



TUOTANNOHJAUKSEN EPÄVARMUUS JA TUOTANNOHJAUSJÄRJESTELMÄN VAATIMUSMÄÄRITTELY KOKOONPANOOTEOLLISUUTEEN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Tuotantotalouden diplomityö

2023

Aatu Olkkonen

Tarkastajat: Dosentti Kalle Elfvingren

Dosentti Lasse Metso

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Teknis-luonnontieteellinen

Tuotantotalous

Aatu Olkkonen

Tuotannonohjauksen epävarmuus ja tuotannonohjausjärjestelmän vaatimusmäärittely kokoonpanoteollisuuteen

Tuotantotalouden diplomityö

2023

61 sivua, 11 kuvaa, 10 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Dosentti Kalle Elfvengren ja Dosentti Lasse Metso.

Avainsanat: Tuotannonohjaus, tuotannonohjausjärjestelmä, vaatimusmäärittely, kokoonpanolinja

Viimeaikaiset globaalit ongelmat toimitusketjuissa ovat vaikeuttaneet yritysten toimintaa. Tuotannonohjauksesta on tullut vaikeampaa huonontuneen materiaalisatavuuden ja lisääntyneiden sairaspöissaolojen takia. Tämän työn tavoitteena on tunnistaa tekijät, jotka lisäävät tuotannonohjauksen epävarmuutta, tuottaa vaatimusmäärittely kohdeyrityksen kokoonpanolinjan tuotannonohjausjärjestelmälle ja tunnistaa miten tekoälyä tai data-analytiikkaa voidaan hyödyntää kohdeyrityksen tuotannonohjauksessa.

Tietoa kohdeyrityksen tuotannonohjauksen nykytilasta ja järjestelmän käyttäjävaatimukset kerättiin puolistrukturoitujen ryhmähaastattelujen avulla. Vaatimusten pohjalta luotiin käytötapaukset, jotka kuvaavat järjestelmän toiminnallisuuksia ja käyttöä. Työn osana rakennettiin koneoppimismalli, joka ennusti valmistustilausten työvaiheiden läpimenoaikaa. Malli todisti, että yrityksen datan pohjalle on mahdollista rakentaa tekoälymalleja. Lisäksi tutkittiin, miten kuljetusyhtiön tarjoamaa terminaalikirjausdataa voidaan hyödyntää rahdin seurannassa. Työssä rakennettu rahtiseurantaraportti mahdollistaa kuljetuksessa olevien toimistusten saapumisajan arvioimisen historiadatan pohjalta. Saapumisaika-arvio tehostaa tuotannonohjausta, koska komponenttipuutteen sattuessa aika-arviota voidaan hyödyntää tuotannonohjauksessa.

Tuotannonohjausjärjestelmälle oleellisinta on ajankohtainen tieto tuotannontekijöiden tilasta. Tällä hetkellä tuotannonohjauksen suurin epävarmuustekijä ovat komponenttipuutteet ja huono näkyvyys komponenttien saatavuudesta. Tekoälyä ja data-analytiikkaa voidaan hyödyntää tuotannonohjauksen epävarmuuden vähentämisessä esimerkiksi ennustamalla komponenttien saapumista, tunnistamalla etukäteen poikkeamat tuotannossa tai optimoimalla henkilöstön ohjaamista heidän osaamisensa perusteella.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Engineering Science

Industrial Engineering and Management

Aatu Olkkonen

Uncertainty in production control and production control system requirements specification for the assembly industry

Master's thesis

2023

61 pages, 11 figures, 10 tables and 2 appendices

Examiners: Associate professor Kalle Elfvengren and docent Lasse Metso.

Keywords: Production control, production control system, requirements engineering, assembly line

Recent global supply chain problems have posed issues for companies' operations. Production control has become more difficult due to impaired material availability and increased number of sick leaves. The objective of this work is to identify factors that increase the uncertainty in production control, to produce a requirements specification for a target company's assembly line's production control system, and to identify how AI or data analytics can be used in the target company's production control.

Information on the current state of the target company's production control and the user requirements of the system were collected through semi-structured group interviews. Based on the requirements, use cases were created to describe the functionalities and use of the system. As part of the work, a machine learning model was built to predict the lead time of manufacturing operations. The model proved that it is possible to build AI models based on company data. In addition, we investigated how terminal logging data provided by a transport company can be used for freight tracking. The freight tracking report built in this work makes it possible to estimate the arrival time of shipments in transit based on historical data. In case of component shortages, the time estimation can be used for production control.

For a production control system, the most important thing is to have up-to-date information on the status of production factors. At present, the main uncertainties in production control are component shortages and poor visibility of component availability. Artificial intelligence and data analytics can be used to reduce uncertainty in production control, for example by predicting the arrival of components, identifying in advance any deviations in production or optimizing the management of personnel based on their skills.

ALKUSANAT

Näitä alkusanoja kirjoittaessani diplomityöni, ja siten opiskeluni alkaa olla loppusuoralla. Tähän työhön kulminoituu liki viiden vuoden opiskelutaival LUT yliopistossa. Tuona aikana olen tutustunut uusiin ihmisiin ja oppinut järjettömän määrän uutta. Omalla tavallaan diplomityöprosessi on ollut kuin tuo opiskeluaika pienoiskoossa. Työn tekeminen yritykseen on pakottanut oppimaan paljon uusia asioita ja tutustuttanut minut uusiin ihmisiin yrityksessä. Diplomityöprojekti on ollut pitkäjaksoisin, pääasiassa itsenäinen projekti, jota olen tehnyt. Työn alussa lopputulosta oli vaikea hahmottaa, mutta olen oppinut sen, että prosessiin täytyy vain uskoa. Kyllä se maali saavutetaan, kunhan vain on suunnitelma, jonka eteen tehdään töitä.

Työ ei olisi onnistunut ilman yrityksen edustajien tukea. Työn mahdollisti ohjaajani ja pomonni Ari Toivanen, jota ilman koko työtä ja prosessia ei olisi mahdollisesti tapahtunut. Olen hänelle kiitollinen tästä mahdollisuudesta. Suuret kiitokset tiedoista ja vinkeistä kuuluu Erno Hiltuselle, jolta liikenä aina joustavasti aikaa, jos minulla oli kysyttävää. Lisäksi haluan kiittää Teemu Suomista ja Pasi Nevalaista, jotka tarjosivat tietoa ja vinkkejä erityisesti teknisestä näkökulmasta. Työssä haastateltuja hankinta- ja materiaaliimiä, sekä kokoonpanon työnjohtajia haluan kiittää yhteistyöstä ja työssä hyödynnettävistä tiedoista. Toivon, että työn tuloksista on yritykselle ja sen henkilöstölle hyötyä tulevaisuudessa!

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

1	Johdanto.....	8
1.1	Työn tausta.....	8
1.2	Työn tavoitteet ja rajaus.....	9
1.3	Tutkimuskysymykset ja -menetelmät.....	10
1.4	Työn rakenne.....	13
2	Vaatimusten määrittely.....	15
2.1	Vaatimusten muodostaminen.....	19
2.2	Vaatimusten analysointi, todentaminen ja validointi.....	19
2.3	Vaatimusten hallinta.....	20
3	Tuotannonohjaus.....	22
3.1	Tilauspiste ja tuotannonohjausmuodot.....	23
3.2	Tuotannonohjauksen linkittyminen tuotannosuunnittelun kokonaisuuteen.....	24
3.3	Tuotannonohjauksen toiminnot.....	27
3.3.1	Tuotannonajoitus.....	28
3.3.2	Materiaalinhallinta.....	30
3.3.3	Henkilöstön hallinta.....	30
3.4	Tuotannonohjausjärjestelmä.....	31
4	Toimitusketjun resilienssi.....	34
5	Tarkasteltavan case-yrityksen tuotantoympäristö ja tuotannonohjaus.....	37
5.1	Tuotantoympäristö.....	37
5.2	Tuotannonohjausprosessi.....	39
5.2.1	Tuotannonajoitus.....	39
5.2.2	Materiaalin varmistaminen.....	40
5.2.3	Henkilöstön hallinta.....	41
5.3	Tuotantoympäristön ja tuotannonohjauksen haasteet.....	42
6	Yrityksen tuotannonohjausjärjestelmän vaatimusmäärittely.....	44

6.1	Käyttjävaatimukset	44
6.1.1	Tuotantoputken järjestäminen ja ajoitus	44
6.1.2	Henkilöstöressurssien kuormitus ja hallinta.....	45
6.1.3	Materiaalin varmistaminen tuotannolle	47
6.2	Käyttömalli.....	48
6.2.1	Käyttjäryhmät.....	48
6.2.2	Käyttötapaukset	49
6.3	Järjestelmävaatimukset datalle.....	50
7	Kehityskohteet	54
7.1	Järjestelmän vaatimat muutokset ja kehityskohteet	54
7.2	Analytiikan ja koneoppimisen mahdollisuudet.....	55
7.2.1	Valmistustilauksen läpimenoajan ennustaminen	56
7.2.2	Rahtiseuranta	60
8	Johtopäätökset	64
9	Yhteenveto.....	68
	Lähteet	70

Liitteet

Liite 1. Käyttötapaukset

Liite 2. Haastattelukysymykset

1 Johdanto

Tuotannonohjaus on yksi valmistavan yrityksen tärkeimmistä toiminnoista (Frazzon, Kück ja Freitag 2018). Viime vuosien logistiset haasteet, komponenttipula ja poliittiset muutokset ovat vaikeuttanut tuotannonohjausta huomattavasti. Tämän diplomityön tarkoituksena on tuottaa vaatimusmäärittely puoliautomatisoidulle tuotannonohjausjärjestelmälle ja tunnistaa sellaisia kehityskohteita, joilla voidaan vähentää tuotannonohjauksen epävarmuutta. Työ tehdään globaaleilla markkinoilla toimivan metsäkoneita valmistavan yrityksen toimeksiantosta. Metsäkone on valmistettavana tuotteena hyvin monimutkainen, sen kokoonpano on monivaiheinen ja sisältää tuhansia eri komponentteja. Komponenttien määrä lisää tuotannonohjauksen haastavuutta, sillä jos yksikin komponentti loppuu, voi tuotanto pysähtyä. Yrityksen tuotantolaitos on vuosien saatossa kehittänyt toimintaansa monilla eri osa-alueilla ja tulevalle tuotannonohjausjärjestelmällä pyritään vakauttamaan tuotantoa, jotta sen kasvanutta tuotantokapasiteettia voidaan hyödyntää tehokkaasti ja mahdollisimman tasaisesti.

1.1 Työn tausta

Viime aikoihin asti on voitu olettaa, että resurssien saatavuus on jatkuvaa ja saatavuusongelmia esiintyy vain harvoin (Ivanov ja Dolgui 2022). Viime vuosina komponenttipuutteet ovat kuitenkin yleistyneet. Vaikeudet on todettu niin toimitusketjuihin liittyvässä kirjallisuudessa, kuin käytännössä kohdeyrityksen tehtaalla. Lopputuotteen tuotanto sijaitsee toimitusketjun loppupäässä, jolloin se on altis monille eri puutoksille. Ivanov ja Dolgui (2022) mukaan puutoksia voidaan nähdä melkein kaikissa tuotannon ja logistiikan resursseissa, kuten työvoimassa, materiaaleissa, energiassa ja pääomassa.

Puutteilla on ollut vaikutuksia yrityksen tuotannon toimivuuteen ja tuotanto on jouduttu jopa pysäyttämään kriittisen komponenttipuutteen vuoksi. Yrityksen tuotantolaitoksen tuotantoa on kehitetty viime vuosina huomattavasti ja sen tuotantolinjan tuotantokapasiteetti on kasvanut. Puutteet ovat kuitenkin haitanneet tuotantoa siinä määrin, että kasvanutta kapasiteettia ei olla pystytty hyödyntämään halutulla tavalla. Tuotannonohjauksen kehityksellä pyritään saamaan tuotantolinjan tuotantopotentiaali irti tasaisesti.

Komponenttipuutteet on hyvin tutkittu aihe toimitusketjun riskien ja resilienssin aihepiirissä. Vuosien 2021 ja 2022 komponenttipuutteet ovat olleet seurausta akuuteista Covid-19 pandemian aiheuttamista puutteista ja kroonisista pidemmän ajan ongelmista. (Ivanov ja Dolgui 2022; Queiroz, Ivanov, Dolgui ja Wamba 2020; Ivanov ja Dolgui 2021) Pandemia aiheutti epätasapainon kysynnän ja tarjonnan välille, kun kysyntä on palautunut pandemian aiheuttamasta shokista nopeammin kuin tarjonta (Rozhkov, Ivanov, Blackhurst ja Nair 2022). Kroonisia ongelmia ovat olleet puolijohdekomponenttipula, työvoiman alijäämä, brexit ja globaalin kaupan riskit. Vuoden 2021 alun konttikriisi nosti konttirahdin hintoja hetkellisesti jopa 1000 % verrattuna vuoden 2019 lopun hintoihin. Konttikriisi oli seurausta kaaoksesta globaalissa toimitusketjussa, energian hinnan noususta sekä kasvavasta inflaatiosta, joka johti paniikkiostoihin ja materiaalipuutteisiin. (Ivanov ja Dolgui 2022)

Uutena ongelmana globaaleille toimitusketjuille on tullut Venäjän hyökkäyssota Ukrainaan, joka alkoi vuoden 2022 helmikuussa. Sodalla on ollut suuri vaikutus erityisesti ruoan hintoihin ja toimituksiin, sillä Venäjä ja Ukraina kattavat yhdessä noin kolmanneksen maailman vehnän tuotannosta ja noin kolme neljänestä auringonkukkaöljyn tuotannosta (Stackpole 2022). Euroopan Unioni on asettanut talouspakotteita Venäjälle, Venäjä on estänyt rahdin lähtemisen Ukrainan satamista ja rahdin kulkeminen maiden läpi on joko estetty kokonaan tai rahdin toimittajat pyrkivät välttämään rahdin kuljettamisen Ukrainan ja Venäjän läpi. Ukraina ja Venäjä ovat läpikulkumaita monilla Aasiasta länteen suuntautuvilla rautateillä, joita pitkin iso osa rahdista on kulkenut. Rahteja on jouduttu uudelleenreitittämään pidempien reittien kautta, joka lisää kuljetusaikaa ja -kustannuksia. Lisäksi osa rahdista on siirretty kuljetettavaksi meriteitse, joka on lisännyt muiden Euroopan satamien ruuhkautumista. Huomattavaa on myös se, että 14,5 % globaalista laivoilla työskentelevistä työntekijöistä on Ukrainan tai Venäjän kansalaisia. (Cekerevac ja Bogavac 2023)

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Työn tavoitteena on määritellä tuotannonohjausjärjestelmä, joka hyödyntää yrityksessä olevaa dataa mahdollisimman tehokkaasti ja vähentää tuotannonohjauksen epävarmuutta uusien datalähteiden, järjestelmäkehityksen ja datan prosessoinnin avulla. Järjestelmän tarkoituksena on helpottaa nopeaa tuotannon uudelleen järjestelyä puutetilanteissa, auttaa työnjohtajia työntekijöiden ohjaamisessa ja vähentää yrityksen tuotannonohjaukseen liittyvää

manuaalista työtä. Järjestelmän vaatimusten määrittelyn lisäksi tavoitteena on kehittää ja testata tuotannonohjausta tukevia tekoälyä ja analytiikkaa hyödyntäviä malleja, jotka voidaan tulevaisuudessa implementoida osaksi järjestelmää. Työssä esitetään lisäksi kirjallisuudessa tunnistettuja tapoja, joilla voidaan varautua aikakauteen, jota ohjaa globaali komponenttipula ja haasteet globaaleissa toimitusketjuissa.

Työ on rajattu kohdeyrityksen yhden tuotantolaitoksen toimintaan. Tuotannonohjausjärjestelmä on rajattu koskemaan vain tuotannon kokoonpanovaihetta. Lisäksi vaatimusten määrittelyn ulkopuolelle rajataan järjestelmän käyttöliittymät, sekä osaa sen käyttämästä datasta käsitellään ”valmiiksi annettuna” eli niihin järjestelmällä ei voi vaikuttaa. Tuotantolaitoksen tuotannonohjausmuoto asiakastilaukspisteen mukaan määriteltynä on tilauksesta kokoonpano (Assemble to Order, ATO), joten työ käsittelee vain tilauksesta kokoonpano -ohjausmuodon ominaisuuksien vaikutusta tuotannonohjaukseen. Työssä määritellään järjestelmän käyttäjävaatimukset, joiden tarkoituksena on kuvailla mitä järjestelmän tulee tehdä ja kuinka sitä käytetään. Työssä ei käsitellä tarkempia järjestelmävaatimuksia tai muita teknisiä yksityiskohtia. Yrityksen projektiryhmän on tarkoitus työn pohjalta laatia tarkemmat järjestelmävaatimukset ja järjestelmäarkkitehtuuri ja toteuttaa itse järjestelmän rakennus.

1.3 Tutkimuskysymykset ja -menetelmät

Työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Mitä tietoa tuotannonohjausjärjestelmä vaatii kokoonpanolinjatuoannossa ATO ympäristössä?
2. Mitkä tekijät lisäävät tuotannonohjauksen epävarmuutta?
3. Miten data-analytiikkaa, tekoälyä ja koneoppimista voidaan hyödyntää epävarmuuden vähentämisessä?

Työssä hyödynnetään konstruktivistista tutkimusmenetelmää, joka on eräänlainen tapaustutkimuksen alalaji. Se on tarkoitettu tosielämän käytännön ongelmien ratkaisemiseen samalla tuottaen teoreettista lisäarvoa tutkimusaiheelle. Se on kehitetty liiketaloustieteen tarpeisiin, mutta se soveltuu laajasti eri alojen ongelmiin ja sitä on käytetty mm. tietojärjestelmätieteiden alalla. Sen tavoitteena on kehittää konstruktiio tai konstruktiioita, jolla pyritään ratkaisemaan tosielämän ongelma. Kun ongelmaan kehitetään uusi ratkaisu, tuottaa

ongelmanratkaisuprosessi uutta tietoa niin käytännön, kuin teoriankin näkökulmasta. Vaikka ratkaisun lopullinen implementointi epäonnistuisikin, voi se tuottaa arvokasta teoreettista kontribuutiota. Konstruktion ominaisuus on se, että se vaatii kehitystyötä eikä sitä vain löydetä asiaa tutkimalla. Tietojärjestelmämalli on esimerkki konstruktiosta. (Lukka 2003)

Kuvassa 1 on esitetty työn tutkimusprosessi, joka noudattaa konstruktiiivisen tutkimusmenetelmän prosessia. Lukka (2000) jakaa konstruktiiivisen tutkimusprosessin seitsemään eri vaiheeseen:

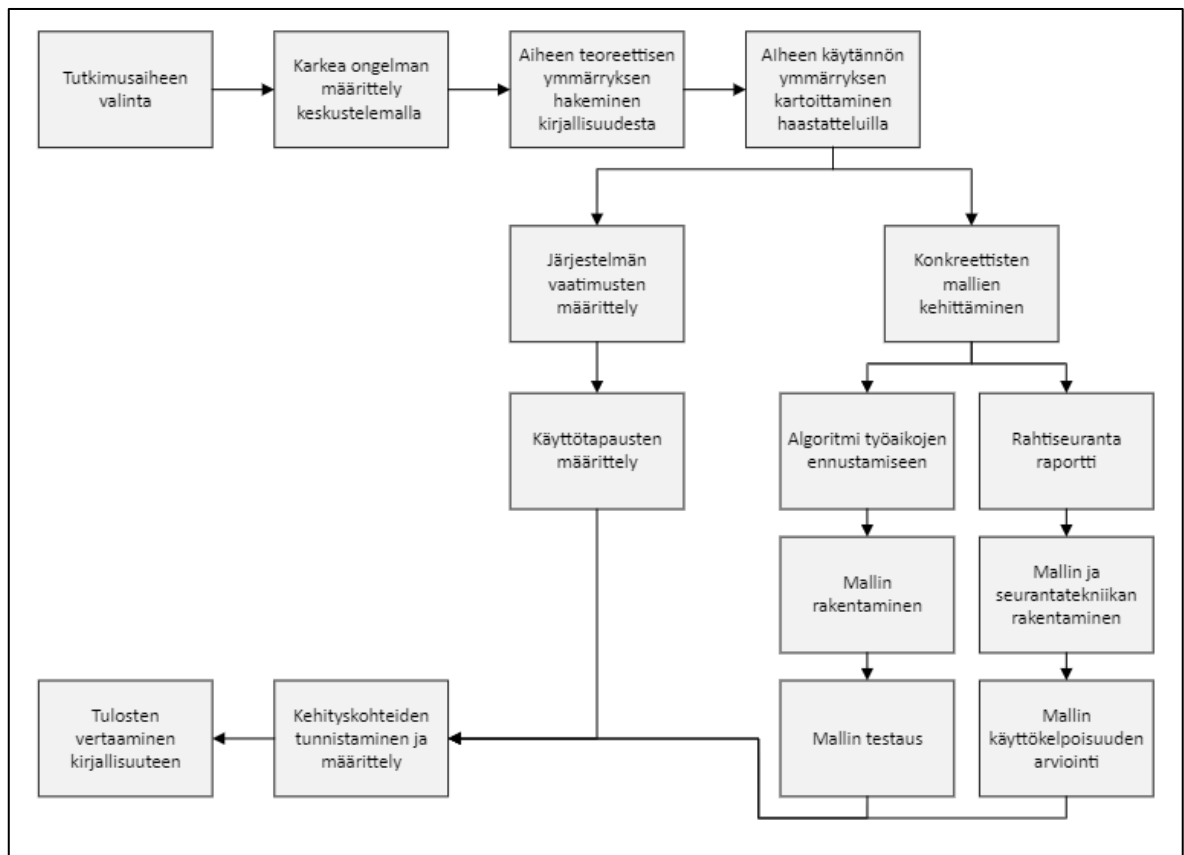
1. Etsi käytännön näkökulmasta relevantti ongelma, jolla on potentiaalia teoreettiseen kontribuutioon.
2. Tutki pitkänajan tutkimusyhteistyön potentiaalia kohdeyrityksen kanssa.
3. Hanki syvä aiheen käytännön- ja teoreettinen ymmärrys.
4. Kehitä ratkaisuidea ja ongelmanratkaisukonstruktio, jolla on potentiaalia teoreettiseen kontribuutioon.
5. Implementoi ratkaisu ja testaa kuinka se toimii.
6. Pohdi ratkaisun sovellettavuutta.
7. Reflektoi tuloksia aikaisempaan kirjallisuuteen.

Konstruktiiviselle tutkimusmenetelmälle sopiva aihe on käytännönläheinen, mutta teorian näkökulmasta paradoksaalinen tai vähän tutkittu. Tutkijan tulee perehtyä aikaisempaan kirjallisuuteen ja tutkimukseen ennen ratkaisuidean kehittämistä. Itse konstruktion kehittäminen on tutkimusmenetelmän tärkein vaihe ja se voi olla hyvin vapaamuotoista ja aikaa vievää. Ratkaisua tulee yrittää testata, jotta voidaan tutkia ratkaisun onnistumista tai epäonnistumista. Molemmissa tapauksissa prosessilla on mahdollisuus teoreettiseen kontribuutioon. (Lukka 2000)

Tietoa tehtaan tuotanto- ja tuotannonohjausprosessista sekä käyttäjien tarpeista tuotannonohjausjärjestelmälle on kerätty toteuttamalla haastatteluja, vapaamuotoisesti keskustelemalla, tutkimalla järjestelmiä ja seuraamalla asianosaisten toimintaa. Haastattelut suoritettiin puolistrukturoituina yksilö- ja ryhmähaastatteluina. Puolistrukturoitu haastattelu on yleisin tiedonkeruussa käytetty haastattelumuoto, jossa haastateltaville esitettävät kysymykset ovat avoimia (Oliver 2021, 72). Haastateltavat jaettiin ryhmiin järjestelmän käyttäjäryhmien

mukaan. Liitteessä 2 on esitetty haastattelukysymykset, jotka pyrittiin kohdentamaan käyttäjäryhmille sopiviksi.

Järjestelmän vaatiman datan nykyistä laatua ja määrää on arvioitu tutkimalla yrityksen tietojärjestelmiä ja -kantoja. Työn teoriapohjana on käytetty kirjallisuutta mm. vaatimusten määrittelystä, tuotannosuunnittelusta ja -ohjauksesta sekä toimitusketjuista. Uudempaa tutkimusta (tieteellisiä artikkeleita ja raportteja) on hyödynnetty erityisesti tuotannonohjauksen osalta.



Kuva 1. Tutkimusprosessi

Kuvassa 1 esitetty tutkimusprosessi alkoi tutkimusaiheen valinnalla yhdessä yrityksen asiantuntijoiden kanssa. Karkea tutkimusongelman määrittely tehtiin yhdessä keskustelemalla, jossa käytiin läpi tuotannonohjauksen nykyinen taso, sen nykyiset ongelmat, tulevaisuuden tavoitetaso ja menneet sekä tulevat kehitysprojektit, joilla on vaikutusta tuotannonohjaukseen. Seuraavaksi kartoitettiin aiheen tuntemusta kirjallisuudesta ja toteutettiin haastattelut. Tätä seurasi järjestelmän vaatimusten määrittely ja samaan aikaan kehitettiin konkreettisia tekoälyä ja analytiikkaa hyödyntäviä malleja, joista voi olla tulevaisuudessa hyötyä.

Seuraavaksi tunnistettiin kehityskohteita yrityksen nykyisistä järjestelmistä ja yrityksen datasta ja tuloksia verrattiin edeltävään kirjallisuuteen.

1.4 Työn rakenne

Työn alussa esitetään aiheelle oleelliset teoreettiset viitekehykset. Teorian jälkeen esitellään kohdeyrityksen toimintaympäristö ja tuotannonohjauksen nykytila. Tämän jälkeen esitellään haastatteluissa esille nousseet asiat ja niiden pohjalta muodostetut järjestelmän käyttäjävaatimukset ja käyttötapaukset. Seuraavaksi esitetään tunnistettuja kehityskohteita, joilla järjestelmän toimintaa ja tuotannonohjausta yleisesti voidaan kehittää tulevaisuudessa. Lopuksi esitellään työn johtopäätökset ja vastataan tutkimuskysymyksiin sekä tehdään työstä yhteenveto. Työn rakenne on esitetty taulukossa 1 input/output kaaviona, jossa kappaleiden syöte- ja tulostiedot ovat esitettynä.

