

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

LUT School of Engineering Science

Kemiantekniikka

Nea Katajala

**TILASTOLLISEN PROSESSINOHJAUKSEN  
HYÖDYNTÄMINEN TAIVEKARTONGIN LAADUN  
PARANTAMISESSA**

Työn tarkastajat ja ohjaajat:

Professori Tuomas Koiranen

DI Anni Käppi-Palomaa (Stora Enso)

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT  
LUT School of Engineering Science  
Kemiantekniikka

Nea Katajala

### **Tilastollisen prosessinohjauksen hyödyntäminen taivekartongin laadun parantamisessa**

Diplomityö

2023

125 sivua, 43 kuvaa, 25 taulukkoa, 1 liite

Työn tarkastajat:                   Professori Tuomas Koironen  
  DI Anni Käppi-Palomaa

Hakusanat: taivekartonki, SPC, tilastollinen prosessinohjaus, laatu, laadun parantaminen, laadunhallinta, formaatio, monimuuttujakoe

Tämän diplomityön tavoitteena oli pyrkiä vakioimaan Stora Enson Inkeröisten kartonkitehtaan taivekartongin laatua käyttämällä uutta käyttöönottettavaa SPC-menetelmään eli tilastolliseen prosessinohjaukseen perustuvaa dataPARC -sovellusta. Sovelluksen avulla oli tarkoitus löytää laatuun, tarkemmin formaatioon, eniten vaikuttavia tekijöitä. Valittujen muuttujien avulla pyrittiin optimoimaan taivekartongin valmistusprosessia, jotta laatuvaihtelua saadaan vähennettyä.

Kirjallisuusosassa tarkasteltiin taivekartongin valmistusprosessia, taivekartongin haluttuja ominaisuuksia, laadun määritelmää, SPC-menetelmän periaatteita ja SPC-menetelmän hyödyntämistä Inkeröisten kartonkitehtaalla. Kokeellisessa osassa tutkittiin taivekartongin formaatioon vaikuttavia prosessimuuttujia, joista pyrittiin valitsemaan formaatioon eniten vaikuttavia tekijöitä SPC-menetelmällä käyttämällä dataPARC-sovellusta. Muuttujien valinnan jälkeen suoritettiin monimuuttujakokeita, joiden avulla todistettiin muuttujien vaikutusta taivekartongin formaatioon. Kokeellisessa osassa tarkasteltiin myös uuden menetelmän ja sovelluksen käyttöönottoa sekä käyttöönoton haasteita tehdasympäristössä.

Tulosten perusteella kartonkikoneen nopeudella on suuri merkitys kartongin formaatioon erityisesti raskaammilla neliömassoilla. Formaatioon esiintyy raskaammilla neliömassoilla vähemmän vaihtelua hitaammalla nopeudella ja laatu on kokonaisuudessaan parempaa. Kun tavoitteena oli maksimoida laatua, havaittiin, että koneen nopeus vaikutti merkittävästi myös muihin koneen prosessiparametrien, kuten runkoperälaatikon huulieron ja huuliaukon säätöihin. Toisin sanoen samat arvot tai arvojen muutokset lineaarisesti suhteessa koneen nopeuteen eivät tuottaneet parempaa laatua. Vaikka pienemmällä neliömassoilla nopeudella ei ollut niin suurta merkitystä, oli formaatio ja muut laatuominaisuudet silti hieman parempia hitaammalla nopeudella kuin kovalla nopeudella.

**ABSTRACT**

Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto LUT  
LUT School of Engineering Science  
Chemical and Process Engineering

Nea Katajala

**Improvement of quality of folding boxboard by using statistical process control**

Master's thesis

2023

125 pages, 43 figures, 25 tables, and 1 appendix

Examiners:                      Professori Tuomas Koironen  
   M.Sc. (Tech.) Anni Käppi-Palomaa

Keywords: folding boxboard, SPC, statistical process control, quality, improvement of quality, quality control, formation, multivariate tests

The goal of this Master's Thesis was to standardize quality of folding boxboard at Stora Enso Ingerois Oy by using new application called dataPARC which is based on SPC (statistical process control) method. By using the application, the goal was to find the parameters that have the greatest influence on the formation of folding boxboard. The selected parameters were used to optimize the manufacturing process of folding boxboard in order to reduce variations in quality.

In the literature part, the manufacturing process of folding boxboard, desired properties of folding boxboard the definition of quality, principles of SPC method and utilization of SPC method at Ingerois Oy were studied. In the experimental part, the process variables affecting to the formation of folding boxboard were studied, from which the parameters with the greatest influence on the formation were selected by using dataPARC application based on SPC method. After the selection of the process parameters, multivariate tests were performed to prove the effect of the selected variables on the formation of folding boxboard. In the experimental part, the implementation of new method and application and challenges of the implementation in industry environment were examined.

According to the results, the speed of the cardboard machine has a huge impact to the formation of the cardboard, especially to the higher grammages. There is less variation in the formation at slower speed and the overall quality of the cardboard is better when higher grammages are in production. If the target is to maximize the cardboard quality, speed has also a significant effect on other process parameters, such as the lip gap of the frame head-box. In other words, the same process values, or changes in values linearly in relation to the speed did not produce better quality. Although, the speed did not matter as much on lower grammages, still formation and other quality characteristics were slightly better at slower speed compared to higher speed.

## ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Stora Enso Oyj:n toimeksiannosta Inkeröisten Kartonkitehtaalla toukokuun 2022 ja tammikuun 2023 välisenä aikana. Inkeröisten Kartonkitehtaan puolelta työn ohjaajana ja tarkastajana toimi laatu- ja kehityspäällikkö Anni Käppi-Palomaa ja yliopiston puolelta professori Tuomas Koiranen. Haluan kiittää molempia hyvästä ohjaamisesta ja tärkeistä neuvoista sekä Stora Ensoa mahdollisuudesta tehdä diplomityöni Inkeröisten kartonkitehtaalla. Haluan myös kiittää Topias Luomaa, Minna Vuorimaata, Iida Vertasta sekä vuoroja 1 ja 3, jotka auttoivat koeajojen suunnittelussa ja niiden toteutuksessa.

Elokuun alussa diplomityön eteneminen hidastui, koska koeajoja ei vielä ollut mahdollista suorittaa. Kirjallisuusosa alkoi olla melko valmis ja edessä oli koeajojen aloittamisen odoteltua. Erityiskiitos Mika Puustiselle, Jorma Ahtolalle ja vuoropäälliköille sekä muille henkilöille, joiden ansiosta pääsin pariin kuukaudeksi lomittamaan vuoron 5 logistiikkamestaria juuri sopivalla hetkellä. Lomitus tuli erittäin hyvään saumaan ja sain pienen tauon diplomityön tekemisestä. Logistiikkamestarin tehtävät jatkuivat vielä joulukuulle asti vuorossa 3. Suuret kiitokset molemmille vuoroille. Aika kului kuin siivillä ja pääsin mukaan seuraamaan ja ratkomaan monenlaisia ongelmia. Saatu työkokemus oli arvokkaampaa kuin osasin kuvitella.

Lopuksi haluan kiittää erityisesti koko Inkeröisten Kartonkitehtaan jälkikäsitellyn henkilöstöä diplomityössä ja vuoromestarin tehtävissä auttamisesta sekä lounasseurasta. He myös pitivät huolen siitä, ettei työn teko muuttunut turhan vakavaksi ja joka päivä oli mukava tulla töihin. Loputtomat kiitokset myös Artulle, perheelleni ja ystäväilleni tsempeistä ja kuuntelemisesta, kun sitä tarvittiin. Diplomityö on vihdoin valmis ja opiskelut ovat ohi ainakin hetkeksi. Aika näyttää mitä tulevaisuus tuo tullessaan, mutta seuraavaksi on aika siirtyä Tehaanmäen toiselle puolelle ja oppia, miten paperia tehdään!

Kouvolassa 26.1.2023

*Nea*



## SISÄLLYSLUETTELO

<b>TIIVISTELMÄ</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>ALKUSANAT</b> .....	<b>3</b>
<b>SISÄLLYSLUETTELO</b> .....	<b>4</b>
<b>SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO</b> .....	<b>6</b>
<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>8</b>
<b>KIRJALLISUUSOSA</b> .....	<b>10</b>
<b>2 TAIVEKARTONKI</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1 Inkeröisten Kartonkitehdas</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2 Kartongin raaka-aineet ja valmistusprosessi</b> .....	<b>12</b>
2.2.1 Taivekartongin rakenne .....	13
2.2.2 Kartongin valmistusprosessi.....	15
<b>2.3 Kartongin ominaisuudet</b> .....	<b>18</b>
2.3.1 Kartongin ominaisuuksien vaihtelut.....	20
2.3.2 Inkeröisten kartonkilaadut .....	22
<b>3 LAATU</b> .....	<b>24</b>
<b>3.1 Laadun takaamisen haasteet</b> .....	<b>26</b>
<b>4 TILASTOLLINEN PROSESSINOHJAUS</b> .....	<b>29</b>
<b>4.1 Satunnais- ja erityisyysvaihtelu</b> .....	<b>30</b>
<b>4.2 Tilastollisen prosessinohjauksen laskenta</b> .....	<b>34</b>
4.2.1 Prosessin tunnusluvut .....	42
<b>4.3 Ohjauskortit</b> .....	<b>47</b>
4.3.1 Ohjauskorttien valinta ja laskenta .....	50
4.3.2 <i>X</i> - ja <i>R</i> -kortit.....	52
4.3.3 <i>X</i> - ja <i>s</i> -kortit.....	56
4.3.4 <i>x</i> / <i>MR</i> -kortti .....	58
<b>4.4 DataPARC</b> .....	<b>60</b>

<b>5 TILASTOLLISEN PROSESSINOHJAUKSEN HYÖDYNTÄMINEN</b>	
<b>INKEROISTEN TEHTAALLA .....</b>	<b>61</b>
<b>5.1 DataPARC:n käyttö .....</b>	<b>61</b>
5.1.1 Korrelaatiomatriisi ja muuttujien valinta.....	64
<b>KOEOSA .....</b>	<b>67</b>
<b>6 PROSESSIMUUTTUIJEN VALINTA.....</b>	<b>68</b>
<b>6.1 Muuttujien valinta DataPARCin avulla .....</b>	<b>68</b>
<b>6.2 Koeajosuunnitelma .....</b>	<b>75</b>
<b>7 TILASTOLLISEN PROSESSINOHJAUKSEN KÄYTTÖÖNOTTO.....</b>	<b>78</b>
7.1 Muutoksien ja uusien ohjelmien hyväksyminen henkilöstössä.....	79
<b>8 KOEAJOJEN TULOKSET JA ANALYSOINTI.....</b>	<b>80</b>
8.1 Koeajojen tulokset laadulla TB220 .....	80
8.2 Koeajojen tulokset laadulla TB270 .....	94
8.3 Prosessin optimoimiseen tähtäävien koeajojen tulokset laadulla TB270 .....	105
8.3.1 Optimit olosuhteet laadulle TB270.....	112
<b>9 YHTEENVETO .....</b>	<b>115</b>
<b>10 JOHTOPÄÄTÖKSET.....</b>	<b>119</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>121</b>
<b>LIITTEET .....</b>	<b>126</b>

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

CCV	satunnaisvaihtelu (common cause variation)
CL	ajostandardi (center line)
CTMP	puolikemiallinen massa
DMAIC	kehittämismenetelmä (Define, Measure, Analyze, Improve, Control)
DOE	koesuunnittelu, monimuuttujakoe (Design of experiments)
I-MR	yksilöllinen ja liikkuvan alueen kuvaaja (Individual and Moving Range)
LCL	alempi valvontaraja (Lower control limit)
LSL	alempi määrittäysraja (Lower specification limit)
SCV	erityisyysvaihtelu (special cause variation)
SPC	tilastollinen prosessinohjaus (statistical process control)
TAR	tavoitearvo
TOPS	ryhmäjohtoinen ongelmanratkaisu (team-oriented problem solving)
TB	Tambrite
TF	Tamfold
UCL	ylempi valvontaraja (upper control limit)
USL	ylempi määrittäysraja (upper specification limit)
x-MR	yksilöllinen ja liikkuvan alueen kuvaaja (Individual and Moving Range)
$A_2$	taulukosta (liite A) näyte-erän koon mukaan valittava kerroin
$A_3$	taulukosta (liite A) näyte-erän koon mukaan valittava kerroin
$B_3$	taulukosta (liite A) näyte-erän koon mukaan valittava kerroin
$B_4$	taulukosta (liite A) näyte-erän koon mukaan valittava kerroin
$c_4$	taulukosta (liite A) näyte-erän koon mukaan valittava kerroin
$d_2$	taulukosta (liite A) näyte-erän koon mukaan valittava kerroin
$D_3$	taulukosta (liite A) näyte-erän koon mukaan valittava kerroin
$D_4$	taulukosta (liite A) näyte-erän koon mukaan valittava kerroin

$E_2$	taulukosta (liite A) näyte-erän koon mukaan valittava kerroin
$C_p$	prosessin maksimisuorituskyky (Process capability index)
$C_{pk}$	prosessin suorituskyky (Process capability index)
$k$	epäkeskeisyyden korjauskerroin
$\mu$	perusjoukon keskiarvo
$MR$	liukuva vaihteluväli
$m$	näyte-erien tai yksittäisten näytteiden määrä
$N$	perusjoukon koko
$n$	mitattujen arvojen tai mittajoukkojen määrä
$P_p$	prosessin maksimitoimintakyky (Process performance index)
$P_{pk}$	prosessin toimintakyky (Process performance index)
$R$	mittausdatan pienen ja suuren arvon välinen arvoalue
$s$	näyte-erän keskihajonta
$s^2$	näyte-erän varianssi
$s_t$	kokonaiskeskihajonta
$\Sigma$	summa
$\sigma$	varianssi
$\sigma^2$	standardijakauma
$\sigma_x$	muuttujan x standardijakauma
$\sigma_y$	muuttujan y standardijakauma
$\hat{\sigma}_t$	prosessin hajonnan estimaatti
$T$	prosessin tavoitearvo
$\bar{x}$	näytteiden tai näyte-erän keskiarvo
$\bar{\bar{x}}$	joukkojen keskiarvojen keskiarvo
$x_i$	mitattu arvo $i$
$x_{max}$	datan maksimiarvo
$x_{min}$	datan minimiarvo

## 1 JOHDANTO

Stora Enso tuottaa erilaisia puupohjaisia tuotteita, kuten paperia, kartonkia, sellua ja sahatarvaa. Stora Enson liikevaihdosta suurin osa tuli Euroopasta (73 %). Inkeröisten Kartonkitehdas kuuluu Stora Enson Packaging Materials -divisioonaan, jonka kokonaisvuosituotanto oli 4,5 miljoonaa tonnia kartonkia vuonna 2020. Inkeröisten kartonkitehtaalla tuotetaan taivekartonkia (Tambrite ja Tamfold), jota käytetään muun muassa lääkepakkauksissa, suklaa- ja pikaruokapakkauksissa. Inkeröisten kartongit ovat tunnettuja tasalaatuisuudestaan, hyvästä painettavuudesta ja jälkikäsitteilyn helppoudesta. Tehtaassa pyritäänkin jatkuvaan laadun parantamiseen ja kehittämiseen. Tällöin laatuun vaikuttavat järjestelmät vaativat välillä päivitystä tai uusien laitteiden ja sovellusten käyttöönottoa. (Stora Enso, 2021a).

Laatu ja sen parantaminen on aina ollut olemassa, mutta tavat ja teoriat siihen liittyen alkoivat kehittyä vasta 1900-luvun alussa. Vuonna 1925 uusi Inspection Department luotiin Bell Telephone Laboratories -yrityksessä, jossa oli mukana monia modernin laadunvalvonnan ja -hallinnan edelläkävijöitä. Toinen maailmansota kiihdytti tilastollista prosessinohjauksajattelua (SPC) entisestään, koska teollisuus, erityisesti sotateollisuus, kasvoi ja tarvittiin toimivaa laadunhallintaa. (Qui, 2013). 1980- ja 1990-luvuilta lähtien SPC:tä on hyödynnetty Yhdysvalloissa useissa sellu- ja paperitehtaissa. Haasteina paperiteollisuudessa hyödyntäessä SPC-menetelmää on ollut tietämättömyys mitatun ominaisuuden vaikutuksesta tuotteen laatuun. Myös mittausvaihtelu on ollut suurta. Vaihtelu on saattanut olla lähes puolet kokonaisvaihtelusta. (Rantamäki, Tiainen ja Kässi, 2013).

BTG Ltd:n omistama dataPARC on sovellus, joka pohjautuu SPC-menetelmään. Sen avulla on mahdollista löytää tuotteen laatuun eniten vaikuttavia tekijöitä, joiden pohjalta tuotantoprosessia on mahdollista vakioida. Ohjelma on käytössä useissa paperiteollisuuden tehtaissa Yhdysvalloissa. (dataPARC). Tämän työn tarkoituksena on tutkia, kuinka uusi ohjelma otetaan käyttöön kartonkitehtaassa ja kuinka taivekartongin laatua on mahdollista parantaa dataPARC:n ja SPC-ajattelun avulla. Työssä on tarkoituksena valita prosessimuuttujia, joiden

uskotaan vaikuttavan eniten kartongin laatuun. Tarkempi laatuanalyysi on kartongin formaatio. Valituilla prosessimuuttujilla suoritetaan monimuuttujakokeita tietyille taivekartonkiläaduille. Kokeiden tulosten perusteella pyritään todistamaan valittujen muuttujien vaikutus taivekartongin formaatioon, jonka jälkeen prosessia pyritään optimoimaan. Diplomityön tarkoituksena on myös todistaa SPC-menetelmän toimivuus, kun tavoitteena on taivekartongin laadun parantaminen ja valmistusprosessin optimointi.

## KIRJALLISUUSOSA

Kirjallisuusosassa perehdytään taivekartongin raaka-aineisiin, valmistusprosessiin ja ominaisuuksiin sekä laadun määritelmään, SPC:n periaatteisiin ja laskentaan. Kirjallisuusosassa pohditaan myös, mitkä tekijät vaikuttavat eniten valmiin kartongin laatuun. SPC:n tarkastelussa perehdytään ohjauskortteihin, niiden luomiseen sekä niiden tulkitsemiseen. Ohjauskortit ovat keskeisessä osassa SPC:n käytössä ja laadun parantamisessa.

## 2 TAIVEKARTONKI

Kartonki on yksi paperiteollisuuden tuotteiden alaryhmistä. Kartonki voidaan jakaa pakkauskartonkiin ja kartonkiin, jota käytetään teknisissä sovelluksissa. Paperiteollisuuden johtavia maita ovat Yhdysvallat, Kanada, Kiina, Japani ja Saksa. Kartongin ja paperin välillä ei ole selvää eroa, mutta yleisesti paksumpaa ja tiheämpää paperia kutsutaan kartongiksi. Kartonki on usein yli 0,3 mm paksua ja sen neliömassa ( $\text{g/m}^2$ ) on yli 140. Nykypäivänä on olemassa yli 3000 erilaista kartonki- ja paperilaatua, joilla jokaisella on oma tarkoituksensa. Vahvuus, tiheys, huokoisuus ja jäykkyys ovat esimerkkejä paperin ominaisuuksista, jotka vaihtelevat eri paperi- ja kartonkilaatujen välillä. (Haeberle, 2020).

Elintarvikepakkauksissa paperi ja kartonki ovat yleisimmät materiaalit heti muovin jälkeen. Kartongin ja paperin etuina verrattuna muihin materiaaleihin ovat edullinen hinta, materiaalin keveys, laaja saatavuus, painatuksen helppous ja mekaaninen vahvuus. Kartonkipakkauksia on olemassa monia erilaisia, kuten kuppeja, laatikoita, kääreitä ja taivekartonkeja. Kartonkia käytetään esimerkiksi jauho-, keksi-, suklaa- ja muropakkauksissa. Kartonki on ekologinen ja kestävä vaihtoehto valittaessa pakkausmateriaalia ja se on kuluttajalle helppo kierrättää. Kartonkia voidaan päällystää erilaisilla kemikaaleilla ja seoksilla, jolloin pakkaus kestää paremmin kosteutta ja rasvaa. Päällystyksen ansiosta kierrättäessä pakkausten kontaminaatiota saadaan myös vähennettyä. (Nowacka et al., 2018).

## 2.1 Inkeröisten Kartonkitehdas

Inkeröisten Kartonkitehtaalla valmistetaan taivekartonkia (Stora Enso, 2019c). Inkeröisten Kartonkitehdas kuuluu Anjalankosken tehtaiden integraattiin, joka sijaitsee Kouvolassa Inkeröisissä. Anjalankosken tehtaat on perustettu 150 vuotta sitten, jolloin Carl August Standertskjöld perusti puuhiomon, ja paperitehdas käynnistyi vuotta myöhemmin. Vuonna 1887 Tampereen Pellava ja Rautateollisuusosakeyhtiö (Tampella) osti Anjalankosken tehtaat. Suomen ensimmäinen jatkuvatoiminen kartonkikone (kartonkikone 1, KK1) käynnistyi vuonna 1897. Kuvassa 1 on Inkeröisten kartonkitehtaan nykyinen tehdasmuseo, jossa sijaitsee ensimmäinen kartonkikone.



**Kuva 1.** Inkeröisten kartonkitehtaan ensimmäisen kartonkikoneen julkisivu (oma kuva-arkisto).

Kuvassa 1 oleva ensimmäinen kartonkikone sijaitsee nykyisen tehdasalueen vieressä porttien ulkopuolella. Ensimmäisen kartonkikoneen käyttöönotosta kaksi vuotta myöhemmin otettiin käyttöön kartonkikone 2. Vuonna 1926 kartonkikone 3 käynnistettiin. Kartonkikone 4 (KK4), millä nimellä nykyinenkin kartonkikone tunnetaan, rakennettiin vuonna 1965. 1990-luvun alussa KK4 uusittiin, ja Enso-Gutzeit Oy osti Anjalankosken tehtaat. Nimi vaihtui 1996 Enso Oy:ksi ja 1998 edelleen Stora Enso Oyj:ksi (Stora Enso, 2012a). Kartonkikoneita uudistettiin vuosina 2012 ja 2016. Tuotteiden kuljetusyhteydet Anjalankosken tehtailta

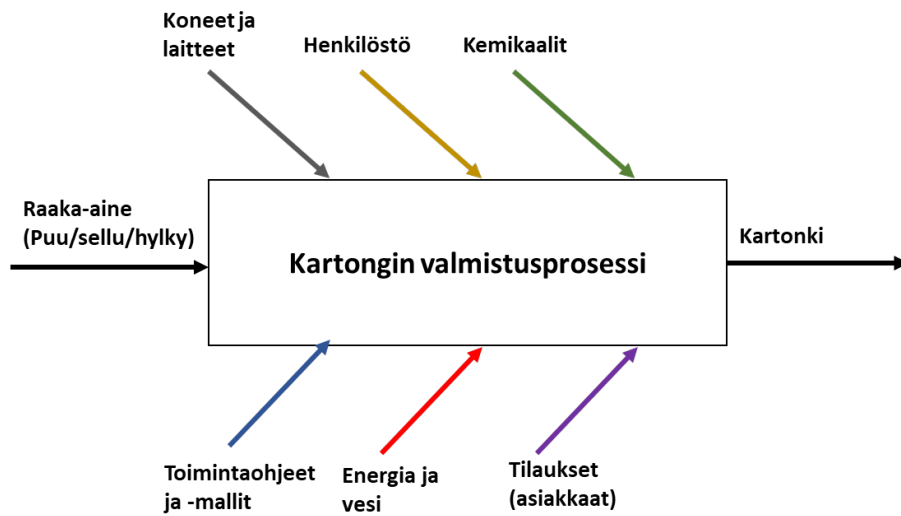


maailmalle ovat hyvät. Lastauslaitureita on sekä junille että rekoille, ja pääasiallisena lähtösatamana toimii HaminaKotkan satama, joka sijaitsee 40 km etäisyydellä. (Stora Enso, 2021a).

Vuonna 2020 paperin ja kartongin tuotantokapasiteetti Anjalankosken tehtailla oli 730 kt/v ja liikevaihto 452 milj. e/v. Tehtaiden päämarkkina-alueena on Eurooppa ja yli 90 % valmistetusta paperista ja kartongista menee vientiin. Anjalankosken tehtaat työllistää 500 henkilöä, joista 200 työskentelee Inkeröisten Kartongitehtaalla. Kartongitehtaan tuote on päällystetty taivekartonki, jota käytetään ruokapakkauksissa, suklaa- ja makeispakkauksissa, terveydenhoitopakkauksissa ja lääkepakkauksissa. Kartongitehtaan vuosittainen kapasiteetti on noin 295 000 tonnia vuodessa ja suunniteltu nopeus on 750m/min. Kartongikoneen radan leveys on 4600 mm ja kartongin neliömassa vaihtelee 190 ja 350 g/m<sup>2</sup> välillä. Taivekartongin pääraaka-aineena käytetään painehioketta ja valkaistua sellua. Inkeröisten Kartongitehtaalla on kartongikoneen lisäksi jälkikäsitelyssä viisi arkkileikkuria. (Stora Enso, 2021a).

## **2.2 Kartongin raaka-aineet ja valmistusprosessi**

Prosessissa materiaalivirroista valmistetaan haluttua tuotetta asiakkaille. Kartongin valmistus on prosessi, jossa materiaalivirroista pyritään valmistamaan haluttua tuotetta eli kartonkia. Kuvassa 2 on esitetty mitä valmistusprosessiin vaaditaan. (Stapenhurst, 2005).



**Kuva 2.** Kartongin valmistusprosessiin vaikuttavia tekijöitä (Stapenhurst, 2005).

Kuten kuvassa 2 on esitetty, valmistusprosessissa hyödynnetään työntekijöitä ja heidän taitojaan, koneita, tehdasrakennelmia sekä muita välttämättömiä asioita, kuten vettä ja energiaa. Valmista tuotetta tutkitaan ja arvioidaan sen laatua. Prosessin epäkohtiin pyritään puuttumaan, jotta prosessia pystytään kehittämään ja parantamaan tuotteen laatua entisestään. Tuotantoprosessi voi olla laadukas vain, jos sen tuotteet ovat laadukkaita. (Qui, 2013). Taivekartonkisellulta vaaditaan korkeaa puhtausastetta ja vaaleustasoa. Myös vetolujuus ja tasalaatuisuus ovat haluttuja ominaisuuksia. (Stora Enso, 2019b).

### 2.2.1 Taivekartongin rakenne

Taivekartonki koostuu usein kolmesta rakenteellisesta kerroksesta, jolloin eri ominaisuuksien optimointi onnistuu halutulla tavalla. Eri kerroksilla on eri ominaisuudet, joten monikerrosrakenteella kartonkiin saadaan lujuutta sekä haluttu ulkonäkö kartongin pinnalle. Kartongin rakenteen havainnekuva on esitetty kuvassa 3. (Stora Enso, 2013).



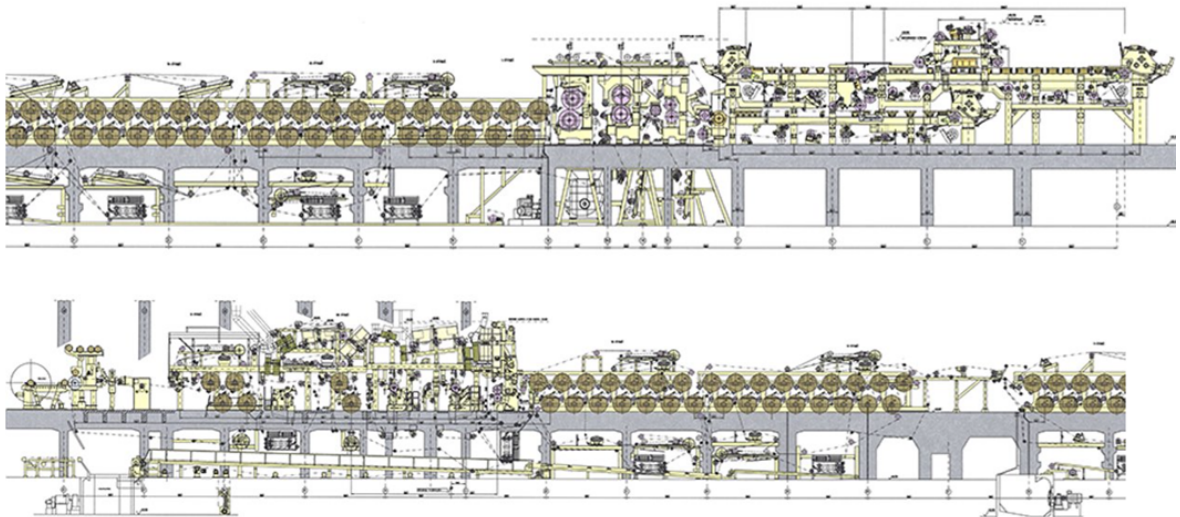
**Kuva 3.** Kartongin rakenteen havainnekuva (Stora Enso, 2013).

Kuten kuvassa 3 on esitetty, kartongin päällimmäinen eli pintakerros muodostetaan valkaistusta sellusta, jolla saavutetaan hyvät painatusominaisuudet sekä hyvä ulkonäkö. Keskikerroksessa käytetään yleensä karkeaa hioketta. Joskus saatetaan käyttää myös hierrettä tai CTMP:tä eli puolikemiallista massaa. Keskikerros on mahdollisimman paksu ja sen tiheys on alhainen. Paksuus ja alhainen tiheys parantavat taivekartongin jäykkyyttä. Taustakerroksessa käytetään valkaistua tai puolivalkaistua sellua. (Stora Enso, 2013).

Taivekartongin raaka-aineina Inkeröisten Kartonkitehtaalla käytetään sellua ja hioketta. Kartongin pintakerroksessa käytetään sellua, joka mahdollistaa kartongin pinnan hyvät lujuus- ja painatusominaisuudet. Kartongin runkokerroksessa suurin osa on hioketta, jonka neliömassa vaihtelee  $130 \text{ g/m}^2$  ja  $250 \text{ g/m}^2$  välillä. Loput runkokerroksen massasta on hylkymassaa. Hylkymassa muodostetaan konehylystä eli reunanauha- ja katkohenylystä sekä omasta pulpperoitavasta rulla- ja arkkihylystä. Myös ostohenylyä käytetään hylkymassan valmistuksessa. Hylyn tulee olla puhdasta ja ostohenylyn täytyy soveltua taivekartongin hylkymassaksi. Myös sakeus ja jauhatus tulee olla sopivia taivekartonkihylyksi. Jos hioketta ei ole riittävästi saatavilla, käytetään lisämassana CTMP:tä. CTMP:tä eli puolikemiallista massaa muodostetaan tekemällä lämpö- ja kemikaalikäsittely hakkeelle ennen kuidutusta. Selkäkerroksessa käytetään sellua. (Stora Enso, 2019b).

### 2.2.2 Kartongin valmistusprosessi

Kartongin valmistus alkaa pulppereista, joissa kemiallisia ja mekaanisia massakuituja sekoitetaan veden kanssa, jolloin muodostuu kosteampaa massaa. Sekoituksen jälkeen massoja muokataan jauhimissa. Jauhimien tarkoituksena on parantaa massan sitoutumiskykyä. Kartonkimassaan lisätään useita eri kemikaaleja, jotta lopulliseen tuotteeseen saadaan haluttuja ominaisuuksia. Myös happoja ja emäksiä käytetään massan pH:n säätämiseen. (Haeberle, 2020). Kartonkikoneen sivuprofiili on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4.** Kartonkikoneen sivuprofiili (Stora Enso, 2022e).

Kartonkikoneen päälaitteita ovat perälaatikot, viiraosat, puristinosat, kuivatusosat ja jenkki, jotka näkyvät myös kuvassa 4 lukuun ottamatta jenkkiä. Perälaatikoista eli kuvan 4 oikeasta yläreunasta matalasakeuksiset kuitu- ja kuitukemikaalivirtaukset pumpataan viiraosille. Viiraosilla massasta poistetaan vettä. Viiraosien pituudet ja vedenpoistotehokkuudet vaihtelevat massakerroksen neliömassasta. Viiraosilta kartonkiraina jatkaa puristinosalle ja kuivatusosalle. Kartongin pinta-, selkä- ja runkokerros yhdistetään yhdeksi kartonkirainaksi ennen puristinosaa. Puristinosalla vettä poistetaan kartonkirainasta puristamalla rainaa kuivatushuopiin, joista vesi imetään pois. Kuivatusosalla vedenpoisto perustuu haihduttamiseen.

(Stora Enso, 2019c). Kuvassa 4 voidaan huomata, että Inkeröiden tehtaalla jenkkisylinteri on poistettu prosessista (Stora Enso, 2022e).

Kartongin rungon massat eli hioke, hylky ja tarvittaessa CTMP johdetaan ja annostellaan rungon konesäiliöön. Säiliössä massat sekoittuvat ja tarvittavat kemikaalit annostellaan joukkoon. Ennen pumppausta massaa laimennetaan haluttuun koostumukseen. Konesihdin eli painesihdin läpi rungon massa pumpataan perälaatikon kautta viiralle. (Stora Enso, 2019b). Massa levitetään koko viiran leveydelle. Säättämällä huuliaukon kokoa voidaan muuttaa viiralle levitettävän massan määrää. Perälaatikon ja sen syöttömekanismien tarkoituksena on levittää kartongin massa tasaisesti koko viiran leveydelle halutulla sakeudella, nopeudella ja suunnalla, tasata mahdolliset syöttövirtauksen painevaihtelut sekä poikkisuuntaiset virtaushäiriöt ja tuottaa riittävän suuri turbulenssi massasuspensioon kuituflokkien rikkomiseksi. (Stora Enso, 2013). Taivekartongin valmistuksessa jokaisella kerroksella, pinta-runko- ja selkäkerroksella, on oma perälaatikkonsa (Valmet, 1997).

Taivekartonkia valmistettaessa viiraosana käytetään monitasoviiraosaa. Kun käytössä on monitasoviira, on mahdollista valmistaa taivekartonkia usealla eri neliömassalla niin, että valmistuva kartonki säilyy laadukkaana. Monitasoviiraosassa selälle, rungolle ja pinnalle on omat viiraosat. (Stora Enso, 2013). Viiraosalla kartonkimassasta poistetaan vettä. Taivekartongin runkokerroksen neliömassa on suuri verrattuna pinta- ja selkäkerrokseen. Raskaamman neliömassan takia vedenpoistokapasiteetti runkokerroksen viiraosalla on oltava suurempi kuin muilla kerroksilla (Häggbloom-Ahnger ja Komulainen, 2001). Inkeröiden kartonkitehtaalla runkokerroksen viiraosalla on yläpuolinen vedenpoisto eli formeri lisäämässä vedenpoistokapasiteettia. (Stora Enso, 2013). Viiraosalla on myös foililistoja tehostamassa vedenpoistoa. Foililistojen avulla tapahtuva vedenpoisto perustuu alipaineeseen. Foililistat, jotka painautuvat viiraa vasten, sijaitsevat viiran alapuolella. Foililistoja on myös mahdollista asentaa imulaatikoiden päälle, jolloin vedenpoisto tapahtuu foililistojen välissä. (Paulapuro, 2000).

Viiralta erikseen muodostetut rainat yhdistetään huopauttamalla ennen puristinosaa (Stora Enso, 2013). Puristinosan tärkein tehtävä on veden poistaminen kartonkirainasta. Puristinosalla on myös vaikutusta kartongin pintojen sileyteen sekä tiivistymiseen. (Valmet, 1997). On tärkeää, että mahdollisimman korkea kuiva-ainepitoisuus saavutetaan puristinosalla ennen kuivatusosaa. Kun kuiva-ainepitoisuus saadaan puristinosalla mahdollisimman korkeaksi, on mahdollista säästää kuivatusosan energiakuluissa ja saada tuotantoa energiatehokkaammaksi. (Hägglom-Ahnger ja Komulainen, 2001).

Kuivatusosalla kartonkiradasta haihdutetaan vettä. Kuivatusosalle tulevan kartonkiradan kiintoainepitoisuus on 40–50 % kartonkilaadusta riippuen ja tavoitteena on saavuttaa 91–94 %:n kiintoainepitoisuus. Perinteinen kuivatusmekanismi on kuivatus höyryn avulla. Kuivatusosalla tavoitteena on säilyttää sekä saavuttaa valmiin taivekartongin haluttuja ominaisuuksia. Kiillotus- eli jenkki sylinteri sijoitetaan kuivatusosalla usein kohtaan, jossa radan kiintoainepitoisuus on noin 60 %. Jenkkiä käytetään erityisesti taivekartongin valmistuksessa, jolloin pinnan kiiltoa ja sileyttä saadaan parannettua. (Valmet, 1997). Inkeröisten kartonkitehtaalla jenkki kuitenkin poistettiin käytöstä 2015. Syynä poistamiseen oli jenkin vaatima tarkka kiintoainepitoisuus, joka hidasti valmistusprosessia huomattavasti. Jenkin poistamisen jälkeen kartonkikoneen nopeutta saatiin nostettua huomattavasti tinkimättä kartongin laadusta. (Lehtonen ja Hietanen, 2022).

Jotta kartongin pinta saadaan tasaisemmaksi ja painettavuutta parannettua, kartongin pinnalle levitetään päällystekerros. Päällystekerroksella on suuri vaikutus kartongin ulkonäköön. Kartonki on mahdollista päällystää molemmilta tai vain toiselta puolelta riippuen lopputuotteen halutuista ominaisuuksista. (Hägglom-Ahnger ja Komulainen, 2001). Päällysteellä on oma kuivatusmekanisminsa. Inkeröisten Kartonkitehtaalla päällysteen kuivatusosan energianlähde muutettiin maakaasusta sähköön syksyllä 2022, jolloin kartongin valmistuksen hiilijalanjälkeä saatiin pienennettyä peräti 20 % (Stora Enso, 2022c).

