

PROSESSIN MITOITUS, OHJAUS JA PARANTAMINEN

Prosessin ulostulon ja kustannuksen muodostumisen näkökulmasta



Ylemmän ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

YAMK, Teknologiaosaamisen johtaminen

Kevät 2022

Jouko Nygård

Teknologiaosaamisen johtaminen

Tekijä Jouko Nygård

Työn nimi Prosessin mitoitus, ohjaus ja parantaminen - prosessin ulostulon ja kustannuksen muodostumisen näkökulmasta

Ohjaaja Pasi Laine

Tiivistelmä

Vuosi 2022

Työn tarkoitus on osoittaa prosessin mitoittamiseen vaikuttavat tekijät tehdasfysiikan näkökulmasta. Työssä tutkitaan kuinka prosessin sisääntulot, kuten varasto, komponenttilaatu ja resursointi vaikuttavat prosessointiaikaan, sekä mikä on näiden vaikutus prosessin ulostulomäärään ja voittoon. Lisäksi tarkastellaan, kuinka prosessin sisääntuloparametrit tulee ohjata, jotta prosessin ulostulot ovat tavoitteen mukaiset. Työssä tutkitaan myös, kuinka parannustoiminta tulee kohdentaa vaikutuksen aikaansaamiseksi prosessin ulostuloon.

Työssä esitellään prosessin mitoittamiseen ja ohjaamiseen vaikuttavat fysiikan teoriat, joiden perusteella muodostettiin prosessin mitoittamiseksi laskentamalli. Tällä laskentamallilla on osoitettu eri prosessiparametrien vaikutus prosessin ulostuloon sekä voittoon. Laskentamallin avulla on mahdollista mitoittaa prosessi niin, että asetettujen tavoitteiden toteuttaminen on myös teorian mukaan mahdollista toteuttaa.

Prosessin ulostuloa voi kasvattaa esimerkiksi parantamalla osien saatavuutta, lisäämällä keskeneräisen työn määrää tai resursointia, mutta pidemmällä aikavälillä on kannattavampaa pienentää prosessin vaihtelua. Vaihtelun pienentäminen mahdollistaa yhtäaikaisesti tuotantomäärän ja voiton kasvun sekä lyhyemmän toimitusajan.

Työn lopussa pohditaan kuinka prosessin vaihtelun pienentäminen on mahdollista ja mitä se prosessin ohjaamiselta, organisoinnilta ja tavoitteiden asettamiselta edellyttää pitkällä aikavälillä.

Tämä opinnäytetyö on dokumentti oppimisprosessista, joka on seuraus kiinnostuksestani prosessin ohjaamisen tieteeseen ja fysiikkaan sekä näiden käytännön soveltamisen vaikeudesta.

Avainsanat Prosessin mitoitus, tehdasfysiikka, vaihtelu, kustannus

Sivut 78 sivua ja liitteitä 3 sivua

The purpose of this thesis is to prove how process should be designed and controlled according to factory physics. I research how process inputs like component stock, components quality and human resources effects to process shop floor processing time and process outputs and to the profit. I also discuss how process improvement should be targeted to the process and how this effects to the profit.

I discuss theory behind the process design and control and I create a calculation model based on this theory. I proved by using this that calculation model how process inputs effects to process output and profit. By demonstrating this calculation model it is possible to design process so that process targets are possible to reach.

It is possible to increase process outputs for example to increase inventory level, work in process and human resources, but in the long term it is more cost efficiency way to decrease process variation. It is possible to increase amount of process output and profit by decreasing process variation, when process lead time decrease at the same time.

In the ends of theses I reflect how variation decreasing is possible in the process and how the process targets should be set in the long term.

This thesis is a result of my learning journey from personal interests about process science and factory physics.

Keywords Process design, factory physics, variation, costs

Pages 78 pages and appendices 3 pages

Sisälllys

1	Johdanto	1
1.1	Opinnäytetyön tausta	1
1.2	Opinnäytetyön tavoite ja tutkimuskysymykset	2
1.3	Teoreettinen viitekehys ja sen historia	2
1.4	Opinnäytetyön rakenne	3
2	Prosessin ohjaamisen teorit	3
2.1	Perustavaa laatuiset lainalaisuudet	3
2.1.1	Littlen laki	3
2.1.2	Täydennysaika-kysyntä varianssiyhtälö	4
2.1.3	Käyttösuhde	8
2.1.4	Jaksonaika ja jono	8
2.2	Häiriöiden vaikutus aikavaihteluun.....	9
2.2.1	Prosessointiaika ilman häiriöitä	9
2.2.2	Osapuutteiden vaikutus prosessointiaikaan	10
2.2.3	Laadun ja resursoinnin vaikutus prosessointiaikaan	11
2.2.4	Prosessointiaika häiriöt huomioituna	12
2.2.5	Varmistusaika	12
2.2.6	Virtauksen vaihtelu - saapuva ja lähtevä vaihtelu	13
2.2.7	Siirtofunktio.....	14
2.3	Jonomallit.....	14
2.3.1	G/G/m jono	15
2.3.2	Yleinen estomalli	15
2.4	Yksinkertainen kustannuslaskenta.....	18
2.4.1	Muuttuvat ja kiinteät kustannukset.....	19
2.4.2	Tulos	19
2.5	Prosessin mitoittaminen	19
2.5.1	Prosessivaiheen sisään- ja ulostuloparametrit	20
2.5.2	Vaihtelun huomioiminen mitoituksessa	22
2.6	Prosessin ohjaaminen	22
2.6.1	Ohjauskortin käyttö.....	23

2.7	Prosessin parantaminen	24
3	Prosessin laskentamalli	25
3.1	Mallin rakentaminen.....	25
3.1.1	Sisääntuloparametrit.....	26
3.1.2	Prosessivaiheen parametrit	27
3.1.3	Prosessointiajat ja suoritusarvot.....	27
3.1.4	Jonovarasto	28
3.1.5	Välivarasto.....	28
3.1.6	Prosessin ulostulot	29
3.2	Mitoituksen simulointi laskentamallin avulla	30
3.2.1	Lähtötilanne	30
3.2.2	Vaihtelun ja ketjutuksen vaikutus prosessin virtaukseen.....	33
3.2.3	Varmistusajan lisäämisen vaikutus	34
3.2.4	Ulostulon kasvatus rinnakkaisia asemia lisäämällä.....	37
3.2.5	Osien saatavuuden parantamisen vaikutus prosessiin.....	39
3.2.6	Laatu- ja resurssipoikkeamien vaikutus prosessiin	42
3.2.7	Töiden saapumisnopeuden vaihtelun vaikutus prosessiin	44
3.2.8	Sisääntuloparametrien mitoituksen yhteisvaikutus prosessiin	46
3.2.9	Kysynnän laskun vaikutus voittoon eri prosessin tiloissa	48
3.3	Prosessin ohjauksen toteutus	51
3.3.1	Komponenttivarasto	51
3.3.2	Komponenttilaatu	52
3.3.3	Asennusresurssit	53
3.3.4	Prosessointiaika - takaisinkytkentä sisääntuloparametrien ohjaukselle	53
3.3.5	Töiden vapauttaminen prosessiin.....	55
3.4	Prosessin parantamisen simulointi kun tuotetta ja prosessia parannetaan .	55
3.4.1	Tuotteen osien määrän pienentämisen vaikutus	55
3.4.2	Tuotteen osakohtaisen kokoonpanoajan pienentäminen.....	57
3.4.3	Parantamisen kohdentamisen merkitys	59
3.5	Prosessin mitoituslaskennan yhteenveto	60
3.5.1	Laskentamallin luotettavuus	61

4	Yhteenveto ja johtopäätökset	62
4.1	Pohdinta	63
4.2	Jatkotutkimuskohteet	66
4.3	Johtopäätökset.....	67
	Lähteet.....	69

Liitteet

Liite 1	Mitoituslaskenta
Liite 2	Prosessivaiheiden laskenta
Liite 3	Kustannuslaskenta

Termit

t_0	Raaka prosessiaika eli häiriötön tuotteen aiheuttama prosessointiaika. Tällä tarkoitetaan kalenteriaikaa.
σ_0	Prosessointiajan luonnollinen vaihtelu, keskihajonta, joka aiheutuu työympäristön vähäisistä poikkeamista ja inhimillisestä suoritusajan vaihtelusta.
m	Rinnakkaisten tekopaikkojen määrä.
t_e	Efektiiivinen prosessiaika, toteutunut prosessointiaika kalenteriaikana, joka sisältää häiriöt.
σ_e	Toteutuneen prosessointiajan vaihtelu, keskihajonta.
A	Käytettävyys, millä todennäköisyydellä työ on mahdollista suorittaa. Esimerkiksi osien saatavuus- ja laatukontekstissa.
m_r	Keskimääräinen häiriön kesto
p	Epäonnistumistodennäköisyys
n	Asennettavien nimikkeiden määrä
RTY	Ensimmäisellä kerralla oikein. Onnistumistodennäköisyys virheettömälle suoritukselle
r_b	Pullonkaulan nopeus
μ_n	Kysynnän määrä prosessiin kappaleissa aikayksikköä kohden
σ_n	Prosessin kysynnän keskihajonta
r_a	Töiden saapumisnopeus
t_a	Töiden saapumisaikaväli
σ_a	Töiden saapumisaikavälin keskihajonta

c^2	Neliöllinen vaihtelukerroin
c_a^2	Saapuvien töiden neliöllinen vaihtelukerroin, saapuva vaihtelu
c_e^2	Lähtevien töiden neliöllinen vaihtelukerroin, lähtevä vaihtelu
u	Käyttösuhde
c_d^2	Lähtevien töiden neliöllinen vaihtelukerroin kun tekopaikat on ketjutettu peräkkäin, lasketaan siirtofunktiolla c_a^2 ja c_e^2 vaihtelukerointen sekä käyttösuhteen perusteella.
d	Keskimääräinen kysyntä
l_t	Keskimääräinen täydennysaika
l_v	Varmistusaika, jolla asetettu prosessointivaiheen onnistumistodennäköisyys saavutetaan. Huomioi prosessointiajan vaihtelun.
σ_D	Kysynnän keskihajonta
σ_l	Täydennysajan keskihajonta
σ_s	Täydennysaika-kysyntä keskihajonta
F	Jakaumafunktio, jonka avulla voidaan määrittää asetusarvo määritellyllä onnistumistodennäköisyydellä jakauman pinta-alasta.
z	Normaalijakauman arvo, jolla keskihajonta kerrotaan halutun onnistumistodennäköisyyden saavuttamiseksi. Tässä varaston täyttöaste ja jaksonajan toteutumistodennäköisyys
s	Turvavarasto
PPM	Viollisten yksiköiden määrä miljoonaa yksikköä kohden
SPC	Tilastollinen prosessin ohjaus, jossa lasketaan mittausdatan perusteella prosessin ohjausrajat
UCL	Tilastollisen ohjauskortin ylempi ohjausraja

LCL	Tilastollisen ohjauskortin alempi ohjausraja
\bar{X}	Lukujoukon keskiarvo
E₂	I-MR kortin ohjausrajojen laskennassa käytettävä taulukkoluku
 mR 	Perättäisten näytteiden erotuksen itseisarvojen keskiarvo
CT	Jaksonaika, joka kuluu työn vapauttamisesta työn valmistamiseen sisältäen jonotusajan
CT_q	Jonotusaika on aika, jonka työ odottaa jonossa ennen pääsyä prosessoitavaksi
TH	Prosessin ulostulo, tässä kappaletta aikayksikköä kohden
WIP	Keskeneräisen työn kappalemäärä prosessissa

G/G/m jono

Jonoutumista kuvaava malli kun tekopaikat ovat rinnakkain ja prosessi- ja saapumisajat ovat normaalisti jakautuneet

Yleinen estomalli

Jonoutumista kuvaava malli kun tekopaikat ovat rinnakkain ja prosessi- ja saapumisajat ovat normaalisti jakautuneet sekä keskeneräisen työn määrä prosessissa on rajoitettu

WIP_{nb}	Laskennallinen keskeneräisen työn määrä ilman keskeneräisen työn rajoitetta. Tarvitaan laskettaessa jonoutumista yleisen estomallin mukaan.
ρ	Käyttösuhteen korjauskerroin yleisen estomallin jonolaskennassa kun käyttösuhte < 1
ρ_R	Käyttösuhteen korjauskerroin yleisen estomallin jonolaskennassa kun käyttösuhte > 1
b	Blokin koko, joka sisältää aseman ja välivaraston keskeneräiset työt. Rajoittaa keskeneräisen työn määrän asetettuun.

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä on kuvattu prosessin käyttäytymiseen vaikuttavat tekijät tehdasfysiikan näkökulmasta, ja kuinka eri prosessiparametrit vaikuttavat toisiinsa. Työssä on lisäksi kerrottu, kuinka vaihtelu vaikuttaa prosessin ulostuloon ja voittoon sekä kuinka vaihtelua vastaan voi suojautua. Työ on tehty teoreettisena opinnäytetyönä, jossa prosessin käyttäytyminen on kuvattu laskentamallin avulla. Työssä käsitellään kuinka prosessin mitoittaminen, ohjaaminen ja parantaminen toteutetaan fysiikan lainalaisuuden huomioiden. Laskentamalliin on liitetty yksinkertaistettu kustannuslaskentamalli, jonka avulla eri ohjausparametrimuutoksien kustannusvaikutuksen voi osoittaa. Kustannusten kytkentä prosessin laskentamalliin mahdollistaa eri prosessiparametrien mitoittamisen kokonaiskustannustavoitteen mukaisesti.

1.1 Opinnäytetyön tausta

Olen työskennellyt valmistavan teollisuuden valmistusyksikön eri rooleissa, jonka aikana on muodostunut käsitys toimintaympäristön monimutkaisuudesta. Olen tätä kautta päässyt näkemään kyseisen toimintaympäristön haasteet eri näkökulmista sekä sen, mikä toimii ja mikä toimii vähän paremmin.

Käännekohta omalle ajattelulle oli, kun minulle tarjoutui mahdollisuus opiskella prosessin ohjaamisen tiedettä ja tehdasfysiikkaa. Käytännön kokemus ja tiede kohtasivat kun ymmärsin, että aiemmat kohtaamani ongelmat on mahdollista ennakoida etukäteen laskemalla ja mitoittamalla prosessi oikein. On ollut palkitsevaa ja motivoivaa huomata kuinka ajatusmallini on avautunut tuotannonohjausjärjestelmien ja taulukkolaskentaohjelmien eksaktista maailmasta kohti vaihtelun ja systeemien maailmaa. Tämä opinnäytetyö on jatkumoa tälle oppimismatkalle.

Haluan kiittää vaimoani ja lapsiani heidän suomasta ajasta tämän työn kirjoittamisen mahdollistamiseksi, Mika Lindevallia lukuisista keskusteluista ajatusten jäsentämiseksi,

Quality Knowhow Karjalainen Oy:n kouluttajaa Antti Piiraista oivalluttamisesta sekä työnantajaani oppimisen mahdollistamisesta.

1.2 Opinnäytetyön tavoite ja tutkimuskysymykset

Opinnäytetyön tavoite on osoittaa prosessin mitoittamiseen ja ohjaamiseen vaikuttavat tekijät tehdasfysiikan näkökulmasta, sekä kuinka parantaminen tulee prosessissa kohdistaa. Tässä työssä on rakennettu kolmivaiheisen prosessin laskentamalli, jolla voi osoittaa laskennallisesti eri tekojoiden vaikutuksen prosessin ulostuloon ja voittoon. Laskentamalli on rakennettu kokoonpanoprosessin näkökulmasta, jossa ihmisvoimin asennetaan komponentteja toisiinsa ja kolmen prosessivaiheen jälkeen syntyy valmis tuote.

Tutkimuskysymykset:

- Mitkä tekijät vaikuttavat prosessin kappalemääräiseen ulostuloon ja kustannuksen muodostumiseen?
- Kuinka prosessi mitoitetaan ja ohjataan suhteessa tavoitteeseen?
- Mihin parannustoiminta tulee prosessissa kohdistaa vaikutuksen aikaansaamiseksi ulostuloon?

1.3 Teoreettinen viitekehys ja sen historia

Tässä työssä käsitellyt prosessointiajan ja prosessin virtauksen vaihtelun aiheuttamat lainalaisuudet perustuvat tehdasfysiikkaan, jotka fyysikot Wallance J. Hopp ja Mark L. Spearman ovat koonneet teokseen Factory Physics vuonna 1988 työskennellessään IBM:n piirilevytehtaalla Texasissa. (Hopp & Spearman, 2011, s. vii)

Työn rakenne mukailee Joseph Juranin yleispätevää läpimurtoprosessia, jonka hän esitteli kirjassaan Managerial Breakthrough vuonna 1964. Juranin trilogiaksi kutsuttu prosessi pitää sisällään suunnittelun, ohjauksen ja parantamisen. Juranin ajatukset ovat pohja nykyiselle Six Sigmalle sekä myös Leanille, koska Joseph Juran ja William Edwards Deming opettivat Japanin liikkeenjohtoa 2. maailmansodan jälkeen. (Karjalainen, 2020, s.195)

Yhdistin työssä prosessin tieteelliseen lähestymiseen taloudellisen näkökulman kustannuslaskennan muodossa, jolla on mahdollista osoittaa prosessiparametrien muutoksen taloudellisissa tunnusluvuissa. Tässä työssä rakennettua mitoituslaskentaa hyödyntäen on prosessi mahdollista mitoittaa niin, että ulostulotavoitteet toteutuvat taloudellisesti mahdollisimman kannattavasti.

1.4 Opinnäytetyön rakenne

Opinnäytetyö koostuu neljästä pääluvusta. Ensimmäisessä luvussa käsitellään opinnäytetyön taustaa ja tavoitetta sekä avataan teoreettisen viitekehyksen historiaa. Toisessa luvussa kerrotaan työssä esitetyt prosessin ohjaamisen teoriat ja selitetään ne auki. Kolmas luku käsittelee prosessin laskennallista simulointia toisen luvun teorioiden mukaisesti. Neljännessä luvussa on yhteenveto ja vastataan tutkimuskysymyksiin sekä pohditaan laskennan hyödyntämistä ja sovelluskohteita.

2 Prosessin ohjaamisen teoriat

Prosessilla tarkoitetaan tässä työssä toistuvien tapahtumien ketjua, joka koostuu syötteestä, toiminnasta ja tuotoksesta. Prosessissa on keskeistä takaisinkytkentä, joka antaa mahdollisuuden ohjata prosessia, mikäli tunnetaan tavoite ja keinot vaikuttaa prosessiin. (Laamanen, 2005, s.153) Syötteestä käytetään tässä työssä myös termiä sisääntuloparametri sekä tuotoksesta prosessin ulostuloparametri. Seuraavissa luvussa on esitetty lainalaisuudet, jotka selittävät prosessin käyttäytymistä.

2.1 Perustavaa laatuiset lainalaisuudet

2.1.1 Littlen laki

Littlen laki sitoo yhteen prosessin keskeneräisen työn, ulostulon ja jaksonajan. Laki on nimetty John D.C. Littlen mukaan, joka todisti tämän matemaattisesti. Laki on tarkemmin sanottuna tautologia eli aina tosi, joka pätee kaikissa prosesseissa. Kyseessä on vastaava

prosessin lainalaisuus, kuin perusfysiikassa voima on massan ja kiihtyvyyden tulo, $F=ma$ tai sähkötekniikassa teho on jännitteen ja virran tulo, $P=UI$. Prosessin mitoittamisen ja ohjaamisen kannalta tämä tautologia on hyvin keskeinen.

Keskeneräisen työn määrää (WIP) on riippuvainen prosessin ulostulon (TH) ja jaksonajan (CT) tulosta. Mikäli prosessivaiheen ulostulon kappalemäärää täytyy kasvattaa, niin on lyhennettävä prosessivaiheen jaksonaikaa tai lisättävä keskeneräisen työn määrää tai yhtäaikaaisesti muutettava molempia parametreja. (Hopp & Spearman, 2011, s. 239)

$$WIP = TH \times CT, \quad TH = \frac{WIP}{CT}$$

2.1.2 Täydennysaika-kysyntä varianssiyhtälö

Täydennysaika-kysyntä varianssiyhtälön avulla voidaan määrittää komponenttivaraston tarvittava varastoitavien osien kappalemäärä, joka kompensoi komponenttien toimitusajan ja komponenttien kysynnän aiheuttaman vaihtelun. Varianssiyhtälön avulla voidaan muodostaa jakauma, jonka perusteella voidaan määrittää haluttu todennäköisyys osien saatavuudelle eli asettaa haluttu varaston palveluaste.

Komponentin toimitusajan, sen kysynnän sekä näiden molempien vaihtelun perusteella voidaan laskea täydennysaika-kysyntä keskihajonta (σ_s). Tämä keskihajonta on yhden standardipoikkeaman siirtymä täydennysaika-kysyntä jakauman keskiarvosta, niin sanottu yhden sigman siirtymä. (Hopp & Spearman, 2011, s. 89)

Normaalijakauma, toiselta nimeltä Gaussin jakauma, muodostuu satunnaismuuttujien summautumislain perusteella, joka tunnetaan tilastomatematiikan keskeisenä raja-arvolauseena. Kun näytekokonaisuus on riittävän suuri (≥ 30), niin jakaumasta tulee likimain normaali (Piirainen, 2014, s.60).

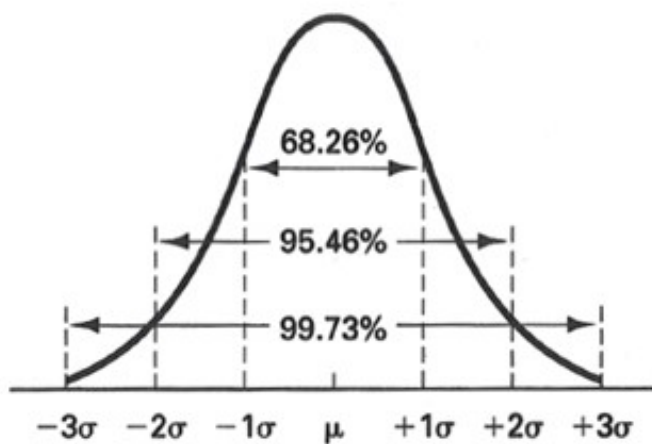
Normaalijakauman luonteesta johtuen, tiedetään yhden sigman siirtymän kattama pinta-ala täydennysaika-kysyntä varianssiyhtälöstä. Hyödyntämällä tietoa normaalijakauman muodosta, voidaan yhden sigman siirtymätiedon perusteella määrittää jakaumalta tavoiteltu

onnistumistodennäköisyys eli osuus jakauman pinta-alasta. Kun varianssiyhtälöllä saatu keskihajonta kerrotaan tavoiteltua pinta-alaa vastaavalla kertoimella, niin voidaan määrittää tarvittava turvavaraston (s) kappalemäärä. (Hopp & Spearman, 2011, s. 89).

$$\sigma_s = \sqrt{l\sigma_D^2 + d^2\sigma_L^2}$$

$$s = F(z)\sigma_s$$

Kuva 1. Normaalijakauma, jossa esitetty eri standardipoikkeamien prosentuaalinen osuus jakauman pinta-alasta.



Täydennysaika-kysyntä varianssiyhtälön käyttö on avattu vielä oheisen laskentaesimerkin avulla, koska varaston ohjaus vaihtelu huomioiden on prosessin toiminnan kannalta niin keskeistä. Laskennan suureet on oltava samassa yksikössä, esimerkiksi päiviä. Huomioitavaa on, että keskimääräinen toimitusaika ja sen hajonta sekä kysynnän hajonta on hyvä tarkastella historiatoteuman perusteella. Toteutunut toimitusaika ja hajonnat usein poikkeavat suunnitellusta tai luvutusta, jolloin todellinen vaihtelu tulee huomioitua tarkastelemalla toteumia. Kysynnän voi myös tarkastella historiasta (D), mikäli sen ei oleteta muuttuvan, mutta tuleviin kysynnän muutoksiin reagoiminen edellyttää oletetun tulevan kysynnän (d) käyttämistä turvavaraston laskennassa. Näin varastotasojä on mahdollista ennakoivasti muuttaa vastaamaan tarvetta, ennen kysynnän realisoitumista prosessiin. (Hopp & Spearman, 2011, s. 88).

