

**Susanna Lähde**

**Keskeiset mittarit kartonkikoneen suorituskyvyn  
arvioinnissa**

Tieto- ja ohjelmistotekniikan diplomityö

4. kesäkuuta 2024

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

**Tekijä:** Susanna Lähde

**Yhteystiedot:** stlahde@ju.fi

**Ohjaaja:** Professori Tommi Mikkonen

**Työn nimi:** Keskeiset mittarit kartonkikoneen suorituskyvyn arvioinnissa

**Title in English:** Key Metrics for Assessing Board Machine Performance

**Työ:** Diplomityö

**Opintosuunta:** Datatekniikka

**Sivumäärä:** 57+0

**Tiivistelmä:** Globaalin kilpailun kiristyessä teollisuusyritysten tuottavuuden parantaminen on muodostunut erittäin tärkeäksi tekijäksi menestyksen saavuttamiseksi ja kilpailuedun parantamiseksi. Yritykset panostavat taloudellisen tehokkuuden lisäksi myös tehtaiden tuotantolinjojen toiminnallisen tehokkuuden kasvattamiseen. Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää mitkä ovat keskeisimmät mittarit, joilla kartonkikoneiden tuotantotehokkuutta voidaan mitata ja arvioida. Työn teoriaosuudessa keskitytään selvittämään millaisia tuotantotehokkuudenmittareita kartonkitehtaissa käytetään. Empiirisessä osiossa tutkitaan miten tuotantotehokkuuden mittareita voidaan laskea ja havainnoida tutkimuksessa käytetyn datan avulla. Lisäksi tutkitaan, miten tuotantotehokkuuden vaihteluita voidaan analysoida. Tutkimuksen perusteella kartongin valmistuksen keskeisimmät tuotantotehokkuutta kuvaavat tunnusluvut ovat aikahyötysuhde, materiaalihyötysuhde ja näiden yhdistelmästä koostuva kokonaistehokkuus. Tutkimuksessa käytetystä datasta onnistuttiin laskemaan ja visualisoimaan kolme aikaan liittyvää tunnuslukua. Lasketut tunnusluvut olivat käyttöaste, aikahyötysuhde ja aikahyötysuhde ilman seisokkeja. Materiaalihyötysuhdetta ja kokonaistehokkuutta ei onnistuttu laskemaan datasta puuttuvien tietojen vuoksi. Tutkimuksen tulokset osoittivat, että tehokkuusmittarit helpottavat ja monipuolistavat tuotantolinjojen tehokkuuden havainnointia sekä tarjoavat tärkeää tietoa konelinjan suorituskyvystä. Tuotantotehokkuuden vaihteluiden tarkempi analyysi on kuitenkin haastavaa, koska datan saatavuuteen ja sen oikeaan tulkintaan liittyy todellisessa tuotantoympäristössä paljon epävarmuustekijöitä.

**Avainsanat:** kartongin valmistus, tuotantotehokkuus, aikahyötysuhde, materiaalihyötysuhde, kokonaistehokkuus, data-analytiikka

**Abstract:** As the global competition is getting tougher improving the productivity of industrial companies has become a very important factor for achieving success and improving competitive advantages. Companies are investing not only in financial terms but also trying to increase the operational efficiency of their production lines. The goal of this thesis is to find out what are the most important metrics that can be used to measure and evaluate the production efficiency of board machines. Another target is to evaluate how production efficiency measures can be calculated and observed with the help of the data used in the research. In addition, we discuss how variations in production efficiency can be analyzed. Based on the research the key figures describing the production efficiency of board making are time efficiency, material efficiency and total efficiency consisting of the combination of these two. Based on the data used in this study it was possible to calculate and visualize three time-related efficiency figures. These were time efficiency, time efficiency without shutdowns and operating rate. The material efficiency and therefore also the total efficiency couldn't be calculated due to missing information in the data. A more precise analysis of the variations in production efficiency is challenging, because the availability of data and its correct interpretation are associated with a lot of uncertainty factors in a real production environment.