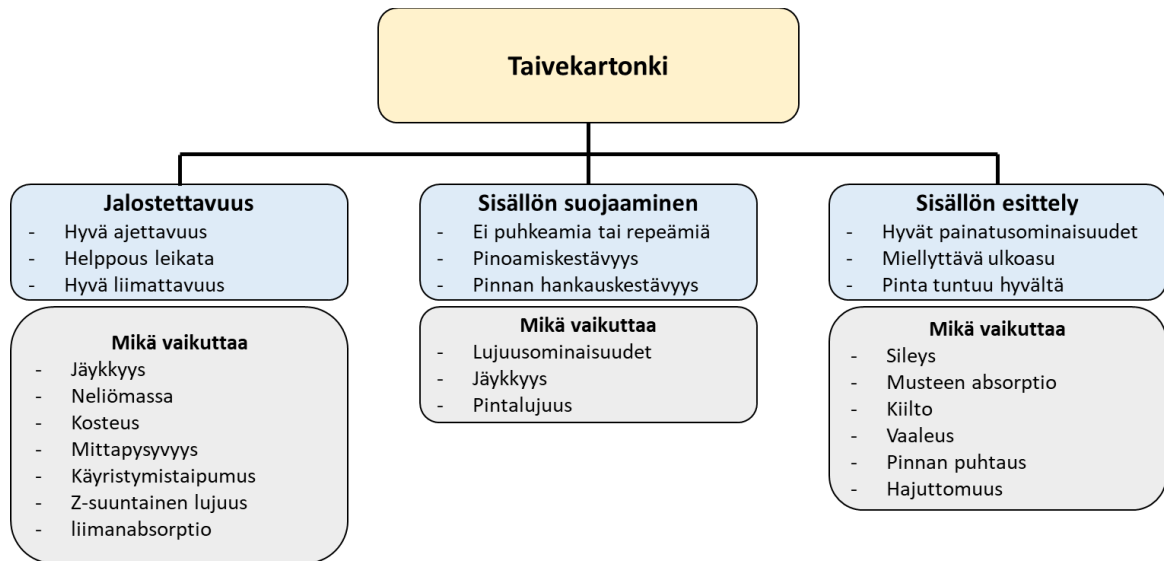
Päällystyksen ja kuivatuksen jälkeen kartonki ohjataan kalantereille, jossa kartonkia puristetaan kahden tai useamman telan välissä. Esikalanterointi on mahdollista sijoittaa prosessiin

jo ennen päällystysvaihetta. Kalanteroinnilla voidaan parantaa kartongin laatuominaisuuksia, kuten sileyttä ja kiiltoa. Haittapuolena kalanteroinnilla on paksuuden ja jäykkyyden heikentyminen. Myös vaaleus ja repäisyjuisuus saattavat kärsiä. (Hägglom-Ahnger ja Komulainen, 2001).

Kalanteroinnin jälkeen valmistunut kartonki johdetaan kiinnirullaimelle. Kartongin valmistusprosessi on jatkuvatoiminen prosessi, lukuun ottamatta rullausta. Rullauksessa pyritään mahdollisimman hyvään hyötysuhteeseen, jolloin hylyn määrää saadaan vähennettyä. Yleisin käytössä oleva rullain on Pope-rullain. Valmistunutta kartonkia rullataan tampuurin ympärille oikealla kireydellä, jotta kartonkiin ei muodostu rynkkyjä tai muita laatuviikoja. Rullaimelta tampouri siirtyy edelleen pituusleikkurille. Pituusleikkurilta valmistuneet rullat vieetään arkkileikkureille tai myydään rullina eteenpäin. (Hägglom-Ahnger ja Komulainen, 2001).

### **2.3 Kartongin ominaisuudet**

Taivekartongin tärkeimmät ominaisuudet ja niihin vaikuttavat tekijät on esitetty kuvassa 5.



**Kuva 5.** Kartongin laatuun vaikuttavia tekijöitä (Stora Enso, 2013).

Kuten kuvassa 5 on esitetty, tärkeimmät ominaisuudet, joita taivekartongilta halutaan, ovat hyvä ja helppo jalostettavuus, suojaava rakenne ja hyvä pinta. Jotta jalostettavuus olisi hyvää, tulee kartongin olla helposti ajettavaa sekä helppoa leikata ja liimata. Jalostettavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa kartongin neliömassa ja jäykkyys. Kartongin suojaava rakenne saavutetaan, kun kartongissa ei ole reikiä ja se kestää pinoamista ja hankautumista. Kartongin pintalujuus ja jäykkyys vaikuttavat kyseisiin ominaisuuksiin. (Stora Enso, 2013). Taivekartongin tärkeimpänä ominaisuutena pidetään taivutusjäykkyyttä, koska taivekartongista valmistettujen pakkausten tulee kestää painoa niiden päällä ilman, että alimmainen kartonkipakkaus litistyy. On vaikeaa hallita kaikkia lopputuotteen haluttuja ominaisuuksia samanaikaisesti, joten jokaisen raaka-aineen osuus ja tehtävä on määritettävä tarkasti. Määrittämisen avulla pystytään luomaan kriittisiä ominaisuuspareja, kuten bulkki ja sileys, bulkki ja kiilto, optiset ja lujuusominaisuudet sekä sileys ja pinnan huokoisuus. Valmistusprosessissa on helpompaa pyrkiä optimoimaan kriittisiä ominaisuuspareja kuin yksittäisiä ominaisuuksia. (Hägglom-Ahnger ja Komulainen, 2001).



### 2.3.1 Kartongin ominaisuuksien vaihtelut

Kartongin vaihtelua voi tapahtua konesuunnassa, poikkisuunnassa, satunnaisena eli jäännös-vaihteluna ja vaihteluna toimituserästä toiseen. Vaihtelua kartongin ominaisuuksissa tapahtuu myös paksuus- eli z-suunnassa. Konesuunnassa tapahtuvat vaihtelut ovat aikaan sidottuja, kun taas poikkisuunnan vaihtelut ovat paikkaan sidottuja. Tärkeimpänä vaihteluna pidetään neliömassan vaihtelua, koska se vaikuttaa kaikkiin kartongin ominaisuuksiin.

Toimituserien välinen vaihtelu johtuu usein kalibrintivirheistä, jotka ovat nykyään harvinaisia. Konesuuntaista vaihtelua, jonka pääsyynä on usein sulpun nopeuden tai sakeuden vaihtelu perälaatikon huuliaukolla, esiintyy koko rainan leveydeltä. Nopeusvaihtelut johtuvat yleensä painevaihteluista, jotka johtuvat perälaatikkoa edeltävistä prosesseista. On myös mahdollista, että ne muodostuvat vasta perälaatikoissa. Poikkisuuntaisen vaihtelun syynä voi olla sakeuden ja nopeuden vaihtelun lisäksi perälaatikon suihkun paksuuden vaihtelu, retention vaihtelu, poikkivirtaukset viiraosalla ja kuivumiskutistuman vaihtelu. Pääsyynä on yleensä nopeuden ja paksuuden vaihtelut. Kuivumiskutistumaa pystytään vähentämään syöttämällä perälaatikkoon laimennusvettä koko leveydeltä, mutta kuitenkin enemmän reunoille. Jäännösvaihtelu johtuu perälaatikon virtaushäiriöistä, jotka luokitellaan satunnaisiksi vaihteluiksi. (Hägglom-Ahnger ja Komulainen, 2001).

Koska perälaatikoiden jälkeen kartongin valmistus on pääasiassa vain veden poistamista rainasta, kartongin kosteuden tasaisuuteen vaikuttaa kaikki perälaatikoiden jälkeiset yksikköprosessit. Kosteusprofiilia on mahdollista säätää, mutta säädöt voivat tapahtua liian hitaasti. Ongelmana kuivatuksessa on epätasainen kuivatus. Kartongin kuivat paikat toimivat lämmöneristeinä, jolloin raskaammalla kartongilla voi esiintyä pintakuivuutta, vaikka kartonki olisi vielä kostea välikerroksissa. Kosteimmat alueet imevät märkää pastaa tai pintaliimaa enemmän kuin kuivat alueet, jolloin päällystyksestä tulee epätasaista. Kalanteroinnissa kosteimmat alueet jäävät kuivempia alueita ohuemmiksi, jolloin kartonkiin tulee laatuvirheitä ja hylyn määrä lisääntyy. (Hägglom-Ahnger ja Komulainen, 2001).

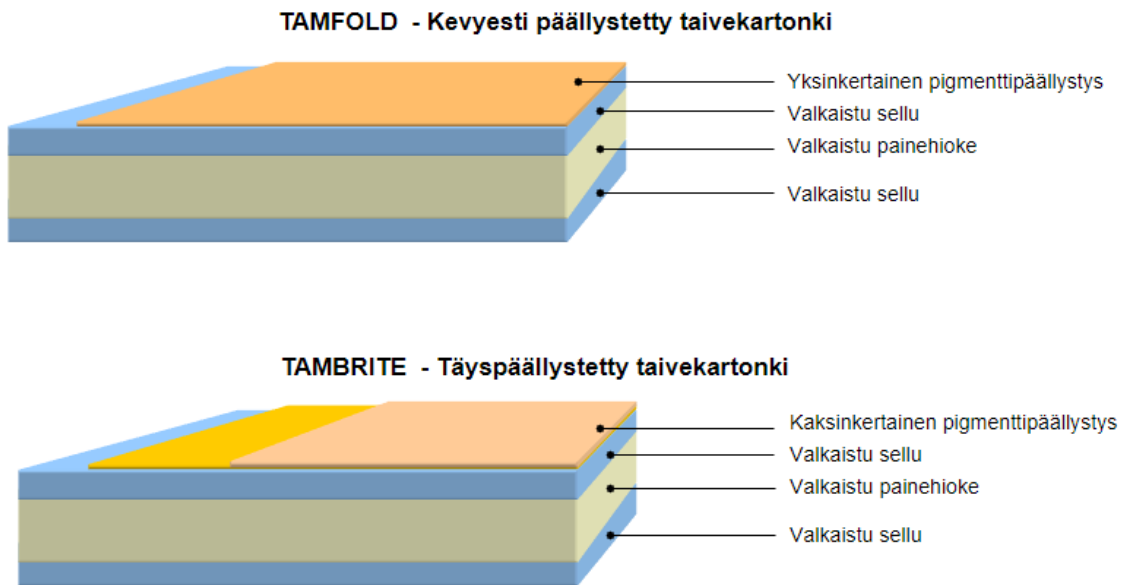
Bulkki on tiheyden käänteisluku, jonka yksikkönä käytetään  $\text{cm}^3/\text{g}$ . Kartongilta halutaan korkeaa bulkkia eli pientä tiheyttä, jolloin kartongilla on suuri jäykkyys, hyvä opasiteetti, suuri repäisylujuus ja suuri kokoonpuristuvuus. Jos halutaan parempaa vetolujuutta ja pinnan sileyttä, kartongin tiheys kasvaa ja bulkin arvo pienenee. Vetolujuutta on mahdollista lisätä lisäämällä pitkäkuituista sellua mekaanisen massan joukkoon, jolloin sileyks usein huonee. Sileyden saa paremmaksi kalanteroinnilla, mutta bulkin arvo pienenee edelleen. Monet kartongit painetaan vain pintapuolelta, jolloin vain toinen puoli kartongista täytyy olla erityisen sileä. Jenkkisylinterin avulla on mahdollista saavuttaa hyvä sileyks toiselle puolelle kartonkia ja samalla säilyttää korkea bulkki ja jäykkyys. (Hägglom-Ahnger ja Komulainen, 2001).

Kartongin formaatio on yksi ainoista ominaisuuksista, jota on mahdollista parantaa heikentämättä muita ominaisuuksia (Hägglom-Ahnger ja Komulainen, 2001). Kartongin formaatiolla tarkoitetaan kartongin neliömassahajontaa. Formaatiota voidaan tarkastella erilaisilla tunnusluvuilla, kuten flokkikoolla, jossa mitataan flokkien kokoa ja formaation variability -muuttujalla, jossa mitataan formaation vaihtelevuutta. Formaatiomittauksia voidaan suorittaa online- ja offline-mittauksilla, joista tarkempia tuloksia saadaan offline-mittauksista. Tuotannon kannalta offline-mittaukset ovat liian hitaita jatkuvasti tehtäviksi, joten tuotannossa käytetään pääosin online-mittauksia. (Stora Enso, 2013).

Formaation parantuessa usein ajettavuus, vetolujuus ja opasiteetti paranevat ja päällysteestä sekä painojäljestä tulee tasaisempaa. Kuituflokkit, joita syntyy kuitujen takertuessa toisiinsa vesisuspensiossa, heikentävät kartongin formaatiota. Flokkien muodostuminen tapahtuu nopeasti, jolloin myös niiden hajottaminen täytyy olla nopeaa. Flokkeja on mahdollista hajottaa perälaatikon ja viiraosan mikrosekoituksen avulla. (Hägglom-Ahnger ja Komulainen). Mikrosekoituksen intensiteetti riippuu virtauskanavien muodoista, massan viskositeetista ja virtausnopeusmuutoksista (Koiranen, 2023). Jos muodostuneita flokkeja ei saada hajotettua, muodostuu kartongin rakenteesta epätasainen eli pilvinen (Hägglom-Ahnger ja Komulainen, 2001).

### 2.3.2 Inkeröisten kartonkilaadut

Inkeröisten Kartonkitehtaalla valmistetaan kahta kartonkilaatua, jotka ovat Tamfold (TF) ja Tambrite (TB). Kartongin yksinkertaistettu malli on esitetty kuvassa 6.



**Kuva 6.** Tamfold- ja Tambrite -kartonkien rakenne (Stora Enso, 2021a).

Kuten kuvassa 6 on esitetty, Tamfold on kevyesti päällystettyä taivekartonkia, joka koostuu valkaistusta sellusta, valkaistusta painehiokkeesta ja yksinkertaisesta pigmenttipäällysteestä. Tamfoldin neliömassa vaihtelee 190 ja 325 g/m<sup>2</sup> välillä. Tamfoldin suorituskyky on erinomainen ja siinä yhdistyy korkea bulkki sekä tasalaatuisuus. Tamfoldin jälkikäsittely on helppoa, minkä ansiosta siihen on mahdollista tehdä sokeainkirjoitusta, laser- ja mustesuihkukoodausta. Tamfoldia käytetään pikaruokapakkauksissa ja suklaa- ja makeispakkauksissa. Tambrite on täyspäällystettyä taivekartonkia. Verrattuna Tamfoldiin Tambriteessa pigmenttipäällystettä on kaksi kerrosta yhden sijaan. Tambriten neliömassa on 200 ja 335 g/m<sup>2</sup> välillä. Toinen pigmenttipäällystekerros takaa Tambriten erittäin hyvän ulkonäön, jäykkyyden ja erinomaisen ajettavuuden. Sillä on hyvä painettavuus, ja Tamfoldin tavoin, siihen on

helppo tehdä erilaisia jälkikäsitteilyjä. Suklaa- ja pikaruokapakkausten lisäksi Tambritea käytetään lääkepakkauksissa. (Stora Enso, 2021a).

Kartongin valmistusta on pyritty automatisoimaan mahdollisimman laajalti. Järjestelmien avulla voidaan valvoa valmistusprosessia ja tehdä mittauksia, säätöjä ja ohjauksia. Manuaalisten mittausten lisäksi on olemassa online-mittauksia ja järjestelmiä niitä varten. Epäpuhauksien ja teräviirujen havainnointia varten on olemassa vianilmaisinjärjestelmä, jonka avulla kartongin laatua voidaan pitää korkeana. Myös mahdollisia katkoja voidaan analysoida erillisellä ohjelmalla. Laboratoriossa suoritetaan mittauksia prosessin raaka-aineista ja valmistetusta kartongista hyvän laadun takaamiseksi. (Stora Enso, 2022b). Tehtaassa pyritään jatkuvaan kehittämiseen ja parantamiseen, jolloin laatuun vaikuttavat järjestelmät vaativat välillä päivitystä tai lisäystä.

### 3 LAATU

Vaikka tuote olisi joskus ollut hyvä, se ei tarkoita, että tuote olisi sitä edelleen. Ajan myötä vaatimustasot muuttuvat, joten vanhat hyvät tuotteet voivat muuttua huonoiksi. Esimerkiksi vuonna 2006 ostettu matkapuhelin on ollut ostohetkellä markkinoiden paras, mutta nykypäivänä se ei täytä vaadittavia laatuvaatimuksia eikä sisällä haluttuja ominaisuuksia. (Qui, 2013). Juranin (2012) mukaan on oltava yhtä mieltä siitä, mitä laatu on, ennen kuin sitä voidaan hallita. Jos laatua on mahdollista hallita, on myös mahdollista miellyttää asiakkaita ja osakkeenomistajia hyvillä tuotteilla ja tuottavalla yrityksellä. Jos laadun määrittämisessä ei päästä yrityksessä yhteisymmärrykseen, laatua ei ole mahdollista hallita parhaimmalla mahdollisella tavalla. Juranin mukaan laadun määrittämisen kaksi tärkeintä piirrettä ovat vapaus vioista ja häiriöistä sekä ominaisuudet, jotka kohtaavat asiakkaiden tarpeiden kanssa. Paremmalla laadulla on monia vaikutuksia yrityksen tuotantoon. Edellä mainittujen piirteiden vaikutuksia tuotantoon on esitetty taulukossa I. (Juran ja De Feo, 2012).

**Taulukko I.** Häiriöttömyyden ja tuotteiden ominaisuuksien ja asiakkaiden tarpeiden kohtaamisen vaikutus tuotteen tuotantoon, liikevaihtoon ja asiakastytyväisyyteen (Juran ja De Feo, 2012).

<b>Tuotteen ominaisuudet kohtaavat asiakkaiden tarpeiden kanssa</b>	<b>Vapaus häiriöistä</b>
Parantunut asiakastytyväisyys	Pienemmät häiriöosuudet
Paremmiin myyvät tuotteet	Vähemmän jätettä
Kilpailukyvyyn parantuminen	Vähemmän häiriöitä ja takuumaksuja
Parempi markkinaosuus	Vähemmän asiakastytymättömyyttä
Myyntitulot paranevat	Vähemmän tarkastuksia ja testejä
Turvalliset premium-hinnat	Lyhyempi tarvittu aika uusien tuotteiden lanseerausessa
Pienemmät riskit	Parempi tuotantotehokkuus
	Parantunut toimitusvarmuus

Kuten taulukossa I on esitetty, asiakkaiden tarpeiden ja tuotteen ominaisuuksien kohtaaminen vaikuttaa eniten tuotteen myymiseen eli yrityksen liikevaihtoon. Paremmasta laadusta,

joka voidaan taata, asiakkaat ovat valmiita maksamaan enemmän. Kun laatu on taattua, myyntikin on yleensä parempaa. Kun tuotannon häiriöt vähenevät, korjaustoimenpiteitä on vähemmän ja tuotanto pysyy korkeammalla tasolla. Tällöin tuotteiden valmistus maksaa vähemmän yritykselle ja yritys tuottaa enemmän liikevoittoa. (Juran ja De Feo, 2012).

Garvinin (1987) mukaan laadun voi jakaa kahdeksaan osaan, jotka ovat

1. suorituskky
2. ominaisuudet
3. luotettavuus
4. vaatimustenmukaisuus
5. kestävyys
6. huollettavuus
7. estetiikka
8. havaittu laatu. (Qui, 2013).

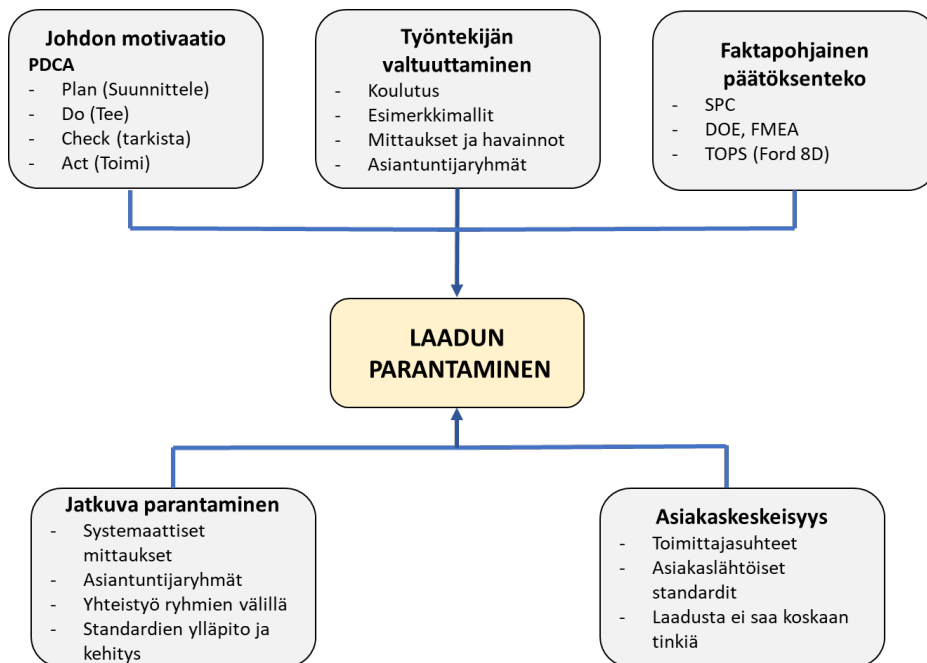
Suorituskky kuvaa tuotteen kykyä suorittaa haluttuja toimintoja. Ominaisuudet liittyvät haluttuihin toimintoihin, joita tuote suorittaa. Halutuimmat ominaisuudet ovat ominaisuuksia, jotka ovat hyödyllisiä ja joita kilpailijoilla ei ole. Luotettavuus kertoo, kuinka usein tuote onnistuu tai epäonnistuu toimintojen suorittamisessa. Tuotteen tulisi saavuttaa suunnitellut ja vaaditut standardit, jonka vaatimustenmukaisuus kertoo. Kestävyys määrittelee tuotteen käyttöiän. Tuotteen vanhetessa se vaatii huoltoa. Huollettavuus kertoo, kuinka helppoa ja kätevää kyseisen tuotteen huoltaminen on, jotta käyttöikä pystytään pidentämään. Estetiikka eli tuotteen ulkonäkö on monen tuotteen yksi tärkeimmistä ominaisuuksista. Tuotteen havaittu laatu kertoo tuotteen ja yrityksen maineesta. Jos käyttäjät pitävät tuotetta hyvänä ja parempana kuin kilpailijoiden tuotetta, havaittu laatu on erinomainen. (Qui, 2013).

Edellä mainittujen 8 osan lisäksi laatu voidaan jakaa kolmeen eri elementtiin, jotka ovat suunnittelun laatu, noudattamisen laatu ja luotettavuuden laatu. Suunnittelun laatu on hyvää, jos tuote tai palvelu on hyvin suunniteltu. Noudattamisen hyvä laatu ilmenee, kun tuotteen

tai palvelun ominaisuudet kohtaavat suunnittelun kanssa. Kun tuote tai palvelu toimii halutulla tavalla ilman ongelmia riittävän ajan, tuotteen luotettavuus on hyvällä tasolla. (Tsfay, 2021).

### 3.1 Laadun takaamisen haasteet

Useat yritykset kokevat, että hyvän laadun takaaminen on hankalaa ja kallista. Suurimpana syynä haasteisiin on tuotantoprosessin sisäinen vaihtelu. Vaihtelun hallinta on useasti hankalaa eikä yrityksillä ole siihen riittäviä työkaluja tai toimintatapoja. Kun erilaisia ominaisuuksia laitetaan eri kategorioihin, on tuotantoprosessista mitattua dataa helpompi analysoida ja käyttää erilaisia laadunhallintajärjestelmiä. Ennen kuin laadunhallintajärjestelmää voidaan käyttää, tulee halutut laadustandardit määrittää ensin. Laadun parantamiseen liittyviä tekijöitä on useita, jotka on esitetty alla olevassa kuvassa 7. (Tsfay, 2021).



**Kuva 7.** Laadun parantamisen keskiössä ovat PDCA (Plan, Do, Check, Act), SPC (Statistical Process Control), DOE (Design of Experiments), FMEA (Failure Modes and Effects Analysis), TOPS (Eight disciplines problem solving) (Tsfay, 2021).

Kuten kuvassa 7 on esitetty, yrityksen johdon tulee olla motivoitunut parantamaan tuotteensa laatua. Yleisin toimintatapa on PDCA, jossa kaikki lähtee suunnittelusta (P), jonka jälkeen toimitaan niiden mukaan (D). Kun on toimittu suunnitelmien mukaan, tulee tarkastaa (C), onko toimilla saatu haluttuja muutoksia. Jos tarkastuksessa havaitaan puutteita, tulee toimia (A) ja, jos toimet eivät riitä, tulee suunnittelu käynnistää alusta. Jotta työntekijöiden osaaminen säilyy, tulee heitä kouluttaa säännöllisin väliajoin. Erilaiset toimintamallit, joita myös erilaiset mittaukset ja havainnot tukevat, auttavat työntekijöitä toimimaan halutulla tavalla. Luomalla erilaisia asiantuntijaryhmiä, jokainen ryhmä pystyy keskittymään parhaiten omaan osaamisalueeseen. Kun päätöksiä tehdään, on tukeuduttava faktoihin. Mittaustuloksia on helppo analysoida esimerkiksi SPC:n tai DOEn (design of experiments) avulla. Ryhmäjohtoisella ongelmanratkaisulla (TOPS) saadaan usein nopeammin ongelmia ratkaistua. Jatkuva parantamista voidaan pitää yllä systemaattisilla mittauksilla, asiantuntijaryhmillä ja yhteistyöllä eri asiantuntijaryhmien kesken. Painopisteen tulee olla asiakkaissa, jolloin standardit perustuvat asiakkaiden toiveisiin. Tärkeintä on, että laadusta ei koskaan saa tinkiä. (Tesfay, 2021).

On todettu, että yrityksissä, joissa laadun hallinta ja parantaminen on onnistunut, on ainakin kymmenen yhteistä tekijää ja strategiaa riippumatta yrityksestä. Kyseiset strategiat ovat

1. Asiakkaat ja laatu prioriteettina
2. Suorituskyvyn parantamisjärjestelmä
3. Strateginen suunnittelu laadun parantamiseksi
4. Suorituskykytestejä parhaimmille käytäntötavoille
5. Sitoutuminen jatkuvaan parantamiseen ja prosessin optimoimiseen
6. Laadunhallintakoulutuksien järjestäminen
7. Organisaation laajuinen keskittyminen hyvään laatuun
8. Projekti projektilta, monitoimisten asiantuntijaryhmien luominen
9. Työntekijöiden valtuuttaminen
10. Kestävän ja sopeutumiskykyisen yrityksen luominen. (Juran ja De Feo, 2012).



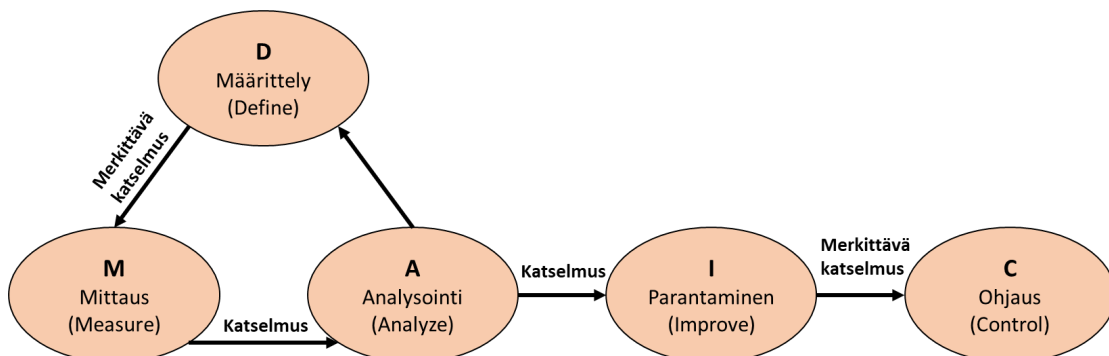
Prosessiteollisuudessa tärkein tavoite on pitää asiakas tyytyväisenä, jolloin tuotteen laadun tulisi olla riittäväällä tasolla. Usein ongelmana on pyrkimys selvittää ongelmista liian helpolla ja halvalla. Ongelmiin usein herätään vasta sitten, kun jotain on jo tapahtunut. Usein prosessi ilmoittaa tulevista ongelmista jo etukäteen, mutta harvoin niihin osataan reagoida. Prosessi on pidetty käynnissä niin kauan, kunnes rajat on ylitetty ja prosessi on pakko pysäyttää. Haasteena on myös vanhojen työtapojen ylläpito, vaikka prosessia olisi uudistettu. Ajatuksena on ”näin on aina tehty” ja niin tehdään edelleen. Monimutkaisessa prosessissa hankaluutena on tietää todellisia syy-seuraussuhteita eli ne perustuvat sormituntumaan. Tällöin virheellisiä säätöjä ja ratkaisuja sattuu helposti. On myös tilanteita, missä tuote on todettu heikoksi, mutta se myydään silti eteenpäin. Tästä aiheutuu helposti ongelmia tulevaisuudessa, koska työympäristössä syntyy ajatus, että ”tämä on kelvannut ennenkin, tämä kelpaa myös nyt”. (Salomäki, 2003).

#### 4 TILASTOLLINEN PROSESSINOHJAUS

SPC tulee sanoista statistical process control. Suomeksi SPC tarkoittaa tilastollista prosessinohjausta. Vaikka prosessi toimisi ilman ongelmia, voi tuotteen laadussa olla vaihtelua eikä tuote välttämättä täytä sen vaadittuja laatustandardeja. SPC:n avulla on mahdollista vähentää tuotteen laatuvarioitumista. (Qui, 2013). Vaikka tilastollisen prosessinohjauksen avulla voidaan vähentää laatuvarioitumista, ei SPC:n käyttö itsessään ratkaise mitään. Tilastollisessa prosessinohjauksessa kerättyä dataa taulukoidaan, joiden avulla prosessia voidaan tulkita paremmin. (Mundwiller, 2017). Tilastollisen prosessinohjauksen peruseräperiaatteina ovat, että

- kaikki työ tapahtuu toisiinsa yhdistetyissä yksikköprosesseissa
- vaihtelua esiintyy jokaisessa yksikköprosessissa
- vaihteluiden ymmärtäminen ja niiden vähentäminen ovat ratkaisu onnistumiseen. (Rantamäki, Tiainen ja Kässi, 2013).

SPC:ssa hyödynnetään myös standardissa ISO 13053 käsiteltävää liiketoiminnan kehittämismenetelmää, Six Sigmaa (ISO 13053-1:2011). SPC ja SixSigma ovat molemmat proaktiivisia eli ennakoivia tapoja ratkaista ongelmia (Hassinen, 2022). Six Sigman menetelmässä on viisi osaa, joiden englanninkielisistä sanoista muodostuu kirjainyhdistelmä DMAIC. DMAIC-menetelmä on esitetty kuvassa 8.



**Kuva 8.** Six Sigman DMAIC-menetelmän hyödyntäminen (ISO 13053-1:2011).

Kuvan 8 mukaan, ongelman tai poikkeaman ratkaisu alkaa ongelman tai poikkeaman määrittelyllä (D). Määrittelyvaiheessa luetellaan havaitut poikkeamat ja epäkohdat sekä niiden kuvaukset mahdollisimman tarkasti. Projektin tavoite tulee myös määritellä. Määrittelyvaiheen jälkeen prosessia on mitattava ja tuloksia analysoitava. Mittausvaiheessa (M) kerätään dataa muuttujista, joiden oletetaan vaikuttavan määriteltyyn ongelmaan. Mittausprosessit on oltava riittävän tarkkoja ongelman määrittämiseen ja ratkaisemiseen. Mittausvaiheessa luodaan erilaisia kuvaajia, kuten ohjauskortteja, histogrammeja ja katselmoidaan prosessia. Analysointivaiheessa (A) havaitaan poikkeamat lähtötason ja tavoitearvojen välillä. Analysoimalla mittausdataa pyritään löytämään syyt, jotka ovat aiheuttaneet vaihtelua prosessissa. Havaitut syyt asetetaan tärkeysjärjestykseen. Analysointivaiheessa hyödynnetään esimerkiksi syy-seurauskuvaajia, prosessin vika- ja vaikutusanalyysijä ja vikapuuanalyysiä. Kolme ensimmäistä vaihetta toistetaan tarvittaessa niin monta kertaa, kunnes määrittely sopii mittauksista analysoituihin tuloksiin. On mahdollista, että analysoinnin aikana käsitys ongelmasta muuttuu, jolloin ongelma tulee määritellä uudelleen. (ISO 13053-1:2011).

Kun määrittely on vakiintunut, on mahdollista edetä kahteen viimeiseen vaiheeseen eli parantamiseen (I) ja ohjaukseen (C). Parantamisvaiheessa (I) tavoite on muuttaa prosessia pysyvästi paremmaksi. Tavoite on poistaa havaitut ongelmat hyödyntämällä esimerkiksi ratkaisunvalintamatriiseja. Ohjausvaiheessa (C) ratkaisua, johon parantamisvaiheessa päädyttiin, tutkitaan keräämällä tuoretta dataa ja analysoidaan sitä. Kun parannus on vahvistettu, voidaan paranneltu prosessi luovuttaa projektin omistajalle. Opitut asiat, faktat ja yksityiskohdat tulee kirjata ylös koko menetelmän käytön ajalta. Loppuraportti tulee laatia, kun projekti on valmis. (ISO 13053-1:2011).

#### **4.1 Satunnais- ja erityisyvaihtelu**

SPC voidaan jakaa kahteen eri vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa valmistusprosessi pyritään vakioimaan ja tavoitteena on saada se toimimaan tasaisesti. Kun prosessia luodaan, ei varsinaista prosessidataa ole tiedossa lähes ollenkaan. Analytiikka perustuu koetuloksiin ja

erilaisiin tutkimuksiin. Kun edetään toiseen vaiheeseen, uskotaan prosessin olevan tasainen. Prosessia valvotaan jatkuvasti, jotta varmistutaan sen toiminnan tasaisuudesta ja varmuudesta. Toisessa vaiheessa prosessin dataa on saatu kerättyä riittävästi, jotta mahdolliset poikkeamat toiminnassa voidaan havaita. Kun poikkeama on havaittu, täytyy prosessiin tehdä säätötoimenpiteitä ja tarvittaessa jopa pysäyttää koko tuotantoprosessi, kunnes poikkeaman aiheuttaja saadaan korjattua. (Qui, 2013).

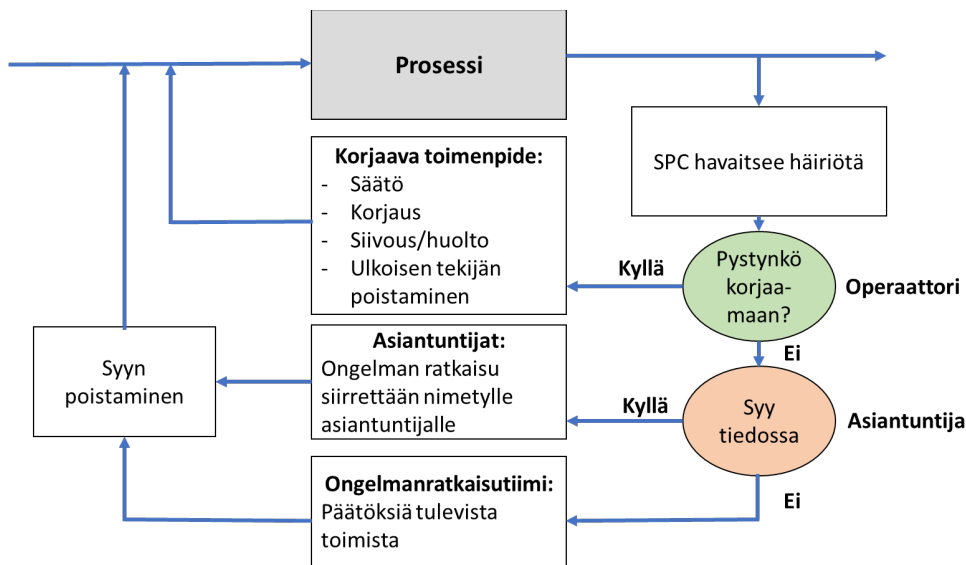
SPC:ssa prosessissa esiintyvät vaihtelut jaetaan kahteen eri luokkaan, jotka ovat satunnaisvaihtelu eli common cause variation (CCV) ja erityisyyvaihtelu eli special cause variation (SCV). Satunnaisvaihtelua on aina läsnä, joten se on yleisin syy laadun vaihteluun. Jos prosessi on tasainen ja painopiste on satunnaisvaihtelussa, prosessia harvoin saadaan parannettua nopeasti ja helposti. Erityisyyvaihtelut perustuvat vaihteluihin yksikköprosesseissa ja syöttövirroissa tai ääriolosuhteisiin. Kun erityisyys on saatu poistettua prosessista tai siihen on reagoitu oikealla tavalla, prosessi saadaan vakioitua. (Rantamäki, Tiainen ja Kässä, 2013). Hyödyntämällä SPC-menetelmää tai Six Sigma -menetelmää, on mahdollista tutkia kohinaan eli satunnaisvaihteluun vaikuttavia syitä ja menetelmän pohjalta yrittää löytää kohinaan eniten vaikuttavia syitä. Tällöin satunnaisvaihteluakin on mahdollista käsitellä ja saada aikaan haluttuja muutoksia. On esimerkiksi mahdollista vakioida tuotteen laatua, kun siihen eniten vaikuttavat syyt on löydetty monesta eri muuttujasta tutkimalla kohinaa SPC:n avulla. (Hassinen, 2022). Taulukossa II on esitetty satunnaisvaihtelun ja erityisyyvaihtelun eroja.

**Taulukko II.** Satunnais- ja erityisyyvaihtelu (Stapenhurst, 2005).

<b>Satunnaisvaihtelu, CCV</b>	<b>Erityisyyvaihtelu, SCV</b>
Mitattavissa	Mitattavissa
Aina läsnä	Joskus läsnä
Monia syitä	Harvoja syitä, erityinen syy
Osa prosessia	Ei osa prosessia
Ennustettavissa	Ei ennustettavissa
Voi olla ongelma	Usein ongelma
Vähennettävissä analysoimalla ja parantamalla prosessia	Poistettavissa indentifioimalla ja poistamalla syy tai jos ei ole poistettavissa, mukaudutaan seurauksiin.

Taulukossa II esitetty satunnaisvaihtelun syynä voi olla esimerkiksi sopimaton tai puutteellinen toimintamalli, jota työntekijät noudattavat. On myös mahdollista, että käytettävissä oleva tekniikka on epäsopivaa. Jos mittauksien ja valvomojen laitteiden välissä esiintyy pitkiä viiveitä, ovat reagointiajat ongelmiin pitkiä. Yksi mahdollisista syistä vaihteluun on liian epätarkat mittaukset. Pituutta saatetaan mitata esimerkiksi senttimetreinä, vaikka sopivampi vaihtoehto olisi mitata millimetreinä. Jos työolosuhteet, kuten kosteus, lämpötila ja värinä, vaihtelevat voimakkaasti, vaikuttavat nekin prosessiin. On myös normaalia, että raaka-aineiden laaduissa esiintyy vaihtelua. Laadunhallinnan ollessa liian heikkoa laatukin vaihtelee voimakkaasti. (Tesfay, 2021).

