjan alkupäässä kertautuu myöhemmin muualla linjalla. Mikäli tämä poistettaisiin, pystyttäisiin linjan alkupäätä käyttämään sen tavoitenopeudella suurimman osan ajasta. Kokonaistuotanto on toisinaan parempi hitaalla, kuin nopealla vauhdilla, mikä on toisaalta tavoitenopeutta ajamista vastaan. (Haastattelu 3)

OEE ei suoranaisesti ole linjan operaattorien seurannassa, mutta toimintamenetelmät operoinnissa ajaa kohti hyvää OEE:tä. Operoitaessa pyritään minimoimaan seisakki ja hävikki sekä maksimoidaan tuotantonopeus. Toisinaan linjalla on mietitty, kannattaako häiriötilanteessa maksimoida vauhti, mikä johtaa nopeampaan pysähdykseen, vai hidastaa, ja ratkaista ongelmaa linjan alkuvaiheen puskurivaraston rajoissa. (Haastattelu 3) Ensimmäinen toimintatapa parantaa nopeustehokkuutta, mutta heikentää aikatehokkuutta,

ja jälkimmäinen toisin päin.

4.2 Tapauksen simulointi

Tuotannon nykytilasta ja -asettelusta laadittiin simulointimalli Siemens Technomatixin Plant Simulationilla. Simulointimallilla erilaisia ajo-ohjelmia pystytään testaamaan, sekä mallintamaan niiden tuottamia tuotannon ja toimitusketjun tunnuslukuja eri skenaarioissa. Yksittäinen simulaatioajo koostuu sille syötetyn ajo-ohjelman ajamisesta linjoilla sekä asetetun kysynnän mukaisesta varaston operoinnista ja saldojen laskennasta. Tämän lisäksi mittareina toimivat moduulit tuottavat ajosta dataa. Kun linjoille annetut ohjelmat on ajettu ja mallille syötetty kysyntä on toteutettu, simulaatioajo valmistuu ja pysähtyy automaattisesti. Ajon jälkeen voidaan tarkastella siihen liittyvää dataa ja tunnuslukuja. Mallissa painotetaan tuotannonsuunnittelun merkitystä. Suunnittelusta riippumattomien tekijöiden, kuten satunnaisten vikaantumisten mallintaminen on jätetty huomiotta mallin toiminnan yksinkertaistamiseksi. Tämä myös tukee optimoinnin keskittämistä ajoeräkoon ja ajojen järjestyksien vaikutusten tutkimiseen.



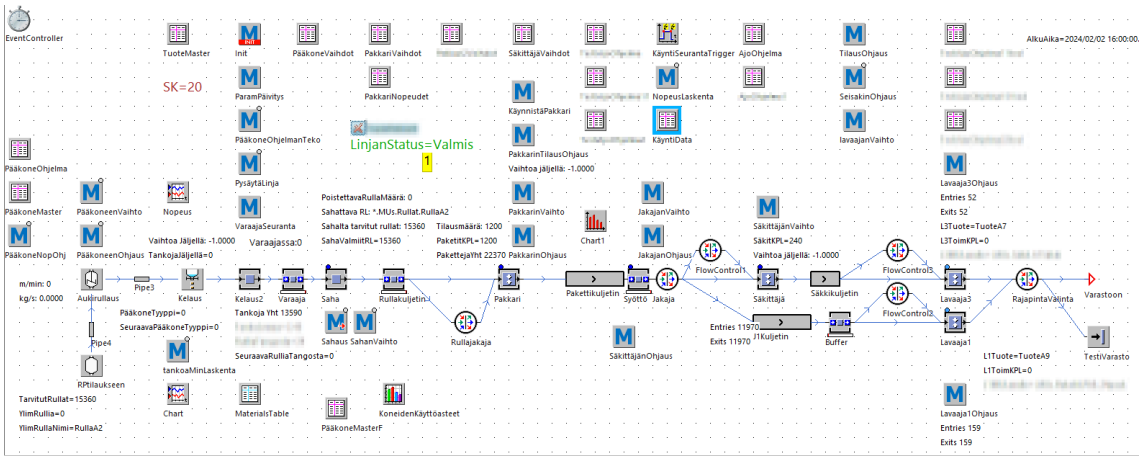
Kuva 4.1. *Simulointimallin pääosakomponentit ja niiden oleellisimmat datavirrat*

Mallista tehtiin modulaarinen siten, että mallin ylätaso sisältää osamoduuleita, jotka kuvaavat tarkemmin erillisiä osia. Kuvassa 4.1 esitellään mallin ylimmän tason perusrakenne osamoduulien osalta. Näitä osamoduuleja ovat esimerkiksi varasto, kysynnänmallinnus, tuotantolinjat ja kustannuslaskenta. Simulointimallin rakentaminen aloitettiin yksittäisestä linjasta. Linjan mallia lähdettiin rakentamaan siltä pohjalta, että syötteenä se saa ajo-ohjelman, jonka mukaan se tuottaa valmiita tuotteita. Tuotteet poistuvat yksikkö kerrallaan mallin rajapinnasta, johon voidaan myöhemmässä vaiheessa liittää varaston malli.

Linjan malli toimii siis myös itsenäisenä muista moduuleista riippumattomana osana tarvittaessa, mikäli sille annetaan manuaalisesti ajo-ohjelma.

4.2.1 Tuotantolinjojen osamoduulit

Tuotantolinjaa kuvaava simulaatiomalli, jatkossa osamoduuli, on toteutettu suhteellisen yksityiskohtaisella tasolla. Tämän ansiosta linjan eri komponenttien tuotteenvaihdot voidaan mallintaa hyvin tarkasti toisistaan riippumatta. Tästä syystä osamoduulissa pienin tuotteen rakenneosa on yksittäinen kuluttajakäyttöön menevä paperirulla. Toteutettu tarkkuustaso mahdollistaa myös rinnakkaisten ajojen lajinvaihtojen mallintamisen toisistaan riippumatta. Tarkkuustasovalinta tosin lisää simulaatiomallin monimutkaisuutta ja sitä kautta ajamiseen kuluvaa suoritusaikaa.



Kuva 4.2. *Tuotantolinjan osamoduuli Plant Simulation -ohjelmassa*

Kuvassa 4.2 nähdään tuotantolinjan osamoduulin rakennetta. Osamoduulin malli koostuu graafisista toisiinsa liitetyistä komponenteista, jotka kuvaavat esimerkiksi eri tuotantolinjan osakomponentteja ja kuljettimia. Näiden lisäksi samassa näkymässä on esillä jotkin muuttujat, datataulukot ja -listat sekä ohjelmakoodiblokit. Kuvassa 4.2 sinisellä M-kirjaimella merkityt komponentit sisältävät mallia varten tehtyä ohjelmakoodia. Näillä voidaan määritellä osamoduulin toimintaa niiltä osin, joihin valmiit komponentit eivät sovellu. Yhteensä lisättyjä koodirivejä tuotantolinjat käsittävissä osamoduuleissa on noin 1500.

Linja generoi sille annetun ajo-ohjelman perusteella omat toisiaan vastaavat ajo-ohjelmansa linjojen pakkareille sekä linjojen alkupäille. Tällä mahdollistetaan linjojen osien todenmukaisempi käyttäytyminen tilausten vaihtuessa. Linjan moduuli sisältää hieman myös sisäistä päätöksentekoa ajojen järjestykseen liittyen. Rinnakkaisille ajoille voidaan asettaa tiettyjä suorituslogiikoita, mitkä eivät suoranaisesti tule esille linjalle annettavasta ajo-ohjelmasta. Linjan moduuli tulkitsee ohjelmassa olevia ajoja, ja niiden soveltuvuutta rinnakkain tuotettavaksi. Linja valmistaa esiasetettujen asetusten perusteella ohjelmassa perätysten olevat ajot osin tai kokonaan rinnakkain.

Linjan moduuli sisältää tuoteparametrien, tunnettujen vaihtoaikojen ja haastatteluista saatujen tietojen perusteella generoidut lajinvaihtotaulukot kullekin oleelliselle linjan osalle. Simulaation reaaliaikaista tarkkailua varten toteutettiin käyntiä kirjaava kuvaaja, joka vastaa yksiköiltään ja ulkoasultaan todellista käytössä olevaa käyntikuvaajaa. Linjojen malleissa on myös monia mittareita ja graafeja, joilla voi tutkia esimerkiksi eri osien käyttöasteita, nopeuksia tai linjan tietyn osan kautta kulkeneiden valmisteiden määriä.

Linjan moduulissa on mahdollisuus toteuttaa stokastisia käyttäytymismalleja, kuten vikaantumisia. Näitä toteutettiin alun perin muutamaan eri osakomponenttiin, mutta ne poistettiin myöhemmin käytöstä luvussa 5 esiteltävän optimoinnin kuormituksen takia. Myös rajapinta materiaalivarastoon on nopeasti toteutettavissa nykyisellä mallilla.

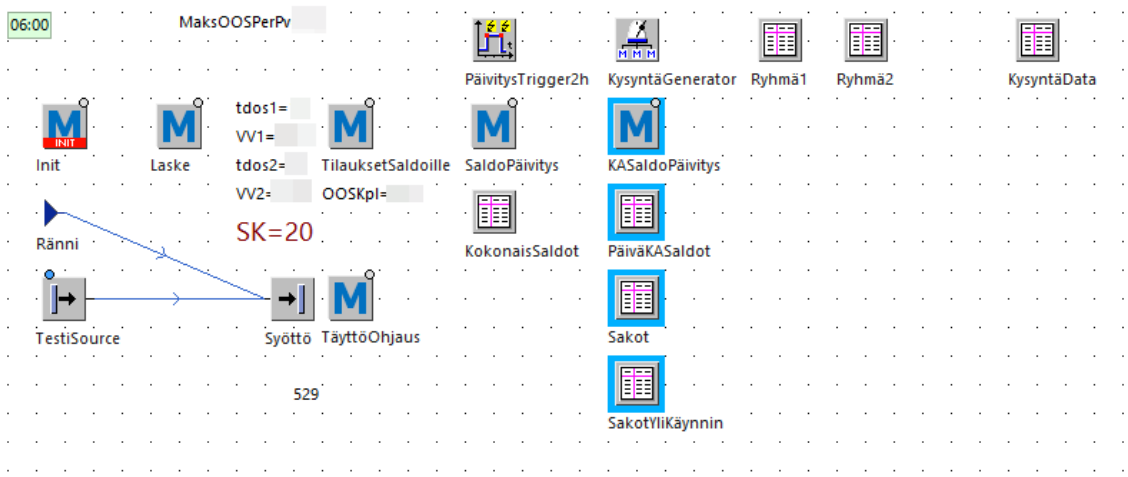
Molemmista työssä käsiteltävistä linjoista laadittiin tällä menettelyllä simulointimallit. Malleilla on paljon yhteneviä komponentteja, mutta myös eroja toimintalogiikassa linjojen eroavaisuuksien takia. Linjojen simulointimallit liitettiin osaksi ylimmän tason mallia, johon kaikki mallin osakomponentit sijoittuvat.

4.2.2 Muut osakomponentit

Tuotantolinjojen jälkeen malliin toteutettiin tuotevaraston osamoduuli. Varastoa kuvaava moduuli nähdään kuvassa 4.3. Varasto on yhteydessä mallin linjoja kuvaaviin osamoduuleihin, joiden tuotanto kirjataan varaston moduulissa oleviin saldoa kuvaaviin taulukoihin. Linjojen ja varaston yhteys ilmenee esimerkiksi kuvasta 4.1. Vastaavasti kokonaismallin ylätasolla asetettu kysyntä vähentää varastosaldoja. Varaston päätietorakenteessa ylläpidetään yrityksen käyttämän tuotannonsuunnitteluohjelmiston näkymän mukaista juoksevaa saldotaulukkoa. Rakenne on toteutettu hierarkkisesti tuoteryhmittäin kullekin tuotteelle erikseen. Tuotekohtaisten taulukoiden riveillä eritellään tuotannon tilausten tekemät nousut saldoon sekä tilausten tekemät vähennykset. Varasto kirjaa toteutuneen tuotannon reaaliaikaisesti kullekin valmistuvalle tuotelavalle sitä mukaa, kun ne siirtyvät linjan mallilta varastolle. Lisäksi varastomoduuli laskee hetkittäisiä kokonaissaldoja, päiväkohtaisia keskiarvosaldoja sekä tuotekohtaista varaston riittoa päivinä. Näitä käytetään muiden moduulien suorittamassa laskennassa. Varastomoduulissa tarkkaillaan ja kirjataan myös tuotepuutokset kustannuslaskentaa varten. Tuotteen kysyntä ja tuotepuutoksista aiheutuva sanktio tallennetaan kerran päivässä.

Kysynnän ja varaston pohjasaldojen muodostaminen on toteutettu mallin ylimmällä tasolla. Simulaatiomallin kysynnän mallinnus on toteutettu tuotekohtaisesti vuorokauden tarkkuudella. Kysyntää ja alkuvarastoa pystyy skaalaamaan ja muokkaamaan nopeasti erilaisten käyttöasteiden ja skenaarioiden mallintamiseksi. Mallissa käsiteltiin noin 30 tuotteen laajuista sortimenttia.

KPI-lukujen mallintamista varten malliin toteutettiin oma moduulinsa. Myös varaston ja

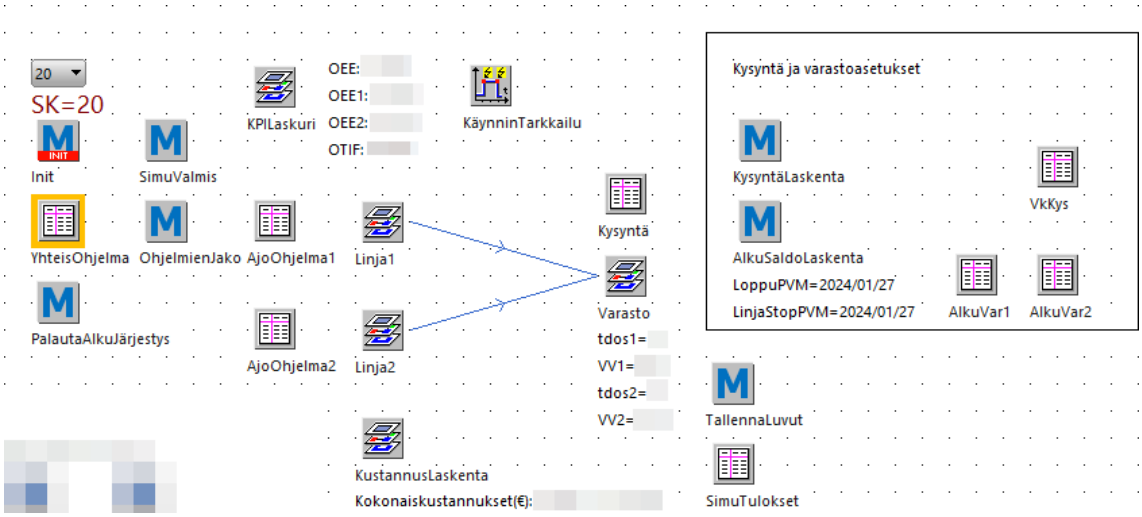


Kuva 4.3. *Varaston osamoduuli Plant Simulation -ohjelmassa*

linjojen malleihin tehtiin tarvittavat muutokset tuotannon parametrien seuraamiseksi. Linjojen malleihin lisättiin mekanismit OEE:n laskemiseksi kerättäviä tietoja varten. OEE:n laatimiseen tarvittavien nopeus- ja aikatehokkuuksien laskentaan tarvittavat tiedot kirjattiin simulaatiosta linjan sisäiseen datatiedostoon. Tämä tiedosto toimi rajapintana KPI-laskentamoduulille. Seuranta tapahtui mallinnuksen aikahorisonttiin nähden tarkalla, 30 sekunnin resoluutiolla. Sen ei vielä oleellisesti todettu kuormittavan mallin suorittamista. Materiaalitehokkuus oletetaan simulaatiomallissa vakioksi haastattelujen perusteella. KPI-laskentamoduuli hakee jokaisen simulaatioajon jälkeen käyntidatan linjojen osamoduuleista ja laskee näiden avulla kummallekin linjalle linjakohtaisen sekä yhdistetyn OEE:n. KPI-lukumoduulissa lasketaan myös OTIF kyseiselle simulaatioajolle. Malli ottaa huomioon vain tuotepuutoksista aiheutuvat muuttujat. OTIFiin voi tämän lisäksi vaikuttaa myös tuotannosta tai varastosta riippumattomat tekijät, kuten esimerkiksi viivästykset kuljetuksissa. Nämä jäävät kuitenkin tarkastelualueen ulkopuolelle.

Simulaatiomallin ylätasolle tehtiin myös kustannuslaskentamoduuli. Tämä moduuli laskee tuotannossa ja toimitusketjussa aiheutuneet kustannukset simulaatioajolle. Varastoinnin osalta lasketaan niin tuotteiden säilyttämisestä kuin tuotepuutteista aiheutuneet kustannukset. Tuotannon osalta lasketaan linjan käyttökustannukset siltä ajalta, kun linja on käytössä. Kulu pohjautuu linjan suuntaa antaviin vuosittaisiin käyttökustannuksiin. Seisakkien aikana käyttökustannukset oletetaan nollaksi. Tämä ei vastaa todellisuutta, mutta kannustaa myöhemmin tehtävän optimoinnin kanssa mallia vähentämään linjan käyttöä, mikäli varasto- ja kysyntätilanne sen sallivat. Varastointikulu lasketaan kustannuksena per lava per säilytysaika. Kulu perustetaan varaston keskimääräiseen päiväsaldoon. Lavakohtainen säilytyskustannus on laskettu suuntaa antavasta varaston kokonaisvuosikustannuksesta.