Taulukko 1. Tutkimuksen input/output kaavio

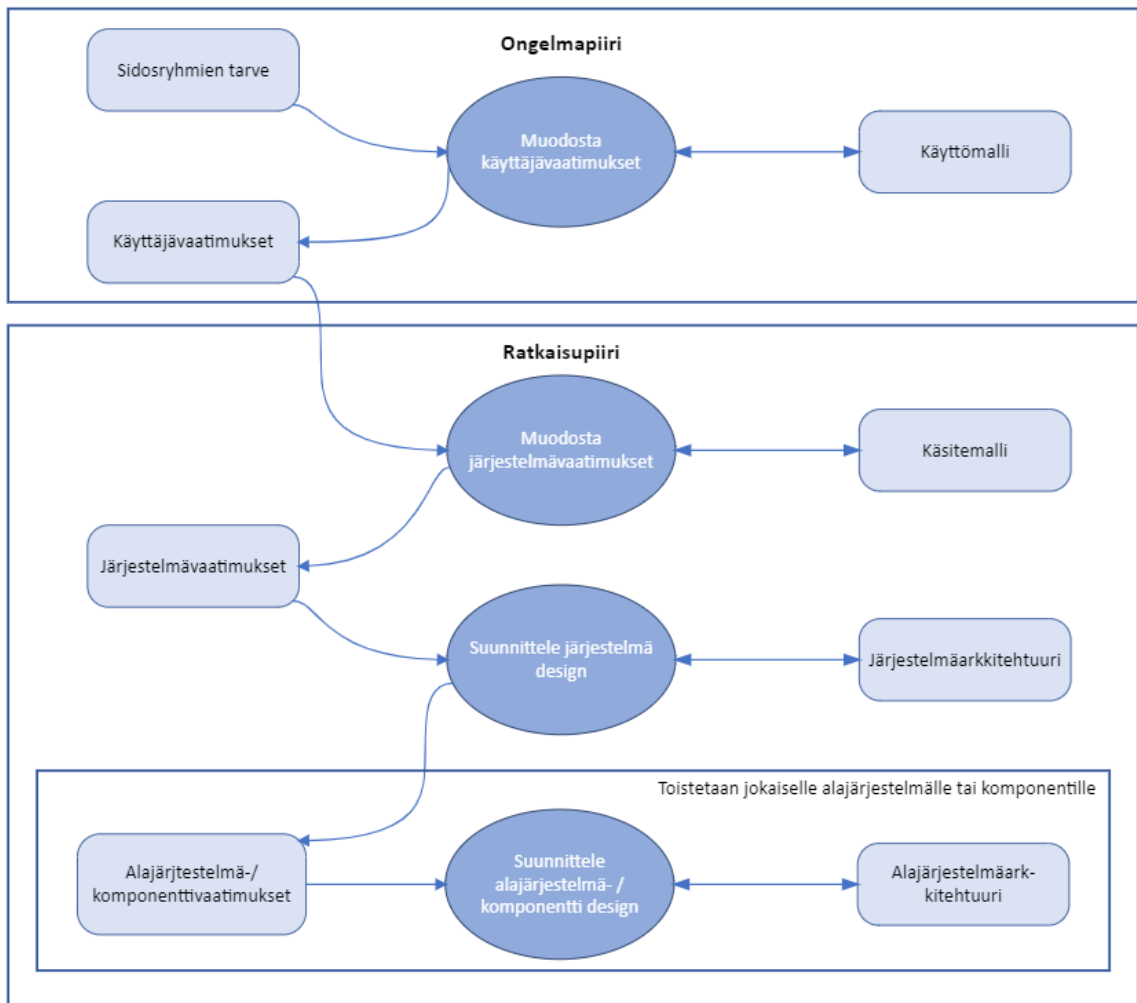
Input	Luku	Output
	Luku 1. Johdanto Esitellään tutkimusaihe, tausta ja tutkimuskysymykset.	Tutkimuskysymykset
Kirjallisuutta ohjelmiston vaatimustenmäärittelystä	Luku 2. Vaatimusten määrittely Esitetään eri lähteissä esitettyjä lähestymistapoja ohjelmiston vaatimustenmäärittelylle	Vaatimustenmäärittely prosessi ja siihen käytettävät tekniikat.
Kirjallisuutta tuotannosuunnittelusta, -ohjauksesta ja tuotannonohjausjärjestelmästä	Luku 3. Tuotannonohjaus Esitetään eri lähteissä esitettyjä lähestymistapoja ja tärkeimpiä pointteja tuotannonohjaukselle ja sidotaan tuotannonohjaus laajempaan tuotannosuunnittelun kokonaisuuteen.	Kirjallisuudessa esitetty tuotannonohjauksen viitekehys ja teoreettinen pohja käytännön ongelmalle.
Kirjallisuutta toimitusketjun resilienssistä	Luku 4. Toimitusketjun resilienssi Esitetään eri lähteissä esitettyjä syitä toimitusketjun resilienssin	Strategisia toimia siihen, että toimitusketju kykenee vastaamaan paremmin kysyntään heikentyneen komponenttisäätävyyden aikana.

	heikentymisestä ja tapoja sen parantamiseksi.	
Kerättyä ja haastatteluihin perustuvaa tietoa kohdeyrityksestä, sen toimintaympäristöstä, tuotannosta sekä tuotannonohjauksesta.	Luku 5. Yritys, tuotantoympäristö ja tuotannonohjaus Kerätyistä tiedoista luodaan kokonaisuus.	Ymmärrys tuotannonohjauksen nykytilasta ja yrityksen tuotannolle oleellisista tuotannonohjauksen yksityiskohdista.
Haastattelutietoa yrityksen henkilöstön tarpeista tuotannonohjausjärjestelmälle.	Luku 5. Yrityksen tuotannonohjausjärjestelmän vaatimustenmäärittely Haastattelun tuloksista luodaan kokonaisuus ja muodostetaan järjestelmän käyttötapaukset	Järjestelmän käyttäjävaatimukset ja käyttötapaukset.
Suunnitellun järjestelmän ominaisuudet ja niiden heikkoudet. Tieto nykyisestä toimintamallista ja uuden järjestelmän käytön vaatimista toimintamalleista. Kirjallisuutta toimitusketjun resilienssistä.	Luku 7. Kehityskohteet Järjestelmän ominaisuuksista ja sen käyttämästä datasta esitetään mahdollisia kehityskohteita. Lisäksi järjestelmän datalla testataan mahdollisuutta hyödyntää tekoälyä ja analytiikkaa.	Järjestelmän tulevaisuuden kehityskohteet, koneoppimismallin tulokset ja sen mahdollisuudet, rahtidatan sovellusesimerkki ja toimenpide ehdotukset toimitusketjun resilienssin parantamiseksi.
Kaikki tutkimuksen aikana kerätty tieto	Luku 8. Johtopäätökset	Johtopäätökset ja vastaukset tutkimuskysymyksiin

2 Vaatimusten määrittely

Vaatimusten määrittely on projektin toteutusta edeltävä prosessi, jossa määritellään, analysoidaan ja validoidaan tulevan projektin vaatimukset (O'Regan 2022). Yleisellä tasolla vaatimukset kertovat mitä projektiin liittyvät sidosryhmät siltä odottavat (Dick, Hull ja Jackson, 2017) Ohjelmistoprojektin tapauksessa vaatimukset kertovat mitä tulevalta järjestelmältä halutaan, mitä sen tulee pystyä tekemään ja mitä mahdollisia rajoitteita esimerkiksi muut järjestelmät, ympäristö tai käyttäjät sille asettavat. Vaatimukset ovat järjestelmän pohja ja jos ne ovat pielessä, tulee järjestelmän lopullinen toteutus epäonnistumaan. Lisäksi vaatimusten määrittelyyn tulisi käyttää riittävästi aikaa, sillä väärin vaatimusten korjauskustannukset kasvavat mitä pidemmällä projekti on. (O'Regan 2022) Standish Group (1995) raportin mukaan suurin tekijä projektien epäonnistumisessa on riittämättömät tai puuttuvat vaatimukset. Toisaalta Lehtisen, Mäntylän, Vanhasen, Itkosen ja Lasseniuksen (2014) tekemän tutkimuksen mukaan projektien epäonnistuminen on useiden eri tekijöiden summa, joista epäonnistunut vaatimusmäärittely on yksi osatekijä. Lisäksi vaatimusten muutosten aiheuttamat kustannukset nousevat mitä myöhemmässä vaiheessa projektia ne ilmenevät ja mitä tärkeämpiä muutokset ovat. Tämä johtuu siitä, että ohjelmistoprojekteissa vaatimusten muutokset vaikuttavat kaikkiin aikaisempiin prosessin osiin lisäämällä työtä ja tärkeämmät muutokset vaativat intensiivisempää työtä. (Sharif, Khan ja Bhatti 2012)

Kuvassa 2 on esitetty järjestelmän kehitysprosessi, joka alkaa vaatimusten määrittelyllä. Vaatimusten määrittely voidaan jakaa kahdelle eri tasolle. Korkeamman tason vaatimuksia kutsutaan usein käyttäjävaatimuksiksi (O'Regan 2022; Chemuturi 2014) tai sidosryhmävaatimuksiksi (Dick, Hull ja Jackson, 2017). Alemman tason vaatimuksia kutsutaan usein järjestelmävaatimuksiksi (O'Regan 2022; Dick et al. 2017) tai ohjelmistovaatimuksiksi (Chemuturi 2014). Käyttäjävaatimukset kertovat mitä tulevan järjestelmän odotetaan tekevän, eli mikä ja miten jokin asia tai ongelma pyritään järjestelmällä ratkaisemaan prosessinäkökuulmasta. Ne kerätään tulevan ohjelmiston käyttäjiltä ja muilta sidosryhmiltä. Käyttäjävaatimuksia käytetään järjestelmävaatimusten pohjana ja ne voidaan jakaa toiminnallisiin ja ei-toiminnallisiin vaatimuksiin. (O'Regan 2022, 85–86) Jos käyttäjävaatimukset muuttuvat, on sillä vaikutusta järjestelmävaatimuksiin, joten käyttäjävaatimusten määrittelyä ja -hallintaa voidaan pitää tärkeämpänä (Chemuturi 2014, 24).



Kuva 2. Järjestelmäkehitysprosessi (Dick et al. 2017, 35)

Vaatimusmäärittely ja -hallinta on monivaiheinen prosessi. Vaatimusmäärittelyn vaiheet järjestyksessä ovat

1. vaatimusten muodostaminen ja määrittely
2. vaatimusten analysointi
3. vaatimusten todentaminen ja validointi. (O'Regan 2022, 87–88)

Vaatimusten hallinnan tehtäviä ovat

- jäljitettävyyden varmistaminen
- edistyksen seuranta ja raportointi
- muutosten hallinta. (Chemuturi 2014, 10; O'Regan 2022, 93).

Vaatimusten määrittelyn yhteydessä voidaan tuottaa muitakin järjestelmän kehitystä edistäviä dokumentteja. Dick et al. (2017, 35) esittämän järjestelmäkehitysprosessimallin mukaan ongelmapiirissä käyttäjävaatimuksia muodostaessa voidaan tuottaa myös käyttömalli. Simmons (2006) ensimmäisen kerran esittelemä käyttömalli on kokonaisuus, joka muodostuu kolmesta tasosta: mallin muodostamista tukevat tiedot, mallin yleiskatsaus ja mallin yksityiskohdat. Taulukossa 2 on esitetty eri käyttömallin mallintamistekniikoita, joita voidaan käyttää tarpeen mukaan, jos ne tuovat lisäarvoa sovellusprojektin kehitykselle.

Taulukko 2. Käyttömallin rakenne (Simmons 2006)

Tukevat tiedot		→	Yleiskatsaus		→	Yksityiskohdat	
Persoonat			Käyttömallin tiekartta			Käyttötapaukset	
Väestötiedot			Kuvakäsikirjoitus			Skenaariot	
Käyttöolosuhteet			Käsite- ja kontekstikaaviot			Käyttäjän tehtävänkulut	
Etniset tiedot			Käyttökokemuksen laskeutumisalue			Toimintaprofiili	

Tukevat tiedot eivät itsessään kuvaa sovelluksen käyttöä, mutta antavat kontekstin seuraavien tasojen suunnitelmille. Persoonat tai käyttäjäryhmät ovat sovelluksen käyttäjiä. Niitä voidaan kuvailla esimerkiksi kuvien, tekstin tai videon avulla. Persoonat tunnistetaan tutkimuksen avulla ja niillä on eri tavoitteet. Väestötiedot ovat tietoa markkinoilta, jota voi olla mm. väestön koko, asenteet ja ostoaiheet. Väestötiedot auttavat mm. markkinoiden arvioinnissa ja kohdesegmenttien vertailussa. Sovellusprojektin näkökulmasta käyttöolosuhteet voivat sisältää tietoa mm. käyttöjärjestelmästä, verkkoympäristöstä ja samanaikaisten käyttäjien määrästä. Etnisten tietojen tarkoituksena on ymmärtää kohdeyleisön kulttuurin ja normien vaikutus sovelluksen käytölle. (Simmons 2006)

Yleiskatsaus sisältää tekniikoita, jotka antavat korkean tason kuvan sovelluksesta. Ne ovat hyödyllisiä kommunikoinnissa yrityksen johdolle tai toisille sovelluskehitystiimeille. Käyttömallin tiekartta kuvaa miten käyttömalli muuttuu ajan kuluessa. (Simmons 2006) Kuvakäsikirjoitukset ovat karkean tason prototyyppisiä tai yksinkertaisia kuvauksia siitä, miten sovellusta käytetään. Niiden tarkoituksena on havainnollistaa sovelluksen suunniteltua käyttöä ja käyttäjän liikkumista eri skenaarioiden välillä sovelluksen kehityksen alkuvaiheissa.

Kuvakäsikirjoitukseen käytettäviä tekniikoita voivat olla mm. esitykset, paperilaput, sarjakuvat tai animaatiot. (Simmons 2006; Cadle, Paul ja Turner 2010, 165) Kontekstikaaviot kuvaavat kuinka sovellus on vaikutuksessa ympäristöönsä, ottamatta kantaa sovelluksen sisäisiin yksityiskohtiin. Käsitekaaviot kuvaavat koko sovellusta yhdellä sivulla. Käyttökokemuksen laskeutumisalue on taulu, joka kuvaa sovelluksen hyväksyttäviä käyttökokemuksen eri tasoja. Sillä voidaan esittää käyttökokemuksen minimi-, tavoite- ja erinomainen taso. (Simmons 2006)

Yksityiskohdat ovat käyttömallin ydin. Ne ohjaavat mm. sovelluksen suunnittelua, vahvistavat sovelluksen arkkitehtuuripäätöksiä, tarjoavat datan ja kontekstin laatuvaatimuksille, auttavat tuotedokumentaation teossa ja varmistavat riittävän testauskattavuuden. Käyttötapaus on järjestelmän yksittäinen toiminnallisuus (Cadle et al. 2010, 205). Ne esittävät sarjan toimintoja, joita käyttäjä tekee sovellusta käyttäessään. (Simmons 2006) Käyttötapausten tarkoituksena on keskittyä siihen, mitä käyttäjän pitää saada suoritettua (Wiegers 2013). Käyttötapaukset voidaan esittää käyttötapausdiagrammina UML notaatiota käyttäen (Cadle et al. 2010, 206), joka on laajasti hyväksytty ohjelmistokehityksessä käytetty mallinnusnotaatio (Pooley ja King 1999), tai luonnollisella kielellä taulukkomuodossa. Käyttötapauksesta voidaan kirjata mm. sen kuvaus, esivaatimukset, laukaisija, onnistumiskriteerit, vähimmäisvaatimukset, sidosryhmät ja poikkeukset. Käyttötapausdiagrammissa tulee olla käyttäjät, käyttötapaukset, järjestelmän rajat sekä yhteydet käyttäjien ja käyttötapausten välillä. (Cadle et al. 2010, 206–210) Skenaariot ovat käyttötapauksia yksityiskohtaisempia ja vähemmän strukturoituja esityksiä sovelluksen käytöstä ja ne ovat usein kirjoitettu luonnollisella kielellä (Simmons 2006). Wiegers (2013) mukaan skenaario on kuvaus järjestelmän yksittäisestä käyttötapahtumasta. Hänen mukaansa käyttötapaus on kokoelma siihen liittyviä käyttöskenaarioita ja skenaario on käyttötapausten yksittäinen ilmentymä. Käyttäjän tehtävänkulut ovat graafisia kuvauksia sovelluksen käytöstä. Niiden rakenne mahdollistaa tarkan kuvauksen käyttäjän tekemistä toimista ja ne voivat kattaa useita käyttötapausta tai skenaarioita kerralla. Toimintoprofiili sisältää sovelluksen kaikki toiminnot ja niiden tapahtumien todennäköisyydet. Toimintoprofiili on hyödyllinen työkalu sovelluksen luotettavuutta ja saatavuutta arvioitaessa. (Simmons 2006; Musa 1993)

2.1 Vaatimusten muodostaminen

Vaatimusten muodostamisessa ja määrittelyssä vaatimukset kerätään ensisijaisilta lähteiltä, eli niiltä sidosryhmiltä, jotka ovat suoraan yhteydessä projektiin ja toissijaisista lähteistä, joita ovat mm. dokumentit, olemassa olevat järjestelmät, säännöt ja standardit. Vaatimusten kerääminen ensisijaisista lähteistä toteutetaan usein tekemällä haastatteluja, järjestämällä ai-voriiihiä, esittämällä kysymyssarjoja, tekemällä markkinakyselyitä, tarkkailemalla tai kokei-lemalla ja esittämällä prototyypillä. (Chemuturi 2014, 33–34)

Helpottaakseen ohjelmiston kehitysprosessin seuraavia vaiheita Chemuturi (2014, 34) mu-kaan vaatimuksia muodostaessa tulisi kerätä

1. lista kaikista sovelluksen prosesseista
2. prosessin syötetiedot
3. prosessin tulostetiedot
4. syötetiedoille tehtävät muutokset
5. prosessin käynnistäjä
6. prosessin päätepiste.

Vaatimusten kerääminen voi kuitenkin olla hankalaa, sillä sidosryhmät eivät välttämättä täy-sin tiedä mitä he ohjelmistolta tarkkaan ottaen haluavat tai heidän toiveensa eivät ole tekni-sesti toteutettavissa. Toisaalta ongelmaksi voi myös muodostua se, että eri sidosryhmien in-tressit ovat ristiriidassa keskenään. Lisäksi ongelmia voi tuottaa se, jos vaatimusten kerääjä ja sidosryhmän edustaja eivät ymmärrä toisiaan. (O’ Regan 2022, 89)

2.2 Vaatimusten analysointi, todentaminen ja validointi

O’Regan (2022, 92) mukaan vaatimusten analysointi tehdään vaatimusten keräämisen kanssa samanaikaisesti. Chemuturi (2014, 58) kuitenkin esittää, että analysointi tulisi tehdä vasta kaikkien vaatimusten keräämisen jälkeen, jotta voidaan varmistua siitä, että kaikki tar-vittavat vaatimukset on kerätty. Hänen mukaansa vaatimusten keräämisen kanssa samanai-kainen analysointi voi johtaa siihen, että päätoiminnallisuuksia avustavat vaatimukset

unohtuvat ja ne lisätään mukaan vasta kehitysprosessin myöhemmissä vaiheissa, mikä voi johtaa suurempiin vaatimusmuutoksiin.

O'Regan (2022, 92) mukaan vaatimusten analysoinnin tarkoituksena on varmistua siitä, että jokainen kerätty vaatimus on

- tarpeellinen
- esitetty tarkasti ja yksiselitteisesti
- täydellinen ja johdonmukainen
- kategorisoitu ja priorisoitu
- analysoitu ristiriitojen tunnistamiseksi ja korjaamiseksi.

Chemuturi (2014, 57–64) esittää analysointiprosessin yksityiskohtaisemmin ja hänen mukaansa tulisi lisäksi arvioida jokaisen vaatimuksen toteutuskelpoisuus teknisestä-, taloudellisesta- ja ajallisesta näkökulmasta. Lisäksi vaatimukset tulisi jakaa sen mukaan, onko ne päätoiminnallisuuksien vaatimuksia vai niitä avustavia vaatimuksia ja ryhmitellä vaatimukset loogisesti niiden mukaan. Prosessissa tulisi myös tunnistaa mm. järjestelmärajapinnat, vaatimusten sidosryhmä ja toteutuksen kannalta mahdolliset aukot vaatimuksissa.

Validoinnin tarkoituksena on varmistua siitä, että oikeat vaatimukset ja toiminnallisuudet tullaan toteuttamaan ja todentamisen tarkoituksena on varmistua siitä, että ne toteutetaan oikein. Validoinnin toteuttavat sidosryhmät, eli he lopulta varmistavat sen, että muodostetut vaatimukset ovat oikeita, sillä vaatimusmuutosten kustannus kasvaa mitä myöhemmässä vaiheessa ne huomataan. Todentamisen tarkoituksena on varmistua siitä, että oikein rakennettuna järjestelmä ottaa huomioon kaikki muodostetut vaatimukset ja sisältää kaikki tarvittavat toiminnallisuudet. Tämän seuraamiseen voidaan käyttää esimerkiksi seurantamatriisia. (O'Regan 2022, 92–93; Cadle et al. 2010, 203)

2.3 Vaatimusten hallinta

Vaatimusten hallinnan vastuulla on vaatimusten muutosprosessin hallinta ja sen varmistaminen, että projektin vaatimukset ovat riittäviä ja ajan tasalla (Cadle et al. 2010, 198). Vaatimukset tulee pitää linjassa projektisuunnitelman ja suunnitellun lopputuloksen kanssa koko projektin ajan. Jos jokin vaatimus muuttuu projektin edetessä, tulee kaikki dokumentit ja

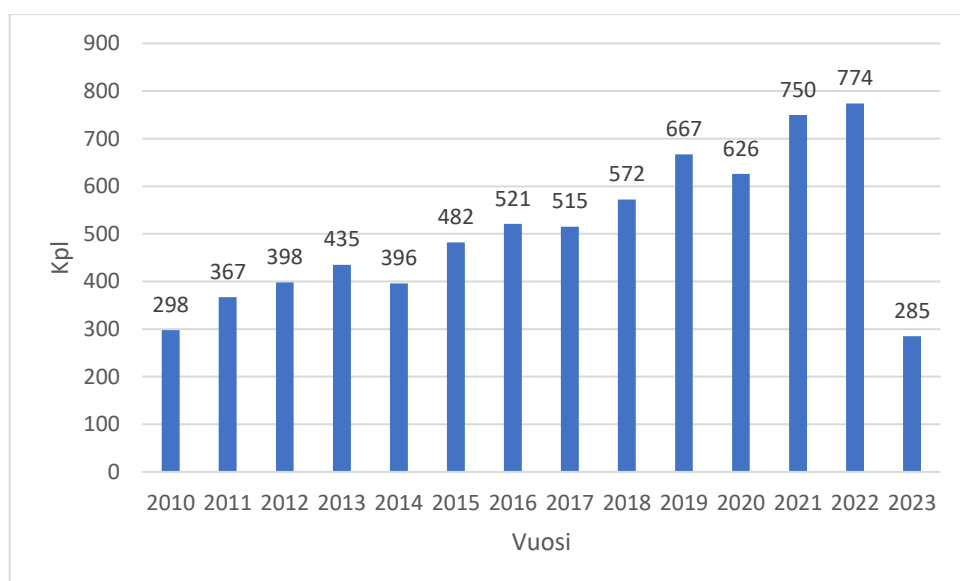
ohjelmistomodulit, joihin muutoksella on vaikutusta, pitää ajan tasalla. (O'Regan 2022, 93) Vaatusmuutokset voivat olla seurausta esimerkiksi esiin nousseista teknisistä ongelmista tai muuttuneista käyttäjä- tai sidosryhmävaatimuksista (Dick et al. 2017, 13).

Vaatimusten muutosprosessia käytetään sen jälkeen, kun projektin alkuperäiset vaatimusdokumentit on hyväksytty ja ohjelmiston kehitys on aloitettu. Se on tärkeä, mutta monimutkainen prosessi, jota helpottaa hyvin hallinnoitu vaatimusten jäljitettävyyys (Dick et al. 2017, 183–184). Vaatimusten muodostamisvaiheessa formaalia muutosprosessia ei ole järkevää käyttää, koska tässä vaiheessa vaatimukset vasta muotoutuvat ja ovat muutoksille alttiita (Dick et al. 2017, 213). Vaatimusten muutosprosessin tarkoituksena on varmistaa se, että ehdotettu vaatimusmuutos on tarpeellinen, se täyttää kaikki hyvän vaatimuksen ominaisuudet ja että kaikki muut vaatimukset ja sovelluksen toiminnallisuudet, joihin muutosehdotuksella on vaikutusta, otetaan huomioon.

3 Tuotannonohjaus

Tuotannonohjauksen tehtävänä on monitoroida tuotantoprosessia ja varmistaa sen tehokas sekä häiriötön toiminta (Missbauer ja Uzsoy 2020, 1). Kirjallisuudessa tuotannonohjaus linkitetään usein osaksi suurempaa kokonaisuutta, jota kutsutaan termillä tuotannosuunnittelu ja -ohjaus. Englanninkielisessä kirjallisuudessa tuotannosuunnittelusta ja -ohjauksesta käytetään usein termiä *Production Planning and Control (PPC)* tai *Manufacturing Planning and Control (MPC)* (Kiran 2019; Vollmann, Berry Whybark ja Jacobs 2018). Tässä kontekstissa tuotannosuunnittelun tehtävänä on päättää mitä valmistetaan, milloin ja kuinka paljon samalla varmistuen, että tarvittavat materiaalit tuotantoon on saatavilla (Missbauer ja Uzsoy 2020, 1).

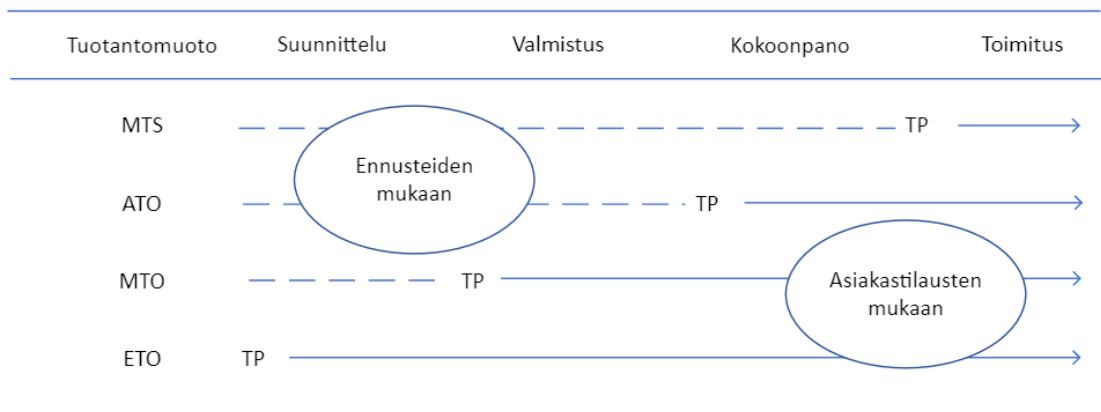
Tuotannonohjaus on yksi tutkituimmista alueista valmistavan yrityksen toiminnassa. Suoritettu tietokantahaku paljastaa, että myös uusia tutkimuksia julkaistaan paljon. Kuvassa 3 on esitetty Elsevierin Science Direct tietokantaan tehdyn artikkelihauksen tulokset, jotka näyttävät kasvavan trendin tutkimusten määrässä. Haku on suoritettu huhtikuun 11. päivänä vuonna 2023. Haku tehtiin hakusanoilla ”Production control” tai ”Manufacturing control”. Julkaisu- vuosiksi suodatettiin vuodet 2010–2023. Artikkelien kokonaismäärä hakuparametreilla oli 7086 kappaletta. Vuodesta 2018 eteenpäin artikkeleita oli julkaistu 3674 kappaletta.