Taulukon II mukaan erityissyysvaihtelu voi johtua esimerkiksi kouluttamattomasta työvoimasta, koneen viallisesta toiminnasta, uudesta jakelijasta, uusista toimintatavoista, työntekijöiden vapaista ja lomista tai esimerkiksi flunssa-aalloista. Lomien ja flunssa-aaltojen takia työntekijöissä on vajausta tai on ollut pakko palkata tuuraajia yrityksen ulkopuolelta. (Stapenhurst, 2005). Esimerkiksi vuosina 2020–2022 Covid-19 pandemia aiheutti työntekijöiden poissaoloja ja siten myös vaihtelua prosesseihin. Jotta erityisyyistä johtuvat vaihtelut voidaan havaita, täytyy satunnaisvaihtelusta johtuva kohina tunnistaa ensin. (Stapenhurst, 2005). Toimintamalli erityisyyistä johtuvan poikkeaman käsittelyyn on esitetty alla olevassa kuvassa 9.



**Kuva 9.** Erityisyydestä johtuvan poikkeaman käsittelyprosessi (Rantamäki, Tiainen ja Kässi, 2013).

Kuvan 9 mukaan, kun SPC havaitsee häiriön prosessissa, operaattori pyrkii reagoimaan havaittuun poikkeamaan ensin. Operaattorin tehtävänä on joko itse säätää, korjata tai huoltaa prosessia tai poistaa ulkoinen prosessia häiritsevä tekijä tai, jos operaattori ei kykene poistamaan poikkeaman aiheuttanutta syytä, hän on yhteydessä asiantuntijaan tai asiantuntijaryhmään. Kun syy on tiedossa, ongelmanratkaisu siirretään oikealle asiantuntijalle, esimerkiksi sähköasentajalle. Jos poikkeaman syy ei ole tiedossa, ongelmanratkaisutiimi pyrkii löytämään ratkaisun ja poistamaan ongelman. Lopputuloksena poikkeaman aiheuttaja on saatu poistettua ja prosessi toimii jälleen normaalisti. (Rantamäki, Tiainen ja Kässi, 2013).

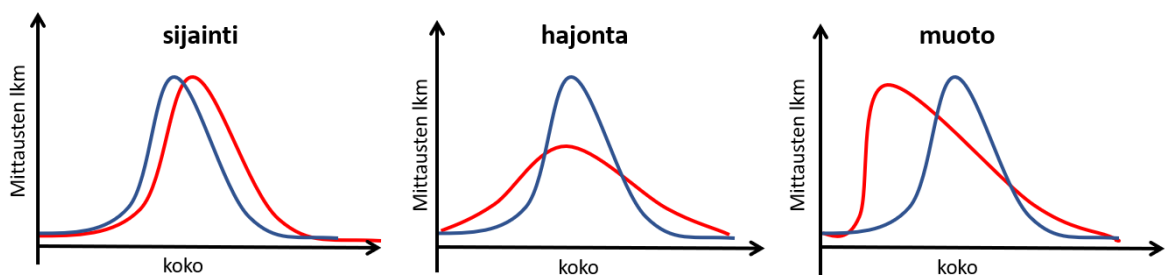
Vaikka SPC:n käytöllä pystytään vähentämään tehtyjä virhesäätöjä, tulee virheitä kuitenkin tapahtumaan. Tehdyt virheet jaetaan kahteen eri tyyppiin, jotka ovat  $\alpha$ - ja  $\beta$ -virheet.  $\alpha$ -virhe, tapahtuu, kun ongelmaan tai poikkeamaan reagoidaan väärin. Prosessia saatetaan alkaa säätää, vaikka ongelma olisi ulkopuolinen tai ongelmaa ei todellisuudessa olisi edes olemassa. Prosessin säätöä ilman varsinaista syytä kutsutaan myös ylioijjaukseksi.  $\beta$ -virhe on virhe, joka tehdään, kun ongelmaan tai poikkeamaan jätetään reagoimatta. Poikkeama prosessissa saatetaan tulkita johtuvan jostain ulkopuolisesta syystä, jolloin siihen ei välttämättä reagoida. Todellisuudessa poikkeama onkin johtunut itse prosessista, jolloin siihen kuuluisi reagoida. Poikkeamaan reagoimatta jättämistä voidaan kutsua myös alioijjaukseksi. Alioijaus

vaikuttaa tuotteen laatuun ja pitkällä tähtäimellä tuotteen laatu saattaa heiketä huomaamatta jatkuvasti, kunnes lopulta asiakkaat eivät enää halua vastaanottaa ja tilata tuotetta. Virheitä on mahdollista vähentää hyödyntämällä SPC-menetelmiä ja käyttämällä ohjauskortteja. (Salomäki, 2003).

## 4.2 Tilastollisen prosessinohjauksen laskenta

Tilastollinen prosessinohjaus perustuu yksinkertaisiin ongelmanratkaisumetodeihin, kuten ohjauskortteihin, Pareto-diagrammiin sekä syy ja seuraus -diagrammeihin, joista ohjauskortit ovat yksi tärkeimmistä tekijöistä onnistuneeseen analyysiin. (Rantamäki, Tiainen ja Kässi, 2013).

Tärkeimmät ja yleisimmät tilastolliset termit ovat keskiarvo, standardijakauma ja määrittelyalue. SPC:n peruseriaatteena on vaihteluiden hallinta ja niiden minimointi. Kun havaintoja ja mittauksia tehdään, tulokset ja mitatut arvot vaihtelevat arvosta toiseen. Kun mitattuja ja tutkittuja arvoja on riittävästi, niiden pohjalta muodostuu normaalijakauma. (Stapenhurst, 2005). Kuvassa 10 on esitetty, miten jakauma voi vaihdella.



**Kuva 10.** Jakauman erilaisia vaihteluita. Y-akselilla on mitausten lukumäärä ja x-akselilla mittauksen koko. (AIAG, 2005).

Kuten kuvassa 10 on esitetty, jakauma voi vaihdella sijainnin, muodon ja hajonnan perusteella (Stapenhurst, 2005). Kun jakauman sijainti muuttuu, muutos voi joko parantaa tai heikentää prosessia. Kun jakauman keskiarvo siirtyy keskeemmälle toleranssialueella, muutos on positiivinen. Jos muutos siirtyy yli toleranssialueen tai lähemmäs rajoja, muutos on negatiivinen ja prosessi vaatii ohjausta ja säätöjä. Jakauman hajonnan levitessä prosessin vaihtelu ja hajonta kasvavat. Silloin prosessin suorituskyky heikkenee ja prosessia tarvitsee säätää. Prosessin vaihtelun luonnetta kuvaa jakauman muoto. Yleisesti prosessin jakaumat ovat harvoin täysin normaalijakautuneita, vaan ne ovat hieman vinoja tai muuten rajoittuneita. Mitä lähempänä jakauman muoto on normaalijakaumaa, sitä paremmin prosessi on hallinnassa. (Salomäki, 2003).

Kun tutkitaan jakauman sijaintia, kolme tärkeintä mittaria ovat keskiarvo, mediaani ja moodi. Keskiarvo on yleisin tilastollinen määre, jota käytetään tutkittaessa jakauman sijaintia. Keskiarvo kertoo kaikkien mitattujen arvojen keskiarvon. Keskiarvon laskenta on esitetty yhtälössä (1). (Stapenhurst, 2005).

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}, \quad (1)$$

jossa

$\bar{x}$  näytteiden tai näyte-erän keskiarvo

$x_i$  mitattu arvo  $i$

$n$  mitattujen arvojen määrä (Stapenhurst, 2005).

Näyte-erien keskiarvo  $\bar{\bar{x}}$  lasketaan yhtälön 1 avulla, mutta näytteiden mitatut arvot korvataan näyte-erien keskiarvoilla  $\bar{x}$ . Tällöin  $n$  kertoo näyte-erien lukumäärän. Määritettäessä koko perusjoukon keskiarvoa, käytetään symbolia  $\mu$ . (Salomäki, 2003).



Mediaani on luku, jossa puolet havainnoista ovat ennen kyseistä arvoa ja puolet arvon jälkeen. Esimerkiksi lukujonon 1, 1, 1, 2, 3, 4, 5 mediaani on 2. Jos tarkasteltavia arvoja on parillinen määrä, arvo on kahden keskimmäisen keskiarvo. Moodi kertoo mitattujen arvojen yleisimmän arvon eli edellisen lukujonon moodi on 1. (Stapenhurst, 2005).

Hajonnan kolme tärkeintä määrettä ovat mittausalue, standardijakauma ja vaihteluväli. Alue määritetään havaintojen minimi- ja maksimiarvojen avulla. Alue,  $R$ , on arvot kyseisten minimi- ja maksimiarvojen välissä. Alueen yhtälö on esitetty yhtälöllä 2.

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (2)$$

jossa

$R$  alue

$x_{max}$  datan maksimiarvo

$x_{min}$  datan minimiarvo (Santos-Fernández, 2013).

Alue on helppo määrittää, mutta mahdolliset poikkeavat havainnot (outliers) vaikuttavat huomattavasti alueen määrittämiseen (Stapenhurst, T., 2005).

Liukuva vaihteluväli eli MR (moving range) saadaan laskettua näytteen ja edellisen näytteen tai näyte-erän keskiarvon ja edellisen näyte-erän keskiarvon avulla. Liukuvan vaihteluvälin laskenta on esitetty yhtälöissä (3) ja (4). (Salomäki, 2003).

$$MR_n = |x_n - x_{n-1}| \quad (3)$$

$$MR_n = |\bar{x}_n - \bar{x}_{n-1}| \quad (4)$$

jossa

$MR_n$  liukuva vaihteluväli

$n$  näytteen tai näyte-erän järjestysnumero (Salomäki, 2003).

Näyte-erän keskihajonta  $s$  on varianssin neliöjuuri, jolloin yhtälö (5) on muotoa

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

jossa

$s$  näyte-erän keskihajonta

$s^2$  varianssi

$n$  näyte-erän koko (Ross, 2017; Salomäki, 2003).

Keskihajonta kertoo, kuinka laajalle alueelle tulokset hajaantuvat. Se ilmaisee tulosten leviämistä keskiarvon molemmille puolille. Mitä suurempi keskihajonta on, sitä laajemmalle alueelle mitatut arvot levittyvät. Usein käytetään näyte-erän keskihajontaa, koska käytännössä aina joudutaan käyttämään rajallista mittausmäärää. Varianssi saadaan määritettyä korottamalla keskihajonta toiseen potenssiin. (Salomäki, 2003). Varianssi kertoo muuttujien keskimääräisen poikkeaman keskiarvosta (Tilastokeskus, 2023). Sitä käytetään mittausdatan mittausepävarmuuksien määrittämisessä. (Salomäki, 2003).

Mittaustulosten kokonaiskeskihajonta,  $s_t$ , saadaan selvitettyä samalla yhtälöllä kuin näyte-erän keskihajonta. Tulosjoukkona on kaikki käytettävissä olevat mittaus tulokset, jolloin kokonaiskeskihajonta kertoo prosessin kaikkien mittaus tulosten hajonnan keskiarvon molem-

min puolin. Kun mittaustuloksia on yli 150 kappaletta, kokonaiskeskihajontaa voidaan käyttää prosessin hajonnan estimaattina  $\hat{\sigma}_t$ . Jos lasketaan keskihajontaa koko perusjoukolle, käytetään yhtälöä (6), joka on muotoa

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (6)$$

jossa

$\sigma$  näyte-erän keskihajonta

$N$  perusjoukon koko (Salomäki, 2003).

Kun keskiarvo ja keskihajonta ovat tiedossa, voidaan mittauksille laskea normaalijakauman tiheysfunktio. Tiheysfunktio lasketaan yhtälöllä (7), joka on

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

jossa

$\mu$  perusjoukon keskiarvo (Salomäki, 2003).

Sanotaan, että data on normaalijakautunut, jos

1. Jakauman korkein kohta on datan keskellä
2. Histogrammin jakauma on kellon muotoinen
3. Histogrammi on symmetrinen (Ross, 2017).

Normaalijakaumassa x-akselin ja käyrän välisen pinta-alan arvo on 1. Datan keskihajonta vaikuttaa käyrän leveyteen ja korkeuteen. Normaalijakaumassa arvojen rajaama alue on verrattavissa todennäköisyyteen (Salomäki, 2003).

Normaalijakaumassa noin 68 % datasta sijaitsee alueella

$$\bar{x} \pm \sigma,$$

95 % alueella

$$\bar{x} \pm 2\sigma$$

ja 99,7 % alueella

$$\bar{x} \pm 3\sigma \text{ (Ross, 2017).}$$

Koska prosessin normaalijakauman laskeminen vaatii paljon aikaa ja laskemista, usein käytetään standardoitua normaalijakaumaa (Salomäki, 2003).

Kun x-akselin muuttujat ovat riippuvaisia y-akselin muuttujista, voidaan kuvaajalle laskea korrelaatiokerroin,  $r$ . Korrelaatiokertoimen yhtälö (8) on muotoa

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)\sigma_x \sigma_y} \quad (8)$$

jossa

$\sigma_x$  muuttujan x keskihajonta

$\sigma_y$  muuttujan y keskihajonta (Ross, 2017).

Korrelaatiokerroin  $r$  on aina arvojen  $-1$  ja  $+1$  välillä. Korrelaatiokertoimen itseisarvo kuvaa muuttujien välistä lineaarisuutta. Itseisarvon ollessa  $1$  muuttujien  $x$  ja  $y$  välillä on täydellinen lineaarisuus. (Ross, 2017). On mahdollista, että tarkasteltavien muuttujien arvoalueet ovat erisuuruisia, esimerkiksi toisen muuttujan arvot vaihtelevat välillä  $100-200$  ja toisen  $1,2-1,4$  välillä. Jotta korrelaatiomatriisin antamat kertoimien arvot ovat mahdollisimman paikkansa-pitäviä, tulee muuttujien arvoalueet normalisoida. Normalisointi tapahtuu yhtälön (9) avulla, joka on muotoa

$$x_i' = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (9)$$

jossa

$x_i'$  normalisoitu  $x_i$ :n arvo

$x_i$  alkuperäinen  $x_i$ :n arvo. (Ajjaj, et al., 2022).

Korrelaatiomatriisi on visuaalinen esitys, jonka avulla voidaan tarkastella muuttujien korrelaatiokertoimia. Korrelaatiomatriisin avulla voidaan selvittää muuttujien välisen korrelaation suuruutta ja onko kyseessä negatiivinen vai positiivinen korrelaatio. Jos korrelaatio on lähellä nollaa, muuttujien välillä ei ole korrelaatiota. Korrelaatiomatriisin avulla on mahdollista tarkastella useiden muuttujien välisiä korrelaatioita samanaikaisesti. (Patil ja Franken, 2021).

Korrelaatiomatriisin avulla valituilla muuttujilla voidaan suorittaa monimuuttujakokeita (DoE, Design of Experiments) prosessin optimoimiseksi. Teollisuudessa monimuuttujakokeiden tavoitteena onkin usein selvittää prosessiparametrien vaikutus tiettyyn muuttujaan, kuten laatuun. Yksi tapa suorittaa monimuuttujakokeita on muuttaa yhtä muuttujaa kerrallaan ja samalla pitää muut muuttujat muuttumattomina. Kyseistä tapaa suorittaa kokeita kutsutaan myös OVAT-kokeiksi (One Variable At a Time). Tapa on kuitenkin melko hidas ja

työläs useamman muuttujan tutkimiseen. Kun muutetaan useampaa muuttujaa samanaikaisesti, täytyy koesuunnitelma olla tarkkaan harkittu. Monimuuttujakoeajattelun kehittänyt Ronald Fisher jo 1920-luvun alussa. Monimuuttujakokeita voidaan käyttää, kun tavoitteena on

- parantaa prosessin tuotantoa ja vakioida prosessia
- parantaa prosessin tuottavuutta
- parantaa prosessin kapasiteettia
- vähentää vaihtelua prosessissa
- vähentää tuotannon kustannuksia
- pienentää suunnitteluun ja kokeiden suorittamiseen käytettävää aikaa
- parantaa ymmärrystä muuttujien välisistä suhteista ja niiden vaikutusta lopputuotteen. (Jiju, 2003).

Teollisuudessa monimuuttujakoeajattelun taustalla on

1. Hypoteesi
2. Testaus, kokeet
3. Analyysi
4. Tulkinta
5. Yhteenvedo. (Jiju, 2003).

Hypoteesina on ajatus tai oletus, joka motivoi kokeiden suorittamiseen. Kokeiden ja testauksen tavoitteena on tutkia mietityn hypoteesin paikkansapitävyyttä. Analysointivaiheessa täytyy ymmärtää koedatan luonnetta ja analysoida kerättyä dataa. Tulkinnassa tulkitaan saatuja tuloksia analysoinnin jälkeen. Yhteenvedossa pohditaan, oliko alkuperäinen hypoteesi totta

vai ei, sekä mietitään, jos on tarvetta suorittaa uusia kokeita. Onnistunut monimuuttujakoe vaatii ryhmätyötä, tietämystä prosessista, tilastollista ajattelua ja tarkkaa suunnittelua. Matemaattisten mallien avulla monimuuttujakokeiden pohjalta on mahdollista löytää prosessille optimiolosuhteet. (Jiju, 2003).

#### 4.2.1 Prosessin tunnusluvut

Tilastollisessa prosessinohjauksessa on erilaisia mittamääreitä. Prosessin kapasiteettia eli suorituskyykyä voidaan mitata  $C_p$  ja  $C_{pk}$  -indekseillä ja prosessin toimintakykyä  $P_p$  ja  $P_{pk}$  -indekseillä.  $C_p$  ja  $C_{pk}$  -indeksejä käytetään lyhyen aikavälin suorituskyyvyn määrittämiseen.  $P_p$  ja  $P_{pk}$  -indeksien avulla voidaan määrittää prosessin pidemmän aikavälin suorituskyykyä eli toimintakykyä. (Senvar ja Sennaroglu, 2016). Edellä mainittuja parametreja,  $C_p$ ,  $C_{pk}$ ,  $P_p$  ja  $P_{pk}$  -indeksejä voidaan käyttää laadun tasaisuuden määrittämiseen ainoastaan normaaleissa prosessiolosuhteissa. Jos prosessissa on häiriöitä, esimerkiksi laitevika tai muu katkos, parametrit eivät ota sitä huomioon. Syynä on se, että häiriö vaikuttaa hajonnan arvoon ja hajonnan lukuarvoa käytetään prosessin tunnuslukujen laskennassa. (Liu et al., 2013).

$C_p$ -luku kertoo prosessin maksimisuorituskyyvyn nykyisellä vaihtelun suuruudella. Se laskeaan yhtälöllä (10), joka on

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (10)$$

jossa

$USL$  ylempi määritysraja

$LSL$  alempi määritysraja (Salomäki, 2003).

USL ja LSL määrittävät rajat, jolloin tuote on hylättävä tai käsiteltävä erikseen ennen hyväksymistä. Jokaisessa prosessissa tai jokaisella prosessiparametrilla ei välttämättä ole molempia lukuarvoja, jolloin kyseessä on prosessin tai parametrin minimi- tai maksimiarvo. (Salomäki, 2003). Jos prosessilla ei ole kuin toinen raja-arvo, prosessin  $C_p$ -luku on merkityksetön (AIAG, 2005).

$C_{pk}$  eli prosessin suorituskykyluku (Process capability index) on tunnettu määre, jonka avulla voidaan arvioida, pystyykö prosessi valmistamaan tuotteita ja palveluita asiakkaan määrittelmien vaatimusten mukaisesti vai ei. (Tsfay, 2021). Prosessin suorituskykyluku määritetään prosessin määrittämissä rajojen, keskiarvon ja normaalijakauman arvojen avulla.  $C_{pk}$ :n laskenta on esitetty yhtälöiden (11) ja (12) avulla, jotka ovat

$$C_{pk} = \frac{\text{Keskiarvon etäisyys lähimpään määrittämissä rajojen} }{\text{Etäisyys keskiarvosta prosessin raja-arvoon}} \quad (11)$$

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{USL - \bar{x}}{3\sigma}, \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma} \right\} \quad (12)$$

(Itay, Yisrael ja Edna, 2009).

Jos halutaan ottaa huomioon prosessin vaihtelun sijainti toleranssiin nähden laskettaessa  $C_{pk}$ -lukua, käytetään epäkeskeisyyden korjauskerrointa  $k$ . Jos kyseessä on prosessi, jossa on kaksipuolinen toleranssi, epäkeskeisyyden korjauskerroin lasketaan yhtälöllä (13), joka on

$$k = \frac{T - \bar{x}}{\frac{1}{2}(USL - LSL)} \quad (13)$$

jossa



$k$	epäkeskeisyyden korjauskerroin
$T$	tavoitearvo (Salomäki, 2003).

Tavoitearvo  $T$  on usein toleranssin keskellä. Kun käytetään epäkeskeisyyden korjauskerrointa,  $C_{pk}$  lasketaan yhtälöllä (14), joka on muotoa

$$C_{pk} = (1 - k)C_p \quad (14)$$

(Salomäki, 2003).

$C_{pk}$ :ta käytetään, kun arvioidaan, kuinka hyvin tuotteen valmistus kohtaa asetetut tavoitteet ja kuinka johdonmukaista se on verrattuna keskimääräiseen suorituskyykyyn.  $C_{pk}$  kertoo parhaan mahdollisen skenaarion prosessille sen suorituskyykyyn verrattuna.  $C_{pk}$ :n avulla on myös mahdollista arvioida prosessin tulevaisuuden suorituskyykyä olettaen, että suorituskyyky on tasaista ajan kuluessa. Mitä korkeampi  $C_{pk}$  -arvo on, sitä suurempi todennäköisyys on, että prosessi kykenee valmistamaan tuotteita, jotka kohtaavat asiakkaiden vaatimusten kanssa. (Tsfay, 2021).

$C_p$ - ja  $C_{pk}$ -lukuja voidaan käyttää vain silloin, kun prosessi on normaalijakautunut ja hallinnassa. Koska prosessi ei koskaan ole täysin normaalijakautunut ja mittausepävarmuudesta johtuen mittauksissa voi esiintyä vaihtelua, tunnusluvut eivät ole tarkkoja vaan suuntaa antavia. Myös erityisyyt, jotka eivät selkeästi erotu prosessin kohinasta, vaikuttavat tunnuslukujen määrittelyyn. Jotta prosessia voidaan pitää hyvänä,  $C_{pk}$  -luku on yli 1,33. (Salomäki, 2003). Yleiset arviot prosessin suorituskyykyyn tasosta on esitetty taulukossa III.

**Taulukko III.**  $C_{pk}$ -luvun arvojen merkityksiä (Salomäki, 2003).

$C_{pk}$ -luvun arvo	Prosessin tilanne
<1,00	heikko, jatkuvasti toleranssin ylityksiä
1,00–1,33	huono, pienetkin muutokset aiheuttavat toleranssin ylityksen
1,33–1,50	kohtuullinen, pienet muutokset mahdollisia
>1,50	luotettava prosessi, muutokset havaitaan herkästi

Kuten taulukossa III on esitetty, prosessi on erittäin luotettava, jos  $C_{pk}$ -luku on yli 1,50. On kuitenkin mahdollista, että nykyajan prosesseissa arvo on jopa 15,0. Yleisesti prosesseissa tavoitteena on vaihtelun vähentäminen. Vaihtelun vähenemisen johdosta  $C_p$ -luvun arvoksi saadaan 1,33 tai suurempi arvo. Vaihtelun vähentämisen jälkeen prosessi ohjataan keskelle toleranssialuetta, jolloin  $C_{pk}$ -luvun arvoksi saadaan 1,33 tai suurempi. Kun kyseiset tavoitteet on saavutettu, prosessia seurataan ja valvotaan ja sitä pyritään parantamaan edelleen. (Salomäki, 2003).  $C_p$ - ja  $C_{pk}$ -lukuja tulisi tarkastella samanaikaisesti. Jos prosessin  $C_p$ -luku on paljon suurempi kuin  $C_{pk}$ -luku, prosessin toimintaa olisi mahdollista kehittää monin tavoin. Mitä lähempänä  $C_{pk}$ -luku on prosessin  $C_p$ -lukua, sitä paremmin prosessi toimii lähellä prosessin maksimisuorituskykyä. (AIAG, 2005).

$P_{pk}$ -luku kertoo prosessin toimintakyvystä (Process Performance index) (Salomäki, 2003). Kun  $C_{pk}$ :n määrittämisessä käytetään prosessin muuttujan keskiarvoa lyhyeltä aikaväliltä,  $P_{pk}$ :n määrittämisessä käytetään keskiarvoa koko prosessin ajalta. (Itay, Yisrael ja Edna, 2009).  $P_{pk}$ -lukua määritettäessä käytetään hajonnan estimaattia, jolloin käytetään yhtälöä (15). Yhtälö (15) on muotoa

$$P_{pk} = \min \left\{ \frac{USL - \bar{X}}{3\hat{\sigma}_t}, \frac{\bar{X} - LSL}{3\hat{\sigma}_t} \right\} \quad (15)$$

(Salomäki, 2003).

Kuten yhtälöstä (15) voi nähdä,  $P_{pk}$ -luku määritetään vastaavalla tavalla kuin  $C_{pk}$ -luku, mutta hajonnan sijasta käytetään hajonnan estimaattia. Laskentaan käytettävistä tuloksista ei myöskään ole poistettu erityisyyttä, koska ne tulkitaan olevan osa prosessia. Erityisyyt vaikuttavat tällöin prosessin toimintakykyyn, mutta oletuksena on, että erityisyyt on tunnistettu ja että ne ovat hallinnassa. Esimerkkeinä edellä mainituista mahdollisista erityisyyksistä ovat lämpötila ja leikkuuterien kuluminen. Kun  $P_{pk}$ -luku on yli 1,67, voidaan prosessin tulkita olevan hyväksyttävällä tasolla. (Salomäki, 2003).

$P_p$ -luku kertoo prosessin maksimitoimintakyvystä. Sen avulla voidaan määrittää, mihin prosessi teoriassa kykenee. Laskentamalli on vastaava kuin  $C_p$ -luvun määrittämisessä, jolloin yhtälö (16) on muotoa

$$P_p = \frac{USL - LSL}{6\hat{\sigma}_t} \quad (16)$$

(Salomäki, 2003).

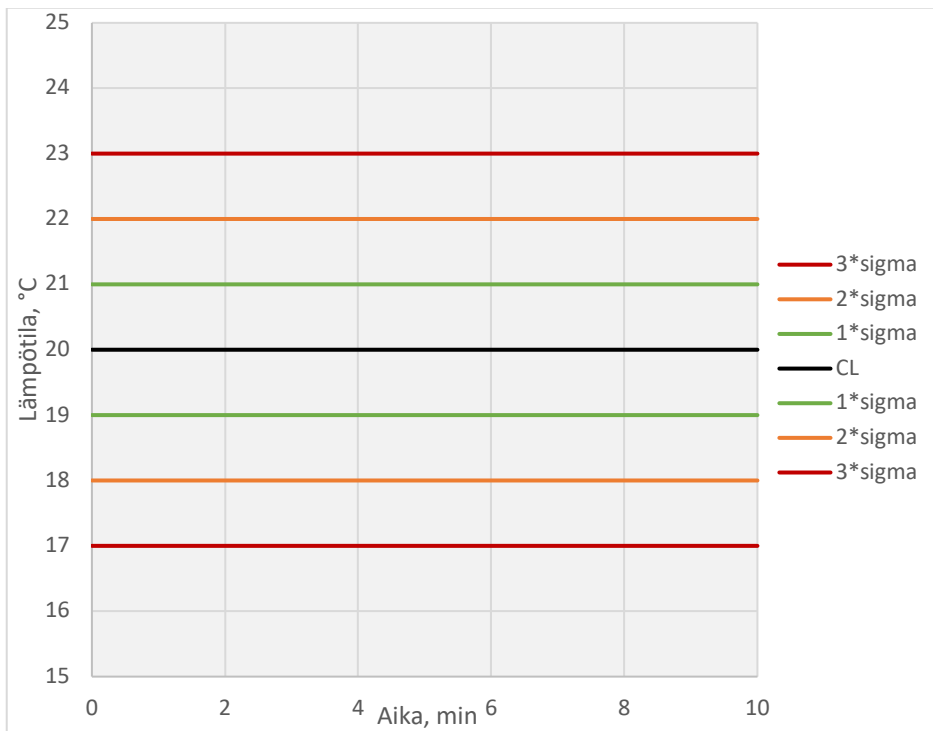
Kuten  $C_p$ - ja  $C_{pk}$ -lukuja, myös  $P_p$ - ja  $P_{pk}$ -lukuja tulisi tarkastella samanaikaisesti.  $P_p$ -luku on käytännössä aina suurempi kuin  $P_{pk}$ -luku, mutta mitä lähemmäksi  $P_{pk}$ -luku saadaan  $P_p$ -lukua, sitä paremmin prosessin toiminta on optimoitu.  $P_p$ -luku on myös merkityksetön kuten  $C_p$ -luku, jos prosessilla on vain minimi- tai maksimiraja-arvo. (AIAG, 2005). SPC:n lasken-

nassa voidaan käyttää myös muita tunnuslukuja prosessin suoritus- ja toimintakyvyn määrittämiseen, mutta edellä mainitut luvut ovat yleisimpiä ja usein kertovat prosessin toiminnasta riittävästi (Salomäki, 2003).

### 4.3 Ohjauskortit

Ohjauskortteja on olemassa erilaisia eri tarkoituksiin. Käytettävän kortin valintaan vaikuttaa data, joka on saatavilla ohjauskortin luomiseen sekä mitä muuttujaa prosessissa on tarkoitus hallita. Ensin on tutkittava eroja diskreetin ja jatkuvan datan välillä. Datan katsotaan olevan diskreettiä dataa, jos se on äärellinen ja laskettavissa. Esimerkkejä diskreetistä datasta on, operaattorien määrä, tuotantolinjojen määrä, operointivirheiden määrä ja viallisten laitteiden määrä. Datan ajatellaan olevan jatkuvaa, jos datajoukko on ääretön ja se on mitattavissa. Esimerkkejä jatkuvasta datasta ovat massa, viskositeetti, pituus ja aika. Erojen löytymisen jälkeen valitaan käytettävän ohjauskortin malli. Kun mietitään, mitä muuttujaa halutaan kontrolloida, tutkitaan Pareto-diagrammia. Pareto-diagrammista havaitaan prosessiin eniten vaikuttavat tekijät, jolloin kyseiset tekijät valitaan kontrolloitaviksi. (Tesfay, 2021).

Ohjauskortissa (Control chart) haluttu muuttuja esitetään useimmiten ajan suhteen. Muuttujana voi olla esimerkiksi lämpötila, pH tai paine, ja arvo voidaan ilmaista muun muassa reaaliaikaisena mitta-arvona, keskiarvona tai poikkeamien määränä. Ohjauskorttien pohjana on aiemmin mainitut  $\sigma$  -rajat. (Neubauer, 2010). Ohjauskorttien viisi pääelementtiä ovat ylempi valvontaraja (UCL), alempi valvontaraja (LCL), ajostandardi (CL), mitatut datapisteet ja ohjauskortin säännöt. Määritetyt valvontarajat ja tavoiteraja ovat keskenään symmetrisiä. Usein x-akseli toimii ajan kuvaajana, jolloin y-akselilla esitetään halutun muuttujan arvoja. Yleensä valvontarajana pidetään arvoa, joka on  $3\sigma$  -etäisyydellä tavoiterajasta. Jos valvontarajojen lisäksi tarvitaan varoitusrajoja, rajana pidetään arvoa, joka on  $2\sigma$  -etäisyydellä tavoiterajasta.  $\sigma$ -rajojen avulla ohjauskortti jakautuu A-, B- ja C-alueisiin, jotka on esitetty kuvassa 11. (Pakdil, 2020).



**Kuva 11.**  $\sigma$ -alueet (Pakdil, 2020).

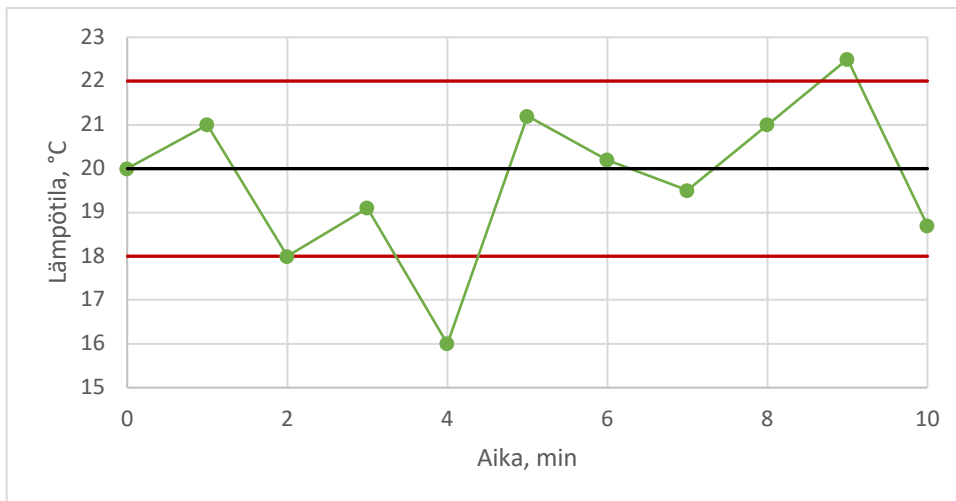
Kuvassa 11 punaiset viivat kuvaavat  $3\sigma$ -rajoja ja oranssit viivat  $2\sigma$ -rajoja. Niiden väliin jäävät alueet ovat A-alueita.  $2\sigma$ -rajojen ja  $1\sigma$ -rajojen väliin jäävät alueet ovat B-alueita. C-alueet ovat ajostandardin (CL) molemmin puolin, joita rajaavat  $1\sigma$ -rajat. (Pakdil, 2020).

Käyttämällä ohjauskortteja voidaan todeta, onko prosessi kontrollissa vai ei. Kun ohjauskortissa havaitaan poikkeamia, jotka ylittävät määritetyt rajat tai kun vaihtelua on liian paljon halutusta tavoitearvosta, prosessi ei ole hallinnassa. Kun tulkitaan ohjauskortteja, yleisimmät tavat, jolloin prosessin ei tulkita olevan kontrollissa, ovat

1. Arvo, joka ylittää  $3\sigma$  -rajan
2. Kaksi peräkkäistä arvoa, jotka ylittävät  $2\sigma$  -rajan
3. Kahdeksan peräkkäistä pistettä, jotka ovat tavoiterajan ylä- tai alapuolella
4. Kuusi peräkkäistä pistettä, jotka liikkuvat poispäin tai kohti tavoiterajaa
5. 14 peräkkäistä pistettä, jotka menevät ylös alas sahakuviona

6. 2/3 pisteistä  $2\sigma$  -rajan yli samalla puolella tavoiterajaa
7. 4/5 peräkkäisistä pisteistä samalla puolella jommalla kummalla puolella tavoiterajaa  $1\sigma$  -rajojen sisäpuolella
8. 15 peräkkäistä pistettä samalla puolella tavoiterajaa  $1\sigma$  -rajojen sisäpuolella
9. Kahdeksan peräkkäistä pistettä  $1\sigma$  -rajojen ulkopuolella samalla puolella tavoiterajaa. (Neubauer, 2010).

Kuvassa 12 on esimerkki mahdollisesta ohjauskortista.



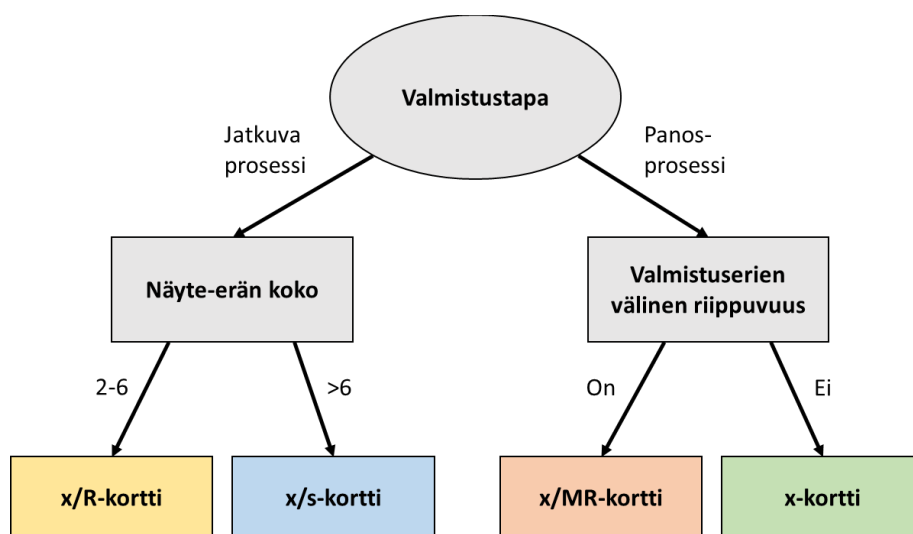
**Kuva 12.** Esimerkki yksinkertaistetusta ohjauskortista.

Kuvassa 12 haluttu tarkasteltava muuttuja on lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ) ja sitä tarkastellaan ajan suhteen (min). Tavoitearvona lämpötilalle on asetettu arvo  $20^{\circ}\text{C}$ , yläraja on  $22^{\circ}\text{C}$  ja alarajaksi lämpötilalle on asetettu arvo  $18^{\circ}\text{C}$ . Tavoitearvo näkyy kuvaajassa mustana viivana ja ylä- sekä alaraja näkyvät punaisina viivoina. Ohjauskortista voidaan havaita, että suurin osa mittaus-tuloksista on rajojen sisällä, lukuun ottamatta ajanhetkeä 4 min ja 9 min. 4 minuutin kohdalla lämpötila on alle alarajan ja 9 minuutin kohdalla yläraja ylittyy puolella asteella. Ohjauskortista voidaan myös huomata, että vaihtelua esiintyy jonkin verran lyhyellä aikavälillä.

Ohjauskorttien käytöstä on paljon hyötyä. Yksi tärkeimmistä on kerääntynyt mittausdata vuosien saatossa, jota voidaan hyödyntää prosessissa edelleen. Ohjauskortit ovat visuaalisia, joten niitä on helppo tulkita. Tärkein ominaisuus ohjauskorteissa on kyky erotella erityisyyt satunnaissyistä, jolloin ongelmaan osataan suhtautua oikealla tavalla. Ohjauskorttien avulla voidaan myös havaita haluttuja positiivisia muutoksia prosessissa. Esimerkiksi, jos tavoitteena on ollut nostaa prosessin nopeutta, nopeuden muutos voidaan havaita ohjauskorteista. Käyttämällä ohjauskortteja on mahdollista jäljittää milloin ja miksi jokin muutos on tapahtunut. Esimerkiksi, jos lämpötila on noussut jatkuvasti ja lopulta ylittää valvontarajan, ohjauskorttien avulla on mahdollista tarkistaa, milloin lämpötilan nousu on alkanut. Viimeisimpänä hyötynä ohjauskorttien käytössä on tapahtumien ennustettavuus. Jotkin tulevat ongelmat on mahdollista havaita historiatietojen avulla jo ennen kuin ne pääsevät tapahtumaan. (Tesfay, 2021).