**Keywords:** boardmaking, production efficiency, time efficiency, area efficiency, overall efficiency, data-analysis

## Esipuhe

Tämä diplomityö tehtiin Valmet Technologies Oy:lle keväällä 2024. Haluan kiittää työnantajaani tästä hienosta mahdollisuudesta oppia lisää kartonkikoneiden ihmeellisestä maailmasta. Suurimmat kiitokset haluan osoittaa työni ohjaajille Jari Kääriäiselle ja Markku Markkaselle. Ilman heidän asiantuntevaa ohjausta ja rohkaisevaa työilmapiiriä olisi diplomityöni teko ollut täysin erilainen kokemus. Jyväskylän yliopistolta haluan kiittää professori Tommi Mikosta arvokkaasta palautteesta ja ohjauksesta prosessin aikana. Kiitos myös läheisilleni, erityisesti äidilleni Päiville ja avopuolisolleni Aatulle, kannustamisesta ja tuesta tämän kevään aikana.

On ollut hienoa oppia lisää kartongin valmistuksesta. Uskon, että diplomityön tekemisen aikana hankkimani tiedot tulevat olemaan hyödyllisiä tulevissa työtehtävissäni. Tämän myötä jätän yliopiston taakseni ja siirryn onnellisena ja kiitollisena kohti uusia haasteita.

Jyväskylässä 4. kesäkuuta 2024

Susanna Lähde

## Termiluettelo

Data-analyysi	Prosessi, jossa kerättyä dataa käsitellään ja tulkitaan tietojen ja johtopäätösten saamiseksi.
Koneoppiminen	Algoritmien ja tilastollisten mallien käyttö tietokoneiden kyvykkyyden parantamiseksi oppia ja tehdä päätöksiä datan perusteella.
KPI	Key Performance Indicator. Suorituskykymittari.
Lainerikartonki	Yleisnimitys kartongeille, joita käytetään aaltopahvin pinta-kerroksena.
OEE	Overall Equipment Effectiveness. Kokonaistehokkuutta kuvaava tunnusluku.
OME	Overall Machine Efficiency. Koneen kokonaistehokkuutta kuvaava tunnusluku.
Testlaineri	Pääasiassa kierrätyskuidusta valmistettu lainerikartonki.
TPM	Total Productive maintenance. Tuottavan kunnossapidon ohjelma.
Valkopintainen laineri	Uusiokuitukartonki, jonka pintakerros on valkaistua sellua.

## Kuviot

Kuvio 1. Kartonkikone sivulta kuvattuna .....	5
Kuvio 2. Viiraosa .....	6
Kuvio 3. Puristinosa .....	6
Kuvio 4. Kuivatusosat .....	7
Kuvio 5. Jälkikäsittelyt .....	8
Kuvio 6. Rullain ja pituusleikkuri .....	9
Kuvio 7. Tuotantolinjan häviöt ( <i>Production Indices For Paper Production 2005</i> ) .....	14
Kuvio 8. Ajan määräytyminen ( <i>Production Indices For Paper Production 2005</i> ) .....	15
Kuvio 9. Tyhjäkäyntiajan ja seisokkiajan muodostuminen valmistusprosessissa ( <i>Production Indices For Paper Production 2005</i> ) .....	18
Kuvio 10. Tyhjäkäyntiaika valmistusprosessissa ( <i>Production Indices For Paper Production 2005</i> ) .....	19
Kuvio 11. Tutkimusprosessin kulku .....	29
Kuvio 12. Aikahyötysuhde .....	32
Kuvio 13. Aikahyötysuhde ilman seisokkeja .....	33
Kuvio 14. Käyttöaste .....	34
Kuvio 15. Katkojen ja alle 48 tuntia kestäneiden seisokkien lukumäärät viikottain .....	35
Kuvio 16. Tuotannon suhde mitoituslaitantoon lajeittain .....	37