Kuva 3. Science Direct tietokantahaun tulokset

3.1 Tilauspiste ja tuotannonohjausmuodot

Tuotannonohjaukselle oleellinen kohta toimitusketjussa on tilauspiste (TP) tai asiakastilauksen kytkeytymispiste (Order Penetration point, OP tai Customer Order Decoupling Point, CODP). Tilauspisteen sijainti tuotantoketjussa määräytyy markkinoiden paineen ja tuotteen hinnan sekä sen monimutkaisuuden perusteella. Markkinoiden kilpailulliset paineet siirtävät tilauspisteen sijaintia alaspäin tuotantoketjussa ja lisää varastosta myytävien mallien määrää. Korkeat kustannukset ja tuotteen monimutkaisuus siirtävät taas tilauspistettä ylöspäin tuotantoketjussa. (Sharman 1984) Kuvassa 4 on esitetty tuotannonohjausmuotojen tai tuotantostrategioiden jakaantuminen neljään osaan tilauspisteen mukaan. Tuotantoketjussa ennen tilauspistettä tehtävää tuotantoa ohjataan ennusteiden mukaan, kun taas tilauspisteen jälkeen tuotantoa ohjaava tekijä on asiakastilaus. Tuotannonohjausjärjestelmän näkökulmasta sen teknisessä suunnittelussa tulee ottaa huomioon kytkeytymispiste, sillä tuotannonohjaukseen käytettävä informaatio eroaa tilauspisteen eri puolilla. (Olhager 2010) Tilauspiste on usein myös se piste, jossa lopulliset tuotekonfiguraatiot jäädytetään (Sharman 1984).



Kuva 4. Tuotannonohjausmuotojen asiakastilausten kytkeytymispisteet (Olhager 2010; Sharman 1984)

Varasto-ohjautuvassa tuotannossa (Make-to-Stock, MTS) valmistettavat tuotteet valmistetaan kysyntäennusteiden perusteella. Valmistetut tuotteet varastoidaan lopputuotevarastoihin, joista asiakkaiden tarpeet on nopea tyydyttää olettaen, että haluttua tuotetta on varastossa. Varasto-ohjautuva tuotanto sopii hyvin standardoiduille tuotteille, joiden yksikkökustannukset ovat pieniä, menekki suurta ja kysyntä ennustettavissa riittäväällä tarkkuudella. Tilauksesta kokoonpantaessa (Assembly-to-Order, ATO) asiakastilauksen kytkeytymispiste sijaitsee toimitusketjussa ennen lopputuotteen kokoonpanoa. ATO ympäristössä yritys

kokoonpanee lopullisen tuotteen asiakastilauksen sisältämän lopullisen tuotteen konfiguraation perusteella. Tuotannonohjaus ennen tilauspistettä tapahtuu kysyntäennusteiden perusteella. Tilauksesta kokoonpano sopii tuotannonohjaukseen, jos lopputuotteiden määrä on suuri ja niiden kysynnän ennustaminen vaikeaa, tuotteiden yksikkökustannukset ovat korkeita ja lopputuotteet ovat modulaarisia eli ne rakentuvat samankaltaisista tuotekonfiguraatioista ja niiden sisältämien optioiden kysyntää voidaan ennustaa. Tilauksesta valmistavassa (Make-to-Order, MTO) tuotannossa asiakastilauspiste sijaitsee raaka-ainevarastoissa ja lopullinen tuote valmistetaan asiakkaan tarpeiden mukaan. MTO tuotannonohjaus on tarpeellinen silloin, kun asiakkaalle tarjottava kustomointi vaikuttaa tuotannon alkupäähän, jolloin tilauksesta kokoonpano ei ole mahdollista. Tilauksesta suunnittelu (Engineer-to-Order) on samankaltainen lähestymistapa kuin MTO, mutta siinä tilauksen valmistamista edeltää sen suunnittelu, joka määrittää mm. tuotteen valmistamiseen käytettävät materiaalit. (Vollmann et al. 2018, 43-49, 373-375; Olhager 2003)

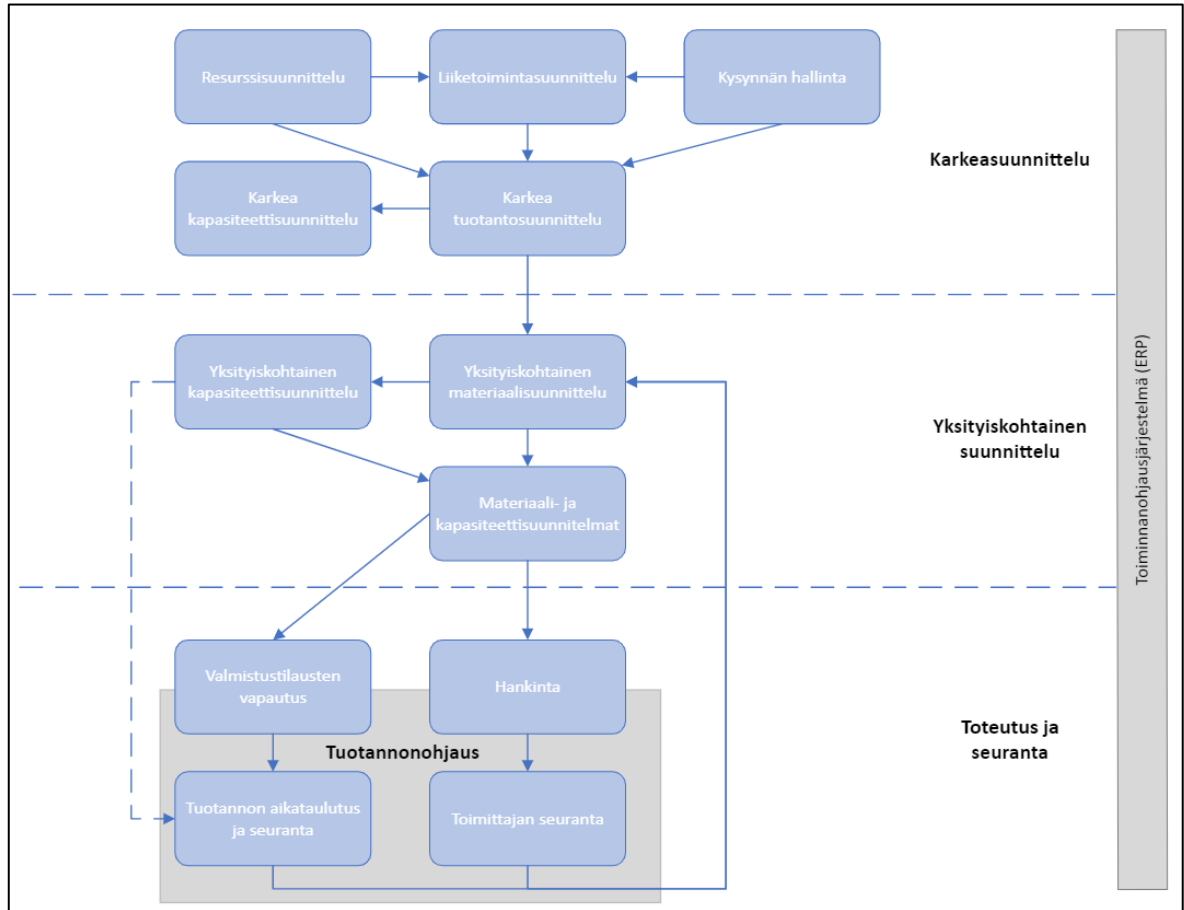
3.2 Tuotannonohjauksen linkittyminen tuotannosuunnittelun kokonaisuuteen

Tuotannosuunnittelu ja -ohjaus -kokonaisuuden tavoitteena on:

- Minimoida tuotannon koneiden ja työntekijöiden joutoaika.
- Minimoida varaston kiertoaika ja pitää varastotasot alhaisina.
- Maksimoida tuotteiden laatu ja asiakastytyväisyys.
- Minimoida pullonkaulojen vaikutukset.
- Suunnitella tuotanto niin, että hankintaosastolle jää riittävästi aikaa materiaalien hankintaan, tuotannon ajoajat ovat riittävän pitkiä ja sen käynnistysajat alhaisia. (Kiran 2019, 2)

Kirjallisuudessa tuotannosuunnittelun ja -ohjauksen periaatteellinen viitekehys on perustunut 1800- ja 1900-luvun vaihteen jälkeen periaatteeseen, jossa tuotannosuunnittelua tehdään organisaation eri tasoilla, eri tarkkuudella ja eri aikaikkunassa. Alemman tason suunnitelmat tarkentavat ylemmän tason suunnitelmaa ja aikaikkuna pienenee. Teoriassa malli ottaa samanaikaisesti huomioon kaikki tuotannon tarvitsemat resurssit kaikilla tasoilla. (Missbauer ja Uzsoy 2020, 29) Kuvassa 5 on esitetty Vollmann et al. (2018) esittämä

tuotannosuunnittelun ja -ohjauksen viitekehys, joka on jaettu kolmeen eri osa-alueeseen, jotka käsittelevät eri aikaikkunoita ja sisältävät eri toimintoja.



Kuva 5 Tuotannon suunnittelu- ja ohjausjärjestelmä (Vollmann et al. 2018, 236)

Karkeasuunnittelu pitää sisällään viisi toimintoa, jotka ovat kysynnän hallinta, liiketoimintasuunnittelu, resurssisuunnittelu, karkea tuotantos suunnittelu ja karkea kapasiteettisuunnittelu (Vollmann et al. 2018, 19). Karkeasuunnittelu on pitkän ajan suunnittelua ja sen toiminnot tähtäävät suunnitteluun tuote- tai tuoteryhmätasolla. Suunnittelun aikaikkuna vaihtelee yrityksittäin ja toiminnoittain, mutta on yleensä yhdestä viiteen vuotta.

Vollman et al. (2018, 19) mukaan kysynnän hallinta koordinoi kaikkia liiketoiminnan toimintoja, jotka muodostavat kysyntää tuotannolle. Sen tehtävänä on lopputuotteen kysynnän ennustaminen liiketoiminnan eri toimintojen tarpeeseen ottamalla huomioon mm. markkinoiden tarpeet, yrityksen ja tehtaan sisäisen kysynnän tarpeet sekä varaosatarpeet. Kysynnän hallinta kontrolloi myös tilausten lupaamisen ja niiden muodostamisen.

Liiketoimintasuunnittelusta käytetään englanninkielisessä kirjallisuudessa termiä *Sales and Operations Planning (S&OP tai SOP)*. Se toimii linkkinä yrityksen laajempien suunnittelu-prosessien ja tuotannosuunnittelun välillä (Missbauer ja Uzsoy 2020, 34). Sen tehtävänä on tasapainottaa yrityksen myynnin suunnitelmat olemassa olevilla tuotantoresursseilla, jolloin voidaan varmistua siitä, että yrityksen tuotanto pystyy tukemaan yrityksen strategiaa ja myynnin tavoitteita (Vollmann et al. 2018, 20).

Resurssisuunnittelun tehtävänä on määrittää tuotannolle tarpeellisten resurssien kapasiteetti lyhyellä ja pitkällä aikavälillä. Pitkällä aikavälillä resurssisuunnittelussa voidaan suunnitella kokonaisia tuotantolaitoksia tai esimerkiksi tuotantolinjoja. Pitkän aikavälin resurssisuunnittelua kutsutaan myös strategiseksi kapasiteettisuunnitteluksi (Kiran 2019, 293). Lyhyellä aikavälillä resurssisuunnittelussa suunnitellaan lopulta henkilöstö- ja konetunteja. Resurssisuunnittelu mahdollistaa tuotantosuunnitelman linjaamisen olemassa olevaan kapasiteettiin. (Vollmann et al. 2018, 19–20)

Karkeasta tuotantosuunnittelusta (tai tuotannon karkeasuunnittelu) käytetään englanninkielisessä kirjallisuudessa termiä *Master Production Scheduling (MPS)*. Sen tehtävänä on muodostaa tuotantosuunnitelma yrityksen liiketoimintasuunnitelman (S&OP), kysyntä ennusteiden ja asiakastilausten pohjalta. (Vollmann et al. 2018, 19; Missbauer ja Uzsoy 2020, 32) Karkea tuotantosuunnitelma esittää tulevaisuudessa valmistettavien lopputuotteiden tai tuoteoptioiden määrät jossakin aikaikkunassa. (Vollmann et al. 2018, 19)

Karkea kapasiteettisuunnittelu käsittelee kapasiteettia tuote- tai tuoteryhmä tasolla. Sen pääasiallinen tiedonlähde on karkea tuotantosuunnitelma (Vollmann et al. 2018, 207). Karkean kapasiteettisuunnittelun tarkoituksena on varmistua karkean tuotantosuunnitelman toteutuskelpoisuudesta (Kiran 2019, 297). Suunnitteluun on kehitetty monia eri tekniikoita, jotka eivät ota todellista kapasiteettia nimenomaisesti huomioon. Niitä kutsutaan rajattoman kapasiteetin suunnittelun tekniikoiksi. (Vollmann et al. 2018, 207)

Yksityiskohtaisen materiaalisuunnittelun pohjana käytetään tuotannon karkeasuunnitelmaa. Sen tehtävänä on määrittää karkean tuotantosuunnitelman tarvitsemat materiaalit (Kiran 2019, 429). Lopputuotteen tuoterakenteen monimutkaisuudesta riippuen voi yksityiskohtainen materiaalisuunnittelu sisältää paljonkin laskentaa. Perinteisessä materiaalitarvelaskennassa (Material Requirements Planning, MRP) lopputuote hajotetaan tuoterakenneluetteloksi tai osaluetteloksi (Bill of Materials, BOM), jonka pohjalta voidaan laskea kuinka monta

kappaletta mitäkin osaa tarvitaan lopullisen lopputuotteen valmistamiseen. Kun osaluettelo yhdistetään tuotannon karkeasuunnitelmaan, voidaan esittää tuotantoon tarvittavat osat karkeasuunnitelman esittämässä aikaikkunassa. (Vollmann et al. 2018, 20)

Yksityiskohtaista materiaalisuunnitelmaa käytetään pohjana yksityiskohtaisessa kapasiteettisuunnittelussa. Se käsittelee osatuotantoon tarvittavaa kapasiteettia. Yksityiskohtaisen kapasiteettisuunnitelman tietoa voidaan hyödyntää tarvittavien avainkoneiden kapasiteetin ja työntekijöiden taitojen määrittämiseen keskipitkällä aikavälillä. Yksityiskohtainen kapasiteettisuunnittelu ei myöskään ota todellista tuotantokapasiteettia yksiselitteisesti huomioon. (Vollmann et al. 2018, 208)

3.3 Tuotannonohjauksen toiminnot

Tuotannonohjaus on jokapäiväistä operatiivista toimintaa ja sen toiminnot tähtäävät tehokkaaseen ja häiriöttömään tuotantoon. Toimintojen pääasiallisena tehtävänä on aikatauluttaa suunnitellut valmistustilaukset yksittäisille työasemille ottaen huomioon tuotannossa olevat työt, suunnitellut valmistustilaukset, olemassa olevan vapaan henkilöstö- ja konekapasiteetin ja materiaalin saatavuuden. Browne (1988) jakoi tuotannonohjauksen toiminnot töiden aikatauluttamiseen, töiden jakamiseen työasemille, materiaalien liikuttamiseen, prosessiohjaukseen ja seurantaan. Vollmann et al. (2018, 236) mallissa tuotannonohjauksen toimintoja ovat valmistustilausten vapautus, tuotannon ajoitus ja -seuranta sekä toimittajien aikataulutus ja -seuranta. Lisäksi hankinnan osalta ostotilausten vapautus ja niiden seuranta on nähty osana tuotannonohjausta. Huomioitavaa on, että malleissa ei oteta kantaa työvoiman ohjaukseen vaan henkilöstöresurssia käsitellään koneiden tapaan resurssina, jolla on jokin ennalta määritetty kapasiteetti. Todellisuudessa työntekijöiden osaaminen ja tehokkuus vaihtelee työntekijöiden välillä. Järjestelmäkehityksen myötä käyttöön tulleet tuotantojärjestelmät (Manufacturing Execution Systems, MES) mahdollistivat mm. henkilöstöresurssien tehokkaamman suunnittelun ja seurannan sekä tuotannon laadun seurannan yhdistämisen osaksi tuotannonohjausta (Kletti 2007).

Reaaliaikaisen seurannan tarkoituksena on seurata suunnitelmien reaaliaikaista toteutumista. Seuranta mahdollistaa muutosten tekemisen suunnitelmiin, mikäli alkuperäinen tuotantosuunnitelma ei jostain syystä ole toteutunut tai tule toteutumaan. Seuranta tapahtuu

keräämällä dataa tuotannon tilasta, jota voi esimerkiksi olla prosessointiajat, osan status, materiaalin saatavuus, tarkastus data ja häiriöajat. (Vollmann et al. 2018, 237; Browne 1988)

3.3.1 Tuotannonajoitus

Valmistustilauksen vapautuksessa yksittäisien valmistustilauksen konfiguraatiot lukitaan, sen tarvitsemat dokumentit laaditaan ja tilaus vapautetaan tuotantoon (Vollman et al. 2018, 236). Kun tilaus on vapautettu ja sen konfiguraatio lukittu, voidaan se ajoittaa tuotantoon. Tuotannon ajoitus ajoittaa valmistustilaukset tuotantoon yksittäisille työasemille ottaen huomioon olemassa olevan kapasiteetin ja materiaalit (Browne 1988). Tuotannonajoitus on yksi valmistavan yrityksen tärkeimmistä toiminnoista ja sillä on suuri vaikutus tuotantojärjestelmän tehokkuuteen (Frazzon et al. 2018). Valmistustilauksen operaatioiden ja reititysten avulla toiminto pystyy laskemaan olemassa olevien resurssien vapaan kapasiteetin ja operaatioiden tarvitsemat materiaalit kaikkina hetkinä ja kaikilla työasemilla. Tämän vuoksi uudet valmistustilaukset saadaan ajoitettua sellaisiin hetkiin, jolloin vapaata kapasiteettia on olemassa ja operaatioiden tarvitsemat materiaalit ovat saatavilla. (Browne 1988) Täydellisen tuotantoaikataulun aikaansaaminen on kuitenkin hyvin vaikeaa tai jopa mahdotonta. Aikataulun luominen parhaalla mahdollisella tavalla jokaiselle työpisteelle vaatii huomattavan määrän laskentatehoa, koska koneiden tai työvaiheiden lisääntyessä eri ratkaisuvaihtoehtojen määrä kasvaa huomattavasti.

Ajoitusongelmat kuvaavat resurssien (raha, työvoima, koneet, työvälineet yms.) allokointiongelmaa, jossa ne tekevät tehtäviä osana jotain prosessia. Tehtävät ovat aikaan sidonnaisia, ne kilpailevat resursseista ja niiden välillä voi olla niiden suoritusjärjestykseen vaikuttavia yhteyksiä. (Blazewicz, Ecker, Pesch, Schmidt, Sterna ja Weglarz 2019, 1) Ongelman ratkaisuksi haetaan optimaalista tapaa jakaa resurssit niin, että prosessi toimii käyttäjän toivomalla tavalla ja täyttää jotkin ennalta määritellyt tavoitteet. Sellaisessa tilanteessa, jossa tehtäviä tekevät koneet tai työasemat tekevät vain tiettyjä tehtäviä, voidaan ajoitusongelmat jakaa kolmeen kategoriaan: job shop, flow shop ja open shop -ajoitusongelmiin. Open shop -ajoitusongelmassa tehtävien määrä jokaisella työllä on sama. Flow shop -ajoitusongelmassa jokaisen työn tehtävien määrä ja niiden järjestys ovat samat. Job shop -ajoitusongelmassa eri töiden tehtävien määrät ja järjestykset vaihtelevat. Koska flow shop-ajoitusongelma kuvaa sellaisen tuotannon ajoitusongelmaa, jossa tuotettavat tuotteet virtaavat samojen

työvaiheiden läpi samassa järjestyksessä (Gupta ja Stafford Jr. 2006), kuvaa se melko hyvin kokoonpanolinjan ajoitusongelmaa. Ashour (1972) mukaan flow shop ympäristössä ja kokoonpanolinjassa on kuitenkin eroja: flow shop tuotantolinja voi toteuttaa erilaisia töitä, mutta standardituotteen kokoonpanolinja kykenee valmistamaan vain tietynlaisia töitä; kokoonpanolinjassa kaikkien töiden on mentävä jokaisen työpisteen läpi, mutta flow shop ympäristössä työ voi hypätä työpisteen yli; flow shop tuotannossa eri töiden prosessointiajat samoilla työasemilla eroavat, mutta kokoonpanolinjassa töiden prosessointiajat ovat standardiaikoja.

Tuotannonajoitukseen on esitetty lukuisia määriä erilaisia ratkaisuja ja lähestymistapoja, jotka on suunniteltu tietynlaiseen tuotantoon tietynlaisten rajoitusten vallitessa. Tokola, Ahlroth ja Niemi (2014) tutkivat kolmea uudelleenajoitustapaa flow shop ympäristössä. Ensimmäisessä uuden tilauksen tultua vanhat tilauskannassa olleet työt saivat liikkua vapaasti, toisessa vanhat työt saivat liikkua vain ajassa eteenpäin ja viimeisessä työt eivät saaneet liikkua ollenkaan. Heidän tutkimuksensa mukaan vapaasti liikkuva malli oli vain hieman parempi, kuin malli, jossa työt saivat liikkua vain eteenpäin. Vapaasti liikkuva malli oli kuitenkin laskennallisesti huomattavasti raskaampi kuin eteenpäin ajoittava malli. Viimeinen malli oli kaikissa kokeissa huonoin. He käyttivät mittarina tilausten myöhästymistä. Takeda-Berger, Zanella ja Frazzon (2019) kehittivät tuotannonajoitusmallin, joka ajoitti tuotannon automaattisesti uudelleen häiriön sattuessa. Malli otti tuotantojonon optimoinnissa huomioon komponenttien varastosaldot, keskeneräisen tuotannon ja valmistuotevaraston, mutta ei mitään muita tuotannon häiriöitä. Malli hyödynsi koneoppimista ja simulaatioihin perustuvaa optimointia. Takeda-Berger, Agostino, da Silva ja Frazzon (2022) kehittivät mallia pidemmälle, testasivat mallin toimivuutta ja vertasivat sen suorituskykyä muihin malleihin. Heidän mallinsa tuotti parhaan tuloksen muihin verrattuna, mutta he ottivat testauksessaan huomioon vain materiaalipuutoksista johtuvat häiriöt. Toivonen, Ikkala ja Niemi (2006) kehittivät tuotannonajoitusmallin MTO ympäristöön, jonka suorituskyky oli hyvä ja joka sopii suuren kokuokan käytännön ongelmiin. Malli käytti monivaiheista heuristiikkaa tilausten ajoitukseen ja se pyrki minimoimaan resurssien käyttöä. Ivanov, Sokolov, Werner ja Dolgui (2020) kehittivät tutkimuksessaan tuotannonajoitusmallin, joka hyödyntää koneiden sensoridataa sen tilasta ja tehtävien järjestystä päättäessään tuotantojärjestystä ja tehtävien ajoitusta.

3.3.2 Materiaalinhallinta

Tarvittavien materiaalien ja komponenttien määrittäminen on suhteellisen yksinkertaista. Operaatioiden reitityksen avulla voidaan laskea tarkasti tarvittavien materiaalien määrää, jolloin toimittajille voidaan kertoa tarkasti, milloin mitäkin komponenttia tarvitaan. (Browne 1988) Haastavaksi materiaalin varmistamisen tekee kuitenkin komponenttien saatavuuden epävarmuus ja komponenttipuutteen sattuessa tuotantosunnitelmaa voidaan joutua muuttamaan tuotannon jatkuvuuden varmistamiseksi tai tuotanto voi jopa pysähtyä. ATO ympäristö on erityisen herkkä komponenttipuutteille, koska komponentit ja osakokoonpanot hankitaan usein varasto-ohjautuvasti ennusteiden perusteella, mutta lopullinen tuote kokoonpannaan asiakastilauksen perusteella. Monesti eri komponenttien määrä on suuri ja ison varaston ylläpito kaikille komponenteille voi olla mahdotonta. Komponenttipuutteet heikentävät ATO ympäristön tuotannon suorituskykyä, koska ne vaikuttavat suoraan asiakkaan kokemaan palvelutasoon myöhästyttämällä asiakkaan tilaaman tuotteen toimitusta. Komponenttipuutteet voivat olla seurausta mm. toimittajan tuotannon läpimenoajan vaihtelusta, komponenttien toimitusajan vaihtelusta tai toimittajan kokemasta materiaalipuutteesta. (Mohebbi ja Choobineh 2005) Komponenttipuutteet ovat realisoituneet esimerkiksi ajoneuvoteollisuudessa puolijohdekomponenttipulan ja Covid-19 pandemian jälkeisen markkinoiden avautumisen vuoksi (Krolikowski ja Naggert 2021). Pitkällä aikavälillä komponenttipuutteisiin voidaan pyrkiä vaikuttamaan toimittajavalinnoilla, komponenttivalinnoilla tai pitämällä suurempaa varmuusvarastoa. Lyhyellä aikavälillä tuotannonohjauksen tulee kuitenkin minimoida komponenttipuutteiden vaikutukset tuotantoon.

Tuotannonohjauksen tulee myös hallita tuotantolaitoksen sisäistä materiaalivirtaa. Kokoonpanolinjalle toimitettavat osat ja valmistettavat osakokoonpanot tulee toimittaa työasemille oikea-aikaisesti, jotta työasema pääsee työskentelemään ilman odotuksia. Toisaalta suurten välivarastojen pitäminen kokoonpanolinjalla voi olla fyysisesti mahdotonta.

3.3.3 Henkilöstön hallinta

Suurin osa työvoimasuunnittelun tutkimuksesta on käsitellyt työvoimaa homogeenisenä, eikä ole ottanut huomioon työntekijöiden keskinäisiä eroja (Wirojanagud, Gel, Fowler ja Cardy 2005). Myös tutkimus työvoiman inhimillisten tekijöiden vaikutuksesta

valmistustehtäviin tai tuotantojärjestelmiin on ollut suhteellisen vähäistä. Suurin osa tutkimuksista on keskittynyt inhimillisten tekijöiden vaikutukseen ihmisten yleiseen suorituskykyyn. (Abubakar ja Wang 2019) Lisäksi monissa kaupallisissa tuotannon simulaatiotyökaluissa työvoimaa käsitellään koneiden tapaan muuttumattomana resurssina, jolloin ihmisten dynaamisesti muuttuvaa suorituskykyä ei oteta huomioon (Digiesi, Kock, Mummolo ja Rooda 2009). Todellisuudessa esimerkiksi työntekijän kokemuksen tuoma tietotaito kasvaa iän myötä, mutta suorituskyky lähtee laskemaan n. 38 ikävuoden jälkeen (Abubakar ja Wang 2019). Lisäksi työntekijöiden väsymisellä voi olla suuri vaikutus tuotantolinjan tehokkuuteen. Väsyminen johtaa tuotannon tahtiajan ja keskeneräisen tuotannon kasvamiseen ja tuotospäärin vähenemiseen. (Digiesi et al. 2009) Työntekijöiden väsymistä ja kokoonpanolinjan toistuvasta työstä johtuvia nivel- ja lihassairauksia voidaan kuitenkin vähentää oikeanlaisella työn kierrolla ja ristiin koulutuksella.