Komponentin keskimääräinen toimitusaika, $l = 20$ päivää

Toimitusajan keskihajonta, $\sigma_L = 2$ päivää

Keskimääräinen kysyntä, $d = 5$ kpl / pv

Kysynnän keskihajonta, $\sigma_D = 1$ kpl / pv

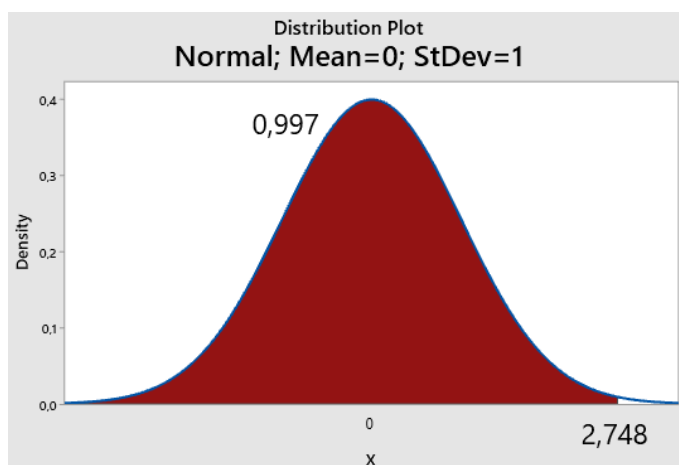
Haluttu komponenttien saatavuus varastosta, 99,7 % todennäköisyys

$$s = F(z)\sqrt{l\sigma_D^2 + d^2\sigma_L^2} = 2,75\sqrt{20 * 1^2 + 5^2 * 2^2} = 2,75 * 11 = 30 \text{ kpl}$$

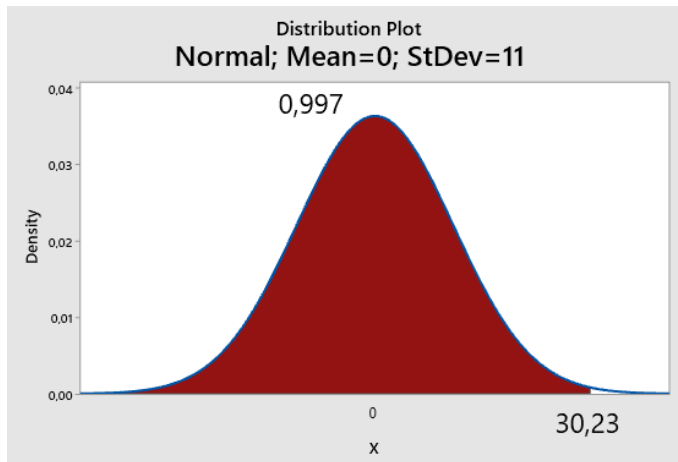
Asetetun varaston palveluaste-prosentin mukainen palveluaste-kerroin (z) voidaan laskea esimerkiksi Excel-taulukkolaskentaohjelmalla funktiolla (=NORM.S.INV(0,997)), joka antaa tulokseksi 2,75. Esimerkin mukaisella komponentin toimitusajalla, kysynnällä ja näiden hajonnalla saadaan täydennysaika-kysyntä keskihajonnaksi 11. Kertomalla palveluaste-kerroin keskihajonnalla, saadaan komponentin turvavarastoksi 30 kappaletta.

Palveluaste-kerroin voidaan myös määrittää havainnollisesti Minitab-analysointiohjelmistolla, Probability distribution plot-työkalulla. Normaalijakauman yhden keskihajonnan arvolla saadaan 99,7 % todennäköisyys arvolla 2,748, joka on vastaava luku kuin täydennysaika-kysyntä varianssiyhdyllä laskettu. Samalla työkalulla voidaan määrittellä myös suoraan 99,7% todennäköisyyden vaatima turvavarasto kun tiedetään täydennysaika-kysynnän keskihajonta.

Kuva 2. Yhden keskihajonnan jakaumalla arvo 2,75 kattaa 99,7 % jakauman pinta-alasta.



Kuva 3. Täydennysaika-kysyntä keskihajonnalla 11 kattaa 30 kappaletta 99,7 % jakauman pinta-alasta.



Turvavaraston on katettava komponentin täydennysajan aikainen kysyntä, jolloin toimitusajan ja kysynnän vaihtelulla on merkittävä vaikutus tarvittavan turvavaraston tarpeeseen. Alla olevassa esimerkissä on pidetty keskimääräinen kysyntä ja toimitusaika samana kuin edellisessä esimerkissä, mutta toimitusajan keskihajonta on nostettu kahdesta päivästä kolmeen, sekä kysynnän keskihajonta yhdestä kahteen kappaleeseen päivässä. Vaihtelun lisääntyminen kasvattaa täydennysaika-kysyntä varianssia yhdestätoista seitsemäätoista, joka nostaa tarvittavan turvavaraston tarpeen kolmestakymmenestä (30) neljäänkymmeneen kahdeksaan (48). Vaikka keskimääräinen kysyntä ja toimitusaika pysyvät samana, niin näiden hajonnan kasvaminen kasvattaa turvavaraston tarvetta 60%. Tästä syystä varaston ohjaamisessa on huomioitava vaihtelu, jotta tavoiteltu varaston palveluaste on mahdollista toteuttaa.

Komponentin keskimääräinen toimitusaika, $l = 20$ päivää

Toimitusajan keskihajonta, $\sigma_L = 2 \rightarrow 3$ päivää

Keskimääräinen kysyntä, $d = 5$ kpl / pv

Kysynnän keskihajonta, $\sigma_D = 1 \rightarrow 2$ kpl / pv

Haluttu osien saatavuus varastosta, 99,7 %

$$s = F(z)\sqrt{l\sigma_D^2 + d^2\sigma_L^2} = 2,75\sqrt{20 * 2^2 + 5^2 * 3^2} = 2,75 * 17 = 48 \text{ kpl}$$

2.1.3 Käyttösuhte

Käyttösuhte (u) on suhdeluku, joka kuvaa millä todennäköisyydellä työasema on kiireinen. Käyttösuhte lasketaan yhden aseman prosessivaiheessa saapuvien (r_a) ja lähtevien (r_e) töiden nopeuksien suhteesta. Mikäli prosessivaiheella on rinnakkaisia asemia, niin käyttösuhte lasketaan kertomalla saapuvien töiden nopeus ja efektiivinen prosessiaika (t_e) eli häiriöt sisältävä toteutunut prosessiaika keskenään, joka jaetaan rinnakkaisten asemien (m) lukumäärällä. (Hopp & Spearman, 2011, s. 284)

Huomionarvoista on, että kun käyttösuhte lähestyy suhdelukua 1, niin prosessi lähestyy epästabiilia tilaa ja jono prosessin edessä sekä jaksonaika lähtee epälineaarisesti kasvamaan. (Hopp & Spearman, 2011, s.317) Työasema menee tällöin niin sanotusti tukkoon, eikä se kykene vastaamaan kysyntään.

$$u = \frac{r_a}{r_e} \quad \text{ja} \quad r_e = \frac{m}{t_e} \quad , \text{jolloin} \quad u = \frac{r_a t_e}{m}$$

Kaavasta nähdään, että käyttösuhteeseen voidaan vaikuttaa ensisijaisesti työasemaan vapautettavien töiden määrällä. Töitä vapautetaan sen verran, että käyttösuhte pysyy alle yhden ja jonotusaika pysyy hallittavana. Mikäli työaseman ulostulomäärä (r_e) ei riitä kysyntään (r_a), niin ulostuloa voidaan kasvattaa joko lyhentämällä toteutunutta prosessointiaikaa (t_e) tai lisäämällä rinnakkaisia asemia (m). Molemmissa tapauksissa työaseman ulostulo kasvaa ja työasemaan voidaan vapauttaa enemmän työtä ilman, että käyttösuhte nousee liian korkeaksi.

2.1.4 Jaksonaika ja jono

Littlen lain yhteydessä esitetty jaksonaika muodostuu kahdesta termistä, jonotusajasta (CT_q) ja efektiivisestä prosessiajasta eli prosessointiajasta (t_e). Kokonaisjaksonaikaan vaikuttaa siis kauanko työt jonottavat pääsyä prosessiin, sekä kauanko työ kestää prosessissa. (Hopp & Spearman, 2011, s. 284)

$$CT = CT_q + t_e$$

Jonon kappalemäärä (WIP_q) prosessissa voidaan laskea kertomalla töiden saapumisnopeus ja jonotusaika keskenään. (Hopp & Spearman, 2011, s. 284)

$$WIP_q = r_a CT_q$$

Jonon muodostumiseen vaikuttaa merkittävästi edellisessä kappaleessa esitetty työaseman käyttösuhde. Jos tarkastellaan esimerkiksi M/M/1 jonomallin mukaista jonotusajan laskentakaavaa, niin havaitaan jonotusajan kasvavan käyttösuhteen kasvaessa, vaikka prosessointiaika pysyisi samana. Jonomalleista enemmän luvussa 2.3.

$$CT_q = \frac{u}{1-u} t_e$$

2.2 Häiriöiden vaikutus aikavaihteluun

Häiriöt kasvattavat tuotteen aiheuttamaa prosessointiaikaa, koska häiriöt estävät työn tekemisen suunnitellusti. Seuraavissa kappaleissa on esitetty, kuinka tuotteesta johtuva prosessointi aika (t_0) ja sen keskihajonta kasvavat häiriöistä johtuvasta vaihtelusta toteutuneeksi prosessointiajaksi eli efektiiviseksi prosessiajaksi (t_e) ja sen keskihajonnaksi. Kun prosessointiajat ovat normaalisti jakautuneita, niin efektiivisen prosessiajan ja sen keskihajonnan perusteella voidaan määrittää varattava aika työn suorittamiseen, jolla saavutetaan tavoiteltu onnistumistodennäköisyys.

2.2.1 Prosessointiaika ilman häiriöitä

Prosessointiajalla tarkoitetaan työn suorittamiseen kuluva kalenteriaikaa, joka kuluu keskimäärin työn aloittamisesta sen päättämiseen yhdessä prosessivaiheessa.

Prosessointiaika ilman häiriöitä (t_0) eli raaka prosessiaika on se aika, joka kuluu työn tekemiseen kun kaikki komponentit on saatavilla, niissä ei ole laatupoikkeamia ja tarvittavat osaavat henkilöresurssit ovat saatavilla. (Hopp & Spearman, 2011, s.271) Prosessointiaikaa ilman häiriöitä voidaan kutsua myös tuotteen aiheuttamaksi ajaksi, koska se on vahvasti riippuvainen asennettävien komponenttien määrästä ja yhden komponentin asennusajasta.

Häiriötön prosessointiaika on työn suorittamiseen kuluva keskimääräinen aika, joka sisältää kuitenkin vaihtelua asetusajoista ja pienistä poikkeamista johtuen. Tätä vaihtelua kutsutaan luonnolliseksi vaihteluksi, keskihajonnaksi (σ_0), joka on yhden sigman siirtymä prosessointiajan keskiarvosta. Prosessointiajoista muodostuu jakauma, jonka keskiarvo voidaan ilmaista t_0 ajalla ja jakauman muoto σ_0 – luvulla. (Hopp & Spearman, 2011, s.272)

Prosessointiaika on lattia-aikaa eli kauanko prosessointi kestää kalenteriaikana. Tämä on siis eri asia kuin työn suorittamiseen tarvittut resurssitunnit, jotka kerääntyvät tuotteelle sen kulkiessa prosessin läpi.

2.2.2 Osapuutteiden vaikutus prosessointiaikaan

Osapuutteiden vaikutus toteutuneeseen prosessointiaikaan (t_e) voidaan laskea osien saatavuuden ja nimikemäärän kautta. Korottamalla toteutunut varaston palveluaste eli varaston käytettävyys (A_v), nimikemäärän potenssiin, saadaan laskettua nimikemäärään suhteutettu onnistumistodennäköisyys, RTY. (Piirainen, 2014, s.70)

$$RTY = A_v^n$$

Tästä voidaan laskea edelleen toteutunut prosessointiaika (t_e), jakamalla tuotteen ja sen nimikemäärän mukainen virheetön prosessointiaika (t_0) onnistumistodennäköisyydellä (RTY) eli nimikemäärän ja varaston palveluasteen huomioidulla käytettävyydellä (A).

$$t_e = \frac{t_0}{A}$$

Osapuutteiden vaikutus prosessointiajan varianssiin voidaan laskea suhteuttamalla tuotteen virheettömän ajan neliöllinen vaihtelu (σ_0^2) käytettävyyden neliö (A^2) toisiinsa, sekä lisäämällä tähän puutteiden ilmenemisajan vaikutus vaihteluun. Kaavassa osapuutteiden kesto on m_r ja puutteiden keston keskihajonta on σ_r . (Hopp & Spearman, 2011, s.278)

$$\sigma_e^2 = \frac{\sigma_0^2}{A^2} + \frac{(m_r^2 + \sigma_r^2)(1 - A)t_0}{Am_r}$$

Neliöllisestä vaihtelukertoimesta (σ_e^2) eli varianssista saadaan laskettua keskihajonta (σ_e) eli vaihtelu ottamalla siitä neliöjuuri.

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_e^2}$$

Näin voidaan laskea osapuutteiden ja niiden keston vaikutus toteutuneeseen prosessointiaikaan (t_e) ja sen keskihajontaan (σ_e). Tuotteen aiheuttamasta ajasta voidaan näin laskea toteutunut prosessointiaika kun tiedetään nimikemäärä, puutteiden määrä ja niiden keston vaikutusaika.

2.2.3 Laadun ja resursoinnin vaikutus prosessointiaikaan

Komponentin virheellisyyden vaikutus toteutuneeseen prosessointiaikaan voidaan huomioida kun tiedetään todennäköisyys, jolla yksittäinen komponentti on virheellinen (p). Vähentämällä epäonnistumistodennäköisyys luvusta 1 saadaan onnistumistodennäköisyys (A), jolla jakamalla tuotteen aiheuttama prosessointiaika, saadaan huomioitua komponentin virheellisyyden vaikutus toteutuneeseen prosessointiaikaan.

$$t_e = \frac{t_0}{1-p} = \frac{t_0}{A}$$

Laatupoikkeamien vaikutus toteutuneeseen prosessointiajan keskihajontaan (σ_e) voidaan laskea alla olevalla kaavalla. Kun tiedetään tuotteen aiheuttama prosessointiaika (t_0), sen keskihajonta (σ_0) sekä onnistumistodennäköisyys eli käytettävyys (A). (Hopp & Spearman, 2011, s.416)

$$\sigma_e^2 = \frac{\sigma_0^2}{A} + \frac{(1-A)t_0^2}{A^2}$$

Henkilöstöressurssipuutteiden vaikutus voidaan laskea samoin kuin laatu vaihtelun vaikutus, kun tiedetään millä todennäköisyydellä (p) resurssipuute ilmenee.

2.2.4 Prosessointiaika häiriöt huomioituna

Kokonaiskäytettävyys, jossa on huomioitu osa-, laatu- ja resurssipuutteet, voidaan laskea kertomalla eri häiriöiden mukaiset onnistumistodennäköisyydet keskenään. Prosessointiaika lasketaan jakamalla tuotteen aiheuttama aika kokonaijonnistumistodennäköisyydellä.

$$t_e = \frac{t_0}{A_p A_l A_r}$$

Prosessointiajan varianssi voidaan laskea lisäämällä eri häiriöiden aiheuttamat varianssit toisiinsa. Keskihajonta saadaan ottamalla tästä kokonaisvariانسsista neliöjuuri.

(Montgomery, 2013, s. 377)

$$\sigma_e^2 = \sigma_{ep}^2 + \sigma_{el}^2 + \sigma_{er}^2$$

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_e^2}$$

2.2.5 Varmistusaika

Aiemmissa kappaleissa käytiin läpi kuinka eri häiriötyypit kasvattavat prosessointiaikaa. Toteutunut prosessointiaika on riippuvainen näiden häiriöiden määrästä, jonka suuruus voitiin laskea kun tiedetään häiriöiden vaikutus onnistumistodennäköisyyteen ja prosessointiajan keskihajontaan. Kun oletetaan prosessointiaikojen olevan normaalisti jakautuneita, niin kokonaisprosessointiajan keskiarvon ja keskihajonnan perusteella voidaan määrittellä varattava aika työn suorittamiseen halutulla onnistumistodennäköisyydellä. Tarvittava varmistusaika (l_v) voidaan määrittää, lisäämällä jaksonajan keskiarvoon (CT) onnistumistodennäköisyysvaatimuksen mukaisella kertoimella (z) kerrottu jaksonajan keskihajonta (σ_{CT}) (Hopp & Spearman, 2011, s.332).

$$l_v = CT + z\sigma_{CT}$$

Kyse on samasta normaalijakauman pinta-alan määrittämisen teoriasta, kuin täydennysaikakysyntä varianssiyhtälön tapauksessa, turvavaraston kappalemäärä laskiessa luvussa 2.1.2.

2.2.6 Virtauksen vaihtelu - saapuva ja lähtevä vaihtelu

Prosessivaiheessa ilmenee sinne saapuva ja prosessivaiheesta lähtevä vaihtelu, joita kutsutaan neliöllisiksi vaihtelukertoimiksi. Saapuvan vaihtelun vaihtelukerroin (c_a^2) voidaan määrittää prosessivaiheeseen saapuvien töiden saapumisaikavälin (t_a) ja saapumisaikavälin keskihajonnan (σ_a) neliöllisestä suhteesta. (Hopp & Spearman, 2011, s.281)

$$c_a^2 = \frac{\sigma_a^2}{t_a^2}$$

Vaihtoehtoisesti prosessivaiheeseen saapuva neliöllinen vaihtelukerroin voidaan määrittää prosessivaiheeseen saapuvien töiden nopeuden keskihajonnan neliön (σ_n^2) ja töiden saapumisnopeuden (μ_n) suhteesta. (Hopp & Spearman, 2011, s.281)

$$c_a^2 = \frac{\sigma_n^2}{\mu_n}$$

Näistä jäljempi tapa määrittää saapuvan vaihtelun neliöllinen vaihtelukerroin saapumisnopeuden keskihajonnan ja saapumisnopeuden perusteella on monesti helpompi, koska laskennan edellyttämää töiden saapumisaikavälin keskihajontaa on prosessista hankalampi mitata. Saapumisnopeus ja sen keskihajonta on yleensä helpompi selvittää.

Prosessivaiheesta lähtevän vaihtelun ilmaiseva neliöllinen vaihtelukerroin (c_e^2) voidaan määrittää efektiivisen prosessiajan (t_e) ja sen keskihajonnan (σ_e) suhteesta. (Hopp & Spearman, 2011, s.279)

$$c_e^2 = \frac{\sigma_e^2}{t_e^2}$$

Prosessivaiheen saapuvan ja lähtevän vaihtelun kertoimia tarvitaan, esimerkiksi kun lasketaan prosessivaiheen eteen muodostuva jonotusaika (CT_q) G/G/m jonomallissa sekä siirtofunktion laskentaan.

2.2.7 Siirtofunktio

Kun prosessivaiheita on kytketty kaksi tai useampi peräkkäin, voidaan edellisessä prosessivaiheessa ilmenevä vaihtelu siirtää seuraavan vaiheen saapuvaksi vaihteluksi (c_d^2) siirtofunktiolla. Seuraavalle vaiheelle siirtyvä vaihtelu lasketaan prosessivaiheen neliöllisten vaihtelukertoimien ja käyttösuhteen perusteella. (Hopp & Spearman, 2011, s.280)

$$c_d^2 = u^2 c_e^2 + (1 - u^2) c_a^2$$

Kun rinnakkaisia asemia (m) on yhdessä prosessivaiheessa useampi, voidaan tämä huomioida käyttämällä alla olevaa kaavaa. Huomionarvoista kaavassa on, että se sievenny edellisen kaavan muotoon, kun rinnakkaisten asemien määrä on 1. Näin ollen rinnakkaiset asemat huomioivaa kaavaa voidaan käyttää kaikissa rinnakkaisten asemien määrän tapauksissa. (Hopp & Spearman, 2011, s.280)

$$c_d^2 = 1 + (1 - u^2)(c_a^2 - 1) + \frac{u^2}{\sqrt{m}}(c_e^2 - 1)$$

2.3 Jonomallit

Erilaisilla jonomalleilla voidaan mallintaa prosessivaiheen saapuvien töiden jonoutumista eli jonotusaikaa (CT_q), jonka saapuva työ joutuu odottamaan ennen pääsyä prosessivaiheeseen. Käytettävän jonomallin valintaan vaikuttaa saapumisajoista ja prosessiajoista muodostuva jakauman muoto, prosessivaiheen rinnakkaisten asemien määrä sekä onko keskeneräisen työn määrä prosessissa rajoitettu. M/M/1, G/G/1, M/M/m sekä G/G/m jonomallit ovat avoimen jonoverkon malleja, jossa oletetaan sisään tulevaa materiaalia sekä tilaa valmistuotteille olevan rajattomasti. (Hopp & Spearman, 2011, s.284)

M/M/1 jonomallia käytetään, mikäli prosessiajat ovat eksponentiaalisia ja rinnakkaisia asemia on vain yksi. Tällöin jonotusaika lasketaan yksinkertaisesti huomioimalla prosessivaiheen käyttösuhte ja efektiivinen prosessiaika. (Hopp & Spearman, 2011, s.287)

$$CT_q = \frac{u}{1 - u} t_e$$

G/G/1 jonomallia käytetään kun prosessiajat eivät ole eksponentiaalisia, vaan yleisen jakauman mukaisia ja prosessivaiheen rinnakkaisia asemia on yksi. Jonomallia kutsutaan myös Kingmanin VUT-yhtälöksi sen kehittäjän John Kingmanin mukaan. Jonomallin laskenta huomioi vaihtelun, käyttösuhteen ja prosessointiajan. (Hopp & Spearman, 2011, s.288)

$$CT_q = VUT$$

$$CT_q = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \left(\frac{u}{1-u} \right) t_e$$

M/M/m jonomalli on vastaava kuin M/M/1, mutta malli huomioi prosessivaiheen rinnakkaiset asemat. (Hopp & Spearman, 2011, s.290)

$$CT_q = \frac{u^{\sqrt{2(m+1)}-1}}{m(1-u)} t_e$$

2.3.1 G/G/m jono

G/G/m jonomalli on tämän työn simulointilaskennassa käytetty ensimmäisen prosessivaiheen jonoutumisen laskennassa käytetty malli. Malli on johdettu M/M/m jonomallista ja sitä käytetään kun prosessiajat ovat yleisen jakauman mukaisia. Malli on rinnakkaisten asemien versio Kingmanin yhtälöstä, jossa on huomioitu prosessivaiheen vaihtelu ja rinnakkaisten asemien lukumäärä. (Hopp & Spearman, 2011, s.291)

$$CT_q = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \frac{u^{\sqrt{2(m+1)}-1}}{m(1-u)} t_e$$

2.3.2 Yleinen estomalli

Yleinen estomalli on tämän työn simulointilaskennassa käytetty malli toisen ja kolmannen prosessivaiheen suoritusparametreja laskiessa. Mallia käytetään kun prosessiajat ovat jakautuneet yleisen mallin mukaan ja prosessivaiheilla on rinnakkaisia asemia. Malli poikkeaa aiemmista esitellyistä jonomalleista kuitenkin sillä, että laskennassa voidaan huomioida

rajoitettu keskeneräisen työn määrä, blokin koko (b). Tämä on tilanne usein myös käytännön sovellutuksissa, jossa fyysinen tila rajoittaa keskeneräisen työn määrää prosessissa.

Esimerkiksi prosessivaiheiden väliset välivarastot eivät voi kasvaa rajattomasti, vaan töiden vapauttaminen on käytännössä keskeytettävä, mikäli töiden valmistumisen tahti on töiden vapauttamistahtia alhaisempi. Tämä keskeneräisen työn määrän rajoite voidaan huomioida prosessin laskennassa, käyttämällä yleistä estomallin laskentaa.

Laskenta on kuitenkin aiemmin esiteltyjä jonomalleja huomattavasti monimutkaisempi, eikä tarkkoja lukuarvoja saada, vaan tulos on likimäärin todellisuutta vastaava. Prosessivaiheen töiden jonotusaikaa ei myöskään suoraan ole mahdollista laskea, vaan prosessin parametrit lasketaan likimääräisen ulostulon kautta (TH). (Hopp & Spearman, 2011, s.296) Prosessin keskeneräisen työn määrä (WIP) voidaan arvioida blokin koon perusteella, jossa lasketaan rinnakkaisten asemien ja välivarastojen kappalemäärä. Jaksonaika (CT) voidaan arvioida luvussa 2.1.1. esitellyn Littlen lain mukaan, josta voidaan edelleen laskea jonotusaika vähentämällä efektiivinen prosessiaika (t_e) jaksonajasta luvussa 2.1.4. esitellyn mukaisesti.