## Taulukot

Taulukko 1. OEE:n osatekijöiden tavoitearvot .....	12
Taulukko 2. Aikakategorioiden ohjearvot ( <i>Paper Machine Performance Guidelines 2022</i> ) .....	20
Taulukko 3. Lainerikartongin tunnuslukujen ohjearvot ( <i>Paper Machine Performance Guidelines 2022</i> ) .....	26
Taulukko 4. Ajanjaksojen määrittely datasta .....	30
Taulukko 5. Lasketut aikahyötysuhteet vuoden ajalta .....	31
Taulukko 6. Mitoitukset lajeittain testlainerille .....	35
Taulukko 7. Mitoitukset lajeittain valkopintaiselle lainerille .....	36
Taulukko 8. Tuotantotehokkuuden tunnusluvut kartonginvalmistuksessa .....	43

# Sisällys

1	JOHDANTO .....	1
2	KARTONGIN VALMISTUS.....	4
	2.1 Massankäsittely ja lyhytkierto .....	4
	2.2 Perälaatikko ja viiraosa .....	5
	2.3 Puristin .....	6
	2.4 Kuivatuosa .....	6
	2.5 Jälkikäsittelyt .....	7
	2.6 Rullain ja pituusleikkuri .....	8
	2.7 Kartonkikoneiden automaatio .....	9
3	TUOTANTOTEHOKKUUDEN MITTAAMINEN .....	11
	3.1 Kokonaistehokkuus, OEE.....	11
	3.2 Tuotantotehokkuutta kuvaavat mittarit kartongin valmistuksessa.....	13
	3.2.1 Taustaa .....	14
	3.2.2 Ajan määritelmät kartongin valmistuksessa .....	15
	3.2.3 Aikaan liittyvät tunnusluvut .....	21
	3.2.4 Pinta-alan määritelmät.....	22
	3.2.5 Materiaalihyötysuhde.....	23
	3.2.6 Kokonaistehokkuus .....	25
4	TUTKIMUSASETELMA .....	28
	4.1 Tutkimuksen tausta ja käytetyt työkalut.....	28
	4.2 Tutkimuksen toteutus .....	28
	4.2.1 Datan esikäsittely .....	29
	4.2.2 Tunnuslukujen laskeminen .....	29
	4.2.3 Mitoitustuotantoon vertailu .....	35
	4.2.4 Ajatuksia tuotantotehokkuuden vaihteluiden analyysiin.....	37
5	TULOKSET.....	39
	5.1 Tutkimuksen tulokset .....	39
	5.2 Tutkimuksen haasteet .....	40
6	POHDINTA .....	42
	6.1 Tutkimuskysymyksiin vastaaminen .....	42
	6.2 Tutkimuksen merkitys .....	44
	6.3 Ehdotukset jatkotutkimusaiheiksi .....	45
7	YHTEENVETO.....	47
	LÄHTEET .....	48

# 1 Johdanto

Liiketoiminnan lisääntynyt kilpailu edellyttää valmistavilta yrityksiltä niiden kaikkien liiketoiminta-alueiden, niin tuotanto- kuin huoltosektorien, suorituskyvyn jatkuvaa ylläpitoa ja kehittämistä kilpailuedun saavuttamiseksi. Maailmanlaajuisen kilpailun kasvaessa yritysten huomio on siirtynyt taloudellisen tehokkuuden lisäämisestä mittakaavaetujen etsimiseen ja hyödyntämiseen, sekä sisäisen erikoistumisen kasvattamiseen. Näiden avulla yritykset pyrkivät vastaamaan entistä paremmin markkinoiden vaatimuksiin joustavuuden, toimituskyvyn ja laadun näkökulmasta. Tuottavuuden parantaminen on yrityksille erittäin tärkeä tekijä menestyksen saavuttamiseksi liiketoiminnassa. Kaikki organisaation tasot vaikuttavat tuottavuuteen, joko lisäämällä tai vähentämällä sitä. Yksi esimerkki yrityksen tuottavuuden arvioinnista on sen tuotantolaitosten tuotantolinjojen suorituskyvyn arviointi. Suorituskykyyn vaikuttavat lukuisat tuotantolaitosten ongelmat, jotka aiheuttavat tuotannon keskeytymisen tai pysähtymisen kokonaan. Yleisesti ottaen ongelmat voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: ihmisiin, koneisiin ja ympäristötekijöihin. Tapoja vaikuttaa näihin kategorioihin on monia, mutta yksi yleinen tapa vähentää ongelmien aiheuttamia tuottavuuden menetyksiä on jatkuva ja systemaattinen tuotantokoneiden analysointi, ylläpito ja huolto. (Sayuti, Julianda ja Fatimah 2019)