Tutkimuksen puute ja inhimillisten tekijöiden unohtaminen työvoiman suunnittelusta ja tuotannonohjauksesta voi johtua siitä, että muutokset työntekijöiden tehokkuudessa eivät näy heti, vaan ne kehittyvät pitkän ajan saatossa. Lisäksi työntekijöiden väsymisellä, osaamisen eroilla ja muilla inhimillisillä tekijöillä on tuotannolle harvemmin pysäyttävä vaikutus. Inhimilliset erot ovat kuitenkin pääosin tiedettävissä, jolloin tietoa on mahdollista hyödyntää myös tuotannon ohjaukseen ja suunnitteluun. Tietojärjestelmien kehitys on mahdollistanut työntekijöiden työajan ja osaamisen seurannan (Tao, Qi, Liu ja Kusiak 2018), jolloin automaation avulla työntekijöiden allokointi työasemille ja aikatauluttaminen perustuen työntekijöiden osaamiseen ja työnkierron suunnitelmaan voidaan tehdä automaattisesti ilman suurta manuaalista suunnittelua ja työtä.

3.4 Tuotannonohjausjärjestelmä

Tuotannonohjausjärjestelmä on tietojärjestelmä. Tietojärjestelmä koostuu fyysisistä laitteista, ohjelmistoista, datasta ja tiedonsiirtolaitteista. Tietojärjestelmässä voidaan esimerkiksi säilyttää tietoa tai käyttää sen tuottamaa tietoa päätöksenteon tukena. Järjestelmän käyttämä data on kokoelma tietoja tai faktoja, jotka eivät itsessään välttämättä kerro mitään, mutta organisoituna yhteen ja analysoituna ne tuottavat tietoa. (Jaiswal 2022) Tuotannonohjausjärjestelmät ovat usein rakennettuna osaksi yrityksen toiminnanohjausjärjestelmää. Tuotannonohjausfunktiot voivat olla sisäänrakennettu osa toiminnanohjausjärjestelmää tai

erillisiä moduuleja, jotka käyttävät toiminnanohjausjärjestelmän dataa. Järjestelmiä räätälöidään kuitenkin monesti asiakkaan tarpeiden mukaan. Valmiin geneerisen tuotannonohjausjärjestelmän käyttöönotto voi olla haastavaa, sillä jokaisen yrityksen tuotanto on hieman erilainen ja tuotannonohjausjärjestelmän tulisi ottaa huomioon kaikki tuotannon yksityiskohdat ollakseen tehokas (Vollmann et al. 2018, 238). Tuotannonohjaukseen tuotantolattialla on kehitetty tuotantojärjestelmiä (Manufacturing Execution system, MES), jonka tehtävänä on kontrolloida tuotantoa ja jakaa tietoa. MES-järjestelmän toiminnot voidaan jakaa kolmeen kategoriaan, jotka ovat tuotanto, laatu ja henkilöstö (Kletti 2007, 23). Taulukko 3 esittää jokaisen kategorian sisältämät toiminnot.

Taulukko 3. MES järjestelmän toiminnot (Kletti, 2007, 24-27)

Tuotanto	Laatu	Henkilöstö
Tuotantodatan kerääminen	Statistinen prosessihallinta	Työajan seuranta ja hallinta
Konedatan kerääminen	Vaatimustenvastaisuuden hallinta	Kannustinpalkat
Tuotannosuunnittelu	Lähtevän ja saapuvan tavaran hallinta	Lyhytaikainen työvoiman suunnittelu
Työkalujen- ja apuresurssien hallinta	Tarkastusvälineistön hallinta	Kulunvalvonta
Sisälogistiikka	Prosessidatan prosessointi	Hälytys- ja eskalaatiotoimet

Reaaliaikainen tuotantoinformaatio on hyvin tärkeää, jotta voidaan tehdä oikeita ja riittävän nopeita päätöksiä (Cottyn, Van Landeghem, Stockman, Derammelaere 2011). Tästä syystä MES järjestelmä kerää reaaliaikaista dataa tuotannon tilasta, koneiden tilasta, työkalujen ja resurssien tilasta, lähtevän ja saapuvan tavaran tilasta ja työvoiman tilasta. Tuotannosta on tarpeellista kerätä ainakin tilaus-, henkilö-, ja konekohtaiset tuotantomäärät ja -ajat. Kerääntynyttä dataa voidaan prosessoida ja käyttää johdon tarpeisiin. Reaaliaikaista dataa voidaan myös näyttää ja analysoida tuotannon tarpeisiin. Työkalujen ja apuresurssien hallinta tarvitsee tietoa niiden teknisestä tilasta, saatavuudesta ja yhteensopivuudesta eri koneiden kanssa. Sisälogistiikka hallitsee työn alla olevien kiertävien materiaalien kiertoa. Se tarvitsee tietoa mm. kiertävien ja kierrossa olevien materiaalien määrästä ja tarpeesta. (Kletti 2007, 25) Lisäksi oleellista on tietää missä varastossa ja millä varastopaikalla materiaali sijaitsee ja milloin sitä on tulossa lisää ja kuinka paljon.

Laadun statistisen prosessinhallinnan tarkoituksena on varmistaa laadun mittaustulosten pysyminen kontrollirajoissa, ilmoittaa poikkeamista ja tallentaa mittaustiedot esimerkiksi

trendien tunnistamiseksi. Laadun lähtevän ja saapuvan tavaran hallinta keskittyy tavaralähe-
tysten rekisteröimiseen, pakkausinformaation oikeellisuuteen ja poikkeamien raportoimi-
seen. Prosessidatan prosessoinnin tarkoituksena on seurata tuotantoprosessissa mitattujen
arvojen, esimerkiksi paineiden ja lämpötilojen, seuraamiseen ja analysointiin. Tuotantopro-
sessin datan seuraaminen on tärkeää, koska tuotannon laatuun vaikuttaa komponenttien ja
tekemisen laadun lisäksi myös olosuhteet. (Kletti 2007, 26)

Henkilöstön työajan seuranta ja hallinta toiminnon tarkoituksena on mahdollistaa työnteki-
joiden työhön saapumis- ja poistumisaikojen leimaaminen, poissaolojen leimaaminen ja ku-
muloituvan työajan seuraaminen. Työajan leimaaminen mahdollistaa esimerkiksi kannustin-
palkkojen tehokkaan hyödyntämisen, kun bonusjärjestelmät voidaan perustaa tehtyjen työ-
tuntien ja työn laadun perustalle. Lyhytaikaisen työvoiman suunnittelutoiminnon tarkoituk-
sena on mahdollistaa työntekijöiden työaikojen suunnittelu niin, että se ottaa tuotannon
suunnitellun kuormituksen huomioon hyödyntäen mahdollisesti automatiikkaa. Hälytys- ja
eskalaatiotoimilla tarkoitetaan erilaisia automaattisia mekanismeja, joiden tarkoituksena on
parantaa ongelmiin reagoimisaikaa antamalla hälytyksiä ja vähentää tuotannon alhaalla olo
aikaa ongelmatilanteissa. (Kletti 2007, 26-27)

MES järjestelmän tuotannosuunnittelu tähtää teknisesti toteuttamiskelpoisiin suunnitel-
miin, jotka ottavat huomioon nykyhetken tilanteen. Mitä yksityiskohtaisempia ja tarkempia
suunnitelmien pitää olla, sitä tärkeämpää on ottaa huomioon nykyhetken tilanne. MES jär-
jestelmän tuotannosuunnittelun tulisi tuotantosuunnitelman manuaalisen muuttamisen li-
säksi tarjota mahdollisuus täysin automatisoituihin muutoksiin, simulaatioon ja optimisoi-
ntiin. (Kletti 2007, 25) Lisääntynyt tietokoneiden laskentateho ja kehittyneemmät tietotekni-
set ratkaisut ovat tuoneet markkinoille myös kehittyneempiä tuotannon hienokuormitusjär-
jestelmiä. Englanninkielisessä kirjallisuudessa järjestelmistä käytetään usein termiä APS
”*Advanced Planning and Scheduling*” tai ”*Advanced Planning System*”. APS järjestelmät
tarjoavat käyttäjälle usein visuaalisen näkymän tuotantosuunnitelmaan esimerkiksi Gantt-
kaavion avulla, jonka avulla tuotannosuunnittelija voi tehdä itse muutoksia aikatauluun.
Tuotannon mallintamisen, simulaation ja tehokkaiden laskentaominaisuuksien avulla järjes-
telmä pystyy laskemaan muutosten vaikutukset kokonaisaikatauluun jopa reaaliaikaisesti,
kun muutoksia tehdään. (Wiers ja de Kok 2018) Yksityiskohtaisten suunnitelmien tekemi-
nen pitkälle tulevaisuuteen on kuitenkin kannattamatonta, jos niiden toteutumisen todennä-
köisyys on alhainen (Kletti 2007, 25).

4 Toimitusketjun resilienssi

Tehokkaalla tuotannonohjauksella voidaan tehostaa tuotannon toimintaa, mutta jatkuvat puutteet tuotannontekijöissä voi pakottaa yritykset radikaalimpiin toimiin. Toimitusketjun resilienssillä tarkoitetaan sen kykyä vastata asiakkaiden kysyntään eri tilanteissa. Kysynnän ja tarjonnan epäsuhde on seurausta kysynnän siirtymisestä, tarjonnan vähentymisestä tai koordinaation peittämisestä. Epäsuhde voi olla seurausta myös syiden yhteisvaikutuksesta ja se voi vaikuttaa toimitusketjun kaikkiin osiin. (Ergun, Hopp ja Keskinocak 2023) Digitaaliset ratkaisut ja tekoälyteknologia voivat parantaa yrityksen toimitusketjun resilienssiä parantamalla mm. toimitusketjun läpinäkyvyyttä (Ivanov ja Dolgui 2022). Lisäksi systemaattinen tuotantodatan analyysi auttaa tekemään tietoon perustuvia päätöksiä, mikä parantaa tuotannon tehokkuutta (Shao, Shin ja Jain 2014). On kuitenkin mahdollista, että paluu aikaan, jolloin voitiin olettaa komponenttien jatkuva saatavuus, ei ole mahdollista moniin vuosiin tai vuosikymmeneihin. (Ivanov ja Dolgui 2022) Puutteet olivat ennen pandemiaa poikkeuksellisia tapauksia, mutta ne ovat yleistyneet huomattavasti ja nykytilaa kutsutaankin kirjallisuudessa puutetaloudeksi (Ivanov ja Dolgui 2021). Tällaisen tilanteen pitkittyessä pelkkä digitalisaation lisääminen ei riitä puutetilanteiden torjumiseen, vaan yritysten täytyy tehdä myös toimitusketjun resilienssiä lisääviä strategisia päätöksiä ja toimenpiteitä.

Tuotanto, joka valmistaa tuotteensa asiakastilausten perusteella, on hyödyntänyt aikaisempaa toimitusketjun ketteryyttä ja materiaalin saatavuutta kaikista eniten. Asiakkaille on voitu tarjota suuri määrä eri tuote- ja tuotekonfiguraatiovaihtoehtoja, koska eri komponentit ovat olleet aina saatavilla ja niiden toimitusajat ovat olleet siedettäviä. Tällä hetkellä pahimmassa tapauksessa ATO strategiaa toteuttavat yritykset eivät pysty tuottamaan tuotteitaan asiakastilausten perusteella, vaan yritykset joutuvat valmistamaan tuotteitaan varasto-ohjautuvasti sen mukaan mitä komponentteja varastosta löytyy. (Ivanov ja Dolgui 2022) Esimerkiksi globaali puolijohdekomponenttipula pienensi kulkuneuvojen tuotantoa Yhdysvalloissa Covid-19 pandemian aikana ja auton valmistajat joutuivat valmistamaan vain kaikista kannattavimpia mallejaan (Krolikowski ja Naggert 2021; Ivanov ja Dolgui 2022). Taulukossa 4 on esitetty Ivanov ja Dolgui (2022) esittämä lista toimenpiteistä, joita voidaan hyödyntää toimitusketjun resilienssin parantamiseen. Toimenpiteitä on mahdollista tehdä toimitusketjun

kaikilla osa-alueilla. Esitettyjen toimenpiteiden tarkoituksena on parantaa toimitusketjun kykyä vastata kysyntään eri tilanteissa (Ergun et al. 2023).

Taulukko 4. Toimenpiteet toimitusketjun resilienssin parantamiseen (Ivanov ja Dolgui 2022)

Johtamisalue	Toimenpiteet
Toimitusketju	<ul style="list-style-type: none"> - Toimitusketjun kriittisten ja harvinaisten materiaalien stressitestaus. - Toimitusketjun hinnankorotusten ja toimitus- sekä kuljetuskapasiteetin stressitestaus. - Toimittajien, materiaalien ja toimitustapojen monipuolistaminen.
Kysynnän hallinta	<ul style="list-style-type: none"> - Harkitse tuotevaihtoehtojen määrää mittakaavaetujen ja standardisaation saavuttamiseksi. - Arvioi korvaavien tuotteiden riski. - Tee suunnitelmat odottamattoman asiakaskäyttäytymisen varalle. - Ota ennusteissa ja suunnitelmissa huomioon inflaation vaikutus. - Ota tuotannon suunnittelussa huomioon suuret muutokset energian ja työvoiman saatavuudessa.
Tuotanto	<ul style="list-style-type: none"> - Harkitse ATO strategiaa tuottavimpien mallien priorisoimiseksi. - Harkitse ATO strategian vaihtamista varasto-ohjautuvaksi (MTS). - Kehitä uusiokäyttöstrategioita. - Kehitä toimintojen alihankinta- ja takaisinkutsusuunnitelma/-portfolio. - Tuotantolaitosten ja logistiikan stressitestaus energia- ja työvoimapuutteiden varalle. - Hyötykäytä uusia digitaalisia teknologioita (esim. lisäävä valmistus) resilienssin parantamiseksi.

Toimitusketjun resilienssiä lisäävien toimenpiteiden valinnan lisäksi oleellista on päättää, kuinka paljon siihen ollaan valmiita panostamaan (Ergun et al. 2023). Resurssipuutteilla ja tuotannonseisauksilla on aina kustannus, mutta niin on myös esitetyillä toimenpiteillä. Tuotannonseisauksen kustannuksia voi olla mm. tuotannon kiinteät kustannukset ja asiakastytyvyyden menetys. Toisaalta resilienssin parantaminen muuttamalla tuotannonohjaus varasto-ohjautuvaksi voi heikentää asiakastytyvyyttä vähentyneen tuotevalikoiman myötä. Ergun et al. (2023) esittää toimitusketjun resilienssin mittaamista ja tavoitetason asettamista palvelutason laskentakaavalla

$$SL = \frac{C_u}{C_u + C_o}$$

, jossa C_u on ”kustannus” siitä, että tuotetta ei ole riittävästi varastossa ja C_o on kustannus siitä, että tuotetta ei voida varastoida tai sitä varastoidaan suunniteltua pidempään. Jos funktio F esittää kysynnän jakaumafunktiota tarkasteluajanjaksolla, tällöin varaston tavoitetason pitää täyttää ehto

$$F(TS) = \frac{C_u}{C_u + C_o}$$

(2)

, jossa TS on varaston tavoitetaso. Kaava tarkoittaa, että tuotteiden tilaaminen varaston tavoitetasoon (TS) asti varmistaa tarjonnan vastaamisen kysyntään tarkasteluajanjaksona todennäköisyydellä SL .

Laskentakaavan perusteella voidaan todeta, että 100 % resilienssi ei ole mahdollista muulloin kuin, jos ylimääräisen varaston pitämisestä ei koidu kustannuksia. Toiseksi optimaalinen resilienssitaso vaihtelee eri tuotteiden välillä, jos oletetaan kustannusten vaihtelevan. Kolmanneksi julkisen sektorin väliintulo on tarpeellista sellaisille tuotteille, joiden tavoiteltava resilienssitaso ylittää huomattavasti sen voittoa tavoittelevan resilienssitason. Tällaisia tuotteita ovat esimerkiksi lääkkeet, joiden voittomarginaali on pieni. Tässä tapauksessa yksityisten apteekkien ei ole kannattavaa varastoida suuria määriä lääkettä varastoissaan, koska niistä saatavat voitot ovat pienet, mutta lääkkeen loppuessa sen kustannukset voivat olla asiakkaille ja yhteiskunnalle suuret. (Ergun et al. 2023)

5 Tarkasteltavan case-yrityksen tuotantoympäristö ja tuotannonohjaus

Diplomityö on tehty toimeksiantona suomalaiselle metsäkoneita valmistavalle yritykselle, joka valmistaa tavaralajimenetelmän metsäkoneita globaaleille markkinoille. Tavaralajimenetelmässä tukkipuu katkotaan puun tilaajan haluamiin mittoihin jo hakkuupaikalla. Tavaralajimenetelmä on yleisin hakkuutapa mm. pohjoismaissa, jossa puunrunkojen halkaisija on pienempi kuin esimerkiksi Pohjois-Amerikassa (Lundbäck, Häggström ja Nordfjell 2020).

Kohdeyritys valmistaa tehtaallaan harvestereita ja kuormatraktoreita. Harvestereita valmistetaan tällä hetkellä neljää eri mallia ja kuormatraktoreita kuutta eri mallia. Lisäksi asiakkaalle on tarjolla lukuisa määrä eri optioita, joilla metsäkone saadaan räätälöityä juuri asiakkaan tarpeisiin sopivaksi.

5.1 Tuotantoympäristö

Yrityksen tuotannossa asiakastilauksen kytkeytymispiste on kokoonpanolinjan alussa. Asiakastilauksen kytkeytymispiste on se piste tuotantoketjussa, milloin valmistettava kone linkitetään tiettyyn asiakastilaukseen (Olhager 2010). Tuotannonohjausmuoto on tällöin tilauksesta kokoonpano (ATO). Tilauksesta kokoonpano soveltuu sellaiseen tuotantoon, jossa tuotannon kokonaisläpimenoaika on pitkä, eri tuotekonfiguraatioiden määrä on suuri ja lopputuotteen osakokoonpanot ovat ainakin jossain määrin modularisoitavissa. Tuotannonohjauksen tärkein ohjauspiste ATO ympäristössä on loppukokoonpanon aikataulu. (Vollman et al. 2018, 43, 374)

Tehtaalla tuotteen loppukokoonpanossa hyödynnetään imuohjautuvaa tuotantoa. Imuohjautuvassa tuotannossa työpisteelle tuleva työn aloittava signaali tulee tuotannon myöhemmistä vaiheista. Työpiste saa työskennellä vain silloin, kun sen tuottamille osille tai kokoonpanoille on tarve tuotannon seuraavassa vaiheessa. Imuohjaus vähentää välivarastojen tarvetta, pienentää eräkokoja, nopeuttaa läpimenoaikaa ja mahdollistaa tasaisemman laadun. (Vollmann et al. 2018, 279) Ideaalitulanteessa, kun pullonkauloja ei esiinny, voi tuotanto toimia

jopa tasatahtisesti, jolloin välivarastointia ei tarvita ollenkaan. Todellisuudessa pullonkauloja esiintyy, koska työpisteiden läpimenoajat eivät ole täysin samat. Tämä pakottaa välivarastojen ylläpitoon ja vaikeuttaa tuotannonohjausta.

Tuotannossa käytettäviä erilaisia komponentteja on tuhansia. Iso erilaisten komponenttien määrä pakottaa ylläpitämään laajaa toimittajaverkostoa, joka luo omat haasteensa hankinnalle. Toimittajien tuotannon läpimenoajat ja toimitusajat ovat vaihtelevia, jolloin oikea-aikainen komponenttien hankinta on hyvin tärkeää, jotta tuotannon tarpeet voidaan tyydyttää. Toisaalta samalla tavoitteena on pitää varastotasot maltillisina. Materiaalien tarvelaskenta on oleellisessa osassa onnistunutta hankintaa. Se tapahtuu toiminnanohjausjärjestelmässä automaattisesti suunnitellun tuotannon ja ennusteiden mukaan. Yrityksen sisäisen aineiston ja asiantuntijoiden mukaan osa komponenteista tilataan konekohtaisesti asiakkaan valitseman konfiguraation perusteella ja osa tilataan täysin kulutuksen ja ennusteiden mukaan. Eri työpisteiden ja komponenttien määrä aiheuttavat haasteita komponenttien fyysiselle toimitukselle työasemille. Sen avuksi on kuitenkin rakennettu työkaluja, jotka helpottavat komponenttien oikea-aikaista siirtoa.

Covid-19 pandemia ja heikko materiaalien saatavuus mm. puolijohdekomponenteilla on aiheuttanut paljon komponenttipuutteita myös yrityksen tuotannossa. Komponenttipuutteet ovat aiheuttaneet järjestysmuutoksia tuotanto-ohjelmaan, lisännyt jälkiasennettavien komponenttien määrää ja jopa pysäyttäneet tuotannon hetkeksi. Yrityksen hankintaosaston asiantuntijoiden mukaan tuotantojärjestyksen muutokset aiheuttavat haasteita komponenttien sisäiselle käsittelylle, muiden toimittajien tuotannolle ja mm. myynnille, koska joidenkin asiakkaiden koneet eivät ole valmistuneet ajoissa komponenttipuutteiden vuoksi. Materiaalivirran hallinta ja materiaalin varmistaminen tuotannon tarpeisiin on merkittävin haaste tuotannonohjauksessa. Yrityksen asiantuntijan mukaan sitä on kuitenkin kehitetty paljon vuosien aikana, joten kehityspotentiaalia ei ole niin paljon, kuin esimerkiksi henkilöstöresurssien hallinnassa. Materiaalin varmistaminen on haasteellista, koska siihen vaikuttavat yrityksestä ulkoiset tekijät kuten toimittaja ja heidän materiaalipulansa. Hankintaosaston asiantuntijoiden mukaan komponenttipulasta johtuvan tuotannon järjestysmuutoksen vaikutukset muiden komponenttien kulutukseen ja saatavuuteen on vaikea ennakoida. Haastavimpia ja joustamattomimpia ovat sellaiset komponentit, joiden tuotannon läpimenoaika ja toimitusaika ovat pitkiä. Lisäksi toimittajien voi olla vaikea arvioida sellaisten komponenttien saatavuutta, joihin vaikuttaa materiaalipuutteita. Lisäksi joidenkin toimittajien ja

kuljetusyhtiöiden tapauksessa voi olla vaikea saada ajantasaista tietoa kuljetusten sijainneista ja sisällöistä.

5.2 Tuotannonohjausprosessi

Tuotannonohjausprosessi kokoonpanossa voidaan jakaa yrityksessä kolmeen eri kokonaisuuteen. Tuotannonajoitus sisältää tuotantojärjestyksen tekemisen ja muuttamisen, tuotannon ajoituksen sekä valmistustilausten vapauttamisen. Materiaalin varmistaminen sisältää tehtävät ja toiminnot, joilla varmistetaan materiaalin ja komponenttien saatavuus tuotannolle. Henkilöstön hallinta tähtää henkilöstön ohjaamiseen siten, että henkilöstö on työskentelemässä oikeaan aikaan oikeassa paikassa ja tuotanto-ohjelman vaatima henkilöstöresurssimäärä saadaan tyydytettyä. Tuotannon kokoonpanovaiheessa koneita ei ole, joten niiden käytön ajoitusta ei oteta huomioon.

Seuraavissa kappaleissa esitetyt tuotannonohjauksen osa-alueiden toiminnot ja yksityiskohdat ovat kerätty puolistrukturoitujen ryhmähaastattelujen avulla. Haastattelut suoritettiin kolmessa osassa. Ensimmäisenä haastateltiin tuotannonajoittajaa, toisessa osassa haastateltiin hankintaosastoa sekä materiaalikoordinaattoria ja kolmannessa osassa haastateltiin kokoonpanon esimiehiä. Haastattelujen tarkoituksena oli kerätä tietoa tuotannonohjauksesta ja sen haasteista sekä tunnistaa tarpeita ja kerätä taustatietoa järjestelmän tärkeimmiltä sidosryhmiltä ja käyttäjiltä.

5.2.1 Tuotannonajoitus

Saapunutta asiakastilauuskantaa hallitaan tällä hetkellä Line Up tool -työkalun avulla. Käytännössä se on tilausputken hallintatyökalu, joka pitää tilaukset järjestyksessä niiden toimituspäivämäärän ja olemassa olevan model mixin mukaan. Model mix on ennalta määritetty sääntö, joka määrittää eri tuotteiden suhteellisen määrän tuotanto-ohjelmassa. Se tasaa lopputuotteiden saatavuutta niin, että kaikkien mallien saatavuus on yhtä pitkällä tulevaisuudessa, vaikka mallien kysyntä vaihtelisikin.

Tehtaan tuotannon ajoittaja määrittää manuaalisesti tuotannon päivänsisäisen järjestyksen. Käytännössä se tehdään ottamalla tuotantojono Microsoft Excel taulukkolaskentaohjelmaan, jossa tuotantojonoa verrataan tiedettyihin materiaali- ja tuotantorajoitteisiin. Päivänsisäinen

järjestys syntyy siten, että ajoittaja määrittelee valmistustilauksille valmistumisajankohdat järjestelmään, jotka eivät ole samat. Se tilaus, jonka valmistumisajankohta on aikaisempi, on järjestyksessä aiemmin. Ajoittaja hyödyntää järjestyksen muodostamisessa tiedettyjä päivänsisäiseen järjestykseen vaikuttavia sääntöjä. Säännöt pyrkivät tasaamaan kaikkien tuotantolinjojen työkuormaa. Työvaiheiden ajoitus syntyy työvaiheiden reitityksen, standardi-työaikojen ja valmistumisajankohdan kautta.

5.2.2 Materiaalin varmistaminen

Materiaalin varmistamista tehdään aktiivisesti koko ajan. Materiaalipuutteisiin pyritään vaikuttamaan mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, koska lähellä tuotannon aloitusta tapahtuvat tuotantojärjestysmuutokset vaikuttavat mm. valmistustilauskohtaisten komponenttien tilausjärjestykseen. Toimittajalla voi olla vaikeuksia toimittaa ajallaan komponentteja sellaisille valmistustilauksille, joiden aikataulu on aikaistunut. Tällaisesta tilanteesta voi syntyä dominoefektin tapaisesti ongelmia monille toimittajille ja omalle tuotanto-ohjelmalle. Toisaalta toimittajan materiaalipula voi johtaa siihen, että ennusteiden mukaan tilattavat komponentit loppuvat, koska toimittaja ei kykene toimittamaan sovittuja ostotilauksia. Monet materiaaliongelmat tulevat kuitenkin ilmi vasta myöhäisessä vaiheessa ja jäädytettyjen valmistustilauksien tuotantojärjestystä joudutaan muuttamaan.