Aiemmin esitellyissä avoimen jonoverkon tapauksissa käyttösuhteen on oltava alle 1, jotta jaksonaika ei kasva äärettömän pitkäksi. Tämä ei päde kuitenkaan yleisen estomallin laskennassa, vaan käyttösuhde voi olla myös 1 tai enemmän. Prosessivaiheen ulostulon (TH) laskenta tehdään käyttösuhteen perusteella kolmelle eri käyttösuhteetilanteelle: alle yksi, yksi ja yli yhden. (Hopp & Spearman, 2011, s.296)

$u < 1$

Kun prosessivaiheen käyttösuhde (u) on pienempi kuin 1, niin prosessivaiheelle lasketaan ensin keskeneräisen työn määrä ilman blokkauksia (WIP_{nb}) hyödyntämällä Kingmannin yhtälöä ja Littlen lakia.

$$WIP_{nb} = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \left(\frac{u}{1-u} \right) + u$$

Tämän jälkeen lasketaan käyttösuhteelle korjauskerroin (ρ) M/M/1 jonomallin keskeneräisen työn ja käyttösuhteen yhteyttä hyödyntäen.

$$u = \frac{WIP - u}{WIP} \rightarrow \rho = \frac{WIP_{nb} - u}{WIP_{nb}}$$

Käyttösuhteen korjauskertoimen laskemisen jälkeen voidaan laskea prosessivaiheen keskimääräisen ulostulon likiarvo. Laskenta huomioi keskeneräisen työn määrän rajoitteen (b) ja saapuvien töiden määrän vaikutuksen ulostuloon, tilanteessa kun käyttösuhde on alle yksi. (Hopp & Spearman, 2011, s.296)

$$TH \approx \frac{1 - u\rho^{b-1}}{1 - u^2\rho^{b-1}}r_a$$

u>1

Prosessivaiheen käyttösuhteen ollessa suurempi kuin yksi, huomioidaan likimääräinen vaikutus tarkasteltavan prosessivaiheen keskeneräisen työn määrään ilman blokkausta käyttösuhteen käänteisluvun kautta.

$$WIP_{nb} \approx \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \left(\frac{1/u^2}{1 - 1/u} \right) + \frac{1}{u}$$

Edelleen lasketaan käyttösuhteen korjauskerron (ρ_R) edellä lasketun keskeneräisen työn määrän likiarvon (WIP_{nb}) perusteella.

$$\rho_R = \frac{WIP_{nb} - 1/u}{WIP_{nb}}$$

Nyt voidaan laskea prosessivaiheen ulostulon likiarvo edellä lasketun käyttösuhteen korjauskertoimen, blokin koon ja saapuvien töiden määrän perusteella. (Hopp & Spearman, 2011, s.297)

$$TH \approx \frac{1 - u\rho_R^{b-1}}{1 - u^2\rho_R^{b-1}}r_a$$

u=1

Prosessivaiheen käyttösuhteen ollessa yksi, voidaan likimääräinen ulostulo laskea suoraan, ilman käyttösuhteen huomioimista neliöllisten vaihtelukertoimien, blokin koon ja prosessivaiheen ulostulonopeuden perusteella. (Hopp & Spearman, 2011, s.297)

$$TH \approx \frac{c_a^2 + c_e^2 + 2(b-1)}{2(c_a^2 + c_e^2 + b-1)} r_e$$

Kaikissa käyttösuhtetilanteissa keskeneräisen työn määrä (WIP) voidaan arvioida blokin koon kautta niin, että blokin kokoon lasketaan mukaan prosessivaiheen rinnakkaiset asemat sekä välivarastot. Keskeneräisen työn määrä on hyvin lähelle asetetun blokin kokoa, mutta aina kuitenkin alle sen. Tämän jälkeen jaksonaika (CT) voidaan määrittää Littlen lain mukaan blokin koon ja lasketun ulostulon likiarvon perusteella. Jaksonaika on hyvin lähelle tämän määritelmän mukaista arvoa, mutta aina kuitenkin enemmän kuin laskettu arvo. (Hopp & Spearman, 2011, s.297)

$$WIP < \min\{WIP_{nb}|b\}$$

$$CT > \frac{\min\{WIP_{nb}|b\}}{TH}$$

2.4 Yksinkertainen kustannuslaskenta

Prosessin kustannusten muodostumisen havainnollistamiseksi laskentamallissa on hyödynnetty yksinkertaista kustannuslaskentaa. Laskennassa on huomioitu prosessin muuttuvat ja kiinteät kulut sekä laskettu voitto.

Kustannukset on laskelmassa huomioitu täysimääräisinä. Käyttämällä esimerkiksi varaston yhteydessä rahoitusjärjestelyjä, saadaan todellisuudessa tätä mallinnusta suurempi vaikutus voittoon. Yksinkertaisesti laskien on kuitenkin mahdollista havainnollistaa prosessiparametrien muutosten vaikutus taloudellisiin tunnuslukuihin.

Prosessin kustannukset ja materiaalien hinnat sekä myyntitulot ovat tätä työtä varten keksittyjä, mutta mukailevat todellisen kokoonpanoprosessin kustannusrakennetta.

2.4.1 Muuttuvat ja kiinteät kustannukset

Muuttuvat kustannukset ovat riippuvaisia valmistettavien tuotteiden määrästä, kun taas kiinteät kustannukset eivät muutu merkittävästi valmistusmäärän muuttuessa. Prosessin muuttuvista kustannuksista on laskelmassa huomioitu tuotteiden valmistamiseksi tarvittavien osien materiaalikustannukset sekä tuotteiden kokoonpanoon vaadittavien työtuntien työkustannukset. Kiinteitä kustannuksia laskelmassa on huomioitu prosessin mahdollistamiseksi vaadittavan tilan vuokra sekä toimihenkilökustannukset. (Tomperi S., 2021, s.18)

2.4.2 Tulos

Prosessin kannattavuuden esittämiseksi on laskelmassa laskettu toiminnan tulos vähentämällä myyntituloista muuttuvat ja kiinteät kustannukset. (Tomperi S., 2021, s.19) Voittoprosentti on laskettu jakamalla prosessin toiminnan tulos tuotteiden myyntituotoilla. (Tomperi S., 2021, s.23) Näin voidaan havainnollistaa prosessin toiminnasta aiheutuva voitto tai tappio. Keskenpäisen työn arvon laskelmassa on huomioitu tuotteen arvon kasvaminen prosessin loppu kohden, huomioimalla asennettujen nimikkeiden arvo ja käytettyjen työtuntien kertyminen. Varaston arvo on laskelmassa huomioitu varastoitavien nimikkeiden määrän keskivaraston arvon mukaan, joka on laskettu summaamalla turvavaraston määrään puolet tilauseräkoosta.

2.5 Prosessin mitoittaminen

Prosessi mitoitetaan haluttujen tavoitteiden toteutumiseksi, joita voi olla useita. Esimerkiksi montako kappaletta valmistetaan aikayksikköä kohden eli läpimeno (TH), toteutunut kustannus tuotettua yksikköä kohden tai kauanko tuotteen valmistuminen prosessissa kestää eli jaksonaika (CT). Kyse on laskentapohjaisesta prosessin mitoittamisesta, jolla saadaan paras mahdollinen asiakastyytyväisyys ja liikevoitto.

Keskeinen prosessivaiheen ulostuloparametri on niin sanottu lattia-aika eli toteutunut prosessointiaika (t_e). Tämä on tärkeä, koska prosessointiajan käänteisluku on prosessivaiheen ulostulonopeus (r_e) eli virtaus, joka muodostaa liikevaihdon. Ulostulonopeus ilmaisee kuinka monta työtä tai tuotetta valmistuu aikayksikköä kohden. (Hopp & Spearman, 2011, s.275) Ulostulonopeutta voi kasvattaa lyhentämällä prosessointiaikaa tai lisäämällä rinnakkaisia asemia.

$$r_e = \frac{1}{t_e} \rightarrow r_e = \frac{m}{t_e}$$

Tuotteiden valmistamiseen tarvittava aika täytyy myös mitoittaa. Tarvittava aika on riippuvainen prosessointiajasta sekä sen vaihtelusta, jolloin tarvittava varmistusaika voidaan määrittää näistä muodostuvan aikajakauman perusteella. Varmistusajan määrittämisestä enemmän luvussa 2.2.5.

Käyttösuhteen mitoittamisella vaikutetaan merkittävästi töiden jonoutumiseen (CT_q) prosessivaiheen edessä ja sitä kautta tuotteen valmistamiseen kuluvaan kokonaisjaksonaikaan (CT). Käyttösuhteen muodostumiseen vaikuttavat prosessointiaika, rinnakkaisten tekopaikkojen määrä sekä paljonko töitä vapautetaan prosessiin. Käyttösuhdetta voi pienentää tässä yhtälössä lisäämällä rinnakkaisia tekopaikkoja, lyhentämällä prosessointiaikaa tai vähentämällä prosessiin vapautettavien töiden määrää. Käyttösuhteen muodostumista ja jonoutumista on käsitelty enemmän luvuissa 2.1.3 ja 2.1.4.

Prosessin mitoittamisessa on siis huomioitava esitelty prosessin ohjaamisen lainalaisuudet ja määriteltävä prosessin sisääntulojen taso prosessin ulostulotavoitetta vasten. Tästä mitoituksen simuloinnista enemmän tämän työn luvussa 3.

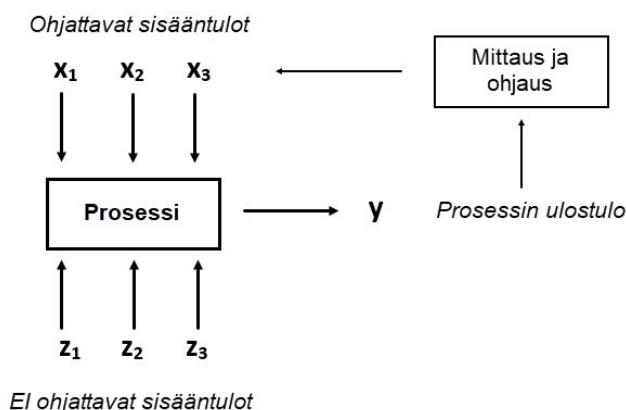
2.5.1 Prosessivaiheen sisään- ja ulostuloparametrit

Prosessivaiheen ulostuloja (Y) ei voi itsenäisinä parametreina ohjata. Ei voi esimerkiksi päättää työvaiheeseen kuluvaan vain tietyn ajan tai jonkun tuotteen valmistamisen maksavan tietyn verran. Ulostulo on seuraus, joka on riippuvainen prosessivaiheen tapahtumista ja työn suorittamisen edellytyksistä, sisääntuloparametreista.

Prosessista on tunnistettava ulostuloihin vaikuttavat sisääntuloparametrit ja ohjattava niitä, halutun ulostulon saavuttamiseksi (Montgomery, 2013, s.13). Ohjattavia sisääntuloparametreja (x) ovat esimerkiksi asennettavien komponenttien saatavuus, niiden laatu ja käytettävissä olevat resurssit. Ohjaamalla näitä, voidaan prosessivaiheen ulostuloihin, kuten valmistettavien kappaleiden määrään ja kuluvaan aikaan vaikuttaa.

Prosessivaiheen ulostuloon vaikuttavat myös ei ohjattavat sisääntulot (z), jotka eivät ole prosessin itsensä ohjattavissa (Montgomery, 2013, s.13). Tällaisia ovat esimerkiksi sää tai komponenttitoimittajan toimitusvarmuus. Näiden ei ohjattavien parametrien vaihtelua vastaan täytyy suojautua ohjattavissa olevilla parametreilla. Esimerkiksi sään aiheuttama työn hidastuminen on kompensoitava resursoinnilla tai toimittajan toimitusvarmuuden vaihtelua vastaan on suojauduttava varastolla. Tästä syystä on tärkeää tunnistaa myös ei ohjattavat parametrit, jotta ne voidaan mitata ja niiden vaihteluun varautua ohjattavissa olevilla parametreilla (x) niin, ettei näiden vaihtelu vaikuta negatiivisesti prosessin ulostuloon. Takaisinkytkentä sisääntuloparametrien ohjaamisen onnistumisesta saadaan prosessin ulostuloista (Montgomery, 2013, s.13). Takaisinkytketyn prosessin sisääntuloparametreja korjataan ulostulosta saadun informaation perusteella, josta syntyy prosessin ohjaus. Korjaamalla näin prosessin sisääntuloparametreja mahdollistetaan prosessin pysyminen tavoitteessa. (Karjalainen, 2000, s.46)

Kuva 4. Prosessin sisääntulojen vaikutus ulostuloon ja takaisinkytkentä ulostulosta.



2.5.2 Vaihtelun huomioiminen mitoituksessa

Prosessointiaika vaihtelee prosessivaiheen sisääntuloparametrien vaikutuksesta, jota on käyty läpi tämän työn aiemmissa luvuissa. Vaihtelun vaikutus on kompensoitava puskurein, jotta suunnitelma toteutuu. Tarvittavat puskurit voi jakaa kolmeen puskurityyppiin, joita ovat varasto, aika ja kapasiteetti. Näiden taso ja suuruus tulee mitoittaa prosessin tavoitteiden ja puskureiden kustannuksen perusteella. Nämä puskurit ovat yhteydessä toisiinsa siten, että aina kun vaihtelu on läsnä, niin yksi tai useampi puskuri on käytössä. Esimerkiksi jos komponenttivaraston taso ei riitä, niin sitä voi kompensoida tiettyyn rajaan asti kapasiteetilla ja ajalla. Mikäli puskureita ei suunnittele vallitsevan vaihtelun mukaisesti prosessiin, niin se tulee aikapuskurin muodossa viimeistään prosessin loppuun. Toimitusvarmuus laskee, eikä asiakaslupausta kyetä pitämään. (Pound, 2014, s.50)

2.6 Prosessin ohjaaminen

Kun prosessin sisääntuloparametrit on tunnistettu ja niiden taso määritetty ulostulotavoitteen saavuttamiseksi, niin nämä parametrit täytyy saada mittaukseen ja ohjaukseen. Käyttökelpoinen tapa prosessiparametrien ohjaamiseen ja seurantaan on tilastollisen prosessinohjauksen ohjauskortti (SPC – Statistical process control), jossa historiadatan perusteella lasketaan ohjausrajat. Näitä ohjausrajoja hyödyntäen voidaan arvioida tulevia toteumia, onko kyse normaalista vaihtelusta vai erityisyydestä. Puuttumalla näihin ohjausrajat ylittäviin poikkeamiin eli erityisyyhin, voidaan tarkasteltava parametri ja prosessi pitää ohjauksessa. (Karjalainen, 2020, s.190)

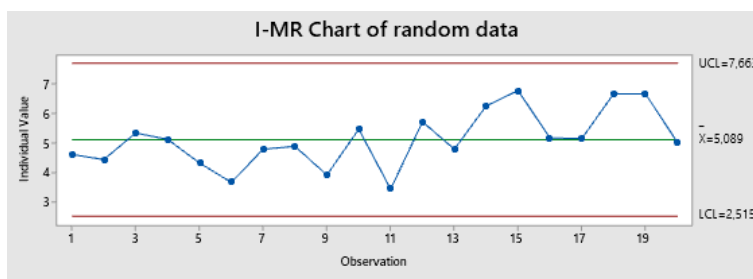
Ohjauskortti tarvitaan erottamaan prosessidatan normaalivaihtelusta erityisyyt, joita on vain noin 2-6 %. Ohjauskortti ohjaa kiinnittämään huomioita niihin datapisteisiin, jotka eivät ole normaalivaihtelun aiheuttamia. Näin keskitytään prosessin kannalta merkittäviin poikkeamiin, eikä yritetä löytää jokaisesta keskiarvosta poikkeavasta datapisteestä yksittäistä syytä sen taustalla. (Karjalainen, 2020, s.149) Mikäli ohjaamisessa siirrytään tilastolliseen prosessin ohjaukseen, siirrytään samalla yksittäisen mitan tarkastamisesta prosessin hajonnan ohjaamiseen. Tällöin hajonta pienenee ja prosessin ennustettavuus paranee. (Karjalainen, 2020, s.191)

Prosessin ohjaaminen on monimutkaista ja keskinäisvaikutusten hahmottaminen on vaikeaa, josta syystä ohjaaminen ilman tilastollisia menetelmiä on vaikeaa. Osaaminen määrittelee siis prosessin laatutason. Kohtuullisella ammattitaidolla voidaan saavuttaa 6,6-30 % virhetaso prosessissa. Ohjausrajoilla ja SPC-ohjauksella saavutetulla stabiiliudella 1-5% virhetaso eli 3 sigman taso on mahdollinen. Tästä korkeampi laatutaso edellyttää jo edistyneempiä tilastollisia menetelmiä ja esimerkiksi koesuunnittelua. (Karjalainen, 2020, s.180) Seuraavassa luvussa on esitelty tarkemmin 3 sigman prosessilaatutason mahdollistava SPC-ohjauskortti.

2.6.1 Ohjauskortin käyttö

Kun prosessiajat ovat normaalisti jakautuneita, niin esimerkiksi I-MR ohjauskortti on käyttökelpoinen prosessiparametrin tarkasteluun. Esimerkiksi Minitab tilasto-ohjelmistolla on helppo luoda prosessidatan perusteella SPC-ohjauskortti prosessin ohjaukseen, jolla voi erottaa normaalivaihtelun ja poikkeamat toisistaan. Ohjauskortille lasketaan lukujoukon perusteella keskiarvo ja ohjausrajat (UCL, LCL), jotka ovat I-MR kortilla niin sanotut 3 sigman rajat. Lukujoukosta kun lasketaan keskihajonta, niin 3 sigman raja on kolmen keskihajonnan päässä keskiarvosta.

Kuva 5. SPC-ohjauskortti



Ohjauskortin 3 sigman rajat on luonut Walter A Stewhart, joka määrittä rajat empiirisen tutkimuksen perusteella niin, että ne toimivat hyvin todellisen maailman lukujen kanssa ja ovat taloudellisesti hyväksyttävät. (Wheeler, 2010, s.60) Kyseisiä ohjausrajoja ei voi kuitenkaan soveltaa suoraan kaikkialle, ilman liittämistä prosessin laatuvaatimuksiin. Esimerkiksi lentokoneiteollisuuden vaatimus on näitä ohjausrajoja korkeampi, koska 3 sigman

rajat päästävät 0,03 prosenttia ohjattavan parametrin virheistä prosessiin. 3 sigman taso ei näin riitä siihen prosessi- ja tuotelaatutasoon, joka edellyttää lentokoneiden ilmassa pysymisen nykyisellä todennäköisyydellä.

I-MR kortin ylä- ja alaohjausrajat (UCL ja LCL) on suhteellisen helppo laskea myös ilman edistyneitä ohjelmistoja. Ne voi laskea prosessidatan keskiarvon (\bar{X}), perättäisten datapisteiden muutoksen itseisarvon ($|mR|$) ja taulukkoarvon ($E_2=2,66$) perusteella alla olevien kaavojen mukaan. (Wheeler, 2010, s.46)

$$UCL = \bar{X} + E_2|mR|$$

$$LCL = \bar{X} - E_2|mR|$$

Prosessin mitoituksen yhteydessä esimerkiksi prosessointiajalle määritetään keskiarvo (t_e) ja keskihajonta (σ_e), joista muodostetaan ohjauskortin ohjausrajat. Tällöin ohjausrajoja ei kuitenkaan lasketa toteumadatan perusteella, vaan ohjausrajat saadaan mitoituslaskennasta. Ohjausrajan ylittävä arvo täytyy tutkia ja poistaa poikkeavan arvon aiheuttaja.

2.7 Prosessin parantaminen

Prosessin parantamista voidaan lähestyä ensisijaisesti kahdella tavalla. Ensimmäinen on tapa on keskittyä parantamaan itse tuotetta, niin että se on edullisempi ja yksinkertaisempi valmistaa. Toinen tapa on parantaa valmistusmenetelmiä hyödyntäen tuotantotekniikoita ja valmistusteknologioita. (Shingo, 2005, s.6) Molemmissa tapauksissa prosessointiajan keskiarvo paranee tai vaihtelu pienenee, mahdollisesti molemmat.

Prosessi paranee myös tunnistamalla ja poistamalla prosessista ohjausrajat ylittäviä poikkeamia luvun 2.6. ohjaustavalla, kun häiriöitä ilmenee prosessissa. Kun prosessi toimii jo mitoituksen mukaisesti tai vaadittava prosessiparametrien muutos ei ole taloudellisesti kannattavaa, niin tällöin keino parantaa on suunnitella tuote ja prosessi uudelleen.

Monimutkaisten prosessin ongelmien ratkaiseminen ja parantaminen perustuu oppimiseen, teoriaan, kokemuksiin ja mielikuvitukseen sekä näiden analysointiin. Parantaminen on monimutkaista ja eri muuttujien keskinäisvaikutusten tunnistaminen on vaikeaa. Siksi parantaminen on tehtävä tieteellisin menetelmin, esimerkiksi Lean Six Sigma-menetelmää hyödyntäen, jolla onnistumistodennäköisyys kasvaa 85-95%:iin. W.E. Demingin ja C. Hollandin tutkimuksissa ilman menetelmää parantaminen onnistuu vain 3-5 % todennäköisyydellä. (Karjalainen, 2020, s.123)

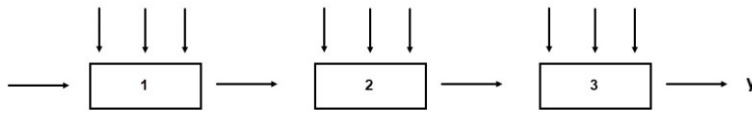
3 Prosessin laskentamalli

Tässä luvussa käsitellään, kuinka prosessin mitoituslaskentamalli on rakennettu työn teoriaosuudessa esitettyjen teorioiden pohjalta. Laskentamallin mitoitus osuudessa esitetään prosessin sisääntuloparametrien muutosten vaikutus prosessin ulostuloihin. Ohjaus osuudessa havainnollistetaan, kuinka mitoituslaskennalla asetetut parametrit pidetään halutulla tasolla. Prosessin parannus osuudessa käsitellään tuotteen ja prosessin uudelleen suunnittelun vaikutusta, kun tuotteen nimikemäärää ja prosessointiaikaa laskee.

3.1 Mallin rakentaminen

Muodostin kolmevaiheisen prosessin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla, johon tein laskennat esitettyjen prosessin ohjaamisen teorioiden mukaisesti. Malliin syötetään kysyntä ja prosessivaiheiden sisääntuloparametrit, jolloin mallilla voidaan simuloida prosessin käyttäytyminen, prosessin ulostulo ja taloudelliset tunnusluvut. Mallilla voi laskea prosessin sisääntuloparametrien aiheuttaman vaihtelun vaikutuksen prosessivaiheen prosessointiaikaan eli aikavaihtelun. Mallin jonolaskennalla voi osoittaa vaihtelun siirtymisen prosessivaiheelta toiselle ja simuloida virtauksen vaihtelun sekä sen vaikutuksen prosessin suoritusarvoihin.

Kuva 6. Havainne kuva simuloidusta prosessista.



Määritin hinnat asennettaville komponenteille, jolloin täydennysaika-kysyntä varianssiyhtälön mukaisella turvavaraston laskennalla voi osoittaa varaston arvon kulloisessakin kysynnän ja prosessin vaihtelun tilanteessa varaston osamäärän perusteella. Komponenttien määrän ja työtuntihinnan perusteella laskin keskeneräisen työn arvon prosessissa, joka muuttuu samanaikaisesti prosessiparametreja muutettaessa. Määritin tuotteiden myyntihinnan, tilavuokran ja toimihenkilöresurssien kustannuksen, jolloin on mahdollista osoittaa prosessiparametrien vaikutus voittoon yksinkertaista kustannuslaskentaa hyödyntäen. Tarkempi kustannuslaskenta on tämän työn liitteenä.

3.1.1 Sisääntuloparametrit

Mitoituslaskennassa huomioin prosessin sisääntuloparametreista toteutuneiden osapuutteiden keston ja niiden keskihajonnan. Komponenttien saatavuus on huomioitu laskelmassa varaston toteutuneena palveluasteena eli osien saatavuuden osuutena asennettavien nimikkeiden määrästä. Komponenttilaatu on huomioitu PPM-lukuna, joka ilmaisee virheellisten komponenttien määrän miljoonaa komponenttia kohden. Henkilöstöresurssipuutteet on huomioitu osuutena prosessivaiheen tekopaikkojen mukaisesta resurssimäärästä.

Laskelmaan voidaan syöttää prosessiin vapautettavien töiden määrä sekä sen keskihajonta, jonka perusteella mitoituslaskenta tehdään. Rakensin mitoituslaskelmaan myös niin sanotun ulostulon leikkurin, jolla voi simuloida esimerkiksi toimittajan ulostulon jäämisen tavoitteesta tai kysynnän nopean laskun. Tällöin voi prosessissa olla esimerkiksi tilanne, että komponenttivarastoon ja rinnakkaisten asemien lisäämiseen on investoitu, mutta ulostulo jää tavoitteesta. Tällöin matalampi ulostulo kantaa investoinnista johtuvat korkeammat kustannukset heikentäen tulosta.

3.1.2 Prosessivaiheen parametrit

Prosessivaiheelle on asetettu vaiheaika, joka tarkoittaa vaiheen suunniteltua kestoä päivissä. Laskelmissa on oletuksena, että työtä tehdään kahdessa vuorossa, yhdellä asentajaresurssilla vuoroa kohden. Tällöin päivittäiseksi käytettävissä olevaksi tuntimääräksi on laskelmissa oletettu 16 tuntia. Kertomalla tämä rinnakkaisten tekopaikkojen määrällä, saadaan päivittäinen prosessivaiheen henkilöresurssituntimäärä.

3.1.3 Prosessointiajat ja suoritusarvot

Määritin laskelmissa yhden nimikkeen asennusajaksi 0,5 tuntia, jolla kertomalla vaiheen asennettavien nimikkeiden määrä, saadaan tuotteen aiheuttama prosessointiaika (t_0). Nimikkeen asennusajasta, asennettavien nimikkeiden määrästä ja vaiheen käytettävissä olevista resurssitunneista saadaan kuvan 7 esimerkissä t_0 -ajaksi 1 päivä. Huomioin laskelmissa t_0 -ajan keskihajonnaksi (σ_0) eli luonnolliseksi vaihteluksi 30 prosenttia tuotteen aiheuttamasta prosessointiajasta eli 0,3 päivää.

Sisääntuloparametrien aiheuttamien häiriöiden vaikutus tuotteen aiheuttamaan aikaan on laskettu työssä esitettyjen teorioiden mukaisesti, jonka perusteella on laskettu toteutunut prosessointiaika (t_e) sekä sen keskihajonta (σ_e). Prosessivaiheen käyttösuhte (u) on laskettu saapuvien ja lähtevien töiden nopeuksien suhteesta.

Ensimmäisen prosessivaiheen jonolaskenta on tehty G/G/m jonomallin mukaan, jonka perusteella on laskettu prosessivaiheen jonotusaika (CT_q). Summaamalla jonotusaika prosessivaiheen toteutuneeseen prosessointiaikaan, saadaan laskettua prosessivaiheen jaksonaika (CT). Ulostulo (TH) saadaan laskettua jakamalla rinnakkaisten asemien lukumäärä toteutuneella prosessointiajalla. Jaksonajasta ja ulostulosta voidaan laskea Littlen lain mukaan prosessivaiheen keskeneräisen työn määrä (WIP).