Paperi- ja kartonkiteollisuus on pääoma- ja energiaintensiivinen teollisuudenala ja siksi alan tuotantolaitosten tehokkuuden maksimoinnilla on suuret taloudelliset vaikutukset. Jatkuva parantaminen on olennainen osa näiden yritysten kilpailuedun varmistamista. Lisäksi korkea teknologinen osaaminen minimoi yritysten toiminnan ympäristövaikutukset. Yksi osa teknologian kehittämisessä ja hyödyntämisessä liittyy tuotantoprosessin datan tehokkaampaan ja monipuolisempaan analysointiin. Tuotantoprosessista kerätyllä datalla ja sen hyödyntämisellä on tärkeä merkitys sekä tuotantotehokkuuden että tuotteiden laadun kannalta. Kerätty ja analysoitu tuotantoprosessin data mahdollistaa häiriötilanteiden ennakoinnin paremmin ja parantaa näin tehtaiden käyttöastetta. Tehokkaampi tuotanto puolestaan vähentää käytetyn energian määrää ja pienentää käyttökustannuksia. Tuotteiden laadun parantaminen tuotantoprosessia kehittämällä vähentää hukkaa sekä turhaa raaka-aineiden käyttöä. Tärkeänä apuna tässä ovat erilaiset työkalut, joiden avulla voidaan simuloida tuotantoprosesseja, optimoida



muun muassa vedenkulutusta sekä arvioida tällaisten muutosten vaikutusta lopputuotteiden laatuun. (Bixler 2008)

Kuten todettiin, on tuotantoprosessista kerätyllä datalla tärkeä merkitys tuotantotehokkuuden kannalta. Yksi tärkeimmistä data-analytiikan avulla saatavista hyödyistä on tuottaa objektiivinen näkemys tuotantoprosessin nykytilasta ja suorituskyvystä. Objektiivinen tarkoittaa sitä, että inhimillisten virheiden määrä päätöksenteossa pystytään minimoimaan. Paitsi objektiivisuutta myös konekannan hallintaa ja optimointia (fleet management) voidaan tehostaa data-analytiikan avulla. Analytiikka auttaa parantamaan tehtaan resurssien käyttöä. Tämä puolestaan alentaa tuotantokustannuksia ja mahdollistaa kulujen tarkemman laskennan ja ennustettavuuden. Alhaisemmat kustannukset ja turhien resurssien käytön minimointi ovat merkittävä osa tehtaiden vastuullisuutta ja ympäristön kuormituksen vähentämistä. Kolmas data-analytiikan tuoma hyöty on mahdollisuus reagoida muutoksiin reaaliajassa: reaaliaikaisen data-analyysin tuottama tieto mahdollistaa tehtailla nopean ja tehokkaan reagoinnin yllättäviin muuttuneisiin tilanteisiin ja ongelmiin. Nopea reagointi ja nopeat korjaavat toimenpiteet parantavat tuotantoprosessin luotettavuutta. Jatkuva data-analytiikan hyödyntäminen mahdollistaa näin laitevikojen tai muiden häiriöiden paremman ennustettavuuden ja mahdollistaa ennakoivan kunnossapidon.

Kaiken kaikkiaan data-analytiikalla on keskeinen rooli tuotantotehokkuuden sekä tuotannon ja tuotteiden laadun parantamisessa. Se auttaa tehtaita erilaisten resurssien, kuten esimerkiksi energian, käytön optimoinnissa sekä ympäristövaikutusten vähentämisessä, mikä on myös kansantaloudellisesti merkityksellinen tavoite. Data-analytiikan tuottamat objektiiviset ja reaaliaikaiset tiedot tuotantoprosesseista auttavat yrityksiä vastaamaan paremmin asiakkaidensa vaatimuksiin ja samalla parantamaan kilpailukykyään kestävästi ja vastuullisesti.