#### 4.3.1 Ohjauskorttien valinta ja laskenta

Valittaessa sopivaa ohjauskorttia prosessille on tiedettävä millaisesta datasta ja prosessiparametreista on kyse. Kartongin valmistuksessa tutkittavat parametrit ovat muuttujatietoja, kuten lämpötila tai sakeus. Kuvassa 13 on esitetty ohjauskortin valintakaavio, kun kyseessä on muuttujatietopohjainen datajoukko. (Salomäki, 2003).



**Kuva 13.** Ohjauskorttien valintakaavio, kun kyseessä on muuttujatieto (Salomäki, 2003).

Yleisimmät käytössä olevat ohjauskortit jatkuville prosesseille ovat  $x$ - ( $X$ -bar) ja  $R$ - ohjauskortit, joiden yhdistelmä  $x/R$ -kortti kuvassa 13 vasemmassa alakulmassa (Tsfay, 2021). Kuten kuvassa 13 on esitetty, täytyy ensin tietää, onko prosessi jatkuvatoiminen vai panosprosessi. Jos kyseessä on jatkuvatoiminen prosessi, näyte-erän koko vaikuttaa valittavaan ohjauskorttiin. Jos kyseessä on pieni näyte-erä (2-6), sopiva valinta ohjauskortiksi on  $x/R$ -kortti. Jos näyte-erien määrä on suurempi kuin 6, on  $x/s$ -kortti parempi valinta. Panosprosesseissa valittavaan ohjauskorttityyppiin vaikuttaa valmistuserien välinen riippuvuus. Jos valmistuserien välillä on olemassa riippuvuus, paras valinta ohjauskortiksi on  $x/MR$ -kortti. Jos riippuvuutta ei ole, toimii  $x$ -kortti prosessin tarkastelussa parhaiten. (Salomäki, 2003).

Ohjauskorttien valinnassa ja tilastollisen prosessinohjauksen haasteena erityisesti korkeanopeuksissa ja automatisoiduissa prosesseissa on autokorrelaatio. Autokorrelaatiossa muuttujan arvoa verrataan saman muuttujan edelliseen tai sitä edelliseen arvoon. Jos käytetään väärää näytteenottosuunnitelmaa tai väärää ohjauskortteja, on vaikea saada prosessista todellista kuvaa. Näytteenottovälien tulee olla riittävän suuria, jotta prosessissa on ehtinyt tapahtua muutoksia. Esimerkiksi, jos tarkastellaan seoksen pH-arvoa ja otetaan viisi näytettä peräkkäin, pH ei todennäköisesti ole ehtinyt muuttua juurikaan näytteiden välillä. Jos seuraavaksi otetaan tunnin kuluttua myös viisi näytettä, ei näytteiden välillä ole välttämättä suurta eroa, vaikka tunnissa pH on saattanut muuttua merkittävästi. Näyte-erissä alueet ( $R$ ) olisivat



lähellä nollaa, jolloin  $x/R$ -kortin valvontarajat olisivat todella lähellä näyte-erien näytteiden keskiarvojen keskiarvoa  $\bar{\bar{x}}$ . Tällöin  $x/R$ -kortissa suurin osa näytteistä saattaisi olla valvontarajojen ulkopuolella. Autokorrelaatio tulee ottaa huomioon mittausten suunnittelussa ja ohjaukskorttityypin valinnassa. (AIAG, 2005).

#### 4.3.2 $\bar{X}$ - ja $R$ -kortit

$\bar{X}$ -kortti on malli, jossa prosessin osa-alueiden keskiarvot esitetään ajan suhteen.  $R$ -kortti on kuvaaja, jossa osa-alueiden data-alueen muutokset esitetään ajan suhteen. On myös mahdollista esittää  $\bar{X}$ -kortti ja  $R$ -kortti samassa kuvaajassa, jolloin kyseessä on  $x/R$ -kortti.  $x/R$ -kortin laskennassa on ensin laskettava keskiarvot  $x$ - ja  $R$ -kuvaajille. Keskiarvojen yhtälöt on esitetty kaavoissa (17–20), jotka ovat

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_m}{m} \quad (17)$$

$$\bar{x} = \left( \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \right) \quad (18)$$

jossa

$\bar{\bar{x}}$             näyte-erien keskiarvojen keskiarvo

$\bar{x}$              näyte-erän keskiarvo

$n$               näyte-erän näytteiden lukumäärä

$m$               näyte-erien lukumäärä ja

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m} \quad (19)$$

$$R_1 = \max(x_1 \dots x_n) - \min(x_1 \dots x_n) \quad (20)$$

jossa

$\bar{R}$  näyte-erien alueiden keskiarvo

$R_m$  näyte-erän alue. (Salomäki, 2003).

Ohjauskorttien valvontarajat ovat oleellisessa osassa korttien käytössä.  $3\sigma$ -rajojen sijasta ohjauskorteissa käytetään myös tarkempia, liitteessä A esitettyjä kertoimia. Eri ohjauskorteilla on eri kertoimet valvontarajojen laskemiseen.  $x/R$ -korttien valvontarajat lasketaan kaavoilla (21–25).  $x$ -ohjauskortin valvontarajat lasketaan yhtälöillä (20) ja (21), jotka ovat muotoa

$$UCL_x = \bar{\bar{x}} + A_2\bar{R} \quad (21)$$

$$LCL_x = \bar{\bar{x}} - A_2\bar{R} \quad (22)$$

jossa

$A_2$  taulukosta (liite A) näyte-erän koon mukaan valittava kerroin (Salomäki, 2003).

Näyte-erän koon mukaan valittava kerroin  $A_2$  on ennalta määriteltä. Kerroin  $A_2$  ja muut ohjauskortteihin vaadittavat kertoimet on esitetty liitteessä A, jonka lähteenä on käytetty AIAG:n SPC:n opaskirjaa (2005).

$R$ -kortin rajat lasketaan kaavoilla (23–25), jotka ovat muotoa

$$UCL_R = D_4\bar{R} \quad (23)$$

$$LCL_R = D_3\bar{R} \quad (24)$$

$$LCL_R = 0, \text{ jos } n \leq 6 \quad (25)$$

jossa

$D_3$  näyte-erän koon mukaan valittava kerroin (liite A)

$D_4$  näyte-erän koon mukaan valittava kerroin (liite A) (Salomäki, 2003).

Jos näyte-eriä on kuusi tai vähemmän, kertoimen  $D_3$  arvo on niin pieni, ettei sitä ole määritetty. Tällöin arvona käytetään nollaa. Kun halutaan laskea prosessin maksimisuorituskykylukua tai suorituskykylukua ( $C_p$  tai  $C_{pk}$ ), käytetään kappaleessa 4.2 esitettyjä kaavoja (10) ja (12). Erona on, että  $\sigma$ :n sijasta käytetään perusjoukon keskihajonnan laskettua estimaattia eli  $\hat{\sigma}$ -arvoa. Perusjoukon keskihajonnan laskettu estimaatti saadaan yhtälöllä (26), joka on muotoa

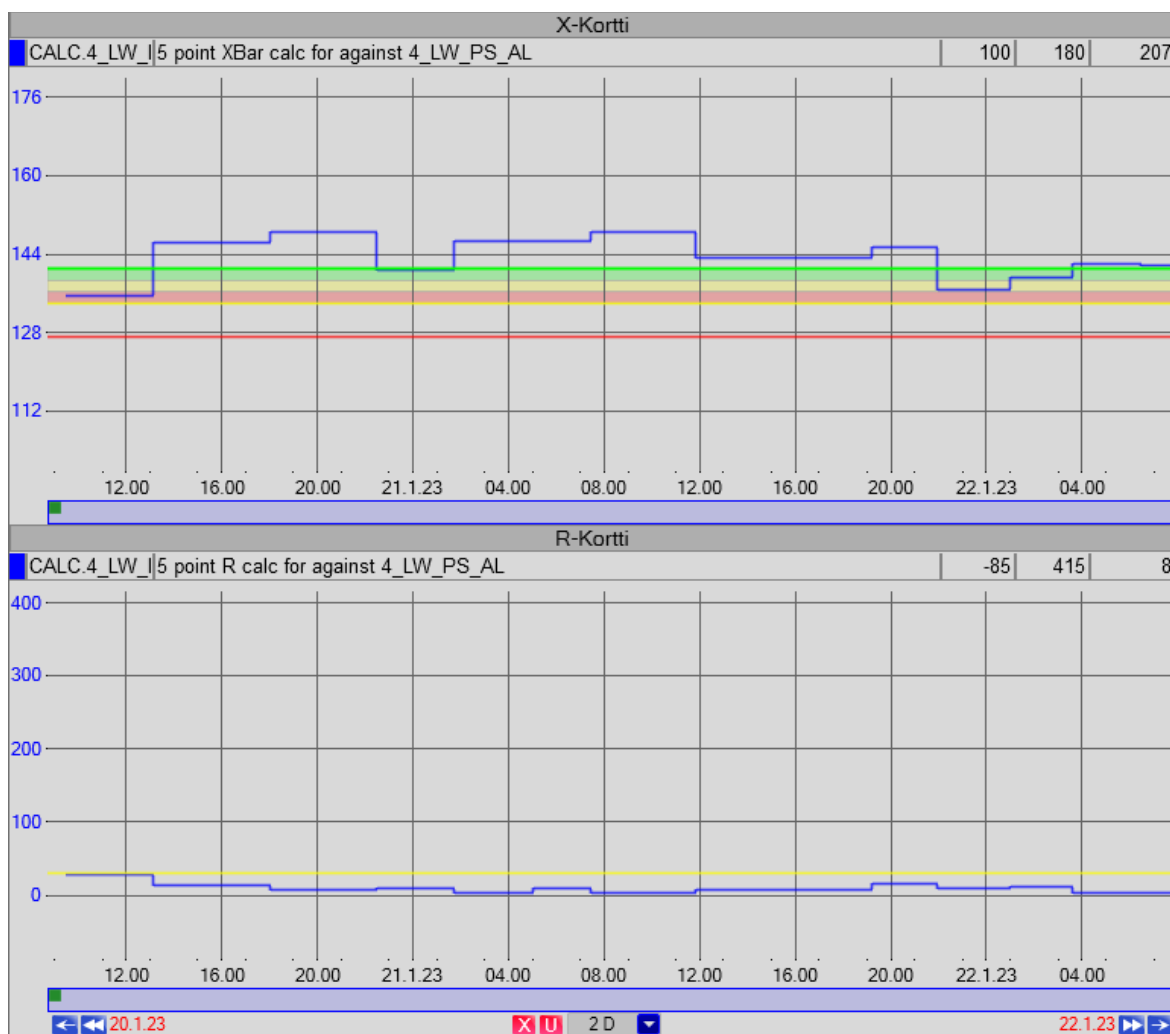
$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (26)$$

jossa

$\hat{\sigma}$  perusjoukon keskihajonnan laskettu estimaatti

$d_2$  näyte-erän koon mukaan valittava kerroin (liite A) (Salomäki, 2003).

Tutkimalla  $x$ - ja  $R$ -kortteja samanaikaisesti on mahdollista havaita, kuinka paljon prosessissa on vaihtelua ja mihin suuntaan vaihtelua on. (Tesfay, 2021).  $x/R$ -korttia voidaan käyttää, kun näyte-erä on melko pieni (2–6) ja näyte-erien ryhmittely on mahdollista ja järkevää. Yksittäiset poikkeamat erottuvat kortissa melko selvästi. (Salomäki, 2003). Esimerkki  $x$ - ja  $R$ -kuvaajasta on esitetty alla olevassa kuvassa 14.



**Kuva 14.** x- ja R-kortit. x-kortissa punainen viiva on alempi määritysraja (LSL), keltainen alempi valvontaraja (LCL), vihreä ajostandardi (CL) ja sininen kuvaa valitun muuttujan viiden peräkkäisen mittauseron muutosta ajan suhteena. R-kortissa keltainen viiva on ylempi valvontaraja ja sininen on näyte-erien keskiarvojen muutokset ajan suhteena.

Kuvassa 14 ylemmässä kuvaajassa (x-kortti) on viiden peräkkäisen näytteen keskiarvot muutokset tietyllä ajanjaksolla. Punainen viiva kuvastaa LSL-rajaa (127) ja keltainen viiva LCL-rajaa (134). Vihreä viiva kuvastaa ajostandardia eli tavoitearvoa. Kyseessä on muuttuja, jolla ei ole määritelty maksimirajoja (UCL, USL). Kuvassa 14 alemmassa kuvaajassa (R-kortti) on esitetty näyte-erien alueiden keskiarvojen muutokset tietyllä ajanjaksolla. Koska muuttujia on alle kuusi, ei R-kortille ole määritelty alempaa valvontarajaa. Ylempi valvontaraja (UCL) on määritetty muuttujalle. CL:n arvo on 30.

### 4.3.3 $\bar{X}$ - ja $s$ -kortit

$S$ -kortti on kuvaaja, jossa esitetään prosessin osa-alueiden standardijakauman muutokset ajan kuluessa. Jos osa-alueen mittausten määrä kasvaa jatkuvasti,  $R$ -kortti ei ole enää sopiva datan tarkasteluun. Tällöin  $s$ -kortti soveltuu datan tarkasteluun paremmin, koska mittausten määrän kasvu ei vaikuta standardijakaumaan niin voimakkaasti kuin se vaikuttaa alueen määrittämisessä. Kun käytetään  $s$ -korttia, osa-alueen joukon tulee olla yli 10 ja dataa tulee kerätä enemmän verrattuna  $x$ - ja  $R$ -kortteihin. Kerätyn datan tulee olla normaalijakautunut ja datan jatkuvaa. (Tefay, 2021). Myös  $s$ -korttia on hyvä tarkastella yhdessä  $x$ -kortin kanssa.  $x$ -kortin rajojen laskenta tapahtuu samalla tavalla kuin  $x/R$ -kortissa.  $s$ -korttia varten tarvitaan keskihajonnan keskiarvo, joka lasketaan yhtälöllä (27). (Salomäki, 2003). Yhtälö (26) on muotoa

$$\bar{s} = \frac{s_1 + s_2 + \dots + s_m}{m} \quad (27)$$

jossa

$\bar{s}$  näyte-erien keskihajontojen keskiarvo (Salomäki, 2003).

$x/s$ -kortin valvontarajat lasketaan kaavoilla (28–32), joista  $x$ -kortin valvontarajojen yhtälöt ovat muotoa

$$UCL_x = \bar{x} + A_3 \bar{s} \quad (28)$$

$$LCL_x = \bar{x} - A_3 \bar{s} \quad (29)$$

jossa

$A_3$  näyte-erän koon mukaan valittava kerroin (liite A) (Salomäki, 2003).

$s$ -kortin valvontarajat lasketaan kaavoilla (30–32), jotka ovat muotoa

$$UCL_s = B_4 \bar{s} \quad (30)$$

$$LCL_s = B_3 \bar{s} \quad (31)$$

$$LCL_s = 0, \text{ jos } n < 6 \quad (32)$$

jossa

$B_3$  näyte-erän koon mukaan valittava kerroin (liite A)

$B_4$  näyte-erän koon mukaan valittava kerroin (liite A) (Salomäki, 2003).

Kun näyte-eriä on vähemmän kuin 6 kappaletta,  $B_3$ -kertoimen arvo on niin pieni, että kertoimena käytetään arvoa 0. Prosessin maksimisuorituskyky ja suorituskyky lasketaan samalla tavalla kuin  $x/R$ -korteissa, mutta perusjoukon keskihajonnan lasketun arvion laskutapa poikkeaa hieman edellä mainitusta.  $x/s$ -kortissa  $\hat{\sigma}$ -arvo lasketaan yhtälöllä (33), joka on muotoa

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{s}}{c_4} \quad (33)$$

jossa

$c_4$  näyte-erän koon mukaan valittava kerroin (liite A) (Salomäki, 2003).

$x/s$ -kortissa näyte-erien tulee olla kohtalaisen suuria mutta myös helposti ryhmiteltävissä, jotta  $x/s$ -kortti toimii parhaalla mahdollisella tavalla (Salomäki, 2003).

#### 4.3.4 $x/MR$ -kortti

Yksilölliset ja liikkuvan alueen ohjauskortit eli  $I-MR$  tai  $x-MR$ -kortit (Individual and Moving Range) on kehitetty erityisesti teollisuuden tarpeisiin Walter Shewartin toimesta (Tefay, 2021).  $x/MR$ -kortit ovat käteviä silloin, kun näyte-eriä ei ole saatavilla tai ne eivät kertoisi todellista kuvaa prosessin toiminnasta. Tällöin näyte-erien tilalla käytetään vain yksittäisiä näytteitä, jolloin  $x/MR$ -kortti soveltuu paremmin kuin  $x/R$ -kortti. (Salomäki, 2003). Yksilöllinen kuvaaja ( $I$ -chart) näyttää datapisteet säännöllisellä aikavälillä. Liikkuvan alueen kortti ( $MR$ -chart) näyttää säännöllisin väliajoin yksikködatapisteet, jossa yksi datapiste kertoo prosessialueen nykyisen arvon ja edellisen arvon välisen suuruuden.  $I-MR$ - tai  $x-MR$ -kortissa on yhdistetty yksilöllinen ja liikkuvan alueen kuvaaja samaan kuvaajaan. (Tefay, 2021). Laskennassa  $x$ -kortin keskiarvo lasketaan keskiarvon yhtälöllä (1).  $MR$ -kuvaajan keskiarvo lasketaan yhtälöllä (34), joka on

$$\overline{MR} = \frac{MR_1 + MR_2 + \dots + MR_{m-1}}{m-1} \quad (34)$$

jossa

$\overline{MR}$  liukuvien vaihteluvälien keskiarvo

$m$  yksittäisten arvojen lukumäärä (Salomäki, 2003).

$x$ -kortin valvontarajat saadaan samaan tapaan kuin muissakin ohjauskorteissa.  $x$ -kortin valvontarajat lasketaan kaavoilla (35) ja (36), jotka ovat muotoa

$$UCL_x = \bar{x} + E_2 \overline{MR} \quad (35)$$

$$UCL_x = \bar{x} + E_2 \overline{MR} \quad (36)$$

jossa

$E_2$  näyte-erän koon mukaan valittava kerroin. (Salomäki, 2003).

*MR*-kortissa lasketaan vain yksi valvontaraja, joka on ylempi valvontaraja. Luonnollisessa vaihtelussa alarajana pidetään arvoa 0, koska peräkkäiset mittausarvot voivat olla yhtä suuria ilman erityisyyttä. *MR*-kortissa ylempi valvontaraja lasketaan yhtälöllä (37), joka on muotoa

$$UCL_{MR} = D_4 \overline{MR} \quad (37)$$

(Salomäki, 2003).

*x/MR*-kortissa näkee jokaisen datapisteen erikseen eikä keskiarvona tai muuna laskettuna arvona, mikä on usein haluttua teollisuudessa. Vaihtelut on nopeasti havaittavissa ja erityisyyttä johtuvat vaihtelut erotetaan nopeasti satunnaisvaihtelusta. *x-MR*-kortti kertoo, milloin prosessi ei ole kontrollissa. *x-MR*-kortit ovat erittäin käteviä, kun osa-alueena on yksikköprosessi. Kyseiset kuvaajat ovat myös erittäin hyödyllisiä silloin, kun on haastavaa kerätä suuria näytteitä. Kuvaajaa käytetään erityisesti tarkasteltaessa panosprosesseja. (Tsfay, 2021).



#### 4.4 DataPARC

DataPARC on Capstone Technologyn luoma ohjelma, joka sopii tehdasprosessien datan mallintamiseen ja tarkasteluun. PARCview on asiakkaan ohjelma, jolla asiakas kykenee seuraamaan, hakemaan ja analysoimaan tuotantoprosessin dataa. (dataPARC, 2022a).

Capstone Technology -yritys on perustettu vuonna 1997. Yrityksen tavoitteena oli jakaa dataPARC -sovellusta teollisuusyrityksille, jotta niillä olisi mahdollisuus saavuttaa tehokkaampia tuotantoprosesseja. 1999 dataPARC otettiin käyttöön Yhdysvalloissa Oregonissa paperitehtaan tuotantoprosessin optimoimiseksi. 2016 dataPARC yhdistyi BTG Groupin kanssa. Kolme vuotta myöhemmin (2019) Voith Group osti BTG Groupin. Tällä hetkellä dataPARC -sovellus on käytössä yli 800 teollisuusyrityksessä. (dataPARC, 2022b).

Yksi dataPARC -sovelluksen käyttötavoista on luoda prosessimuuttujille ohjauskortteja, joiden avulla prosessia on helpompi hallita. Valita prosessimuuttujille tavoitearvot sekä ylä- ja alarajat, joiden välissä muuttujan arvon tulisi olla prosessin aikana. Muuttujat voivat kuulua laatumuuttujiin, prosessin toimintaan tai muihin mahdollisiin muuttujiin. Esimerkkejä muuttujista on koneen nopeus, kosteusprosentti, lämpötila ja pH. Tuotantoa seurataan rajoja vastaan. Rajat voidaan luoda jokaiselle kartonkilaadulle erikseen. (Stora Enso, 2022a).

## 5 TILASTOLLISEN PROSESSINOHJAUKSEN HYÖDYNTÄMINEN INKEROISTEN TEHTAALLA

Perinteisesti paperi-, sellu- ja kartonkitehtaissa tuotanto- ja laatutavoitteisiin pyrkiessä vähäpätöisemmät asiat jätetään usein huomioimatta ja korjaamatta. On esimerkiksi mahdollista, että mittaristot eivät toimi täydellisesti tai ne eivät ole riittävän tarkkoja. On myös tyypillistä, että jokaisella operaattorilla ja vuorolla on omat tapansa ohjata prosessia, jolloin vaihtelua syntyy sekä vuoron sisällä että vuorojen välillä. (Rantamäki, Tiainen ja Kässä, 2013).

Kartongin laatuun vaikuttavia tekijöitä on useita. Tarkkailtavia ominaisuuksia, jotka vaikuttavat kartongin laatuun ovat neliömassa, paksuus, kosteus, päällystemäärät, värisävy, vaaleus, formaatio ja kiilto. Inkeröisten Kartonkitehtaalla on olemassa laatusäätöjärjestelmä eli QCS-järjestelmä (Quality Control System), jossa prosessitietokone ohjaa kartonkikoneessa olevia rataprofiilin mittapalkkeja. Prosessitietokone kerää ja analysoi mittaustietoja, joiden pohjalta se suorittaa säätötoimenpiteet. (Stora Enso, 2019a).

### 5.1 DataPARC:n käyttö

DataPARC -sovelluksessa kartonkikoneen ajoille on luotu määritys- ja valvontarajoja kartongin tuotannon prosessimuuttujille ja kartongin eri ominaisuuksille, kuten koneen nopeudelle, kartongin neliömassalle ja paksuudelle sekä pinnan sileydelle. Jos jotain laatumuuttujaa halutaan parantaa, täytyy prosessimuuttujia säätää toisiinsa asetuksiin. Esimerkiksi laatumuuttujaksi voidaan valita pinnan sileyty tai rungon formaatio, joiden muuttumista seurataan samalla kun säädetään esimerkiksi koneen nopeutta, rungon sakeutta ja runkoperälaatikon huuliaukon kokoa. Prosessimuuttujat eli koneen nopeus, rungon sakeus ja runkoperälaatikon huuliaukon koko toimivat input-muuttujina, joita muuttamalla halutaan muuttaa output-muuttujaa eli tässä tapauksessa laatumuuttujaa, kuten kartongin formaatiota. Input-muuttujia voi olla useita ja niistä tulee löytää muuttujat, jotka vaikuttavat eniten haluttuun output-

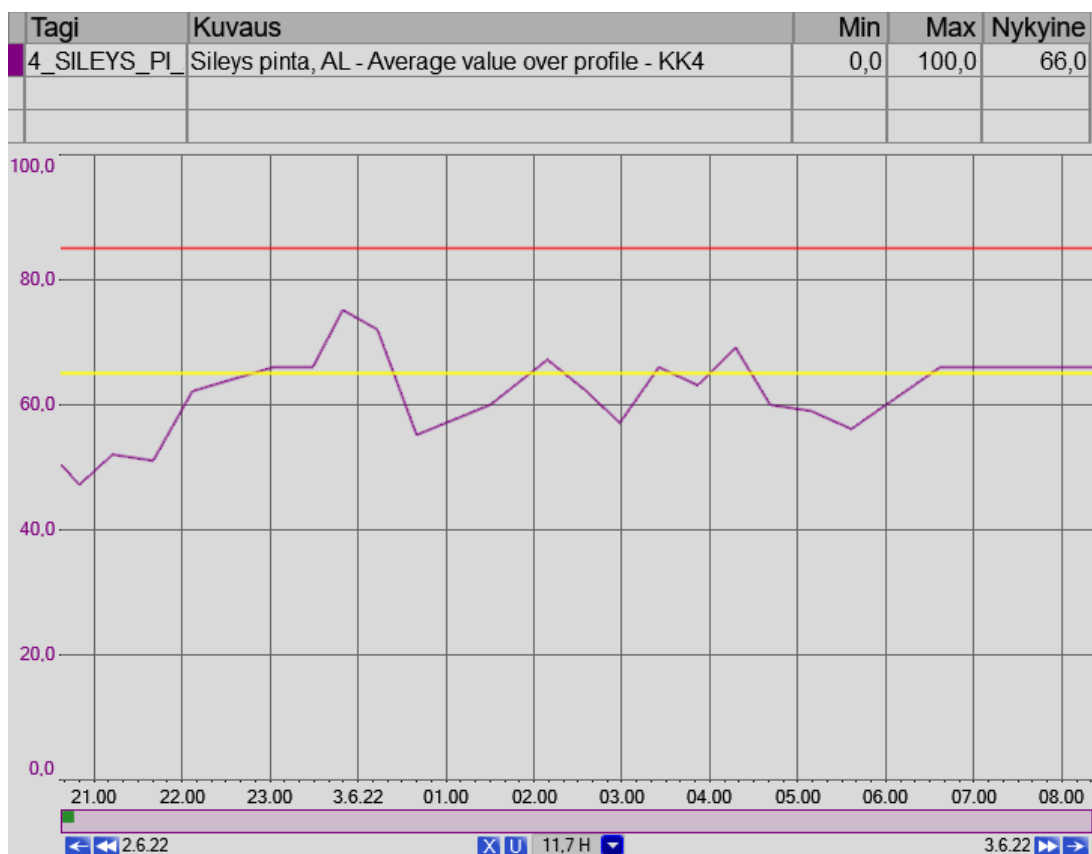
muuttujaan. Input-muuttujille tulee tämän jälkeen luoda ajostandardit, joita seuraamalla on mahdollista saada output-muuttuja halutulle tasolle ja vakioida prosessivaihtelua. Taulukossa IV on esimerkki käytössä olevasta ajostandardista.

**Taulukko IV.** Esimerkki dataPARC:n ajostandardinäytöstä.

Kuvaus	Nykyinen	LSL	LCL	TAR	UCL	USL	edellinen kone-rulla
neliö-massa	239,0	230,4	233,0	237,0	240,0	249,6	239,0
koneen nopeus	609,9	-	-	-	-	-	609,9
sileys, pinta	66			65	85		
paksuus	456	437	452	455	465	473	456

Taulukon IV ensimmäisessä sarakkeessa näkyy ajossa olevan laadun arvot. LSL ja USL ovat ajon ala- ja ylämäärittäjärajat. Jos raja ylitetään, ajo täytyy pysäyttää ja valmistettu kartonki ajaa hylyksi. LSL- ja USL-rajat ovat asiakkaan määrittämiä rajoja. Kun rajat ylittyvät, asiakkaan laatuvaatimukset eivät toteudu. LCL ja UCL ovat ohjauksen ala- ja ylärajat (hälytysrajat). Jos rajat ylittyvät, ylitys aiheuttaa hälytyksen ja prosessia tulee säätää. TAR on ajon tavoitearvo kyseisellä muuttujalla. Oikeassa reunassa olevassa sarakkeessa näkyy edeltävän saman laadun ajon arvot.

Haluttua ajon ominaisuutta voi myös tarkastella kuvaajana. Kuvassa 15 on esitetty esimerkki ohjauskortista.



**Kuva 15.** Esimerkki dataPARC:n ohjauskortista.

Kuvassa 15 näkyy pinnan sileyden muutos 11,7 tunnin aikana. Keltainen viiva kuvaa tavoitearvoa ja punainen viiva ylämääritysrajaa. Kyseisellä muuttujalla ei ole alempaa määritysrajaa. Violetti käyrä kuvaa muuttujan arvoja. Kuvasta 15 voidaan huomata, että pinnan sileys on pysytellyt lähellä tavoitearvoa koko 11,7 tunnin ajan eikä ole ylittänyt punaista määritysrajaa kertaakaan.

DataPARC-sovelluksen avulla on myös mahdollista tarkastella korrelaatiomatriiseja halutuilla muuttujilla Excelin avulla. Käyttämällä korrelaatiomatriisia pystytään tutkittavien prosessimuuttujien määrää karsimaan, jotta muuttujat, joilla on oletettavasti suurin vaikutus kartongin laatuun, voidaan valita. Valittujen muuttujien avulla suoritetaan koeajoja, joilla pyritään löytämään optimaaliset olosuhteet prosessille ja takaamaan taivekartongin hyvä laatu tulevaisuudessa.

Kartongin formaatio on yksi tärkeimmistä taivekartongin laatuun vaikuttavista tekijöistä, koska formaation avulla pystytään vaikuttamaan myös muihin taivekartongin ominaisuuksiin. DataPARC-sovelluksen avulla formaatiota ja siihen vaikuttavia prosessimuuttujia on helppo tutkia ja seurata niiden muutoksia ajan kuluessa. Kun formaatio ajostandardit ovat ajan tasalla ja toimivia, kartongin laatua on helpompi ylläpitää parempana vain seuraamalla luotuja ajostandardeja. Jotta formaatiota saataisiin pidettyä hyvänä mahdollisimman helposti, prosessimuuttujia, jotka vaikuttavat formaatioon, tulisi olla valittuna mahdollisimman vähän. Mitä vähemmän prosessimuuttujia on tarvetta seurata, sitä helpompi niiden asetusarvoja on seurata. Valittujen prosessimuuttujien tulisi olla niitä, joilla on suurin vaikutus formaatioon. Vaikutuksen voimakkuutta voi tutkia korrelaatiomatriisin ja koeajojen avulla.

#### 5.1.1 Korrelaatiomatriisi ja muuttujien valinta

DataPARC:n Excel -sovellusta hyödynnettiin muuttujien valinnassa. Excel -sovelluksen avulla pystyttiin luomaan tag-lista valituista prosessimuuttujista ja tutkimaan muuttujien välisiä korrelaatioita. Esimerkki korrelaatiomatriisista on esitetty taulukossa V.



naisuuteen, pois tarkastelusta ja jäljelle jäävistä muuttujista on helpompi valita todennäköisemmin eniten vaikuttavat muuttujat muiden parametrien joukosta. Kun tutkimisen kohteena on taivekartongin formaatio ja flokkikoko, suurin vaikutus kyseiseen laatuparametriin on runko-osalla. Muun muassa runkoperälaatikon paine, huuliaukon koko ja huuliero vaikuttavat suoraan taivekartongin flokkikokoon. Korrelaatiomatriisin avulla saadaan rajattua koeosassa tutkittavien muuttujien määrää monimuuttujakokeita varten. Oletuksena on, että valitut muuttujat vaikuttavat eniten taivekartongin flokkikokoon. Tavoitteena on pienentää flokkien määrää ja kokoa, jolloin taivekartongin tasaisuutta saadaan parannettua. Kun taivekartongin pilvisuus eli epätasaisuus vähenee, sen ulkonäkö ja laatu paranevat. Monimuuttujakokeiden avulla pyritään todistamaan edellä mainittujen muuttujien vaikutus taivekartongin laatuun ja samalla pyritään löytämään optimiolosuhteet valmistusprosessille.

## KOEOSA

Tässä osiossa keskitytään tutkimaan taivekartongin formaatiota ja siihen vaikuttavia muuttujia sekä SPC:n soveltuvuutta taivekartongin laatuun. Tutkittavana laatuna käytetään Tambrite -laatuja. Valituilla muuttujilla suoritetaan monimuuttujakokeita eli Taguchi-kokeita, joiden avulla pyritään löytämään eniten formaatioon vaikuttavat prosessimuuttujat, hälytysrajat muuttujille ja optimaaliset olosuhteet valmistusprosessille. Koeosassa pyritään myös todistamaan SPC-menetelmän toimivuus ja helppous taivekartongin valmistusprosessin optimoinnissa ja laadun parantamisessa. DataPARC-sovelluksen käyttöönotossa tarkastellaan uuden ohjelman käyttöönoton vaiheita ja haasteita tehdasympäristössä. Koeajot suoritetaan laaduilla TB220 ja TB270. Koska DataPARC -sovellusta ei vielä ollut kartonkikoneella käytössä koeajojen aikana, ohjaukorteja ei myöskään ollut käytössä koeajojen aikana. Tästä syystä myös koeajot painottuivat enemmän formaatioon vaikuttavien prosessimuuttujien etsimiseen ja niiden korrelaatioon kartongin formaatioon nähden. Tuloksia käytetään DataPARC-sovelluksen kehittämiseen, jotta ohjelmasta saadaan kartonkikoneella entistäkin toimivampi.



## 6 PROSESSIMUUTTUIJEN VALINTA

Tavoitteena koeajoissa oli parantaa kartongin formaatiota. Koeajoja varten tutkittiin prosessimuuttujia, jotka laskennallisesti korreloivat flokkikoon kanssa. Prosessimuuttujia eli input-muuttujia muuttamalla pyrittiin vaikuttamaan output-muuttujaan eli kartongin formaatioon. Output-muuttujana koeosassa käytettiin kartongin flokkikoon kanssa myös kartongin formaation variability -muuttujaa, jolla seurataan formaation vaihtelevuutta. Valittujen muuttujien tuli sijaita kartonkikoneella, joten esimerkiksi hiokkeen laadun vaikutusta ei tutkittu. Muuttujien tuli myös olla sellaisia, joita oli melko helppo ja nopea säätää suuntaan tai toiseen. Muuttujien rajauksessa käytettiin DataPARC -sovellusta.

### 6.1 Muuttujien valinta DataPARCin avulla

Muuttujien valinta lähti liikkeelle kokeilemalla eri runko-osan eri prosessimuuttujia. Muuttujien valinnassa hyödynnettiin DataPARCin Excel -sovellusta, jossa haluttua laatumuuttujaa pystyttiin vertaamaan prosessiparametreihin. Koeosassa tutkitaan prosessimuuttujien vaikutusta kartongin flokkikokoon. Ensimmäisessä korrelaatiomatriisissa tutkittiin kaikkien runko-osan muuttujien vaikutusta flokkikokoon. Korrelaatiomatriisissa prosessimuuttujalla on positiivinen kerroin, jos suurettamalla muuttujan arvoa myös flokkikoko kasvaa. Koska formaatio on parempaa, mitä pienempi kartongin flokkikoko on, on hyvä formaatio kääntäen verrannollinen kartongin flokkikokoon ja formaation vaihtelevuuteen nähden.

Korrelaatiomatriisin avulla prosessimuuttujien määrää pystyttiin vähentämään. Kun flokkikokoon vaikuttavien muuttujien määrää saatiin karsittua, seuraavaksi DataPARCin avulla etsittiin melko pitkä ajojakso tiettyä laatua. Valittu kartonkilaatu oli TB270. Korrelaatiomatriisin tutkimisessa käytetty ajanjakso oli 11.7.2022 klo 16:30 – 13.7.2022 klo 7:15. Kun muuttujien tutkimisessa käytettiin samaa laatua ja samaa ajojaksoa, satunnais- ja erityisyyvaihtelun vaikutusta tuotantoon pystyttiin rajaamaan ja muuttujien vaikutusta flokkikokoon

oli helpompi tarkastella. Lopulta muuttujien määrää saatiin karsittua kymmeneen prosessi-  
muuttujaan, jotka on esitetty alla olevassa taulukossa VI.