Valmis simulointimallin ylätaso on esitelty kuvassa 4.4. Mallin ylätasolla nähdään eri osamoduulit sekä ajo-ohjelmat ja kysynnän mallinnuksen osia. Ylätason rinnalla erillisessä



Kuva 4.4. *Simulointimallin ylätason rakenne*

osassa on vielä parametrisointiin liittyviä ohjelmafreimejä, jotka eivät osallistu suoranaisesti simuloinnin suoritukseen, eivätkä ne ole esillä kuvassa 4.4.

Simulaatiomallista päätettiin jättää yksinkertaistuksen vuoksi suorat stokastiset ominaisuudet pois. Seuraavassa vaiheessa toteutettava optimointi vaatisi stokastisen simulaatiomallin kanssa moninkertaisesti suoritusaikaa deterministiseen malliin verrattuna. Näitä stokastisia käyttäytymismalleja olisi voinut soveltaa esimerkiksi kysynnän muutoksien sekä linjan vikaantumisten todenmukaisempaan mallintamiseen.

4.2.3 Simulointimallin validointi

Simulointimallin validointia tehtiin niin haastatteluin kuin data-analyysinkin pohjalta. Todellisten tuotantolinjojen havainnointi haastattelun 3 yhteydessä tarjosi myös mahdollisuuden kerätä dataa todellisten linjojen käyttäytymisestä operaattorin avulla. Kerättyä dataa hyödynnettiin mallin parametroinnissa. Tuotantolinjan mallia tarkasteltiin myös lyhyesti haastattelussa 7.

Simulointimallin kulurakenne suunniteltiin pohjautuen haastatteluihin 4, 5 ja 6. Vaikka kulut perustuivat suoraan sekä varaston että linjojen osalta suuntaa antavaan vuosikustannukseen, kuvaa tämä riittävällä tasolla kulujen vertailua eri ajo-ohjelmien välillä. (Haastattelu 5)

Data-analyysin avulla verrattiin todellisen linjan ja mallin tuottamia tunnuslukuja monissa eri skenaarioissa. Simulaatiomallin generoimat OEE:t ja käyntiajat ovat optimistisempia kuin todellisen tuotannon, johtuen mallin deterministisestä luonteesta. Todellisuudessa simuloitavan kokonaisuuden reaalimaailman vastineessa voi esiintyä häiriötekijöitä, kuten esimerkiksi konerikkoja tai materiaalipuutteita. Tämän takia mallin suorituskyky on keskimäärin todellista linjaa parempi. Keskimäärin tulosten todettiin kuitenkin ovat ver-

Taulukko 4.1. *Linjan 1 simulointimallin KPI-luvut suhteessa toteutuneisiin*

Skenaario	Ero tuotantoajassa	Ero OEE:ssa	Ero aikatehokkuudessa	Ero nopeustehokkuudessa	Ero materiaalitehokkuudessa
1	-3,01 %	10,70 %	33,09 %	-16,43 %	-0,43 %
2	-1,24 %	-1,49 %	26,47 %	-21,42 %	-0,97 %
3	-1,08 %	1,56 %	30,92 %	-21,91 %	-0,65 %

Taulukko 4.2. *Linjan 2 simulointimallin KPI-luvut suhteessa toteutuneisiin*

Skenaario	Ero tuotantoajassa	Ero OEE:ssa	Ero aikatehokkuudessa	Ero nopeustehokkuudessa	Ero materiaalitehokkuudessa
1	-0,39 %	7,78 %	22,31 %	-11,59 %	-0,42 %
2	-1,19 %	-3,54 %	13,90 %	-17,95 %	-1,79 %
3	-5,15 %	0,93 %	17,77 %	-14,15 %	0,11 %

rannollisia. Data-analyysiä ei luottamuksellisista syistä julkaista tässä työssä. Taulukossa 4.1 on esitelty reaalimaailman ja simulaation KPI-lukujen suhteet eräillä ajanjaksoilla linjalle 1 ja taulukossa 4.2 linjalle 2. Erot on esitetty taulukoissa suhteellisina eroina, ei eroina prosenttiyksiköissä. OEE ja nopeustehokkuudet esitetään tavallisesti prosentteina, minkä takia todetaan tämä lisähuomio. Malli suoritettiin todelliseen dataan pohjautuvilla skenaarioilla, ja saatuja KPI-lukuja verrattiin samalla ohjelmalla todellisuudessa toteutuneisiin KPI-lukuihin. Taulukoissa esitellyt skenaariot sisältävät tapauksen mukaan noin 3–4 viikon ajo-ohjelmat.

Mallia parametrisoitaessa keskityttiin siihen, että tuotantomäärät tietyllä ajanjaksolla ovat mahdollisimman lähellä todellisuutta. Muutoin varaston käyttäytyminen ja riitto eivät vastaa todellisuutta riittävällä tarkkuudella. Taulukoiden 4.1 ja 4.2 perusteella tuotantoajat todellisuudessa ja mallissa vastaavat kohtalaisen hyvin toisiaan. Tämä tukee simulaatioon pohjautuvalla optimoinnilla muodostetun ajo-ohjelman toteuttamiskelpoisuuden varmistamista. Mikäli simulointimalli suoriutuisi annetusta ajo-ohjelmasta todellista huomattavasti nopeammin, saattaisi optimointi sisällyttää ohjelmaan ajoja, joita todellinen linja ei ehtisi samassa ajassa suorittaa. OEE:n ja tuotantoaikojen välillä esiintyy pieniä epäjohdonmukaisuuksia, mutta tämä saattaa johtua myös skenaarion 1 erityispiirteistä. Näiden ei katsota kuitenkaan olevan merkittäviä myöhemmin työssä tehtävän optimoinnin osalta. Silloin pääosassa on mallin johdonmukainen käyttäytyminen eri ajo-ohjelmia verrattaessa ja riittävä verrannollisuus todelliseen käyttäytymiseen.

Mallin aikatehokkuus oli satunnaisten häiriöiden puuttuessa liian optimistinen todellisuuteen verrattaessa. Tätä kompensoitiin nopeustehokkuutta heikentämällä luomalla pullonkaulaa linjan loppupäähän. Tämä nähdään todellisuutta parempana aikatehokkuutena, jota kompensoi todellisuutta huonompi nopeustehokkuus. Liiallinen nopeustehokkuuden heikentäminen aiheuttaa kuitenkin liiallisia eroja yksittäisten ajojen valmistumisaikoihin.

Käytössä olevilla parametreilla erot eivät kasva turhan suuriksi. Tätä heijastelee myös pieni ero kokonaistuotantoajoissa. Lisäksi simulaatiomallissa materiaalitehokkuus otetaan vakioterminä OEE:hen mukaan, mutta simulaatiossa ei tapahdu hävikkiä. Näin ollen se ei näy tuotannon suoriutumisessa tai tuotantoajassa, mutta OEE:ssä kyllä. Tämä aiheuttaa pienen poikkeavuuden OEE:n ja tuotantomäärien välillä. Mikäli malli huomioisi hävikin, niin pitäisi tuotetun määrän, tuotantoajan ja OEE:n muuttua samassa suhteessa. Materiaalitehokkuuden katsotaan olevan niin korkea, että sen huomioimatta jättäminen ei aiheuta merkittävää virhettä mallissa. Myös linjan käyntidatan keräämisen näytteistystaajuus saattaa vaikuttaa datan laatuun. Suuremmalla näytteistystaajuudella varmistuttaisiin siitä, että käyntidatassa ei pääsisi tapahtumaan tulosten laatua heikentävää laskostumista.

5. OPTIMOINTIMALLIN MUODOSTAMINEN JA OPTIMOINNIN TULOKSET

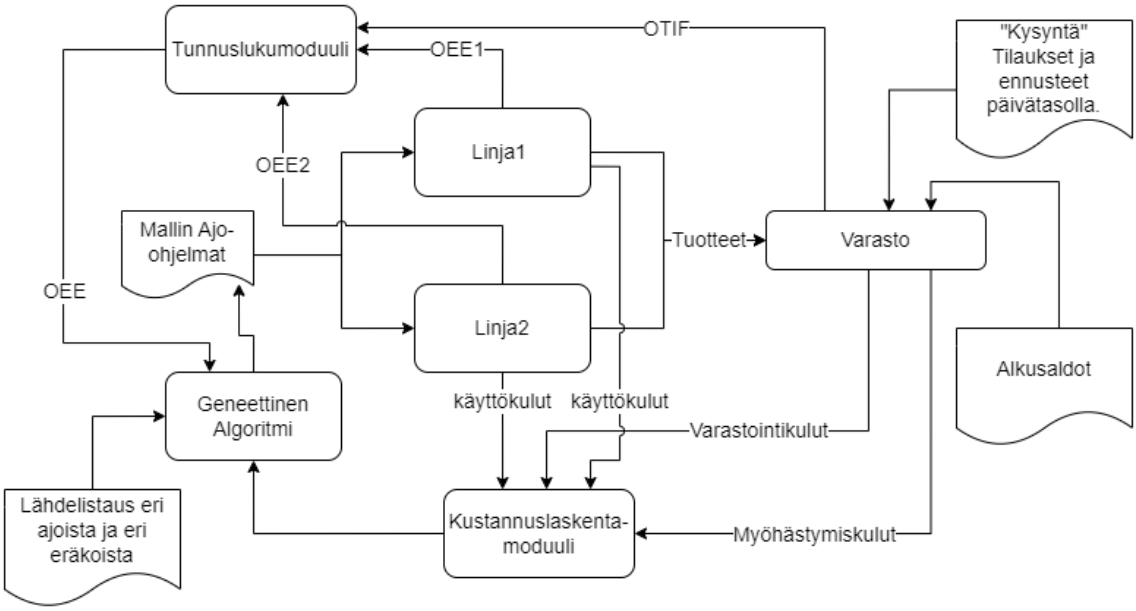
Työn toimeksiannossa yksi päätavoitteista oli kustannustehokkaimman toimintamallin määrittäminen kahdelle tuotantolinjalle. Tuotannonsuunnittelijalla ei nykytilassa ole välineitä arvioida suunniteltavan toiminnan kokonaiskustannuksia. Nykytila-analyysissä rakennetulla simulaatiomallilla eri skenaarioille arvioituja lukuja voidaan tarkastella vaivattomasti. Se ei kuitenkaan luo ratkaisuja, vaan tarvitsee syötteekseen ajo-ohjelman, jonka se suorittaa. Kustannustehokkaimman mallin löytäminen KPI-lukuja huomioiden on monioptimointiongelma. Toimintaan liittyy monia toisistaan riippuvaisia kustannuksia. Myös muita parametreja pitää tarkkailla, jotta ratkaisu olisi toteuttamiskelpoinen. Kokonaiskustannuksia varten otetaan huomioon suunnittelun kannalta oleellisimmat luvut: Tuotantokustannukset, varastointikustannukset sekä myöhästymissakot. Toimeksiannossa on niin runsaasti muuttujia, että mallin ratkaisemiseen tarvitaan optimointimalli. Tätä varten simulaatiomalliin integroitiin heuristisiin menetelmiin lukeutuva geneettinen algoritmi. Tämän lisäksi lisättiin muutamia skriptejä, joilla hypoteettisen ajo-ohjelman pohja saadaan generoitua kullekin skenaariolle.

5.1 Simulointioptimointi

Nykytila-analyysiä varten tehtyä mallia laajennettiin lisäämällä sen ylätasolle geneettinen algoritmi. Simulaatiomallin ja geneettisen algoritmin yhdistetyn rakenteen yksinkertaistettu kaavio on kuvassa 5.1. Kuvassa on esitelty tärkeimmät moduulien väliset rajapinnat ja kommunikaatiot. Kuvasta nähdään, että mallin komponentit ovat laajasti yhteydessä.

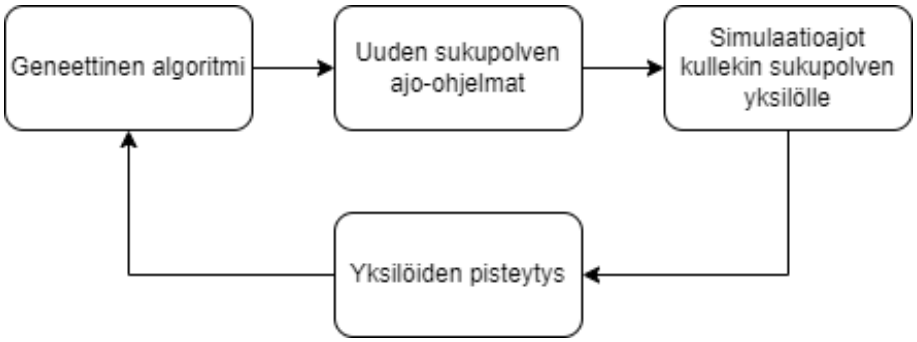
Geneettiselle algoritmille annetaan syötteenä taulukko, joka kuvaa linjojen yhteistä ajo-ohjelmaa. Algoritmi allokoi ja järjestää syötteen parametrit ja suorittaa yksilöä kuvaavan taulukon perusteella simulointiajon. Simulointiajo pisteytetään kokonaiskustannusten ja OEE:n avulla laskettavan vertailuluvun avulla. Parhaiten pisteytetyt yksilöt kirjataan ylös, ja niistä yhdistellään seuraavan sukupolven yksilöt, joille tehdään sama tarkastelu. Geneettisen algoritmin toimintaperiaate on selitetty luvussa 2.4.2. Yksinkertaistettu optimointiprosessi on kuvattu kuvassa 5.2.

Optimointi voidaan hajauttaa eri tietokoneiden, tai yhden tietokoneen eri loogisten suorit-



Kuva 5.1. *Simulointioptimointimallin rakenne*

timien välille, mikä nopeuttaa huomattavasti suoritusaikaa. Tämän tutkimuksen simulointi toteutettiin hajautetulla simuloinnilla. Optimointiin käytettiin järjestelmää, jossa suorittimena oli AMD Ryzen 5 2600 3,4 GHz 6 ytimellä. Loogisia ytimiä oli 12 kappaletta.



Kuva 5.2. *Optimointiprosessi*

Geneettinen algoritmi tarvitsee syötteekseen ehdotelman erilaisista tuotantotilauksista, joita ajo-ohjelmaan voisi sisällyttää. Näitä eriä voidaan muodostaa useilla eri tavoilla. Eri eräkokojen vaikutuksia tutkittaessa ajoerät voidaan generoida lähtövarastoa ja ajanjaksolle tunnettua kysyntää hyödyntämällä. Kullekin tuotteelle luodaan määritettyjä eräkoon vaatimuksia seuraten tarvittava määrä erikokoisia ajoeriä. Tuotteelle X voidaan luoda esimerkiksi seuraavaa juoksevaa 2 viikon kysyntää vastaavat erät 2 kuukauden ajalle. Näin ajoerät mukautuvat kysynnän mukaan. Erälle voidaan asettaa myös jokin minimikoko. Tällä menetelmällä geneettiselle algoritmille voidaan generoida lähdelista tilauksista, jotka se myöhemmin järjestää. Algoritmille tarjotaan myös mahdollisuus sisällyttää ohjelmaan seisakkeja. Käytännössä lähdelistaan sisällytetään useita rivejä, jotka kuvaavat 24 tunnin seisakkia. Lähdelistan kaikki tuotantoerät ja seisakit eivät päädy linjan suoritettavaksi. Lista seisakkeineen on pidempi, mitä tuotantolinja pystyy annetussa ajanjaksossa

suorittamaan. Näin ollen optimointi tekee samalla myös ajojen priorisointia.

Mallin geneettisen algoritmin muodostamalla yksilöllä on kahdesta kolmeen kromosomia riippuen siitä, optimoiko algoritmi myös eräkokoja. Kromosomit kuvaavat ajoerien järjestystä, eräkokojen järjestystä, sekä ajoerän valmistamiseen käytettävän linjan valintaa. Mikäli eräkoot on määrätty ennalta, käytetään kahta kromosomia ja eräkokojen järjestys jää optimoinnista pois. Geneettisen algoritmin käsittelemän taulukon periaate esitetään taulukossa 5.1. Taulukkoa on yksinkertaistettu huomattavasti, vähäisimmälle vaaditulle tasolle. Kromosomien käsittelyyn liittyy myös monia muita tietorakenteita. Eri kromosomit on esitetty kuvassa sarakkeina ”Määrä”, ”Järjestys” ja ”Linja”. Kromosomeja, jotka kuvaavat määrää ja järjestystä, käsitellään järjestelyoperaatioilla. Näiden sarakkeiden alkioiden järjestys siis vaihtelee eri yksilöiden välillä. Linjaa kuvaavaa kromosomia muokataan allokoinnin avulla. Kukin rivi saa arvokseen ”Linja1” tai ”Linja2”. Tietyt ennalta määrätyt tuotteet algoritmi pakottaa aina tietylle linjalle. Taulukon 5.1 riveillä 6 ja 7 kuvataan linjalle suunniteltuja seisakkeja. Näiden ”Määrä” -sarakkeen arvo säilyy aina ennalta asetettuna, arvossa 24, joka käsitellään simulaatiossa tunteina. Seisakkiajanjakson pituus määräytyy sillä, montako näitä seisakkirivejä lopullisessa ajo-ohjelmassa on peräkkäin. Myös seisakit allokoidaan eri linjoille.