Materiaalien varmistaminen valmistustilauksille perustuu komponenttien varastosaldoihin, suunniteltuun ja ennustettuun kulutukseen sekä ostotilauksien tilausmääriin ja toimituspäivämääriin. Materiaalipuutteet johtuvat pääasiassa toimittamattomista tai toimittajan eteenpäin siirtämistä ostotilauksista. Joskus materiaalipuutteet voivat olla seurausta vääristä varastosaldoista tai laatutapauksista, jolloin toimittaja on toimittanut epäkuranttia tavaraa tai tehtaan omavalmistekomponenteissa on ollut laadullisia ongelmia. Väärät varastosaldot voivat olla seurausta mm. väärästä toimitusmäärästä, toimituksessa hävinneistä komponenteista, tuotteiden rakennevirheistä toiminnanohjausjärjestelmässä, unohdetuista saldovähennyksistä laatutapauksissa tai inhimillisistä näppäilyvirheistä toimitusta vastaanottaessa.

Haastattelujen perusteella ongelmaksi materiaalin varmistamisessa nähtiin se, että komponenttipulan vuoksi näkymä tulevaisuuden materiaalitilauksista ei ole luotettava, koska toimittajat ja kuljetusyhtiöt eivät välttämättä kykene antamaan luotettavaa arviota sovitun ostotilauksen toimituspäivämäärästä. Lisäksi logistiset ongelmat ovat lisänneet

toimitusaikojen vaihtelua ja kriittisten komponenttien tapauksessa on jouduttu turvautumaan nopeampiin ja kalliimpiin toimitusvaihtoehtoihin.

Materiaalien saatavuus pitää olla varmistettuina valmistustilaukselle ennen kuin se jäädytetään. Kuitenkin jos puuttuva komponentti on sellainen, että se voidaan jälkiasentaa lopputuotteeseen, voi valmistustilauksen jäädytys olla mahdollista. Jokaisen komponentin jälkiasennuskelpoisuus ja hyväksyttävä jälkiasennusten määrä arvioidaan kuitenkin tapauskohtaisesti materiaali puutteen ilmetessä.

5.2.3 Henkilöstön hallinta

Tuotantokapasiteetille tarvittava henkilöstöresurssin määrä on laskettu resurssilaskennalla etukäteen. Laskelmat perustuvat teoreettiseen tehtaan tuotantojärjestelyjen kapasiteettiin, model mixiin, arvioituihin tai kelloitettuun asennustöiden standardityötunteihin ja arvioituihin poissaolomääriin. Laskelmissa on kuitenkin tarkentamisen varaa, sillä työntekijät ovat erilaisia ja standarditunnit ovat kerran mitattuja työaikoja, eivätkä ne heijasta todellista oppimisen kautta tullutta työn tehostumista tai normaalia työn tehokkuuden vaihtelua.

Kokoonpanolinjalla työtä tehdään kahdessa vuorossa. Työnjohtajat ovat määritelleet sellaiset työvuorot työntekijöilleen, että työvuoroissa on riittävä määrä työntekijöitä. Työntekijöiden vuorokalenterit ovat määritelty työajanseurantajärjestelmään, mutta työntekijöiden työpisteitä ei. Työpisteet ja niiden kierto on sovittu työnjohtajan ja työntekijöiden kesken ja ne vaihtelevat tiimien välillä.

Poissaolojen ilmaantuessa työntekijät tuuraavat toisiaan oman tiimensä sisällä. Kokoonpanolinja on jaettu neljään eri tiimiin eri työnjohtajille. Tiimien välillä tuurausta tapahtuu vähän. Koska työntekijöille ei ole selkeää näkymää muiden työpisteiden tilanteesta, joutuu työnjohtaja kertomaan, jos tuurausta tarvitaan tai työntekijän täytyy itse poistua muille työpisteille tarkastamaan tilanne. Ongelmia voi syntyä erityisesti työvuorojen alussa, jolloin työnjohtaja ei välttämättä ole vielä paikalla ja työntekijöille ei ole vielä hahmottunut ketä on saapunut töihin.

Työntekijöiden osaamista seurataan osaamismatriisin avulla, johon on merkitty kaikki työpisteet, joilla työntekijä on työskennellyt. Se ei kuitenkaan ota kantaa esimerkiksi siihen, kuinka kauan edellisestä työskentelykerrasta jollain työpisteellä on kulunut. Toisaalta se ei

ota myöskään siihen kantaa onko työpisteen työnkuva muuttunut. Haastattelujen perusteella tuli ilmi, että työntekijän harjaantuminen työpisteen tehtäviin on hyvin vaihtelevaa ja se voi kestää muutamasta päivästä kuukauteen. Myös työn unohtaminen on yksilöllistä. Osaamismatriisiin ei ole merkittynä työntekijän saamia yrityksen sisäisiä koulutuksia tai lainalaisia koulutuksia, vaan niitä ylläpidetään erillisessä järjestelmässä. Poissaolon sattuessa työnjohtaja voi kuitenkin osaamismatriisista tarkastaa ketkä työntekijät ovat työskennelleet aikaisemmin tuuraavaa työntekijää tarvitsevilla työpisteellä.

5.3 Tuotantoympäristön ja tuotannonohjauksen haasteet

Taulukossa 5 on esitetty yhteenveto yrityksen tuotantoympäristön tuomista ja tuotannonohjauksessa esiintyvistä haasteista ja kehittymismahdollisuuksista. Taulukossa on lisäksi esitetty, miten tieto on kerätty. Esitetyt yksityiskohdat ovat tärkeässä osassa uuden järjestelmän vaatimusmäärittelyssä.

Taulukko 5. Tuotantoympäristön ja tuotannonohjauksen haasteet ja kehitysmahdollisuudet case-yrityksessä

Asia	Kuvaus	Tiedonlähde
Suuri erilaisten komponenttien määrä	Suuri komponenttien määrä pakottaa ylläpitämään laajaa toimittajaverkostoa, vaikeuttaa materiaalin hallintaa tuotantolattialla ja pakottaa tarkkaan materiaalin varmistamiseen.	Järjestelmätutkimus, haastattelut, vapaat keskustelut
Tilattavien komponenttien vaihtelevat läpimeno- ja toimitusajat	Vaikeuttaa materiaalityökalujen ja materiaalien varmistamista. Pakottaa varmuusvarastojen ylläpitoon, mutta välikä varmuusvarastotkaan eivät riitä.	Oma pohdinta, haastattelut
Materiaalin varmistamisen tärkeys	Materiaalin varmistaminen on kriittisessä osassa tuotannon ohjauksessa. Materiaalipuutteet ovat olleet suurin syy tuotannon vaikeuksille menneisyydessä.	Haastattelut, vapaat keskustelut, oma pohdinta
Henkilöstön ohjauksen kehityspotentiaali	Henkilöstön ohjauksessa on paljon kehityspotentiaalia. Henkilöstön riittävydestä ei ole ollut suurempia ongelmia, joten siihen ei olla panostettu niin paljon, kuin materiaalin varmistamiseen.	Vapaat keskustelut, oma pohdinta
Tuotantojärjestysmuutoksen vaikutukset	Tuotantojärjestysmuutosten vaikutukset muiden komponenttien kulutukseen on vaikea ennakoita. Vaikutukset voivat olla kuitenkin suuria ja ne pitäisi pystyä ennakoimaan ajoissa.	Haastattelut
Myöhästyneen tuotannon vaikutus materiaalin tarkasteluun	Järjestelmätasolla myöhässä olevat valmistustilaukset vaikeuttavat materiaalin varmistamista, koska valmistustilauksen pyytämien materiaalien tarvepäivät ovat väärin.	Haastattelut, oma pohdinta, järjestelmätutkimus
Näkyvyyden puute kuljetuksessa olevien komponenttien sijainnista ja saapumisesta	Kuljetuksessa olevien komponenttien saapumisesta on vaikea saada tarkkaa arviota. Tällä hetkellä arvio tehdään oman kokemuksen perusteella.	Vapaat keskustelut, haastattelut, oma pohdinta

6 Yrityksen tuotannonohjausjärjestelmän vaatimusmäärittely

Tämä vaatimusmäärittely keskittyy automatisoidun tuotannonohjausjärjestelmän käyttäjävaatimusten, käyttömallin ja järjestelmän vaatiman datan määrittelemiseen. Lisäksi määritellään karkean tason järjestelmävaatimukset niiltä osin, kun on oleellista. Järjestelmä keskittyy vain kokoonpanolinjan ajoittamiseen ja resurssien tarkasteluun sekä -ohjaamiseen. Taustatietoa ja käyttäjien tarpeita vaatimustenmäärittelyn tueksi on kerätty työn osana suoritettujen haastattelujen avulla.

Yritys on suunnitellut rakentavansa itse tuotannonohjausjärjestelmän. Tämä työ avustaa yritystä järjestelmän kehitystyössä. Seuraavissa kappaleissa esitellään vaatimusten määrittelyn laajuus, käyttäjävaatimukset sekä käyttömalli ja järjestelmävaatimukset niiltä osin, kun ne sisältyvät rajaukseen.

6.1 Käyttäjävaatimukset

Tässä määritellyt käyttäjävaatimukset ovat tulevan järjestelmän käyttäjiltä tulleita vaatimuksia siitä, mitä järjestelmällä pitää saada aikaan ja miten sitä pitää pystyä käyttämään. Vaatimukset on laadittu haastattelujen perusteella ilmenneistä tarpeista ja toiveista. Käyttäjävaatimukset on seuraavissa kappaleissa jaettu osiin tuotannonohjauksen- ja järjestelmän päätoiminnallisuuksien mukaan.

6.1.1 Tuotantoputken järjestäminen ja ajoitus

Tuotannonohjausjärjestelmä järjestää valmistustilaukset ennalta määritettyjen rajoitusten ja asiakastilausten toimituspäivämäärän mukaan tuotantoon. Järjestelmä ottaa huomioon tuotannon päivänsisäiset rajoitteet, kun valmistustilauksen suunniteltuun valmistuspäivämäärään on 30 tai alle työpäivää. Järjestelmä ajoittaa automaattisesti tuotantoputken joka yö uudelleen. Käytännössä automaattinen ajoittaminen tarkoittaa valmistustilausten valmistuspäivämäärän eli viimeisen tuotantovaiheen valmistusajankohdan päivittämistä, mikäli edellisen päivän kokoonpanolinjaan lähteneiden koneiden määrä eroaa suunnitellusta.

Uudelleen ajoittaminen on tärkeää, jotta järjestelmätasolla ei olisi myöhässä olevia valmistustilauksia. Myöhässä olevat valmistustilaukset vaikeuttavat mm. materiaalitarvelaskentaa ja linjan kuormituksen laskentaa, sillä materiaalien tarvepäivämäärät ja työvaiheiden ajat eivät ole todelliset.

Lähellä tuotantohetkeä järjestys ei normaalitilanteissa muutu, mutta niin voi käydä yllättävien materiaalipuutteiden sattuessa. Järjestelmä ei saa muuttaa jäädytettyjen valmistustilausten järjestystä automaattisesti, mutta sen tulee ilmoittaa materiaali- ja henkilöstöresurssipuutteista sekä ehdottaa sopivaa väliä tuotantoputkesta valmistustilaukselle. Järjestelmän tulee ottaa ehdotuksessaan huomioon ennalta määritetyt tuotantorajoitteet, suunniteltu valmistuspäivämäärä sekä päivämäärä, jolloin puutteena ollut materiaali pitäisi olla tuotannon käytettävissä. Jos puutteena ollut materiaali on omavalmisteosan materiaalia, tulee myös sen tuotannon läpimenoaika ottaa huomioon.

Valmistustilauksen jäädytyksessä järjestelmä jäädyttää automaattisesti yhtä monta valmistustilausta, kuin edellisenä päivänä on koneita lähtenyt kokoonpanolinjaan. Jos suunniteltavan päivän suunniteltu tuotantokapasiteetti on vähemmän kuin edellisenä päivänä kokoonpanolinjaan lähteneiden koneiden määrä, jäädyttää järjestelmä suunnitellun tuotantokapasiteetin verran valmistustilauksia. Tällöin jäädytetty tuotantoputki ei kasva kohtuuttoman mitaiseksi, vaikka tuotanto olisikin jättämässä.

Järjestelmässä pitää olla mahdollisuus lukita valmistustilaus paikalleen valmistuspäivämäärän mukaan. Tällaisessa tapauksessa valmistustilauksen valmistuspäivämäärä ei muutu, vaikka tuotanto olisikin myöhässä vaan kyseessä oleva valmistustilaus nousee prioriteettijärjestyksessä ylöspäin. Tuotannonajoittajalla on aina mahdollisuus manuaalisesti siirtää minkä tahansa valmistustilauksen järjestystä ja ajoitusta.

6.1.2 Henkilöstöresurssien kuormitus ja hallinta

Järjestelmä näyttää tuotantolinjalle tulevan työmäärän työpiste-, päivä- ja vuorokohtaisesti, mikä helpottaa työnjohtajien tekemää lyhyen aikavälin henkilöstöresurssisuunnittelua. Kuormitusta näytetään myynnin jääjaksosta eteenpäin, jolloin asiakastilauksen konfiguraatioon ei tule enää muutoksia. Kuormituksen laskennassa käytetään ennalta määritettyjä standardityötunteja, jotka ilmaisevat kuinka monta henkilötyötuntia mikäkin asennustyö kestää.

Kun tiedetään päivän tai vuoron kaikki suunnitellut työt ja niiden standardityötunnit, voidaan laskea, kuinka monta henkilötyötuntia vuoron kuormitus on. Tuotantolinjojen työnjohtajat voivat käyttää kuormitustietoa henkilöstömäärän suunnittelussa ja ohjaamisessa.

Jotta järjestelmä voi verrata henkilöstöressurssien riittävyyttä tuotanto-ohjelmalle, täytyy työntekijöiden suunnitellut työasemat työpäivittäin olla merkittynä järjestelmään. Tällöin järjestelmä voi tunnistaa jo etukäteen työpisteet, joille on suunniteltu liian vähän työntekijöitä verrattuna vuoron kuormitukseen. Kun järjestelmässä on päivittäinen tieto työntekijän työpisteestä ja työntekijä ei saavu työvuoronsa alussa töihin, voi järjestelmä automaattisesti ilmoittaa muille työntekijöille, että kyseiseltä työpisteeltä puuttuu työntekijä ja sinne kaivataan lisäresursseja. Työntekijöiden ohjauksen voi suorittaa esimerkiksi tuotantolinjalla olevilla televisioilla tai työpisteiden tietokoneilla. Automaattinen työpisteiden henkilöstöressurssien ohjaus henkilöstön puutetilanteessa parantaisi työntekijöiden itseohjautuvuutta ja työpisteiden henkilöstötilanne olisi työntekijöille selvä jo ennen kuin työnjohtajat saapuvat töihin.

Järjestelmän tulee ottaa huomioon työntekijöiden osaaminen, jotta henkilöstön ohjaaminen voidaan perustaa heidän todellisen osaamisensa pohjalle. Karkean tason osaamisen seurantaan järjestelmä hyödyntää työntekijöiden osaamismatriisia, jossa esitetään kaikki työasemat, joilla henkilö on historiassa työskennellyt. Lisäksi osaamismatriisiin tulee olla ilmoitettuna työntekijöiden yrityksen sisäiset-, sekä lainalaiset koulutukset ja niiden voimassaolo päivämäärä.

Järjestelmä pisteyttää työntekijöiden osaamisen eri työasemilla. Pisteytystä voidaan hyödyntää erityisesti sellaisissa tilanteissa, kun tarvitaan korvaavaa työntekijää jollekin työpisteelle, jolloin järjestelmä voi ehdottaa työntekijöitä osaamispisteiden perusteella. Yhdistettynä työasemien päivän kuormitukseen, järjestelmä voi ehdottaa osaavia työntekijöitä sellaisilta työpisteiltä, joiden päivän kuorma on pienempi. Osaamispisteisiin vaikuttaa positiivisesti työpisteellä työskennelty aika. Negatiivisesti vaikuttaa taas se aika, joka on kulunut pisteellä työskentelemisestä. Haastattelujen perusteella työn oppiminen vie työntekijältä muutamasta päivästä kuukauteen ja osaamisen heikentyminen on myös hyvin yksilöllistä. Jos osaamispisteiden skaala on 0–100, kasvattaa yksi työskennelty työvuoro osaamispisteitä 5 yksikköä ja pisteet laskevat 0,275 yksikköä joka päivä sellaisilta asemilta, joilla henkilö ei kyseisenä päivänä työskennellyt. Osaamispisteiden heikentymisessä otetaan huomioon myös sellaiset päivät, jolloin ei työskennellä. Tällä pisteytyksellä henkilön osaamispisteet kasvavat

maksimiin noin kuukauden työskentelyn jälkeen ja heikentyy nolnaan noin vuoden kuluessa. Koska yrityksen valmistamat tuotteet ovat melko pitkälle asiakkaan tarpeiden mukaan konfiguroituja, on tuotteiden kokoonpanoissa paljon eroja. Jotta henkilöstön ohjaamista vaihtelevassa tuotannossa voidaan tarkentaa, pitää osaamismatriisin ottaa huomioon tuoterakenteet, joita jokainen asentaja on asentanut. Järjestelmä kirjaa ylös kaikki suunnittelun osarakennekoodit (Engineering top number, ETN), joita asentaja on asentanut. ETN numerot voidaan hakea valmistustilauksilta, jotka asentajan työvuoron aikana on kulkenut hänen työasemansa läpi. Jos työasemalle on tulossa sellainen valmistustilaus, joka sisältää sellaisen ETN numeron, jota työasemalla työskentelevä asentaja ei ole aiemmin asentanut, järjestelmä ilmoittaa kyseisen alueen työnjohtajalle ristiriidasta. Työnjohtaja voi tällöin oman harkinnan mukaan ohjata toisen työntekijän, joka on aiemmin asentanut kyseisen tuoterakenteen, autamaan asennuksessa.

6.1.3 Materiaalin varmistaminen tuotannolle

Järjestelmä tarkastelee myös materiaalien saatavuutta, eikä se jäädytä automaattisesti sellaisia valmistustilauksia, joilta puuttuu materiaalia. Järjestelmä ilmoittaa etukäteen, mihin valmistustilauksiin materiaali puutteet vaikuttavat, mitkä materiaalit valmistustilaukselta puuttuu ja näyttää myöhässä olevan ostotilauksen tiedot tai seuraavan ostotilauksen tiedot. Jos komponentilla on edes yksi myöhässä oleva ostotilausrivi, mitään kyseisen toimittajan kyseisen komponentin ostotilausriviä ei oteta huomioon, koska ei voida olla varmoja komponenttien todellisesta saapumisesta. Tulevaisuudessa ostotilausrivin saapumista on mahdollista ennustaa tai arvioida rahtiseurannan avulla. Rahtiseurannan saapumisarviota voidaan hyödyntää esimerkiksi sellaisessa tilanteessa, kun ostotilausrivin vastaanotto on myöhässä suunnitellusta ajasta, tilaus tiedetään olevan kuljetuksessa ja kuljetusyhtiön tarjoamia terminaalikirjauksia on saatavilla.

Jos tuotantoon menevillä jäädytetyillä valmistustilauksilla on materiaali puutteita, järjestelmä antaa käyttäjälle mahdollisuuden valita ajoitetaanko tuotantoon muita sellaisia valmistustilauksia, joille kaikki materiaalit ovat jo varmasti saatavilla vai pidetäänkö tuotantojono ennallaan välittämättä materiaali puutteista. Tuotantojono saatetaan pitää ennallaan, jos uskotaan puuttuvien komponenttien saapuvan ennen niiden tarvetta kokoonpanolinjalla tai ne päätetään jälkiasentaa. Järjestelmään pitää olla mahdollista merkitä, jos komponenttia ei

oteta huomioon materiaalin tarkastelussa tai se asennetaan jälkikäteen. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi hyvin suuren kulutuksen osat, kuten pultit ja mutterit ja jälkiasennettavat osat.

Järjestelmästä on suoraan mahdollisuus lähettää inventointipyynnöksi komponentille. Järjestelmä luo inventointitiimin Microsoft Planner sivulle inventointipyynnökortin, jossa lukee inventointipyynnön tarvitsemat tiedot. Kortista tulee tulla ilmi, että se on tuotannonohjausjärjestelmän generoima kortti sekä sen käyttäjän tunnus, joka tuotannonohjausjärjestelmästä loi inventointipyynnön. Lisäksi korttiin merkitään inventoitavan komponentin tunnistenumero. Inventointipyynnön lähettäminen voi olla tarpeellista silloin, kun tiedetään jonkin komponentin loppuvan ja halutaan varmistua komponentin varastosaldon paikkansa pitävyydestä ja valmistustilausten määrästä, joille komponentti riittää.

6.2 Käyttömalli

Käyttömallilla pyritään kuvaamaan järjestelmän käyttöä sen käyttäjien näkökulmasta. Tämän vaatimusten määrittelyn tueksi Simmons (2006) esittelemästä käyttömallista on käytettäväksi valittu persoonat eli käyttäjäryhmät ja käyttötapaukset. Käyttäjäryhmien avulla kuvataan järjestelmän käyttäjiä ja heidän tarpeitaan järjestelmästä. Käyttötapaukset kuvaavat järjestelmän toimintoja ja järjestelmän käyttöä sekä niiden ja käyttäjien suhteita. Käyttötapausdiagrammi kokoaa yhteen käyttäjät ja käyttötapaukset yhteen kuvaan.

6.2.1 Käyttäjäryhmät

Järjestelmällä on kolme pääasiallista käyttäjäryhmää, jotka ovat tuotannonajoittaja, materiaalkoordinaattori ja tuotannon työjohto. Käyttäjäryhmät käyttävät pääasiallisesti järjestelmän eri toimintoja. Tuotannonajoittaja käyttää laajimmin järjestelmän eri toimintoja ja hänen tarpeensa menevät osittain päällekkäin kahden muun käyttäjäryhmän kanssa. Taulukossa 6 on esitetty järjestelmän käyttäjäryhmät ja heidän piirteensä.

Taulukko 6. Persoonat

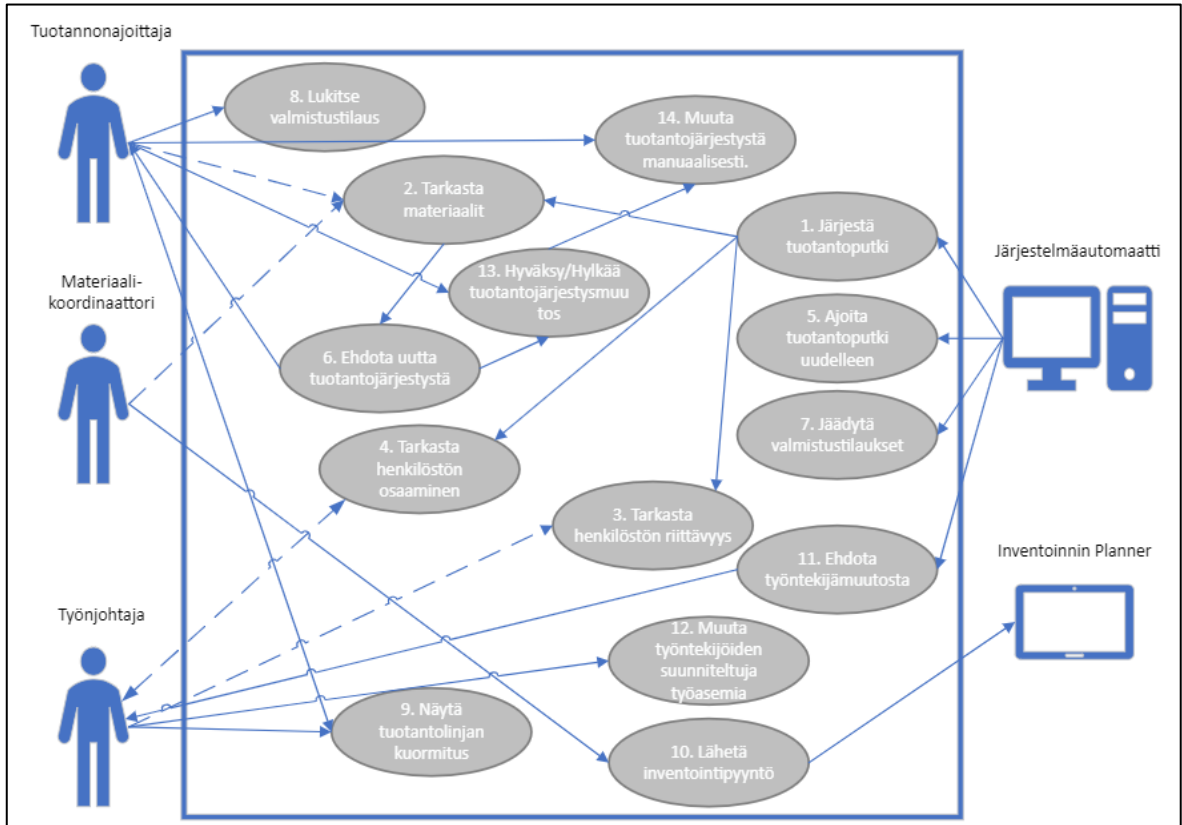
	Tuotannonajoittaja Pääkäyttäjä	Materiaalikoordi- naattori	Työnjohto
Tavoite	Suunnitella tuotantoputki niin, että tuotanto voi toimia mahdollisimman häiriöttömästi ja valmistustilaukset valmistuvat mahdollisimman lähellä niiden suunniteltua valmistuspäivämäärää.	Varmistaa materiaali tuotannolle ja ohjata materiaalin liikettä työasemille.	Varmistaa tuotannon henkilöstön riittävyys ja osaaminen tuotanto-ohjelmalle.
Pelot	Tuotantojärjestykseen vaikuttavat materiaalipuutteet	Materiaalipuutteet, komponenttien kittausvirheet, epätieto materiaalin saapumisesta	Henkilöstöresurssipuutteet, työtapaturmat
Yleiset toimet	Valmistustilauksen jäädytys, tuotantojärjestyksen hienosäätö, materiaalien varmistaminen valmistustilauksille	Materiaalien varmistaminen valmistustilauksille, materiaalien koordinointi, logistiikan koordinointi	Työntekijöiden koordinointi

6.2.2 Käyttötapaukset

Liitteessä 1 on esitetty haastattelujen perusteella määritellyt järjestelmän käyttötapaukset, jotka järjestelmän tulee mahdollistaa. Käyttötapausten tarkoituksena on esittää järjestelmän käyttöä ja kuvata sen toiminnallisuuksia. Tarkempi järjestelmävaatimusten määrittely ja järjestelmäsuunnittelu tehdään yrityksen IT-osaston toimesta tämän dokumentin pohjalta.