Tässä diplomityössä tutkitaan minkälaisilla mittareilla tuotantotehokkuutta voidaan kuvata. Erityisesti tarkastellaan kartonkikoneiden suorituskykyä kuvaavia tunnuslukuja. Empiirisessä osiossa tutkitaan miten tunnuslukuja saadaan laskettua kartonkikoneen automaatiojärjestelmästä kerätyn datan pohjalta sekä miten tunnuslukuja voidaan visualisoida ja analysoida. Tutkimusmetodina teoriaosuudessa on kirjallisuuskatsaus ja empiirisessä osiossa data-analyysi. Työssä käsiteltävät tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

*1. Mitkä ovat keskeisimmät mittarit, joilla kartonkikoneiden tuotantotehokkuutta voidaan mitata ja arvioida?*

*2. Miten kartonkikoneiden tuotantotehokkuutta voidaan havainnoida saatavilla olevan datan ja käytettävien mittareiden avulla?*

*3. Miten tuotantotehokkuuden vaihteluita voidaan tutkia?*

Diplomityö kokonaisuudessaan koostuu seitsemästä luvusta. Teoriaosuus koostuu luvuista 2 ja 3. Teoriaosuuden ensimmäisessä luvussa käsitellään kartongin valmistusta ja käydään läpi kartonkikoneen rakenne rakenneryhmittäin. Toisessa teorialuvussa, eli luvussa 3, käsitellään pääasiassa kartongin valmistuksessa käytettäviä tuotantotehokkuuden mittareita. Lisäksi käsitellään tuotantotehokkuutta kuvaava tunnusluku OEE ja sen seuraamisesta saatavat hyödyt. Työssä tehty tutkimus ja sen vaiheet käydään läpi luvussa 4. Luvussa 5 käsitellään tehdyn tutkimuksen tulokset. Tutkimuskysymyksiin vastaaminen sekä ehdotukset jatkotutkimusaiheista käsitellään luvussa 6. Lopuksi luvussa 7 on työn yhteenveto.

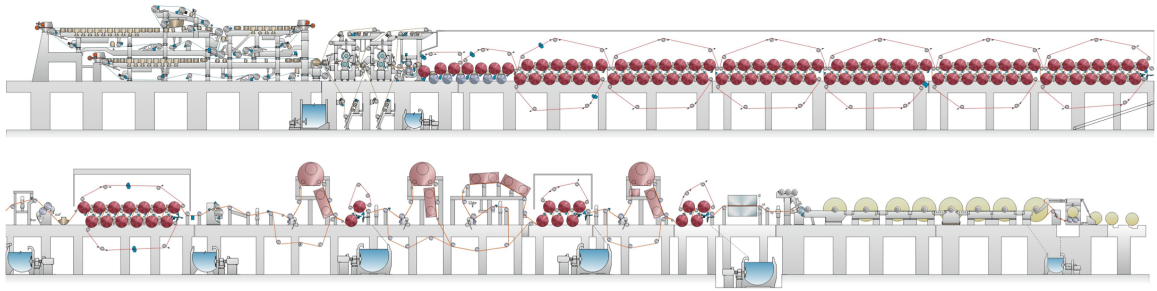
## 2 Kartongin valmistus

Tässä luvussa tarkastellaan kartonkikoneen rakennetta rakenneryhmittäin. Jotta voidaan ymmärtää kartonkikoneiden toimintaa ja valmistusprosessin vaiheita, on tärkeää tutustua koneen eri osiin ja niiden toimintaan sekä siihen, miten ne vaikuttavat lopputuotteen laatuun.