Taulukko 5.1. *Geneettisen algoritmin ajo-ohjelma optimoinnin lähtötilanteessa*

	integer 1	string 2	integer 3	integer 4	string 5
string	Tilaus	Tuote	Määrä	Järjestys	Linja
1	1000	Tuote1	20	1	Linja1
2	2000	Tuote2	20	2	Linja1
3	3000	Tuote3	40	3	Linja1
4	4000	Tuote4	80	4	Linja2
5	5000	Tuote5	100	5	Linja2
6	0		24	6	Linja2
7	0		24	7	Linja1

Taulukossa 5.2 nähdään sama ohjelma geneettisen algoritmin yksilönmuodostuksen jälkeen. Sarakkeissa 3 ja 4 alkioiden järjestys on muuttunut lähtötilanteeseen nähden, ja sarakkeessa 5 tuotteet ja seisakit on allokoitu uudelleen linjoille. Tämän linjojen yhteisohjelman pohjalta luodaan linjakohtaiset ajo-ohjelmat. Sarakkeen 3 järjestystä ei sekoiteta, mikäli optimoinnissa halutaan käyttää kiinteitä ennalta määritettyjä ajoeräkokoja.

Yhteisohjelman muodostamisen jälkeen ajo-ohjelma jaetaan kahtia linjoille taulukon 5.2 sarakkeen 5 perusteella. Jakamisessa otetaan huomioon myös taulukon 5.2 sarakkeessa 4 esitetty järjestys. Taulukon rivit järjestetään jaon yhteydessä siten, että ”Järjestys” -sarake on kasvavassa järjestyksessä pienimmästä suurimpaan. Rivi, jolla järjestysnumero on 1, ajetaan simulaatiossa ensin ja niin edelleen. Taulukossa 5.3 esitetään taulukon 5.2 tilanteesta muodostettu ohjelma linjalle 2. Linjalle 1 allokoidut ajot eivät enää

Taulukko 5.2. *Geneettisen algoritmin generoimat parametrit ajo-ohjelmassa*

	integer 1	string 2	integer 3	integer 4	string 5
string	Tilaus	Tuote	Määrä	Järjestys	Linja
1	1000	Tuote1	80	6	Linja1
2	2000	Tuote2	20	4	Linja2
3	3000	Tuote3	100	7	Linja1
4	4000	Tuote4	40	2	Linja2
5	5000	Tuote5	20	3	Linja2
6	0		24	5	Linja2
7	0		24	1	Linja2

näy tässä ohjelmassa. Todellisuudessa myös järjestystä ja linjaa kuvaavat sarakkeet karsitaan tässä vaiheessa pois. Vastaava linjakohtainen ajo-ohjelma laaditaan myös linjalle 1.

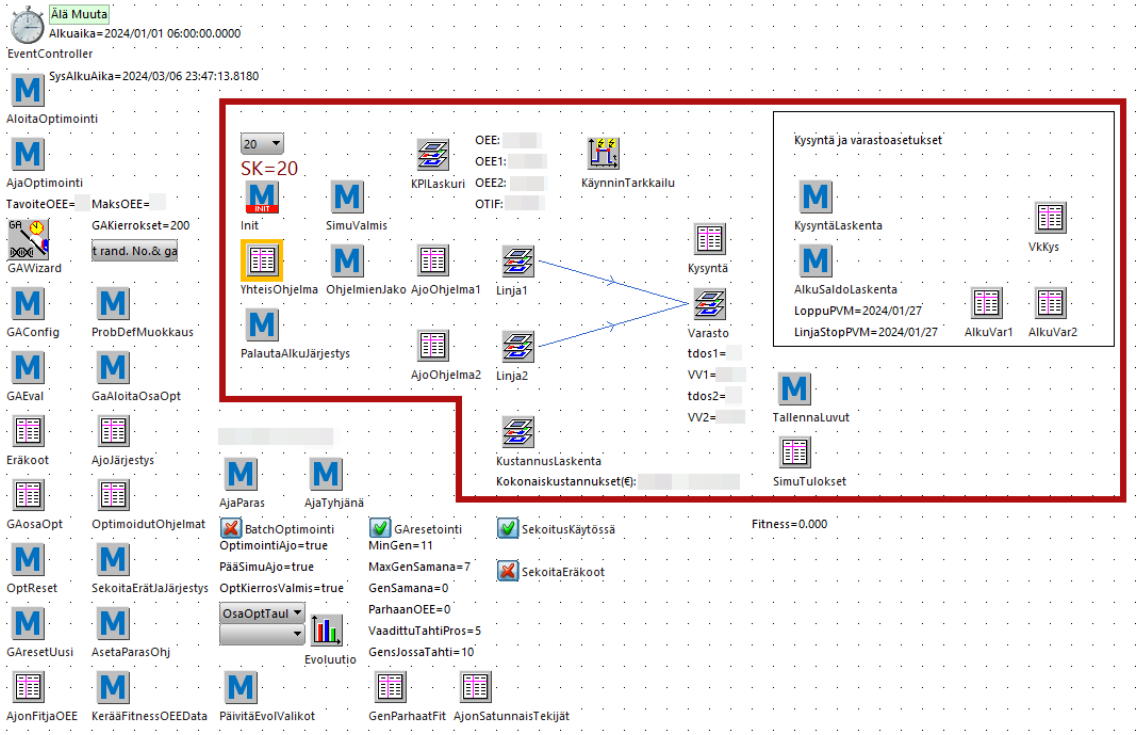
Taulukko 5.3. *Geneettisen algoritmin muodostama ohjelma linjalle 2*

	integer 1	string 2	integer 3	integer 4	string 5
string	Tilaus	Tuote	Määrä	Järjestys	Linja
1	0		24	1	Linja2
2	4000	Tuote4	40	2	Linja2
3	5000	Tuote5	20	3	Linja2
4	2000	Tuote2	20	4	Linja2
5	0		24	5	Linja2

Ohjelmien jaon jälkeen varsinainen simulaatio käynnistetään ja suoritetaan muodostettujen ajo-ohjelmien mukaisesti. Simulaatioajon jälkeen pisteytys tehdään sopivuusfunktion avulla. Sopivuusfunktiota voidaan muokata tutkittavan skenaarion mukaan. Tavallisesti testeissä käytettiin suoraan skenaariossa kertyneiden kokonaiskustannusten arvoa sopivuusfunktion arvona. Tämä skaalattiin esityksen kannalta luontevamman kokoiseksi jakamalla se vakiokertoimella. Mikäli testattiin skenaarioita, joissa tavoiteltiin tiettyjä OEE:n arvoja, otettiin sopivuusfunktioon mukaan myös OEE. OEE ei ole muuttuja, vaan simulaatiosta saatava lopputulos. Tämän takia se piti ottaa huomioon sopivuusfunktiossa, mikäli ajoilla toivottiin olevan tietyn arvon ylittävä OEE. Tapauksissa, joissa OEE sisältyi sopivuusfunktion laskentaan, kunkin yksilön kustannuksiin perustuva sopivuusfunktion, eli kokonaiskustannusten, arvo kerrottiin kaavan 5.1 mukaisella kertoimella. Myös käänteen verrannollista kerrointa testattiin, jotta kerroin ei rankaisisi niin voimakkaasti pienestä OEE:n pudotuksesta parempaa ratkaisua haettaessa. Kyseinen kerroin jäi toistuvasti tavoitearvosta kertoimen pienentyessä epälineaarisesti OEE-tavoitetta lähestyttäessä.

$$k(OEE) = \begin{cases} 1 & \text{OEE} \geq \text{OEE-tavoite} \\ 1 + \text{OEE-tavoite} - \text{OEE} & \text{OEE} < \text{OEE-tavoite} \end{cases} \tag{5.1}$$

Optimointia voidaan suorittaa monilla eri reunaehdoilla. Mallin pohjavarastoja sekä kysyntää voidaan muokata vastaamaan erilaisia markkinatilanteita. Pohjavaraston skaalaamisella saadaan mallinnettua simulointia edeltävää suunnittelufilosofiaa: Onko varastoja pidetty korkeammalla, vai matalammalla tasolla? Simuloinnin tulos voidaan lisäksi esimerkiksi hylätä, mikäli sen OEE on alle ennalta määritetyn arvon. Myös liian pieni OTIF tai liian monet peräkkäiset saman tuotteen myöhästymiset voisivat aiheuttaa kyseisen ohjelman hylkäämisen. Nämä päätettiin kuitenkin säilyttää populaatioissa, jotta populaatioiden moninaisuus säilyy, ja suppeneminen hidastuu. Optimointikierroksia voidaan ajaa esimerkiksi asettamalla vaadittu OEE tietylle tasolle. Optimointikierroksen jälkeen paras ohjelma kustannuksineen voidaan ottaa talteen. Tämän jälkeen vaadittua OEE:tä nostetaan esimerkiksi puoli prosenttia, jonka jälkeen optimointikierros toteutetaan uudestaan. Tällä tavalla voidaan ohjata algoritmia tietyn OEE:n tuottaviin ratakisuihin. Näin voidaan tehokkaammin arvioida kustannusten ja OEE:n suhdetta toisiinsa, mikäli ratkaisut painottuvat tietyn OEE:n alueelle. Työssä esitellyissä tuloksissa OEE:n on annettu kehittyä ilman karsintaa tai sen sisällyttämistä sopivuusfunktioon. Päätös tehtiin alustavien koeoptimointien perusteella.



Kuva 5.3. *Optimointimalli simulointimalliin integroituna. Simulointimalli rajattu punaisella, muokattu*

Kuvassa 5.3 nähdään optimointimalli simulointimallin rinnalla. Nykytila-analyysissä laadittu simulointimalli on kuvassa rajattu punaisella. Rajauksen ulkopuolella olevat komponentit liittyvät optimointiin. Kuvassa 5.3 vasemmassa reunassa näkyvä GAWizard -objekti sisältää varsinaisen geneettisen algoritmin toteutuksen ja suorituksen. Muut elementit säätävät ja ohjaavat optimoinnin toimintaa ja tulosten muodostamista sekä tallentamista.

Monet seuraavassa luvussa toteutettavat ominaisuudet liittyvät näihin elementteihin.

5.2 Optimointimallin parametrisointi

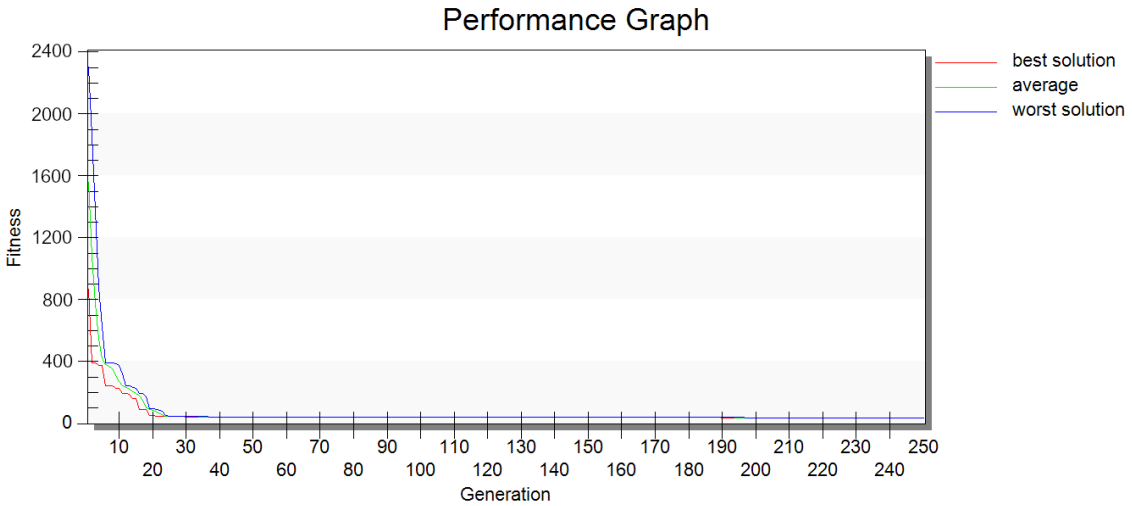
Mallilla optimoidaan ajo-ohjelmat noin 4 viikon ajalle. Tälle ajalle jakautuu mahdollisesti kymmeniä erillisiä ajoeriä. Alustavasti yksittäisen simulaation havaittiin pyörivän simulointikoneella noin 2 minuuttia ja 20 sekuntia. Simulaatiomalli on tarkkuutensa takia kohtalaisen raskas kirjallisuudessa esiintyneisiin malleihin verrattuna. OEE:n tarkempi arviointi etenkin rinnakkaisten ajojen kanssa vaatii kuitenkin lähtökohtaisesti yksityiskohtaista simulointia, sillä pienin ajojen yhteinen komponentti on yksittäinen kuluttajapaperirulla. 4 viikkoa kattavan simulaation aikana kyseisiä rullia käsitellään laskennallisesti miljoonia kappaleita. Simulaatioajoja täytyy geneettisen algoritmin suoritusvaiheessa ajaa tuhansia, joten yksittäiseen ajoon kuluvaa aikaa piti saada pienennettyä. Jotta simulaatioaikaa saatiin laskettua, malliin toteutettiin skaalauskerroin, jolla linjojen logiikassa liikkuvien yksittäisten tuotteiden määrää saatiin pienennettyä. Kerroin otettiin huomioon myös linjan eri osien käyttämissä tuotantoajoissa, jotta kokonaistuotantoaika säilyi ennallaan. Käytettävää kerrointa pystyy tarvittaessa muuttamaan nopeasti eri arvoihin yksinkertaisella pudotusvalikolla. Kertoimen 20 havaittiin toimivan hyvin mallin kanssa. Kyseistä kerrointa käytettäessä mallin logiikan käsittelemien tapahtumien määrä putoaa käytännössä miltei kahdeskymmenesosaan alkuperäisestä. Tämä nopeuttaa mallin suoritusta optimointivaiheessa oleellisesti. Mallin tarkkuus kärsii tutkittavan parametrin mukaan n. 0,5–3 %, mutta virhe on ennakoitava ja säännöllinen. Optimoinnin lopuksi paras ratkaisu voidaan ajaa kuitenkin kertoimen arvolla 1, jolloin skaalausominaisuudet ovat poissa käytöstä, ja simulaatiosta saatavat arvot ovat tarkempia.

Geneettisen algoritmin pohjarunkona käytettiin Siemens Technomatixin Plant Simulationissa valmiiksi toteutettua GAWizard -objektia. Objekti mahdollistaa laajan parametrisoinnin sekä omien funktioiden toteuttamisen eri vaiheisiin optimoinnin sopeuttamiseksi käytettävälle simulaatiolle ja skenaariolle. Se sisältää valmiiksi optimoinnin seurannassa ja arvioinnissa hyödyllisiä kuvaajia sekä taulukoita. Se myös hallinnoi optimoinnin perustoimintojen toteuttamista käyttäjän parametrien mukaisesti. Objektin ohelle piti lisäksi ohjelmoida useita lohkoja, jotka varmistivat algoritmin oikeanlaisen toiminnan tutkittavassa tapauksessa.

GAWizard -objekti teettää risteytyksessä aina kaksi yksilöä yhtä aikuista kohti. Nämä kaikki arvioidaan, ja puolet niistä valikoituvat seuraavaan risteytykseen. Populaatiokoon ollessa esimerkiksi 60, polven vanhemmat koostuvat vain 30 yksilöstä. Populaatiokoko kuitenkin säilyy samana polvesta toiseen. Risteytyksessä käytettävien vanhempien valinta asetettiin perustumaan täysin sopivuusfunktion arvoon. Yksilön valinta seuraavaan sukupolveen perustettiin aluksi koko perheen, eli vanhempien ja näiden kahden lapsen arviointiin. Näistä yksi valitaan seuraavan sukupolven populaatioon. Edeltävän sukupolven

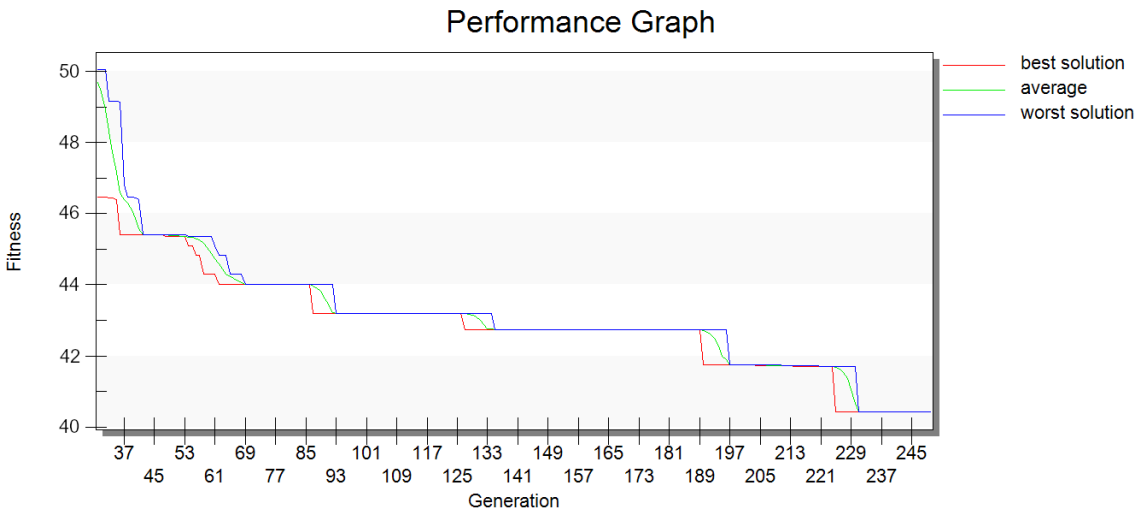
paras yksilö sisällytetään sellaisenaan seuraavaan sukupolveen.