Käyttötapauksesta on dokumentoitu sen nimi, toimijat, kuvaus, laukaisija, lähtö- ja tulostiedot, tärkeysaste, käyttötiheys sekä mahdolliset olettamat. Päätoimija on käyttötapausten yleisin toimija ja käyttötapausten laukaisija. Toissijaiset toimijat käyttävät käyttötapausten tuottamaa tietoa tai laukaisevat käyttötapausten harvemmin. Kuvaukseen on kuvattu käyttötapausten kulku karkealla tasolla. Laukaisija kuvaa käyttötapausten laukaisevaa tapahtumaa. Lähtötiedot kuvaavat mitä tietoja järjestelmä käyttää käyttötapauksessa, ja tulostiedot kuvaavat käyttötapausten tuottamaa tietoa. Tärkeysaste kuvaa käyttötapausten kriittisyyttä järjestelmän toiminnalle. Käyttötiheys kuvaa käyttötapausten tapahtumisen tai käytön tiheyttä, eli sitä kuinka monesti se laukaistaan jossakin aikaikkunassa. Olettamat kuvaavat

käyttötapausten luomishetkellä vallinneita oletuksia. Kuva 6 esittää käyttötapaukset käyttötapausdiagrammissa, joka kokoaa yhteen järjestelmän käyttäjät ja käyttötapaukset.



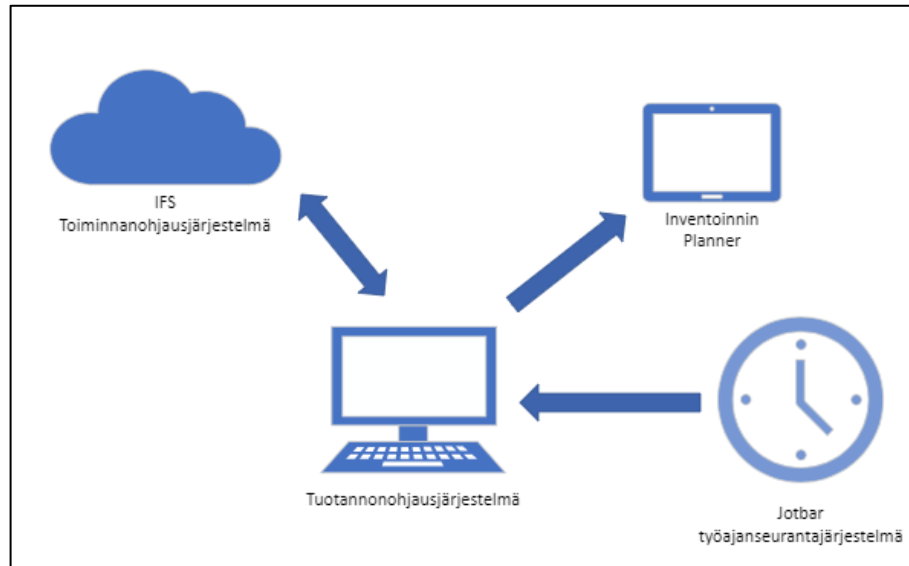
Kuva 6. Käyttötapausdiagrammi

Käyttötapausdiagrammissa käyttötapauksia ympäröivät kehykset kuvaavat järjestelmän rajapintaa muihin järjestelmiin ja käyttäjiin. Järjestelmäautomaatti kuvaa järjestelmän sisäisiä laukaisumekanismeja, jotka käynnistävät järjestelmän toimintoja automaattisesti. Selkeyden vuoksi se on esitetty rajapinnan ulkopuolella, vaikka se onkin osa järjestelmää. Monilla käyttötapauksilla on vain yksi pääasiallinen toimija, mikä johtuu siitä, että käyttäjäryhmien tarpeet eroavat toisistaan. Tuotannonajoittajan tarpeet ovat laajimmat ja hän voi laajimmin hyödyntää järjestelmän eri toimintoja.

6.3 Järjestelmävaatimukset datalle

Datasta on tulossa avaintekijä tuotannon kilpailukyvyyn parantamiselle (Kusiak 2017). Suunniteltu tuotannonohjausjärjestelmä käyttää ja yhdistelee erilaista dataa yrityksen eri tietolähteistä. Kuva 7 esittää järjestelmän käyttämän datan lähteet. Suurin osa järjestelmän tarvitsemasta datasta sijaitsee toiminnanohjausjärjestelmän tietokannassa. Järjestelmä käyttää myös

mm. työajanseurantajärjestelmän dataa. Toisaalta osa käyttötapausten pohjalta muotoutuvista toiminnallisuuksista vaativat sellaista dataa, jota yrityksessä ei vielä ole tai yrityksen datan tarkkuus ei ole vielä riittävällä tasolla.



Kuva 7. Järjestelmän käyttämät tietojärjestelmät

Taulukko 7 esittää järjestelmän toimintaan vaatiman datan, sen lähteet, siihen liittyvät käytötapaukset ja huomioita mm. datan tarkkuudesta. Suurin osa järjestelmän käyttämästä datasta sisältää tietoa tuotannontekijöiden tilasta. Esimerkiksi valmistustilauksilta voidaan hakea tieto sen suoritetuista ja suorittamattomista työvaiheista, ostotilauksilta saadaan tieto materiaalin saapumispäivästä sekä komponenttien määrästä. Lisäksi työntekijöiden leimat kertovat ketä on saapunut töihin, joka yhdistettynä työntekijöiden työasemakalenteriin kertoo kuinka monta työntekijää kullakin työasemalla pitäisi olla töissä.

Taulukko 7. Järjestelmän vaatima data

Dataobjekti	Lähde	Käyttötapaus	Huom.
Valmistustilaukset	IFS	ID: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11	Valmistustilauksen tiedot, tuoterakenne, operaatiot
DOP-tilaukset	IFS	ID: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11	DOP-tilauksen tiedot, tuoterakenne, operaatiot
Model-mix	IFS	ID: 1, 6	
Tuotannon päivänsisäiset rajoitteet	-	ID: 1, 6	
Komponenttien varastosaldot	IFS	ID: 2, 10	Nimikkeiden varastosaldot ja varastopaikkojen tiedot
Ostotilaukset	IFS	ID: 2, 6	Ostotilauksen tiedot, Ostotilausriivien tiedot
Osarakenteiden työajat	IFS	ID: 3, 9	Tällä hetkellä "standarditunteina"
Työntekijöiden työasema kalenteri	-	ID: 3, 4, 9, 11, 12	Ei ole vielä olemassa. Hallitaan järjestelmässä.
Työntekijöiden vuorokalenteri	Jotbar	ID: 3, 4, 9, 11, 12	
Työntekijöiden leimat	Jotbar	ID: 3, 9, 11	Työntekijöiden saapumis- ja poistumisleimat, ennakkoleimat, lomat yms.
Työntekijöiden osaamismatriisi	-	ID: 4, 11	Työasemat, joilla työntekijä on työskennellyt ja osarakenteet, joita hän on asentanut.
Nimikkeen tiedot	IFS	ID: 10	Varastonimike, ostonimike

Dataobjektit, joiden lähteeksi on merkitty viiva (-), ovat tällä hetkellä ylläpidettyinä esim. Excel-tiedostoissa tai niitä ei ole olemassa ollenkaan. Tuotannon päivänsisäiset rajoitteet ovat sellaisia sääntöjä, joita tuotannonajoittaja noudattaa hienosäätäessään päivänsisäistä tuotantojärjestystä. Säännöt tulee sisällyttää järjestelmän ajoituslogiikkaan, joten ne tulee kääntää järjestelmän ymmärtämäksi logiikaksi. Jos päivänsisäiset rajoitteet ovat muuttuvia, olisi järjestelmään hyvä sisällyttää sääntöjen hallintatoiminto, jossa tuotannonajoittaja voisi muokata käytössä olevia logiikkoja. Työntekijöiden työasemakalenteria ei aikaisemmin ole käytetty, joten se tulee rakentaa osaksi järjestelmää. Työasemakalenterin tulisi tuottaa

järjestelmälle tieto työntekijöiden työasemista työpäivinä. Työasemakalenteriin voisi olla käytännöllistä hakea tieto työntekijöiden suunnitelluista lomista ja muista ennakkoleimoista. Työnjohtajat ovat käyttäneet työntekijöiden osaamismatriisia aiemmin, mutta sitä on ylläpidetty Excel-tiedostossa ja ylläpito on ollut osittain manuaalista. Lisäksi nykyisessä osaamismatriisissa ei ole seurattu työntekijöiden osaamista ETN-tasolla.

7 Kehityskohteet

Työssä määritelty järjestelmä vaatii toimiakseen muutoksia käyttäjien toimintamalleihin ja nykyiseen dataan. Lisäksi järjestelmän toimintaa voidaan kehittää esimerkiksi data-analytiikan ja koneoppimismallien avulla. Toisaalta muuttunut maailmantilanne voi pakottaa yritykset tekemään vielä suurempia muutoksia lisätäkseen toimitusketjunsa kykyä vastata asiakkaiden kysyntään.

7.1 Järjestelmän vaatimat muutokset ja kehityskohteet

Järjestelmään suunniteltu työntekijöiden työasemien määrittäminen etukäteen vaatii työnjohtajilta uusien työskentelytapojen omaksumista. Haastatteluissa ilmeni, että tällä hetkellä työasemia ei ole määritetty järjestelmätasolla ollenkaan etukäteen, vaan työntekijöiden kanssa on sovittu tietty työasemien kiertomenetelmä, jota he toteuttavat. Työnjohtajien tulisi omaksua työskentelyynsä uusi toimintamalli, jossa työntekijöiden työasemat määritetään samalla, kun työntekijöiden työvuorot määritetään. Koska työn kierto seuraa tällä hetkellä jotain ennalta määrättyä kaavaa, ei asemien määrittäminen järjestelmään olisi työlästä. Se vaatii kuitenkin työnjohtajalle käytännöllisen käyttöliittymän. Järjestelmän toiminnan kannalta olisi kuitenkin oleellisen tärkeää, että työasemat ovat määritettyinä järjestelmään. Tietoa voidaan hyödyntää mm. työntekijöiden automaattiseen ohjaamiseen ja osaamisen seurantaan (asennettujen ETN rakenteiden kirjaaminen).

Inventointipyynnön lähettäminen järjestelmästä suoraan Microsoft Planneriin vaatii rajapintayhteyden avaamisen. Microsoft tarjoaa Planneriin REST API rajapinnan Microsoft Graph rajapintapalvelun kautta, jonka kautta on mahdollisuus lisätä kortteja olemassa olevaan ryhmään. Rajapinnan kautta on mahdollista luoda uusia kortteja Microsoft ryhmän eri sivuille, mm. Planner sivulle. Kortin luominen vaatii sen, että käyttäjä on kyseisen sivun omistavan Microsoft ryhmän jäsen. (Microsoft 2022)

Yritys käyttää asennustöiden työaikoina standardityötunteja. Ne ilmaisevat kuinka monta henkilötyötuntia asennustyö kestää. Ne ovat joko manuaalisesti kellotettuja aikoja tai ns. valistuneita arvauksia. Eri asennustöiden kellottaminen on hyvin työlästä, joten kellotettuja

aikoja ei ole tarjolla kaikille töille. Lisäksi ne ovat yleensä vain kerran mitattuja aikoja, joten ne eivät välttämättä ole tarkkoja, koska työn tehokkuudessa on vaihtelua. Jotta työaikojen määrittäminen pohjautuisi todelliseen ja jatkuvaan työntekoon, tulisi sitä mitata jatkuvasti. Tällä hetkellä työntekijät merkitsevät yrityksen omaan tuotantotyökaluun tietokonepäätteellä, kun työ aloitetaan ja kun työ lopetetaan työasemalla. Aloituksen ja lopetuksen välinen aika merkitsee kuitenkin vain työvaiheeseen mennyttä aikaa, ja on siis liian karkealla tasolla. Lisäksi datassa on paljon vaihtelua ja poikkeamia. Tieto olisi hyödyllisempää, jos se olisi tarkemmalla tasolla. Yrityksen asiantuntijan mukaan työvaiheen aikoja olisi mahdollista tarkentaa mm. sillä, että työasemat jaettaisiin osiin. Yleensä tällä hetkellä yhdellä työasemalla on työskentelemässä kaksi henkilöä, jotka tekevät yhteistä työjonoa. Työjono sisältää kunkin työn vaatimat tehtävät. Todellisuudessa työntekijät työskentelevät eri puolilla konetta, jolloin heidän tekemänsä työt eroavat vaikka ne on esitetty yhteisessä työjonossa. Jos työasemien työjonot jaettaisiin osiin ja työntekijän olisi mahdollista kuitata työn aloitus ja lopetus työn tehtävätasolla, olisi data paljon hyödyllisempää. Tehtävätason kuittausaikoja voitaisiin hyödyntää mm. työajan jatkuvaan määrittämiseen, joka pohjautuisi dataan. Tällöin reaalin työaika pysyisi ajantasaisena ja sen muutosta olisi mahdollisuus seurata. Lisäksi se mahdollistaisi lähes reaaliaikaisen tuotannon seurannan, kun tiedetään missä vaiheessa työjonoa mikäkin asema on menossa. Muita mahdollisia datan käyttökohteita olisi mm. työntekijöiden yksilöllinen mittaaminen sekä työn kuormittavuuden ja työntekijöiden väsymisen analysointi (Digiesi et al. 2009). Jotta tehtävätasoinen kuittaus olisi mahdollista, olisi siitä tehtävä mahdollisimman helppoa ja vaivatonta. Työntekijän tulisi pystyä kuittaamaan tehtävä tehdyksi työn lomassa esimerkiksi yksinkertaisella painokytkimellä.

7.2 Analytiikan ja koneoppimisen mahdollisuudet

Dataa käytetään nykyään melkein kaikilla tuotantoyrityksen eri osa-alueilla (Tao, Cheng, Qi, Zhang M, Zhang H ja Sui 2018). Datan käytön lisääntymiseen on vaikuttanut se, että yritysten kyky kerätä, säiliö ja prosessoida dataa on parantunut huomattavasti. Tuotantoyritykset keräävät ja hyödyntävät tietoa mm. tuotannosta sen tuotantojärjestelmistä (MES, ERP, CRM, SCM ja PDM), asiakkaista esim. verkkokauppojen sivuilta tai sosiaalisesta mediasta, tuotetietoa sen omien palvelujen kautta ja julkista tietoa julkisista tietolähteistä. (Tao et al. 2018). Jotta data on lopulta yrityksen hyödynnettävissä, käy se läpi tietyt vaiheet. Datan elinkaaren vaiheet ovat datan keräys, siirto, säilytys, esikäsittely, suodatus, analyysi,

louhinta, visualisointi ja käyttäminen (Siddiqa, Hashem, Waqoob, Marjani, Shamshirband, Gani ja Nasaruddin 2016). Datasta voidaan etsiä tietoa esimerkiksi perinteisin data-analytiikan keinoin. Data-analytiikkaa voidaan kuitenkin tehostaa huomattavasti käyttämällä erilaisia tekoälyn, koneoppimisen ja ennustamisen menetelmiä (Tao et al. 2018; Siddiqa et al. 2016). Visualisoinnin tarkoituksena on esittää tieto käyttäjälle siten, että se on helposti ymmärrettävissä (Lee, Butavicius ja Reilly 2003).

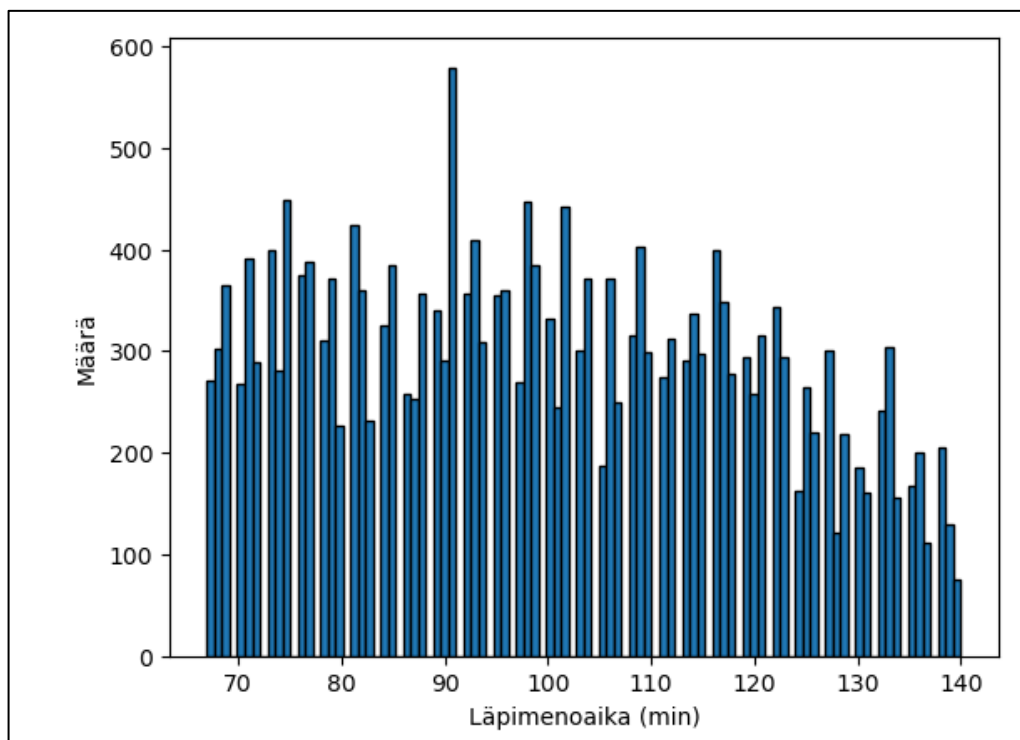
Tekoälyä hyödyntäviä optimisointialgoritmeja voidaan käyttää optimaalisten tuotantoresurssien määritykseen ja työvaiheiden määritykseen (Song ja Kusiak 2010; Tao, Zhao, Hu ja Zhou 2008). Tuotannon poikkeamat (esimerkiksi myöhästyneet tilaukset) on myös mahdollista tunnistaa ennen niiden tapahtumista. Monesti poikkeamia edeltää tietynlaisia tapahtumia, jotka johtavat poikkeaman syntyyn. (Tao et al. 2018) Poikkeamien tunnistamiseen voidaan hyödyntää esimerkiksi päätöspuihin perustuvia koneoppimisalgoritmeja tai neuroverkkoja (Abonyi, Roubos ja Szeifert 2003; Hinton ja Salakhutdinov 2006). Koneoppimista on hyödynnetty myös kunnossapidossa ennustamaan koneiden huoltotarvetta ja rikkoutumista (Carvalho, Soares, Vita, Francisco, Basto ja Alcalá 2019). Luokittelualgoritmeja voidaan hyödyntää esimerkiksi, kun tutkitaan eri muuttujien vaikutuksia tuotannon laatuun (Kim A, Oh, Jung ja Kim B 2017).

Analytiikan ja koneoppimisen mahdollisuuksia arvioitiin olemassa olevien järjestelmien ja haastatteluissa ilmenneiden tarpeiden pohjalta. Kirjallisuudessa on esitetty ja olemassa olevat APS järjestelmät sisältävät erilaisia tekoälyä sisältäviä ratkaisuja. APS järjestelmät hyödyntävät tekoälyä esimerkiksi tuotannon ajoituksen optimoimiseen (Wiers ja de Kok 2018). Työn alkuvaiheessa yrityksen asiantuntijat kertoivat, että yritykselle esiteltyt APS järjestelmät ovat olleet suhteellisen kalliita. Yrityksen kokoonpanolinjan tuotannonohjaus on kuitenkin suhteellisen yksinkertaista, joten kaupallisesta APS järjestelmästä ei nähty saatavan riittävää hyötyä. Tekoälystä voisi kuitenkin olla hyötyä tuotannonohjaukselle, jos sen tarjoamat hyödyt kohdennetaan oikeisiin kohteisiin.

7.2.1 Valmistustilauksen läpimenoajan ennustaminen

Työn osana testattiin koneoppimisalgoritmin hyödyntämistä valmistustilausten läpimenoaikojen ennustamiseen eri työasemilla. Testiin valittiin kolme algoritmia: K lähimmän naapurin algoritmi (kNN), xGBoost ja Random Forest. K lähimmän naapurin algoritmi on

Läpimenoajoissa oli melko paljon vaihtelua ja selkeitä poikkeamia esiintyi. Käytännöstä tiedetään, että läpimenoajojen mediaaniarvo on noin 110 minuuttia. Poikkeamat poistettiin datasta siten, että jäljelle jäävien valmistustilausten läpimenoajan yläraja on 75. persentiili läpimenoajasta ja alaraja oli 25. persentiili läpimenoajasta. Persentiili on prosenttipiste ja se ilmoittaa muuttujan arvon, kun tapauksista jää sen alapuolelle X määrä tapauksia. 75. persentiilin arvo on siis se arvo, jonka alle jää 75 % tapauksista. Kuvassa 8 on esitetty läpimenoajojen jakauma. Jäljelle jäävä data oli lähes normaalijakautunutta, mutta riippui työasemasta.



Kuva 8. Yhden työaseman työaika

Seuraavaksi aineisto jaettiin opetus- ja testiaineistoihin. Testiaineiston koko oli 25 % koko aineistosta. Algoritmin parhaat hyperparametrit etsittiin jokaiselle algoritmille käyttäen satunnaisesti ristiin validointia. Seuraavaksi algoritmi opetettiin käyttäen ristiin validoinnin tuloksena saatuja parhaita parametreja sekä opetusaineistoa. Opetuksen jälkeen algoritmin tarkkuutta testattiin testiaineistolla. Testauksen mittareina käytettiin keskineliövirheen neliöjuurta (RMSE), keskimääräistä neliövirhettä (MSE) ja absoluuttisen virheen keskiarvoa (MAE). Testien tulokset on esitetty taulukossa 9. Tulosten perusteella voidaan todeta, että algoritmin hyödyntäminen läpimenoajojen ennustamisessa on mahdollista. Parhaimmat tulokset saatiin xGBoost algoritmillä. Random Forestin tulokset olivat lähellä xGBoostin

tuloksia, mutta xGBoost oli suorituskyvyltään ylivoimainen ja Random Forest selkeästi algoritmeista raskain. Algoritmien tulokset ovat melko heikkoja. Absoluuttisen virheen keskiarvoa tutkittaessa voidaan todeta, että jokainen algoritmi ennusti läpimenoajan keskimäärin yli 15 minuuttia väärin. MSE ja RMSE antavat enemmän painoarvoa sellaisille ennusteille, joiden absoluuttinen virhe on suuri. Algoritmeista kNN sai näillä mittareilla heikoimmat tulokset eli osassa sen ennusteista oli selkeästi suuremmat virheet kuin kahdessa päätöspuihin perustuvassa algoritmossa. Osa algoritmien virheestä selittyy normaalilla kokoonpanotyössä esiintyvällä läpimenoajan vaihtelulla, esimerkiksi eri työntekijöiden välisillä tehokkuuseroilla, mutta osa virheestä voi olla kitkettävissä algoritmien paremmalla optimoinnilla ja datan käsittelyllä sekä sen lisäämisellä.

Taulukko 9. Algoritmien tulokset

	kNN	xGBoost	RandomForest
MSE	471,0	362,3	381,5
RMSE	21,7	19,0	19,5
MAE	17,8	16,0	16,2

Algoritmien suorituskykyä on mahdollista optimoida lisää esimerkiksi tunnistamalla uusia muuttujia datasta, suodattamalla taukoajat pois datasta tai käyttämällä useamman algoritmin tuloksia yhdessä. Ennustettua läpimenoaikaan olisi mahdollisuus hyödyntää tuotannonajotuksessa siten, että ennustettua aikaa käytetään valmistustilauksen reitityksessä työvaiheen läpimenoaikana. Työvaiheen työaika tai ETN:ien työaika olisi kuitenkin arvokkaampaa tietoa yritykselle läpimenoaikaan verrattuna. Työajan määrittäminen on kuitenkin mahdotonta tällä hetkellä, koska yrityksen järjestelmissä ei ole määritetty etukäteen tai raportoitu jälkikäteen työntekijöiden määrää työasemalla. Lisäksi työntekijöiden määrä olisi hyvin oleellinen tieto, jotta tapahtuneelle työlle voidaan esimerkiksi laskea tarkkoja kustannuksia. Lisäksi jos työn aloitus- ja lopetusmerkinnät tapahtuisivat automaattisesti esimerkiksi RFID (Radio Frequency Identification) porttien avulla, voisi kirjattujen läpimenoaikojen vaihtelu olla vähäisempää (Weinstein 2005). Kokoonpanolinjan alussa kiinnitettäisiin jokaiseen valmistustilaukseen RFID tunniste ja jokaisen työaseman alkuun ja loppuun RFID portit, jotka kirjaisivat, kun valmistustilaus kulkee työasemalle ja lähtee pois työasemalta. RFID:n lisäksi datan todenmukaisuutta, koska se poistaisi inhimillisen virheen mahdollisuuden kirjauksia tehdessä. Tehtaalla on osaamista ennestään RFID:n käytöstä, koska teknologiaa hyödynnetään jo nyt tiettyjen materiaalien kierron seuraamiseen.

7.2.2 Rahtiseuranta

Yrityksen suurin haaste tuotannonohjauksen kannalta ovat komponenttipuutteet ja puuttuva tieto saapuvan materiaalin saapumisajankohdasta. Saapuvan materiaalin tiedon parantamiseksi yrityksen toiminnanohjausjärjestelmään ollaan ottamassa käyttöön ASN toiminnallisuutta, jossa toimittaja merkitsee samassa toimituksessa lähtevät ostotilausrivit saman ASN numeron alle. Kun toimittaja on varannut kuljetusyhtiöltä kuljetuksen lähtevälle tavaralle, hän ilmoittaa ASN toiminnallisuuden kautta kuljetusyhtiön antaman tilauskoodin, joka on yhdistetty kuljetukseen. Kuljetusyhtiö tarjoaa mahdollisuuden hakea kuljetusten terminaalkirjausdataa heidän rajapintansa kautta. Yritys on rakentanut yhteyden kuljetusyhtiön rajapinnan ja yrityksen tietokannan välille. Rajapinnasta on mahdollisuus hakea kuljetusten perustiedot, kuten kollien määrän, sekä jokaisen kuljetuksen terminaalkirjaukset. Taulukossa 10 on esitetty esimerkki terminaalkirjausdatasta. Terminaalkirjauksissa on kirjattuna mm. kaupunki ja ajankohta, jolloin kirjaus on tehty. Terminaalkirjaukset tehdään joka kerta, kun kuljetus on noudettu, saapuu terminaaliin, lähtee terminaalista ja kun lähetys on toimitettu.