### 2.1 Massankäsittely ja lyhytkierto

Kartongin valmistus tapahtuu kartonkikoneella. Kartonkikoneen yleiskuva on esitetty kuvassa 1. Ennen kartonkikoneetta sellumassa käsitellään massankäsittelyssä. Massankäsittely sijoittuu massatehtaan ja kartonkitehtaan väliin. Kartonkitehtaan massankäsittelyjärjestelmään kuuluvat vesijärjestelmät, lyhyt kierto, hylkyjärjestelmä, pulpperit ja massankäsittely. Yleisesti massankäsittelyllä puhdistetaan, kuidutetaan, jauhatetaan, hajotetaan ja annostellaan massoja. Lisäksi massankäsittelyssä talteenotetaan kuituja ja kiintoainetta sekä hoidetaan häiriösuodatusta massatehtaan ja kartonkikoneen välillä. Yksi kartonginvalmistuksen tärkeimpiä osaprosesseja on jauhatus. Jauhatuksessa kuitujen ominaisuuksiin vaikuttamalla voidaan vaikuttaa lähes kaikkiin valmiin kartongin ominaisuuksiin. (“Knowpap, Massa- ja vesijärjestelmät” 2024)

Prosessinosaa, jossa perälaatikkoon virtaavan massan laimentamiseen käytetään viiran läpi tulevaa suodosvettä, kutsutaan lyhyeksi kierroksi. Tehtaan valmistusprosessissa lyhyt kierto tapahtuu massojen annostelun ja kartonkikoneen välissä. Tuotantolinjoilla, joilla valmistetaan monikerroskartonkia, on jokaiselle kerrokselle oma lyhyt kierto. (“Knowpap, Massa- ja vesijärjestelmät” 2024)

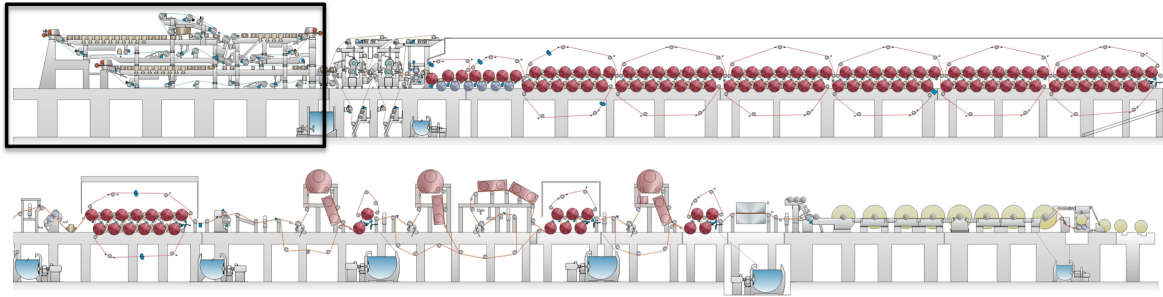


Kuvio 1. Kartonkikone sivulta kuvattuna

## 2.2 Perälaatikko ja viiraosa

Massankäsittelyn jälkeen prosessi siirtyy perälaatikolle ja viiraosalle, jotka sijaitsevat kartonkikoneen alussa (2). Perälaatikko sijaitsee lyhyen kierron ja viiraosan välissä. Perälaatikolla putkessa virtaava massa levitetään tasaisesti ja hallitusti viiran levyiseksi suihkuksi viiran kanssa lähes samalla nopeudella (Juneja, Ray ja Mitra 2011). Lisäksi perälaatikko tasoittaa poikittaisvirtauksia ja painevaihteluja sekä estää kuituja kertymästä yhteen niin sanotuiksi kuituflokeiksi (Juneja, Ray ja Mitra 2011). Konekonseptista riippuen perälaatikoita voi olla yksi tai useampi. Monikerroskartonkeja valmistettaessa perälaatikoita ja viiraosia on tyypillisesti useampia (“Knowpap, Viiraosa” 2024).