**Taulukko VI.** Kartongin flokkikokoon vaikuttavia prosessimuuttujia.

	IK.ABB_MES.4_FORMCDSIZE_QCS_ReelVal.P(StationCode=KK4,PROPERTY_PROFILE=REEL	IK.KK4-DNA.34-XI-7309.1:av COL6-POPEN NOPEUS, M	IK.KK4-DNA.34-PIC-3210:me COL7-RUNKOPERÄL. PAINE, M	IK.KK4-DNA.34-SYIC-3217:me COL8-RUNKOPERÄL.S/V SÄÄTÖ, M	IK.KK4-DNA.34-ZIC-3214:me COL9-RUNKOPERÄL. H-AUKKO, M	IK.KK4-DNA.34-ZIC-3215:me COL10-RUNKOPERÄL. HUULIERO, M	IK.KK4-DNA.34-LIC-3211:me COL11-RUNKOPERÄL. PINTA, M	IK.KK4-DNA.34-PIC-3420:me COL12-RUNKO TYHJÖFOIL.IMU, M	IK.KK4-DNA.34-QIC-2420:me COL13-RUNGON VIIRAV.SAKEUS, M	IK.KK4-DNA.34-FIC-3233:me COL14-G514 RUNKOMAS. MÄÄRÄ, M	IK.KK4-DNA.34-PIC-3416:me COL15-RUNKO, TASOIMUT, M
IK.ABB_MES.4_FORMCDSIZE_QCS_ReelVal.P(StationCode=KK4,PROPERTY_PROFILE=REEL		0,65	0,65	-0,22	0,35	-0,20	0,10	-0,21	-0,20	0,79	-0,03
IK.KK4-DNA.34-XI-7309.1:av COL6-POPEN NOPEUS, M	0,65		0,99	-0,35	0,77	0,34	0,17	-0,13	-0,28	0,81	-0,06
IK.KK4-DNA.34-PIC-3210:me COL7-RUNKOPERÄL. PAINE, M	0,65	0,99		-0,32	0,75	0,32	0,18	-0,10	-0,27	0,81	-0,08
IK.KK4-DNA.34-SYIC-3217:me COL8-RUNKOPERÄL.S/V SÄÄTÖ, M	-0,22	-0,35	-0,32		-0,34	-0,16	0,10	0,22	0,19	-0,19	-0,11
IK.KK4-DNA.34-ZIC-3214:me COL9-RUNKOPERÄL. H-AUKKO, M	0,35	0,77	0,75	-0,34		0,70	0,14	-0,17	-0,17	0,49	0,04
IK.KK4-DNA.34-ZIC-3215:me COL10-RUNKOPERÄL. HUULIERO, M	-0,20	0,34	0,32	-0,16	0,70		0,11	0,00	-0,11	0,05	-0,06
IK.KK4-DNA.34-LIC-3211:me COL11-RUNKOPERÄL. PINTA, M	0,10	0,17	0,18	0,10	0,14	0,11		0,06	-0,20	0,08	-0,06
IK.KK4-DNA.34-PIC-3420:me COL12-RUNKO TYHJÖFOIL.IMU, M	-0,21	-0,13	-0,10	0,22	-0,17	0,00	0,06		0,04	-0,09	-0,11
IK.KK4-DNA.34-QIC-2420:me COL13-RUNGON VIIRAV.SAKEUS, M	-0,20	-0,28	-0,27	0,19	-0,17	-0,11	-0,20	0,04		-0,10	-0,03
IK.KK4-DNA.34-FIC-3233:me COL14-G514 RUNKOMAS. MÄÄRÄ, M	0,79	0,81	0,81	-0,19	0,49	0,05	0,08	-0,09	-0,10		-0,13
IK.KK4-DNA.34-PIC-3416:me COL15-RUNKO, TASOIMUT, M	-0,03	-0,06	-0,08	-0,11	0,04	-0,06	-0,06	-0,11	-0,03	-0,13	

Taulukossa VI muuttujien vaikutusta flokkikokoon tutkittiin käyttämällä R-arvoa (yhtälö (8)), jotta nähtiin, oliko korrelaatio positiivinen vai negatiivinen. Taulukosta nähdään, että runkomassan määrällä, popen nopeudella eli kiinnirullaimen nopeudella ja runkoperälaati-

kon paineella on melko suuri positiivinen korrelaatio flokkikoon kanssa. Yleisesti on tiedossa, että mitä sakeampaa runkomassa on eli mitä vähemmän vettä massassa on, sitä suurempaa on flokkaantuminen. Sakeutta saadaan pienennettyä esimerkiksi suurentamalla runkoperälaatikon huuliaukon kokoa. Taulukosta VI voidaan kuitenkin havaita, että flokkikoko on kasvanut suurentamalla huuliaukon kokoa. Tulokset, jotka ovat vastoin yleistä oletusta, on selitettävissä runkoviiran erilaisilla vedenpoisto-ominaisuuksilla. On myös mahdollista, että käytössä olevan runkoviiran ominaisuudet huomioiden huuliaukkoa on suurennettu jo liikaa.

Koneen nopeutta seurataan popen nopeuden avulla. Runkoperälaatikon huulierolla ja suihku/virtaus –säädöllä (s/v säätö) on kohtalainen negatiivinen vaikutus flokkikokoon, kuten myös rungon viiraveden sakeudella ja tyhjöfoilien imulla. Korrelaatiomatriisin mukaan runkoperälaatikon pinnalla on 0,1 korrelaatiokerroin. Osa operaattoreista on myös havainnut, että runkoperälaatikon pinnalla on vaikutusta flokkikokoon (Stora Enso. 2022b). Taulukossa VI esitettyjen muuttujien nykyiset raja-arvot (LCL ja UCL) on esitetty taulukossa VII.

**Taulukko VII.** Flokkikokoon vaikuttavien muuttujien nykyiset raja-arvot (LCL, UCL), tavoitearvot (CL), korrelaatiokertoimet ja tag-nimet (5.10.2022). Oranssit korrelaatiokertoimet ovat positiivisia kertoimia ja siniset negatiivisia. Keltaiset (LCL ja UCL) luvut ovat valvontarajoja ja vihreä (CL) arvo on muuttujan tavoitearvo.

muuttuja	korrelaatio	LCL	CL	UCL	tag
G514 RUNKOMAS. MÄÄRÄ, M (l/s)	0,79	257	297	337	IK.KK4-DNA.34-FIC-3233:me
POPEN NOPEUS, M (m/min)	0,65	616,8	631,8	646,8	IK.KK4-DNA.34-XI-7309.1:av
COL7-RUNKOPERÄL. PAINE, M	0,65	28,5	40,4	52,2	IK.KK4-DNA.34-PIC-3210:me
COL9-RUNKOPERÄL. H-AUKKO, M	0,35	21,9	24,1	26,4	IK.KK4-DNA.34-ZIC-3214:me
COL11-RUNKOPERÄL. PINTA, M	0,10	376	389	402	IK.KK4-DNA.34-LIC-3211:me
COL13-RUNKO, TASOIMUT, M	-0,03	17,8	18,5	19,2	IK.KK4-DNA.34-PIC-3416:me
COL13-RUNGON VIIRAV.SAKEUS, M	-0,20	-	-	-	IK.KK4-DNA.34-QIC-2420:me
COL10-RUNKOPERÄL. HUULIERO, M	-0,20	16,1	19,7	23,4	IK.KK4-DNA.34-ZIC-3215:me
COL15-RUNKO TYHJÖFOIL.IMU, M	-0,21	6,4	6,5	6,6	IK.KK4-DNA.34-PIC-3420:me
COL8-RUNKOPERÄL.S/V SÄÄTÖ, M	-0,22	1,003	1,013	1,023	IK.KK4-DNA.34-SYIC-3217:me

Taulukossa VII esitettyjen muuttujien raja- ja tavoitearvot on määritetty eri lajeille erikseen. Taulukossa esitetyt arvot ovat laadulle TB270. Esimerkiksi laadulla TB220 runkomassan määrän LCL on 234, CL 276 ja UCL 318. Täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että taulukossa VII esitetyt raja-arvot ovat pääosin laskennallisia. Taulukosta VII voidaan myös huomata, että rungon viiraveden sakeudelle ei ole määritetty raja-arvoja ollenkaan.

Seuraavaksi muuttujien määrää pyritään laskemaan kymmenestä prosessimuuttujasta viiteen muuttujaan. Muuttujien lopullinen valinta perustuu korrelaatiokertoimiin, muutoksien tekemisen helppouteen ja siihen, että tietyn muuttujan arvon muuttaminen ei muuta automaattisesti toisia arvoja. Toisin sanoen prosessimuuttujien tulisi olla mahdollisimman itsenäisiä muuttujia. Prosessimuuttujien valitsemisessa haastateltiin vuoron 4 määränpään valvomon operaattoreita (Vuoro 4, 2022). Rajaavana tekijänä valinnassa oli, että prosessimuuttujan korrelaatiokertoimen tulisi olla yli 0,2 tai alle -0,2, jolloin korrelaatio kartongin formaation kanssa on oletettavasti kohtalainen. Valitut prosessimuuttujat eli input-muuttujat on esitetty taulukossa VIII.

**Taulukko VIII.** Valitut prosessimuuttujat koeajoja varten. Oranssit korrelaatiokertoimet ovat positiivisia kertoimia ja siniset negatiivisia.

Nro	muuttuja	korrelaatio	tag
1	POPEN NOPEUS, M (m/min) Popen nopeus	0,65	IK.KK4-DNA.34-XI-7309.1:av
2	COL13-RUNGON VIIRAV.SAKEUS, M Rungon viiraveden sakeus	-0,20	IK.KK4-DNA.34-QIC-2420:me
3	COL15-RUNKO TYHJÖFOIL.IMU, M Rungon tyhjöfoilien imu	-0,21	IK.KK4-DNA.34-PIC-3420:me
4	COL9-RUNKOPERÄL. H-AUKKO, M Runkoperälaatikon huuliaukko	0,35	IK.KK4-DNA.34-ZIC-3214:me
5	COL10-RUNKOPERÄL. HUULIERO, M Runkoperälaatikon huuliero	-0,20	IK.KK4-DNA.34-ZIC-3215:me

Taulukossa VIII esitetyistä muuttujista matemaattisen mallinnuksen mukaan ainoastaan popen nopeudella ja runkoperälaatikon huuliaukolla on positiivinen korrelaatiokerroin flokki-kokoon nähden. Muilla muuttujilla vaikutus on mallin mukaan negatiivinen. Suurin korrelaatiokerroin on popen nopeudella. Jokaista muuttujaa on mahdollista säätää itsenäisesti, jonka takia perälaatikon painetta ei valittu muuttujaksi. Paine muuttuu samanaikaisesti, kun runkoperälaatikon huuliaukkoa säädetään. Tyhjöfoilien alipaineiden eli imujen sijasta koeajoissa säädetään äskettäin viiraosalle asennettuja Duovac1 ja Duovac2 -imulaattikkojen alipaineita. Imulaatikoille ei ole vielä omia tag-muuttujia Dataparcissa, joten niiden toimintaa ei vielä pysty seuraamaan Dataparcissa. Duovac -laatikoiden tagit Wedge-ohjelmassa on esitetty taulukossa IX.

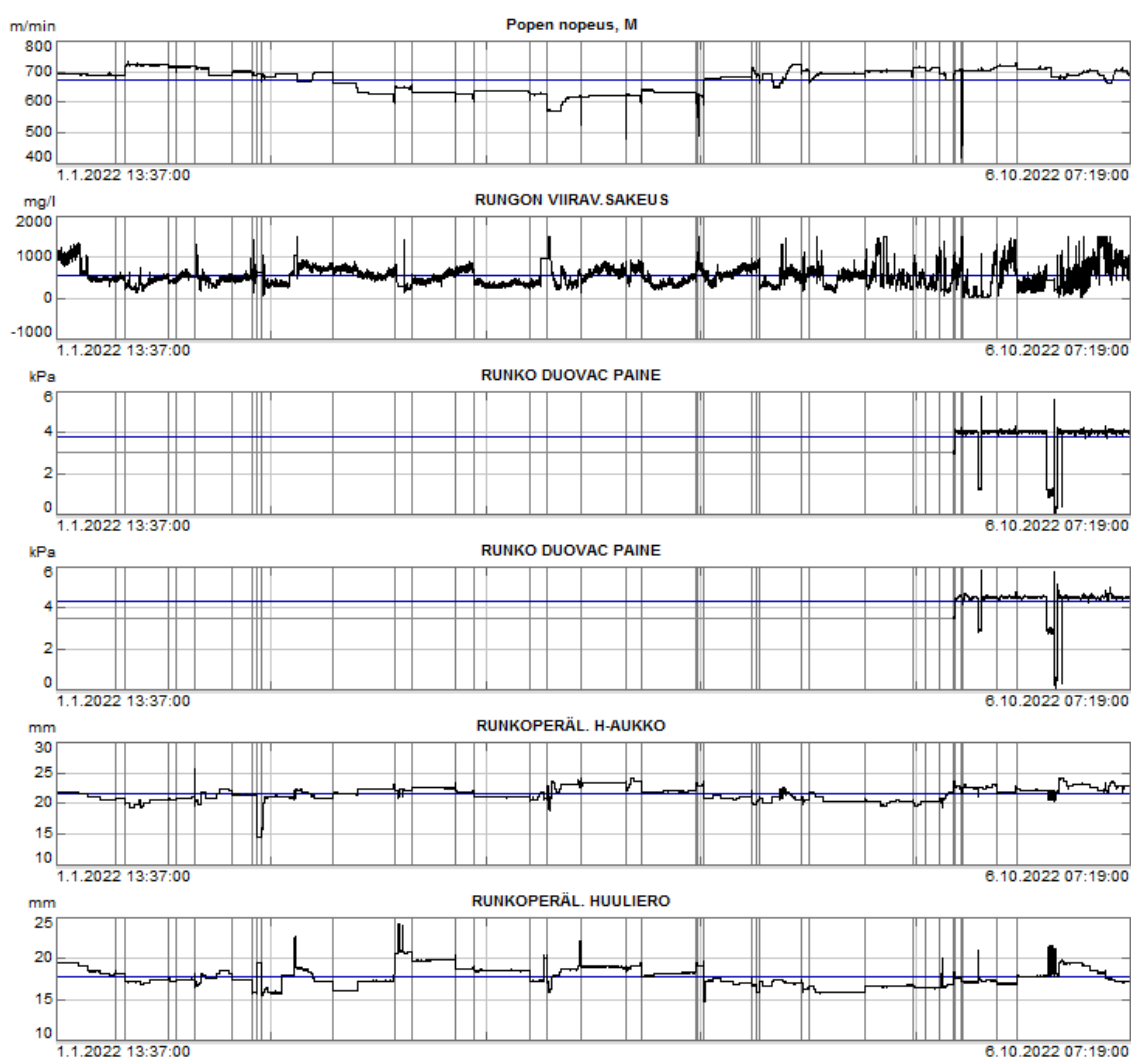
**Taulukko IX.** Duovac -imulaatikoiden tagit ja nimet.

Nro	muuttuja	korrelaatio	tag
2	RUNKO DUOVAC PAINE (1)	-	IK.KK4-DNA.34-PIC-3484:me
	Rungon Duovac1-imulaatikon paine		
3	RUNKO DUOVAC PAINE (2)	-	IK.KK4-DNA.34-PIC-3483:me
	Rungon Duovac2-imulaatikon paine		

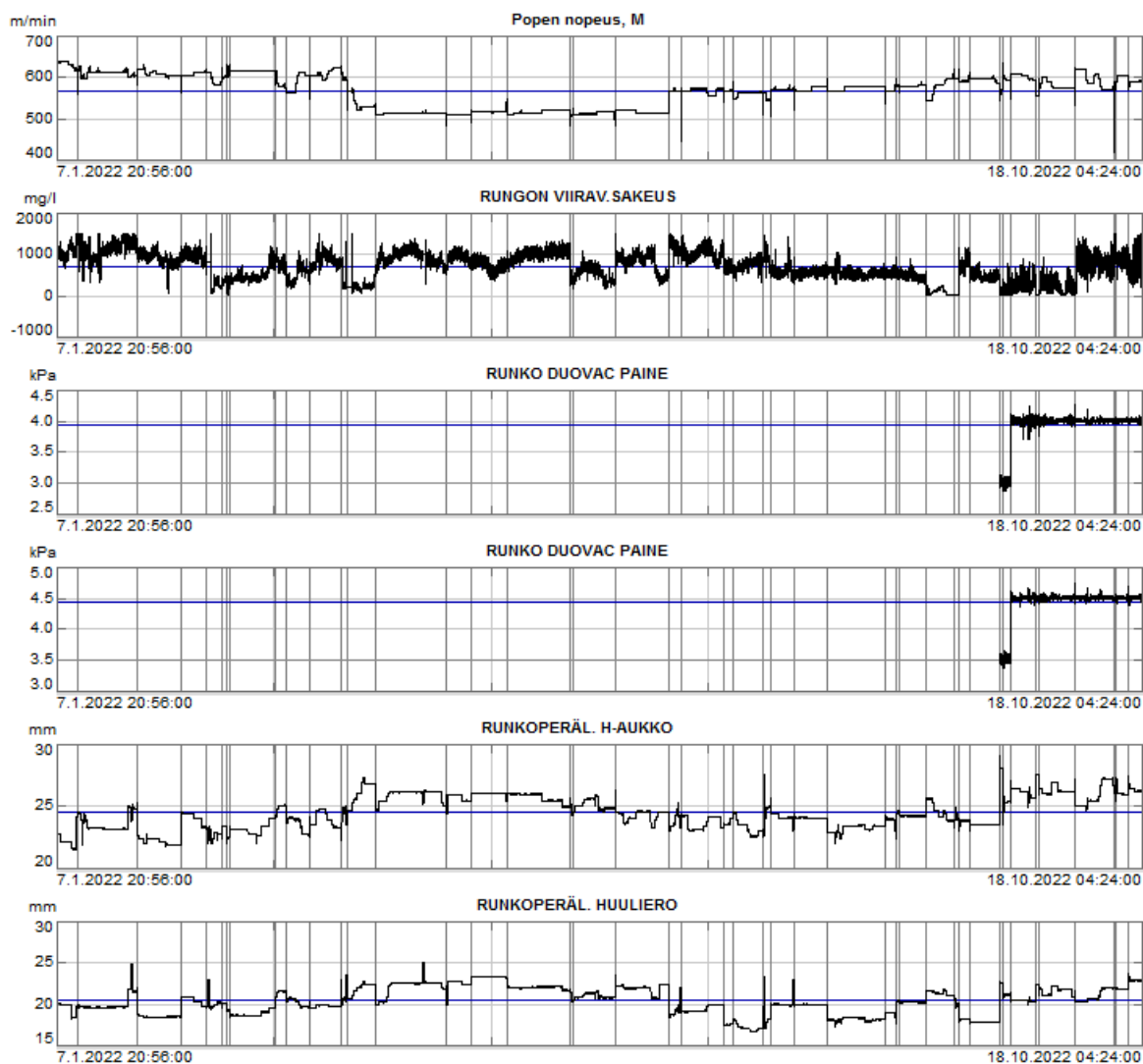
Taulukossa IX esitetyillä imulaatikoilla ei ole myöskään korrelaatiokerrointa, koska laati-koita ei löydy vielä Dataparcista, jossa korrelaatiokertoimia pystyisi tarkastelemaan. Laaduilla TB220 ja TB270 valittujen muuttujien arvot vuoden 2022 alusta lähtien on esitetty kuvissa 14 ja 15.

Koneen nopeuden kasvaessa kartonkirainan viipymäaika tietyssä pisteessä lyhenee. Tällöin esimerkiksi kemikaalien sitoutuminen tai massojen tasainen levittyminen saattaa kärsiä. Perälaatikon huulivirtauksella on suuri merkitys kartongin formaatioon, mikä on havaittavissa myös korrelaatiokertoimissa taulukossa VIII. Viiraosalle levittyvän massan tulisi olla mahdollisimman tasalaatuista ja –nopeuksista ja massasuspension tulisi sisältää riittävästi turbulenssia, jotta flokkeja ei pääsisi syntymään. Säättämällä perälaatikon huuliaukkoa vaikutetaan huuliaukon suuruuteen korkeussuunnassa ja huulierolla vaikutetaan suuruuteen pituus-suunnassa. Duovac-imulaatikot sijaitsevat kartonkikoneen viiraosalla, jossa vettä poistetaan

kartonkirainasta. Alipaineita säätämällä on mahdollista parantaa kartongin formaatiota. Rungon viiraveden sakeutta pystytään muuttamaan muun muassa retentiokemikaalin annostelulla. Viiraveden sakeus kuuluu siis märän pään kemiallisiin ominaisuuksiin. Rungon viiraveden sakeutta optimoimalla on mahdollista parantaa kartongin formaatiota. (Stora Enso, 2013). Kuvissa 16 ja 17 on esitetty popen nopeuden, rungon viiraveden sakeuden, rungon imulaatikoiden paineiden, runkoperälaatikon huuliaukon ja runkoperälaatikon huulierojen vaihtelut vuoden 2022 aikana laaduilla TB220 ja TB270.



**Kuva 16.** Laadun TB220 Popen nopeuden, runkomassan määrän, rungon tyhjöfoilien imun sekä runkoperälaatikon huuliaukon ja huulieron vaihtelut aikavälillä 1.1.2022-6.10.2022.



**Kuva 17.** Laadun TB270 Popen nopeuden, runkomassan määrän, rungon tyhjöfoilien imun sekä runkoperälaatikon huuliaukon ja huulieron vaihtelut aikavälillä 7.1.2022-18.10.2022.

Taulukossa X on esitetty laatujen TB220 ja TB270 valittujen prosessimuuttujien keskiarvot ajanjaksolta 9.1.-6.10.2022.

**Taulukko X.** Prosessimuuttujien keskiarvot laaduilla TB220 ja TB270 aikavälillä 9.1.2022-6.10.2022.

<b>Muuttuja</b>	<b>TB220</b>	<b>TB270</b>
Popen nopeus (m/min)	673	567
Rungon viiraveden sakeus (mg/l)	557	709
Rungon Duovac1-laatikon imu (kPa)	3,8	3,9
Rungon Duovac2-laatikon imu (kPa)	4,3	4,4
Runkoperälaatikon huuliaukko (mm)	21,6	24,5
Runkoperälaatikon huuliero (mm)	17,8	20,5

Kun verrataan kuvissa 16 ja 17 sekä taulukossa X esitettyjä arvoja raja-arvoihin taulukossa VIII, voidaan huomata, että esimerkiksi Popen todellinen nopeus on ollut hitaampaa kuin taulukossa VIII esitetty LCL-raja. Myös muissa muuttujien arvoissa voi havaita poikkeamia verrattuna tavoite- ja raja-arvoihin.

## 6.2 Koeajosuunnitelma

Koeajojen suunnittelussa hyödynnettiin Minitab -sovellusta. Tarkoituksena oli toteuttaa koeajot monimuuttujakokeilla eli Taguchi -kokeilla. Minitab -sovelluksessa valittiin haluttu muuttujien määrä eli tässä tapauksessa kuusi muuttujaa, mittauspisteiden määrä ja koeajojen määrä. Mittauspisteitä haluttiin kaksi eli pieni ja suuri arvo (arvot 1 ja 2). Koeajojen minimimäärä oli kahdeksan. Koska koeajot haluttiin pitää lyhyinä, jotta koeajot pystyttiin suorittamaan valitun lajin saman tuotannon aikana, valittiin kahdeksan koeajoa eli minimimäärä Taguchi-kokeille. Koeajosuunnitelma on esitetty taulukossa XI.



**Taulukko XI.** Koeajosuunnitelma valituilla muuttujilla. Punaiset ruudut viittaavat suuriin arvoihin ja siniset pieniin arvoihin.

Popen nopeus	Rungon viiraveden sakeus	Runko duovac1 paine	Runko duovac2 paine	Rungon perälaatikon huuliaukko	Rungon perälaatikon huuliero
1	1	1	1	1	1
1	1	1	2	2	2
1	2	2	1	1	2
1	2	2	2	2	1
2	1	2	1	2	1
2	1	2	2	1	2
2	2	1	1	2	2
2	2	1	2	1	1

Taulukossa XI numero 1 viittaa muuttujan pieneen arvoon ja numero 2 muuttujan suureen arvoon. Valittujen prosessimuuttujien pienet ja suuret arvot, joita koeajoissa käytetään laaduilla TB220 ja TB270, on esitetty taulukoissa XII ja XIII.

**Taulukko XII.** Prosessimuuttujien halutut arvot koeajoissa laadulla TB220. Punainen sarake viittaa suuriin arvoihin ja sininen pieniin arvoihin.

Nro	muuttuja	1	2
1	POPEN NOPEUS, M (m/min)	670	730
2	COL13-RUNGON VIIRAV.SAKEUS, M	500	900
3	RUNKO DUOVAC1 PAINE	3,0	5,0
4	RUNKO DUOVAC2 PAINE	3,5	5,5
5	COL9-RUNKOPERÄL. H-AUKKO, M	21,0	23,0
6	COL10-RUNKOPERÄL. HUULIERO, M	16,5	19,5

**Taulukko XIII.** Prosessimuuttujien halutut arvot koeajoissa laadulla TB270. Punainen sarake viittaa suuriin arvoihin ja sininen pieniin arvoihin.

Nro	muuttuja	1	2
1	POPEN NOPEUS, M (m/min)	550	630
2	COL13-RUNGON VIIRAV.SAKEUS, M	600	1000
3	RUNKO DUOVAC1 PAINE	3,0	5,0
4	RUNKO DUOVAC2 PAINE	3,5	5,5
5	COL9-RUNKOPERÄL. H-AUKKO, M	23,0	26,5
6	COL10-RUNKOPERÄL. HUULIERO, M	18,0	22,5

Kuten taulukoista XII ja XIII nähdään, kevyempiä laatuja on mahdollista ajaa kovemmallalla nopeudella kuin neliömassaltaan raskaampia laatuja. Koska massan määrä ja koneen nopeus ovat erilaisia jokaisella laadulla, myös huulierot ja huuliaukon koot ovat olleet toisistaan poikkeavat. Koeajojen ala- ja yläarvot on valittu LCL- ja UCL-arvojen ja historiatietojen perusteella. Historiatietojen avulla oli mahdollista tutkia muuttujien arvoja tarkemmin kuin raja-arvojen avulla.

Koeajossa jokaista asetusta ajetaan noin 20–30 minuuttia eli yhden konerullan verran. Prosessimuuttujat on valittu siten, että prosessin pitäisi saavuttaa halutut olosuhteet melko nopeasti ja muutokset olisivat siten melko nopeasti havaittavissa. Jos jostain syystä niin ei tapahdu, koeajossa ajetaan toinen konerulla samoilla säädöillä. Kun koepiste on saavutettu ja ollut stabiilina riittävän kauan (vähintään 10–15 min) tai, kun konerulla on valmis, siirrytään seuraaviin koeolosuhteisiin. Optimitalanteessa koeajossa ajetaan kahdeksan konerullaa. Koeajon alusta, puolesta välistä ja lopusta otetaan kartonkinäytteet, jotta formaatiota voidaan tarkastella paremmin. Koko koeajon aikana seurataan online-formaatiomittaria. Suunnitelman mukaiset koeajot suoritetaan vuoden 2022 loppupuolella, kun kartonkikoneella on ajossa laadut TB220 ja TB270.

## 7 TILASTOLLISEN PROSESSINOHJAUKSEN KÄYTTÖÖNOTTO

Vuoden 2022 alussa DataPARC -sovellusta ryhdyttiin muokkaamaan Inkeröisten Kartonkitehtaan käyttöön. Käyttöönottoa ja soveltamista varten luotiin kehitystiimi, jossa jokaisella jäsenellä oli oma roolinsa kehitystyössä. DataPARCin käytön opettelua ja soveltamista varten järjestettiin tasaisin väliajoin Teams-koulutuksia kehitystiimin kesken. Koulutuksia vetivät BTG-Groupin henkilöstön jäsenet, jotka työskentelivät dataPARC -sovelluksen parissa. Koulutuksissa opeteltiin DataPARC -sovelluksen käyttöä sekä kuinka sovellukseen saa luotua omia laskentakaavoja, näyttöjä operaattoreille ja muita sovelluksen toimintaan liittyviä asioita. Koulutusten tavoitteena oli myös löytää mahdollisia puutteita sovelluksesta, jotka tuli korjata ennen käyttöönottoa. Puutteina saattoi olla esimerkiksi virheelliset käännökset englannista suomeksi tai tietyn toiminnan puuttuminen. Sovellusta muokattiin Inkeröisten kartonkitehtaalle sopivaksi noin puolen vuoden ajan. Tavoitteena oli ottaa ohjelma käyttöön ennen kesälomakauden alkua toukokuun aikana.

Käyttöönotto hieman viivästyi suunnitellusta aikataulusta. Syinä viivästykselle oli ongelmat dataintegraatiossa, sairaspöissaolot sekä tietoinen päätös lykätä käyttöönottoa kesälomakauden yli. Viivästymisistä johtuen vasta kesäkuun alussa alettiin sovelluksesta järjestää esittelykokouksia Teams:n välityksellä tehtaan vuoropäälliköille kehitysryhmän vetämänä. Tavoitteena esittelykokouksissa oli esitellä tulevaa ohjelmaa ja sen käyttötapoja sekä varmistaa sovelluksen toiminta vuoropäälliköiden tietokoneilla. Vuoropäälliköiltä kysyttiin mielipiteitä sovelluksesta ja mahdollisista puutteista. Mielipiteiden pohjalta sovellusta muokattiin tarvittaessa ennen käyttöönottoa.

Seuraavana haasteena sovelluksen käyttöönotossa oli tekniset ongelmat. Ohjelma ei aina toiminut tai avautunut halutulla tavalla. Kesälomakauden alku hankaloitti projektin etenemistä, joten tehtiin päätös siirtää dataPARCin käyttöönotto myöhempään ajankohtaan, jolloin kesälomakausi olisi päättynyt ja kartonkikone saatu käyntiin seisokin jäljiltä.

Syksyllä kesälomakauden jälkeen järjestettiin SPC-koulutuksia työntekijöille. Koulutuksissa esiteltiin SPC:n periaatteita ja esiteltiin uutta ohjelmaa. Osassa koulutuspäivistä esiintyi teknisiä haasteita, mutta pääperiaatteet SPC:n ideasta ja DataPARC:sta tulivat kuitenkin esille. Koulutuksia jatkeen myös vuoden 2023 puolella.

### **7.1 Muutoksien ja uusien ohjelmien hyväksyminen henkilöstössä**

Uuden menetelmän käyttöönotto herättää aina erilaisia tunteita. Usein uudistusta haluavat ja sitä suunnittelevat henkilöt ovat innokkaimpia uuden asian eteenpäin viemiseen. Kyseinen asetelma oli havaittavissa myös Inkeröisten kartonkitehtaalla. Uuden sovelluksen odotetaan parantavan nykyistä kartongin valmistusprosessia entisestään ja sovelluksen muokkaaminen omaan käyttöön sopivaksi vahvistaa tunnetta.

Ohjelman esittelyn onnistuminen on tärkeässä roolissa uuden ohjelman käyttöönotossa. Usein muutoksia vastustetaan ja jos esittely ei onnistu, uuden menetelmän käyttöönotto voi olla haastavaa. Motivaation puutetta uutta menetelmää kohtaan esiintyy poikkeuksetta. Haasteet käyttöönotossa ja pitkittyneet suunnitelmat saattavat laskea motivaatiota entisestään. Syksyllä kesälomakauden jälkeen järjestettiin operaattoreille koulutuksia uudesta ohjelmasta ja menetelmästä. Koulutuksessa esiintyneet tekniset ongelmat eivät valitettavasti lisänneet luottamusta uutta menetelmää kohtaan.

DataPARC-sovellusta käytettiin diplomityössä ainoastaan muuttujien valintaan ja kartonkikoneen ajojen historiatietojen tutkimiseen. Työn koeajot suoritettiin siinä vaiheessa DataPARC-sovelluksen käyttöönottoa, kun sovellus ei vielä ollut aktiivisesti operaattoreiden käytössä.

## 8 KOEAJOJEN TULOKSET JA ANALYSOINTI

Ensimmäiset koeajot suoritettiin laadulla TB220 joulukuun puolivälin jälkeen ja koeajot laadulla TB270 suoritettiin joulukuun lopussa. Molemmat koeajot sujuivat hyvin ilman katkoja tai muita merkittäviä ulkoisia muuttujia. Varsinaisten koeajojen jälkeen suoritettiin vielä laadulla TB270 koeajo, jossa pyrittiin löytämään formaatioon eniten vaikuttavat parametrit ja niiden optimiarvot, jotta kartongin laatu olisi parhaimmalla tasolla ja tuotantomäärä mahdollisimman hyvä.

### 8.1 Koeajojen tulokset laadulla TB220

Koeajot laadulla TB220 suoritettiin 19.12.2022 iltapäivän ja illan aikana vuorojen 1 ja 5 toimesta. Toteutuneet koeajot on esitetty alla olevassa taulukossa XIV.

**Taulukko XIV.** Koeajojen numerot, prosessimuuttujat ja niiden arvot sekä konerullien numerot laadulla TB220. Punaiset arvot viittaavat suuriin arvoihin ja siniset pieniin arvoihin.

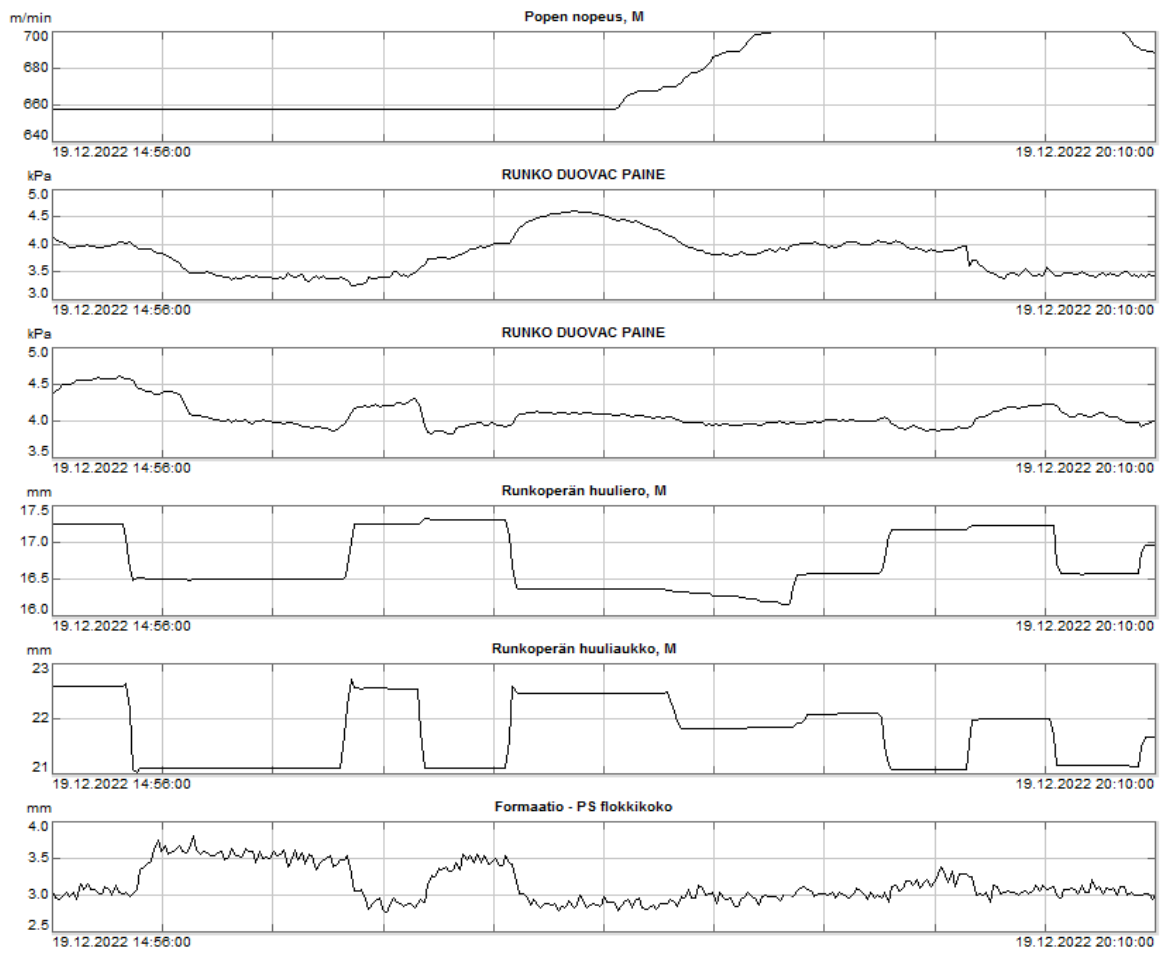
Koeajon nro	Popen nopeus (m/min)	Runko duovac1 paine (kPa)	Runko duovac2 paine (kPa)	Rungon perälaatikon huuliaukko (mm)	Rungon perälaatikon huuliero (mm)	Konerullan nro
1	657	3,5	4,0	21,1	16,5	2016769
2	657	3,5	4,2	22,5	17,2	2016770
3	657	4,0	4,0	21,1	17,2	2016771
4	657	4,0	4,5	22,5	16,5	2016772
5	699	4,0	4,0	22,1	16,5	2016775
6	699	4,0	4,0	21,1	17,2	2016776
7	699	3,5	4,0	22,1	17,2	2016777
8	699	3,5	4,1	21,1	16,5	2016778

Kuten taulukosta voidaan huomata, alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen rungon viiraveden sakeutta ei koeajojen aikana säädetty. Asiasta keskusteltiin vuoron 1 operaattoreiden kanssa ja yhdessä heidän kanssaan todettiin, että rungon viiraveden sakeuteen käytettäisiin

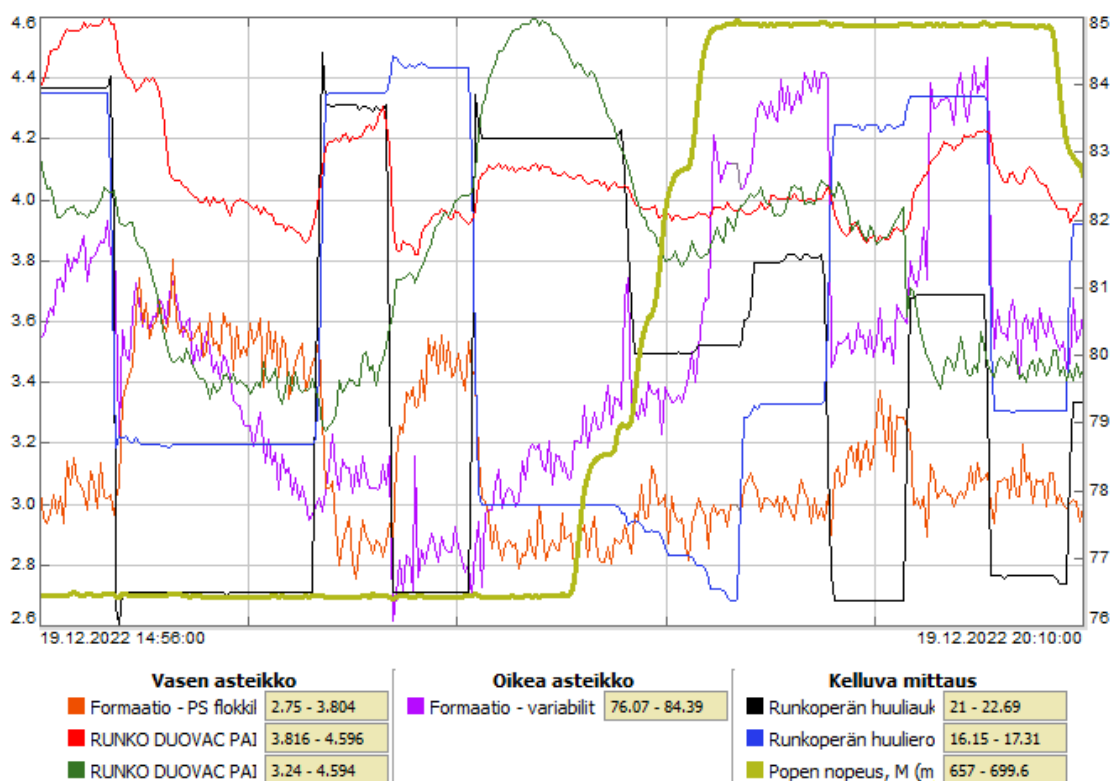
niin paljon kemikaaleja, että niiden käyttö vaikuttaisi huomattavasti prosessiin. Koeajo tehtiin lopulta viidellä prosessimuuttujalla, jotka on esitetty taulukossa XIV. Vuoron 1 kanssa hiottiin myös koeajoarvoja paremmiksi, jotta hyllyn määrä pystyttiin minimoimaan.