Geneettisen algoritmin populaation, eli sukupolven kooksi valittiin aluksi 60. Sukupolvien määränä testattiin 250:tä. Parametrien valinta perustuu pitkälti iteratiiviseen prosessiin, kuten luvussa 2.4.2 todetaan. Mikäli tulokset eivät suppene, pienennetään populaatiokokoa tai kasvatetaan sukupolvien määrä ja päinvastoin. Tämän tapauksen eri skenaariotkin vaativat erilaista parametrisointia lähtötilanteesta ja tavoitteesta riippuen. Mutaatiooperaatioon järjestystä kuvaavissa kromosomeissa käytetään kääntöoperaattoria. Se ottaa yhtenäisen osan kromosomista, ja kääntää sen järjestyksen päinvastaiseksi. Kääntöoperaation todennäköisyys on 0,4, ja kromosomin osan pituus on satunnainen. Risteytyksen todennäköisyytenä käytetään 0,8:aa. Näin jotkin yksilöt säilyvät sellaisenaan seuraavaan sukupolveen.



Kuva 5.4. *Testiajon evoluutiokäyrä 250 sukupolvelle populaatiokoolla 60*

Mallia testiajettaessa havaitaan, että sopivuusfunktion arvo suppenee suhteellisen nopeasti tietylle tasolle, kuten kuvasta 5.4 havaitaan. Kuvassa y-akselina on sopivuusfunktion saavuttamat arvot, jotka ovat verrannollisia kokonaiskustannuksiin. X-akselina on analysoidut sukupolvet. Kuvaaja kuvaa siis kronologisesti vasemmalta oikealle tulosten kehitystä sukupolvesta toiseen. Suppenemisen jälkeen ilmenneiden yksilöiden lähemmässä tarkastelussa havaitaan, että järjestystä kuvaava kromosomi on miltei täydellisesti suppeutunut. Eri yksilöiden kromosomien välinen moninaisuus on suurelta osin hävinnyt. Tämä aiheuttaa sen, että järjestys ei enää kehity merkittävästi. Eräkokoja ja allokointia mallintavat kromosomit suppenivat hitaammin. Suppeneminen tapahtui suunnilleen yhtä nopeasti riippumatta siitä, otettiinko OEE huomioon sopivuusfunktiossa vai keskittyikö laskenta vain kustannuksiin. Liian nopea suppeneminen viittaa vahvasti lokaaliin minimiin jumittumiseen. Tätä voidaan tutkia muuttamalla algoritmin käyttämää satunnaislukusiementä. Liian nopeaa suppenemista voidaan ehkäistä lisäämällä mutaation esiintymistodennäköisyyttä sekä kasvattamalla yksittäisen sukupolven kokoa. Näin yksilöiden monipuolisuus säilyy pidempään korkeammalla tasolla.



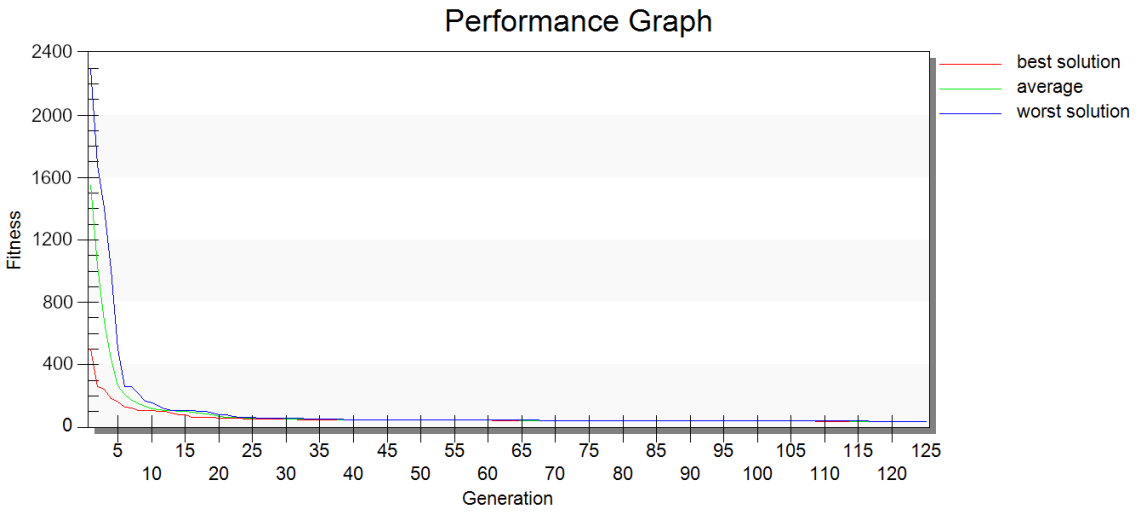
Kuva 5.5. *n. 50-kertainen suurennos testiajon evoluutiokäyrästä 250 sukupolvella ja 60 populaatiokoolla 30. sukupolvesta alkaen*

Suppeneminen jatkui ensimmäisten 30 sukupolven jälkeen, vaikkakin huomattavasti hitaammin. Kuvassa 5.5 on suurennos kuvan 5.4 käyrästä. Suurennoksessa jätetään alun huomattava kehitys huomiotta. Hidastunut kehitys tapahtui todennäköisesti mutaatioiden ansiosta. Pääasiallinen järjestys on kuitenkin tässä vaiheessa jo kehittynyt, eikä algoritmi löydä kohtuullisessa ajassa enää muita täysin uusia ratkaisuja. Se tekee pieniä muutoksia olemassa olevaan, mistä hidastuminen loppua kohden johtuu. Suurennetusta kuvasta 5.5 ilmenee, että ratkaisu ei loppua kohden kehity välttämättä 60 sukupolveen lainkaan ennen seuraavaa kehitysaskelta. Kuvasta 5.5 havaitaan myös, että viimeinen kehitysaskel on tapahtunut suhteellisen lähellä sukupolvien maksimirajaa. Ratkaisu ei ole välttämättä siis täysin suppeutunut. Tämä kannustaa lisäämään käsiteltävien sukupolvien kokonaismäärää, mikä toisaalta lisää laskenta-aikaa.

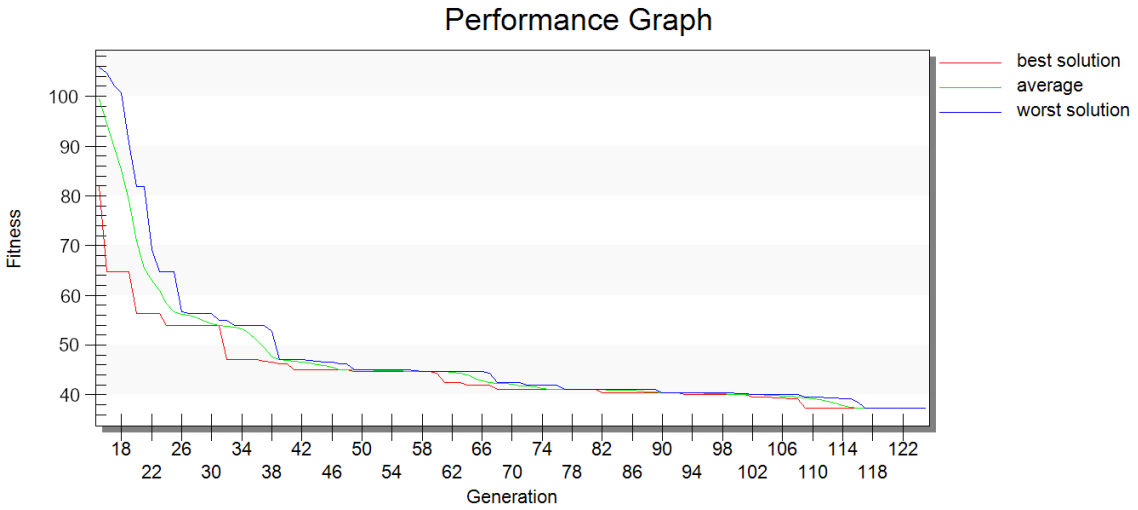
Seuraavaa testiä varten populaation koko tuplattiin, ja sukupolvien määrä puolitettiin. Tällöin yksilöiden kokonaismäärä ja optimoinnin suoritusaika säilyvät samana ensimmäiseen kokeeseen verrattuna. Kuvassa 5.6 nähdään ratkaisun suppenevan edelleen aluksi hyvin nopeasti. Suurennetussa kuvassa 5.7 nähdään suppenemisen jatkuvat tasaisemmin ilman kuvassa 5.5 havaittuja pitkiä tasaisia kehityksettömiä vaiheita. Saavutettu vastauksen arvo on suurin piirtein sama.

Lisätestaamisen jälkeen päädyttiin kuitenkin käyttämään suurempaa populaatiokokoa. Populaatiokoko saisi olla todennäköisesti huomattavasti suurempikin, mutta käytettävissä oleva suoritusteho ei riitä optimoinnin suorittamiseen kohtuullisessa ajassa suuremmilla sukupolvien koilla.

Sukupolvien kokojen lisäksi testattiin risteytyksen yhteydessä tehtävän yksilönvalintapolitiikan vaikutuksia tuloksiin ja niiden suppenemisnopeuksiin optimoinnin aikana. Risteytyksen jälkeen populaation kullakin yksilöllä on ”perhe”, johon kuuluu kaksi ”vanhempaa”



Kuva 5.6. *Testiajon evoluutiokäyrä 125 sukupolvelle populaatiokoolla 120*



Kuva 5.7. *n. 20-kertainen suurennos testiajon evoluutiokäyrästä 125 sukupolvelle populaatiokoolla 120 15. sukupolvesta alkaen*

ja kaksi ”jälkeläistä”. Perheestä seuraavaan polveen etenevän yksilön valintaan oli tarjolla neljä eri menetelmää.

1. Valinta täysin yksilön sopivuuslukuun perustuen vain perheen kahdesta jälkeläisestä.
2. Valinta perheen kaikista yksilöistä satunnaisluvulla painottaen.
3. Valinta perheen kaikista yksilöistä satunnaisesti.
4. Valinta täysin yksilön sopivuuslukuun (fitness) perustuen koko perheestä.

Eri yksilönvalintamenetelmillä suoritettiin 125 sukupolven ja 60 populaatiokoon kanssa muilta osin identtiset kokeet. Skaalatut sopivuusfunktioiden arvot on esitelty taulukossa 5.4. Pienin arvo on asetettu arvoon 1000, johon muut on suhteutettu. Pienempi arvo on parempi, sillä arvo kuvaa kokonaiskustannuksia. Samalla logiikalla on skaalattu myös

parhaiden OEE ja OTIF arvoihin 100 ja 100. Taulukosta 5.4 nähdään, että vain jälkeläisiin perustuva valinta saavutti huomattavasti paremman tuloksen annetussa ajassa, alun perin käytettyyn, koko perheeseen perustuvaan valintaan nähden. Tulosten kehittyminen jälkeläisiin perustuvalla menetelmällä oli huomattavasti nopeampaa evoluutiokäyristäkin havainnoituna. Paras ratkaisu löydettiin siis verrokkeja huomattavasti nopeammin.

Taulukko 5.4. *Eri yksilönvalintamenetelmillä saadut tulokset kokonaiskustannukset sopivuusfunktion arvona*

Valintaperuste	Sopivuus	OEE	OTIF
Paras jälkeläisistä	1000,00	67,73	100,00
Satunnainen koko perheestä	1084,31	69,17	99,93
Sopivuudella painotettu koko perheestä	1182,20	66,01	97,81
Koko perheen paras	1244,83	70,00	99,14

Menetelmillä suoritettiin myös testi, jossa sopivuusfunktio ottaa huomioon sekä kustannukset että OEE:n. Tämän on suoritetuissa alustavissa kokeissa havaittu olevan monioptimointiongelmana vielä haastavampi. Tulokset on esitetty taulukon 5.4 kanssa samanlaisilla skaalauksilla taulukossa 5.5. Tässä testissä sopivuudella koko perheestä painotettu valinta osoittautui verrokkeja tehokkaammaksi menetelmäksi. Sopivuudella mitatessa edeltävässä testissä menestynyt, vain jälkeläisiin perustuva valinta, oli alle prosentin päässä näitä verrattaessa. Yksilönvalintaa testattiin vielä muutamalla muulla otannalla, mikä vahvisti käsitystä valitun menetelmän paremmuudesta ja valinta asetettiin jatkossa perustumaan vain jälkeläisiin. Myös optimointi suoritettiin varsinaisissa kokeissa pääosin ilman suoraa OEE:n vaikutusta sopivuusfunktiossa, mitä valittu menetelmä tukee.

Taulukko 5.5. *Eri yksilönvalintamenetelmillä saadut tulokset monioptimoinnilla*

Valintaperuste	Sopivuus	OEE	OTIF
Sopivuudella painotettu koko perheestä	1000,00	100,00	99,44
Paras jälkeläisistä	1007,21	99,86	100,00
Koko perheen paras	1126,71	99,05	99,37
Satunnainen koko perheestä	1228,36	98,92	97,93

Yksilöt suppenivat kuitenkin edelleen nopeasti päätyen lokaaliin optimiin. Algoritmiin päätettiin toteuttaa luvussa 2.4.2 esitelty resetointimenetelmä, jonka avulla algoritmi löytää uusia ratkaisuja nopeammin. Mikäli ratkaisun kehitys evoluutiosta toiseen hidastuu huomattavasti, paras siihen asti saavutettu ratkaisu otetaan talteen, lähtötilanne sekoitetaan ja satunnaismuuttujan siemenarvo vaihdetaan. Tämän jälkeen optimointi aloitetaan alusta. Näin algoritmi löytää toisen mahdollisen ratkaisun jäljille. Algoritmi löysi nyt samassa

ajassa alkuperäiseen tilanteeseen nähden useita ratkaisuja, joille se suorittaa kokeen jälkeen vertailun ja ottaa parhaan tuloksen talteen. Resetointia varten algoritmiin lisättiin säätöparametrit, joita muuttamalla resetoinnin herkkyyteen voitiin vaikuttaa. Nämä koskivat muun muassa analysoitujen sukupolvien vähimmäismäärää, prosentuaalista kehitystahtia sekä sukupolviajanjaksoa, jossa tahtivaatimusta tarkastellaan.

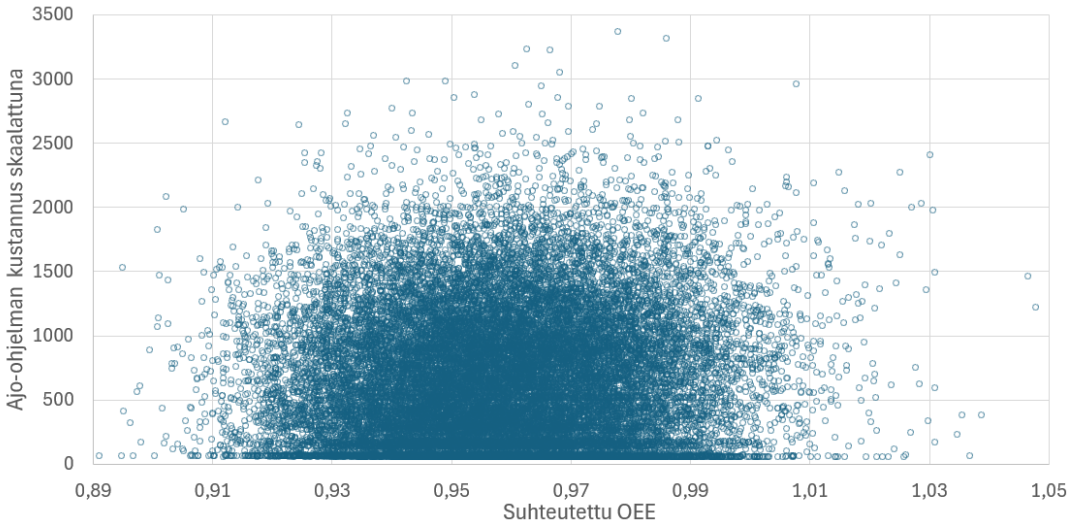
5.3 Todellisten skenaarioiden optimointi

Aluksi simulaatio ajettiin todellista tilannetta vastaavilla kysynnän, varaston sekä ajo-ohjelmien luvuilla, jotta saatiin verrokkiajo optimoinneille. Tämän jälkeen samalle kysynnälle ja alkuvarastolle generoitiin optimoinnin avulla ajo-ohjelmat. Optimoinnin avulla haluttiin selvittää samalla kokonaiskustannusten ja OEE:n suhdetta. Näin nähdään miten kustannukset kehittyvät suhteessa OEE:hen. Optimointialgoritmia ajettiin erilaisilla eräkokoa ohjaavilla pohja-ajo-ohjelmilla. Yksittäisen ajo-ohjelman rivin eräkoon optimointia ei sisällytetty algoritmin suoritukseen, vaan kunkin tuotteen ajoerät määräytyivät kysynnän ja käytettävän eräkokosäännön perusteella.