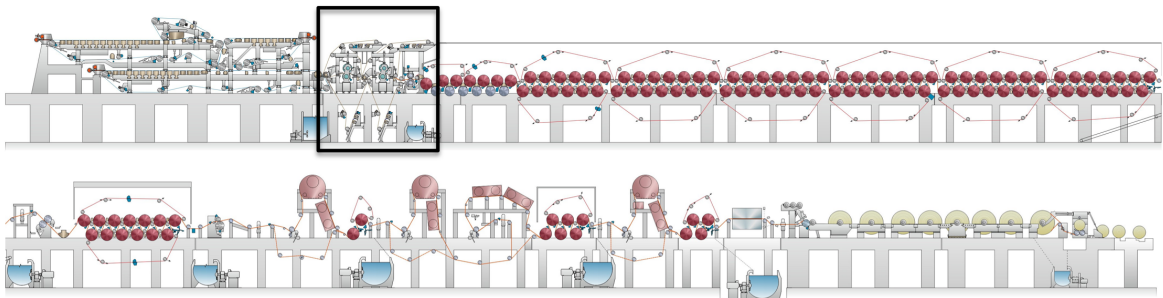
Viiraosalle tulevan massan sakeus on noin yksi prosentti. Tämä tarkoittaa sitä, että yksi prosentti massasta on kuituja ja loput 99 prosenttia ovat vettä. Viiraosalla massan sakeus nousee noin 20 prosenttiin. Vedenpoisto toteutetaan viiraosalla useilla vedenpoistoelementeillä, jotka perustuvat painovoimaan, painepulsseihin ja alipaineeseen. Vesi poistuu massasta viiraokudoksen läpi. Kokonaisvedenpoistosta yli 80 prosenttia tapahtuu viiraosalla painovoiman ja imun avulla. Viiraosalla vaikutetaan useisiin paperin rakenneominaisuuksiin kuten paperin formaatioon. Paperin formaatio tarkoittaa paperin pienimittakaavaista neliömassavaihtelua. Huono formaatio saattaa aiheuttaa paperin painatuksessa muun muassa laikullista painojälkeä. (Nilsson 2014; Roux ja Rueff 2012; “Knowpap, Viiraosa” 2024)



Kuvio 2. Viiraosa

### 2.3 Puristin

Puristinosä sijaitsee viiraosan jälkeen ennen kuivatusosaa. Puristinosalle tullessaan radan kuiva-ainepitoisuus on noin 15-20 prosenttia. Puristinosalla kuiva-ainepitoisuus nousee 40-55 prosenttiin. Puristinosan sijainti on esitetty kuvassa 3. Puristinosan tärkein tavoite on poistaa radasta mahdollisimman paljon vettä, eli nostaa radan kuiva-ainepitoisuutta. Korkea kuiva-ainepitoisuus on tärkeää koneen nopeuden nostamisen, tuotannon lisäämisen ja toimintatehokkuuden parantamisen kannalta. Puristinosalla vesi poistuu puristintelojen aiheuttaman mekaanisen voiman ansiosta. (Hägglom-Ahnger ja Komulainen 2000, s. 149)



Kuvio 3. Puristinosä

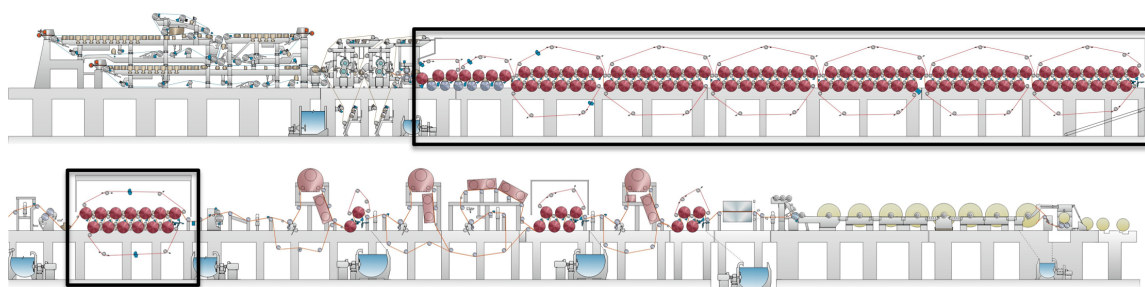
### 2.4 Kuivatusosa

Kuivatusosalla paperin kuivatus tapahtuu höyry- ja lauhdejärjestelmän, ilmajärjestelmän ja lämmön talteenottojärjestelmien avulla. Kuivatusosan tehtävä on haihduttaa märästä paperiradasta vettä kartongin laatua huonontamatta. Paperia kuivatetaan haihduttamalla siitä vettä