Rungon Duovac-imulaatikoiden säätämisessä jouduttiin hieman soveltamaan, erityisesti duovac2-imulaatikon suhteen. Kuten taulukosta XIV voidaan huomata, imulaatikon imu on melko lähellä arvoa 4 koko koeajon ajan. Vaikka imulaatikko oli 100 % teholla, alipainetta ei aina saatu 4,5 kPa asti. Koeajossa myös huomattiin, että välillä säätämällä toista imulaatikon alipainetta, myös toisen imulaatikon alipaine muuttui. Syytä ei siihen ei koeajon aikana selvinnyt. Myös rungon huuliaukon suurta arvoa jouduttiin hieman pienentämään nopeutta nostessa, jotta hylkyä ei syntyisi. Huuliaukon kokoa ja eroa ei myöskään pystynyt säätämään tiettyyn haluttuun arvoon, vaan niitä pystyi ainoastaan säätämään suuremmaksi tai pienemmäksi. Tavoitteena oli säätää rungon huuliaukon kokoa mahdollisimman lähelle arvoja 21,1 ja 22,5 mm (22,0 mm) ja huuliero lähelle arvoja 16,5 ja 17,2 mm.

Kuvissa 18 ja 19 on esitetty prosessiolosuhteiden muutokset ja sekä flokkikoon muutokset koeajon aikana.



**Kuva 18.** Popen nopeuden, rungon Duovac-imulaatikoiden paineiden, rungon perälaatikon huuliaukon, rungon perälaatikon huulieron ja formaatioon flokkikoon muutokset koeajon aikana 19.12.22 laadulla TB220.



**Kuva 19.** Popen nopeuden, rungon Duovac-imulaatikoiden paineiden, rungon perälaatikon huuliaukon, rungon perälaatikon huulieron, formaation vaihtelevuuden ja formaation flokkikoon muutokset koeajon aikana samassa kuvaajassa (19.12.22.) laadulla TB220.

Kuvassa 18 ylempi rungon Duovac-imulaatikon paine on laatikon numero 1 paine ja alempi on numero 2. Imulaatikoita ei ole järjestelmässä nimetty erikseen, vaikka niitä on mahdollista säätää yksitellen, kuten kuvasta 18 voi havaita. Kuvista 18 ja 19 voidaan myös havaita, että kartongin flokkikokoa seurataan kahdella eri laatumuuttujalla. Koneenhoitajat seuraavat pääosin variability-muuttujaa, mutta työssä on aiemmin tarkasteltu vain flokkikokoa. Tavoitteena on pitää sekä flokkikoko että formaation variability -muuttuja mahdollisimman alhaisena. Kuvassa 20 on esitetty korrelaatiomatriisin arvot koeajon aikana koeajossa säädettyillä prosessimuuttujilla ja valitulla laatuarvolla eli flokkikoolla formaation variability-muuttujalla.



	Popen nopeus, M <sup>-1</sup>	RUNKO DUOVAC PAINE	RUNKO DUOVAC PAINE <sup>-1</sup>	Runkoperän huuliero, M	Runkoperän huuliaukko, M	Formaatio - PS flokkikoko <sup>-1</sup>	Formaatio - variability <sup>-1</sup>
Popen nopeus, M <sup>-1</sup>	1	-0.08	-0.21	0.09	-0.05	-0.36	0.75
RUNKO DUOVAC PAINE	-0.08	1	-0.04	-0.33	0.45	-0.43	-0.12
RUNKO DUOVAC PAINE <sup>-1</sup>	-0.21	-0.04	1	0.00	0.33	-0.12	0.16
Runkoperän huuliero, M	0.09	-0.33	0.00	1	-0.13	0.09	-0.04
Runkoperän huuliaukko, M	-0.05	0.45	0.33	-0.13	1	-0.74	0.06
Formaatio - PS flokkikoko <sup>-1</sup>	-0.36	-0.43	-0.12	0.09	-0.74	1	-0.15
Formaatio - variability <sup>-1</sup>	0.75	-0.12	0.16	-0.04	0.06	-0.15	1

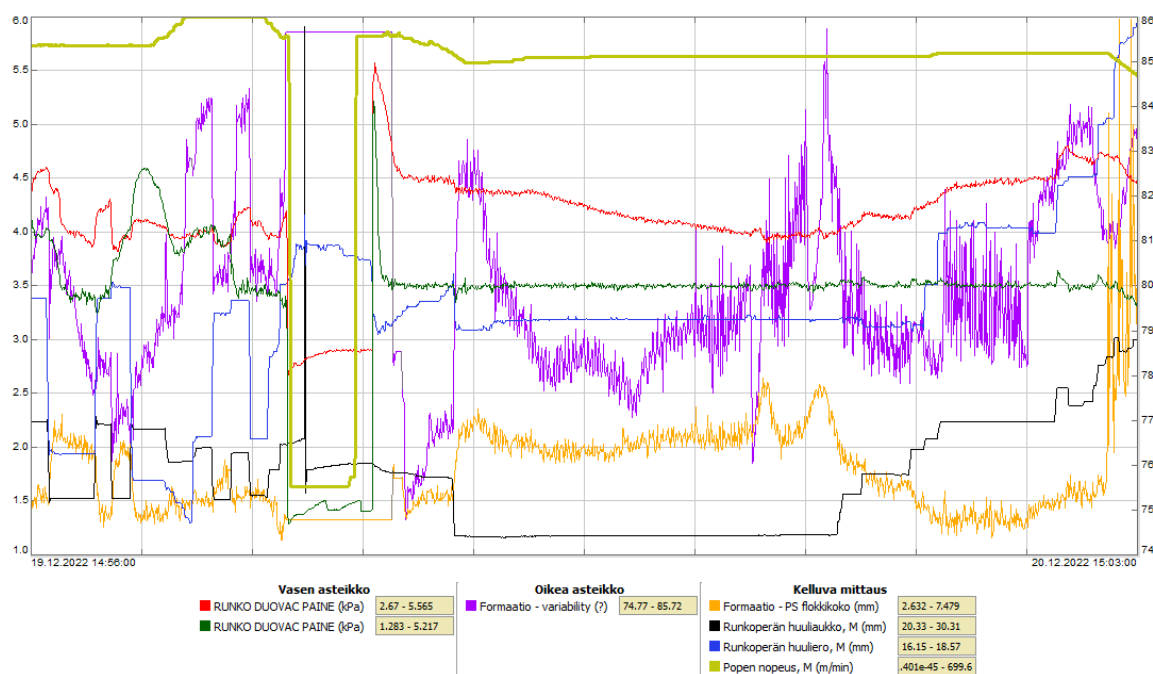
**Kuva 20.** Korrelaatiomatriisi valituilla prosessimuuttujilla ja laatuarvoilla koeajon aikana 19.12.22 laadulla TB220. Mitä tummemman sävyinen lukuarvo on, sitä suurempi korrelaatio. Violetti sävy viittaa positiiviseen korrelaatioon ja punainen sävy negatiiviseen.

Laadulla TB270 suoritettujen koeajomuuttujien valinnassa korrelaatiokertoimet flokkikokoon nähden olivat

Popen nopeus (m/min)	0,65
Runkoperälaatikon huuliaukko (mm)	0,35
Runkoperälaatikon huuliero (mm)	-0,20

Kuten kuvista 18, 19 ja 20 voidaan huomata, popen nopeuden eli koneen nopeuden noustessa flokkikoko on hieman suurentunut mutta pysynyt nopeuden kasvattamisen jälkeen melko tasaisena. Alustavasti oli oletuksena, että koneen nopeuden kasvaessa myös flokkikoko kasvaa. Oletus perustui laatuun TB270. TB270 laadun neliömassa on huomattavasti suurempi kuin laadulla TB220, mikä todennäköisesti vaikuttaa korrelaatioiden suuruuksiin, kun koeajon tuloksia verrataan alustaviin oletuksiin. Kartongin neliömassaa muutetaan säätämällä kartongin runkokerrokseen liittyviä prosessiparametreja, joita myös koeajossa säädettiin. Koska kartongin neliömassaa ja formaatiota voidaan muuttaa muuttamalla samoja prosessiparametreja, prosessiparametrien säädöt eivät voi olla jokaisella laadulla samat ja prosessiparametrin säädön vaikutuksen voimakkuus formaatioon nähden voi muuttua.

Molemmilla Duovac-imulaatikoilla on negatiivinen korrelaatio flokkikokoon eli imua suurennettaessa flokkikoko pienenee. Myös suurentamalla runkoperälaatikon huuliaukkoa flokkikoko pieneni, niin kuin oli oletuksena. Oletuksena myös oli, että runkoperälaatikon huuliero kasvattaessa flokkikoko pienenee, mutta oletusta oli vaikea todistaa koeajon aikana. Laadulla TB220 runkoperälaatikon huulierolla ei vaikuttanut olevan kovin suurta vaikutusta kartongin formaatioon verrattuna koneen nopeuteen ja runkoperälaatikon huuliaukkoon. Tulokset olivat yllättäviä, mutta selitettävissä erilaisella kartongin neliömassalla, kuten jo aiemmin todettiin. Koska runkomassan määrä on vähäisempi neliömassaltaan pienemmillä laaduilla, flokkeja ei pääse muodostumaan niin helposti ja niin paljon kuin neliömassaltaan raskaammilla laaduilla. Koneen nopeudella ja runkoperälaatikon huuliaukolla vaikuttaisi olevan suurin vaikutus kartongin flokkikokoon laadulla TB220. Myös toinen Duovac-imulaatikoista saattaa vaikuttaa kartongin formaatioon jonkin verran. Kuvissa 21 ja 22 on tarkasteltu flokkikokoon ja valittujen parametrien muutoksia koko TB220-laadun ajon aikana sekä korrelaatiomatriisia koko aikaväliltä.

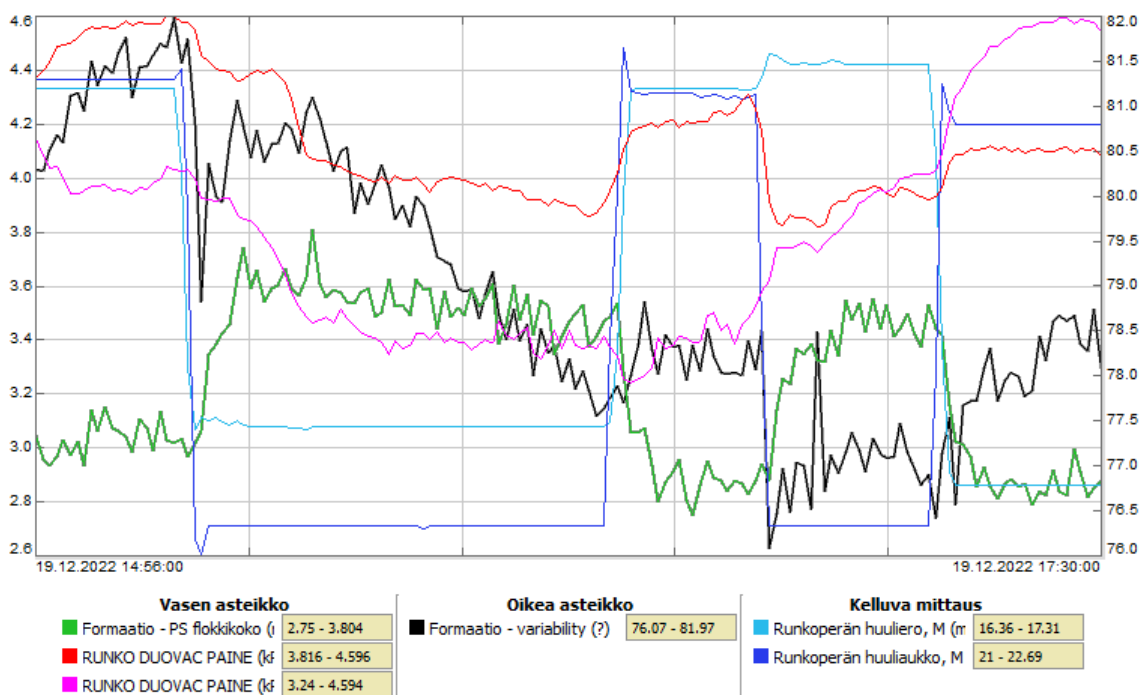


**Kuva 21.** Valittujen prosessimuuttujien ja flokkikokoon muutokset laadun TB220 aikana 19.12.-20.12.22.

	Popen nopeus, M <sup>-1</sup>	RUNKO DUOVAC PAINE	RUNKO DUOVAC PAINE <sup>-1</sup>	Runkoperän huuliero, M	Runkoperän huuliaukko, M	Formaatio - PS flokkikoko <sup>-1</sup>	Formaatio - variability <sup>-1</sup>
Popen nopeus, M <sup>-1</sup>	1	0.82	0.70	-0.22	-0.09	0.20	-0.51
RUNKO DUOVAC PAINE	0.82	1	0.76	-0.33	-0.04	0.17	-0.54
RUNKO DUOVAC PAINE <sup>-1</sup>	0.70	0.76	1	0.15	0.17	0.14	-0.36
Runkoperän huuliero, M	-0.22	-0.33	0.15	1	0.47	0.15	0.26
Runkoperän huuliaukko, M	-0.09	-0.04	0.17	0.47	1	-0.30	0.29
Formaatio - PS flokkikoko <sup>-1</sup>	0.20	0.17	0.14	0.15	-0.30	1	-0.11
Formaatio - variability <sup>-1</sup>	-0.51	-0.54	-0.36	0.26	0.29	-0.11	1

**Kuva 22.** Korrelaatiomatriisi valituilla prosessimuuttujilla ja laatumuuttujalla laadun TB220 ajon aikana 19.12.-20.12.22. Mitä tummemman sävyinen lukuarvo on, sitä suurempi korrelaatio. Violetti sävy viittaa positiiviseen korrelaatioon ja punainen sävy negatiiviseen.

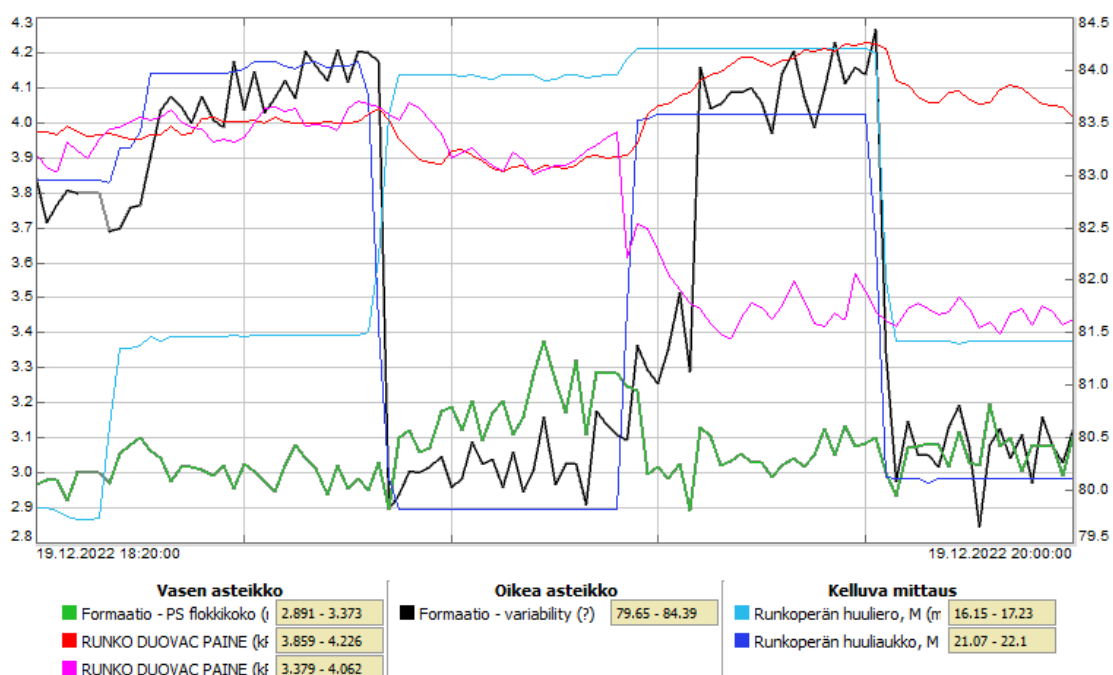
Kuvien 21 ja 22 perusteella voidaan havaita, että koneen nopeudella ja runkoperälaatikon huuliaukolla ja todennäköisesti runkoperälaatikon huulierolla on vaikutusta kartongin flokkikokoon. Myös Duovac-imulaatikon suurella alipaineella vaikuttaisi olevan positiivinen vaikutus kartongin formaatioon. Kuvista 21 ja 22 voidaan myös havaita, että huuliaukon ollessa pieni ja huulieron suuri, flokkikoko todennäköisesti kasvaa. Kevyellä laadulla (TB220) nostamalla koneen nopeutta kartongin formaatio mahdollisesti pysyy melko hyvänä. Koska koneen nopeudella näyttäisi olevan melko suuri vaikutus myös muihin prosessimuuttujien korrelaatioihin flokkikokoon nähden, kuvissa 23–26 on esitetty korrelaatiomatriisit koeajojen aikana popen nopeuksilla 657 ja 699 m/min.



**Kuva 23.** Prosessi- ja laatu muuttujien muutokset laadulla TB220 popen nopeudella 657 m/min.

	RUNKO DUOVAC PAINE	RUNKO DUOVAC PAINE~^0	Runkoperän huuliaukko, M	Runkoperän huuliero, M	Formaatio - PS flokkikoko~^0	Formaatio - variability~^0
RUNKO DUOVAC PAINE	1	0.14	0.38	-0.24	-0.46	-0.23
RUNKO DUOVAC PAINE~^0	0.14	1	0.34	-0.14	-0.31	0.55
Runkoperän huuliaukko, M	0.38	0.34	1	0.08	-0.86	-0.25
Runkoperän huuliero, M	-0.24	-0.14	0.08	1	-0.17	-0.54
Formaatio - PS flokkikoko~^0	-0.46	-0.31	-0.86	-0.17	1	0.37
Formaatio - variability~^0	-0.23	0.55	-0.25	-0.54	0.37	1

**Kuva 24.** Korrelaatiomatriisi valituilla prosessi- ja laatu muuttujilla popen nopeudella 657 m/min. Mitä tummemman sävyinen lukuarvo on, sitä suurempi korrelaatio. Violetti sävy viittaa positiiviseen korrelaatioon ja punainen sävy negatiiviseen.



**Kuva 25.** Prosessi- ja laatu muuttujien muutokset laadulla TB220 popen nopeudella 699 m/min.

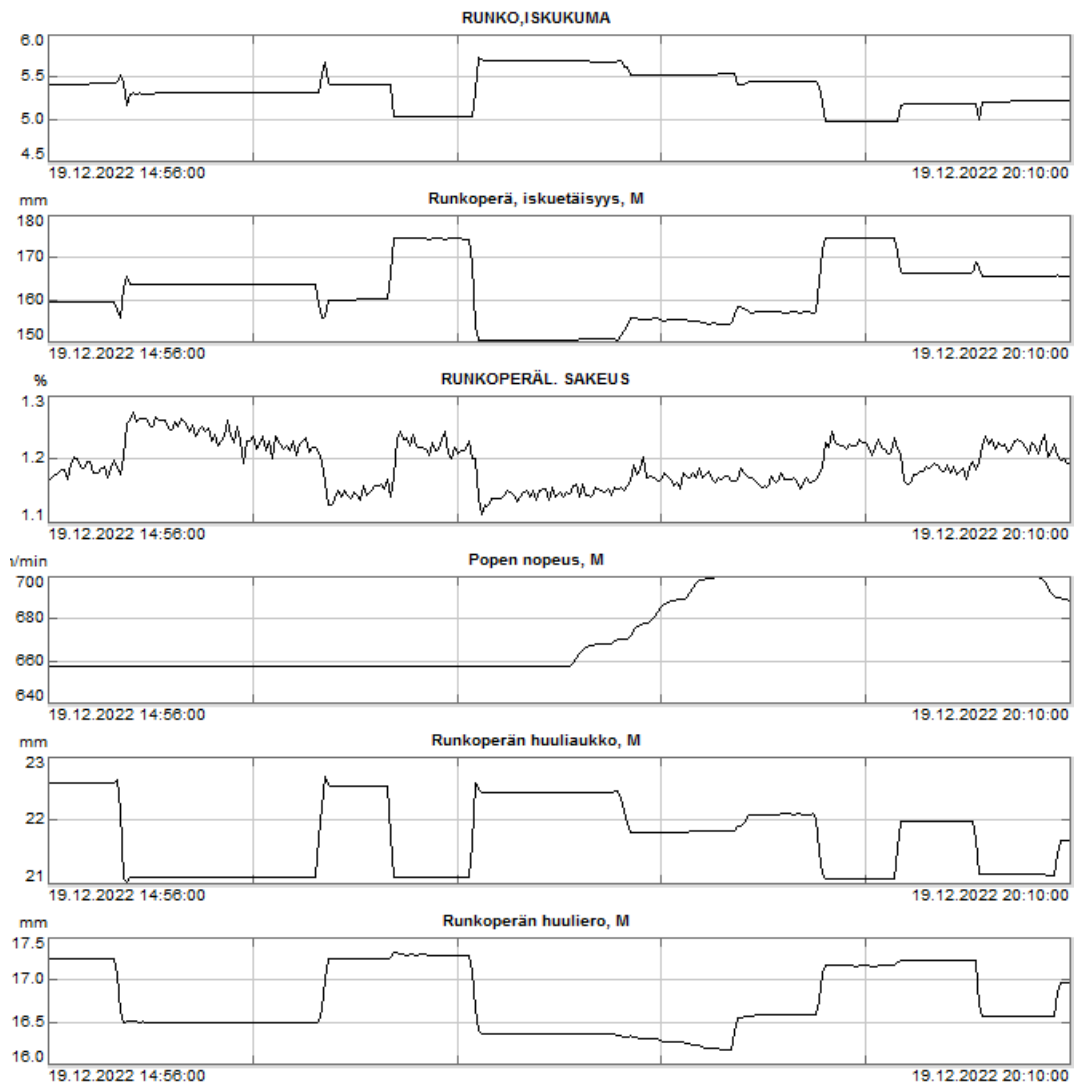
	RUNKO DUOVAC PAINE	RUNKO DUOVAC PAINE~^0	Runkoperän huuliaukko, M	Runkoperän huuliero, M	Formaatio - PS flokkikoko~^0	Formaatio - variability~^0
RUNKO DUOVAC PAINE	1	-0.70	0.18	-0.18	0.04	0.17
RUNKO DUOVAC PAINE~^0	-0.70	1	0.39	0.12	-0.39	0.47
Runkoperän huuliaukko, M	0.18	0.39	1	-0.11	-0.49	0.91
Runkoperän huuliero, M	-0.18	0.12	-0.11	1	0.47	-0.09
Formaatio - PS flokkikoko~^0	0.04	-0.39	-0.49	0.47	1	-0.41
Formaatio - variability~^0	0.17	0.47	0.91	-0.09	-0.41	1

**Kuva 26.** Korrelatiomatriisi valituilla prosessi- ja laatu muuttujilla popen nopeudella 699 m/min. Mitä tummemman sävyinen lukuarvo on, sitä suurempi korrelaatio. Violetti sävy viittaa positiiviseen korrelaatioon ja punainen sävy negatiiviseen.

Kuvasta 23 voidaan havaita, että hitaammalla nopeudella runkoperälaatikon huuliaukon ja huulieron ollessa pieniä, formaation variability -muuttuja kasvaa. Samalla hetkellä myös imulaatikoiden imuja on laskettu. Variability-muuttuja on parhaimmillaan hitaalla nopeudella, kun runkoperälaatikon huuliaukko on pieni ja huuliero suuri sekä imulaatikoiden paineet ovat melko suuret. Toisaalta silloin flokkien koko on hieman suurempi. Kuvasta 25 voidaan todeta, että kovalla nopeudella tilanne on sama; runkoperälaatikon huuliaukon ol-

lessa pieni ja huulieron suuri sekä imulaatikoiden alipaineiden ollessa melko suuret, formaation variability -muuttuja on alhainen. Kuvasta 25 tosin voidaan huomata, että flokkikokovalla nopeudella saadaan pienenemään, kun runkoperälaatikon huuliaukko pidetään pienenä, mutta runkoperälaatikon huulieroä pienennetään.

Runkoperälaatikon huuliaukon ja huulieron muutokset sekä koneen nopeuden muutokset oletettavasti vaikuttavat myös runkoperälaatikon sakeuteen, iskuetäisyyteen ja iskukulmaan. Kuvassa 27 on esitetty runkoperälaatikon huuliaukon, huulieron ja koneen nopeuden muutoksien vaikutukset runkoperälaatikon sakeuteen, iskuetäisyyteen ja iskukulmaan.



**Kuva 27.** Runkoperälaatikon iskukulman, iskuetäisyyden ja sakeuden muutokset koeajon aikana 19.12.2022 laadulla TB220.

Kuvasta 27 voidaan havaita, että koneen nopeuden muutoksella ei ole ollut merkittävää vaikutusta runkoperälaatikon iskukulman, iskuetäisyyden tai sakeuden muutoksiin. Kun huuliaukko on ollut pienin ja huuliero suurin, runkoperälaatikon iskuetäisyys on ollut suurin eli 174,4 mm ja runkoperälaatikon iskukulma pienin eli 5,0 °. Runkoperälaatikon sakeus on vaihdellut koko koeajon ajan 1,2 % molemmin puolin sitä mukaa, kun runkoperälaatikon huuliaukkoa ja huuliero on säädetty. Kuvasta 27 voidaan päätellä, että formaation kannalta runkoperälaatikon iskuetäisyys olisi hyvä olla melko korkea ja iskukulman mahdollisimman

pieni, jotta formaatiosta saataisiin mahdollisimman tasaista ja flokkisuutta vähennettyä. Kuvasta 26 voidaan myös havaita, että runkoperälaatikon sakeus on ollut koeajon aikana melko korkea silloin, kun formaatio on ollut hyvää.

Koeajoista otettiin kaksi näytettä kovemalla nopeudella konerullista 2016776 ja 2016778 (koeajot 6 ja 8), jotka lähetettiin paperilaboratorioon tarkempiin formaatiomittauksiin. Mittauksien tulokset on esitetty alla olevassa taulukossa XV.

**Taulukko XV.** Paperilaboratorion formaatiokokeiden tulokset laadulla TB220 suoritettusta koeajosta 19.12.2022.

		Koeajo nro 6	Koeajo nro 8
Ominaisuus	Yksikkö	Konerulla 2016776	Konerulla 2016778
Neliömassa	g/m <sup>2</sup>	218,6	217,7
Formaatio	g/m <sup>2</sup>	5,52	5,37
Tarkka formaatio	g <sup>0.5</sup> /m	0,37	0,36

Taulukossa XV on parempi mitä alhaisempia formaation arvot ovat, joten voidaan havaita, että formaatio on ollut parempi konerullassa 2016776 kuin konerullassa 2016778. Taulukossa XV esitettyjen koeajojen aikana koneen eli popen nopeus on ollut sama (699 m/min). Konerullan 2016776 aikana runkoperälaatikon huuliero on ollut suuri, runkoperälaatikon huuliaukko pieni ja imulaatikoiden paineet ovat olleet suuret. Konerullassa 2016778 Duovac1-imulaatikoiden paine on ollut pieni ja sekä runkoperälaatikon huuliaukko että huuliero ovat olleet pienet. Tulokset ovat vastaavia kuin mitä jo aiemmin laadun TB220 koeajon tuloksista on voinut päätellä eli parempaa laatua on mahdollista tuottaa, kun imulaatikoiden paineet ovat suuret, runkoperälaatikon huuliaukko pieni ja runkoperälaatikon huuliero suuri. Poiketen yleisestä oletuksesta, että suuremmalla runkoperälaatikon huuliaukolla eli suuremmalla veden määrällä on mahdollista tuottaa parempaa formaatiota, ei koeajossa pitänyt paikkaansa eikä myöskään ennen koeajoa tehdyissä korrelaatiokertoimien tarkastelussa. Käytössä olevan runkoviiran vedenpoisto-ominaisuudet saattavat olla poikkeavat verrattuna aikaisempiin viiroihin, mikä vaikuttaa myös optimiin runkomassan veden määrään. Yksi



mahdollinen selitys myös on, että huuliaukkoa on säädetty jo liian suureksi kuin mitä olisi tarpeellista.

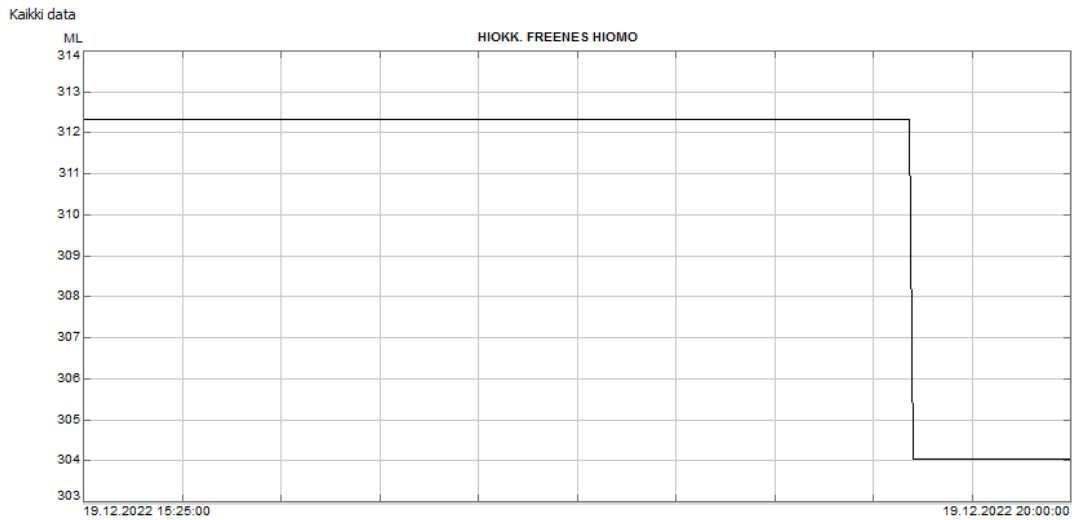
Taulukossa XVI on esitetty oletetusti parhaimmat olosuhteet kartongin tuotantoon laadulla TB220 kahdella eri nopeudella.

**Taulukko XVI.** Oletetusti parhaimmat olosuhteet kartongin tuotantoon laadulla TB220. Punaiset arvot viittaavat koeajoissa käytettyihin suuriin arvoihin ja siniset pieniin arvoihin.

Laatu	Popen nopeus (m/min)	Runko duovac1 paine (kPa)	Runko duovac2 paine (kPa)	Rungon perälaatikon huuliero (mm)	Rungon perälaatikon huuliaukko (mm)
TB220	657	4,0	4,0	17,3	21,1
TB220	699	4,0	4,0	16,5	21,1

Taulukossa XVI esitetyt arvot ovat vain suuntaa antavia. On tiedossa, että esimerkiksi hiokkeen laatu vaikuttaa merkittävästi kartongin laatuun ja ajettavuuteen. Hitaammalla nopeudella taulukossa XVI esitetyillä ajoarvoilla myös muut laatuarvot, kuten z-lujuudet, nousivat huomattavasti paremmiksi kuin mitä ne olivat ennen koeajoja ja sen jälkeen. Voidaan todeta, että formaation kannalta parhaimmilla ajoarvoilla on mahdollista parantaa kartongin muitakin laatuominaisuuksia. Kovemalla nopeudella z-lujuuksia ei mitattu.

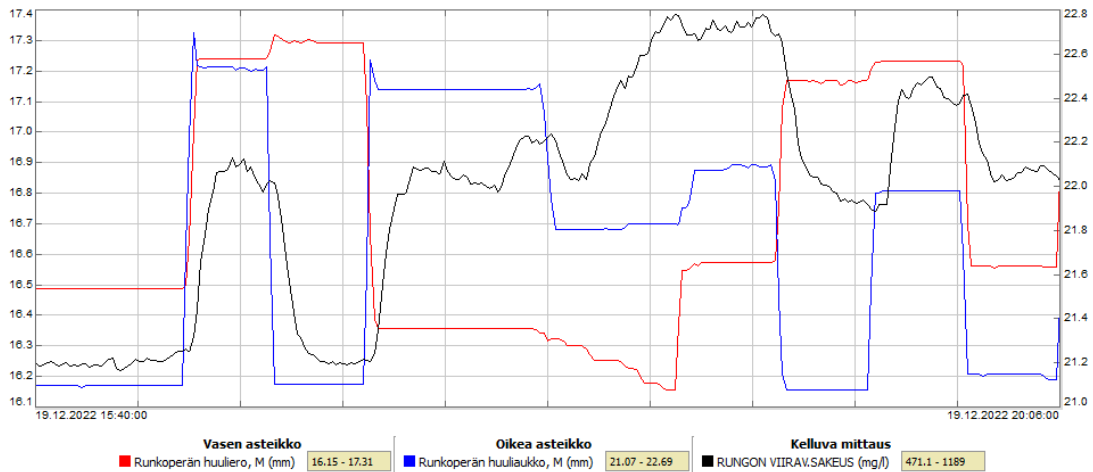
Kartongin valmistus on monimutkainen prosessi, jossa myös ulkopuoliset tekijät, kuten hiokkeen laatu ja ulkolämpötila, vaikuttavat merkittävästi myös kartongin laatuun. Kyseiset tekijät eivät kuulu tämän työn tutkimusalueeseen, mutta niiden vaikutus on kuitenkin tiedossa. Hiokkeen suotautuvuustasoa, jolla myös hienousastetta seurataan, voidaan seurata hiokkeen freeness -arvolla. Kuvassa 28 on esitetty hiokkeen freeness -arvon vaihtelu koeajon aikana.



**Kuva 28.** Hiokkeen freeness -arvon muutokset koeajon aikana.

Kuvasta 28 voidaan havaita, että hiokkeen freeness eli hiokkeen suotautuvuustaso (CSF-luku) on säilynyt koeajon aikana melko tasaisena. Ohjearvona hiokkeen suotautuvuustasolle on 330 ml ja toleranssi on 30 ml yli ja alle ohjearvon. (Stora Enso, 2019b). Hiokkeen freeness-luvun kasvaessa hiokkeen tikkupitoisuus myös kasvaa. Mitä pienempi freeness-luku on, sitä hienompaa hiokke on. Hiokkeen laadulla on suuri merkitys kartongin laatuominaisuuksiin, kuten formaatioon ja jäykkyyteen. (Stora Enso, 2013).

Kuvassa 29 on esitetty rungon viiraveden sakeuden muutokset koeajon aikana rungon perälaatikon huulieron ja huuliaukon koon muutoksien kanssa samassa kuvaajassa.



**Kuva 29.** Rungon viiraveden sakeuden muutokset suhteessa rungon perälaatikon huuliaukon koon ja huulieron muutoksiin.

Kuvasta 29 voidaan havaita, että viiraveden sakeus muuttuu samassa suhteessa, kun runko-perälaatikon huuliaukkoa säädetään. Huuliaukkoa suurennettaessa viiraveden sakeus kasvaa, koska kun huuliaukkoa suurennetaan, myös syöttövirtauksen määrä kasvaa ja suurempi osa massasta menee viiran läpi ja päätyy lyhyen kierron kautta takaisin runko-perälaatikolle.

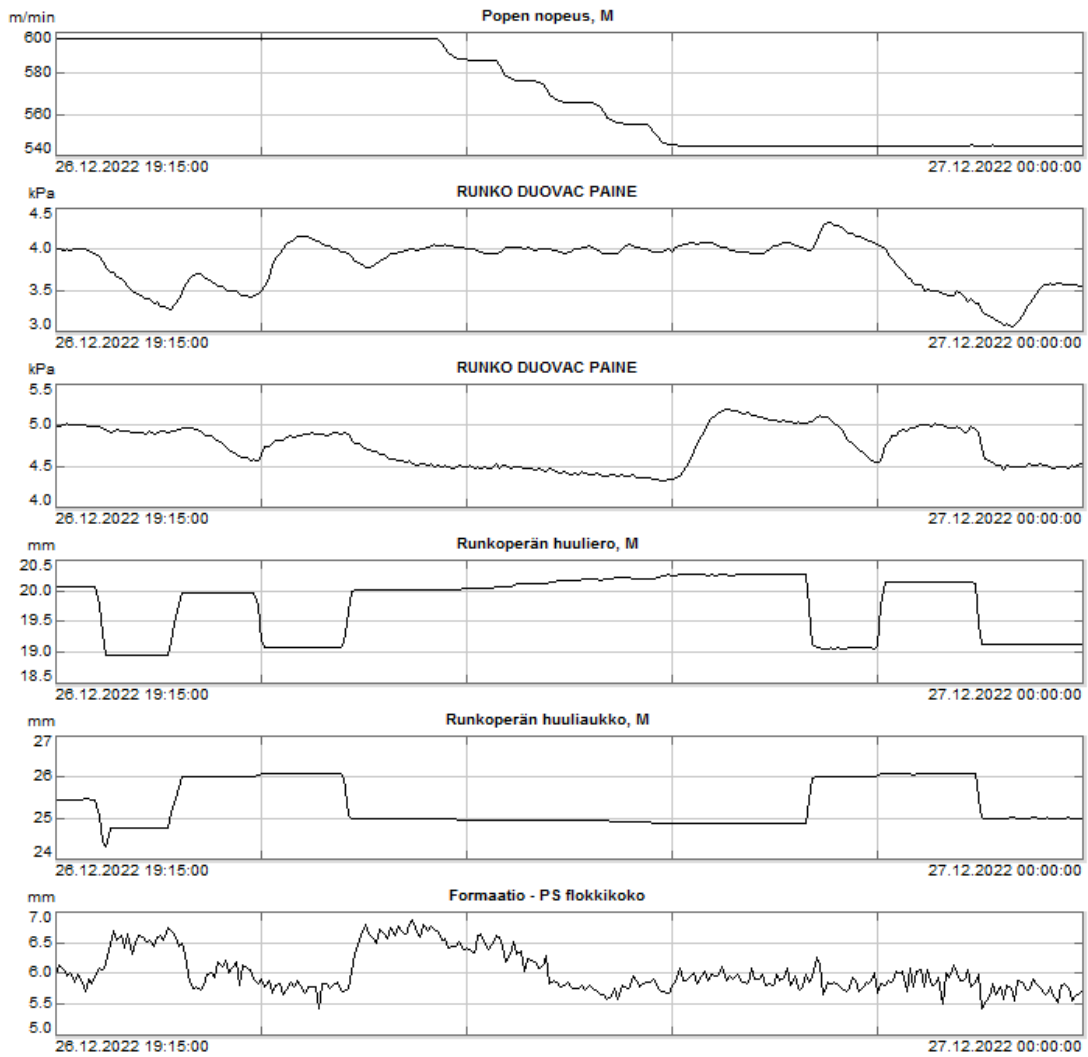
## 8.2 Koeajojen tulokset laadulla TB270

Koeajot laadulla TB270 suoritettiin 26.12.2022 illan ja yön aikana vuoron 3 toimesta. Toitutuneet koeajot on esitetty alla olevassa taulukossa XVII.