Toisen ja kolmannen prosessivaiheen laskenta on toteutettu yleisen jonomallin teorian mukaan, jonka perusteella on laskettu prosessivaiheen ulostulo. Keskeneräisen työn määrä

(WIP) on määritelty rinnakkaisten tekopaikkojen ja välivaraston koon perusteella. Näistä voidaan laskea Littlen lain mukaan prosessivaiheen jaksonaika (CT).

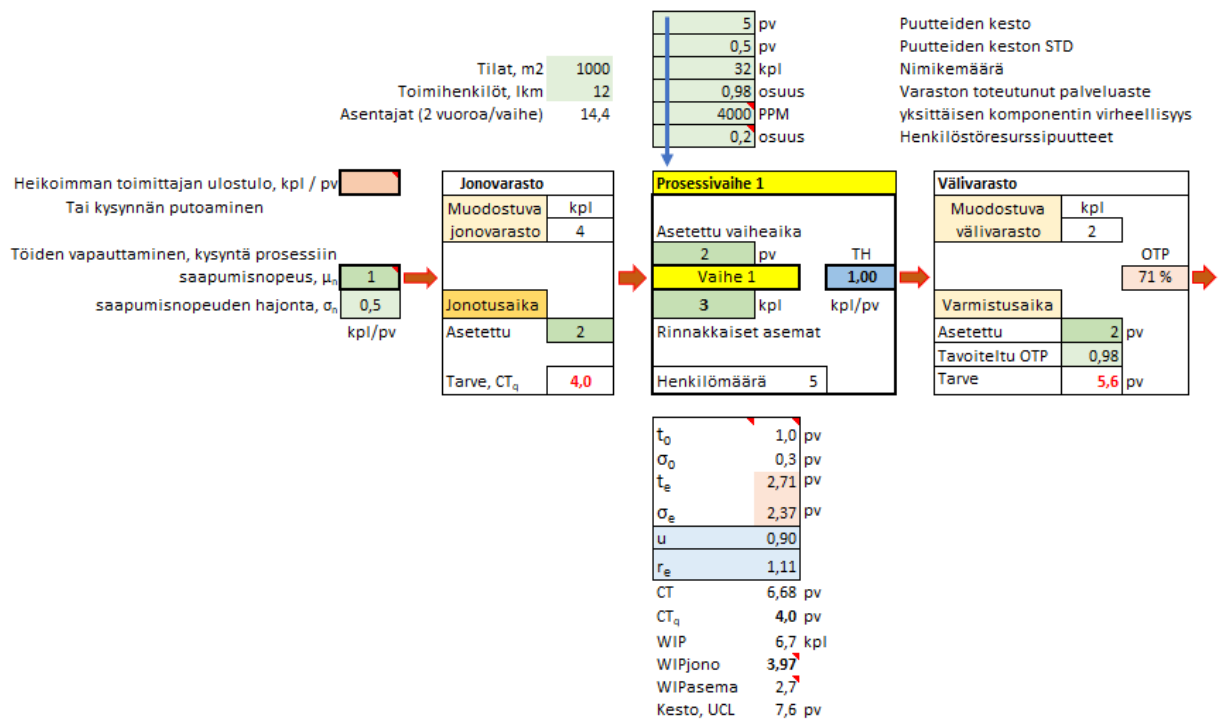
3.1.4 Jonovarasto

Ensimmäisen vaiheen jonolaskennan perusteella prosessivaiheelle laskettiin jonotusaika (CT_q), joka ilmaisee kauanko työ odottaa prosessivaiheen edessä ennen pääsyä prosessiin. Tätä on laskelmassa verrattu asetettuun jonotusaikaan, jolla voidaan ilmaista toteutuuko suunniteltu jonotusaika. Jonotusaika kun kerrotaan prosessivaiheen ulostulolla, niin saadaan muodostuvan jonovaraston kappalemäärää (WIP_q).

3.1.5 Välivarasto

Ensimmäisen ja toisen prosessivaiheen jälkeen muodostuvan välivaraston kappalemäärä määräytyy edellisen prosessivaiheen ulostulon ja asetetun varmistusajan tulona. Tarvittava varmistusaika vaiheiden välissä voidaan määrittellä edellisen vaiheen toteutuneen prosessointiajan ja sen keskihajonnan perusteella asetetun onnistumistodennäköisyyden perusteella. Näin voidaan mitoittaa tarvittava varmistusaika prosessivaiheiden väliin, edellisen vaiheen prosessointiajan perusteella. Toimitusvarmuus seuraavalle vaiheelle voidaan määrittellä vertaamalla asetetun vaiheajan ja varmistusajan summaa edellisen vaiheen prosessointiajan ja keskihajonnan muodostamaan aikajakaumaan. Toimitusvarmuus voidaan määrittellä näin asetetun ajan kattaman pinta-alan osuutena prosessointiajan aikajakaumalta.

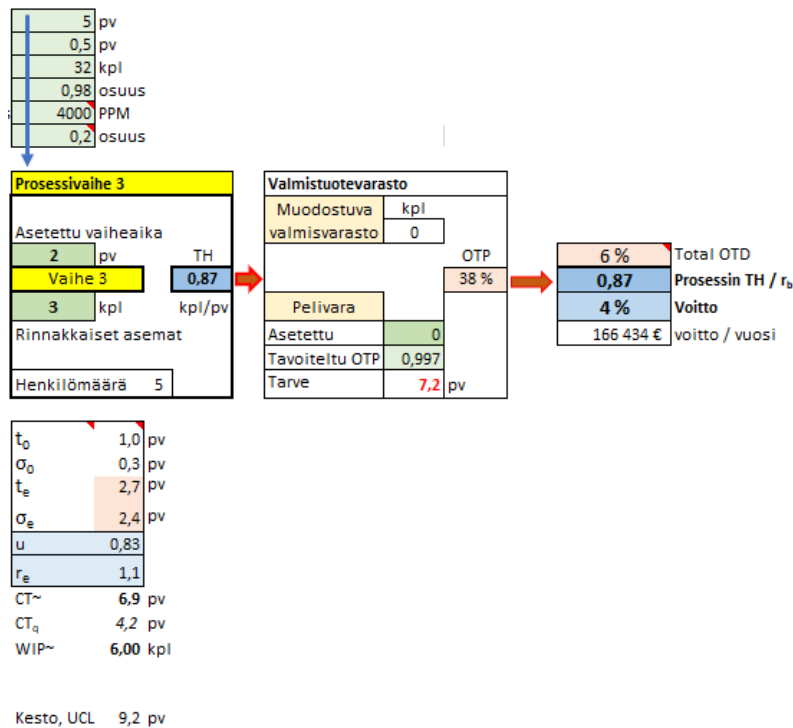
Kuva 7. Mitoituslaskennan toteutus: jonovarasto, prosessivaihe 1 ja välivarasto.



3.1.6 Prosessin ulostulot

Koko prosessin toimitusvarmuus voidaan laskea kertomalla prosessivaiheiden toimitusvarmuudet keskenään. Koko prosessin ulostulon (TH) määrittelee hitaimman vaiheen ulostulonopeus eli pullonkaulan nopeus (r_b). Teoriaosuudessa esitellyn kustannuslaskennan mukaisesti laskin prosessin euromääräisen voiton ja voittoprosentin.

Kuva 8. Mitoituslaskennan toteutus: prosessivaihe 3 ja valmistuotevarasto.

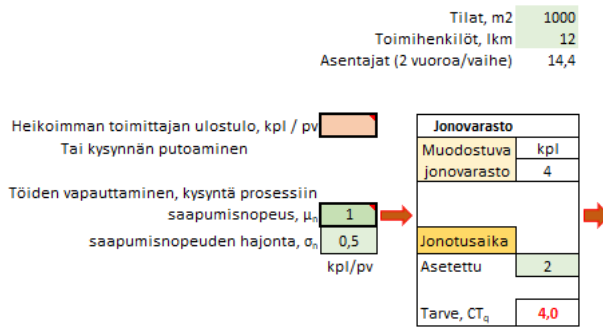


3.2 Mitoituksen simulointi laskentamallin avulla

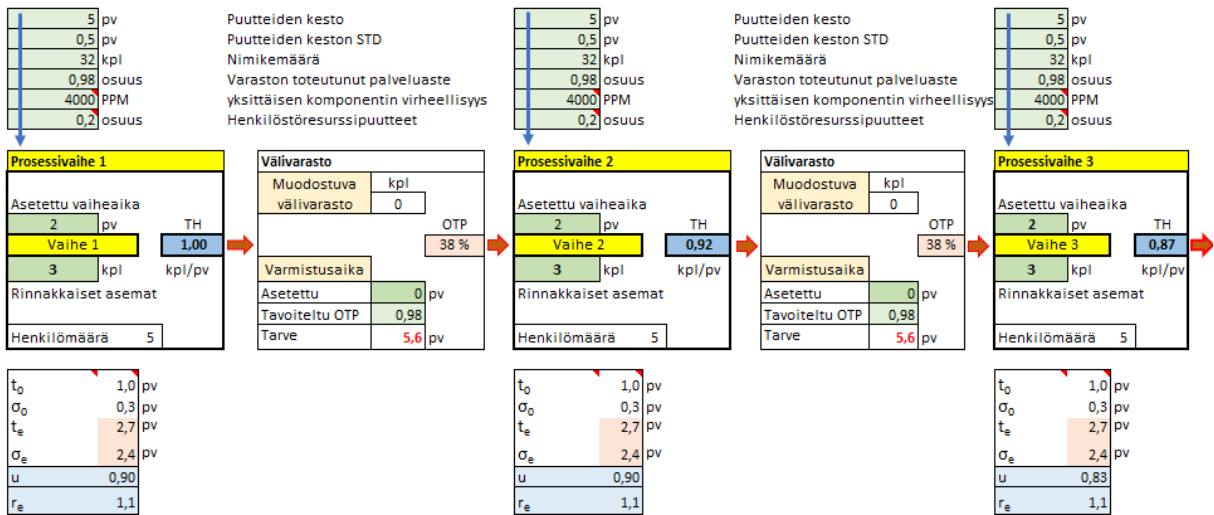
3.2.1 Lähtötilanne

Asetin mitoituksen lähtötilanteessa prosessin kysynnäksi 1 ja keskihajonnaksi 0,5 kappaletta päivässä. Varaston vajaatäytöstä johtuen, toteutunut varaston palveluaste jokaiselle prosessivaiheelle on 98%. Komponenttien virheellisyydeksi on määritiä 4000 PPM ja resurssipuutteeksi on 20 % prosessin tekopaikkojen tarvitsemasta resursoinnista. Näistä prosessin sisääntuloparametrien tasosta johtuen, tuotteen aiheuttama prosessointiaika (t_0) kasvaa 1 päivästä 2,7 päivän toteutuneeksi prosessointiajaksi (t_e). Prosessointiajan keskihajonta kasvaa 0,3:ta 2,4:n. Kunkin vaiheen kolmella rinnakkaisella tekopaikalla prosessin ulostulo jää 0,87 kappaleeseen asetetun 1 kappaleen kysynnän sijaa. Prosessin jaksonaika on tavoitellun 8 päivän sijaan 20 päivää, jonka seurauksen toimitusvarmuus on vain 6 %. Valmistusprosessin voitto on 4 %.

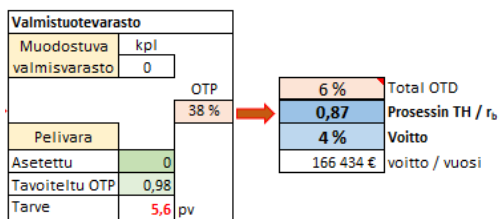
Kuva 9. Töiden vapautus ja jonovarasto.



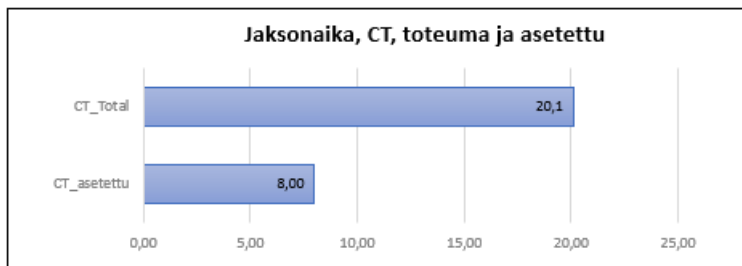
Kuva 10. Prosessivaiheet 1-3.



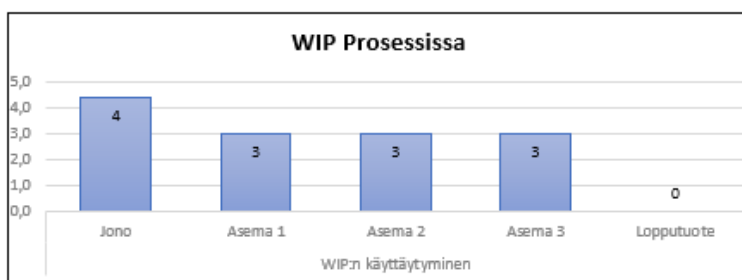
Kuva 11. Valmistusvarasto ja prosessin ulostulot.



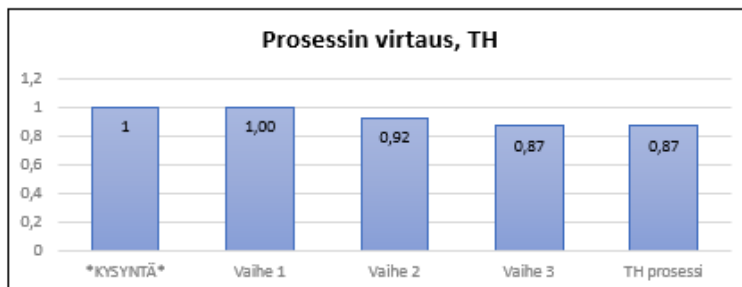
Kuva 12. Asetettu ja toteutunut jaksonaika keskimäärin.



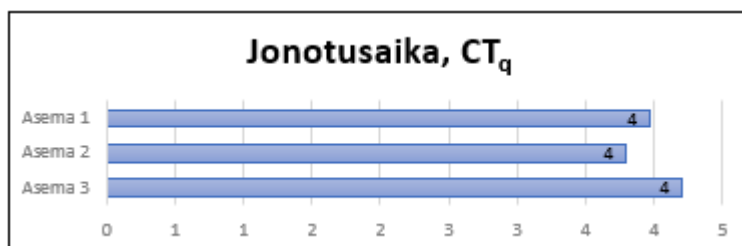
Kuva 13. Keskeneneräisen työn määrä prosessissa.



Kuva 14. Kysyntä, prosessivaiheiden ulostulot ja koko prosessin ulostulo.



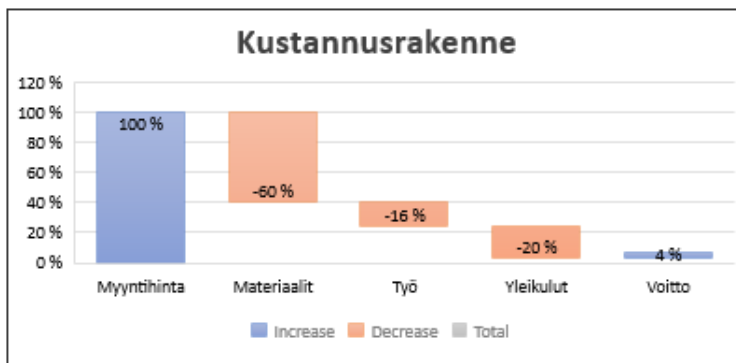
Kuva 15. Prosessivaiheiden jonotusajat.



Kuva 16. Komponenttivaraston arvo, keskeneräinen työn arvo ja yleiskustannukset.



Kuva 17. Tuotteen kustannusrakenne.

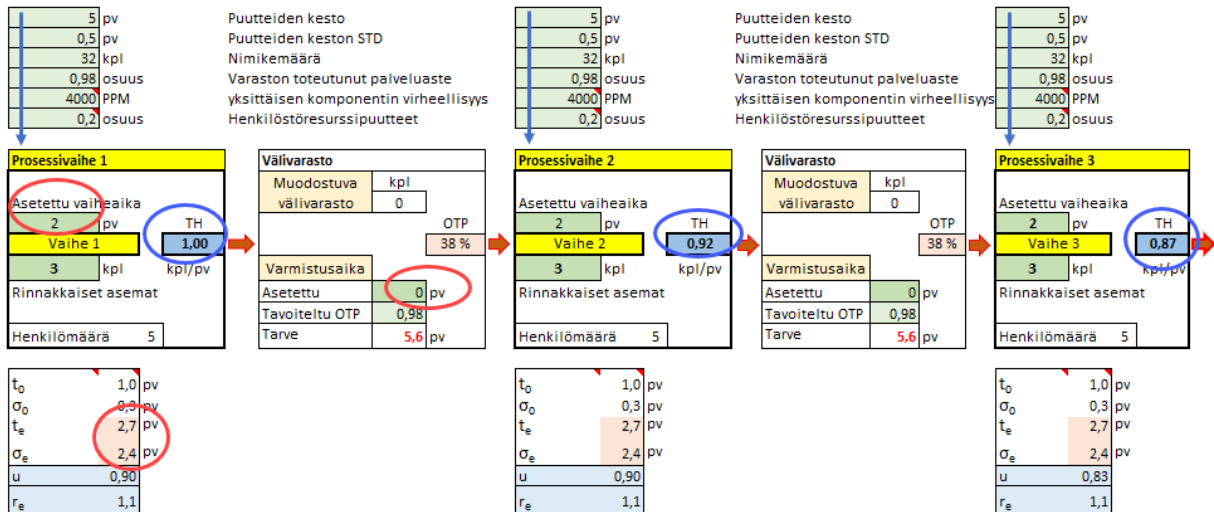


3.2.2 Vaihtelun ja ketjutuksen vaikutus prosessin virtaukseen

Mitoituksen lähtötilanteessa prosessivaiheet on ketjutettu peräkkäin ilman varmistusaikaa vaiheiden välissä. Kysyntä prosessivaiheeseen on 1 kappale, mutta kolmannelta prosessivaiheelta valmistuu vain 0,87 kappaletta. Häiriöistä johtuen prosessivaiheen prosessointiajan keskiarvo (t_e) on 2,7 ja keskihajonta (σ_e) 2,4, mutta prosessivaiheen vaiheajaksi on asetettu 2. Koska varmistusaikaa ei ole ja prosessointiaika on keskimäärin pidempi kuin suunniteltu, niin seuraava prosessivaihe ei pääse aloittamaan töitä suunnitellusti. Seuraava prosessivaihe odottaa edellisen vaiheen työn valmistumista, eikä varattua kapasiteettia saada hyödynnettyä suunnitellusti työn edistämiseen. Tästä johtuen kapasiteettia menetetään ja ulostulo (TH) on pienempi kuin edellisen vaiheen, vaikka materiaalien ja resursoinnin edellytykset ovat laskentaesimerkissä prosessivaiheilla identtiset. Häiriöistä aiheutuva prosessointiajan vaihtelu on se syy, miksi peräkkäisten prosessivaiheiden väliin tarvitaan varmistusaikaa. Ensimmäisen prosessivaiheen ulostulo

(TH) on 1, joka laskee virtauksen vaihtelusta johtuen toisella asemalla 0,92:n ja kolmannella 0,87:n.

Kuva 18. Prosessivaiheiden ketjutuksen vaikutus virtaukseen.



3.2.3 Varmistusajan lisäämisen vaikutus

Laskennan lähtötilanteen esimerkissä suunnitelma ei toteudu esimerkiksi ulostulomäärän osalta, eikä toimitusvarmuus ole hyväksyttävällä tasolla. Lisäämällä aikaa vaiheiden väliin, voidaan katkaista ketjutus, prosessivaiheen toimitusvarmuus seuraavalle prosessivaiheelle kasvaa ja seuraava vaihe pääsee aloittamaan työn suunnitellussa aikataulussa. Toteutuneen prosessiajan (t_e) ja sen keskihajonnan (σ_e) perusteella voidaan muodostaa jakauma, jolta voidaan määrittää tarvittava varmistusajan tarve. Varmistusajan määrittämisen teoriaa on käsitelty enemmän luvussa 2.2.5.

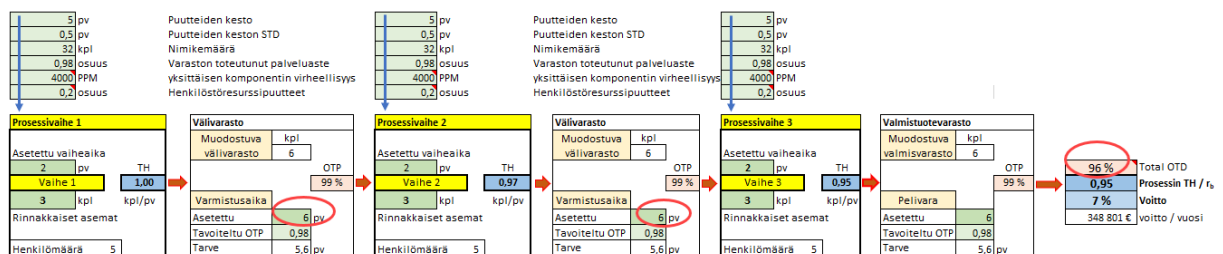
Kuvan 19 mitoitusesimerkissä prosessointiaikajakaumalta on määritetty tarvittava vaiheen aika, jonka aikana 98 prosenttia töistä valmistuu. Tästä kokonaisaikatarpeesta vähentämällä asetettu kahden päivän vaiheaja, saadaan varmistusajan tarpeeksi 5,6 päivää asetetun vaiheajan lisäksi. Lisäämällä 6 päivää varmistusaikaa jokaisen vaiheen jälkeen, voidaan nostaa koko prosessin toimitusvarmuus 96 prosenttiin lähtötilanteen 6 prosentin sijaan. Varmistusajan seurauksena muodostuu vaiheiden väliin välivarasto ja prosessin loppuun valmistuotevarasto, jolloin keskeneräisen työn määrä (WIP) nousee 13 kappaleesta 31

kappaleeseen. Keskeneräisen työn kappalemääräisen nousun mukana kasvaa myös sen arvo, 180 tuhannesta eurosta 414 tuhanteen euroon. Varmistusajan lisääminen nostaa myös suunniteltua kokonaisjaksonaikaa kahdeksasta (8) kahteenkymmeneen kahdeksaan (28) päivään. Vaikka prosessin jaksonaika ja keskeneräinen työ kasvavat, niin nyt voidaan 28 päivän jaksonaika pitää 96 prosentin todennäköisyydellä.

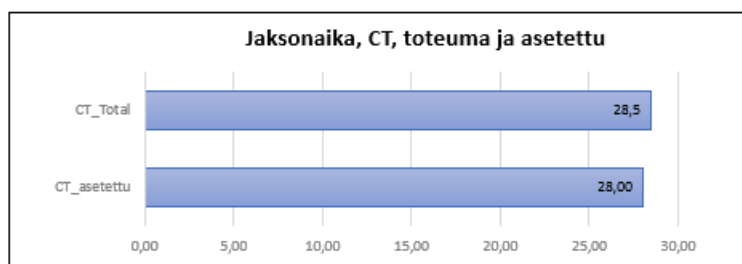
Suunnitellun ajan lisääminen prosessointiajan vaihtelun kompensoimiseksi, nostaa myös kolmen prosessivaiheen ulostulokyvykkyyden (TH) 0,87 kappaleesta päivässä 0,95 kappaleeseen. Ulostulon kasvamisen mahdollistaa välivarasto, jonka ansiosta seuraavalle prosessivaiheelle riittää työtä, vaikka edellisen prosessivaiheen prosessointiaika vaihtelee. Prosessista saatava voitto kasvaa myös ajan lisäämisen seurauksena 4 prosentista 7 prosenttiin, koska suurempi määrä tuotteita jakaa prosessin kustannukset.

Ajan kasvattaminen siis kasvatti voittoa. Tästä syystä toimitusajan lyhentäminen ei aina ole kokonaiskustannuksen kannalta järkevää, eikä sitä kannata itseisarvona tehdä.

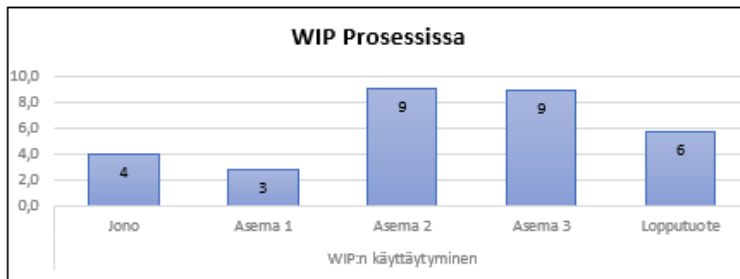
Kuva 19. Varmistusajan lisääminen prosessiin.