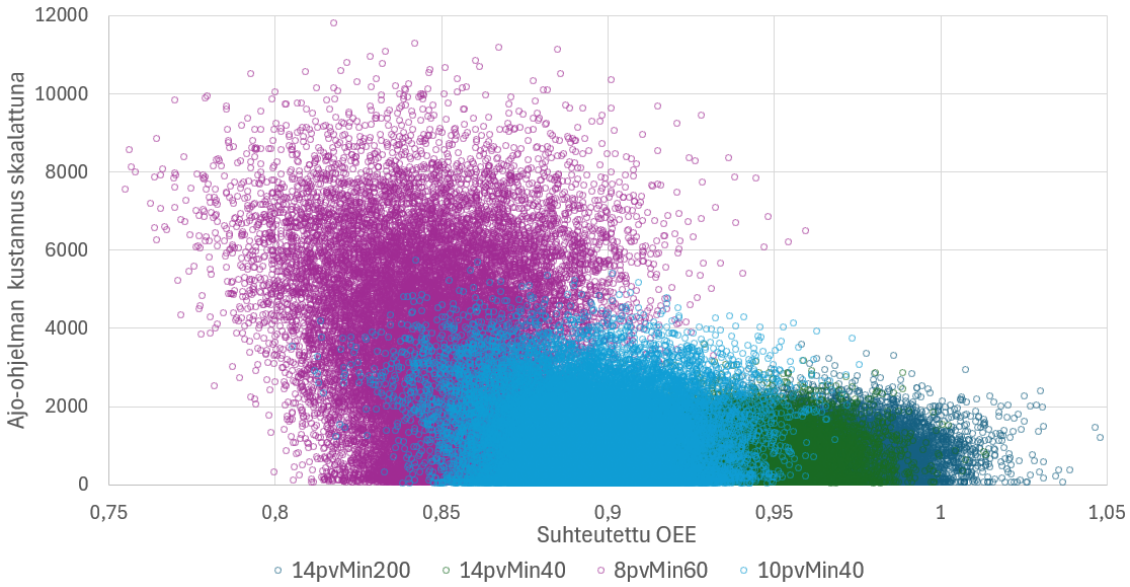
Optimointialgoritmi tuottaa tuloksenaan ajo-ohjelmia. Näitä ajo-ohjelmia arvioidaan simuloinnin avulla. Yhden simulointiajon löytämiä tuloksia voidaan tutkia kuvaajassa sijoittamalla ajo-ohjelmien kustannukset y-akselille, OEE:n ollessa toisella akselilla. Esimerkkinä kuvassa 5.8 on esitetty yksittäisen optimointiajon tuottamat tulokset edellä mainitun muotoisessa kuvaajassa. Vaaka-akselilla on siis ajo-ohjelman tuottama OEE, ja pystyakselilla ajo-ohjelmasta aiheutuneet kokonaiskustannukset skaalattuna vakiokertoimella. Yksittäinen piste edustaa tiettyä optimoinnin muodostamaa ja simulaatiolla testattua ajo-ohjelmaa. Pisteet koostuvat vain ääriviivasta, jotta tulosten tiheysjakauma tulee paremmin esille. Kuvassa 5.8 on kuvattuna noin 24 800 eri ajo-ohjelman tuottamat kokonaiskustannukset ja OEE:t.

Seuraavaksi esitetään ensimmäisiä optimointiajoja, joiden perusteella optimoinnin lähtöparametreja tarkennettiin. Optimointi suoritettiin todelliselle historialliselle tilanteelle samoilla lähtötiedoilla, jotka ajo-ohjelman alkupäivänä oli saatavilla. Kuvassa 5.9 esitellään optimointiajon tilastolliset tulokset eri eräkokoja käytettäessä. Tämän optimoinnin pohjavarastot mallinnettiin siten, että yksittäisen tuotteen saldo rajattiin noin eräkokoa vastaavaan maksimiin, mikäli tämä ylitettiin. Alkuvarastot olivat pienempiä kuin todelliset varastotasot tapauksessa, mutta eivät tarkasti kontrolloituja. Tällä tutkittiin eräkoon vaikutusta kohtalaisen korkeilla varastotasoilla. Tuotteiden saldoja ei kuitenkaan nostettu, mikäli ne olivat alle eräkoon. Tämä on todennäköisesti kokonaisuudessaan todellista tilannetta optimistisempi tilanne.

Kuvassa 5.9 eri värit kuvaavat eri eräkoilla toteutettuja ajo-ohjelmia. Eräkoot perustetaan seuraavien päivien kysyntään, tai eräkoon minimirajaan. Mikäli kyseessä olevien päivien kysyntä ei ylitä minimieräkokoa, on tuotantoerä ilmoitettu minimieräkoko. Purppurat pis-



Kuva 5.8. *Optimoinnin tuottamat kokonaiskustannukset OEE:n funktiona yhdellä eräkokostrategialla*

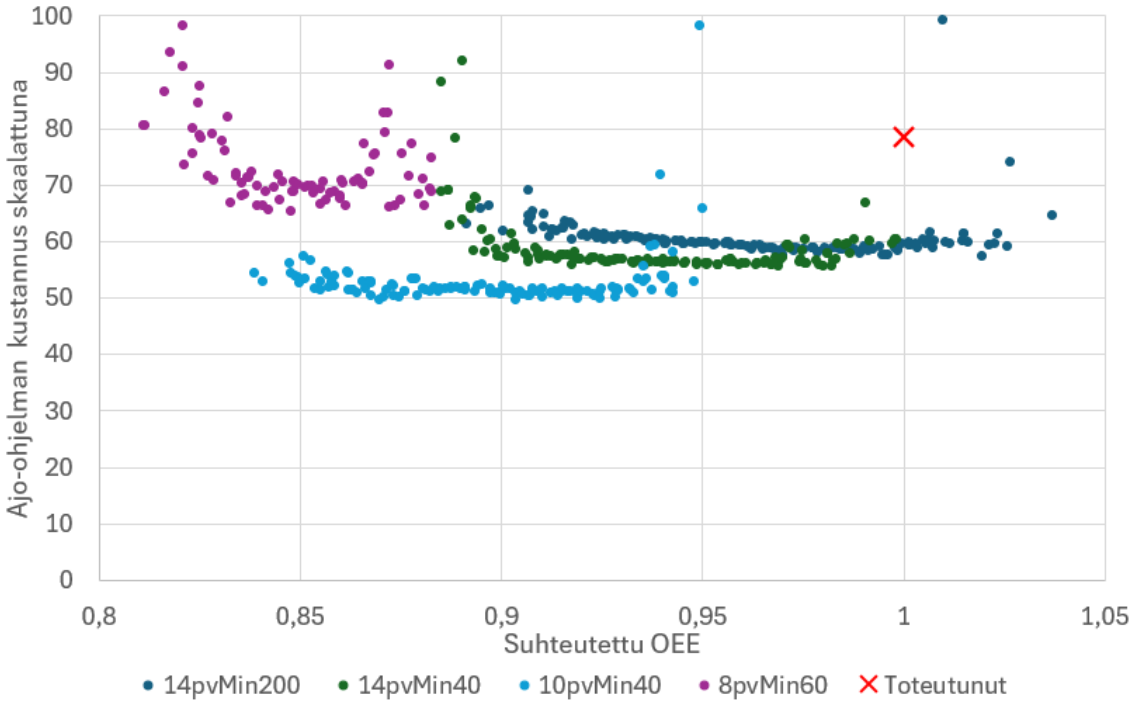


Kuva 5.9. *Skenaarion 1 optimoinnin tuottamat kokonaiskustannukset OEE:n funktiona eri eräkoilla*

teet kuvaavat 7 päivän kysyntää vastaavaa ajoerää 60 lavan minimieräkoolla, vaaleansiniset 10 päivän kysyntää vastaavaa erää, tai 40 lavaa ja niin edelleen. Pisteitä on kuvassa noin 100 000. Optimaalisia tuloksia tutkittaessa kiinnostus on niissä pisteissä, jotka saavat pienimmän arvon, eli tuottavat pienimmät kustannukset. Kuvassa 5.10 on esitetty optimoinnin parhaimmat tulokset eri OEE:n arvoilla. Kuvaa varten OEE jaksotettiin pieniin pätkiin, ja kultakin väliltä kerättiin välin kolmen parhaan ohjelman tulokset. Nämä ovat siis kuvassa 5.9 esitetyn pistepilven alareunaa.

Kuva 5.10 on y-akselin osalta tarkennettu hyvin lähelle edeltävään kuvaan nähden, mikä havaitaan myös y-akselin arvovälistä. Tämä helpottaa tulosten tarkastelua. Eri skenaa-

rioista esitetään selkeyden vuoksi vain jälkimmäinen kuva. Kuvasta nähdään, että 10 päivän kysyntää vastaava eräkoko tuottaa kustannusten kannalta parhaan ratkaisun. Huomionarvoista on myös, että 14 päivän kysyntää kuvaavista pistejoukoista pienemmällä minimieräkoolla olevat ohjelmat menestyivät kustannusten kannalta paremmin. Tämä on odotettu tulos, kun skenaarion pohjavarastotasot eivät tuota akuuttia tarvetta monille eri tuotteille. Pienemmät ajoerät mahdollistavat varaston vähäisemmän täyttöasteen ja linjan seisottamisen pienentäen varastointi- ja tuotantokustannuksia.



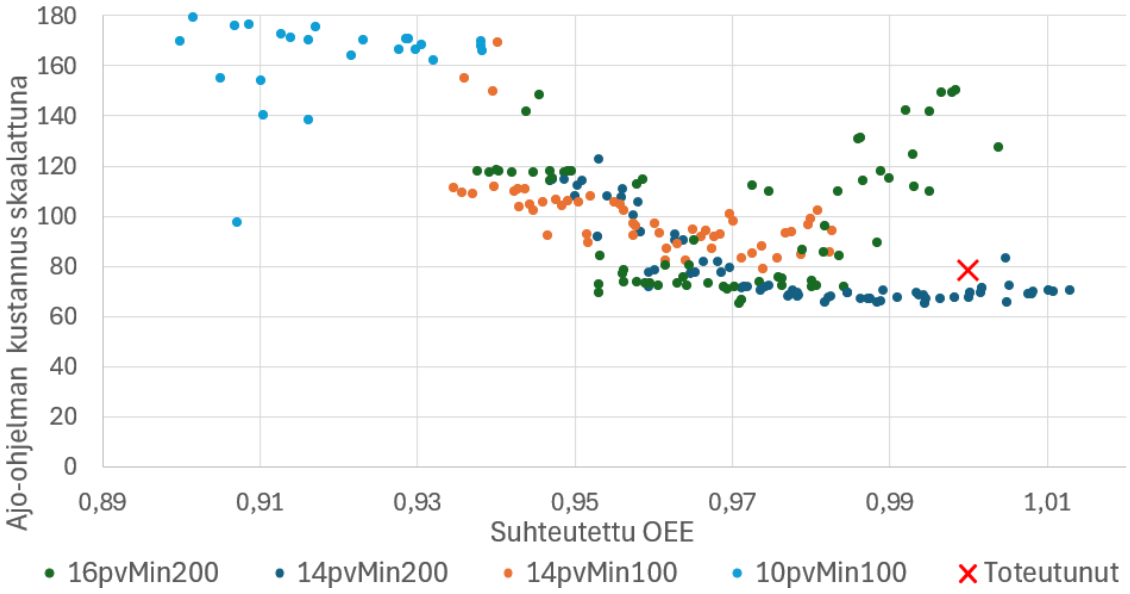
Kuva 5.10. *Skenaarion 1 optimoinnin parhaat tulokset*

Vertailun vuoksi kuvaan 5.10 on sijoitettu todellisuudessa toteutuneen ohjelman pisteytys punaisella rastilla. Mallin ratkaisut ovat siis tarkasteltujen mittareiden näkökulmasta kilpailukykyisiä toteutettujen ajo-ohjelmien kanssa. Ratkaisujen jakauman avulla saadaan myös käsitys siitä, kuinka paljon OEE:tä ja sitä kautta tuotantotehokkuutta kannattaa painottaa ratkaisua valittaessa.

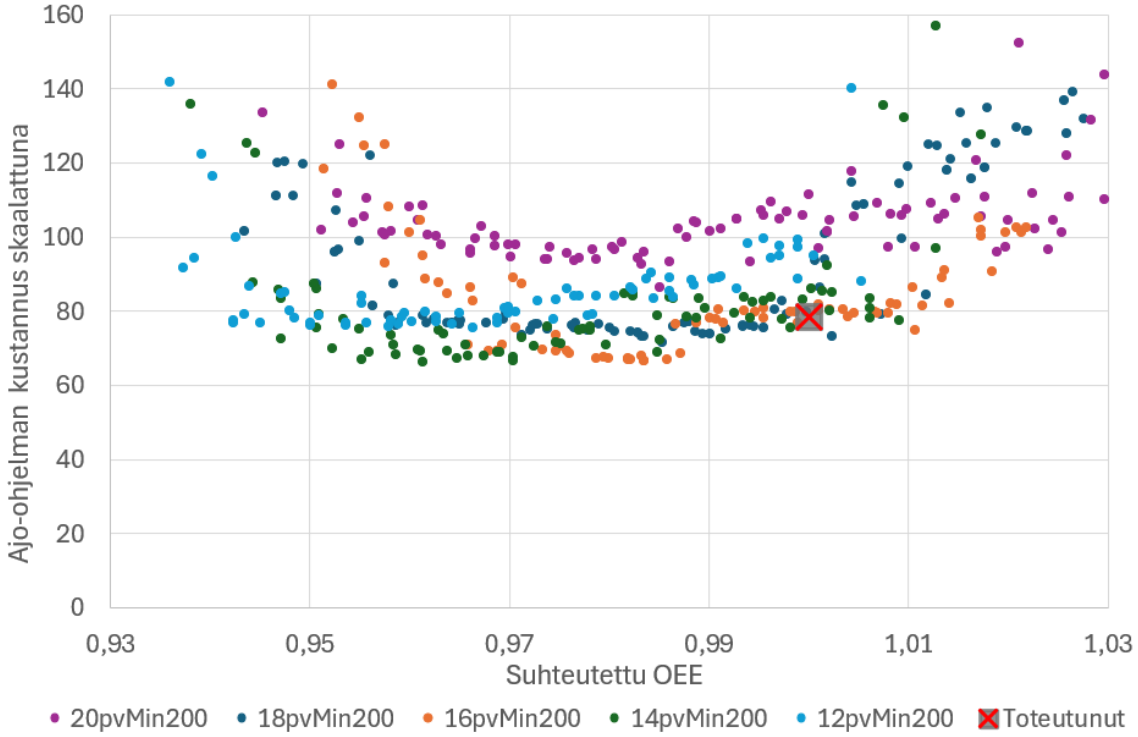
Kuten aikaisemmin mainittiin, kuvassa 5.10 alkuvarastot olivat ylioptimistisia. Kuvassa 5.11 esitellään tulokset skenaarion 2 optimoinneille, joissa alkuvarasto määriteltiin tasajakautuneella satunnaismuuttujalla, jonka maksimiarvo oli tuotteen eräkoko. Alkuvarasto oli siis jotain 20:n ja tuotteen eräkoon väliltä. Käytetty kysyntä oli sama kuin skenaariossa 1.

Kuvasta 5.11 nähdään, että parhaita ohjelmia kuvaavat pisteet ovat enemmän hajallaan kuin kuvassa 5.10. Kysyntätilanteen täyttävän ohjelman muodostaminen on pienemmällä ja satunnaisemmalla pohjavarastolla haastavampi operaatio, mikä selittää pisteiden hajanaisuutta. Algoritmi löysi silti toteutuneen ohjelman kanssa kilpailukykyisiä ohjelmia

useammalla eri eräkoolla. Varaston mallintamisen tulisi kuitenkin tämän perusteella perustua samaan skaalattavaan pohjavarastoon eri eräkokoja testattaessa.



Kuva 5.11. *Skenaarion 2 optimoinnin parhaat tulokset*



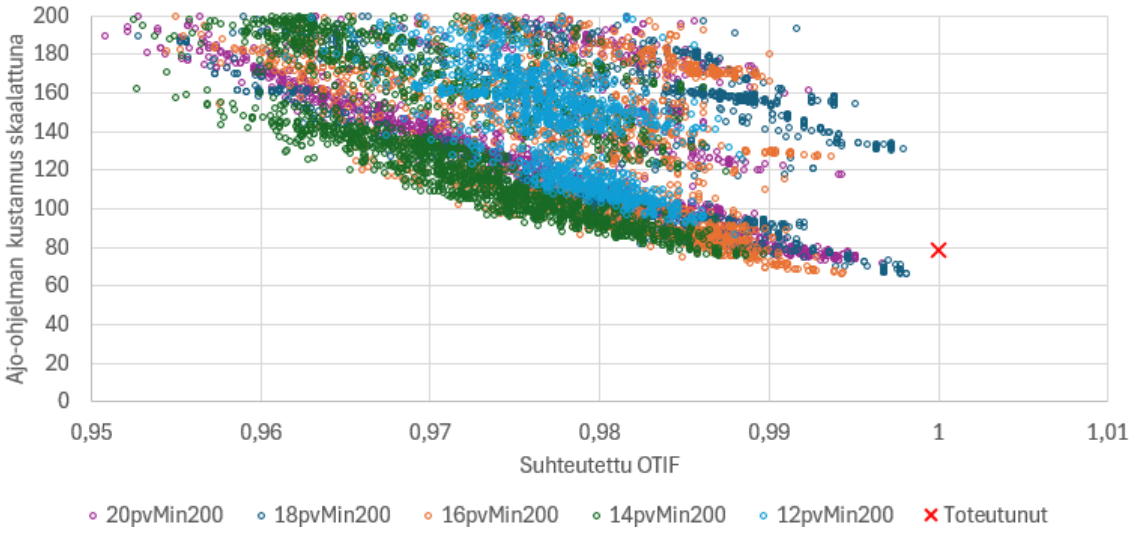
Kuva 5.12. *Skenaarion 3 optimoinnin parhaat tulokset*

Lopuksi ohjelmat optimoitiin skenaariossa 3 käyttäen skenaariossa 2 käytettyä tasajakautuneella satunnaismuuttujalla muodostettua pohjavaraston muodostusta. Tässä tapauksessa alkuvarastot skaalattiin eri eräkokosääntöjä käyttäen samasta varaston alkutilanteesta. Näin eri eräkokojen vertailu onnistuu todenmukaisemmin. Käytetty kysyntä on

sama kuin skenaarioissa 1 ja 2. Parhaat tulokset on esitetty aiempien tulosten kanssa samassa muodossa kuvassa 5.12. Kuvien 5.10 ja 5.12 perusteella voidaan todeta, että eräkokojen vertailu käytetyllä tarkasteluvälillä on mielekästä vain samaan pohjavarastoon perustuen. Kuvassa 5.11 eri eräkokojen tulokset ovat huomattavasti enemmän hajallaan, koska pohjavarastot vaikuttavat optimoinnin tuloksiin merkittävästi näin lyhyellä, 4 viikon tarkastelujaksolla.