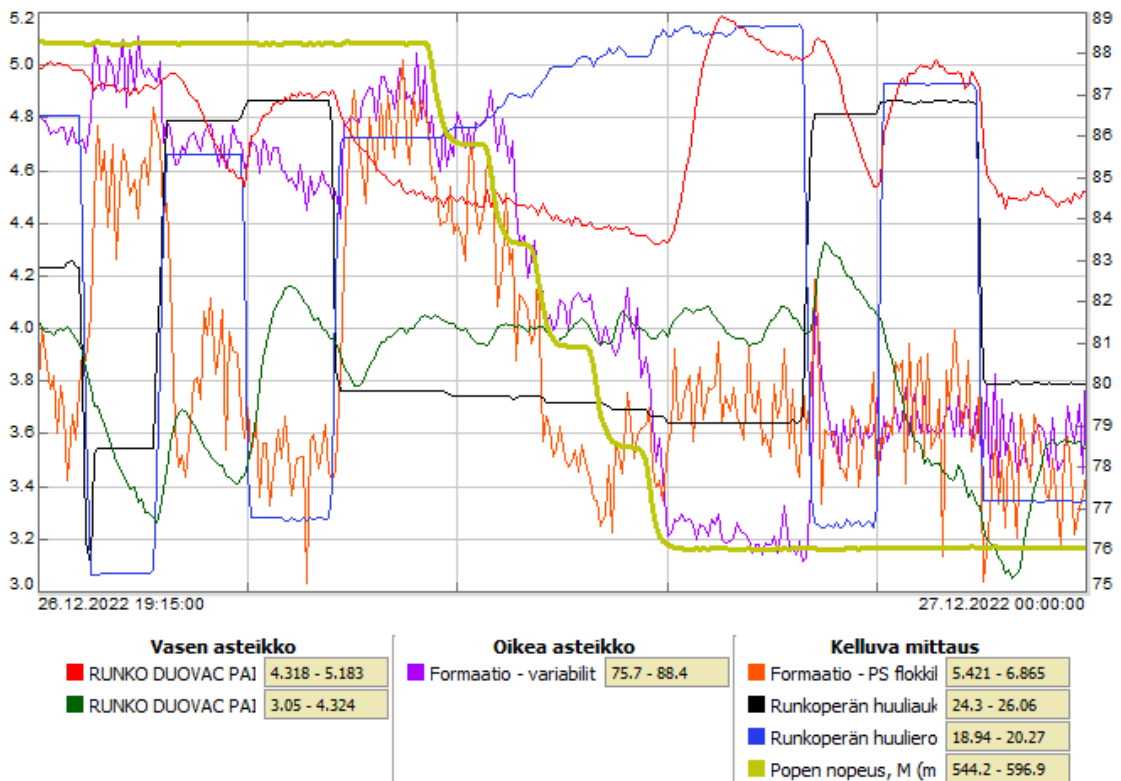
**Taulukko XVII.** Koeajojen numerot, prosessimuuttujat ja niiden arvot sekä konerullien numerot laadulla TB270. Punaiset arvot viittaavat suuriin arvoihin ja siniset pieniin arvoihin.

Koeajon nro	Popen nopeus (m/min)	Runko duovac1 paine (kPa)	Runko duovac2 paine (kPa)	Rungon perälaatikon huuliero (mm)	Rungon perälaatikon huuliaukko (mm)	Konerullan nro
1	544	3,5	4,5	19,0	25,0	2017175
2	544	3,5	5,0	20,0	26,0	2017174
3	544	4,0	4,5	19,0	26,0	2017173
4	544	4,0	5,0	20,0	25,0	2017172
5	597	4,0	4,5	20,0	25,0	2017168
6	597	4,0	5,0	19,0	26,0	2017167
7	597	3,5	4,5	20,0	26,0	2017166
8	597	3,5	5,0	19,0	25,0	2017165

Taulukon Kuvissa 30 ja 31 on esitetty prosessiolosuhteiden muutokset ja sekä flokkikoon muutokset koeajon aikana.



**Kuva 30.** Popen nopeuden, rungon Duovac-imulaatikoiden paineiden, rungon perälaatikon huuliaukon, rungon perälaatikon huulieron ja formaation flokkikoon muutokset koeajon aikana 26.12.22 laadulla TB270.



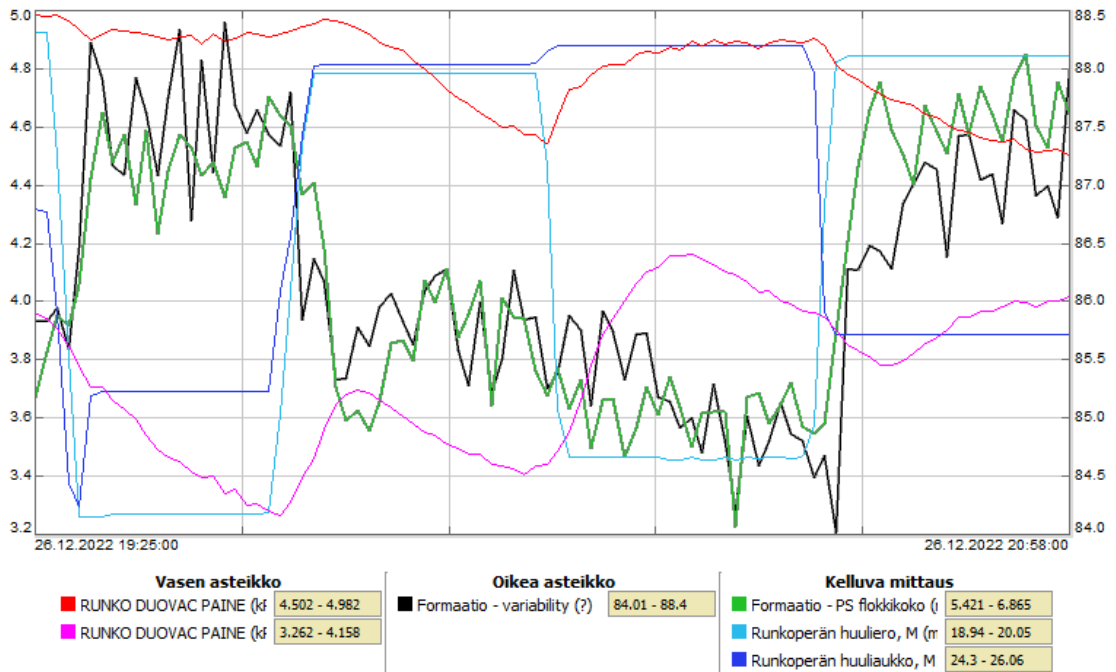
**Kuva 31.** Popen nopeuden, rungon Duovac-imulaatikoiden paineiden, rungon perälaatikon huuliaukon, rungon perälaatikon huulieron, formaation vaihtelevuuden ja formaatioon flokkikoon muutokset koeajon aikana samassa kuvaajassa (26.12.22.) laadulla TB270.

Kuvista 30 ja 31 voidaan huomata, että laadulla TB270 koneen nopeudella on melko suuri merkitys kartongin formaatioon. Koneen nopeutta laskiessa formaatio parani. Mielenkiintoista oli huomata, että runkoperälaatikon huuliaukkoa pienentämällä flokkikoko kasvoi. Kun koneen nopeutta laskettiin ja runkoperälaatikon huuliaukkoa pienennettiin, flokkikoko parani hieman. Koneen nopeuden muutos oli melko merkittävä, 80 m/min eli noin 4t/h. Kovemmalla nopeudella runkoperälaatikon huulierolla oli myös suurempi vaikutus flokkikokoon kuin hitaammalla nopeudella. Huulieron ollessa pieni, myös flokkikoko pieneni. Kuvassa 32 on esitetty valittujen prosessimuuttujien ja laatumuuttujien korrelaatiokertoimet.

	Popen nopeus, M <sup>-1</sup>	RUNKO DUOVAC PAINE	RUNKO DUOVAC PAINE <sup>-1</sup>	Runkoperän huuliero, M	Runkoperän huuliaukko, M	Formaatio - PS flokkikoko <sup>-1</sup>	Formaatio - variability <sup>-1</sup>
Popen nopeus, M <sup>-1</sup>	1	0.01	-0.00	-0.14	0.06	0.55	0.95
RUNKO DUOVAC PAINE	0.01	1	-0.00	0.30	-0.05	-0.01	-0.05
RUNKO DUOVAC PAINE <sup>-1</sup>	-0.00	-0.00	1	-0.09	0.35	-0.03	-0.11
Runkoperän huuliero, M	-0.14	0.30	-0.09	1	-0.21	0.08	-0.18
Runkoperän huuliaukko, M	0.06	-0.05	0.35	-0.21	1	-0.31	0.04
Formaatio - PS flokkikoko <sup>-1</sup>	0.55	-0.01	-0.03	0.08	-0.31	1	0.62
Formaatio - variability <sup>-1</sup>	0.95	-0.05	-0.11	-0.18	0.04	0.62	1

**Kuva 32.** Korrelaatiomatriisi valituilla prosessimuuttujilla ja laatumuuttujalla laadun TB270 koeajon aikana 26.12.22. Mitä tummemman sävyinen lukuarvo on, sitä suurempi korrelaatio. Violetti sävy viittaa positiiviseen korrelaatioon ja punainen sävy negatiiviseen.

Myös kuvan 32 perusteella voidaan todeta, että suurin merkitys kartongin flokkikokoon laadulla TB270 on koneen nopeudella. Koneen nopeutta nostamalla myös flokkikoko kasvaa. Korrelaatiomatriisissa voidaan myös havaita, että runkoperälaatikon huuliaukon ja huulieron vaikutusta flokkikokoon ei voi suoraan tulkita korrelaatiomatriisista, koska koneen nopeus vaikuttaa merkittävästi kyseisten muuttujien käyttäytymiseen. Kuvissa 33–36 on esitetty prosessi- ja laatumuuttujien muutokset sekä korrelaatiomatriisit popen nopeuksilla 544 ja 597 m/min.

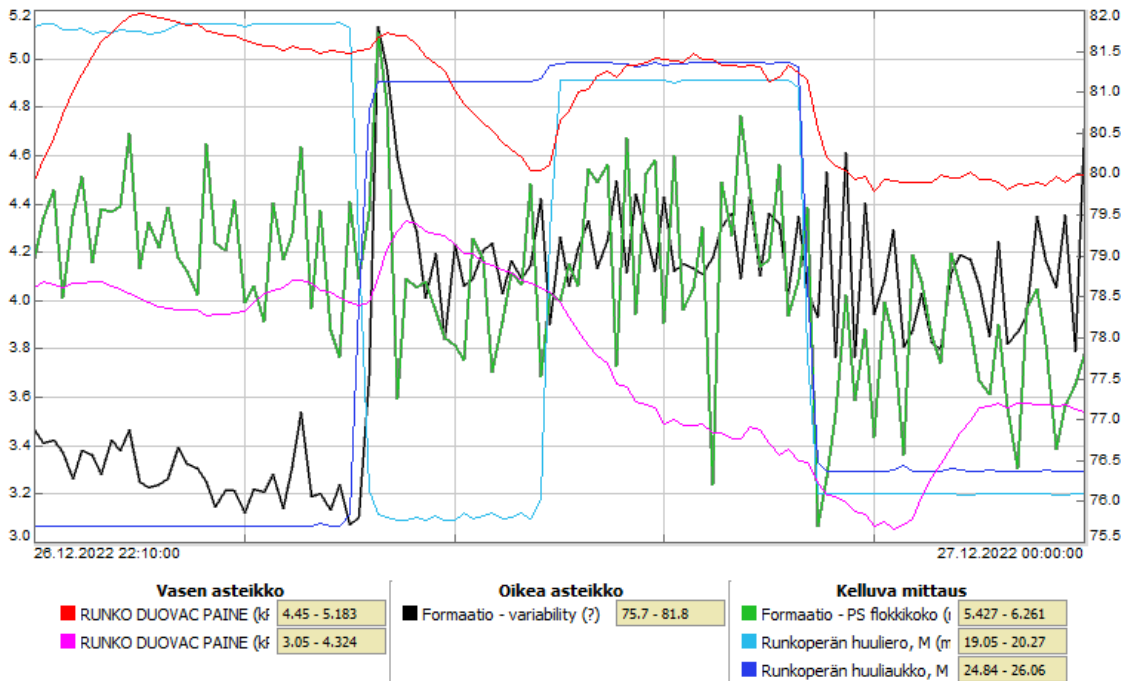


**Kuva 33.** Prosessi- ja laatu muuttujien muutokset laadulla TB270 popen nopeudella 597 m/min.

	RUNKO DUOVAC PAINE	RUNKO DUOVAC PAINE~^0	Runkoperän huuliaukko, M	Runkoperän huuliero, M	Formaatio - PS flo kkikoko~^0	Formaatio - variab ility~^0
RUNKO DUOVAC PAINE	1	-0.12	0.16	0.02	-0.28	-0.41
RUNKO DUOVAC PAINE~^0	-0.12	1	0.05	-0.56	-0.32	-0.14
Runkoperän huuliaukko, M	0.16	0.05	1	0.06	-0.80	-0.75
Runkoperän huuliero, M	0.02	-0.56	0.06	1	0.19	-0.03
Formaatio - PS flokkikoko~^0	-0.28	-0.32	-0.80	0.19	1	0.85
Formaatio - variability~^0	-0.41	-0.14	-0.75	-0.03	0.85	1

**Kuva 34.** Korrelaatiomatriisi valituilla prosessi- ja laatu muuttujilla popen nopeudella 597 m/min. Mitä tummemman sävyinen lukuarvo on, sitä suurempi korrelaatio. Violetti sävy viittaa positiiviseen korrelaatioon ja punainen sävy negatiiviseen.





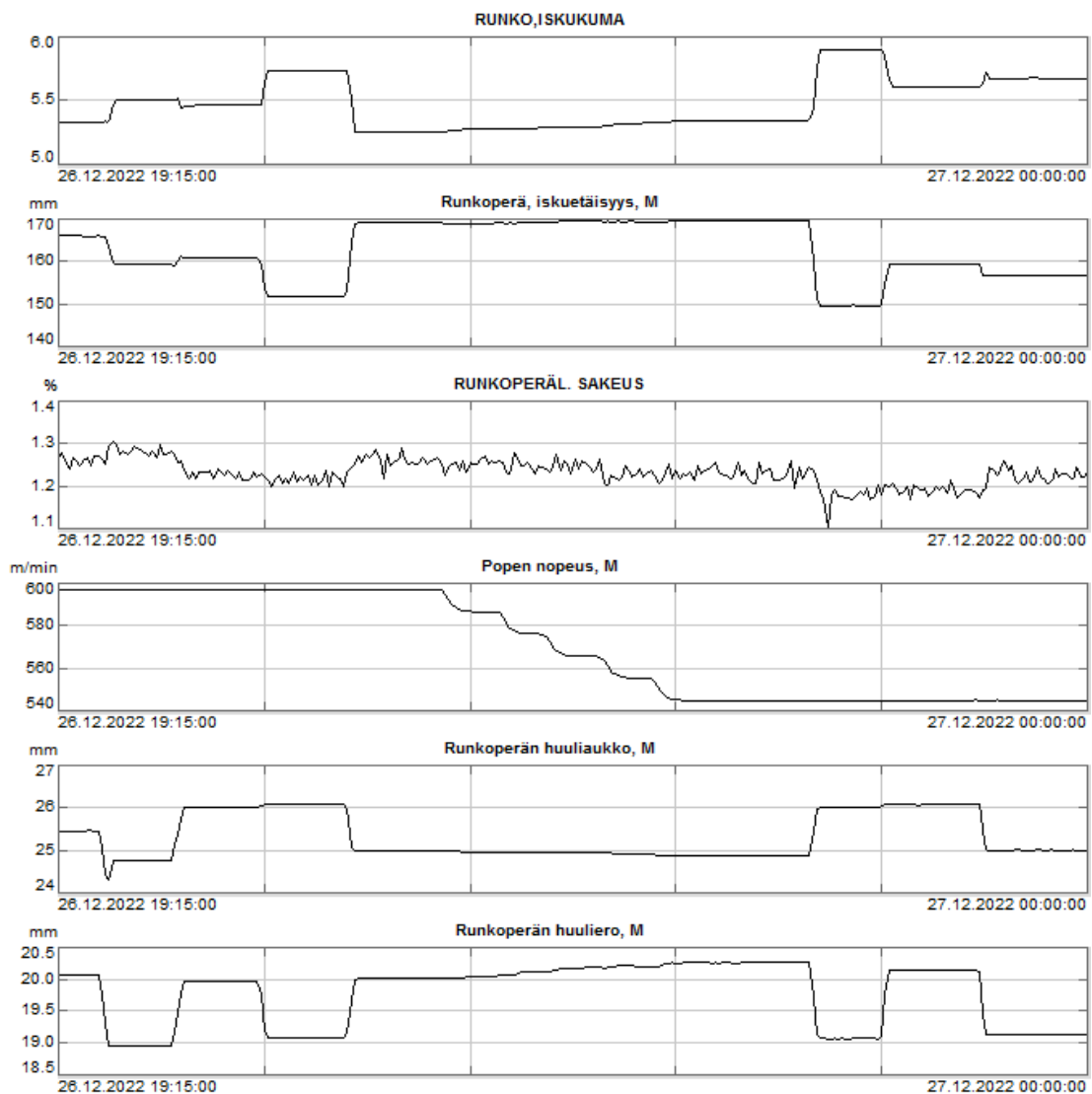
**Kuva 35.** Prosessi- ja laatuomuttujien muutokset laadulla TB270 popen nopeudella 544 m/min.

	RUNKO DUOVAC PAINE	RUNKO DUOVAC PAINE~^0	Runkoperän huuliaukko, M	Runkoperän huuliero, M	Formaatio - PS flokkikoko~^0	Formaatio - variability~^0
RUNKO DUOVAC PAINE	1	0.51	0.08	0.22	0.32	-0.35
RUNKO DUOVAC PAINE~^0	0.51	1	0.15	0.68	0.52	-0.35
Runkoperän huuliaukko, M	0.08	0.15	1	-0.11	0.17	0.66
Runkoperän huuliero, M	0.22	0.68	-0.11	1	0.48	-0.54
Formaatio - PS flokkikoko~^0	0.32	0.52	0.17	0.48	1	-0.10
Formaatio - variability~^0	-0.35	-0.35	0.66	-0.54	-0.10	1

**Kuva 36.** Korrelaatiomatriisi valituilla prosessi- ja laatuomuttujilla popen nopeudella 544 m/min. Mitä tummemman sävyinen lukuarvo on, sitä suurempi korrelaatio. Violetti sävy viittaa positiiviseen korrelaatioon ja punainen sävy negatiiviseen.

Kuvista 33 ja 34 voidaan huomata, että kovalla nopeudella imulaatikoiden imujen ollessa suurimmat, runkoperälaatikon huulieron ollessa mahdollisimman pieni ja huuliaukon mahdollisimman suuri formaation variability -muuttuja ja flokkikoko olivat koeajossa pienimmät kyseisellä nopeudella. Kuvien 35 ja 36 mukaan hitaammalla nopeudella prosessimuuttujien muutoksilla ei ole kovin suurta vaikutusta formaation variability -muuttujaan tai flokkikokoon. Kuvan 35 perusteella variability-muuttuja oli pienimmillään, kun runkoperälaati-

kon huuliaukon koko oli mahdollisimman pieni, Duovac-imulaatikoiden imut mahdollisimman suuret ja runkoperälaatikon huuliero oli mahdollisimman suuri. Hitaammalla nopeudella variability-muuttujan arvot olivat hieman pienemmät hitaammalla nopeudella verrattuna kovempaan nopeuteen, kuten kuvista 33 ja 35 voidaan havaita. Kuvassa 37 on esitetty runkoperälaatikon huuliaukon, huulieron ja koneen nopeuden muutoksien vaikutukset runkoperälaatikon sakeuteen, iskuetäisyyteen ja iskukulmaan.



**Kuva 37.** Runkoperälaatikon iskukulman, iskuetäisyyden ja sakeuden muutokset koeajon aikana 26.12.2022 laadulla TB270.

Kuvasta 37 voidaan havaita, että koneen nopeuden muutoksella ei ole ollut merkittävää vaikutusta runkoperälaatikon iskukulman tai iskuetäisyyden muutoksiin myöskään laadulla TB270. Koneen nopeutta laskemalla runkoperälaatikon sakeus laskee hieman arvosta 1,3 % arvoon 1,2 %. Kuvan 37 mukaan, neliömassaltaan suuremmalla laadulla runkoperälaatikon sakeuteen eniten vaikuttaa runkoperälaatikon huuliaukon koko. Runkoperälaatikon huulierolla ei vaikuttaisi olevan niin suurta vaikutusta sakeuteen kuin kevyemmällä laadulla.

Koeajon aikana kuvan 37 mukaan, kun huuliaukko on ollut pienin ja huuliero suurin, runkoperälaatikon iskukulma on ollut pienin, jolloin arvo on ollut välillä 5,25 ja 5,35 °. Samaan aikaan runkoperälaatikon iskuetäisyys on ollut suurin eli 169–169,5 mm. Kuten jo kuvasta 27, myös kuvasta 37 voidaan päätellä, että runkoperälaatikon iskuetäisyys tulisi olla melko korkea ja iskukulman mahdollisimman pieni, jotta kartongin formaatiota voidaan parantaa. Kun laadulla TB270 suoritettujen koeajojen tuloksia verrataan laadulla TB220 suoritettuihin koeajoihin, voidaan havaita, että iskuetäisyys on ollut hieman alhaisempi (noin 5 mm) ja iskukulma hieman suurempi (noin 0,3 °) verrattuna kevyempään laatuun. Neliömassaltaan suuremmalla laadulla runkokerroksen paksuus on suurempi, jolloin runkoperälaatikon huuliero ja huuliaukko ovat suurempia, joten myös iskuetäisyys ja iskukulma muuttuvat. Kuvista 27 ja 37 voidaan myös päätellä, että koneen nopeus ei merkittävästi vaikuta runkoperälaatikon iskukulmaan tai iskuetäisyyteen raskailla tai kevyillä laaduilla.

Koeajon aikana otettiin näytteet kolmesta eri konerullasta, jotka lähetettiin formaatioanalyysiin paperilaboratorioon. Näytteiden tulokset on esitetty alla olevassa taulukossa XVIII.

**Taulukko XVIII.** Paperilaboratorion formaatiokokeiden tulokset 26.12.2022 suoritetusta koeajosta laadulla TB270.

		Koeajo nro 8	Koeajo nro 4	Koeajo nro 1
Ominaisuus	Yksikkö	Konerulla 2017165	Konerulla 2017172	Konerulla 2017175
Neliömassa	g/m <sup>2</sup>	264,3	264,6	263,4
Formaatio	g/m <sup>2</sup>	9,02	8,15	8,42
Tarkka formaatio	g <sup>0.5</sup> /m	0,55	0,5	0,52

Taulukosta XVIII voidaan huomata, että parhaita laatua formaation kannalta on tuotettu konerullassa 2017172 eli koeajossa 4. Mitä pienempiä formaatioiden lukemat ovat, sitä parempaa kartongin formaatio on. Silloin kartongin flokkisuus on pienempää ja kartongin ulkonäkö tasaisempi. Kyseisen koeajon aikana koneen eli popen nopeus on ollut hidas (545 m/min), Duovac-imulaatikoiden paineet suuret, runkoperälaatikon huuliero suuri ja runkoperälaatikon huuliero pieni. Konerullan 2017172 laatu on ollut formaation kannalta huomattavasti parempaa kuin konerullassa 2017165, jolloin koneen nopeus on ollut suurempi ja runkoperälaatikon huuliero pieni. Formaatioanalyysien tulokset vahvistavat jo aiemmin tehtyjä tulkintoja online-mittauksista. Online-mittausten ja laboratorioanalyysien perusteella koneen nopeudella sekä runkoperälaatikon huulierolla ja huuliaukolla on melko suuri merkitys kartongin laatuun erityisesti neliömassaltaan raskaammalla laadulla. Laadulla TB270 koeajon perusteella parasta laatua on mahdollista tuottaa hitaammalla nopeudella, suurella runkoperälaatikon huulierolla ja pienellä runkoperälaatikon huuliaukolla, kuten havaittiin jo laadulla TB220.

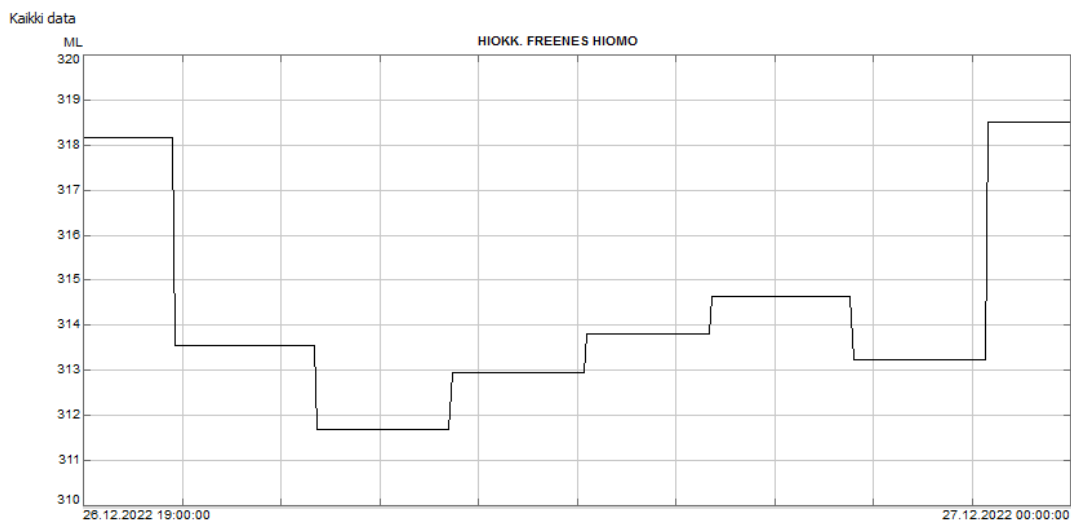
Taulukossa XIX on esitetty oletetusti parhaimmat olosuhteet kartongin tuotantoon laadulla TB270 valituilla muuttujilla kahdella eri nopeudella.

**Taulukko XIX.** Oletetusti parhaimmat olosuhteet kartongin tuotantoon laadulla TB270. Punaiset arvot viittaavat koeajoissa käytettyihin suuriin arvoihin ja siniset pieniin arvoihin.

Laatu	Popen nopeus (m/min)	Runko duovac1 paine (kPa)	Runko duovac2 paine (kPa)	Rungon perälaatikon huuliero (mm)	Rungon perälaatikon huuliaukko (mm)
TB270	544	4,0	5,0	20,0	25,0
TB270	597	4,0	5,0	19,0	26,0

Kuten laadulla TB220, myös laadulla TB270 muut laatuarvot, kuten z-lujuudet, olivat parempia hitaalla nopeudella taulukossa XIX esitetyillä arvoilla parempia kuin ennen koeajoja. Kovemalla nopeudella koeajon aikana lujuusmittauksia ei suoritettu.

Koeajojen aikana hiokkeen freeness -arvon vaihtelu on esitetty kuvassa 38.



**Kuva 38.** Hiokkeen freeness -arvon vaihtelut koeajon aikana 26.12.22.

Hiokkeen suotautuvuustasossa on hieman ollut hieman vaihtelua koeajon aikana, kuten kuvasta 38 voidaan havaita. Kuvien 33–36 perusteella, sillä ei ole kuitenkaan ollut suurta merkitystä koeajojen onnistumiseen.

26.12. koeajojen pohjalta voidaan suunnitella uudet koeajot laadulle TB270, joiden tarkoituksena on löytää optimit prosessimuuttujien säädöt laadulle TB270. Uusi koeajosuunnitelma on esitetty taulukossa XX.

**Taulukko XX.** Koeajosuunnitelma laadulle TB270 prosessin optimoimiseksi. Punaiset arvot viittaavat suuriin arvoihin ja siniset pieniin arvoihin.

Konerulien määrä	Popen nopeus (m/min)	Runko duovac1 paine (kPa)	Runko duovac2 paine (kPa)	Rungon perälaatikon huuliero (mm)	Rungon perälaatikon huulivälikko (mm)
1	544	4,0	5,0	20,0	25,0
2	544	4,0	5,0	20,0	25,0
3	544	4,0	5,0	20,0	25,0
4	597	4,0	5,0	19,0	26,0
5	597	4,0	5,0	19,0	26,0
6	597	4,0	5,0	19,0	26,0

Taulukossa XX esitetyt koeajot suoritetaan mahdollisimman pian.

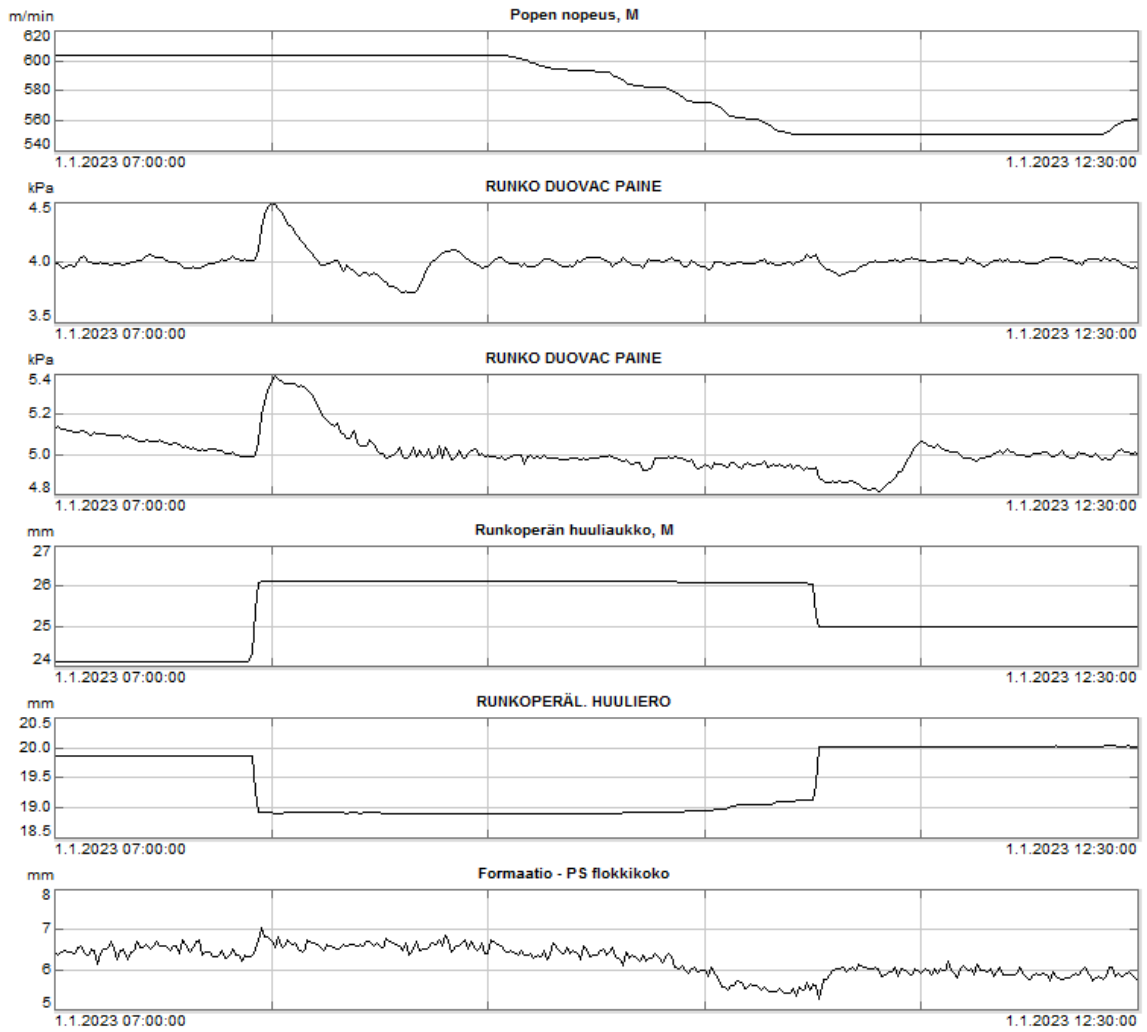
### 8.3 Prosessin optimoimiseen tähtäävien koeajojen tulokset laadulla TB270

Koeajo prosessin optimoimiseksi suoritettiin 1.1.2023 laadulla TB270 vuoron 3 toimesta. Koeajoissa käytetyt arvot on esitetty taulukossa XXI.

**Taulukko XXI.** Koeajossa 1.1.2023 käytetyt arvot laadulla TB270. Punaiset arvot viittaavat suuriin arvoihin ja siniset pieniin arvoihin.

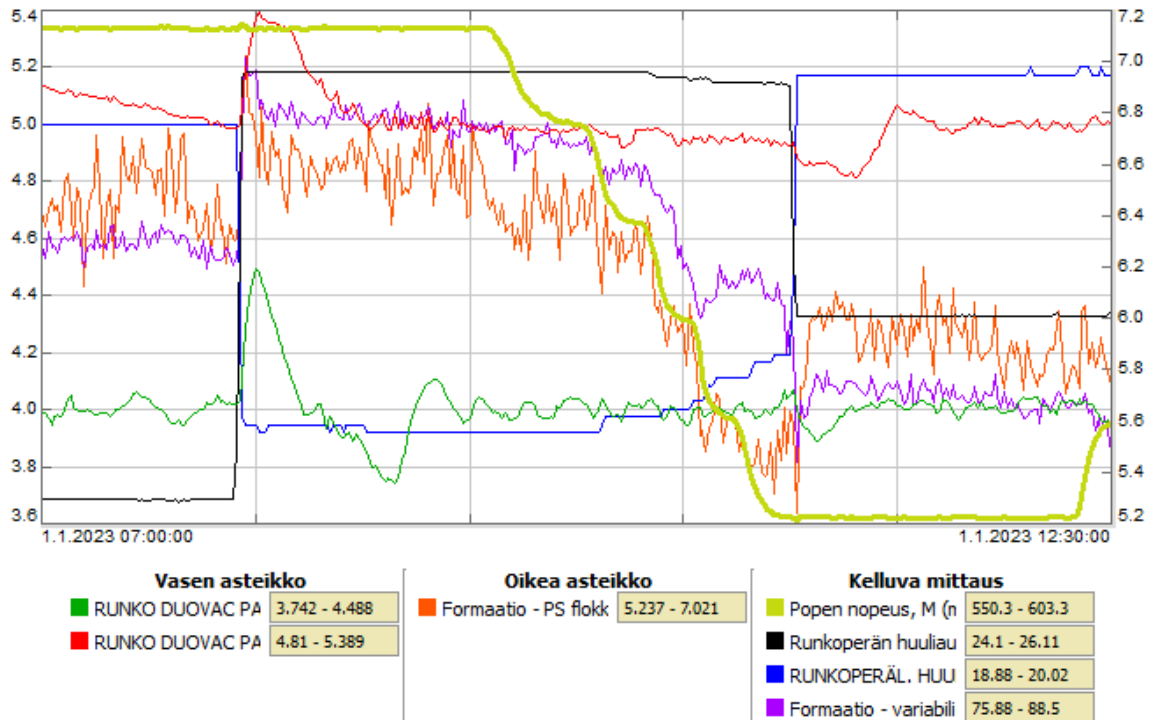
Konerullien määrä	Popen nopeus (m/min)	Runko duovac1 paine (kPa)	Runko duovac2 paine (kPa)	Rungon perälaatikon huuliero (mm)	Rungon perälaatikon huuliaukko (mm)	Konerullan nro
1	551	4,0	5,0	20,0	25,0	3000016
2	551	4,0	5,0	20,0	25,0	3000015
3	551	4,0	5,0	20,0	25,0	3000014
4	603	4,0	5,0	18,9	26,1	3000009
5	603	4,0	5,0	18,9	26,1	3000008
6	603	4,0	5,0	18,9	26,1	3000007

Taulukossa XXI poikkeavat hieman suunnitelluista ajoarvoista. Eroa kuitenkin oli niin vähäinen määrä, että koeajoa suoritettaessa todettiin arvojen olevan riittävän lähellä. Koeajossa suoritettiin kovan nopeuden koeajot ensin, jonka jälkeen koneen nopeutta laskettiin maltillisesti haluttuun nopeuteen. Koeajo sujui hyvin ilman katkoja tai häiriöitä. Kuvissa 39 ja 40 on esitetty popen nopeuden, Duovac-imulaatikoiden paineenvaihtelut, runkoperälaatikon huulieron ja runkoperälaatikon huuliaukon arvojen vaihtelut koeajoa ennen ja sen aikana.



**Kuva 39.** Popen nopeuden, rungon Duovac-imulaatikoiden paineiden, rungon perälaatikon huuliaukon, rungon perälaatikon huulieron ja formaatioon flokkikoon muutokset ennen koeajoa ja sen aikana 1.1.2023 laadulla TB270.

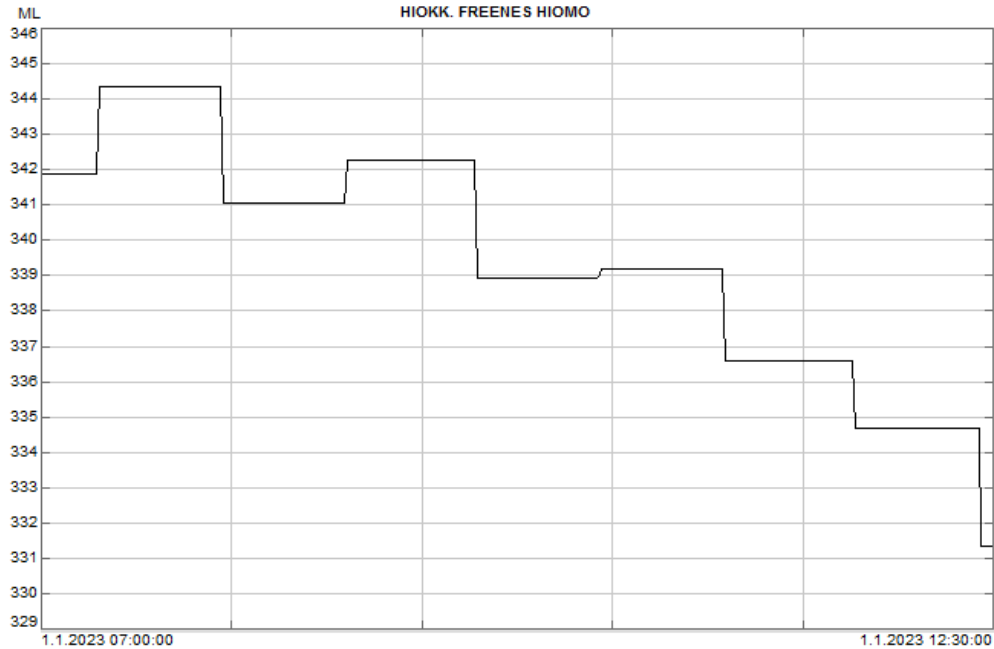




**Kuva 40.** Popen nopeuden, rungon Duovac-imulaatikoiden paineiden, rungon perälaatikon huuliaukon, rungon perälaatikon huulieron ja formaatioon flokkikoon muutokset koeajon aikana samassa kuvaajassa (26.12.22.) laadulla TB270.