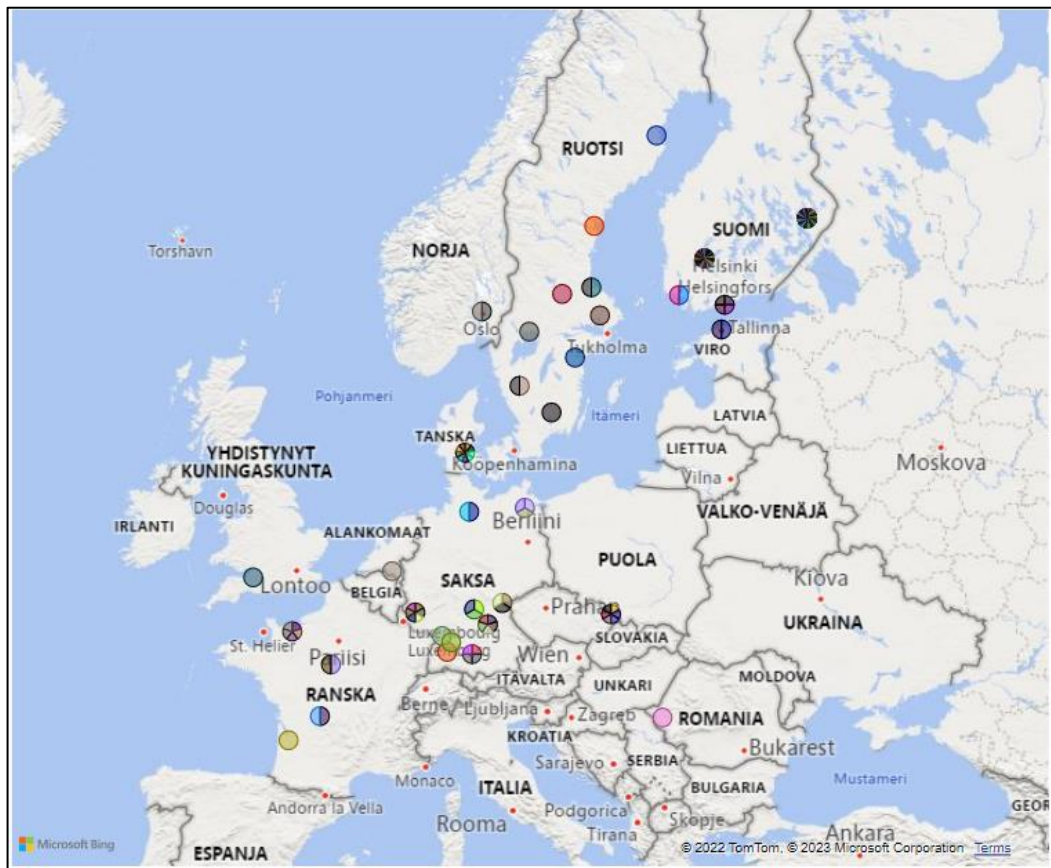
Taulukko 10. Esimerkki terminaalkirjausdatasta

ID	Event Seq	Event Code	Reason Code	Event Desc	Event Time	Terminal
1	4	21	0	Delivered	8.3.2023 12.32	xxxx
1	3	24	0	Shipped from terminal	6.3.2023 16.12	xxxx
1	2	1	0	Received at terminal	5.3.2023 10.10	xxxx
1	1	13	0	Collected	3.3.2023 08.09	xxxx
2	3	24	0	Shipped from terminal	7.3.2023 15.32	xxxx
2	2	1	0	Received at terminal	5.3.2023 10.50	xxxx
2	1	13	0	Collected	5.3.2023 06.10	xxxx
3	1	13	0	Collected	1.3.2023 14.20	xxxx
4	2	1	0	Received at terminal	5.3.2023 10.23	xxxx
4	1	13	0	Collected	4.3.2023 14.57	xxxx

Työn osana tutkittiin rahtidatan hyödyntämismahdollisuuksia. Rahtidata itsessään ei kerro, mitä kuljetuksessa on kyydissä. Jotta dataa voidaan hyödyntää parhaalla mahdollisella tavalla, pitää se yhdistää yrityksen ostotilauksiin. Kun toimittajat tilaavat kuljetusta lähettämälleen tavaralle, he saavat kuljetusyhtiöltä tilausnumeron. Kuljetusyhtiön kanssa on sovittu, että he lisäävät toimittajien saaman tilausnumeron viitteeksi kuljetuksen tietoihin, jotta kuljetuksen tiedot ovat haettavissa toimittajan saamalla tunnuksella. Tulevaisuudessa

ASN toiminnallisuus mahdollistaa sen, että yrityksen toiminnanohjausjärjestelmään on kirjattuna mitkä tilausrivit ovat lähteneet samassa kuljetuksessa ja mikä on kuljetuksen tunnistenumero.

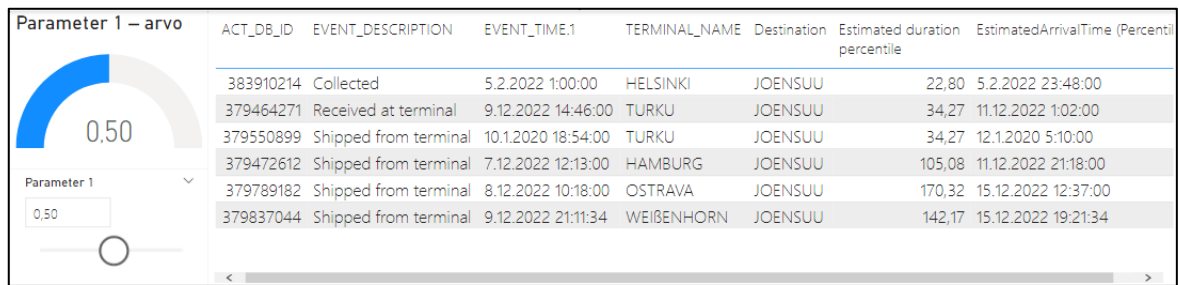
Terminaalikirjauksilla ja ASN tiedoilla on mahdollista rakentaa mm. automaattinen Power BI raportti tai dashboard, joka esittää kuljetuksessa olevien komponenttien viimeisimmän sijainnin ja ajankohdan. Kuvassa 9 on esitetty kuljetusten sijainnit Power BI:n kartalla. Power BI on Microsoftin tarjoama pilvipohjainen liiketoimintatiedon hyödyntämiseen (Business Intelligence, BI) tarkoitettu työkalu. Sillä voidaan rakentaa raportteja ja dashboardeja, joilla tietoa voidaan esittää monin eri tavoin. (Aspin 2018) Rahtisijaintiaporotti helpottaa rahdin seuranta, mutta ei sinällään tuo mitään uutta, koska rahdin terminaalitiedot ovat ennenkin olleet saatavilla rahtiyhtiön palvelujen kautta. Se kuitenkin nopeuttaa tiedon saatavuutta, koska jokaista kuljetusta ei tarvitse hakea kuljetusyhtiön seurantapalvelusta erikseen. Lisäksi se mahdollistaa rahtitiedon ja ostotilauksen tietojen yhdistämisen ja niiden esittämisen samalla alustalla. Jotta rahtidatan käyttö olisi tehokkaampaa, tulisi sitä pystyä hyödyntämään komponenttien saapumisajan arviointiin.



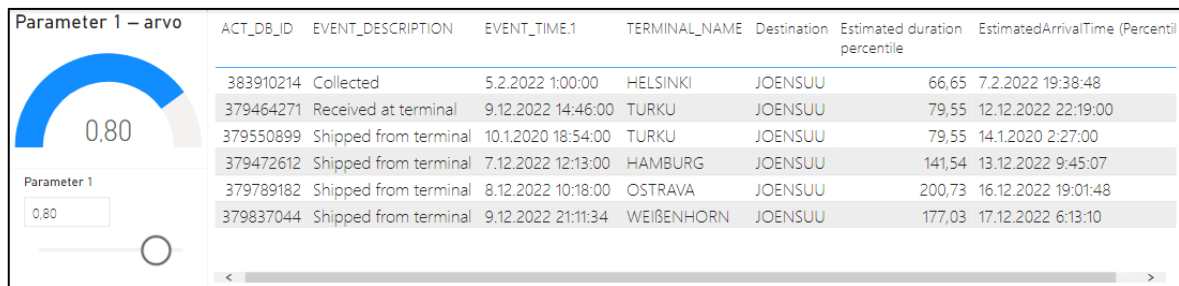
Kuva 9. Kuljetusten viimeisen sijainnin näyttäminen kartalla

Terminaalidataa muokkaamalla on mahdollista laskea eri terminaalien väliset kuljetusajat. Datassa kuljetuksen tunniste (Id) ja kuljetuksen tapahtuman järjestysnumeron (Event Seq) avulla voidaan selvittää jokaisen kuljetuksen tapahtumat järjestyksessä. Tapahtuman koodin (Event Code) ja syykoodin (Reason Code) avulla voidaan selvittää tapahtumaparit, joissa lähetys on kulkenut yhdestä terminaalista toiseen. Tapahtumien aikaleimojen erotus on kuljetukseen kulunut aika. Historiadatasta voidaan selvittää myös mikä aika on kulunut jokaisesta terminaalikirjauksesta sen kuljetuksen viimeiseen pisteeseen, jossa kuljetus on toimitettu. Näiden kirjausten välistä aikaa voidaan hyödyntää helposti tulevien kuljetusten saapumisajan arviointiin. Kun kuljetusten määrä datassa on suuri, on saapumisajan arviointi mahdollista. Historiadatasta huomattiin, että kuljetusten kestoissa oli paljon vaihtelua. Kriittisen komponentin tapauksessa olisi kuitenkin mielekästä pystyä arvioimaan saapumisaikaa päivän tarkkuudella.

Saapumisajan arviointia testattiin Power BI:llä. Taulukossa 10 esitetty alkuperäinen terminaalikirjausdata muokattiin sellaiseen muotoon, että jokaiselle terminaalikirjausriville haettiin kyseisen kuljetuksen tapahtunut toimitusajankohta ja terminaalikaupunki. Riville laskettiin lisäksi toimitusajankohdan ja kirjausrivin tapahtuman ajankohdan erotus. Rahtidatan määrän kasvaessa datasta löytyy useampia kirjauksia samasta terminaalista, joiden lopullinen määränpää on sama. Kuljetuksen jäljellä olevaa aikaa arvioitiin Power BI raportilla Dax mittarin avulla. Mittari haki historiadatasta kaikki kirjaukset, joiden terminaali oli sama kuin arvioitavan kuljetuksen terminaali ja jonka määränpää oli sama kuin haluttu. Testiraportissa määränpääksi oli määritetty kaikissa tapauksissa Joensuu, mutta ASN toiminnallisuuden myötä kuljetuksen määränpää voidaan määrittää ostotilausrivin tiedoista. Mittari määrittä kuljetusajan haetusta historiadatasta persentiilin perusteella, jonka käyttäjä sai määrittää parametrin avulla. Kuva 10 ja Kuva 11 esittävät parametrin käytön vaikutusta kuljetusajan arviointiin. Jos saapumisajan arviointiin käytettäisiin historiadataan mediaaniarvoa eli 50. persentiilia, kestäisi puolessa kuljetuksista kuitenkin kauemmin kuin on arvioitu. Esimerkiksi historiadataan perusteella kuljetus Hampurista Joensuuhun on arvioitu kestävän ("Estimated duration percentile") 105 tuntia historiadataan mukaan, jos arviointiin käytetään datan keskimmäistä arvoa. Jos saapumisesta halutaan olla varmempia ja arviointiin käytetään 80. persentiilia, Hampurista Joensuuhun on arvioitu kestävän 141,5 tuntia.



Kuva 10. Kuljetuksien saapumisajan arviointi Power BI:llä (50. persenttiili)



Kuva 11. Kuljetuksien saapumisajan arviointi Power BI:llä (80. persenttiili)

Esiteltyjä tapoja hyödyntää rahtidataa käytiin läpi yrityksen asiantuntijoiden kanssa. Heidän mielestään saapumisajan arviointi historiadatan ja käyttäjän määrittämän persenttiilin avulla oli hyvä ja käyttökelpoinen idea. Persenttiilin voi ajatella tässä tapauksessa olevan todennäköisyys, jolla toimitus saapuu korkeintaan arvioidussa ajassa. Persenttiiliparametria voi hyödyntää myös niin, että arvioidaan kriittisen komponentin saapumisen todennäköisyyttä ennen komponentin tarvehetkeä. Tällöin asetetaan parametrin arvo sellaiseksi, että saapumisajankohta on komponentin tarve ajankohta ja katsotaan parametrin osoittama persenttiili. Tulosta voidaan käyttää esimerkiksi siihen, että arvioidaan, täytyykö tuotantoon tehdä muutosta komponenttipuutteen vuoksi.

8 Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli määritellä tuotannonohjausjärjestelmä, joka helpottaa tuotannonohjaukseen liittyvää manuaalista työtä ja vähentää tuotannonohjaukseen liittyvää epävarmuutta. Järjestelmän käyttäjävaatimuksia ja käyttötapauksia on käyty yrityksen edustajan kanssa yhdessä läpi, ja niihin on oltu tyytyväisiä. Yrityksen on mahdollisuus jatkaa järjestelmän kehitystä tutkimuksessa esitettyjen käyttötapauksen pohjalta.

Tutkimuksessa haettiin vastausta kolmeen tutkimuskysymykseen. Ensimmäinen kysymys oli: *Mitä tietoa tuotannonohjausjärjestelmä vaatii kokoonpanolinjatuoannossa ATO ympäristössä?* Koska tuotannonohjaukseen on monenlaisia lähestymistapoja ja yritysten tuotannot ovat hyvin yksilöllisiä, on universaalinen tuotannonohjausjärjestelmän kehitys vaikeaa. Järjestelmä tulee räätälöidä kuhunkin tuotantoon sopivaksi ollakseen tehokas. Se mitä yksityiskohtaa tuotannonohjauksessa painotetaan, määrittelee paljon sitä, mitä tietoa tarvitaan ja mikä sen tarkkuus tulee olla. Esimerkiksi ATO ympäristön tuotannonohjauksen kannalta tärkein kontrollipiste on lopputuotekokoonpanon aikataulu. Aikataulun pitämisen kannalta on oleellista tietää kokoonpanon komponenttien saatavuus, henkilöstökapasiteetti ja työasemien tila. Lisäksi tärkeää on se, että kokoonpanon asennustöiden suunnitellut työajat perustuvat todellisuuteen ja ovat siten toteutettavissa. Yleisesti oleellisinta on siis ajantasainen tieto tuotannontekijöiden tilasta. Esimerkiksi Zanella ja Frazzon (2019) kehittivät tuotannonajoitusmallin, joka keskittyi tuotannon uudelleen ajoittamiseen komponenttipuutteen satuessa. Tässä tapauksessa oleellisinta oli komponenttien varastosaldot, keskeneräinen tuotanto ja valmistuotevarasto. Ivanov et al. (2020) malli keskittyi taas tuotannonajoitukseen tuotannon sensoridatan pohjalta, jota oli saatavilla. Tutkimuksessa määritelty tuotannonohjausjärjestelmä hyödyntää yrityksellä olevaa dataa mahdollisimman paljon, mutta osaa dataa on tarkennettava ja toimintatapoja muutettava. Lisäksi rahtiseurantaraportin tuottama saapumisaika-arvio on tulevaisuudessa hyvä lisä järjestelmän käyttämään dataan.

Työn toinen tutkimuskysymys oli: *Mitkä tekijät lisäävät tuotannonohjauksen epävarmuutta?* Tuotannonohjauksen epävarmuutta lisää yllättävät muutokset tuotannontekijöiden määrässä tai tehokkuudessa ja huono näkyvyys resurssien saatavuudesta. Tällöin joudutaan tekemään muutoksia tuotantosuunnitelmiin hyvinkin lyhyen aikavälin sisällä ja sillä voi olla suuria vaikutuksia yrityksen toimittajiin, asiakkaisiin ja työntekijöihin. Kohdeyritykselle

selkeästi suurin haaste oli komponenttipuutteet. Komponenttipuutteiden syynä on monesti ollut toimittajan materiaalipuutteet tai poissaolot tuotannossa. Lisäksi tuotannonajoitusta on vaikeuttanut tiedon puute komponenttien saapumisesta. Ongelmien sattuessa toimittajat eivät monesti pysty antamaan edes hyvää arvausta siitä, milloin he voivat tilatut materiaalit lähettää. Lisäksi lähihistoriassa on nähty useampia maan- tai maailmanlaajuiseen logistiikkaan vaikuttavia tapahtumia, jotka ovat vaikuttaneet rahtien saapumiseen tai lähtemiseen. Huomattava on myös se, että ATO tuotannossa suurin osa komponenteista hankitaan kysyntäennusteiden pohjalta, jolloin asiakkaiden yllättävä ostokäyttäytyminen voi johtaa komponenttipuutteisiin erityisesti pitkän läpimenoajan komponenteilla. Tällaisten komponenttien saatavuus mukautuu huonosti kysynnän vaihteluihin. Covid-19 pandemian aikana lisääntyneet poissaolot ovat lisänneet henkilöstön ohjauksen tarvetta. Poissaolot eivät ole pysäyttäneet tuotantolinjaa, mutta poissaolojen sattuessa työntekijöiden on täytynyt avustaa toisiaan eri työasemilla.

Kolmas tutkimuskysymys oli: *Miten data-analytiikkaa, tekoälyä ja koneoppimista voidaan hyödyntää tuotannonohjauksessa ja sen epävarmuuden vähentämisessä?* Kaupalliset APS järjestelmät hyödyntävät tekoälyä esimerkiksi tuotannon ajoituksen optimoimiseen. Kirjallisuudessa on myös esitetty tapoja, miten tekoälyä voidaan hyödyntää esimerkiksi tuotantorurssien optimaaliseen määrittämiseen (Song ja Kusiak 2019; Tao et al. 2008), tuotannon poikkeamien ennustamiseen (Abonyi et al 2003), ennakoivaan kunnossapitoon (Carvalho et al. 2019) ja laatututkimuksiin (Kim et al. 2017). Työn osana tehty koneoppimismalli näytti, että myös yrityksen data mahdollistaa optimointimallien kehittämisen. Esitettyssä mallissa ja datassa itsessään on kuitenkin vielä kehitettävää, jotta malli olisi tehokas. Yritykselle suurin epävarmuustekijä oli komponenttipuutteet ja epävarmuus komponenttien saapumisesta. Työssä esitelty rahtiseurantaraportti mahdollistaa rahdin saapumisajan arvioimisen historiadataan pohjalta. Saapumisajan arviointi historiadataan pohjalta mahdollistaa nopeampien faktapohjaisten päätösten tekemisen. Aika-arvio on tärkeää tietoa erityisesti sellaisessa tilanteessa, kun kriittinen komponentti on loppumassa ja halutaan varmistua, kerkeääkö komponentit tarveaikanaan tuotantoon. Raporttia voidaan jatkokehittää esimerkiksi tunnistamalla erilaisia kuljetukseen vaikuttavia tekijöitä. Tekijöiden ja historiadataan pohjalta voidaan rakentaa tekoälyä hyödyntävä saapumisaikaennustemalli, joka olisi mahdollisesti tarkempi kuin esitetyn raportin tuottama aika-arvio.

Konstruktiiivisen tutkimusmenetelmän osana kehitettyä konstruktiota testataan käytännössä ja sen tuloksia arvioidaan. Työssä esiteltyä järjestelmän vaatimusmäärittelyä on työn osana mahdotonta testata kokonaisuutena, koska järjestelmää ei ole vielä rakennettu. Työn osana kehitettyä rahtiseurantaraporttia ja koneoppimismallia on kuitenkin testattu ja niiden toimivuutta arvioitu. Yrityksessä suhtauduttiin lähestymistapoihin suurella mielenkiinnolla ja niissä nähtiin paljon potentiaalia. Rahtiseurantaraportin mahdollistama tapa arvioida kuljetusten saapumista tullaan ottamaan käyttöön. Sen nähtiin parantavan kuljetusten seuraamista ja materiaalien saapumisten arviointia, koska arviot perustuvat historiadataan. Koneoppimismalli oli täysin uusi lähestymistapa läpimenoaikojen määrittämiseen. Mallien dynaaminen luonne herätti mielenkiintoa, sillä yritys käyttää työaikojen määrittämiseen arvioituja tai mitattuja standardiaikoja. Todellisuudessa töihin menevät ajat voivat muuttua ja uusia töitä tulla lisää. Mallit vaativat kuitenkin jatkokehitystä, mutta niissä nähtiin potentiaalia ja mallien tuomat edut ymmärrettiin.

Tuotannonohjaus on hyvin tutkittu aihepiiri. Suurin osa siihen liittyvästä kirjallisuudesta keskittyy tuotannonajoituksen optimointiin, johon liittyvät ajoitusongelmat ovat hyvin tunnettuja ongelmia. Vaikka materiaalipuutteet ovat tänä päivänä monille yrityksille arkipäivää, vain harvat tutkimukset keskittyvät materiaalipuutteiden vähentämiseen tai sen vaikutuksen heikentämiseen tuotannonohjauksen keinoin. Toimitusketjun resilienssi on hyvin ajankohtainen tutkimusaihe ja siihen liittyvässä kirjallisuudessa käsitellään pääasiassa toimia, joilla voidaan lieventää komponenttipuutteiden vaikutuksia. Toinen yllättävä asia oli se, että tuotannonohjauksen kirjallisuudessa ei juurikaan oteta huomioon työntekijöiden tehokkuuden dynaamisuutta. Henkilöstöä käsitellään monesti koneiden kaltaisena resurssina. MES järjestelmissä henkilöstön ohjaus on kuitenkin otettu paremmin huomioon. Yksi työssä määritellyn järjestelmän ominaisuus on se, että se ottaa huomioon työntekijöiden osaamistason ja antaa työnjohtajalle ehdotuksia korvaavista työntekijöistä poissaolojen sattuessa heidän osaamisensa perusteella.

Työn aihe on varmasti monelle yritykselle ajankohtainen. Työn tulokset ja siinä esitetyt mallit ovat sovellettavissa muihinkin samankaltaisiin organisaatioihin. Jos yrityksen tuotannossa käytetään laajasti erilaisia komponentteja ja heidän tuotantonsa on kärsinyt komponenttipuutteista, voi työssä esitellyistä ratkaisuista olla apua. Muuttuneen maailmantilanteen vuoksi lisätutkimusta kaivattaisiin teknologisista ratkaisuista, joilla voitaisiin varautua

materiaali- ja logistiikkaongelmiin. Lisäksi lisätutkimusta henkilöstön ohjaamisesta teko-
älyn tai muiden teknologisten ratkaisujen avulla kaivataan.

9 Yhteenveto

Tuotannonohjaus on yksi valmistavan yrityksen tärkeimmistä toiminnoista. Viime vuosien globaalit logistiset ongelmat, Covid-19 pandemia ja materiaalipuutteet ovat kuitenkin aiheuttaneet haasteita teollisuusyritysten tuotannossa. Tuotannonohjauksesta on tullut hankalaa ja lyhyenkin ajan suunnitelmat eivät välttämättä toteudu, koska materiaalien saatavuusnäkökulma on heikko ja muutoksia tapahtuu jatkuvasti. Tässä työssä tutkittiin tuotannonohjaukseen vaikuttavia epävarmuustekijöitä, tehtiin vaatimusten määrittely kohdeyrityksen tuotannonohjausjärjestelmälle ja tunnistettiin sekä kehitettiin tuotannonohjausta tehostavia tekoälyä ja analytiikkaa hyödyntäviä malleja. Työn tavoitteena oli tunnistaa suurimmat tuotannon epävarmuustekijät ja määrittellä tuotannonohjausjärjestelmä, joka pyrkii heikentämään epävarmuustekijöiden vaikutuksia ja vähentää tuotannonohjaukseen liittyvää manuaalista työtä.

Työssä hyödynnetään konstruktivistista tutkimusmenetelmää, joka on tapaustutkimuksen alalaji. Työssä on hyödynnetty tieteellistä kirjallisuutta mm. vaatimusten määrittelystä, tuotannosuunnittelusta ja -ohjauksesta, toimitusketjujen resilienssistä ja tekoälystä. Tietoa yrityksen tuotannonohjauksesta sekä tuotannonohjausjärjestelmän käyttäjien tarpeista kerättiin puolistrukturoiduilla ryhmähaastatteluilla. Käyttäjävaatimusten pohjalta muodostettiin käyttötapaukset, jotka esittävät järjestelmän toimintoja ja sen käyttöä. Työssä tutkittiin lisäksi tekoälyn, koneoppimisen ja data-analytiikan hyödyntämistä tuotannonohjausjärjestelmässä. Työn osana rakennettiin koneoppimismalli tuotannon työvaiheiden läpimenoaikojen ennustamiseen ja rahtiseurantaraportti kuljetuksessa olevan rahdin seurantaan ja saapumisajan arviointiin. Yrityksen asiantuntijat olivat hyvin tyytyväisiä määriteltyyn järjestelmään, muodostettuihin käyttötapauksiin ja esiteltyihin kokeellisiin malleihin. Yrityksen on tarkoitus jatkaa järjestelmän kehitystä työn pohjalta. Lisäksi rahdin saapumisajan arviointia rahtiseurantaraportin tavoin tullaan hyödyntämään tulevaisuudessa. Diplomityössä esitetty koneoppimismalli herätti paljon mielenkiintoa ja sai yrityksen edustajat ajattelemaan uudella tavalla. Malli vaatii kuitenkin jatkokehitystä ollakseen toimiva ja tehokas.

Oleellista tuotannonohjausjärjestelmälle on ajantasainen data tuotannontekijöiden tilasta. Yritysten tuotannon ovat yksilöllisiä ja monesti tuotannonohjausjärjestelmä tulisi räätälöidä jokaiselle tuotannolle sopivaksi. Se mitä yksityiskohtaa tuotannonohjauksessa painotetaan,

määrittelee paljon sitä, mitä dataa järjestelmä erityisesti vaatii. Tuotannonohjauksen epävarmuutta lisäävät huono näkyvyys tuotannontekijöiden saatavuudesta ja muutokset tuotannontekijöiden määrässä ja tehokkuudessa. Kohdeyritykselle suurin epävarmuustekijä oli komponenttipuutteet ja huono näkyvyys komponenttitoimitusten saapumisesta haluttuna päivänä. Tekoälyllä ja data-analytiikalla voidaan tehostaa tuotannonohjausta esimerkiksi enustemallien avulla, jolla voidaan arvioida esimerkiksi komponenttitoimitusten saapumista, koneiden huoltotarvetta ja tulevia poikkeamia tuotannossa.