Tässäkin tapauksessa realistisilla ja yhdenmukaisilla pohjavarastoilla optimointi löytää OEE:n ja kokonaiskustannusten kannalta toteutuneen ajo-ohjelman kanssa kilpailukykyisiä ratkaisuja. Skenaariossa kaikille eräkokostrategioille oli asetettu sama 200 lavan minimi, jotta tulokset olisivat kysyntään perustuvan osan perusteella vertailukelpoisia. Kuvasta 5.12 nähdään, että 18, 16 ja 14 päivän kysyntöjä vastaavat eräkoot menestyivät parhaimmin. 12 ja 20 päivän eräkoot eivät saavuttaneet kustannusten kannalta yhtä hyviä tuloksia. OEE:n kasvaessa suuremman ajoerän ajo-ohjelmat menestyivät paremmin.

Kuvassa 5.12 esiteltiin skenaarion 3 OEE:n ja kustannusten välisiä suhteita eri eräkoilla. Kuvassa 5.13 esitetään myös OTIFin ja kokonaiskustannusten suhteet samoille ajoille simulaation perusteella. Haastattelujen mukaan OTIF tulisi pitää korkealla tasolla. Myös simulointimallilla ohjelmia vertaillessa, ja optimointeja tarkasteltua saatiin viitteitä OTIFin ja kustannusten sidonnaisuudesta.



Kuva 5.13. *Skenaarion 3 optimoinnin kokonaiskustannukset suhteessa OTIFiin*

Kuvaan 5.13 on merkitty punaisella rastilla simulaation tuottama OTIF myös todelliselle ajo-ohjelmalle. Kuvaajan OTIFit on suhteutettu tähän arvoon. Kuvaajassa käytetään samaa eräkokojen esitystapaa kuin OEE:tä ja kustannuksia vertailtaessa. Kuvasta nähdään selkeä riippuvuus simulointimallin tuottaman OTIFin ja kokonaiskustannusten välillä. Samalla OTIFin arvolla voidaan kuitenkin jakauman korkeudesta pääteltynä suorittaa optimointia. OTIF ei siis selkeästi ole ainoa merkitsevä muuttuja ajoja ja eriä järjesteltäessä, sillä samalla OTIFin arvolla on laaja jakauma kokonaiskustannusten arvoja. Optimointi ei

saavuttanut todellisen ohjelman tuottamaa OTIFia, mutta ero on hyvin vähäinen. Kuvaajassa näkyy myös samat kustannusten kannalta paremmat ohjelmat kuin kuvassa 5.12. Näiden OTIF ei kuitenkaan yllä toteutuneen tasolle. Optimoinnin tuottamat matalammat kustannukset aiheutuvat alhaisemmista varastotasoista pienempiä eräkokoja käytettäessä.

5.4 Optimointimallin validointi

Optimointimallin ratkaisuja tarkasteltiin simulointimallin generoiman datan perusteella. Simulointimallin validointi on esitelty luvussa 4.2.3. Simulointimallilla voidaan tarkastella esimerkiksi ajo-ohjelmalla tulevaa OTIFia, ja varmistaa, että toimitusvarmuus säilyy hyväksyttävällä tasolla. Ajonaikainen varastokehitys nähdään myös helposti simulointimallin varastomoduulin kautta. Se näyttää niin päiväkohtaiset keskiarvoiset kokonaissaldot kuin varaston riiton päivissä kyseiseltä päivältä eteenpäin. Kaikki nämä arvot käyttäytyvät tulosten parhailla ohjelmilla todellisuuden sallimissa rajoissa. Päivissä laskettu varaston riitto pysyy hyvinkin vakaana. Varaston suhdetta OEE:hen ja kustannuksiin tutkittiin määrällisesti lähinnä optimoinnissa käytettävien eri eräkokojen kautta. Varaston juoksevien kesiarvojen esittäminen OEE:n, OTIFin ja kokonaiskustannusten vertailuun käytettyjen kuvaajien mukaisesti olisi hyvin haastavaa. Yksittäinen keskiarvo ei kuvaa varaston tilannetta aidosti, eikä kaksiulotteinen kuvaaja optimoinnin tuloksista tue tätä kovin hyvin. Eri eräkokojen käyttäminen optimoinnin lähtötietoina kuvaa kuitenkin välillisesti myös varaston tilaa.

Myös optimointimallin tuottamien ohjelmien kustannusten tulosjakaumasta voi arvioida optimoinnin suoriutumista kyseisillä parametreilla. Mikäli yksittäisen eräkokoon parhaiden tulosten pisteet asettuvat jatkuvalle janalle, on todennäköisempää, että tulos on lähellä optimia. OEE:n uskotaan käyttäytyvän jokseenkin suhteessa optimikustannuksiin. Erittäin epäsäännöllinen optimaalisten tulosten muodostama linja viittaa siihen, että pisteiden välistä olisi vielä löydettävissä parempia ratkaisuja. Joissakin skenaarioissa tulokset hajaantuivat jonkin verran tällä tavalla. Todenmukaisinta varastointimallia käytettäessä skenaariossa 3, tulokset asettuivat melko hyvin jatkuville käyrille.

Optimointimallin lähtötilanteen mallintaminen vaikuttaa huomattavasti saataviin tuloksiin. Mikäli eräkokona käytetään tiettyä arvoa, pitää myös pohjavaraston noudattaa tätä. Pohjavaraston saldot määrittävät suuresti ajo-ohjelmissa esiintyvät eräkoot ja järjestykset näin lyhyellä tarkasteluajanjaksolla, mikä tapauksessa oli käytössä. Pohjavarastosaldot muodostettiin osin tasajakautuneella satunnaisfunktiolla käytettävään eräkokoon perustuen. Satunnaisten varastosaldojen muodostaminen optimoinnin pohjavarastoihin rajoittaa tulosten todenmukaisuutta, sillä useita eri lähtösaldoja ei suoritustehon puitteissa voida tutkia. Pohjavarastojen suhteuttamista eräkokoonkin kokeiltiin skenaariossa 3. Tämä tuotti johdonmukaisempia tuloksia.

Kuvista 5.10, 5.11 ja 5.12 nähdään, että tulokset ovat myös todellisen ajo-ohjelman tulosten kanssa samassa suuruusluokassa. Ne menestyivät osin jopa paremmin. Optimoinnin tulosten todellinen optimaalisuus ja verrannollisuus suhteessa todellisuuteen riippuu kuitenkin täysin simulointimallin tuottamista tuloksista, ja siitä miten hyvin se vastaa todellisuutta. Jos simulointimalli arvioi jotakin haitallista toimintaa väärin, ja pisteyttää tämän liian positiivisesti, voi optimointikin tukea enemmän tätä ratkaisuissaan.

Optimoinnin voidaan kuitenkin todeta aidosti löytävän erittäin hyviä ajo-ohjelmia ratkaisuavaruuden kokoon ja keskiarvoisen ratkaisun sopivuuteen verrattuna. Kuvasta 5.9 nähdään esimerkiksi kaikki ratkaisut sisältävän kuvaajan y-akselin yltävän aina 12 000:een asti. Vastauksia löytyy runsaasti laajalta alueelta. Silti esimerkiksi kuvasta 5.8 nähdään, että ratkaisujen sopivuusarvoja kuvaavan pistepilven alareunassa on selkeä tiivistymä, eli algoritmi on löytänyt monia eri ratkaisuja, jotka ovat huomattavasti keskimääräistä parempia. Geneettinen algoritmi voi kromosomien määrän mukaan muokata useita eri tekijöitä, mikä lisää ongelman mahdollisten ratkaisujen määrää. Esimerkiksi pelkästään ajoerien järjestystä tutkivalla operaatiolla on kuvan 5.8 tilanteessa 40 eri erää. Tämä tarkoittaa, että mahdollisia vaihtoehtoja tälle yksittäiselle osaongelmalle on $40! \approx 3 \cdot 10^{39}$ kappaletta. Luku on käsittämättömän suuri. Maailmankaikkeuden on arvioitu olevan noin 13,82 miljardia vuotta vanha (NASA n.d.). Tämä sekunneiksi muutettuna on noin $4,36 \cdot 10^{17}$. Tämä lukukin on häviävän pieni ratkaisuvaihtoehtojen määrään verrattuna. Siitä huolimatta algoritmi löytää suhteellisen suuren määrän hyvin pieniä, eli kustannusten kannalta hyviä arvoja. Tämä nähdään esimerkiksi kuvien 5.8 ja 5.10 y-akseleita ja keskiarvoisten ratkaisujen arvoja verrattaessa parhaisiin. Tämä osoittaa, että optimointimalli tuottaa systemaattisesti suhteellisen hyviä tuloksia.

6. TULOSANALYYSI

6.1 Nykytila-analyysin tulosten analysointi

Haastattelujen ja data-analyysin perusteella voidaan todeta, että toimintaympäristö on kaikkine muuttujineen hyvin monimutkainen. Tuotannonsuunnittelussa yksinkertaisilla nyrkkisäännöillä on mahdotonta saavuttaa optimaalisia tuloksia. Joillakin yksinkertaisempien kysyntä- ja tuoterakenteiden tapauksessa manuaalisella suunnittelulla voidaan päästä lähelle optimia. Nykytila-analyysissä selvisi, että muuttuva kysyntä yhdessä tuotannon vaatimusten kanssa aiheuttaa monia muuttuvia tilanteita, joissa ajojen priorisointipäätösten tekeminen on haastavaa. Lisäksi varastotilanteen ja -kehityksen arvioinnin vaikeus aiheuttaa lisähaasteita.

Materiaali- ja tuotevaraston tilanteen seuraaminen koettiin haastavaksi. Ruuhka tuotevarastossa voi pahimmillaan aiheuttaa lyhyellä varoajalla suunniteltavia seisakkeja ja muutoksia tuotantoon. Tämä taas saattaa aiheuttaa kerrannaisvaikutuksia materiaalivaraston puolella. Varastotilanteen kehityksen parempi hahmottaminen auttaisi suunnittelemaan tuotantoa varastotilanteen kannalta pitkäjänteisemmin. Vaikka linjan tavoitevarastoa päädyttäisiin laskemaan, voi joihinkin kampanjatilauksiin valmistautuminen vaatia väliaikaisesti suurempaa varastokapasiteettia. Nämäkin tilanteet helpottuisivat, mikäli näkyvyys niin materiaali kuin tuotevarastonkin suuntaan paranisi. Varasto-ohjautuvassa tuotannossa varaston kokonaiskehitys on olennaista tietoa. Tällä hetkellä varaston tilanteesta saadaan tietoa vain yksittäisiltä hetkiltä joissakin palavereissa, ja silloinkin tieto koskee vallitsevaa tilaa hyvin yleisellä tasolla. Tämän pohjalta ei pystytä tekemään kuin hätäisiä korjausliikkeitä, joita jäädytysajanjakson puitteissa tulisi välttää. Myös kysyntätilanteiden muutosten havainnointi koettiin toisinaan haastavaksi. Nämä ovat asioita, jotka liittyvät tuotannonsuunnittelujärjestelmän tarjoamaan tilannekuvaan. Myös tuotannonsuunnittelua tukevan dashboardin muodostaminen nousi esille.

Eri haastattelujen perusteella voidaan todeta, että toimitusvarmuuden heikentämisellä on odotetusti paljon suuremmat negatiiviset vaikutukset kuin siitä saatavat hyödyt. Tämä ilmeni myös simulaatiomallin ajoista. Näin ollen OTIFin kustannuksella ei lähdetty tekemään optimointia. Mallin kustannusrakenne ohjasi luontaisesti OTIFin korkealle tasolle pääasiassa minimoiden myöhästyneiden tilausten määrää.

6.2 Optimoinnin tulosten analysointi

Perinteiset ajo-ohjelmia optimoivat algoritmit muodostavat yleensä vain kustannuksiin perustuvan arviointimallin. Tämä tuottaa jonkin tuotantosyklin, joka käyttöönottamalla saavutetaan tietty teoreettinen kustannustaso. Tässä työssä esitelty malli mahdollistaa simuloinnin ansiosta usean eri ominaisuuden huomioon ottamisen optimoinnin ratkaisuja arvioitaessa. Vastaavasta esitystavasta ei löydetty tutkimusta kirjallisuuskatsauksessa. Tuloksista kuitenkin havaittiin, että samankin kustannustason ajo-ohjelmat voivat tuottaa huomattavia eroja tuotantotehokkuudessa. Kustannusten kannalta parhaiden ratkaisujen tuottama OTIF oli usein hyvin korkealla tasolla. Pääsääntöisesti korkeimman OTIFin tuottamat ajo-ohjelmat tuottivat lähes matalimmat kustannukset.

Optimoinnin tuloksia pohjustettaessa kuvasta 5.8 huomataan, miten laaja ratkaisuavaruus ohjelmaa muodostettaessa on. Erilaisia vaihtoehtoja ajojen järjestyksille ja eräkoille on valtavasti myös realistisissa, pienten kokonaiskustannusten ratkaisuissa. Havaittiin, että ratkaisujen tiheys pieneni huomattavasti OEE:n ääripäitä lähestyttäessä. Kokonaiskustannukset asettuivat usein tietyllä eräkoolla melko tarkasti suoralle, jonka korkeamman OEE:n päädyssä oli kustannusmallin perusteella parempia ratkaisuja. Ratkaisujen tiheyden pieneneminen kuitenkin tarkoittaa, että optimaalisia ratkaisuja on vaikeampi löytää tästä päädystä. Näiden löytäminen manuaalisesti on siten huomattavan haastavaa. Optimointikin löysi vain hajanaisia ratkaisuja korkeimman OEE:n alueelta. Se kuitenkin löysi vastauksia, jotka antoivat vähintään nykyisen tasoisen OEE:n, mutta lisäksi pienemmät kokonaiskustannukset.

Optimoinnin tulosten pohjalta ei voida tehdä suoraan yleistä pääsääntöä, miten eriä tulisi muodostaa, tai ajoja järjestellä. Optimoinnin tuloksista havaitaan, että erilaisissa skenaarioissa optimaalinen tulos ei tule välttämättä samalla eräkokostrategialla. Luotujen ajo-ohjelmien havaittiin noudattelevan osittain samoja pääsääntöjä, joita ajoja järjestellessä käytetään nykyäänkin. Optimointi kuitenkin poikkesi näistä toisinaan. Algoritmin havaittiin priorisoivan toimitusvarmuutta mallia optimoitaessa. Optimointi löysi kustannusten perusteella optimaalisempia ajo-ohjelmia käytetyn ohjelman OEE:tä matalammalla OEE:llä. Tämä viittaisi siihen, että tuotantotehokkuudesta voisi mahdollisesti karsia kokonaiskustannuksien laskemiseksi. Pääosin myös tehokkuutta kasvattavia, toteutuneita matalamman kokonaiskustannuksen tuottavia ajo-ohjelmia löydettiin.

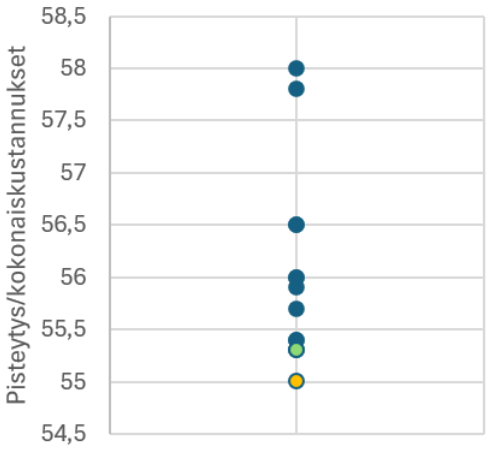
6.3 Kehitysehdotukset tutkimuksen pohjalta

Tutkimuksen perusteella ei voida vetää yksiselitteisiä johtopäätöksiä siitä, mihin suuntaan ajomallia tulisi kehittää. Optimointia ajettiin yli 300 tuntia, ja erillisiä kokeita tehtiin kymmeniä. Yksittäinen eräkokosääntö, joka saattoi menestyä yhdessä testatussa skenaariossa, ei välttämättä menestynyt toisenlaisessa skenaariossa. Kysyntä ja varastotilanteet todel-

lisuudessa vaihtelevat ja kehittyvät jatkuvasti, jolloin suoranaisen suunnittelupääsäännön tekeminen on kyseenalaista.