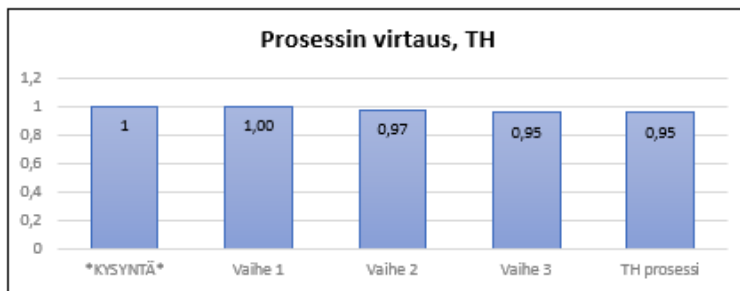
Kuva 20. Asetettu ja toteutunut jaksonaika keskimäärin.



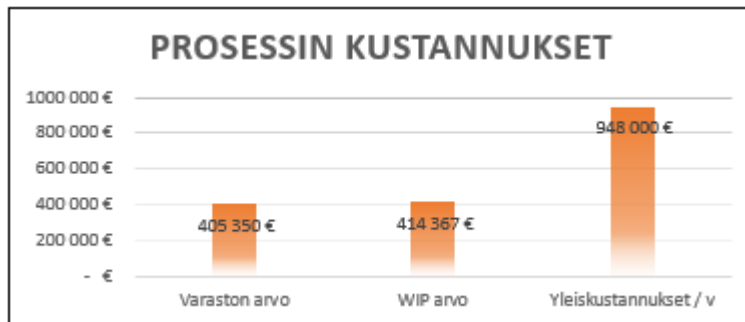
Kuva 21. Keskenäisen työn määrä prosessissa.



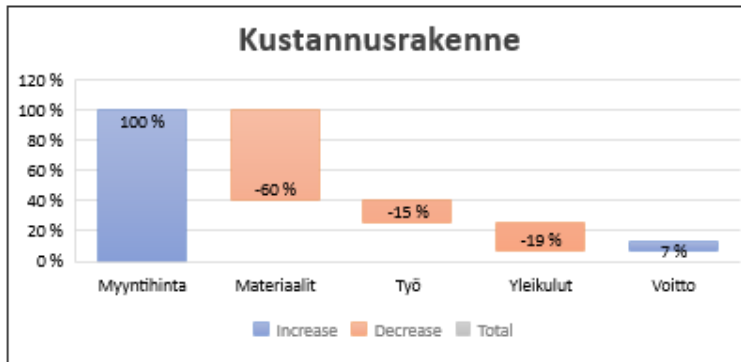
Kuva 22. Kysyntä, prosessivaiheiden ulostulot ja koko prosessin ulostulo.



Kuva 23. Komponenttivaraston arvo, keskenäinen työn arvo ja yleiskustannukset.



Kuva 24. Tuotteen kustannusrakenne.



3.2.4 Ulostulon kasvatus rinnakkaisia asemia lisäämällä

Prosessin ulostuloa voi nostaa lisäämällä prosessivaiheiden rinnakkaisia tekopaikkoja, tilanteessa kun kysyntä kasvaa ja prosessivaiheiden prosessointiaika ei muutu.

Prosessivaiheen ulostulo lasketaan jakamalla prosessointiaika rinnakkaisten tekopaikkojen määrällä, josta enemmän luvussa 2.1.3. Lisäämällä rinnakkaisten tekopaikkojen määrää, voidaan ulostuloa kasvattaa.

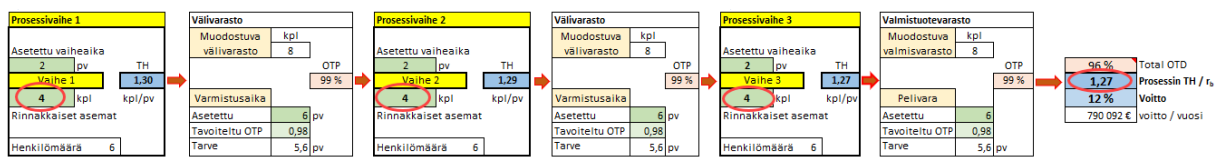
Mitoitus esimerkissä on nostettu kaikkien prosessivaiheiden rinnakkaisten tekopaikkojen määrä kolmesta neljään, jolloin myös asennusresurssien määrä kasvaa niin, että uudet tekopaikat on resursoitu kahdessa vuorossa. Prosessivaiheiden ulostulonopeus nousee edellisen luvun varmistusajan lisäys esimerkistä, jolloin kysyntää voidaan kasvattaa 1 kappaleesta 1,3 kappaleeseen käyttösuhteen menemättä ensimmäisellä vaiheella liian korkeaksi. Prosessin ulostulonopeus kasvaa 0,95:tä 1,27 kappaleeseen päivässä.

Rinnakkaisten tekopaikkojen lisäys aiheuttaa keskeneräisen työn määrän ja arvon kasvamisen, joka muuttuu edellisen luvun esimerkin 414 tuhannen euron arvosta 559 tuhanteen euroon. Kysynnän kasvatus lisää myös tarvittavaa nimikkeiden varastointimäärää, koska varaston on katettava nimikkeen toimituksen aikainen kysyntä ja näiden vaihtelu. Tätä on käsitelty tarkemmin kappaleessa 2.1.2. Komponenttivaraston määrän nosto on tehtävä ennen vapautettavien töiden määrään lisäystä, jotta osapuutteet eivät kasva alemman kysynnän tilanteesta. Mitoitus esimerkissä kun kysyntä varastoon nostetaan 1 kappaleesta

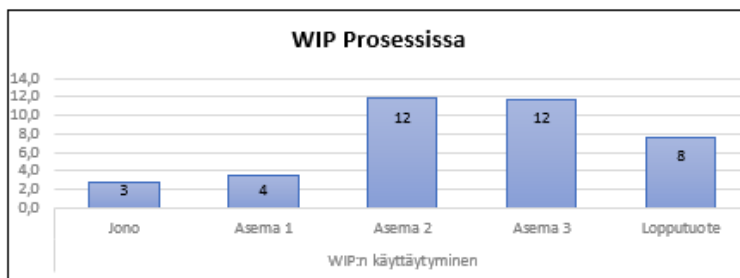
1,3 kappaleeseen, niin tarvittava komponenttivaraston määrän arvo nousee 405 tuhannesta eurosta 436 tuhanteen euroon.

Prosessin jaksonaika ei rinnakkaisia tekopaikkoja lisäämällä muutu, koska prosessointiaikaa ja varmistusaikaa ei muutettu. Voitto sen sijaan kasvaa ulostulon kasvaessa, koska lisääntyneen ulostulon myötä myynti kasvaa lisääntyneitä kuluja enemmän. Voitto kasvaa luvun 3.2.3. esimerkin 7 prosentista 12 prosenttiin.

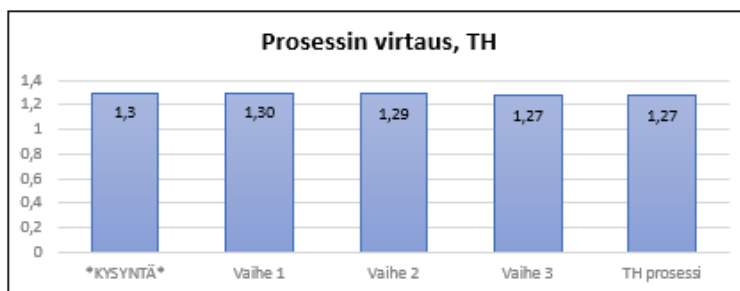
Kuva 25. Rinnakkaisten tekopaikkojen ja prosessin kysynnän kasvatus



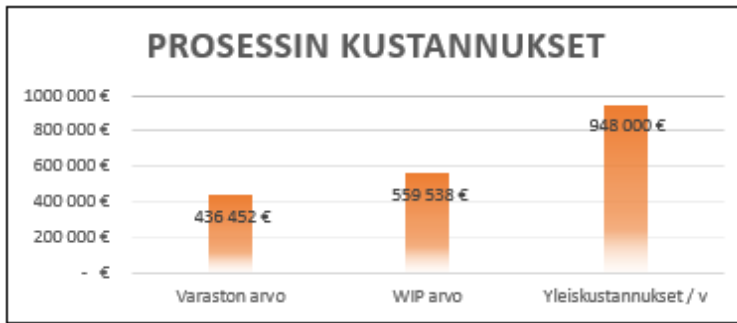
Kuva 26. Keskenäisen työn määrä prosessissa



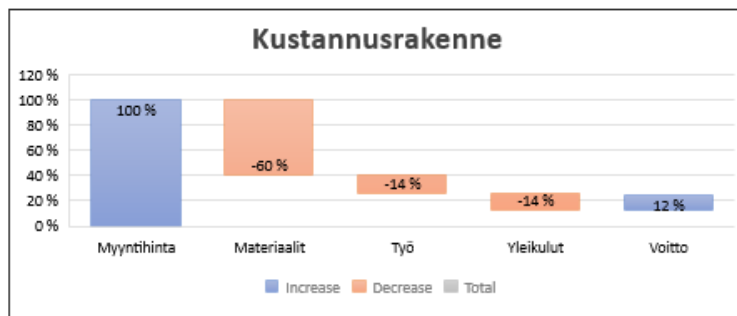
Kuva 27. Kysyntä, prosessivaiheiden ulostulot ja koko prosessin ulostulo.



Kuva 28. Komponenttivaraston arvo, keskeneräinen työn arvo ja yleiskustannukset.



Kuva 29. Tuotteen kustannusrakenne.



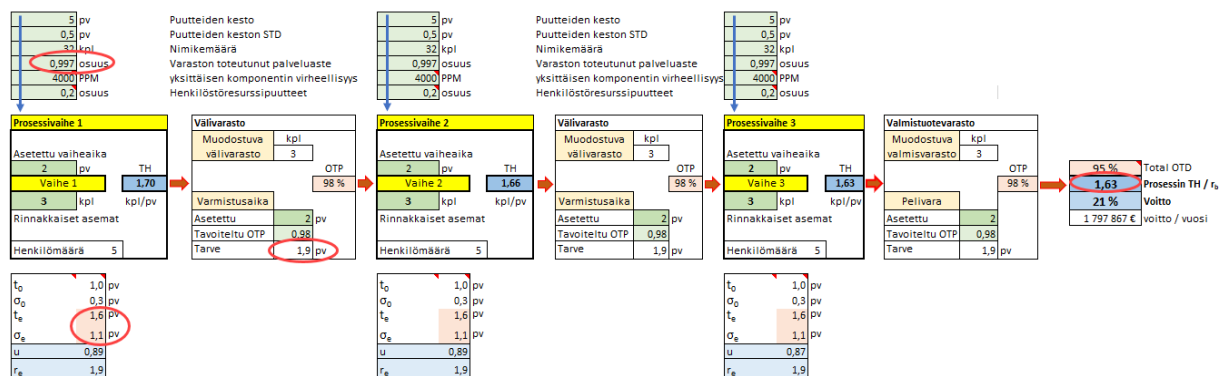
3.2.5 Osien saatavuuden parantamisen vaikutus prosessiin

Komponenttipuutteita prosessissa voidaan vähentää nostamalla varaston toteutunutta palveluastetta prosessivaiheelle. Tällä tarkoitetaan todennäköisyyttä, jolla yksittäinen komponentti on prosessivaiheen saatavilla. Osien saatavuuden osalta prosessivaiheen onnistumistodennäköisyys lasketaan korottamalla palveluaste nimikemäärän potenssiin, joten palveluasteen noston myötä myös prosessivaiheen kokoonpanon onnistumistodennäköisyys kasvaa. Tämän seurauksena prosessointiaika ja keskihajonta laskevat, koska pienempi määrä osapuutteita realisoituu prosessiin. Osapuutteiden kesto ja sen keskihajonnan suuruus vaikuttavat myös prosessointiaikaan ja keskihajontaan, koska prosessointiaika kasvaa puutteen ilmetessä korvaavan osan toimitusajan verran. Lyhentämällä komponenttien toimitusaikaa, lyhennetään myös prosessointiaikaa ja sen keskihajontaa. Tämän luvun simulointiesimerkissä ei tosin muutettu komponenttien toimitusajan ja puutteiden keston parametreja, mutta nämä on todellisessa prosessissa huomioitava. Varastoitavien nimikkeiden määrän laskenta palveluastetavoitteen perusteella ja sen vaikutus prosessointiaikaan on esitetty tarkemmin luvuissa 2.1.2. ja 2.2.2.

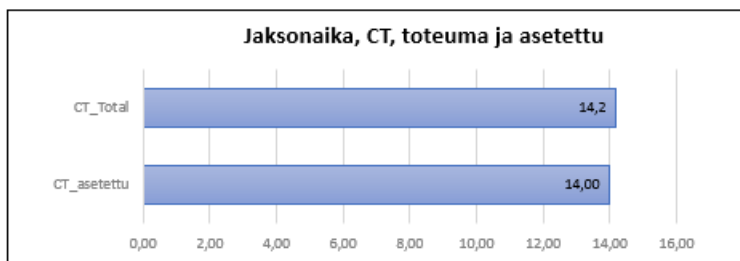
Prosessointiajan laskun seurauksena prosessivaiheen ulostulonopeus kasvaa, koska samalla kapasiteetilla saadaan enemmän työtä tehdyksi. Prosessiin voidaan näin vapauttaa enemmän työtä. Mitoitus esimerkissä varaston palveluasteen nosto 98 prosentista 99,7 prosenttiin mahdollistaa kysynnän kasvattamisen 1,7 kappaleeseen, jolloin prosessin ulostulo kasvaa luvun 3.2.3 esimerkin 0,95 kappaleesta 1,63 kappaleeseen.

Prosessointiajan ja sen keskihajonnan laskun myötä, myös tarvittava varmistusajan määrä on mahdollista laskea kahteen päivään. Muodostuvan välivaraston koko pienenee ja näin myös keskeneräisen työn määrä laskee. Myös jaksonaika putoaa varaston palveluasteen noston ja varmistusajan tarpeen vähenemisen seurauksena 28 päivästä 14 päivään. Varaston palveluasteen ja varaston kysynnän kasvu aiheuttavat komponenttivaraston arvon nousun 436 tuhannesta eurosta 594 tuhanteen. Voitto sen sijaan kasvaa luvun 3.2.3 esimerkin 7 prosentista 21 prosenttiin, prosessin ulostulon kasvaessa merkittävästi.

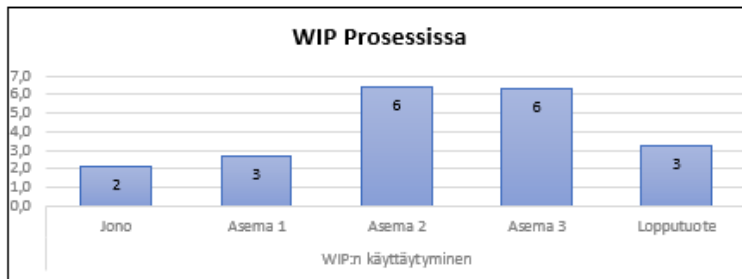
Kuva 30. Komponenttien saatavuuden parantaminen



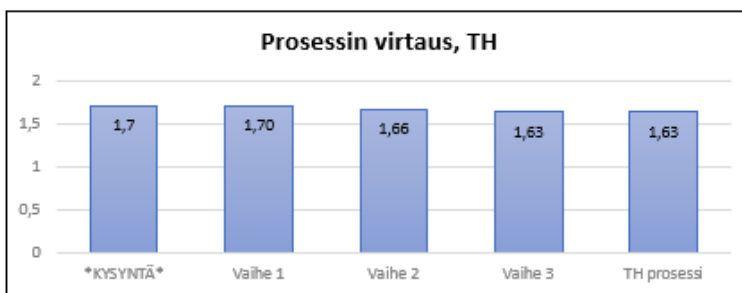
Kuva 31. Asetettu ja toteutunut jaksonaika keskimäärin.



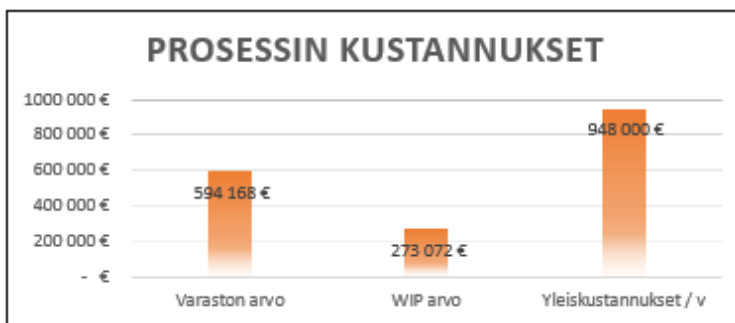
Kuva 32. Keskeneneräisen työn määrä prosessissa



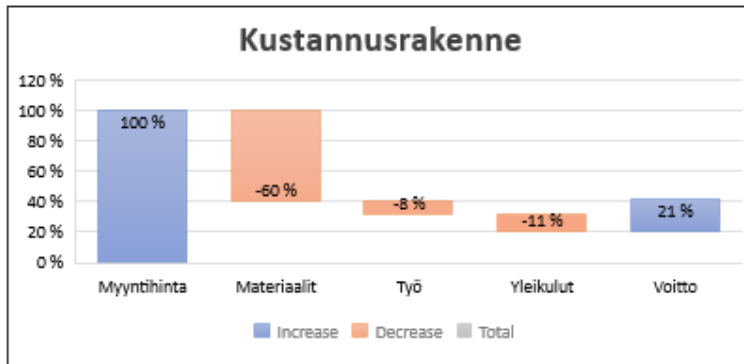
Kuva 33. Kysyntä, prosessivaiheiden ulostulot ja koko prosessin ulostulo.



Kuva 34. Komponenttivaraston arvo, keskeneneräinen työn arvo ja yleiskustannukset.



Kuva 35. Tuotteen kustannusrakenne.

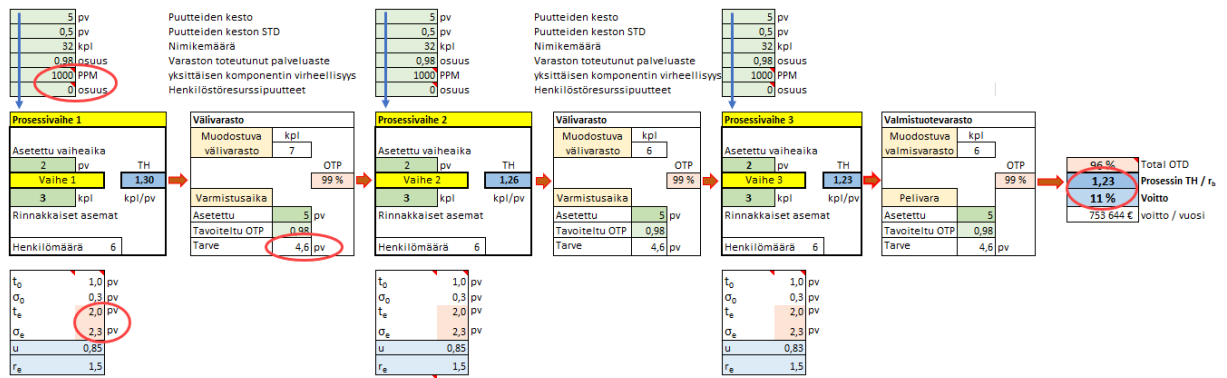


3.2.6 Laatu- ja resurssipoikkeamien vaikutus prosessiin

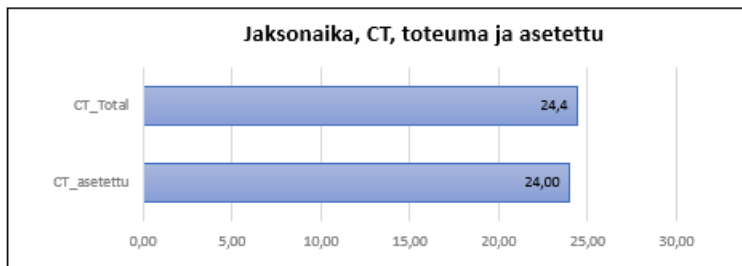
Komponenttilaadun ja resurssipuutteiden vaikutus prosessointiaikaan ja sen keskihajontaan on laskentateknisesti samanlainen, joista molemmat huomioidaan laskennassa niiden ilmenemistodennäköisyytenä. Komponenttilaatu ilmaisee virheellisten komponenttien määrän miljoonaa komponenttia kohden, josta voidaan laskea virheellisten komponenttien prosentuaalinen osuus. Resurssipuutteet on laskennassa huomioitu prosenttiosuutena prosessivaiheen tekopaikkojen määrän ja kahden vuoron vaatimasta resursoinnista. Komponenttilaatu- ja resurssipoikkeamien vaikutuksen laskenta prosessointiaikaan ja sen keskihajontaan on kerrottu tarkemmin luvussa 2.2.3.

Luvun 3.2.3 mitoitusesimerkistä komponenttilaatu on nostettu 4000:sta virheestä 1000 virheeseen miljoonaa mahdollisuutta kohden, sekä poistettu aiemman tilanteen resursoinnin puutteet. Tämä laskee toteutunutta prosessointiaikaa ja sen keskihajontaa, jonka seurauksena varmistusajan ja tarpeen määrä laskee. Prosessivaiheiden ulostulonopeus kasvaa ja prosessiin voidaan syöttää yhden kappaleen sijasta 1,3 kappaletta kysyntää. Voitto kasvaa vertailutilanteen 7 prosentista 11 prosenttiin ja ulostulo 0,95:stä 1,23 kappaleeseen.

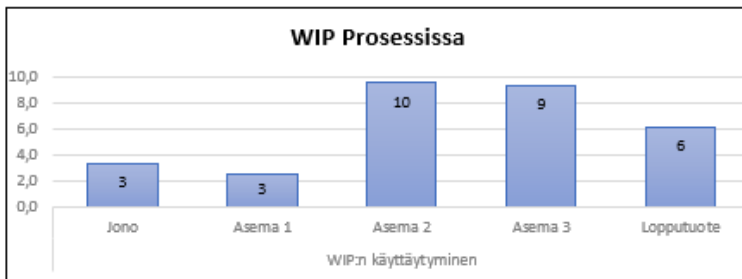
Kuva 36. Komponenttilaadun ja resursoinnin vaikutus.



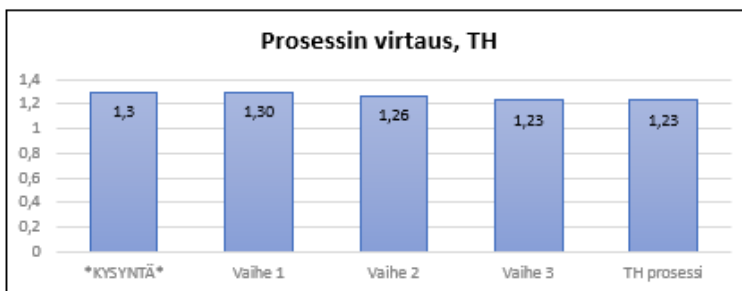
Kuva 37. Asetettu ja toteutunut jaksonaika keskimäärin.



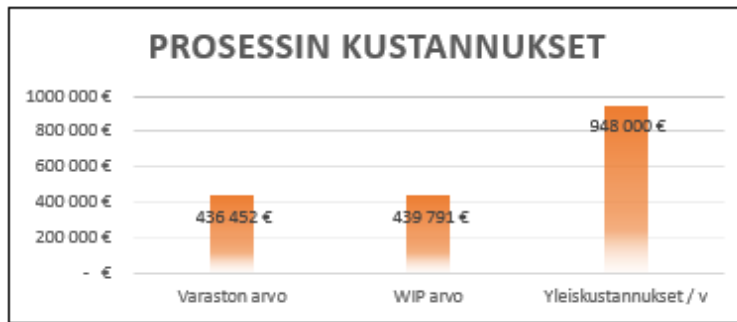
Kuva 38. Keskenäisen työn määrä prosessissa



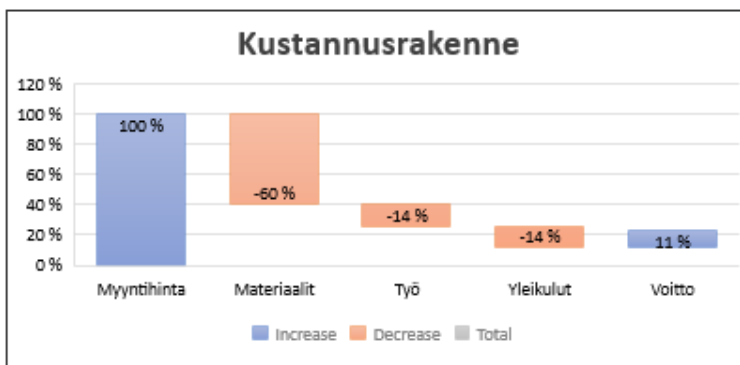
Kuva 39. Kysyntä, prosessivaiheiden ulostulot ja koko prosessin ulostulo.



Kuva 40. Komponenttivaraston arvo, keskeneräinen työn arvo ja yleiskustannukset.



Kuva 41. Tuotteen kustannusrakenne.