Lähteet

- Abonyi J., Roubos J. ja Szeifert F. (2003) Data-driven generation of compact, accurate, and linguistically sound fuzzy classifiers based on a decision-tree initialization. *International Journal of Approximate Reasoning* 32(1): 1-21.
- Abubakar M. ja Wang Q. (2019) Key human factors and their effects on human centered assembly performance. *International Journal of Industrial Ergonomics* 69: 48-57.
- Ashour S. (1972) *Sequencing Theory*. Heidelberg: Springer Berlin.
- Aspin A. (2018) *Pro Power BI Desktop*. Berkeley, CA: Apress.
- Błażewicz J., Ecker K., Pesch E., Schmidt G., Sterna M. ja Węglarz J. (2019) *Handbook on Scheduling from Theory to Practice*. Cham: Springer International Publishing.
- Bonaccorso G. (2017) *Machine Learning Algorithms : Reference Guide for Popular Algorithms for Data Science and Machine Learning*. Birmingham, England ;: Packt.
- Browne J. (1988) Production activity control-a key aspect of production control. *International Journal of Production Research* 26(3): 415-427.
- Cadle J., Paul D. ja Turner P. (2010) *Business Analysis Techniques: 72 Essential Tools for Success*. : British Informatics Society Ltd.
- Carvalho T., Soares F., Vita R, Francisco R., Basto J. ja Alcalá S. (2019) A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering* 137: 106024.
- Cekerevac Z. ja Bogavac M. (2023) Impact of Covid-19 and Ukraine-Russia War on The International Trade and Logistics. *MEST Journal* 11(1): 19.
- Chen T. ja Guestrin C. (2016) XGBoost: A Scalable Tree Boosting System.: *ACM* 785-794.
- Chemuturi M. (2013) *Requirements Engineering and Management for Software Development Projects*. New York, NY: Springer New York.
- Cottyn J., Van Landeghem H., Stockman K. ja Derammelaere S. (2011) A method to align a manufacturing execution system with Lean objectives. *International Journal of Production Research* 49(14): 4397-4413.
- Dick J., Hull E. ja Jackson K. (2017) *Requirements Engineering*. Cham: Springer International Publishing.
- Digiesi S., Kock A., Mummolo G. ja Rooda J. (2009) The effect of dynamic worker behavior on flow line performance. *International Journal of Production Economics* 120(2): 368-377.
- Ergun O., Hopp W. ja Keskinocak P. (2023) A structured overview of insights and opportunities for enhancing supply chain resilience. *IIE Transactions* 55(1): 57-74.
- Frazzon E., Kück M. ja Freitag M. (2018) Data-driven production control for complex and dynamic manufacturing systems. *CIRP Annals* 67(1): 515-518.

- Friedman J., Hastie T. ja Tibshirani R. (2000) Special Invited Paper. Additive Logistic Regression: A Statistical View of Boosting. *The Annals of Statistics* 28(2): 337-374.
- Gupta J. ja Stafford E. (2006) Flowshop scheduling research after five decades. *European Journal of Operational Research* 169(3): 699-711.
- Hinton G. ja Salakhutdinov R. (2006) Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks. *Science* 313(5786): 504-507.
- Ivanov D. ja Dolgui A. (2022) The shortage economy and its implications for supply chain and operations management. *International Journal of Production Research* 60(24): 7141-7154.
- Ivanov D. ja Dolgui A. (2021) Stress testing supply chains and creating viable ecosystems. *Operations Management Research* 15(1-2): 475-486.
- Ivanov D., Sokolov B., Werner F. ja Dolgui A. (2020) Proactive Scheduling and Reactive Real-Time Control in Industry 4.0. *International Series in Operations Research & Management Science*. Springer International Publishing, 11-37.
- Jaiswal S. (2022) What is Information System? Definition, Examples, & Facts. [Verk-
kolähde] Saatavilla: <https://emeritus.org/in/learn/information-system/> Viitattu: [1.3.2023]
- Kim A., Oh K., Jung J. ja Kim B. (2018) Imbalanced classification of manufacturing quality conditions using cost-sensitive decision tree ensembles. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 31(8): 701-717.
- Kiran D. (2019) *Production Planning and Control: A Comprehensive Approach*. San Diego: Elsevier Science & Technology.
- Kletti J. (2007) *Manufacturing Execution Systems — MES*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Krolikowski P. ja Naggert K. (2021) Semiconductor Shortages and Vehicle Production and Prices. *Economic Commentary* (2021-17).
- Kusiak A. (2017) Smart manufacturing must embrace big data. *Nature* 544(7648): 23-25.
- Lee M., Butavicius M. ja Reilly R. (2003) Visualizations of binary data: A comparative evaluation. *International Journal of Human-Computer Studies* 59(5): 569-602.
- Lehtinen T., Mäntylä M., Vanhanen J., Itkonen J. ja Lassenius C. (2014) Perceived causes of software project failures – An analysis of their relationships. *Information and Software Technology* 56(6): 623-643.
- Lukka K. (2000) The key issues of applying the constructive approach to field research. *Management Expertise for the New Millennium*: 113-128.
- Lukka K. (2003) The Constructive Research Approach. *Case Study Research in Logistics*. Turku, Finland: Turku School of Economics and Business Administration, 83-101.
- Lundbäck M., Häggström C. ja Nordfjell T. (2021) Worldwide trends in methods for harvesting and extracting industrial roundwood. *International Journal of Forest Engineering* 32(3): 202-215.

- Mahesh B. (2018) Machine Learning Algorithms -A Review. *International Journal of Science and Research (IJSR)* 9(1).
- Massaron L. ja Boschetti A. (2016) Regression Analysis with Python : *Learn the Art of Regression Analysis with Python*. Birmingham: Packt Publishing.
- Microsoft (2022) Use the Planner REST API - Microsoft Graph V1.0. [Verkkolähde] Saatavilla: <https://learn.microsoft.com/en-us/graph/api/resources/planner-overview>. Viitattu: [14.3.2023]
- Missbauer H. ja Uzsoy R. (2020) *Production Planning with Capacitated Resources and Congestion*. New York, NY: Springer.
- Musa J. (1993) Operational profiles in software-reliability engineering. *IEEE Software* 10(2): 14-32.
- Olhager J. (2010) The role of the customer order decoupling point in production and supply chain management. *Computers in Industry* 61(9): 863-868.
- Olhager J. (2003) Strategic positioning of the order penetration point. *International Journal of Production Economics* 85(3): 319-329.
- Oliver P. (2021) Using Qualitative Methods to Answer Your Research Question : *Open Up Study Skills*. London: McGraw-Hill Education.
- O'Regan G. (2022) *Concise Guide to Software Engineering: From Fundamentals to Application Methods*. Cham: Springer International Publishing AG.
- Pandas (2023) Pandas - Python Data Analysis Library. [Verkkolähde] Saatavilla: <https://pandas.pydata.org/>. Viitattu: [21.3.2023]
- Pooley R. ja King P. (1999) The unified modelling language and performance engineering. *IEE Proceedings - Software* 146(1): 2-10.
- Queiroz M., Ivanov D., Dolgui A. ja Fosso Wamba S. (2020) Impacts of epidemic outbreaks on supply chains: mapping a research agenda amid the COVID-19 pandemic through a structured literature review. *Annals of Operations Research* 319(1): 1159-1196.
- Rozhkov M., Ivanov D., Blackhurst J. ja Nair A. (2022) Adapting supply chain operations in anticipation of and during the COVID-19 pandemic. *Omega (Oxford)* 110: 102635.
- Scikit-learn (2023) Scikit-Learn: Machine Learning in Python — Scikit-Learn 1.2.2 Documentation. [Verkkolähde] Saatavilla: <https://scikit-learn.org/stable/>. Viitattu: [21.3.2023]
- Shao G., Seung-Jun S. ja Jain S. (2014) Data Analytics using Simulation for Smart Manufacturing. *IEEE* 2192-2203.
- Sharif B., Khan S. ja Bhatti M. (2012) Measuring the Impact of Changing Requirements on Software Project Cost: An Empirical Investigation. *International Journal of Computer Science Issues* 9(3): 170.
- Sharman G. (1984) The rediscovery of logistics. *Harvard Business Review* 62(5): 71.
- Siddiqa A., Hashem I., Yaqoob I., Marjani M., Shamshirband S., Gani A. ja Nasaruddin F. (2016) A survey of big data management: Taxonomy and state-of-the-art. *Journal of Network and Computer Applications* 71: 151-166.

- Simmons E. (2006) The usage model: describing product usage during design and development. *IEEE Software* 23(3): 34-41.
- Song Z. ja Kusiak A. (2010) Multiobjective Optimization of Temporal Processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Part B, Cybernetics* 40(3): 845-856.
- Stackpole B. (2022) Ripple Effects from Russia-Ukraine War Test Global Economies. [Verkkolähde] Saatavilla: <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/ripple-effects-russia-ukraine-war-test-global-economies>. Viitattu [15.3.2023]
- The Standish Group (1995) *The CHAOS Report*. The Standish Group International, Inc.
- Takeda-Berger S., Zanella R. ja Frazzon E. (2019) Towards a data-driven predictive-reactive production scheduling approach based on inventory availability. *IFAC-Papers On-Line* 52(13): 1343-1348.
- Takeda-Berger S., Agostino Í., da Silva M. ja Frazzon E. (2022) Reactive production scheduling approach based on inventory availability. *IFAC-Papers On-Line* 55(10): 418-423.
- Tao F., Qi Q., Liu A. ja Kusiak A. (2018) Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems* 48: 157-169.
- Tao F., Zhao D., Hu Y. ja Zhou Z. (2008) Resource Service Composition and Its Optimal-Selection Based on Particle Swarm Optimization in Manufacturing Grid System. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 4(4): 315-327.
- Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H. ja Sui F. (2018) Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94(9-12): 3563-3576.
- Toivonen V., Ikkala K., Niemi E. ja Korhonen A. (2006) Planning and Scheduling System for Make-To-Order Production. *CIRP Annals* 55(1): 493-496.
- Tokola H., Ahlroth L. ja Niemi E. (2014) A comparison of rescheduling policies for online flow shops to minimize tardiness. *Engineering Optimization* 46(2): 165-180.
- Vollmann T., Whybark D., Jacobs F. ja Berry W. (2018) *Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management: The CPIM Reference*. : McGraw-Hill.
- Weinstein R. (2005) RFID: a technical overview and its application to the enterprise. *IT Professional* 7(3): 27-33.
- Wieggers K. ja Beatty J. (2013) *Software Requirements*. Pearson Education.
- Wiers V. ja de Kok A. (2018) *Designing, Selecting, Implementing and using APS Systems*. Cham : Springer International Publishing.
- Wirojanagud P., Gel E., Fowler J. ja Cardy R. (2007) Modelling inherent worker differences for workforce planning. *International Journal of Production Research* 45(3): 525-553.

Liite 1. Käyttötapaukset

ID ja nimi:	1. Järjestä tuotantoputki	
Päätoimija:	Järjestelmä	Toissijaiset toimijat:
Kuvaus:	Järjestelmä järjestää tilauskannan tuotantojärjestykseen ennalta määritettyjen sääntöjen ja rajoitteiden mukaan. 30 – 0 työpäivää ennen tilauksen suunniteltua valmistumista valmistustilaukset ovat järjestettyinä myös päivän sisäiseen järjestykseen.	
Laukaisija:	Automaattisesti jokaisen iltavuoron jälkeen.	
Lähtötiedot:	Tilaukanta, tuotannon- ja hankinnan rajoitteet, model-mix	
Tulostiedot:	Tuotantoputki tuotantojärjestyksessä	
Tärkeys:	Korkea	
Käyttöiheys:	Päivittäin	
Olettamat:		

ID ja nimi:	2. Tarkasta materiaalit valmistustilauksille	
Päätoimija:	Järjestelmä	Toissijaiset toimijat: Tuotannonajoittaja, Materiaalikoordinaattori, Ostajat
Kuvaus:	Järjestelmä käy jokaisen valmistustilauksen läpi ja tarkastaa toiminnanohjausjärjestelmän tietokannasta valmistustilauksen materiaalien oletetun saldon materiaalin tarvepäivänä. Jos komponentilla on myöhässä olevia ostotilauksia, mitään sen komponentin ostotilauksia, jotka tulevat myöhässä olevalta toimittajalta, ei oteta huomioon.	
Laukaisija:	Järjestelmä tarkastaa materiaalit automaattisesti tuotannon ajoituksen ja järjestysmuutosten jälkeen. Käyttäjällä myös mahdollisuus laukaista toiminto manuaalisesti.	
Lähtötiedot:	Tilaukanta, materiaalien varastosaldot, Ostotilaukset	
Tulostiedot:	Tuotantoputki, jonka materiaalit on tarkastettu ja puutteet ilmoitettu.	
Tärkeys:	Korkea	
Käyttöiheys:	Päivittäin	
Olettamat:		

ID ja nimi:	3. Tarkasta henkilöstön riittävyys tuotanto-ohjelmalle	
Päätoimija:	Järjestelmä	Toissijaiset toimijat: Työnjohtajat, Tuotannonajoittaja
Kuvaus:	Järjestelmä laskee jokaisen työpisteen kuormituksen perustuen kyseisen päivän suunniteltuun tuotantoon. Järjestelmä tarkastaa työpisteen kyseisen päivän suunnitellun henkilöstön ja vertaa tuotannon kuormitusta henkilöstön määrään. Järjestelmää antaa ilmoituksen, jos henkilöstön määrä ei ole riittävä.	
Laukaisija:	Järjestelmä automaattisesti	
Lähtötiedot:	Tuotantoputki, Valmistustilausten osarakenteiden työajat, työpisteiden suunniteltu henkilöstö, vuorokalenteri	
Tulostiedot:	Tuotantoputki, jonka työmäärä on tarkastettu suunnitellulla henkilöstön määrällä	
Tärkeys:	Kohtalainen	
Käyttöiheys:	Päivittäin	
Olettamat:		

ID ja nimi:	4. Tarkasta henkilöstön osaaminen	
Päätoimija:	Järjestelmä	Toissijaiset toimijat: Työnjohtajat, Tuotannonajoittaja
Kuvaus:	Järjestelmä tarkastaa tuotantoputken valmistustilausten osarakenteet ja vertaa työpisteille tulevien valmistustilausten osarakenteita työpisteelle suunniteltujen henkilöiden aikaisempaan osaamiseen. Järjestelmä tarkastaa osaamismatriisista onko työpisteen henkilöstön asentanut aikaisemmin työn alle tulevien valmistustilausten osarakenteita ja antaa ilmoituksen, jos ei ole.	
Laukaisija:	Järjestelmä automaattisesti	
Lähtötiedot:	Tuotantoputki, Valmistustilausten osarakenteet, osaamismatriisi, Työntekijöiden työasemavuorolistat	
Tulostiedot:	Tuotantoputki, jonka valmistustilausten vaatimukset on tarkastettu henkilöstön osaamisella.	
Tärkeys:	Kohtalainen	
Käyttö- heys:	Päivittäin	
Olettamat:		

ID ja nimi:	5. Ajoita tuotantoputki uudelleen	
Päätoimija:	Järjestelmä	Toissijaiset toimijat:
Kuvaus:	Järjestelmä määrittelee valmistustilauksille uudet valmistumisajankohdat, jonka perusteella työvaiheiden ajoitukset määrittyvät, jos toteutunut tuotantomäärä poikkeaa suunnitellusta.	
Laukaisija:	Järjestelmä automaattisesti jokaisen iltavuoron jälkeen.	
Lähtötiedot:	Tuotantoputki, Valmistustilausten tiedot	
Tulostiedot:	Uudelleen ajoitettu tuotantoputki	
Tärkeys:	Korkea	
Käyttö- heys:	Päivittäin tai harvemmin jos tuotanto pysyy aikataulussa	
Olettamat:		

ID ja nimi:	6. Ehdota uutta tuotantojärjestystä	
Päätoimija:	Järjestelmä, tuotannonajoittaja	Toissijaiset toimijat: Materiaalikoordinaattori
Kuvaus:	Jos yksittäiseltä valmistustilaukselta puuttuu materiaalia ja valmistustilaus sijaitsee tuotantoputkessa tuotannonajoittajan hallinnoimalla alueella (0–30 työpäivää ennen suunniteltua valmistumista), järjestelmä ehdottaa uutta tuotantojärjestystä. Uudessa järjestyksessä valmistustilaus on siirretty sellaiselle päivämäärälle, jolloin puuttuvan materiaalin ostotilausrivin materiaali pitäisi olla saatavilla. Järjestelmä huolehtii, että jäädytetyn alueen tuotantojärjestys pysyy mahdollisimman muuttumattomana ja päivän sisäinen järjestys pysyy toteutuskelpoisena.	
Laukaisija:	ID 2.	
Lähtötiedot:	Tuotantoputki, ostotilausrivit, tuotantorajoitteet	
Tulostiedot:	Tuotantoputki, jossa vähintään yksi valmistustilaus on siirretty tai muuttumaton tuotantoputki jos tuotannonajoittaja on päättänyt olla siirtämättä valmistustilausta.	
Tärkeys:	Kohtalainen	
Käyttö- heys:	Päivittäin tai harvemmin jos materiaali puutteita ei ole	
Olettamat:	Ostotilausrivin vastaanottopäivämäärä on tulevaisuudessa.	

ID ja nimi:	7. Valmistustilausten jäädyttäminen	
Päätoimija:	Järjestelmä	Toissijaiset toimijat: Tuotannonajoittaja

Kuvaus:	Järjestelmä jäädyttää automaattisesti yhtä monta valmistustilausta, kuin edellisenä päivänä on kokoonpanolinjaan lähtenyt.
Laukaisija:	Järjestelmä automaattisesti iltavuoron jälkeen.
Lähtötiedot:	Valmistustilaukset, suunnitellut valmistustilaukset (DOP)
Tulostiedot:	Edellisen päivänä kokoonpanolinjaan lähteneiden koneiden määrää vastaava määrä jäädytettyjä valmistustilauksia.
Tärkeys:	Kohtalainen
Käyttö- heys:	Päivittäin
Olettamat:	

ID ja nimi:	8. Valmistustilauksen lukitseminen
Päätoimija:	Tuotannonajoittaja Toissijaiset toimijat:
Kuvaus:	Valmistustilauksen valmistuspäivämäärä voidaan lukita järjestelmässä, eli kyseisen valmistustilauksen ajoitusta ei tällöin pysty muuttamaan.
Laukaisija:	Tuotannonajoittaja haluaa varmistaa tietyn valmistustilauksen valmistumisen tietyssä päivänä.
Lähtötiedot:	"Vapaa" valmistustilaus
Tulostiedot:	"Lukittu" valmistustilaus
Tärkeys:	Korkea
Käyttö- heys:	Harvemmin
Olettamat:	Lukittavan valmistustilauksen materiaalit on saatavilla.

ID ja nimi:	9. Näytä tuotantolinjan kuormitus
Päätoimija:	Työnjohto, Tuotannonajoittaja Toissijaiset toimijat:
Kuvaus:	Järjestelmä näyttää työpiste-, päivä- ja vuorokohtaisesti työpisteen päivän kuormituksen ja päivän ja vuoron suunnitellut henkilötyötunnit.
Laukaisija:	Käyttäjä haluaa katsoa tuotantolinjan kuormituksen.
Lähtötiedot:	Tuotantoputki, työpisteiden työajat, työpisteiden suunniteltu henkilöstö, vuorokalenteri
Tulostiedot:	Työpisteiden päivä- ja vuorokohtaiset kuormitukset
Tärkeys:	Kohtalainen
Käyttö- heys:	Päivittäin tai useammin
Olettamat:	

ID ja nimi:	10. Lähetä inventointipyyntö
Päätoimija:	Materiaali- koordinaattori, Tuotannonajoittaja Toissijaiset toimijat: Inventoinnin Microsoft Planner sivu
Kuvaus:	Järjestelmästä on mahdollisuus lähettää inventointipyyntö nimikkeelle. Inventointipyynnön lähettäminen voi olla tarpeellista, kun järjestelmä ilmoittaa tulevasta materiaali puutteesta ja halutaan varmistua, että sen hetkiset nimikkeen saldot pitävät paikkansa.
Laukaisija:	Tuleva materiaali puute ja materiaalin varastosaldosta halutaan varmistua
Lähtötiedot:	Nimikkeen tiedot

Tulostiedot:	Inventointipyyntö inventoinnin Microsoft Planneriin.
Tärkeys:	Matala
Käyttötiheys:	Harvemmin
Olettamat:	Yhteys järjestelmän ja Microsoft Plannerin välille voidaan rakentaa.

ID ja nimi:	11. Ehdota työntekijämuutosta
Päätoimija:	Järjestelmä Toissijaiset toimijat: Työnjohtaja
Kuvaus:	Järjestelmä ehdottaa työntekijöiden vaihdosta työpisteiden välillä saman vuoron sisällä, jos työntekijöiden osaaminen alkuperäisessä työntekijäsuunnitelmassa ei vastaa tuotantoputken vaatimaa osaamista. Järjestelmä pyrkii etsimään tiimin sisältä sellaiset työntekijäparit, joiden työpisteet vaihtamalla tuotantoputken vaatima osaaminen täyttyy. Jos työpisteen kuormitus, jolta osaava työntekijä löytyy, on alhainen, järjestelmä ehdottaa työntekijää avuksi toiselle työpisteelle. Osaamisen mittarina käytetään osarakennenumeroita (ETN).
Laukaisija:	Automaattisesti iltavuoron jälkeen, kun tuotantoputki ajoitetaan uudelleen.
Lähtötiedot:	ID 4. Tuotantoputki, valmistustilausten osarakenteet, osaamismatriisi, työntekijöiden vuorolistat
Tulostiedot:	Ehdotus työntekijöiden työpisteiden muutoksista.
Tärkeys:	Kohtalainen
Käyttötiheys:	Päivittäin
Olettamat:	Työntekijöiden osaamismatriisi kattaa ETN tiedot, Työntekijöiden suunnitellut vuorot ja työasemat on määritelty järjestelmään.

ID ja nimi:	12. Muuta työntekijöiden suunniteltuja työasemia
Päätoimija:	Työnjohtaja Toissijaiset toimijat:
Kuvaus:	Vaihtoehto 1: Työnjohtaja hyväksyy järjestelmän ehdottaman työntekijän työasema muutokset. Vaihtoehto 2: Työnjohtaja muuttaa itse työntekijän suunniteltua työpistettä.
Laukaisija:	Päivittäin jos järjestelmä ehdottaa muutosta tai muuten tarpeen mukaan.
Lähtötiedot:	Työntekijöiden työasemavuorolistat
Tulostiedot:	Muutettu työasemavuorolista
Tärkeys:	Kohtalainen
Käyttötiheys:	Päivittäin
Olettamat:	

ID ja nimi:	13. Hyväksy/Hylkää tuotantojärjestysmuutos
Päätoimija:	Tuotannonajoittaja Toissijaiset toimijat:
Kuvaus:	Vaihtoehto 1: Tuotannonajoittaja hyväksyy järjestelmän ehdottaman tuotantojärjestysmuutoksen. Vaihtoehto 2: Tuotannonajoittaja hylkää järjestelmän ehdottaman tuotantojärjestysmuutoksen.
Laukaisija:	ID 6.
Lähtötiedot:	ID 6.
Tulostiedot:	Muutettu tuotantoputki
Tärkeys:	Suuri
Käyttötiheys:	Päivittäin
Olettamat:	

ID ja nimi:	14. Muuta tuotantojärjestystä manuaalisesti.
Päätoimija:	Tuotannonajoittaja Toissijaiset toimijat:
Kuvaus:	Vaihtoehto 1: Tuotannonajoittaja hylkää järjestelmän ehdottaman tuotantojärjestysmuutoksen ja muuttaa manuaalisesti tuotantojärjestystä. Vaihtoehto 2: Tuotannonajoittaja muuttaa manuaalisesti tuotantojärjestystä ilman järjestelmän ehdotusta.
Laukaisija:	ID 13. tai tuotannonajoittajan tahto esimerkiksi aikaistaa jonkun tietyn valmistustilauksen valmistusta.
Lähtötiedot:	ID 6.
Tulostiedot:	Muutettu tuotantoputki
Tärkeys:	Suuri
Käyttöiheys:	Päivittäin
Olettamat:	

Liite 2. Haastattelukysymykset

Haastateltava: Tuotannonajoittaja

- Tuotannonohjaus tällä hetkellä
 - o Miten muutat tuotantojärjestystä omassa aikaikkunassasi
 - Aikaikkunan pituus?
 - Käytännön toimenpiteet?
 - o Miten varmistat materiaalit ja henkilöstön tuotanto-ohjelmalle tai miten ja keneltä saat tiedon materiaali/henkilöstö haasteista/vajauksesta?
 - o Miten kommunikoit eteenpäin muutoksista tuotantojärjestykseen ja kenelle?
 - o Eroako jäädyttämättömien koneiden ja jäädytettyjen koneiden siirtäminen?
 - o Pitääkö jäädytetyn koneen materiaalit olla varmasti saatavilla ennen jäädytystä? Jos ei niin mikä heitto on sallittavaa? Mihin (ostotilauksen) päivämäärään nojataan, kun uskotaan materiaalin olevan varma?
 - o Mistä muutokset tuotantojärjestyksessä johtuvat?
 - o Mikä osuus työstäsi on työläintä ja miksi?
- Mitä uudella järjestelmällä pitäisi saada aikaan? (Lopputulema sinun työsi kannalta)
- Miten sitä pitäisi pystyä käyttämään?

Haastateltavat: Ostajat ja materiaalikoordinaattori

- Miten varmistatte materiaalin tuotannolle?
 - o Miten ja mistä/keneltä saatte tiedon haasteellisesta materiaalista, jotka tulevat varmasti tai mahdollisesti vaikuttamaan tuotantoon?
 - o Jos toimittaja antaa (kriittiselle) ostotilausriville toimituspäivämäärän, millä perusteella määrittelette, että päivämäärä on luotettava?
- Miten kommunikoitte haasteista eteenpäin ja kenelle?
- Mistä materiaaliongelmat johtuvat?
- Miten materiaalien varmistelua voisi helpottaa ja prosessia varmistaa?
- Mitä ja miten ohjelmisto/muu tietotekninen ratkaisu voisi helpottaa?
- Mitä tietoa sen (ohjelmiston/järjestelmän/muun tietoteknisen ratkaisun) pitäisi tuottaa teille?
- Miten sitä pitäisi pystyä käyttämään?
 - o Käyttöliittymä?
 - o Valmis raportti/ilmoitus/hälytys?

Haastateltavat: Kokoonpanon työnjohtajat

- Onko liian vähäisestä henkilöstöstä ollut ongelmaa tuotannolle?
- Miten tällä hetkellä varmistatte henkilöstön riittävyyden tuotanto-ohjelmalle päivittäisessä työssä?
 - o Onko jotain aikaikkunaa, jossa seuraatte henkilöstön riittävyyttä?

- Entä henkilöstön osaamisen varmistaminen?
 - Mitä työkaluja käytätte tällä hetkellä?
- Kommunikoitko henkilöstöressurssihaasteista eteenpäin ja jos kommunikoitte niin miten ja kenelle?
 - Miten ongelmia ratkotaan?
- Miten henkilöstöressurssien hallintaa voitaisiin helpottaa päivittäisessä toiminnassa?
- Miten tietokoneohjelma voisi helpottaa asiaa? Esim:
 - Henkilöstön allokoinnissa työasemille,
 - Osaamisen varmistamisessa,
 - Ongelmien kommunikoinnissa ja ”avun pyytämisessä”.
- Miten ohjelman pitäisi toimia, jotta se olisi käytännöllinen ja helpottaisi työtä?