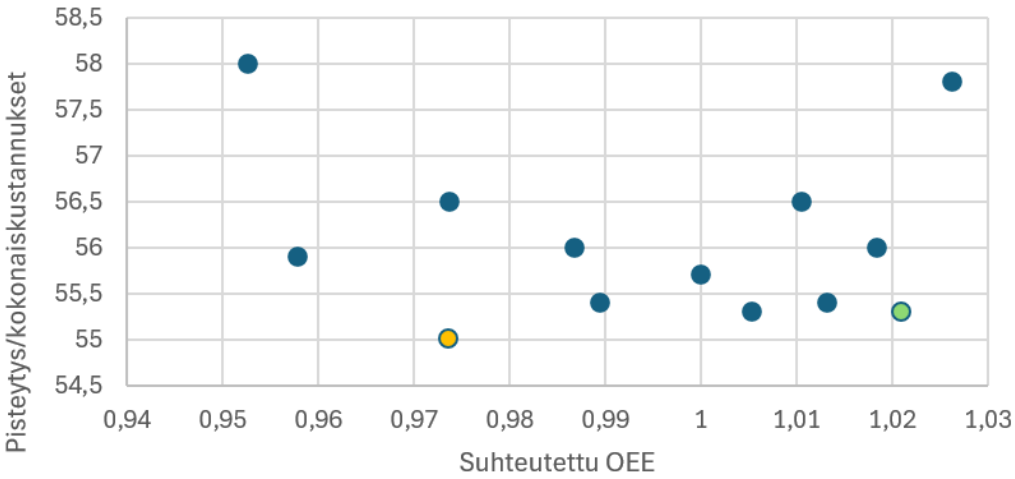
Eri skenaarioiden ajo-ohjelmille luomat ajurit poikkeavat muun muassa kysyntä- ja varastotilanteen takia toisistaan, joten optimaalisia menetelmiä pitäisi tutkia tilannekohtaisesti ajankohtaisella datalla. Tämä olisi mahdollista ajo-ohjelman optimointiin kehitetyn ohjelmiston avulla. Se voisi vastata nykytila-analyysin haastatteluissa ilmenneeseen tarpeeseen päätöksentekoa tukevasta ohjelmistosta.

Työssä toteutettu simulointioptimointimalli toimi konseptitodistuksena siitä, miten simulointiin yhdistettyä optimointiohjelmaa voidaan hyödyntää tuotannonsuunnittelussa. Optimoinnin kehittämiä ajo-ohjelmia voidaan arvioida monien eri tekijöiden perusteella esittämällä optimoinnin tulokset visuaalisesti kaksiulotteisella kaaviolla työssä esiteltyjen kuvien mukaisesti. Tämän lisäksi yksittäisen pisteen tuottamaa toimitusvarmuutta voitaisiin ilmaista esimerkiksi tietyllä välillä liukuvasti muuttuvalla värillä. Näin pisteistä voisi valita eri tavoitteiden mukaisen ohjelman.



Kuva 6.1. *1-ulotteinen havainnekuva optimointituloksista*

Kuva 6.1 havainnollistaa esimerkinomaisesti mahdollisen optimoinnin tuloksia 1-ulotteisessa kuvaajassa. Käytetyt pisteet ovat esimerkkiä varten muodostettuja. Pystyakselilla on vain optimoinnin ratkaisun pisteytys, esimerkiksi kokonaiskustannukset. Perinteisesti optimoinnissa valitaan pisteytyksen kannalta paras ratkaisu, eli kuvassa 6.1 oleva keltainen piste. Havainnekuva esitetyn mukaisen järjestelmän tuloksenvalintakäyttöliittymästä on esitetty kuvassa 6.2. Siinä on esitetty samat pisteet, kuin kuvassa 6.1, mutta vaaka-akselin yksikkönä on ajo-ohjelmalle simulaatiossa muodostettava OEE suhteutettuna otannan OEE:n mediaaniin. Kuvissa 6.1 ja 6.2 samat kaksi pistettä on merkattu vihreällä ja keltaisella. Nyt kuvasta 6.2 nähdään, että pienellä joustolla kustannuksissa saavutetaan huomattavasti parempi ajo-ohjelma tuotantotehokkuuden kannalta. OEE:n kannalta parempi ajo-ohjelma (vihreä piste kuvissa 6.1 ja 6.2) sisältää todennäköisesti yksinkertaisempia tuotteenvaihtoja, mikä parantaa lisäksi ohjelman suorituksen ennakoi-



Kuva 6.2. *2-ulotteinen havainnekuva optimointituloksista*

tavuutta. Parempi OEE voi siis välillisesti tuottaa hyötyjä optimoinnin tarkastelulaajuuden ulkopuolella. Paremman OEE:n ohjelma voi myös parantaa turvallisuutta. Vaihtotilanteissa täytyy toimia esimerkiksi koneiden sisällä vaihdon suorittamiseksi, jolloin suurempien vaihtojen kohtuullinen välttäminen on perusteltua. Lisäksi jos pisteen väri kuvaisi tässä OTIFia, olisi vihreä piste keltaista laadukkaampi OTIFinkin kannalta.

Optimoinnin tulokset voitaisiin esittää suunnittelijalle kuvan 6.2 mukaisessa näkymässä. Tämä vastaa esimerkiksi kuvassa 5.12 esitettyjä optimoinnin tuloksia. Pistettä klikkaamalla voitaisiin tuoda esiin esimerkiksi ajo-ohjelman tuottama päivittäinen tuotantolinjan varastotilanne tai ajo-ohjelma. Tämä onnistuisi käyttöliittymäkehityksen jälkeen myös työssä kehitetyllä mallilla, mikä tukee sen toteuttamiskelpoisuutta. Kaikille ratkaisuille lasketaan simulaation avulla dataa niin tuotannon kuin varastonkin suoriutumisesta. Kirjallisuuskatsauksessa ei ilmennyt vastaavaa esitystapaa tuloksille. Perinteinen algoritmi saattaisi tarjota yksinkertaisesti sen tuottamaa kustannusten kannalta parasta ajo-ohjelmaa. Tuotantotehokkuuden kannalta nämä saattavat huomaamatta erota toisistaan merkittävästi. Ohjelmalle lasketun OEE:n ja visuaalisen ratkaisuesityksen perusteella voidaan arvioida ohjelman kokonaisvaikutuksia. Kuten edeltävässä kappaleessa mainittiin, tähän voisi sisällyttää myös arvion OTIFista.

Muun muassa SAP on kehittänyt SAP Optimizer -ohjelmatoiminnon, joka kehittää matemaattisten mallien sekä SAPissa tarjolla olevan datan avulla ajo-ohjelmia, tavoitevarastotasoja ja jakelureittejä. Toiminnon käyttöönottaminen edellyttää luonnollisesti järjestelmän tarkkaa parametrisointia ja masterdatan ajantasaisuutta. Masterdatan ajantasaisuuden merkitys nousi esille myös nykytila-analyysissä ja kirjallisuuskatsauksessa. SAP ei tosin itsessään mahdollista simulointia OEE:n laskentaa varten. Simuloinnin ja SAPin rajapintoja ei tutkimuksen ajan puitteissa ehditty tutkia.

Tuotannonsuunnittelun tukemiseksi ehdotetaan siis kehitettävän edellä kuvatun mukainen optimointialgoritmiin ja ajo-ohjelmien simulointiin perustuva päätöksenteon tukityö-

kalu. Simulointimallista voisi olla sen toteutustavan mukaan hyötyä myös varsinaisen ajo-ohjelman muodostamisen ulkopuolisissa sovelluksissa.

6.4 Tutkimuksen rajoitteet ja kehityskohteet

Optimoinnin suorittamat simulointiajot vaativat kohtalaisen paljon laskentatehoa ottaen huomioon suuret toistomäärät optimointia tehtäessä. Simulointimallin toimintoja pystyisi todennäköisesti optimoimaan siten, että suoritusnopeus kasvaa. Simulointiajon aikavaativuuden asymptoottinen yläraja on tällä hetkellä likimäärin lineaarinen. Kertaluokan parantaminen lineaarisesta voi tapahtumapohjaisen simuloinnin kohdalla olla haastavaa, koska simuloitavien tapahtumien määrä riippuu luonnollisesti mallin tuottamien tuotteiden määrästä. Laskentatehoa saisi kuitenkin lisättyä huomattavasti käytettyyn järjestelmään verrattuna. Laskentaan voisi käyttää rinnakkaiseen laskentaan tarkoitettuja prosessoreita, ja näistä koostuvia rinnakkaisia tietokoneita. Tämä mahdollistaisi nopeammat optimointiajot, minkä avulla eri kokeita ja skenaarioita saisi suoritettua merkittävästi enemmän parempien ja monipuolisempien tulosten saavuttamiseksi. Työssä käytetyn suorittimen 6 ytimen sijaan voitaisiin käyttää esimerkiksi useita 64-ytimisiä prosessoreita rinnakkain, mikä mahdollistaisi vähintään monikymmenkertaiset suoritusnopeudet.

Simulaatiomalli ei nykyisellään ota kantaa jalostuslinjan raaka-aineiden eräkokoihin. Tämä on kuitenkin oleellinen osa koko ketjua suunnitellessa. Paperikoneen ajo-ohjelman, sekä muiden materiaalien hankinnan sisällyttäminen malliin mahdollistaisi myös raaka-aine-eräkokojen huomioinnin kustannusten ja tehokkuuksien määrittämisessä. Raaka-ainetoimituksissa on myös viive, jonka malli voisi huomioida.

Epävarmuustekijöiden, kuten linjan vikaantumisten ja kysynnän heilahtelun sisällyttäminen malliin lisäisi myös tulosten todenmukaisuutta. Tätä varten olisi tarvittu lisää laskentatehoa. Stokastista mallia arvioitaessa arviointi täytyy perustaa useamman suorituksen keskiarvoisiin tuloksiin. Tämä edellyttää useampaa simulaatioajoa yhtä tutkittavaa ajo-ohjelmaa kohden. Toisaalta näiden jättäminen vakiomuuttujaksi kaventaa optimoinnin keskittymisen suunnitteluun. Linjan vikaantumiset eivät lähtökohtaisesti ole ajojärjestyksestä riippuvia.

Simulointimallien sisäistä dynamiikkaa voisi mallintaa tarkemmin parempien tulosten saavuttamiseksi. Tämä liittyy oleellisesti edellä mainittujen epävarmuustekijöiden mallintamiseen. Vaikka vikaantumisia ei mallinnettaisi, pitäisi kunkin osakomponentin keskimääräinen käyttäytyminen mallintaa tarkemmin mallin tarkkuuden parantamiseksi. Tällä hetkellä mallin nopeutta rajoittaa pääosin linjan loppupäässä olevan linjan osalla luotu pullonkaula. Todellisuudessa linjalla tapahtuvat tehokkuushäviöt jakautuvat tasaisemmin koko linjalle.

Optimointimalli ei myöskään ota tällä hetkellä huomioon tuotevaraston kapasiteettia. Optimointia tehtiin pääosin sellaisilla eräkoilla ja kysynnöillä, ettei varaston kapasiteetti tullut

käytännössä vastaan. Varaston kehitystä ja keskiarvoista kokonaissaldoa voitiin tarkkailla optimointitulosten osalta. Linjojen toimiessa kapasiteettiensa rajoilla, maksimikapasiteetti tulisi kuitenkin huomioida mallissa.

Optimointia varten mallinnettavan pohjavaraston muodostaminen vaikuttaa hyvin oleellisesti tuloksiin. Pohjavarasto on myös seurausta edeltävästä ajo-ohjelmasta ja sen laatimiseen käytetystä filosofiasta. Tämän mallintaminen on haastavaa. Nykyisellään käytetty tasajakautuneeseen todennäköisyysfunktioon perustunut menetelmä vaatisi toistoja useilla eri pohjavarastoilla, jotta suunnittelufilosofiasta ja eräkoon vaikutuksesta saataisiin luotettavaa tilastollista dataa. Optimoinnin käyttämä aika ei mahdollistanut tämän kaltaista analyysiä. Tulevaisuuden alkuvarastotilanteen voisi mahdollisesti generoida tunnetun tulevan ajo-ohjelman ja kysyntäennusteen perusteella.

Kysynnän pohjalta laadittavissa eräkoissa käytetään kaikille tuotteille samaa logiikkaa. Todellisuudessa joillakin tuotteilla kannattaisi käyttää muista poikkeavia sääntöjä eräkokojen määrittämiseen. Tämä on helposti toteutettavissa käytössä olleeseenkin algoritmiin, mutta aikataulu ei sallinut sen vaatimaa lisätestaamista. Tämä lisäisi mallin muuttujia oleellisesti. Vakituisessa käytössä eräkoot tuntiessa tämä ei olisi todennäköisesti ongelma.

Optimointimallin operatiivista käyttöarvoa lisäisi myös huomattavasti se, että sillä voitaisiin tehdä juoksevan horisontin suunnittelua. Se voisi muokata olemassa olevia ajoja ennalta annettujen parametrien mukaisesti, tekemättä kuitenkaan liian radikaaleja muutoksia esimerkiksi paperikoneen ajo-ohjelmaa huomioiden.

Operatiivista käyttöä varten kustannukset pitäisi perustaa todellisiin toiminnasta aiheutuviin kustannuksiin. Nyt mallin kustannukset pohjautuivat vuoden ajalta keskiarvoistettuihin kustannuksiin. Varaston mallintaminen ei ole näin yksinkertaista, tai sidoksissa varastoitavien tuotteiden määrään. Tätä kuitenkin kompensoi se, ettei mallin kustannuslaskennassa otettu huomioon varastoon sitoutuneen pääoman tai keskeneräisen tuotannon kustannuksia. Myös tuotantolinjojen suunnitteluun sidonnaiset kustannukset pitäisi mallintaa todellisiin kustannuksiin perustuen. Tämä monimutkaistaa mallia, mutta työssä suoritetun optimoinnin perusteella algoritmi selviytyy vaativastakin optimointitehtävästä.

Tutkimuksessa haastateltujen henkilöiden otanta olisi voinut olla suurempi eri ryhmien sisällä. Lisäksi logistiikan ja varastoinnin puolelle olisi voinut teettää teema-haastattelun vapaampien keskustelujen lisäksi. Tällä olisi saanut selvitettyä varaston näkökantaa varaston käytön ja eräkokojen välisiin haasteisiin. Myös simulointimallin toimintaa olisi saanut syvennettyä varaston osalta.

7. YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia paperitehtaan kahden jalostuslinjan ajo-ohjelmien ja niistä aiheutuvien kokonaiskustannusten, sekä tiettyjen KPI-lukujen suhteita. Tarkasteltavat KPI-luvut olivat tuotantotehokkuutta kuvaava OEE, toimitusvarmuutta ja palvelutasoa kuvaava OTIF ja tuotevaraston varastotasot. Työssä pyrittiin muodostamaan geneettistä algoritmia ja simulointia hyödyntäen ajomalli, jossa kokonaiskustannukset ovat optimoituja KPI-luvut huomioiden. Ajomallilla tarkoitetaan tässä yhteydessä kokonaisuutta, joka käsittää ajojen, eli tuotantotilausten järjestyksen, käytettävät eräkoot minimissään ja suhteessa kysyntään sekä ajojen jakautumisen linjoille ja niiden osakomponenteille. Myös käyttöasteen muutokset olivat osana optimointia.

Työssä toteutettiin yksityiskohtainen tuotantoa ja varastoa kuvaava tapahtumapohjainen simulointimalli, jolla erilaisia ajo-ohjelmia saatiin vertailtua. Kyseistä mallia käytettiin myös osana optimointialgoritmin toimintaa. Tutkimuskysymyksenä 1. oli: ”Mikä on kustannusten kannalta tehokkain ajomalli jalostuskoneelle, ja mitkä ovat KPI-lukujen (OEE, OTIF, varastot) arvot tässä mallissa?” Kysymystä tutkittiin edellä mainitulla simulointioptimointimallilla. Kustannuksiltaan optimaalisimpien ajo-ohjelmien KPI-lukuja tarkasteltiin simuloinnin avulla. Tutkimuksessa selvisi, että tuotantotehokkuuden vähempi priorisointi tuotti mallilla matalampia kustannuksia varastotasojen laskemisen ja toimitusvarmuuden parantumisen kautta. Myös OEE:n ja kokonaiskustannusten osalta toteutuneita parempia ajo-ohjelmia saatiin muodostettua. Kysymykseen ei saatu käytetyllä tarkastelutasolla kuitenkaan yleistettävää vastausta. Tietyt tuotannonsuunnittelun eräkokosäännöt toimivat tietyissä skenaarioissa. Skenaarioissa oli niin paljon muuttujia, että intensiivinen testaaminen oli haastavaa.

Toinen kysymys koski edellä mainittujen KPI-lukujen kehittymistä suhteessa toisiinsa eri skenaarioissa. Tätä saatiin tutkittua hyvin kattavalla optimoinnilla, joka tuotti satoja tuhansia datapisteitä eri eräkoilla. Tuloksia esitettiin kuvaajissa, joissa voitiin tarkkailla esimerkiksi kokonaiskustannusten ja OEE:n välisiä suhteita.