3.2.7 Töiden saapumisnopeuden vaihtelun vaikutus prosessiin

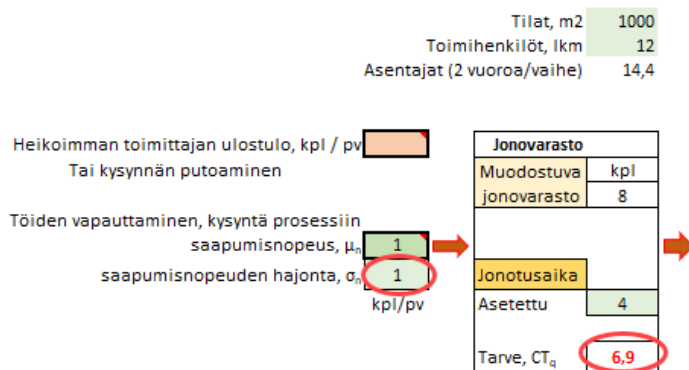
Töiden saapumisnopeuden vaihtelulla on vaikutusta töiden jonoutumiseen prosessin eteen. Esimerkilaskelmassa on havainnollistettu kuinka ensimmäisen prosessivaiheen jonotusaika kasvaa 4 päivästä 6,9 päivään kun töiden saapumisnopeuden keskihajonta nousee 0,5:stä yhteen. Jonotusajan kasvamisen myötä myös jaksonajan toteuma kasvaa, eikä suunniteltu jaksonaika enää riitä. Saapumisnopeuden keskihajonnan kasvaminen kasvattaa prosessivaiheen vaihtelukerrointa (c_a^2), joka puolestaan jonotusajan laskennassa kasvattaa jonotusaikaa. Tarkemmin tätä vaihtelu ja jonoutumista on käyty läpi luvuissa 2.2.6. ja 2.3.1.

Prosessin kysynnän vaihtelulla on merkittävä vaikutus myös komponenttivaraston tarpeeseen, koska se aiheuttaa kysynnän vaihtelua varastoon. Komponenttivaraston osien kappalemäärän laskennassa yksi parametri on kysynnän vaihtelu, joten sen kasvaminen nostaa varastoitavien nimikkeiden tarvemäärää. Tässä laskentaesimerkissä kysynnän

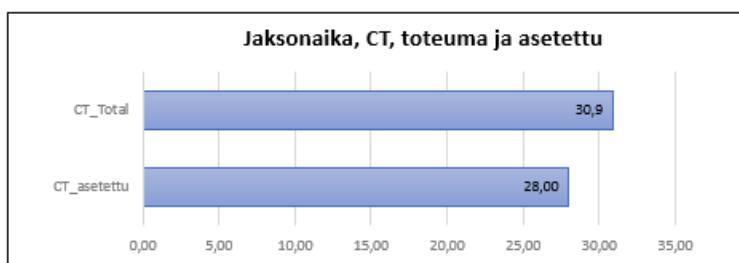
vaihtelu on huomioitu kaikkien prosessivaiheiden nimikkeiden varaston määrän laskennassa simulointilaskennan yksinkertaistamiseksi. Todellisuudessa varastoon kohdistuva kysynnän vaihtelu laskee prosessin loppua kohden, koska välivarastot vähentävät prosessivirtauksen suuntaista vaihtelua ja näin kysynnän vaihtelua varastoon. Laskentaesimerkin kaltainen tilanne voi olla esimerkiksi silloin, kun prosessiin vapautetaan vuorotellen eri nimikkeitä sisältäviä tuotteita. Kysynnän vaihtelun kasvu 0,5:stä 1:n edellyttää suuremman määrän varastoa, jonka tarve kasvaa 405 tuhannesta eurosta 576 tuhanteen euroon.

Kysynnän vaihtelu vaikuttaa prosessivaiheen ulostuloon, mikäli varastoitavien nimikkeiden määrässä ei ole huomioitu kysynnän vaihtelun tasoa tai kysynnän vaihtelu kasvaa varaston mitoituksen jälkeen. Varasto ei tällöin riitä kattamaan täydennysajan aikaista kysynnän vaihtelua, jolloin osapuutteet kasvavat. Prosessointiaika kasvaa ja ulostulo laskee.

Kuva 42. Töiden saapumisnopeuden hajonnan kasvu lisää jonotusaikaa



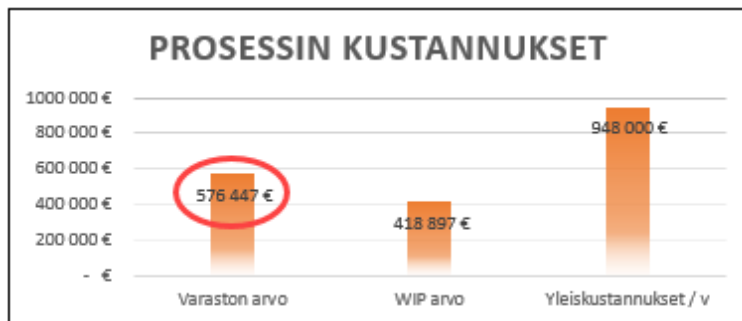
Kuva 43. Jaksonaika kasvaa jonotusajan kasvamisen verran.



Kuva 44. Komponenttivaraston arvo kysynnän hajonnalla 0,5.



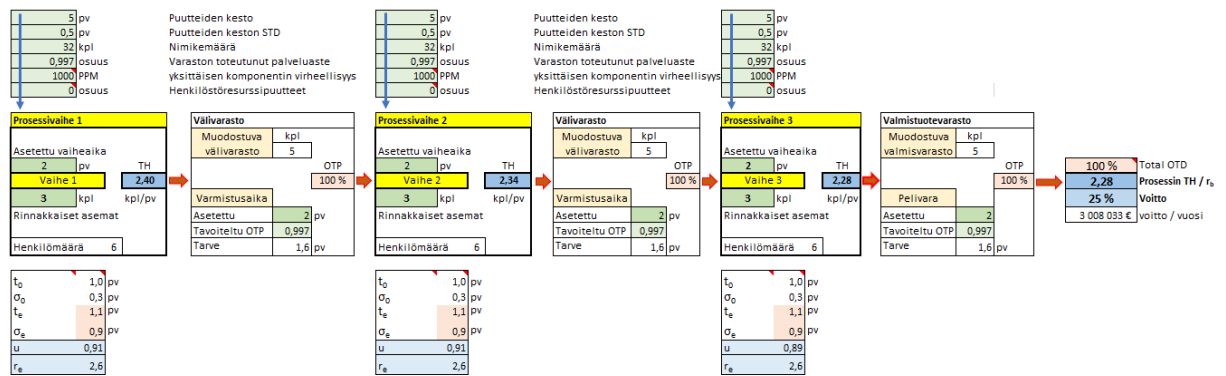
Kuva 45. Komponenttivaraston arvo kysynnän hajonnalla 1.



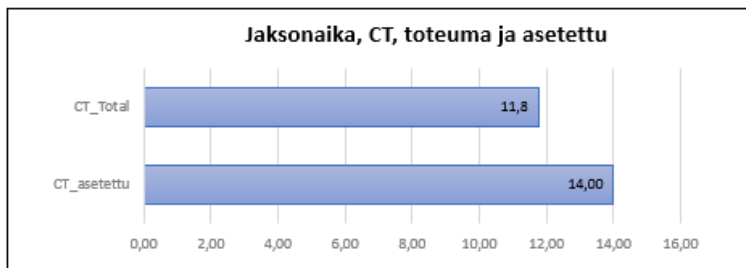
3.2.8 Sisääntuloparametrien mitoituksen yhteisvaikutus prosessiin

Komponenttien saatavuuden nosto 99,7 prosenttiin, komponenttilaadun parantaminen 1000 PPM:n ja resurssipuutteiden poistaminen nostaa laskentaesimerkissä prosessin kyvykkyyttä niin, että prosessiin ulostulo kasvaa luvussa 3.2.3. esitetyn laskennan mukaisen 0,95 kappaleesta 2,28 kappaleeseen päivässä. Prosessointiaika ja sen hajonta laskevat niin, että prosessivaiheen kahden päivän varmistusaika riittää yli 99,7 prosentin prosessivaihekohtaiseen onnistumistodennäköisyyteen. Näin saavutetaan lähes sadan prosentin toimitusvarmuus asiakkaalle, 14 päivän toimitusajalla. Tuotteiden voitto kasvaa laskelman mukaan luvun 3.2.3. esimerkin 7 prosentista 25 prosenttiin, joka johtuu prosessin virtauksen kasvamisesta aiheuttamasta suoran työn ja yleiskulujen laskusta valmistettua tuotetta kohden.

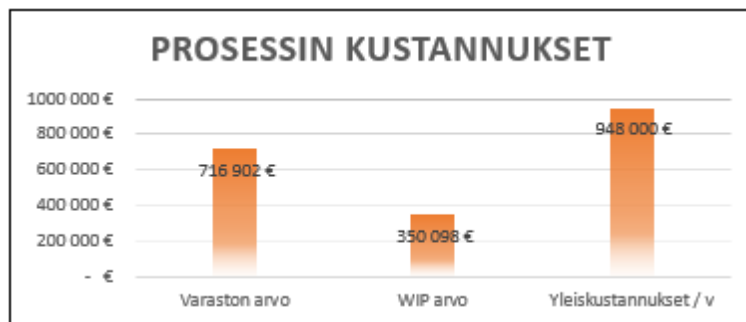
Kuva 46. Sisäntuloparametrien yhteisvaikutus.



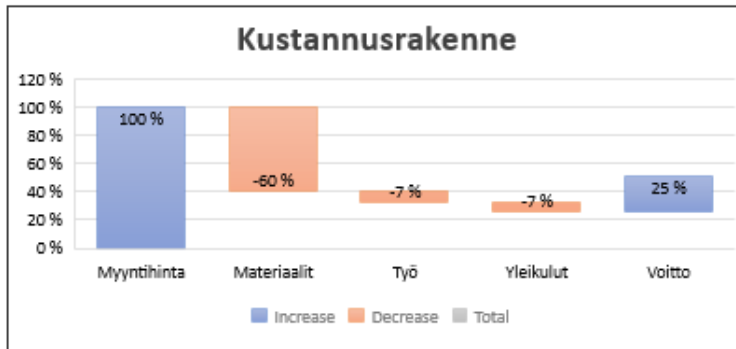
Kuva 47. Jaksonaikatoteuman keskiarvo ja asetettu jaksonaika.



Kuva 48. Komponenttivaraston arvo, keskeneräinen työn arvo ja yleiskustannukset.



Kuva 49. Tuotteen kustannusrakenne.

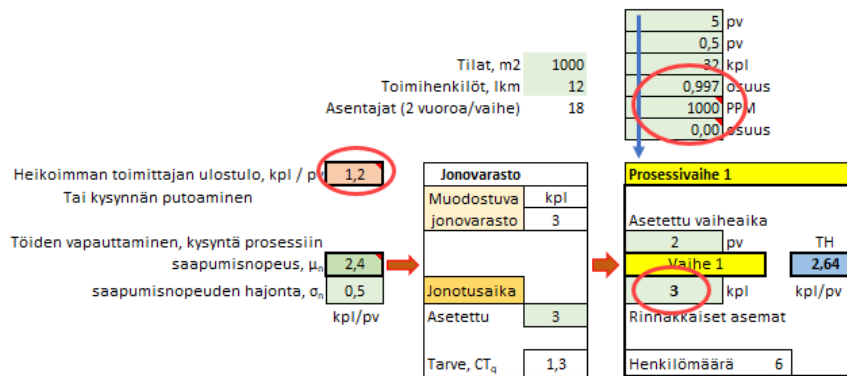


3.2.9 Kysynnän laskun vaikutus voittoon eri prosessin tiloissa

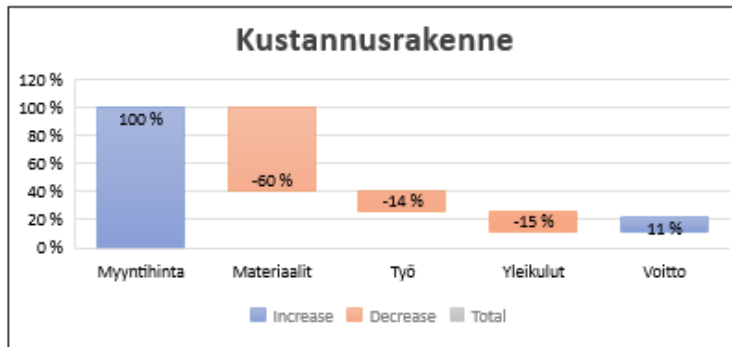
Prosessin mitoituksen tavalla on merkitystä siihen, kuinka hyvin prosessi sietää lyhyen aikavälin kysynnän muutoksia voiton näkökulmasta. Lyhyellä aikavälillä tarkoitan tässä sitä, että prosessin sitoutunut pääoma ja resurssit jäävät korkeamman kysynnän mitoituksen tasolle. Toinen mahdollinen tilanne on se, että prosessin ulkoinen tekijä rajoittaa ulostulon prosessin mitoitusta matalammalle tasolle. Tällöin prosessin ulostulo jää rajoitteen tasolle, prosessin kustannuksien ollessa korkeamman kysynnän tasolla. Mitoituslaskennassa simuloin tilanteen niin, että laskentaan voi syöttää rajoitteen aiheuttaman ulostulon kappalemäärän alkuperäisen kysynnän rinnalle. Alkuperäinen prosessiin kohdistuva kysyntä muodostaa laskelmassa prosessin kustannukset ja prosessin rajoite leikkaa prosessin ulostulon. Näin voi simuloida tilanteen kun prosessiin on sitoutunut korkeamman kysynnän kustannukset, mutta prosessista valmistuu kustannuksia jakavia tuotteita vähemmän.

Tarkastellaan edellisen luvun mitoitusesimerkkiä, jossa ulostuloa kasvatettiin 2,28 kappaleeseen prosessin sisääntuloja muuttamalla ja saavutettiin 25 prosentin voitto. Tässä prosessin tilanteessa asetetaan rajoite 1,2 kappaletta, joka on noin puolet prosessin mitoitettusta ulostulosta. Prosessiin sitoutunut rahamäärä on mitoituksen mukainen, mutta kustannuksia kantavien tuotteita valmistuu puolet vähemmän, jolloin voitto laskee 11 prosenttiin.

Kuva 50. Prosessin ulostulon rajoite tilanteessa kun prosessin vaihtelua on vähennetty

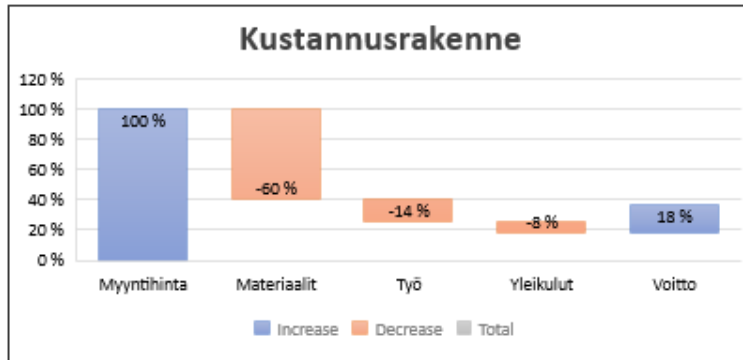


Kuva 51. Tuotteen kustannusrakenne tilanteessa kun vaihtelua vähennetty ja ulostulon rajoite.

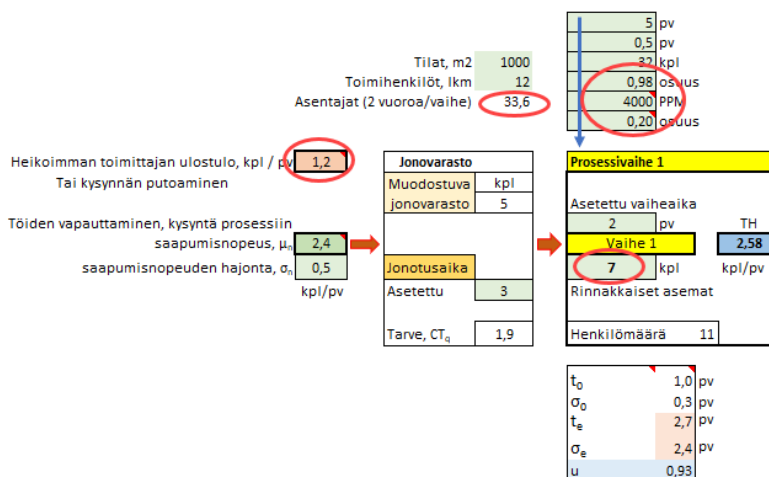


Tarkastellaan seuraavaksi tilannetta, jossa prosessin ulostulon kasvatus on toteutettu kasvattamalla rinnakkaisia tekopaikkoja. Prosessin sisääntulot ovat tämän työn simuloinnin lähtötason mukaiset kuten luvussa 3.2.3. on esitetty. Prosessiin pääsee vaihtelua sisääntuloparametrien tasosta johtuen, joka kasvattaa prosessointiaikaa ja sen keskihajontaa. Rinnakkaisien tekopaikkojen määrää on nostettava kolmesta (3) seitsemään (7) jokaisessa prosessivaiheessa, jotta ulostulo kasvaa likimain edellisen esimerkin tasolle. Rinnakkaisten tekopaikkojen kasvatus edellyttää myös asennusresursoinnin kasvattamista sekä keskeneräisen työn määrä kasvaa, jolloin voittoprosentiksi muodostuu mitoitusesimerkissä 18. Tämän jälkeen kun prosessin ulostuloon asetetaan rajoite, joka laskee ulostulomäärän 1,2 kappaleeseen, niin toiminnan tulos menee 2 prosenttia negatiiviseksi. Tuotteista saatava myynti ei enää kata prosessin kustannuksia.

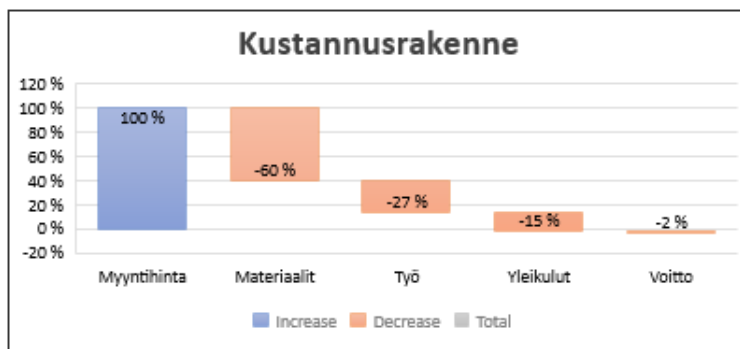
Kuva 52. Tuotteen kustannusrakenne tilanteessa kun ulostuloa on nostettu keskeneräistä työtä lisäämällä.



Kuva 53. Prosessin ulostulon rajoite tilanteessa kun ulostuloa on kasvatettu keskeneräistä työtä lisäämällä.



Kuva 54. Tuotteen kustannusrakenne tilanteessa kun keskeneräistä työtä on kasvatettu ulostulon rajoite.



Prosessin ulostulon kasvattaminen on myös riskienhallinnan kannalta kannattavampaa tehdä prosessin vaihtelua pienentämällä. Tällöin prosessiin sitoutunut kustannus on pienempi ja prosessi sietää enemmän ulostulon vaihtelua toiminnan menemättä kannattamattomaksi. Käytännössä on kuitenkin huomioitava mitoitustapojen vaatima eri aikajänne. Prosessin vaihtelun pienentäminen on paljon vaikeampaa ja kestää kauemmin kuin rinnakkaisten tekopaikkojen kasvattaminen. Mikäli ulostulotavoite muuttuu vaihtelun pienentämisen vaatimaa aikajännettä lyhyemmällä aikavälillä, niin silloin ulostulon nosto on mahdollisesti tehtävä rinnakkaisia tekopaikkoja lisäämällä.

Pidemmällä aikavälillä on kuitenkin kannattavampaa investoida prosessin vaihtelun pienentämiseen, joka edellyttää investointia ihmisiin ja osaamiseen. Näin toimien prosessi sietää paremmin suhdanteiden muutoksia ja häiriöitä, jolloin ei ole pakko mitoitaa prosessia uudelleen taloudellisista syistä. Prosessin ulostulon kasvattaminen kestää kuitenkin aina pitempään kuin mitoitus alaspäin, jolloin kysynnän jälleen muuttuessa on riski, ettei palautuneeseen kysyntään kyetä enää vastaamaan.

3.3 Prosessin ohjauksen toteutus

Kun prosessi on mitoitettu liiketoiminnan tavoitteiden mukaisesti, niin prosessiparametrien pitäminen halutulla tasolla vaatii jatkuvan mittauksen ja ohjauksen. Prosessin ulostulot ohjataan sisääntuloparametreja ohjaamalla, jotka pidetään mitoituksen mukaisella tasolla liiketoiminnan tavoitteiden toteutumiseksi. Sisään- ja ulostuloparametreja on käsitelty tarkemmin luvussa 2.5.1.

3.3.1 Komponenttivarasto

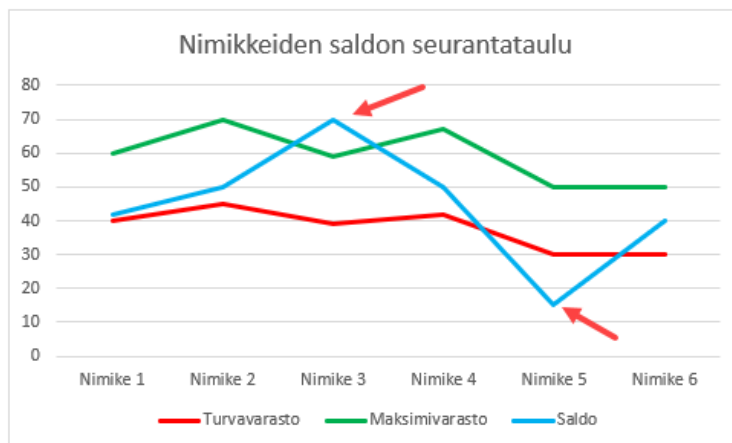
Kun mitoituskannan perusteella määritelty varaston palveluastetarve, niin täydennysaikakysyntä varianssiyhtälöllä, joka on käsitelty luvussa 2.1.2., voidaan tämän perusteella laskea tarvittava komponenttikohtainen turvavarasto. Komponentin eräkkö ja turvavarasto summaamalla voidaan muodostaa maksimivarasto, josta saadaan yläohjausraja.

Turvavarasto on luonnollisesti nimikkeen saldon alaohjausraja. Nimikkeen saldoa voidaan

näin verrata laskettuihin ohjausrajoihin ja reagoida poikkeamiin. Kuvan 55 esimerkissä Nimike 3 saldo on hieman yli tavoitteen, josta aiheutuu hyvin pieni taloudellinen rasite.

Nimike 5 saldo on alle tarvittavan turvavaraston edellyttämän määrän. Mikäli seuraavan toimituserän viivästyy ja saman aikaisesti tulee kysyntäpiikki varastoon, niin kyseinen nimike realisoituu osapuutteenksi ja aiheuttaa prosessointiajan kasvamisen. Tämä aiheuttaa häiriön suunniteltuun ulostuloon ja liikevaihtoon. Turvavaraston tason alittavan nimikkeen saapuminen on varmistettava, jotta prosessiin ei tule suunnittelematonta häiriötä. Varastonohjauksen onnistumisen takaisinkytkentä saadaan mittaamalla osien saatavuutta eli toteutunutta palveluastetta tekopaikassa. Mikäli prosessin mitoituksen peruste on ollut osien saatavuus 99,7 % todennäköisyydellä, niin realisoituneita puutteita ei tule olla 0,03 % enempää.

Kuva 55. Komponenttien varastosaldon ohjaus.



3.3.2 Komponenttilaatu

Komponenttien virheellisyyttä on mitattava, koska komponenttivikojen määrä (PPM) vaikuttaa prosessointiaikaan ja edelleen prosessin ulostuloon. PPM-lukua on mitattava ja poikkeamat korjattava, jotta taso pysyy prosessin mitoituksen vaatimalla tasolla. Vikojen määrän kasvu on tarvittaessa kompensoitava esimerkiksi asennusresursseilla, rinnakkaisilla tekopaikoilla tai ajalla.

On huomioitava, että komponenttivikojen määrällä ja tarvittavalla turvavaraston määrällä on yhteys. Mitä suurempi on komponenttivikojen määrä, sitä enemmän tarvitaan vikaantuneen nimikkeen korvaavia komponentteja varastosta kokoonpanoon. Yksi tapa huomioida tämä, on huomioida varaston kysyntänä myös vikaantuneen tilalle kerätty komponentti normaalin kokoonpanon kysynnän lisäksi. Tällöin täydennysaika-kysyntä varianssiyhtälöllä laskettu turvavaraston määrä riittää korvaamaan myös vikaantuneet komponentit.

Mitoituslaskennassa on huomioitu satunnaisuudesta johtuvat komponenttien vikaantumiset. Mikäli esimerkiksi koko toimituserä on viallinen ja prosessi pysähtyy, niin vaikutus prosessin ulostuloon on paljon suurempi kuin tämän työn mitoituslaskennan komponenttilaadun vaikutuslaskenta.

3.3.3 Asennusresurssit

On huolehdittava esimerkiksi päivittäisjohtamisella, että prosessin jokainen vuoro ja tekopaikka on resursoitu suunnitelman mukaan. Toteutettava esimerkiksi varahenkilöjärjestelmä tai moniosaamiseen investointi, etteivät poissaolot vaikuta prosessointiaikaan. Mikäli suunniteltu poissaolomäärä ylittyy, niin ylittyy myös suunniteltu prosessointiaika. Prosessin ulostulo laskee, jolloin liikevaihto jää suunnitellusta.