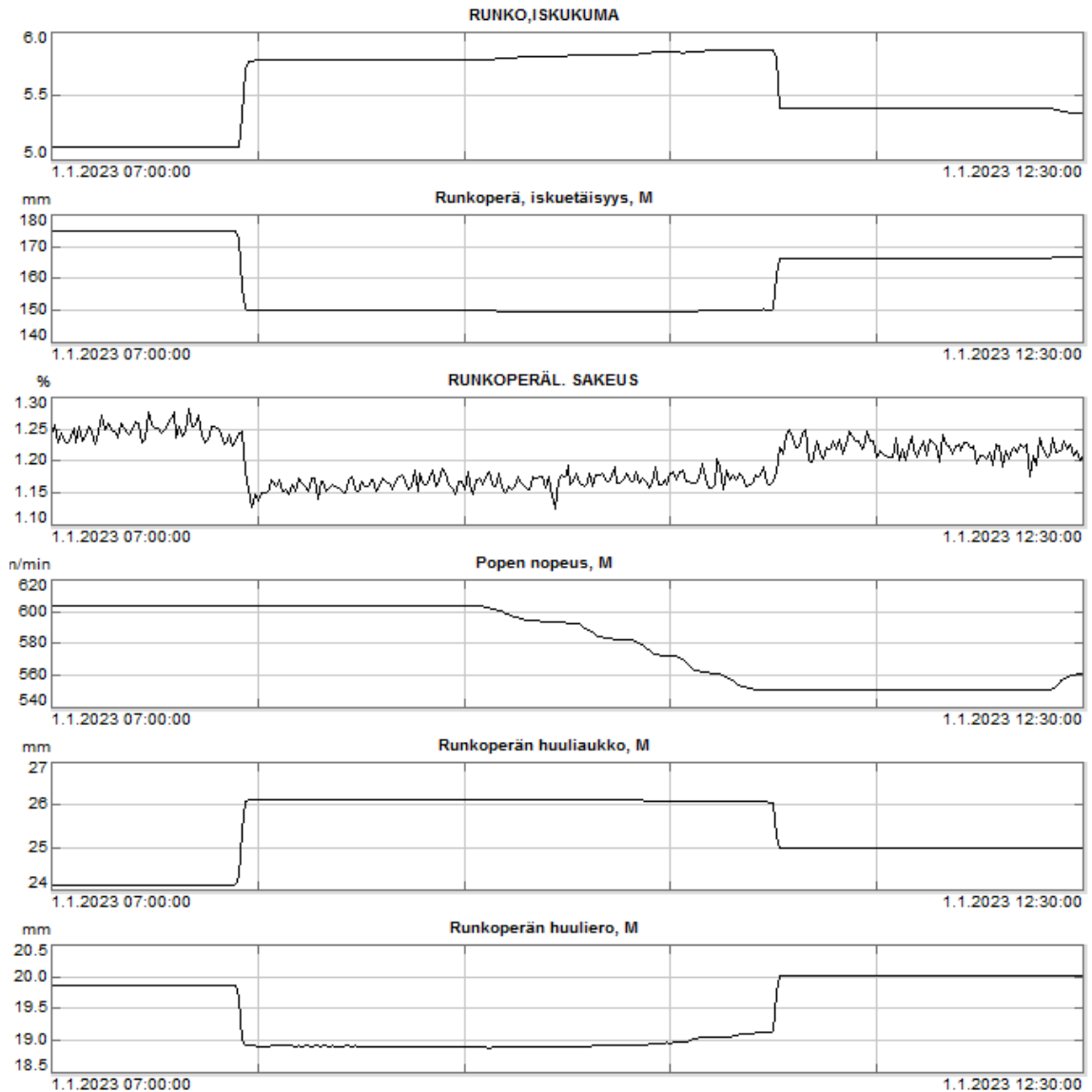
Kuvista 39 ja 40 voidaan huomata, että flokkikoko ja variability ovat heikentyneet koeajon alussa säätöjen jälkeen. Kuvien perusteella voidaan olettaa, että huuliaukkoa on hyvä pitää mahdollisimman alhaisena ja huulieroa mahdollisimman suurena, mikä hieman poikkeaa ensimmäisten koeajojen tuloksista kovalla nopeudella. Formaation variability -muuttujan arvot ja flokkikoon arvot hitaalla nopeudella ovat vastaavia kuin edellisessä koeajossa laadulla TB270 (26.12.22). Kuvista 39 ja 40 voidaan myös huomata, että ennen koeajon aloittamista runkoperälaatikon huulieron ja huuliaukon arvot ovat olleet lähtötilanteessa alhaisemmat kuin koeajossa käytetyt arvot. Arvot ovat myös pienempiä kuin edellisellä koeajokerralla vastaavalla laadulla. Laatu on ollut melko hyvää jo ennen koeajoa, joten voidaan olettaa, että ainakin mahdollisimman pieni huuliaukon koko tuottaa parempaa laatua formaation kannalta. On myös todennäköistä, että suuremmalla huulierolla on mahdollista saada parempaa laatua. Huuliero oli ennen koeajon aloittamista 19,8 mm ja koeajon aikana kovalla nopeudella 18,9 mm ja hitaalla 20,0 mm.

Kuvassa 41 on esitetty hiokkeen suotautuvuustason vaihtelu koeajon aikana.



**Kuva 41.** Hiokkeen freeness -arvon vaihtelut koeajon aikana 1.1.2023.

Hiokkeen freeness-arvot olivat koeajon aikana 1.1.2023 hieman korkeammat kuin edellisellä kerralla koeajon aikana laadulla TB270, kuten kuvasta 41 voidaan havaita. Hiokkeen suotautuvuustasolla ei oleteta olevan vaikutusta koeajon tuloksiin verrattuna edellisiin tuloksiin, koska freeness-arvojen ero on melko pieni. Kuvassa 42 on esitetty runkoperälaatikon huulieron, huulieron ja koneen nopeuden muutoksien vaikutukset runkoperälaatikon sakeuteen, iskuetäisyyteen ja iskukulmaan.



**Kuva 42.** Runkoperälaatikon iskukulman, iskuetäisyyden ja sakeuden muutokset koeajon aikana 01.01.2023 laadulla TB270.

Kuten kuvasta 37 ja myös kuvasta 42 voidaan havaita, että koneen nopeuden muutoksella ei ole ollut merkittävää vaikutusta runkoperälaatikon iskukulman tai iskuetäisyyden muutoksiin. Koneen nopeutta laskettaessa runkoperälaatikon sakeus hieman laskee arvosta 1,25 % arvoon 1,22 %. Runkoperälaatikon sakeus muuttuu koeajon aikana samassa suhteessa kuin runkoperälaatikon huuliaukon koko ja runkoperälaatikon huuliero. Kuten jo aiemmin on todettu, kuvan 37 mukaan runkoperälaatikon huuliaukko vaikuttaa eniten runkoperälaatikon sakeuteen laadulla TB270. Hitaalla koneen nopeudella huulieron ollessa suuri ja huuliaukon

pieni runkoperälaatikon sakeus on korkein, runkoperälaatikon iskuetäisyys suurin (168 mm) ja runkoperälaatikon iskukulma pienin (5,35 °). Samanaikaisesti flokkikoko ja formaation variability ovat alhaisimmat, kuten kuvasta 39 voidaan havaita. Kuten myös aikaisemmista koeajoista voidaan havaita, kartongin formaatio on parhaimmillaan, kun koneen nopeus on alhaisempi ja runkoperälaatikon huuliero suurin, huuliaukko pienin, iskukulma on pienin ja iskuetäisyys suurin. Iskukulmaa ja iskuetäisyyttä saadaan säädettyä haluttuihin arvoihin säättämällä runkoperälaatikon huulieroa ja runkoperälaatikon huuliaukkoa, kuten kuvasta 41 voidaan todeta.

Koeajon aikana otettiin kaksi kartonkinäytettä paperilaboratorion formaatioanalysejä varten. Näytteiden tulokset on esitetty alla olevassa taulukossa XXII.

**Taulukko XXII.** Laadulla TB270 1.1.2023 suoritettujen koeajojen formaationäytteiden tulokset.

		Koeajo nro 5	Koeajo nro 2
Ominaisuus	Yksikkö	Konerulla 3000008	Konerulla 3000015
Neliömassa	g/m <sup>2</sup>	265,3	270,8
Formaatio	g/m <sup>2</sup>	8,07	8,44
Tarkka formaatio	g <sup>0.5</sup> /m	0,5	0,51

Taulukosta XXII voidaan havaita, että konerullan 3000008 eli koeajon 5 näyte on parempaa laatua formaatiomittausten mukaan kuin 3000015, koska koeajossa 5 formaation arvot ovat pienempiä kuin koeajossa 2. Konerullan 3000008 aikana koneen nopeus on ollut suurempi kuin konerullan 3000015 aikana. Tulokset ovat ristiriidassa koeajon aikaisten on-linemit-tausten kanssa. Alla olevassa taulukossa XXIII on koko koeajon (1.1.2023) aikana ajettujen koerullien formaatioarvojen keskiarvot.

**Taulukko XXIII.** 1.1.2023 laadulla TB270 suoritettujen koeajon aikana mitatut formaation online-mittaukset. Arvot ovat konerullan keskiarvoja.

Kone- rulla	Popen nopeus (m/min)	Formaa- tio va- riability	Formaa- tio KS koko (mm)	Formaa- tio PS koko (mm)
3000016	551	77,77	3,67	5,86
3000015	551	78,12	3,70	5,96
3000014	551	78,30	3,53	5,89
3000009	603	86,48	3,93	6,59
3000008	603	86,69	3,94	6,59
3000007	603	86,95	3,86	6,63

Taulukoiden XXII ja XXIII sekä kuvien 39 ja 40 perusteella voidaan olettaa, että formaatio on ollut kokonaisuudessaan parempaa hitaammalla nopeudella kuin kovemmalla nopeudella. Taulukossa XXIII esitetyt arvot ovat online-mittauksesta laskettuja konerullan keskiarvoja, kun taas taulukossa XXII esitetyt arvot ovat konerullan tietyistä pisteistä mitattuja laboratoriomittausten arvoja. Tulosten ero voi selittyä näytepisteiden erolla, koska on mahdollista, että laatu vaihtelee konerullan leveys- ja pituussuunnassa. Koeajon aikana laadun paraneminen hitaammalla nopeudella oli myös visuaalisesti havaittavissa. Voi olla, että konerullan kohta, josta kartonkinäytteet on otettu, on ollut huonompaa laatua hitaammalla nopeudella kuin muu konerulla tai kovemmalla nopeudella näytteenottokohtaan laatu on sattunut olemaan hieman parempaa.

### 8.3.1 Optimit olosuhteet laadulle TB270

26.12.2022 ja 1.1.2023 suoritettujen koeajon perusteella voidaan todeta, että koneen nopeudella on erittäin suuri vaikutus kartongin laatuun erityisesti neliömassaltaan raskaammilla laaduilla. Ensimmäisten koeajojen oletuksena oli, että kovalla nopeudella olisi parempi tuottaa kartonkia niin, että runkoperälaatikon huuliaukko olisi mahdollisimman iso ja runkoperälaatikon huuliero mahdollisimman pieni, jotta formaatiota saataisiin parannettua. Tämä

oletus kuitenkin kumottiin koeajossa 1.1.2023. Sekä kovemmallalla, että hiljaisemmalla nopeudella on parempi, että runkoperälaatikon huuliaukko on mahdollisimman pieni ja runkoperälaatikon huuliero mahdollisimman suuri. Koeajojen perusteella todetut optimiolosuhteet laadulle TB270 on esitetty taulukossa XXIV.

**Taulukko XXIV.** Koeajojen perusteella optimoidut prosessiolosuhteet. Punaiset arvot viittaavat suuriin arvoihin ja siniset pieniin arvoihin.

Laatu	Popen nopeus (m/min)	Runko duovac1 paine (kPa)	Runko duovac2 paine (kPa)	Rungon perälaatikon huuliero (mm)	Rungon perälaatikon huuliaukko (mm)
TB270	551	4,0	5,0	20,0	24,0
TB270	603	4,0	5,0	20,0	24,0

Taulukon XXIV mukaan, voidaan todeta, että Duovacien paineet on pidettävä korkealla, runkoperälaatikon huuliero suurena ja runkoperälaatikon huuliaukko pienenä koneen nopeudesta riippumatta. Koeajoissa 26.12.2022 ja 1.1.2023 suurin käytetty runkoperälaatikon huuliaukon koko oli pienimmillään 25,0 mm, mutta ennen koeajon aloittamista arvo oli 24,0 mm. Koska koeajossa on todettu, että arvon tulisi olla mahdollisimman pieni ja ennen koeajon aloittamista 1.1.2023 laatu oli melko hyvää, voidaan olettaa, että huuliaukko voisi olla jopa 24,0 mm. Runkoperälaatikon huuliero oli koeajoissa ja ennen koeajoja suurimmillaan 20,0 mm. Todennäköistä on, että myös laadulla TB220 huulieron olisi hyvä olla suurempi myös kovemmallalla nopeudella, mutta sitä ei ole todistettu tässä työssä. On mahdollista, että arvo voisi olla jopa suurempi.

Jotta prosessi voitaisiin optimoida laadun kannalta, tulisi suorittaa vielä koeajoja, joissa runkoperälaatikon huuliero nostettaisiin ja runkoperälaatikon huuliaukkoa pienennettäisiin verrattuna tässä työssä suoritettuihin koeajoihin. Tutkimuksissa tulisi ottaa huomioon myös kartonkikoneen nopeuden vaikutus prosessiparametreihin. Jatkotutkimuksissa olisi selvitettävä kartonkikoneen nopeuden vaikutus huuliaukon optimikokoon eri nopeuksilla. Olisi myös hyvä toteuttaa laajempia tutkimuksia, jotta ohjaukskorttien raja-arvot saataisiin määritettyä jokaiselle laadulle, niin että ne toimisivat hyvin myös eri nopeuksilla. Tarvittaessa

ohjauskortit tulee määrittää erikseen eri nopeuksille erityisesti neliömassaltaan raskaammilla laaduilla. Jos ohjauskorttien valitut raja-arvot tietylle laadulle ovat samat jokaisella nopeudella, on mahdollista, että rajat ovat liian kaukana toisistaan, jolloin raja-arvoista ei ole hyötyä. Toisaalta rajoissa pitää myös olla hieman liikkumavaraa, koska prosessissa aina esiintyy satunnaista vaihtelua. Kyseiset koeajot eivät kuitenkaan enää kuulu tämän diplomityön tutkimukseen, vaan ne suoritetaan erikseen. Ohjauskorttien määrittämisessä tulee ottaa myös huomioon käytössä olevan viiran ominaisuudet. Jos viiran vedenpoisto-ominaisuudet muuttuvat, todennäköisesti myös ajo-olosuhteet muuttuvat, joten samoja muuttujien arvoja ei voida käyttää tuotannossa. Viiran vedenpoisto-ominaisuuksien muuttuessa tarvittava veden määrä runkomassassa voi muuttua oleellisesti, jolloin vastaavia koeajoja olisi hyvä suorittaa uudestaan.

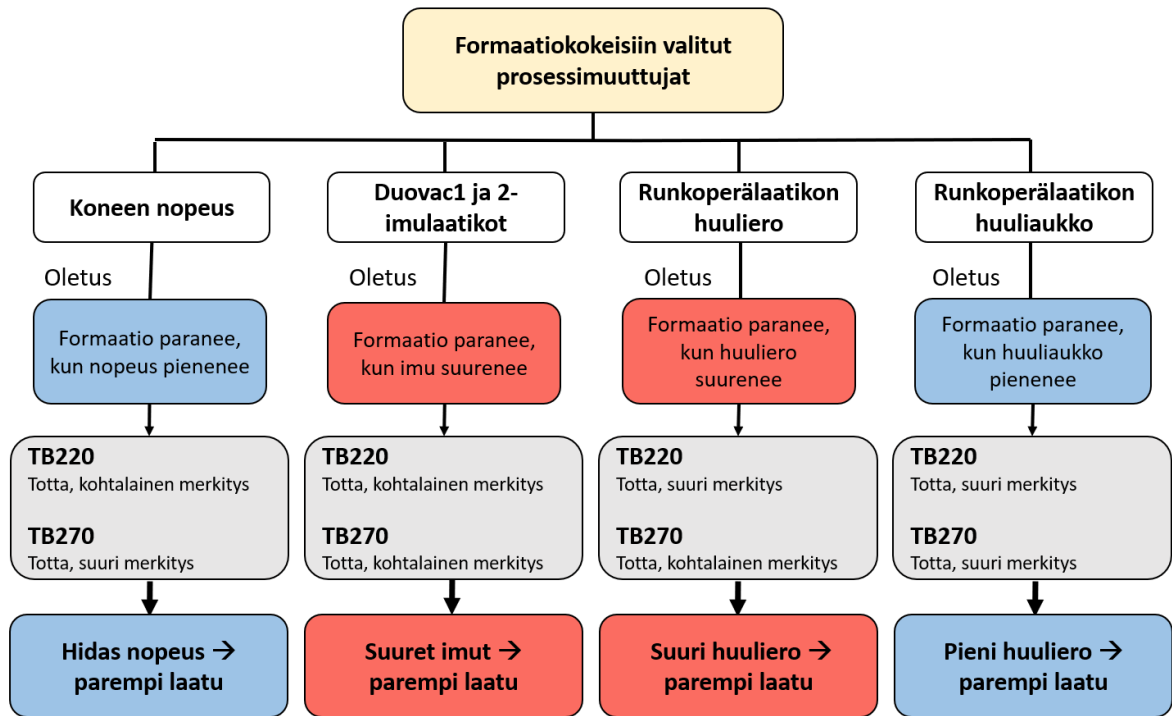
## 9 YHTEENVETO

Inkeröisten kartonkitehtaalla on tuotettu laadukasta kartonkia jo 125 vuotta. Kartongin valmistusprosessia ja kartongin laatua on pyritty parantamaan jatkuvasti ja yksi viimeisimmistä kehitysprojekteista on ollut SPC:n käyttöönotto. SPC:n eli tilastollisen prosessinohjauksen tarkoituksena on hyödyntää prosessidataa tuotantoprosessin ja laadun optimoimiseksi. SPC:n avulla on mahdollista löytää haluttuun laatuominaisuuteen eniten vaikuttavia prosessimuuttujia, luoda ohjaukskortteja muuttujille ja ohjaukskorttien avulla on mahdollista optimoida tuotantoprosessia ja vähentää satunnaisvaihtelua. (Qui, 2013). Tämän työn tavoitteena oli tutkia kartongin formaatioon eniten vaikuttavia tekijöitä ja pyrkiä löytämään paremmat tuotanto-olosuhteet, jotta formaatiota on mahdollista parantaa.

Ennen koeajoja oli oletuksena, että koneen nopeutta nostamalla ja runkoperälaatikon huuliauukkoa suurentamalla flokkikoko kasvaa ja runkoperälaatikon huuliero pienentämällä flokkikoko pienenee. Koeajot suoritettiin monimuuttujakokeilla kahdella eri laadulla. Valittuja muuttujia oli viisi, jotka olivat koneen nopeus (popen nopeus), Duovac1- ja Duovac2-imulaatikoiden paineet, runkoperälaatikon huuliauukon koko ja runkoperälaatikon huuliero.

Koeajojen tulosten perusteella kartonkikoneen nopeudella on suuri merkitys kartongin laatuun. Yleisesti voidaan todeta, että hitaammalla nopeudella on mahdollista tuottaa parempaa laatua kuin kovemalla nopeudella. Kun kartonkikoneella on ajossa neliömassaltaan raskaampia laatuja, kartonkikoneen nopeuden merkitys kasvaa. Hitaammalla nopeudella on mahdollista saada sekä flokkikokoja että formaation variability -muuttujaa pienemmiksi. Kuvassa 43 on esitetty kooste koeajoissa tutkituista formaatioon vaikuttavista muuttujista ja niiden vaikutuksesta kartongin formaatioon.





**Kuva 43.** Formaatioon vaikuttavat prosessimuuttujat. Sinisillä muuttujilla on negatiivinen korrelaatio ja punaisilla muuttujilla positiivinen korrelaatio kartongin laatuun.

Kuvan 43 perusteella voidaan todeta, että hitaammalla nopeudella ja pienemmällä runkoperälaatikon huuliaukolla on mahdollista tuottaa parempaa laatua. Samanaikaisesti Duovac-imulaatikoiden imu ja runkoperälaatikon huuliero on pidettävä suurena. Koneen nopeudella ja runkoperälaatikon huuliaukolla oli hieman suurempi vaikutus kartongin formaatioon kuin Duovac-imulaatikoilla ja runkoperälaatikon huulierolla. Koeajojen tuloksissa täytyy ottaa huomioon, että esimerkiksi hiokkeen laadulla ja käytössä olevan runkoviiran ominaisuuksilla voi olla suuri vaikutus prosessimuuttujiin ja niiden säätöarvoihin. Tutkimustulokset ovat suuntaa antavia.

Taulukossa XXV on esitetty laaduilla TB220 ja TB270 suuntaa antavat ohjearvot rungon Duovac-imulaatikoiden paineille, runkoperälaatikon huulierolle ja runkoperälaatikon huuliaukolle kahdella eri nopeudella, kun tarkoituksena on optimoida kartongin formaatiota.

**Taulukko XXV.** Ohjearvot rungon Duovac-imulaatikoiden paineille, runkoperälaatikon huulierolle, ja runkoperälaatikon huuliaukolle kahdella eri koneen nopeudella laaduilla TB220 ja TB270. Punaiset arvot viittaavat suuriin arvoihin ja siniset pieniin arvoihin.

Laatu	Popen nopeus (m/min)	Runko duovac1 paine (kPa)	Runko duovac2 paine (kPa)	Rungon perälaatikon huuliero (mm)	Rungon perälaatikon huuliaukko (mm)
TB220	657	4,0	4,0	17,3	21,1
TB220	699	4,0	4,0	16,5 tai 17,3	21,1
TB270	544	4,0	5,0	20,0	24,0
TB270	597	4,0	5,0	20,0	24,0

Taulukossa XXV esitetyistä voidaan havaita, että kevyemmällä laadulla runkoperälaatikon huuliero ja huuliaukko ovat pienempiä kuin neliömassaltaan raskaammilla laaduilla. Koero selittyy sillä, että runkomassa on sakeampaa raskaammilla laaduilla, jolloin myös runkoperälaatikon huuliaukon ja huulieron tulee olla suurempia. Runkoperälaatikon säädöt vaikuttavat runkoperälaatikon iskukulmaan ja iskuetäisyyteen. Koeajojen perusteella iskukulma olisi hyvä olla mahdollisimman pieni ja iskuetäisyyden mahdollisimman pieni laadusta riippumatta. Runkoperälaatikon huulien säädöt vaikuttavat myös hieman runkoperälaatikon sakeuteen. Hieman korkeammalla sakeudella oli koeajossa mahdollista tuottaa parempaa formaatiota kuin matalammalla sakeudella. Erityisesti kevyemmällä laaduilla koneen nopeus ei vaikuttanut merkittävästi runkoperälaatikon sakeuteen, iskukulmaan ja iskuetäisyyteen. Imulaatikoiden paineet ovat olleet lähellä maksimia molemmilla laaduilla, mutta jostain syystä ensimmäisissä koeajoissa kevyemmällä laadulla paineet jäivät alhaisemmiksi. Laadulla TB270 suoritettiin toinen koeajo, jossa todistettiin, oliko laatua mahdollista parantaa valituilla arvoilla.

Toisessa laadun TB270 koeajossa todettiin, että oletus koneen nopeuden vaikutuksesta laatuun oli oikea. Myös oletus, että pienemmällä runkoperälaatikon huuliaukolla ja suuremmalla runkoperälaatikon huulierolla on mahdollista parantaa kartongin laatua, osoittautui oikeaksi. Tutkimuksessa jäi selvittämättä, kuinka paljon runkoperälaatikon huuliaukkoa voi pienentää ja kuinka paljon runkoperälaatikon huuliero voi suurentaa, jotta laatu paranee

edelleen. Tutkimuksia ei myöskään tehty muilla laaduilla; ainoastaan kahdella eri grammalla. Prosessiparametrien muilla arvoilla ja eri laaduilla tulisi suorittaa koeajoja, jotta optimit ajoarvot saataisiin selvitettyä jokaiselle laadulle. Olisi myös hyvä tutkia, kuinka paljon nopeuden muutos vaikuttaa muihin prosessiparametrien asetuksiin. Koska kartonkikoneen nopeus vaikuttaa merkittävästi kartongin laatuominaisuuksiin, kartonkikoneen nopeuden vakioiminen olisi äärimmäisen tärkeää. Vakionopeudella ohjauskortit pystyttäisiin määrittämään niin, että valvonta- ja määrittäysrajoja sekä ajostandardia noudattamalla olisi mahdollista tuottaa kartonkia mahdollisimman hyvällä formaatiolla. Tarvittaessa ohjauskortit tulisi luoda koneen eri nopeuksille erikseen, jotta ajostandardia sekä valvonta- ja määrittäysrajoja noudattamalla olisi mahdollista tuottaa parasta laatua. Koneen nopeuden vakioimisella ja tarvittaessa luomalla ohjauskortit eri nopeuksille, voidaan välttää tilanteet, joissa ohjauskorttien alueet ovat liian leveät tai kapeat. Jos ohjauskorttien alueet ovat liian leveät, ohjauskortit menettävät merkityksensä eikä niitä noudattamalla ole mahdollista tuottaa parasta mahdollista laatua ja vaihtelua esiintyy paljon. Jos ohjauskorttien alueet ovat liian kapeat, niitä on vaikea noudattaa, ja olosuhteiden muuttuessa korttia noudattamalla ei välttämättä ole mahdollista tuottaa hyvää laatua rajojen sisäpuolella.

## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa todistettiin, että tilastollista prosessinohjausta on mahdollista hyödyntää kartongin valmistuksessa, kun tavoitteena on parantaa kartongin laatua. Kun kartonkikoneen dataa ryhdytään tarkastelemaan SPC:n näkökulmasta, tulee tarkastelu suorittaa yhdellä laadulla kerrallaan ja mielellään niin, että koneen nopeus on pysynyt vakiona. Koeajoissa todistettiin, että koneen nopeudella oli suurempi vaikutus kartongin laatuun kuin muilla prosessimuuttujilla, joten koneen nopeuden vakioiminen on äärimmäisen tärkeää, jotta kartongin laatu vaihtelua saadaan vähennettyä. Tilastollisen prosessinohjauksen avulla on mahdollista löytää oletettavasti laatuun vaikuttavia tekijöitä nopeasti ja korrelaatiomatriisin avulla voi päätellä, onko prosessimuuttujan korrelaatio positiivinen vai negatiivinen laatumuuttujaan nähden. Jotta korrelaatioiden tarkasteleminen onnistuu parhaiten, on tärkeää, että prosessin tuntemus on riittävällä tasolla. Tilastollinen prosessinohjaus on vain matemaattinen mallinnus prosessidatasta, joten mahdolliset virheet voidaan välttää tuntemalla prosessi mahdollisimman hyvin. Tehtyjen tutkimuksien pohjalta on hyvä jatkaa SPC:n käyttöönottoa ja soveltamista tuotannon tarpeisiin.

Jatkotutkimuksissa tulisi selvittää, kuinka kartonkikoneen nopeus vaikuttaa prosessimuuttujien ajoarvoihin. On todennäköistä, että neliömassaltaan raskaammilla laaduilla nopeudella on merkitystä muuttujien arvoihin, kun tavoitteena on optimoida kartongin laatua. Jatkotutkimuksissa tulisi myös selvittää, onko koeajoissa tutkittujen muuttujien oletetut optimiarvot todellisuudessa parhaimmat mahdolliset ajoarvot laadun kannalta. Tutkimuksissa tutkittiin vain muuttujien kahta eri arvoa (pieni ja suuri arvo), joten jos lopputuloksissa on todettu, että muuttujan arvon olisi hyvä olla pieni arvo, tulisi tutkia kuinka paljon arvoa on mahdollista pienentää entisestään. Koeajoissa huomattiin, että kartongin neliömassa vaikuttaa merkittävästi muuttujien arvoihin sekä prosessimuuttujien ja formaation väliseen korrelaatioon, joten jatkotutkimuksia tulisi selvittää myös prosessimuuttujien ajoarvot muillakin laaduilla. Jo tutkittujen prosessimuuttujien lisäksi kartongin formaatioon vaikuttaa todennäköisesti myös moni muu prosessimuuttuja. SPC:n käyttöönoton jälkeen olisi hyvä tutkia myös muita

prosessimuuttujia ja pyrkiä optimoimaan ne. Jos runkoviira vaihdetaan uuteen ja vedenpoisto-ominaisuudet muuttuvat, niin se tulisi ottaa jatkotutkimuksissa huomioon. Vedenpoisto-ominaisuuksien muuttuessa myös prosessiparametrien arvot voivat muuttua jonkin verran.

## LÄHTEET

AIAG (Automotive Industry Action Group). 2005. Statistical Process Control (SPC), Second Edition. AIAG. pp. 12-158, 181.

Ajjaj, S., et al. 2022. A New Multivariate Approach for Real Time Detection of Routing Security Attacks in VANETs.

dataPARC. 2022a. Käsikirja, Welcome to dataPARC 7.1.

dataPARC. 2022b. kotisivut, [About Us \(dataparc.com\)](https://dataparc.com). [Viitattu 25.5.2022].

Haeberle, M. 2020. Pulp and Paper Workers, and Paper Dermatitis. In: John, S. et al. Kanerva's Occupational Dermatology. Springer, Cham. pp. 2183-2202.

Hassinen, P. 2022. Sisäinen ongelmanratkaisukoulutus. Stora Enso Ingerois Oy.

Hietanen, H. 2022. Stora Enso. Haastattelu 1.9.2022.

Hägglom-Ahnger, U. ja Komulainen, P. 2001. Paperin ja kartongin valmistus. Kemiallinen metsäteollisuus II, 2. painos. Opetushallitus. pp.75-236.

ISO 13053-1:2011. Prosessin kehittämisen kvantitatiiviset menetelmät. Six Sigma. Osa 1: DMAIC-menetelmä. Suomenkielinen käännös 2014. Suomen standardisoimisliitto SFS. pp. 1-52.

Itay, N., Yisrael, P. ja Edna, S. 2009. Developing a sampling plan based on Cpk. In Quality Engineering, 21. Taylor & Francis Group, LLC. pp. 306-318.

Jiju, A. 2003. Design of experiments for engineers and scientists. Oxford: Bittenworth-Heinemann. pp. 1-14.

Juran, J. M. ja De Feo, J. A. 2012. Juran's quality handbook: the complete guide to performance excellence. 6<sup>th</sup> edition. McGraw-Hill, New York. pp. 19-43.

Koiranen, T. 2023. LUT yliopisto. Haastattelu 20.1.2023.

Lehtonen, V. 2022. Stora Enso. Haastattelu 1.9.2022.

Liu, Y. et al. 2013. Mission reliability modeling of manufacturing processes and system. In Applied mechanics and materials vol. 248 (2013). Trans Tech Publications, Switzerland. pp. 450-455.

Luoma, T. 2022. Stora Enso. Haastattelu heinäkuu 2022.

Mundwiller, S. 2017. Statistical Process Control: A Pragmatic Approach. Milton: CRC Press.

Nowacka, M., et al. 2018. The quality and safety of food contact materials – paper and cardboard coated with paraffin emulsion. In: Food Control, 2018, Vol 93. Oxford, Elsevier. pp. 183-190.

Neubauer, D. V. 2010. Manual on presentation of data and control chart analysis. ASTM International, USA. pp. 40-60.

Pakdil, F. 2020. Control Charts. In: Six Sigma for Students. Palgrave Macmillan, Cham. pp. 333-373.

Parkkinen, P ja Vertanen, I. 2022. Stora Enso. Koeajopalaveri 17.10.2022.

Paulapuro, H. 2000. Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. Fapet Oy, Jyväskylä. pp. 224-226.

Patil, V. H. ja Franken, F. H. 2021. Visualization of statistically significant correlation coefficients from a correlation matrix: a call for a change in practice. *Journal of Marketing Analytics* 9. pp. 286-297.

Qui, Peihua. 2013. Introduction to statistical process control. Boca Raton, FL: Chapman and Hall/CRC, an imprint of Taylor and Francis. First edition. pp. 1-10.

Rantamäki, J., Tiainen E-L. ja Kässi, T. 2013. A case of implementing SPC in a pulp mill. *International Journal of Lean Six Sigma*, Bingley Vol. 4. Iss 3. pp. 321-337.

Ross, S. M. 2017. Introductory statistics. Elsevier, Amsterdam. pp. 84-105.

Salomäki, R. 2003. Suorituskykyiset prosessit – Hyödynnä SPC, 2. uudistettu painos. Metalliteollisuuden Keskusliitto, MET, Tampere. pp. 82-85, 178-360.

Santos-Fernández, E. 2013. Multivariate Quality Control Using R. Springer, New York. pp. 4-8.

Senvar, O. ja Sennaroglu, B. 2016. Comparing performances of Clements, Box-Cox, Johnson Methods with Weibull distributions for assessing process capability. In *Journal of industrial engineering and management*, Vol 9. OmniaScience. pp. 634-656.



Stapenhurst, Tim. 2005. Mastering statistical process control: a handbook for performance improvement using cases. Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam; London. pp. 1-7.

Stora Enso, Ingerois Mill. 2022a. Osa 1, dataPARC demo ja koulutus 2.2.2022. Sisäinen koulutusvideo.

Stora Enso. 2022b. Valmistus. Sisäinen verkkosivusto. WeShare.

Stora Enso. 2022c. Stora Enso Oyj paikallistiedote 14.6.2022, Stora Enso investoi 3,5 miljoonaa euroa Inkeröisten Kartongitehtaan hiilijalanjäljen pienentämiseen. WeShare.

Stora Enso. 2022d. SPC-koulutus. Sisäinen koulutus 30.8.2022.

Stora Enso. 2022e. Inkeröisten kartongitehdas. Sisäinen verkkosivusto.

Stora Enso. 2021a. Tehdasesittely. Sisäinen verkkosivusto, WeShare.

Stora Enso. 2019a. Puusta Kartongiksi, QCS. Sisäinen verkkosivusto, WeShare.

Stora Enso. 2019b. Puusta Kartongiksi, Raaka-aineet. Sisäinen verkkosivusto, WeShare.

Stora Enso. 2019c. Puusta Kartongiksi, Valmistus KK4. Sisäinen verkkosivusto, WeShare.

Stora Enso. 2013. KnowPap, Paperitekniikan ja automaation oppimisympäristö. Sisäinen verkkosivusto, WeShare.

Stora Enso. 2012a. Anjalankosken tehtaiden historiaa. Sisäinen verkkosivusto, WeShare.

Tesfay, Y. Y. 2021. Developing structured procedural and methodological engineering designs -Applied industrial engineering tools. Springer, USA. pp. 3-194.

Tilastokeskus. 2023. Johdatus tilastotieteeseen. [verkkosivusto]. Linkistä [Tilastokoulu - Tilastokeskus \(stat.fi\)](https://tilastokeskus.fi). [Viitattu 4.1.2023].

Valmet. 1997. Kartonkikoneet. Puusta paperiin M-506. Sepsilva LTD, 2. muunnettu painos. pp. 46-128.

Vuoro 4, määränpään valvomo. 2022. Stora Enso. Haastattelu 5.10.2022.

**LIITTEET**

Liite A

Näyte-erän koko	x- ja R-kortit				x- ja s-kortit				x/MR-kortti
	A <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	d <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	c <sub>4</sub>	
2	1,880	0	3,267	1,128	2,659	0,000	3,267	3,267	2,660
3	1,023	0	2,574	1,693	1,954	0,000	2,568	2,568	1,772
4	0,729	0	2,282	2,059	1,628	0,000	2,266	2,266	1,457
5	0,577	0	2,114	2,326	1,427	0,000	2,089	2,089	1,290
6	0,483	0	2,004	2,534	1,287	0,030	1,970	1,970	1,184
7	0,419	0,076	1,924	2,704	1,182	0,118	1,882	1,882	1,109
8	0,373	0,136	1,864	2,847	1,099	0,185	1,815	1,815	1,054
9	0,337	0,184	1,816	2,970	1,032	0,239	1,761	1,761	1,010
10	0,308	0,223	1,777	3,078	0,975	0,284	1,716	1,716	0,975
11	0,285	0,256	1,744	3,173	0,927	0,321	1,679	1,679	NA
12	0,266	0,283	1,717	3,258	0,886	0,354	1,646	1,646	NA
13	0,249	0,307	1,693	3,336	0,850	0,382	1,618	1,618	NA
14	0,235	0,328	1,672	3,407	0,817	0,406	1,594	1,594	NA
15	0,223	0,347	1,653	3,472	0,789	0,428	1,572	1,572	NA
16	0,212	0,363	1,637	3,532	0,763	0,448	1,552	1,552	NA
17	0,203	0,378	1,622	3,588	0,739	0,466	1,534	1,534	NA
18	0,194	0,391	1,608	3,640	0,718	0,482	1,518	1,518	NA
19	0,187	0,403	1,597	3,689	0,698	0,497	1,503	1,503	NA
20	0,180	0,415	1,585	3,725	0,680	0,510	1,490	1,490	NA
21	0,173	0,425	1,575	3,778	0,663	0,523	1,477	1,477	NA
22	0,167	0,434	1,566	3,819	0,647	0,534	1,466	1,466	NA
23	0,162	0,443	1,557	3,858	0,633	0,545	1,455	1,455	NA
24	0,157	0,451	1,548	3,895	0,619	0,555	1,445	1,445	NA
25	0,153	0,459	1,541	3,931	0,606	0,565	1,435	1,435	NA

AIAG, 2005.