Viimeisen tutkimuskysymyksen mukaisesti pyrittiin selvittämään minkälaisia työkaluja ajomallin toteuttamiseen ja noudattamiseen tarvitaan ja soveltuvatko tuotannonsuunnittelussa nykyisin käytössä olevat järjestelmät tähän tarkoitukseen. Tätä varten järjestettiin haastatteluja henkilöstölle ja havainnointia käytettyihin järjestelmiin. Tutkimuksen toteut-

taja on lisäksi seurannut yrityksen toimintatapoja useissa eri työtehtävissä neljän vuoden aikana. Eri skenaarioiden mahdollisten tuotantotehokkuuksien vertailu tällä tasolla ei ole ollut aiemmin mahdollista. Tuotantotehokkuus pyritään kuitenkin ottamaan suunnittelua tehdessä huomioon, ja työssä muodostetun simulointimallin kaltaisella ratkaisulla eri ajo-ohjelmia voisi vertailla keskenään. Mallin yhteyteen toteutetulla optimointialgoritmilla voitiin myös painottaa tiettyjä piirteitä, kuten tuotantotehokkuutta sen luomissa ratkaisuissa. Näin algoritmin avulla pystytään optimoimaan tuotantoa niin toimitusketjun kuin tuotannon tavoitteita huomioiden. Luvussa 6 esitetään ehdotus simulointiin ja optimointialgoritmiin pohjautuvasta tuotannonsuunnittelun päätöksentekotyökalusta.

Tutkimuskysymys	Tutkimusmenetelmät	Tulokset	Toimenpide-ehdotukset
Mikä on kustannusten kannalta tehokkain ajomalli jalostuskoneille, ja mitkä ovat KPI-lukujen arvot tässä mallissa?	• Geneettiseen algoritmiin pohjautuva simulointi-optimointimalli • Data-analyysi • Haastattelut	Kustannusten kannalta optimaalinen malli riippuu vallitsevasta kysyntä- ja varastotilanteesta. Ajoerien pienentäminen ja nykyisten suunnittelua määrittävien pääsääntöjen löysääminen tuotti useassa skenaariossa nykyistä paremmat tulokset. Kokonaiskustannuksia ja OEE:ta saatiin parannettua algoritmin avulla.	Ajoerien pienentäminen tasaisella kysynnällä. Yleistettäviä nykyistä tarkempia periaatteita ei saada muuttuvissa skenaariossa muodostettua. Tätä varten tarvitaan tilannekohtaista algoritmiavusteista tuotannonsuunnittelun optimointia.
Miten KPI-luvut kehittyvät suhteessa toisiinsa eri skenaarioissa?	• Tapahtumapohjainen simulointimalli • Haastattelut	OEE:n kannalta parhaat tulokset tuottavat pääsääntöisesti tarpeettoman suuren varaston. OTIF tulee pyrkiä maksimoimaan kustannusten ja asiakastyytyväisyyden parantamiseksi.	OTIF:n priorisointi suunnittelussa. Varastotasojen tarkastelu, ja mahdollinen pienentäminen nykytilasta
Miten käytännössä ajomallia hallitaan? Millaisille lisämittareille tai työkaluille on tarve?	• Haastattelut • Data-analyysi • Havainnointi • Geneettiseen algoritmiin pohjautuva simulointi-optimointimalli	Ajomallia tulisi muuttaa tilauskannan mukaan kustannusten optimoimiseksi. Kehitetyllä optimoinitalgoritmilla saavutettiin käytettyjen mittareiden perusteella optimaalisempia ajo-ohjelmia toteutuneisiin verrattuna. Suunnittelussa ei pystytä vertaamaan tai arvioimaan eri ratkaisujen vaikutuksia OEE:hen tarkasti. Varaston kehityksen arviointi on haastavaa, ja siihen voi sitoutua tarpeettoman paljon pääomaa. Varastotilanteen ennakointi on tarpeettoman haastavaa vaihtelevalla kysynnällä.	Suunnittelun tueksi tulisi hankkia simulointia hyödyntävä optimointiohjelmisto, joka kehittää eri osa-alueita huomioiden optimaalisen ajo-ohjelman. Varaston näkyvyyttä tuotannonsuunnittelulle tulisi parantaa sopivalla dashboardilla tai tulevaisuuden kehityksen näyttävällä järjestelmänäkymällä.

Kuva 7.1. *Yhteenveto tärkeimmistä havainnoista*

Tutkimuksen keskeisimmät havainnot on esitelty taulukossa 7.1. Erityisen huomionarvoista on, että optimointialgoritmin avulla saavutettiin simulointimallilla arvioiden matalampia kokonaiskustannuksia kuin toteutuneilla ajo-ohjelmilla. Työssä toteutetun simulointi-

optimointimallin suoriutumisen perusteella suositellaan vastaavan moniulotteisen simulointia hyödyntävän optimointimallin hankintaa.

Tutkimuksen tuloksia rajoittavat simulaatiomallin tarkkuus, sekä simulointiin käytetty laskentateho. Laskentatehoa lisäämällä simuloinnin tuloksia olisi saatu laajennettua useampiin skenaarioihin. Myös yksittäistä skenaariota olisi voinut optimoida intensiivisemmin saaden laadukkaampia tuloksia. Simulaatiomallin kustannusrakenne muodostui suuntaa antavista keskimääräisistä toimintojen osakustannuksista. Operatiivista käyttöä varten kustannukset tulisi mallintaa todenmukaisemmin. Keskeneräisen tuotannon ja varastoon sitoutuneen pääoman vaikutusta ei otettu huomioon. Tämä olisi tosin saattanut ajaa optimoinnin ratkaisuja saatujakin tuloksia enemmän matalamman varastotason suuntaan. Simulaatiomallissa ei voitu myöskään ottaa rajauksen puitteissa kaikkia suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä huomioon. Näitä ovat muun muassa jalostuslinjoja edeltävät tuotannon vaiheet ja välivarastot.

Työssä esitetään uusi moniulotteinen tuotannonsuunnittelun päätöksentekoa tukeva optimointimalli. Luvussa 6 esitellyn mallin avulla optimoinnin ratkaisuja voidaan tarkastella visuaalisesti monesta eri näkökulmasta huomioimalla sekä kannattavuutta että tuotantotehokkuutta ja toimitusvarmuutta visuaalisesti. Vastaavaa esitystapaa ratkaisuille ei ilmennyt kirjallisuuskatsauksessa. Perinteisten algoritmien tuottamia tuloksia ei havaittu voitavan tarkastella tuotantotehon kannalta. Päätös käytettävästä ohjelmasta voidaan tehdä siis useamman oleellisen mittarin perusteella. Esitetyn mallin avulla voidaan saavuttaa kokonaisuuden kannalta parempia ajo-ohjelmia monimutkaisissa skenaarioissa. Työssä malli tuotti simuloinnilla arvioitaessa monella eri mittarilla kilpailukykyisiä ajo-ohjelmia.

LÄHTEET

Absi, N., Kedad-Sidhoum, S. ja Dauzère-Pérès, S. (2011). ”Uncapacitated lot-sizing problem with production time windows, early productions, backlogs and lost sales”. eng. *International journal of production research* 49.9, s. 2551–2566.

Andersson, C. ja Bellgran, M. (2015). ”On the complexity of using performance measures: Enhancing sustained production improvement capability by combining OEE and productivity”. *Journal of Manufacturing Systems* 35, s. 144–154. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.12.003.

Bahl, H. C., Ritzman, L. P. ja Gupta, J. N. (1987). ”DETERMINING LOT SIZES AND RESOURCE REQUIREMENTS: A REVIEW.” *Operations Research* 35.3, s. 329–345. DOI: 10.1287/opre.35.3.329.

Barratt, M. (2004). ”Understanding the meaning of collaboration in the supply chain”. English. *Supply Chain Management* 9.1, s. 30–42.

Beck, F. G. ja Glock, C. H. (2020). ”The economic lot scheduling problem: a content analysis”. eng. *International journal of production research* 58.11, s. 3437–3454.

Chatfield, D. C. (2007). ”The economic lot scheduling problem: A pure genetic search approach”. eng. *Computers & operations research* 34.10, s. 2865–2881.

Copil, K., Wörbelauer, M., Meyr, H. ja Tempelmeier, H. (2017). ”Simultaneous lotsizing and scheduling problems: a classification and review of models”. *OR Spectrum* 39.1, s. 1–64. DOI: 10.1007/s00291-015-0429-4.

Dolgui, A., Eremeev, A. V., Kovalyov, M. Y. ja Kuznetsov, P. M. (2010). ”Multi-product lot sizing and scheduling on unrelated parallel machines”. *IIE Transactions* 42.7, s. 514–524. DOI: 10.1080/07408170903542649. eprint: https://doi.org/10.1080/07408170903542649.

Dolgui, A., Ivanov, D., Sethi, S. P. ja Sokolov, B. (2019). ”Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control: fundamentals, state-of-the-art and applications”. eng. *International journal of production research* 57.2, s. 411–432.

Ellinger, A. E. (2000). ”Improving Marketing/Logistics Cross-Functional Collaboration in the Supply Chain”. *Industrial Marketing Management* 29.1, s. 85–96. DOI: https://doi.org/10.1016/S0019-8501(99)00114-5.

Fuchigami, H. Y. ja Rangel, S. (2018). ”A survey of case studies in production scheduling: Analysis and perspectives”. *Journal of Computational Science* 25, s. 425–436. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.06.004.

Ghosh Dastidar, S. ja Nagi, R. (2005). ”Scheduling injection molding operations with multiple resource constraints and sequence dependent setup times and costs”. *Computers*

& Operations Research 32.11, s. 2987–3005. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.04.012.

Glock, C. H., Grosse, E. H. ja Ries, J. M. (2014). ”The lot sizing problem: A tertiary study”. *International Journal of Production Economics* 155, s. 39–51. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.009.

Harjunkoski, I., Maravelias, C. T., Bongers, P., Castro, P. M., Engell, S., Grossmann, I. E., Hooker, J., Méndez, C., Sand, G. ja Wassick, J. (2014). ”Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods”. *Computers & Chemical Engineering* 62, s. 161–193. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.12.001.

Hilletofth, P. (2009). ”How to develop a differentiated supply chain strategy”. eng. *Industrial management + data systems* 109.1, s. 16–33.

Huang, J. ja Süer, G. A. (2015). ”A dispatching rule-based genetic algorithm for multi-objective job shop scheduling using fuzzy satisfaction levels”. eng. *Computers & industrial engineering* 86, s. 29–42.

Hyvärinen, M., Suoninen, E. ja Vuori, J. (n.d.). *Haastattelut*. Teoksessa Jaana Vuori (toim.) Laadullisen tutkimuksen verkkokäsikirja. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/laadullisen-tutkimuksen-aineistot/haastattelut/ [Viitattu 26.11.2023].

Istokovic, D., Perinic, M., Vlatkovic, M. ja Brezocnik, M. (2020). ”Minimizing Total Production Cost in a Hybrid Flow Shop: a Simulation-Optimization Approach”. eng. *International journal of simulation modelling* 19.4, s. 559–570.

Jonsson, P. ja Ivert, L. (2015). ”Improving performance with sophisticated master production scheduling”. *International Journal of Production Economics* 168, s. 118–130. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.06.012.

Juhila, K. (n.d.). *Laadullisen tutkimuksen ominaispiirteet*. Teoksessa Jaana Vuori (toim.) Laadullisen tutkimuksen verkkokäsikirja. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/mita-on-laadullinen-tutkimus/laadullisen-tutkimuksen-ominaispiirteet/#Analyysivetoisuus [Viitattu 26.11.2023].

Khouja, M., Michalewicz, Z. ja Wilmot, M. (1998). ”The use of genetic algorithms to solve the economic lot size scheduling problem”. eng. *European journal of operational research* 110.3, s. 509–524.

Kim, H., Jeong, H.-I. ja Park, J. (joulukuu 2008). ”Integrated model for production planning and scheduling in a supply chain using benchmarked genetic algorithm”. English. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 39.11-12, s. 1207–1226.

Kristensen, J. ja Jonsson, P. (2018). ”Context-based sales and operations planning (S&OP) research: A literature review and future agenda”. eng. *International journal of physical distribution & logistics management* 48.1, s. 19–46.

Kumar, S. V., Mani, V. ja Devraj, N. (2014). ”Production Planning and Process Improvement in an Impeller Manufacturing Using Scheduling and OEE Techniques”. *Procedia Materials Science* 5, s. 1710–1715. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.360.

Löhndorf, N., Riel, M. ja Minner, S. (2014). ”Simulation optimization for the stochastic economic lot scheduling problem with sequence-dependent setup times”. *International Journal of Production Economics* 157, s. 170–176. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.05.006.

Maravelias, C. T. ja Sung, C. (2009). ”Integration of production planning and scheduling: Overview, challenges and opportunities”. *Computers & Chemical Engineering* 33.12, s. 1919–1930. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.06.007.

Martin, C., Peck, H. ja Towill, D. (2006). ”A taxonomy for selecting global supply chain strategies”. English. *International Journal of Logistics Management* 17.2, s. 277–287.

Missbauer, H. ja Uzsoy, R. (2022). ”Order release in production planning and control systems: challenges and opportunities”. *International Journal of Production Research* 60.1, s. 256–276. DOI: 10.1080/00207543.2021.1994165.

Muchiri, P. ja Pintelon, L. (2008). ”Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion”. eng. *International journal of production research* 46.13, s. 3517–3535.

Narayanan, A. ja Ishfaq, R. (2022). ”Impact of metric-alignment on supply chain performance: a behavioral study”. *International Journal of Logistics Management* 33.1, s. 365–384. DOI: 10.1108/IJLM-01-2021-0061.

NASA (n.d.). *Cosmic History*. https://science.nasa.gov/universe/overview/ [Viitattu 28.3.2024].

Nobil, A. H., Sedigh, A. H. A. ja Cárdenas-Barrón, L. E. (2016). ”A multi-machine multi-product EPQ problem for an imperfect manufacturing system considering utilization and allocation decisions”. *Expert Systems with Applications* 56, s. 310–319. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.03.015.

Olhager, J. ja Selldin, E. (2007). ”Manufacturing planning and control approaches: market alignment and performance”. eng. *International journal of production research* 45.6, s. 1469–1484.

Oliva, R. ja Watson, N. (2011). ”Cross-functional alignment in supply chain planning: A case study of sales and operations planning”. eng. *Journal of operations management* 29.5, s. 434–448.

Qian, R., Wu, Y., Duan, X., Kong, G. ja Long, H. (2018). ”SVM multi-classification optimization research based on multi-chromosome genetic algorithm”. eng. *International Journal of Performability Engineering* 14.4, s. 631–638.

Rahman, H. F., Sarker, R. ja Essam, D. (2015). ”A genetic algorithm for permutation flow shop scheduling under make to stock production system”. *Computers & Industrial Engineering* 90, s. 12–24. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.08.006.

Raza, A. S. ja Akgunduz, A. (2008). ”A comparative study of heuristic algorithms on Economic Lot Scheduling Problem”. eng. *Computers & industrial engineering* 55.1, s. 94–109.

Ruusuvuori, J., Tiittula, L., Aaltonen, T., Alastalo, M., Rastas, A., Tienari, J., Vaara, E., Meriläinen, S., Lumme-Sandt, K., Alasuutari, M., Hyvärinen, M. K., Löyttyniemi, V., Valtonen, A. ja Nuolijärvi, P. (2005). *Haastattelu : tutkimus, tilanteet ja vuorovaikutus*. fin. Tampere: Vastapaino.

Sahin, F., Powell Robinson, E. ja Gao, L.-L. (2008). ”Master production scheduling policy and rolling schedules in a two-stage make-to-order supply chain”. *International Journal of Production Economics* 115.2, s. 528–541. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.05.019.

Santander-Mercado, A. ja Jubiz-Diaz, M. (2016). ”The economic lot scheduling problem: a survey”. eng. *International Journal of Production Research* 54.16, s. 4973–4992.

Shah, N. (2005). ”Process industry supply chains: Advances and challenges”. *Computers & Chemical Engineering* 29.6, s. 1225–1235. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2005.02.023.

Sridharan, S. V., Berry, W. L. ja Udayabhanu, V. (WinterWinter 1988). ”Measuring Master Production Schedule Stability Under Rolling Planning Horizons”. English. *Decision Sciences* 19.1, s. 147.

Sridharan, V. ja Berry, W. L. (1990). ”Master production scheduling make-to-stock products: a framework for analysis”. eng. *International journal of production research* 28.3, s. 541–558.

Stadtler, H. (2005). ”Supply chain management and advanced planning—basics, overview and challenges”. *European Journal of Operational Research* 163.3, s. 575–588. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.03.001.

Sun, H., Huang, H.-C. ja Jaruphongsa, W. (2009). ”A genetic algorithm for the economic lot scheduling problem under the extended basic period and power-of-two policy”. eng. *CIRP journal of manufacturing science and technology* 2.1, s. 29–34.

Vogel, T., Almada-lobo, B. ja Almeder, C. (tammikuu 2017). ”Integrated versus hierarchical approach to aggregate production planning and master production scheduling”. English. *OR Spectrum* 39.1, s. 193–229.

Vuori, J. (n.d.). *Tapaustutkimus*. Teoksessa Jaana Vuori (toim.) Laadullisen tutkimuksen verkkokäsikirja. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/tutkimusasetelma/tapaustutkimus/ [Viitattu 26.11.2023].

Wacker, J. G. ja Sheu, C. (2006). ”Effectiveness of manufacturing planning and control systems on manufacturing competitiveness: evidence from global manufacturing data”. eng. *International journal of production research* 44.5, s. 1015–1036.