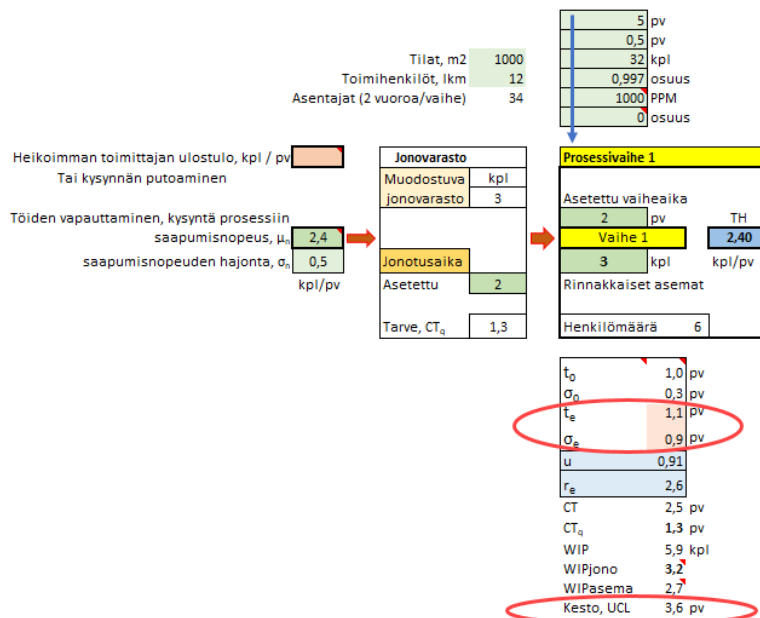
3.3.4 Prosessointiaika - takaisinkytkentä sisääntuloparametrien ohjaukselle

Prosessin mitoituslaskennalla on määritetty sallittu toteutuva prosessointiaika ja sen keskihajonta, jotka mahdollistavat liiketoimintatavoitteiden täyttymisen. Kuvan 56 esimerkissä prosessointiajaksi (t_e) on määritetty 1,1 päivää ja keskihajonnaksi (σ_e) 0,9 päivää. Koska mitoituslaskennassa prosessiajat ovat normaalisti jakautuneita, voidaan näiden kahden parametrin perusteella määritellä toteutuneen prosessointiajan yläohjausraja halutulla todennäköisyydellä. Tästä tarkemmin luvussa 2.2.5.

Luvussa 2.6.1. todettiin kolmen standardipoikkeaman eli 3 sigman rajan olevan käyttökelpoinen ekonomisen ohjausraja, joka normaalijakaumalla tarkoittaa 99,7%

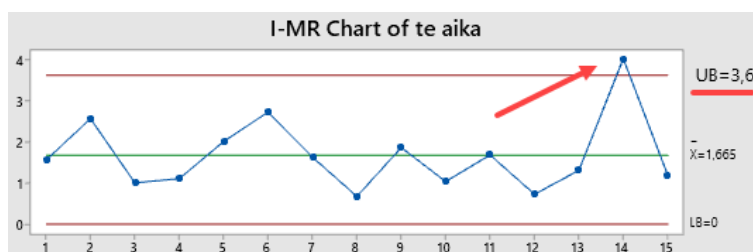
jakauman pinta-alasta. Näistä voidaan määrittää prosessointiajan yläohjausrajaksi 3,6 päivää.

Kuva 56. Prosessivaiheen prosessointiaika ja keskihajonta.



Prosessointiajan ohjaamiseen voidaan näin muodostaa ohjauskortti, jossa yläohjausraja on 3,6 päivää. Prosessointiaikojen toteumat, jotka jäävät tämän ohjausrajan alle ovat prosessin normaalia vaihtelua, mutta ylityksiin tulee puuttua. Kuvan esimerkissä datapiste 14 ylittää ohjausrajan, jonka syy on viipymättä selvitettävä ja korjattava, jotta prosessi toimii mitoituksen mukaisesti ja liiketoiminnan tavoite täyttyy. On siis tutkittava mikä prosessin sisääntuloparametri on aiheuttanut ohjausrajan ylityksen ja korjattava tämä sisääntuloparametri mitoituksen mukaiselle tasolle.

Kuva 57. Prosessointiajan toteuman seuranta.



3.3.5 Töiden vapauttaminen prosessiin

Kun prosessi on mitoitettu tietylle kysyntätasolle, niin töitä ei tule vapauttaa prosessiin mitoitettua määrää enempää. Liian suuri vapautettavien töiden määrä nostaa käyttösuhdetta ja jono prosessin edessä lähtee kasvamaan, eikä luvattua toimitusaikaa kyetä enää toteuttamaan. Tarkemmin käyttösuhteen muodostumista on käsitelty luvussa 2.1.3. Kysynnän kasvaessa prosessi on mitoitettava uudelle kysyntätasolle ja muutettava prosessia ja prosessin edellytyksiä, ennen kuin suurempi määrä töitä vapautetaan prosessiin.

Vapautettavien töiden määrän hajonnalla on myös merkitystä suunnitelman toteutumiseen, jota on myös ohjattava. Vaikka hajonta ei muuttaisi vapautettavien töiden määrän keskiarvoa ja prosessi tästä jonoutumisen kasvamisesta kykenisi selviytymään, niin suurempi vaikutus tulee välillisesti varaston kautta. Varaston tulee kattaa komponentin toimituksen aikainen kysyntä, jolloin töiden vapauttamisen hajonnan kasvaminen kasvattaa kysynnän hajontaa varastoon. Mikäli varasto on mitoitettu matalammalle kysynnän hajonnan tasolle, niin prosessiin realisoituvat osapuutteet kasvavat. Tämä puolestaan aiheuttaa prosessointiajan kasvamisen ja edelleen riskin liiketoiminnan tavoitteiden toteutumiseksi. Varaston ohjausta on käsitelty tarkemmin luvussa 2.1.2

3.4 Prosessin parantamisen simulointi kun tuotetta ja prosessia parannetaan

3.4.1 Tuotteen osien määrän pienentämisen vaikutus

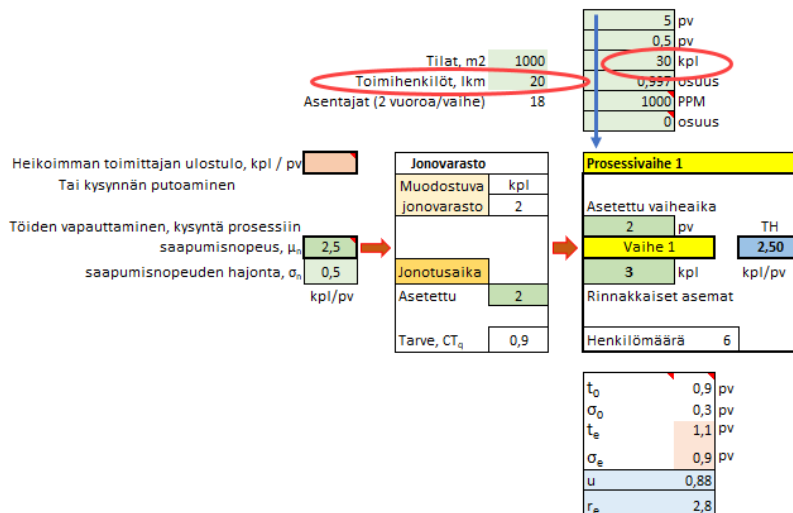
Prosessia voi parantaa parantamalla itse tuotetta. Tätä on käsitelty tarkemmin luvussa 2.7. Seuraavassa laskentaesimerkissä on toteutettu tilanne, jossa tuotteen uudelleen suunnittelulla on onnistuttu vähentämään prosessivaihekohtaista osien määrää 32 kappaleesta 30 kappaleeseen. Kuitenkin niin, ettei muiden asennettavien osien kustannus nouse. Mitoituslaskennassa on määritelty yhden osan asennusaika, joka kertomalla osien määrällä, saadaan tuotteen aiheuttama prosessointiaika (t_0). Näin osien määrän vähennyttä myös tuotteen aiheuttama prosessointiaika pienenee. Osien määrän vähentyminen kasvattaa prosessivaiheen onnistumistodennäköisyyttä prosessin edellytysten pysyessä

lähtötilanteen tasolla, jolloin toteutunut prosessointiaika (t_e) laskee ja sen keskihajonta (σ_e) pienenee.

Prosessointiajan lyhentymisen ansiosta prosessiin kohdistuvaa kysyntää voidaan kasvattaa 2,5 kappaleeseen. Prosessointiajan ja sen keskihajonnan pienentyminen vähentävät myös varmistusajan tarvetta, jolloin keskeneräisen työn määrä prosessissa vähenee. Osien määrän vähentyminen pienentää myös varastoitavien osien tarvetta ja kustannusta. Näiden yhteisvaikutuksena kustannusrakenne kantaa enemmän yleiskustannuksia, jonka simuloimiseksi laskennassa on nostettu toimihenkilömäärä 12 henkilöstä 20 henkilöön. Voitto on tällöin 25 prosenttia, joka vastaa luvussa 3.2.8. käsiteltyä mitoituskalkyylin 25 prosentin voittoa suuremmalla osamäärällä ja pienemmällä henkilömäärällä.

Todellisessa prosessissa investointi henkilömäärään ja osaamiseen on tehtävä ennen kuin, se on mahdollista todentaa prosessin ulostulon parantumisena. Ensinnäkin on investoitava ja hyväksyttävä voiton pieneminen. Vasta prosessin parantumisen jälkeen on mahdollista kasvattaa prosessin ulostuloa, jolloin voitto kasvaa.

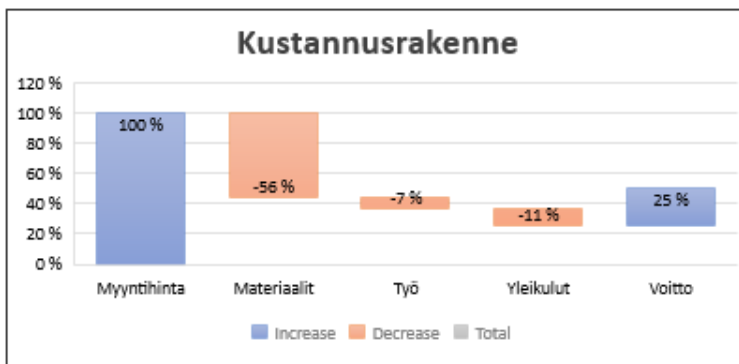
Kuva 58. Osien määrän pienentäminen ja toimihenkilömäärän kasvattaminen.



Kuva 59. Komponenttivaraston arvo, keskeneräinen työn arvo ja yleiskustannukset.



Kuva 60. Tuotteen kustannusrakenne.



3.4.2 Tuotteen osakohtaisen kokoonpanoajan pienentäminen

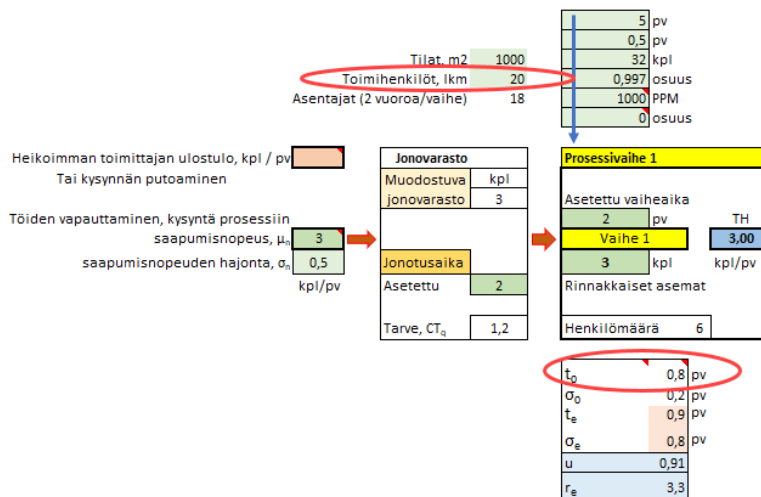
Prosessia voi parantaa myös lyhentämällä tuotteen aiheuttamaa prosessointiaikaa prosessivaiheessa, jota on käsitelty tarkemmin luvussa 2.7. Tämä on simuloitu mitoitukslaskennassa asettamalla yhden osan asennusajaksi 30 minuutin sijaan 24 minuuttia. Tällöin tuotteen aiheuttama prosessointiaika (t_0) lyhenee vaikka asennettavien osien määrä pysyy samana. Tuotteen aiheuttaman ajan lyhentyessä myös toteutunut prosessointiaika (t_e) lyhenee ja sen keskihajonta (σ_e) pienenee, vaikka prosessihäiriöiden taso pysyy samana.

Tuotteen aiheuttaman prosessointiajan lyhentymisen ansiosta, prosessiin kohdistuvaa kysyntää voidaan kasvattaa 3 kappaleeseen. Prosessointiajan ja sen keskihajonnan pienentyminen vähentää myös varmistusajan tarvetta, jolloin keskeneräisen työn määrä prosessissa vähenee. Kun kysyntää prosessiin kasvatettiin, niin komponenttivaraston määrä kasvaa, verrattuna edellisen luvun nimikkeiden määrää vähennys esimerkkiin. Ulostulon

kasvaminen ja lisääntynyt myynti kantaa kuitenkin enemmän varastoa ja yleiskustannuksia, jonka simuloimiseksi laskennassa on nostettu toimihenkilömäärä 12 henkilöstä 20 henkilöön. Voitto on tällöin 24 prosenttia, joka on lähelle sama kuin luvussa 3.2.8. käsitelty mitoituskannan 25 prosentin voitto alkuperäisellä tuotteen aiheuttamalla ajalla ja henkilömäärällä.

Prosessiin investoinnin ja sen ulosmittaamisen järjestys en edellisen luvun esimerkin mukainen. Ensin on investoitava ja vasta prosessin parantumisen jälkeen, voidaan kysyntää prosessiin kasvattaa.

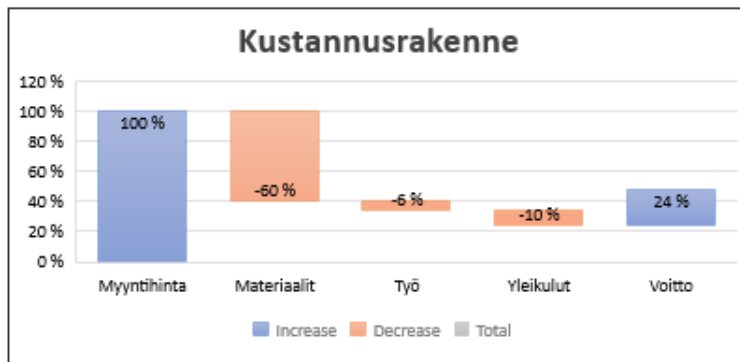
Kuva 61. Osan asennusajan pienentäminen ja toimihenkilömäärän kasvattaminen.



Kuva 62. Komponenttivaraston arvo, keskeneräinen työn arvo ja yleiskustannukset.



Kuva 63. Tuotteen kustannusrakenne.

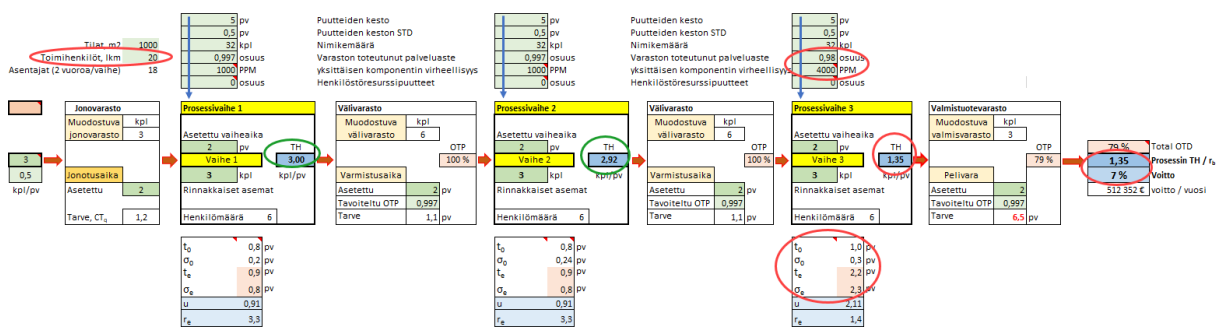


3.4.3 Parantamisen kohdentamisen merkitys

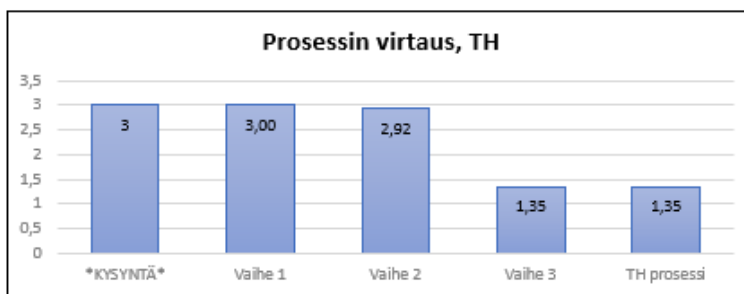
Tarkastellaan edellisen luvun laskentaesimerkkiä hyödyntäen tilanne, jossa investoidaan henkilömäärään ja osaamiseen parantamisen mahdollistamiseksi sekä esimerkiksi komponenttivarastoon osapuutteiden vähentämiseksi. Toimenpiteet eivät kuitenkaan onnistu viimeisellä prosessivaiheella tai sinne ei ole kohdistettu toimenpiteitä. Viimeisellä prosessivaiheella tuotteen aiheuttama nimikekohtainen asennusaika on korkeampi ja häiriöiden määrä on suurempi. Viimeisen prosessivaiheen ulostulo jää 1,35 kappaleeseen. Samoin voitto on vain 7 % tavoitellun 24 % sijaan, koska pullonkaulavaihe (r_b) on hitain ja määrittää koko prosessin ulostulon ja liikevaihdon. Samasta pullonkaulan tunnistamisesta on kysymys kapeikkoajattelussa, joka tunnetaan myös nimellä TOC-teorian. (Goldratt, 2014, s.362)

Edellisessä luvussa mainituista syistä parannustoiminnan kohdistaminen oikein on keskeistä. Prosessi on oltava tarkoituksenmukaisesti mittauksessa, jotta prosessin virtausta rajoittavat, niin sanotut pullonkaulavaiheet voidaan tunnistaa. Väärin kohdennettu parantaminen nostaa kokonaiskustannuksia, kun investointia ei saada realisoitua prosessin ulostuloon. Hitaimman prosessivaiheen vauhti määrittää liikevaihdon.

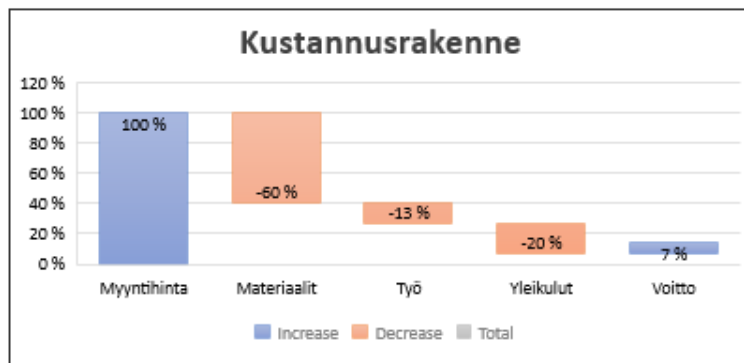
Kuva 64. Prosessin hitain vaihe määrää prosessin ulostulon.



Kuva 65. Kysyntä, prosessivaiheiden ulostulot ja koko prosessin ulostulo.



Kuva 66. Tuotteen kustannusrakenne.



3.5 Prosessin mitoituskalken yhteenvedo

Prosessin ulostulojen kannalta mitoitus on mahdollista tehdä vaihtoehtoisia parametreja muuttamalla. Toiminnan tavoitteista ja tuotteiden valmistusmäärästä riippuu, millä vaihtelu kannattaa prosessissa hallita. Suurempi määrä tuotteita kantaa usein isomman investoinnin prosessiin ja vaihtelun pienentämiseen, kuin projektiluontoinen valmistaminen. Mikäli

prosessiin pääsee sisääntuloparametrien mukana liikaa vaihtelua, niin lisäämällä aikaa prosessivaiheiden väliin, voidaan toimitusvarmuus pitää tavoitellulla tasolla. Tällöin kuitenkin jaksonaika kasvaa. Prosessin ulostulevaa kappalemäärää voidaan kasvattaa lisäämällä rinnakkaisia tekopaikkoja. Samalla kasvaa kuitenkin keskeneräisen työn määrä ja sen arvo prosessissa. Sisääntuloparametreista esimerkiksi varaston toteutunutta palveluastetta ja laatua parantamalla voidaan prosessiin pääsevää vaihtelua vähentää, jolloin ulostulo kasvaa. Prosessin sisääntulojen aiheuttaman vaihtelun pienentämisellä saadaan prosessista suurempi voitto ja saavutetaan lyhyempi jaksonaika, kuin tekopaikkoja lisäämällä.

Prosessin kyvykkyys tavoitteisiin nähden on riippuvainen prosessin sisääntuloista. Tästä syystä sisääntulojen taso on mitattava ja ohjattava, jonka onnistumiselle saadaan takaisinkytkentä prosessointiajasta. Mikäli toiminnan taso jää tavoitteesta, niin rajoite on tunnistettava ja parannustoiminta on kohdistettava sinne. Mikäli mitoittamisella ja parantamisella ei päästä tavoitteeseen, voidaan tuote ja prosessi suunnitella uudelleen prosessointiajan lyhentämiseksi.

3.5.1 Laskentamallin luotettavuus

Laskennan laatu on riippuvainen prosessidatan laadusta. Monia laskennassa tarvittavia tunnuslukuja ei välttämättä prosessista mitata, tai kerätty data ei vastaa todellista toimintaa. Näytteestä puuttuu esimerkiksi datapisteitä tai ne ovat virheellisiä. Prosessin mittaaminen on kuitenkin edellytys prosessin mitoittamiselle ja onnistuneelle ohjaamiselle. Vaihtelun määrä prosessissa, sekä sen merkittävä vaikutus liiketoiminnan tulokseen, on vaikea hahmottaa ilman luotettavaa mittausta.

Laskentamallin yleisen estomallin mukainen jonolaskenta on likiarvo, vaikkakin se antaa hyvin lähelle oikean tuloksen. Prosessin mitoittamisessa on kuitenkin paljon suurempia epävarmuustekijöitä datan laadun ja inhimillisten tekijöiden johdosta, jotka aiheuttavat suuremman epätarkkuuden kuin itse laskenta. Laskenta on suunnittelutyökalu, jolla eri prosessimuuttujien välisiä keskinäisvaikutuksia on mahdollista simuloida. Prosessin todellinen ulostulo on mitoituslaskennalla saatua pienempi, koska esimerkiksi ihmisten

tekemät inhimilliset virheet, eri tasoiset osaamiset tai muut laskennassa huomioimattomat prosessin häiriöt kasvattavat prosessointiaikaa ja heikentävät ulostuloa.

Työssä käytetty kustannuslaskenta on yksinkertaistettu, joka ei vastaa täysin liiketoiminnassa käytettävää kustannuslaskentaa. Yksinkertaistettu kustannuslaskenta mahdollistaa kuitenkin eri prosessiparametrien muutosten keskinäisvaikutuksen havainnollistamisen muodostuvaan kustannukseen ja voittoon.

4 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän työn mitoitukselaskennassa on osoitettu komponenttivaraston, osapuutteiden, komponenttilaadun ja resurssimitoituksen sekä prosessivaiheiden ketjutuksen vaikutus aikavaihteluun ja prosessin ulostuloihin. Prosessin ulostuloja tai aikaa ei voi suoraan ohjata, vaan tavoiteltu ulostulo ohjataan mitoittamalla prosessi ja prosessin suoriutumiseen vaikuttavat sisääntuloparametrit tukemaan kokonaistavoitetta. Vaihtelu prosessissa aiheuttaa merkittävän kustannuksen. Kun vaihtelua vähennetään, niin prosessointiaika lyhenee ja prosessin ulostulo kasvaa. Pienempi määrä vaihtelua edellyttää myös pienemmän määrän vaihtelun kompensoimiseksi tarvittavia puskureita, jolloin myös kustannukset pienenevät. Vaihtelun väheneminen mahdollistaa myös lyhyemmän jaksonajan, jolloin voidaan myydä lyhyemmällä toimitusajalla. Heikoimman ulostulon prosessivaihe määrittää koko prosessin ulostulon ja liikevaihdon, joten virtausta rajoittavat prosessivaiheet on tunnistettava ja parannustoimenpiteet on kohdistettava sinne.

Tuotteen ja prosessin sekä näiden kustannuksen suunnittelu on vaikeaa, joka vaatii valmistusteknologioiden ja prosessin käyttäytymisen lainalaisuuksien tuntemisen. Prosessin ohjaaminen edellyttää tilastollisten menetelmien haalintaa, jotta poikkeamiin puuttuminen kohdentuu prosessin kannalta merkitseviin poikkeamiin. Näin voi pienentää vaihtelua ja sen aiheuttamaa kustannusta. Parantaminen edellyttää oikeiden menetelmien hallintaa ja niiden kohdentamista oikein, jotta vaikutus prosessin ulostuloon saadaan aikaiseksi. Tuotteiden valmistaminen kannattavasti, oikea-aikaisesti ja oikean laatuksena on monimutkaista ja vaatii organisaatiolta osaamista. Organisaation osaamisen taso määrittelee prosessin vaihtelun määrän ja muodostuvan kustannuksen. (Karjalainen, 2020, s.180) Osaamisen ja oikeiden

menetelmien hallinta korostuu, kun aikasiirtymä päätöksestä sen realisoitumiseen kasvaa. Esimerkiksi uuden tuotteen suunnittelu aikana tehdyt ratkaisut määrittelevät pääosin valmistuskustannuksen, jonka onnistuminen voidaan todentaa huomattavan paljon myöhemmin prosessin jälkilaskennasta. Ilman oikeita menetelmiä ja osaamista on vaikea muodostaa käsitystä eri muuttujien välisistä keskinäisvaikutuksista, sekä mikä on tehtyjen ratkaisuiden vaikutus kokonaiskustannukseen. Prosessista vastaavien johtajien tärkein tehtävä onkin pitkällä aikavälillä organisaation osaamisen kehittäminen. (Laamanen, 2005, s.311)

4.1 Pohdinta

Prosessin mitoitus, ohjaus ja parantaminen tapahtuvat prosessin virtauksen suuntaisesti, yli perinteisten organisaatorajojen. Siksi nämä on organisoitava ja resursoitava virtauksen suuntaisesti, sekä käytettävä soveltuvia menetelmiä kokonaisuuden hallitsemiseksi. Prosessi mitoitetaan tulevan suorituskyvyn mahdollistamiseksi strategisia tavoitteita vasten. Ohjaus tapahtuu pääosin operatiivisella tasolla, osana päivittäistä tekemistä ja johtamista. Parannuskohteet määritellään koko toimitusketjua tarkastellen ja parannustoiminta kohdennetaan, joko nykyisen suorituskyvyn parantamiseksi tai uuden tavoitetilan saavuttamiseksi. Organisaation resursointi ja rakenne ovat riippuvaisia organisaation koosta sekä prosessin monimutkaisuudesta ja prosessilaatutavoitteesta, mutta ajattelu ja ihmisten välinen vuorovaikutus on joka tapauksessa organisoitava ja resursoitava.

Tämän työn mitoitusesimerkissä on käsitelty kokoonpanoprosessia, jossa ihmiset asentavat komponentteja ja syntyy valmis tuote. Sama fysiikka on kuitenkin taustalla niin tietotyössä, palveluntuotannossa kuin marketin kassajonossa. Tässä työssä esitetyt mitoituksen lainalaisuudet pätevät siis muihinkin prosesseihin, vaikka mitattavat parametrit voivat vaihdella soveltamiskohteesta riippuen. Todellisessa prosessissa mitoitus on kuitenkin tämän työn laskentaa vaikeampaa, koska muuttujia on enemmän. Koneita sisältävän prosessin mitoituksessa on huomioitava esimerkiksi vaihto aika- ja eräkokolaskenta. Osaamisella, motivaatiolla ja prosessin ohjaustavalla on myös merkittävä vaikutus onnistumiseen, joita ei tämän työn mitoituskalkulaatio huomioi.

Mitoituslaskennassa käytettävät parametrit voidaan pääosin prosessista mitata, mutta tuotteen aiheuttama prosessointiaika (t_0) on määritettävä, esimerkiksi menetelmäsuunnittelun ja työntutkimuksen osaamista hyödyntäen. Tuotteen aiheuttama prosessointiaika (t_0) on mitoituksen ja kustannuksen suunnittelun kannalta keskeinen ja sen määrittely vaatii osaamisen työn suorittamisesta. Tämä aika muodostuu osien määrän, niiden koon, asennustavan ja esimerkiksi asennuksen monimutkaisuuden perusteella. Tämän ajan määrittämisen osaaminen on keskeistä tuotteen suunnittelussa ja prosessin mitoittamisessa, koska sillä on merkittävä vaikutus tuotteen ja prosessin kustannuksen muodostumiseen. Tuotteen aiheuttamasta ajasta muodostuu prosessin häiriöiden vaikutuksesta prosessointiaika (t_e), joka vaikuttaa prosessin vaihtelunhallintapuskureiden tarpeeseen ja edelleen kustannukseen. Mikäli tuotteen aiheuttamaa aikaa ei tiedetä, niin toteutuneesta prosessointiajasta ja sen vaihtelusta on vaikea tulkita, mikä osuus tästä on tuotteen ja mikä prosessin aiheuttamaa. Prosessin mitoittamista ja tuotteen kustannuksen suunnittelua on tällöin vaikeampi tehdä.

Todellisessa prosessissa muutokset eivät myöskään tapahdu hetkessä, kuten simulointiesimerkin taulukkoon lukuja muuttaessa. Eri tyyppiset muutokset kestävät eri määrän aikaa, ennen kuin muutos realisoituu prosessin sisääntuloihin ja edelleen ulostuloihin. Esimerkiksi keskeneräisen työn lisääminen on mahdollisesti nopeampi toimenpide kuin komponenttilaadun parantaminen. Osaamisen kasvattamisessa ja prosessin parantamisessa on kyse ennemminkin vuosista kuin kuukausista. On siis arvioitava muutostarpeen tavoiteaikajänne suhteessa mahdollisten muutosten suoritusajajänteeseen, jotta muutos on mahdollista tehdä tavoiteaikataulussa. Esimerkiksi lyhyen aikavälin kysynnän nousu on todennäköisesti realistisinta tehdä komponenttivaraston ja keskeneräisen työn määrää nostamalla, kun taas prosessin parantaminen osaamista kehittämällä on pitkän aikajänteen toimenpide.

Yritysten vuosittaiset tulostavoitteet ohjaavat tekemään toimenpiteitä vuoden tarkasteluaikajänteellä, jolloin tilikauden tulosta mahdollisesti parannetaan kustannuksia alentamalla. Mikäli tämä tehdään vähentämällä esimerkiksi resurssi- tai komponenttivarastokuluja alle vaihtelun kompensoimiseen vaadittavan tason, niin prosessin vaihtelu kasvaa. Vaihtelun kasvaminen edellyttää suurempia puskureita, jotta

ulostulotavoite on mahdollista toteuttaa. Puskureiden kasvatus lisää prosessin kustannuksia, jolloin prosessi on entistä herkempi suhdannevaihteluille. Syntyy kierre, jossa lyhyen aikavälin säätötoimenpiteet heikentävät pitkän aikavälin prosessin parantamisen ja tuottavuuden kehittämisen edellytyksiä. Organisaation tuottavuus ja prosessilaatu laskee, jolloin pidemmän tarkasteluajankänteen omaavat organisaatiot menevät kilpailukyvyssä ohi.

Pitkän aikavälin tavoitteesta on hyvä esimerkki Toyotan toimenpiteet Yhdysvaltojen autotehtaalla finanssikriisin aikaan 2008. Kysynnän pysähtyessä korkea valmistuotevarasto aiheutti tehtaan sulkemisen useiksi kuukausiksi. Toyota näki tässä tilanteessa kuitenkin mahdollisuuden kasvattaa henkilöstön osaamista. Koko henkilöstö kävi tuotannon pysäytyksestä huolimatta normaalisti töissä, jolloin aika käytettiin koulutuksiin ja henkilöstön osaamisen kasvattamiseen. Kyseinen Toyotan tehdas selvisi taantumasta kilpailijoita nopeammin ja laatu sekä tuottavuus nousivat taantumaa edeltävästä tasosta. (Liker J., 2012, xi)

Edellisessä kappaleessa kuvattu Toyotan ajattelumalli ja reagoimistapa suhdannevaihteluihin on keskeinen tekijä, miksi Japanin autoteollisuus on kyennyt vuosikymmeniä kasvattamaan tasaisesti myyntiä ja valmistusmääriä suhdannevaihteluista huolimatta. Lyhyen aikavälin suhdannevaihteluihin reagoimisella on dramaattisia vaikutuksia prosessin kyvykkyyteen pidemmällä aikavälillä, mikäli sopeuttaminen kohdistuu yrityksen arvokkaimpaan pääomaan - ihmisiin. (Womack, 2007, s.255)

Monessa yrityksessä ei kuitenkaan ole realistista siirtyä suoraan Toyotan esimerkin mukaiseen pitkän aikavälin suorituskyvyn ohjaamiseen, koska se vaatii sitoutumisen huomattavan pitkään tarkasteluajankänteseen sekä vahvat kassavarat. Prosessin ohjaamisen lainalaisuudet sekä osaamisen merkitys, eivät kuitenkaan niin paljon muutu kontekstista riippuen, joten näiden ymmärtäminen auttaa tekemään kussakin tilanteessa oikeita päätöksiä. Prosessin käyttäytymisen ymmärtäminen auttaa asettamaan lyhyen aikavälin tavoitteet niin, että myös pitkän aikavälin tavoitteet on mahdollista toteuttaa.

Prosessin ohjaamisen ja parantamisen vaatima pitkä aikajänne sekä vuosittaisten tulostavoitteiden lyhyempi tarkasteluaikajänne on se ristiriita, joka yrityksissä täytyy ratkaista, ennen kuin pidemmän aikavälin tuottavuuden kehittäminen on mahdollista.

Prosessin ohjaamiseksi vaaditaan fysiikan ymmärryksen lisäksi muutakin osaamista. Työssä esitetyt fysiikan lainalaisuudet on kuitenkin hyvä hallita, jotta esimerkiksi hyvän johtamisen, ihmisten motivaation ja osaamisen kehittämisen hyödyt kyetään realisoimaan liiketoiminnan tulokseksi.

4.2 Jatkotutkimuskohteet

Hankintapäätösten tueksi on mitoituseläskennasta saatavissa useita parametreja, joiden välillä valintaa kannattaa tehdä. Komponentin hinta, toimitusaika ja toimitusajan hajonta vaikuttavat varaston määrään ja siihen sitoutuneeseen rahamäärään. Toimitusaika ja sen hajonta vaikuttavat myös prosessointiaikaan ja sen hajontaan, silloin kun varaston liian alhainen täyttöaste realisoituu komponenttipuutteeksi. Komponenttien laatu vaikuttaa prosessointiaikaan ja sen vaihteluun, sekä näiden kompensoimiseksi tarvittavien puskureiden tasoon. Paljonko kannattaisiko maksaa nimikkeestä korkeampaa hintaa, jotta toimitusaika olisi lyhyempi ja tarvittava komponenttivarasto olisi pienempi sekä realisoituneiden puutteiden aiheuttama häiriöaika lyhyempi? Paljonko voisi maksaa komponentista enemmän, jotta komponenttien laatu olisi korkeampi ja prosessin vaihtelu vähäisempää? Tämänhetkissä toimitusketjujen globaalissa häiriötilanteessa, myös logistiikkakulut ja toimittajien aiheuttama riski liiketoiminnalle on hyvä huomioida kokonaiskustannusta määriteltäessä. Esimerkiksi näiden tekijöiden vaikutus prosessiin ja kokonaiskustannuksen muodostumiseen on hyvä ymmärtää.

Tuotteen nimikemäärä ja tuotteen monimutkaisuus muodostavat merkittävän osan muodostuvasta kustannuksesta, josta syystä tuotteen suunnittelun aikana päätetään merkittävä osa kustannuksista. Tuotteen prosessointiaika (t_0) määritellään tuotteen suunnittelun aikana ja siitä muodostuu prosessin häiriöiden vaikutuksesta prosessointiaika (t_e). Prosessin suunnittelusta ja sen kustannuksesta muodostuu näin takaisinkytkentä tuotteen suunnitteluun, josta syystä prosessin suunnittelu tulisi tehdä tuotteen suunnittelun

kanssa samanaikaisesti. Tämän takaisinkytkennän toteuttamisen tueksi on menetelmiä, kuten esimerkiksi Desing for Six Sigma (DFSS) ja Desing for Manufacturing (DFA), joita hyödyntämällä kokonaiskustannuksen suunnittelun onnistumistodennäköisyys kasvaa. Näin tuote on mahdollista suunnitella prosessille asetettujen vaatimusten mukaisesti, samalla kun tuoteominaisuudet suunnitellaan. Tai vaihtoehtoisesti prosessi suunnitellaan uudelleen tuotteen suunnittelun kanssa samanaikaisesti, mikäli uusi tuote ja asetetut vaatimukset tätä edellyttävät. Tästä syystä esimerkiksi menetelmäsuunnittelun ja laatuteknologian sekä prosessin mitoituksen osaaminen tuotteen suunnittelun aikana on keskeistä, jotta valmistuskustannus on mahdollista suunnitella tavoitteen mukaisesti.

4.3 Johtopäätökset

Valmistettava tuote, sen monimutkaisuus sekä asennettavien komponenttien määrä ja kustannus muodostavat tuotteen ja prosessin kustannuksen perustason. Valmistusprosessiin pääsevän vaihtelun määrä sekä vaihtelun kompensoivien puskureiden taso, vaikuttavat prosessin ulostuloon ja muodostuvaan kustannukseen.

Mitoittamalla prosessin sisääntulot ulostulotavoitteita vasten ja ohjaamalla näitä, voidaan haluttu prosessin ulostulo ja kustannus ohjata. Tuotteen ja prosessin suunnittelu onkin tehtävä samanaikaisesti liiketoiminnan tavoitteiden mukaisesti, hyödyntämällä koko organisaation ja toimittajaverkoston osaamista. On käyttävä soveltuvia menetelmiä ja tunnettava valmistusteknologiat sekä prosessin käyttäytymisen lainalaisuudet, jotta muodostuva kustannus on suunniteltu ja valmistusmäärä on mahdollista toteuttaa kilpailukykyisesti.

Prosessin parantamiseksi on tunnettava koko prosessin kyvykkyys suhteessa tavoitteeseen, jotta parannustoiminta voidaan kohdentaa heikoimpaan prosessivaiheeseen ja saada aikaiseksi toivottu vaikutus ulostuloon. Prosessia ja sen ulostuloa voidaan myös parantaa suunnittelemalla tuote ja prosessi uudelleen.

Organisaation osaaminen on keskeistä tavoitteiden saavuttamisen kannalta, koska ihmisten toiminta ja tehdyt päätökset vaikuttavat prosessin vaihteluun. Vaihtelun määrä prosessissa

vaikuttaa toteutuneeseen tuotteen ja prosessin kustannukseen sekä tuotantomäärään. Organisaation osaaminen määrittelee siis kannattavuuden ja strategisten tavoitteiden toteutumisen. Ihmisten osaamisen karttuminen kestää tilikauden ja suhdannevaihteluiden aikaväliä huomattavasti pidempään, joten osaaminen on johdettava näitä pidemmällä aikavälillä. Kasvattamalla organisaation osaamista pitkäjänteisesti, ohjataan tällä myös prosessin ja liiketoiminnan pitkän aikavälin kannattavuuden kehitys.

Lähteet

Goldratt, E. (2014). *Tavoite*. Kolmas painos. Kukonaskel Oy. (Alkuperäinen teos julkaistu 2004)

Hopp, W. & Spearman, M. (2011). *Factory Physics*. Third Edition. Waveland Press, Inc.

Karjalainen, E. & Karjalainen, T. (2020). *Lean Six Sigma 2.0 ja laatuteknologia*. Quality knowhow Karjalainen Oy.

Karjalainen, T. & Karjalainen E. (2000). *Laatujohtamisoppien (TQM) soveltaminen PK-yritykseen -SPC, systeemiteoria, TOC-teoria*. 2. painos. Quality knowhow Karjalainen Oy.

Laamanen, K. (2005). *Johda suorituskykyä tiedon avulla*. Suomen laatukeskus Oy

Liker, J. & Convis, G. (2012). *Toyotan tapa lean johtamiseen*. (Niemi M. Käänt.) Readme.fi. (Alkuperäinen teos julkaistu 2012)

Montgomery, D. (2013). *Introduction to Statistical Quality Control*. Seventh edition. John Willy & Sons. Inc.

Piirainen, A. (2014). *Vaihtelu*. 1. Painos. Quality Knowhow Karjalainen Oy.

Pound, E. & Bell, J & Spearman, M. (2014). *Factory Physics for Managers*. McGraw-Hill Education.

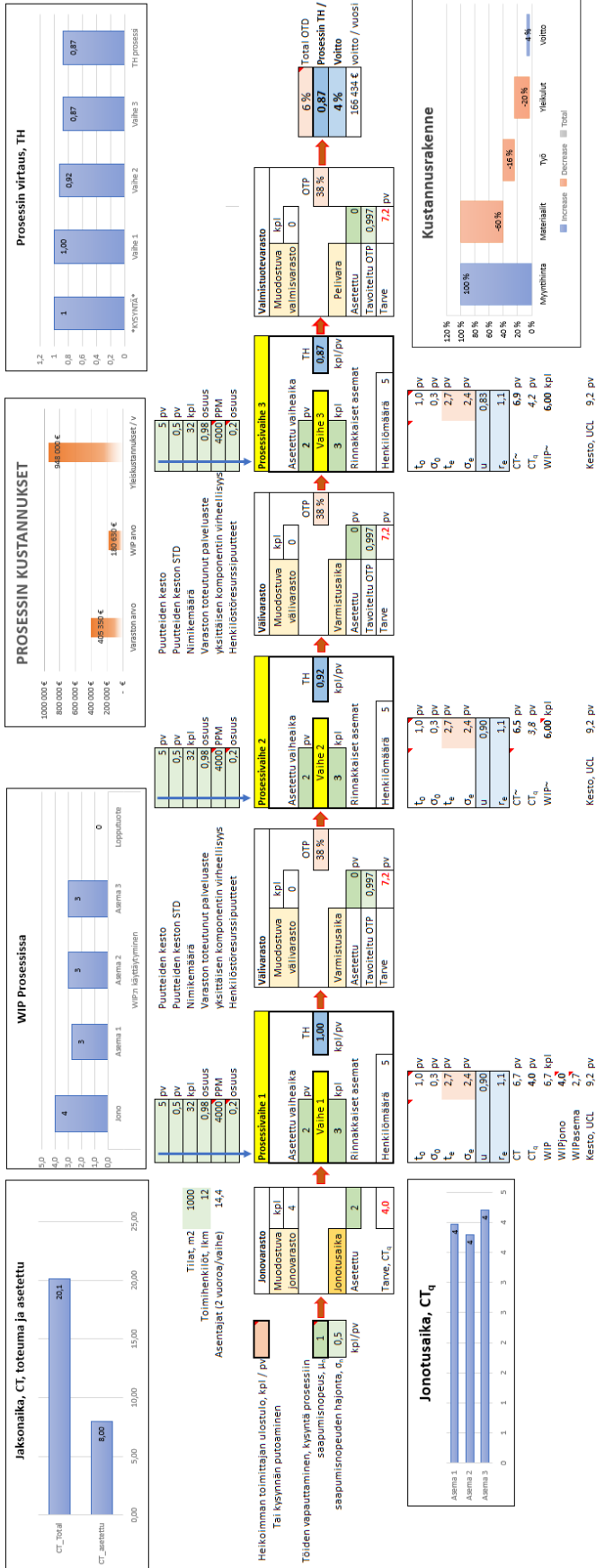
Shingo, S. (2005). *A Study of the Toyota Production System from Industrial Engineering Viewpoint*. (Dillon A. Käänt.). CRC Press. (Alkuperäinen teos julkaistu 1989)

Tomperi, S. (2021). *Taloushallinto, Toiminnan kannattavuus*. 14. Painos. EDITA.

Wheeler, D. & Chambers, D. (2010). *Understanding Statistical Process Control*. Third Edition. SPC Press.

Womack, J. & Jones, D. & Roos, D. (2007). *The Machine That Change The World*. First edition. Free Press of Simon & Schoster, Inc.

Liite 1: Mitoituslaskenta



Liite 2: Prosessivaiheiden laskenta

		Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3
Tuotteen aiheuttama lattia-aika	Asetettu vaiheika	2 pv	2 pv	2 pv
	t0 (lattia-aika)	1 pv	1 pv	1 pv
Luonnollinen vaihtelu	s0	0,3 pv	0,300 pv	0,30 pv
	Nimikemäärä	32 kpl	32 kpl	32 kpl
	m, (rinnakkaiset asemat)	3 kpl	3 kpl	3 kpl
Puutteet	Puutteiden kesto	5 pv	5 pv	5 pv
	Puutteiden keston STD	0,5 pv	0,5 pv	0,5 pv
	Varaston palveluaste	0,98 osuus	0,98 osuus	0,98 osuus
	Omistumistodennäköisyys	0,52 osuus	0,52 osuus	0,52 osuus
	te_puutteet	1,9 pv	1,9 pv	1,9 pv
	se_puutteet	2,2 pv	2,2 pv	2,2 pv
Laatu	yksittäisen komponentin v	0,004 osuus	0,004 osuus	0,004 osuus
	epäonnistumistodennäköi	0,120 osuus	0,12 osuus	0,12 osuus
	te_laatu	1,14 pv	1,14 pv	1,14 pv
	se_laatu	0,51 pv	0,51 pv	0,51 pv
Henkilöresursointipuutteet	Miehityspuutteet	0,20 osuus	0,20 osuus	0,20 osuus
	te_respuute	1,25 pv	1,25 pv	1,25 pv
	se_respuute	0,65 pv	0,65 pv	0,65 pv
Tehollinen aika, efektiivinen lattia-aika	te_tuote	2,7	2,7	2,7
	re_m_huomioitu	0,9 pv	0,9 pv	0,9 pv
	se (prosessiajan vaihtelu)	2,37 pv	2,37 pv	2,37 pv
Nopeus ilman häiriöitä	r0	3,00 kpl/pv	3,00 kpl/pv	3,00 kpl/pv
Häiriöiden aiheuttama menetys	Erotus re-r0	-1,89 kpl/pv	-1,89 kpl/pv	-1,89 kpl/pv
Viirtauksen vaihtelu	ra (saapumisnopeus)	1 kpl/pv	1,11 kpl/pv	1,11 kpl/pv
Saapuva	ta (saapumisväli)	1,0 pv	0,90 pv	0,90 pv
Lähtevä	sa (saapumisvälin stdv)	-	Siirtofunktio	Siirtofunktio
	re (tehollinen ulostulonop	1,11 kpl/pv	1,11 kpl/pv	1,11 kpl/pv
vaihtelu	Virtauksen vaiht	Ce2 (SCV saapuva)	0,3	0,75
	Prosessiajan vai	Ce2 (SCV lähtevä)	0,76	0,76
		Käytösuhde, u	0,90	1,00
Jonolaskenta	Cd2 (siirtofunktio)	0,75	0,84	6
	b, jono_asetissa ja välissä		6	
Jono, G/G/m	CTq (G/G/m)	3,97		
Wienin estomalli	WIPnb (ilman blokkia)		7,35	4,18
-rinnakkaiset aseman ja block	p		0,88	0,80
	TH (u<1)		0,92	0,87
	WIP-		6,00	6,00
	CT-		6,5	6,9
	WIPnb (ilman blokkia)		-7,62	-4,58
	pr		0,85	0,71
	TH (u>1)		0,94	0,89
	WIP-		6,00	6,00
	CT-		6,4	6,7
	TH (u=1)		0,98	0,97
	WIP-		6,00	6,00
	CT-		6,14	6,17
	käytösuhteen mukainen		0,92	0,87
			6,00	6,00
			6,51	6,92
Kysynnällä rajoitettu ulostulo, TH	TH, vaihe	1,00	0,92	0,87

Liite 3: Kustannuslaskenta

		Nimikemäärä	Hinta/nimike	toimitusaika	t.aika hajonta	kysyntä	k.hajonta	palveluaste	Turvavarasto	Eräkoko	Keskivarasto	Varaston arvo / nimike	koko varastonarvo	Vaiheen materiaalikustannus	
Varasto	Vaihe 1	32	200	160	5		1	0,5	0,98	17	20	27	5312	169970	6400
	Vaihe 2	32	170	160	5		1	0,5	0,98	17	21	27	4600	147195	5440
	Vaihe 3	32	100	160	5		1	0,5	0,98	17	22	28	2756	88185	3200
													12667	405350	15040
		rinnakkaiset a	Resurssitunnit / pv	Tuntihinta	Kustannus,€	Miehityspuutteiden vaikutus	Toteutunut kustannus	Henkilömäärä							
Asennusresurssitunnit	Vaihe 1	3,0	48,0	30,0	1440,0	0,80	1152	4,8							
	Vaihe 2	3,0	48,0	30,0	1440,0	0,80	1152	4,8							
	Vaihe 3	3,0	48,0	30,0	1440,0	0,80	1152	4,8							
			144,0		4320,0		3456	14							
		WIP	Materiaalit	Työkustannus	WIP kustannus										
WIP kustannus	Vaihe 1	7,39	47288	8512	55800										
	bufferi 1 + vaihe 2	6,00	38400	6912	45312										
	Bufferi 2 + vaihe 3	3,0	35520	6912	42432										
	Valmistuote	0,0	0	0	0										
		16,4	121208	22336	143544										
Vlaiskulut		Henkilömäärä	vuosikustannus												
	Ihmiset	12	768000												
	Tilat	1000	180000												
			948000												
	Per tuote	5138													

Tuotemäärä	Paivä	Vuosi
TH:n mukaan	0,86	185
Kysynnällä rajoitettu TH	0,86	185
Kustannuskenta		
Myyntihinta	25000	
-Muuttuvat kustannukset		
Materiaalit	15040	60 %
Työ	4026,9	16 %
-Kiinteät kustannukset		
Yleikulut	5138	21 %
Tuotekustannus	24205	
Voitto	795	3 %
Myynti / vuosi	4 612 994 €	
voitto / vuosi	146 777 €	
Varastoon sitoutunut pääoma		10 %
WIP	143544	14354
Komponenttivarasto	405350	40535
	548 894 €	54889
Koneet ja laitteet	2 000 000 €	
Sitoitunut pääoma	2 548 894 €	
Pääoman kierto	1,8	
Oman pääoman tuotto %	6 %	