pois niin pitkään että päästään haluttuun loppukuiva-ainepitoisuuteen. Kartongin valmistuksessa käytetään yleisesti kolmea eri kuivatusmenetelmää: sylinterikuivatusta, puhalluskuivatusta ja säteilykuivatusta. Edellä mainituille kuivatusmenetelmille yhteistä on niille tuotu ulkoinen energia, jota tarvitaan veden haihduttamiseen pois radasta. Ilman avulla haihtunut vesi vietään pois radan läheisyydestä. (“Knowpap, Kuivatusosa” 2024)

Vaikka kuivatusosalla alkuperäisestä vedestä poistetaan vain noin yksi prosentti, on se kuitenkin kartonginvalmistusprosessin kallein ja energiaintensiivisin yksikkö. Kuivatusosa maksaa noin 40 prosenttia kokonaisinvestoinnista ja kuluttaa yli 60 prosenttia kartonkikoneen käyttämästä energiasta. (Kong ym. 2016; Li, Kong ja Liu 2012)

Kuivatusosia on tyypillisesti useampia. Tällöin puhutaan etukuivatusosasta ja jälkikuivatusosasta. Jälkikuivatusta tarvitaan silloin, kun kartonkia on käsitelty esimerkiksi pintaliimauksessa. Kuvassa 4 on esitetty kuivatusosien sijainnit kartonkikoneella.



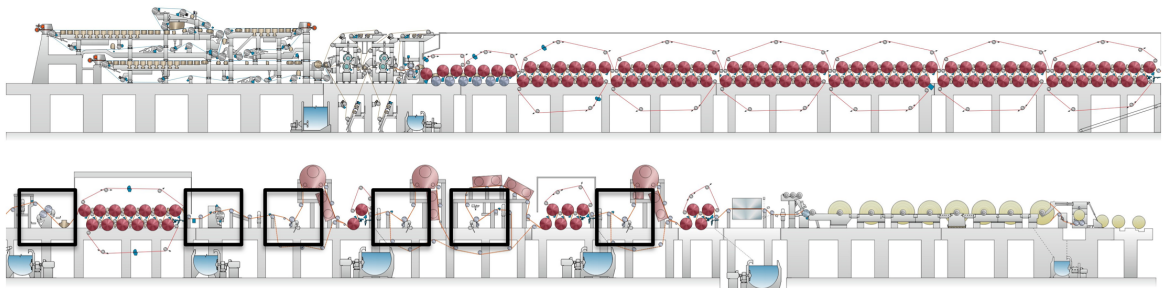
Kuvio 4. Kuivatusosat

## 2.5 Jälkikäsitteilyt

Kartonkia voidaan käsitellä pintaliimauksella, kalanteroimalla ja päällystämällä. Kuvassa 5 on kuvattu vasemmalta oikealle ensimmäisenä pintaliimaus, kalanteri ja viimeisenä neljä päällystysasemaa. Kartongin pintaliimauksessa levitetään paperirainan pinnalle tärkkelystä. Tämän avulla parannetaan radan pinta- ja lujuusominaisuuksia, painettavuutta ja vedenkestävyyttä. Pintaliimausta käytetään hienopapereille ja kartongeille. Pintaliimaus suoritetaan tyypillisimmin filmiliimapuristimessa. Filmiliimapuristimen nippiteloille levitetään ohut liima, joka siirtyy telanipissä rataa. Myös täyteaineita voidaan sekoittaa pintaliimaliuokseen, jolloin puhutaan pigmentoinnista. (“Knowpap, Pintaliimaus” 2024)

Toinen tyypillinen kartonginvalmistukseen liittyvä jälkikäsittely on kalanterointi. Kalanteroinnilla parannetaan kartongin pintaominaisuuksia, kuten sileyttä ja kiiltoa. Pintaominaisuuksiin vaikuttaminen parantaa kartongin painatusominaisuuksia. Tämän lisäksi kalanteroinnilla voidaan tasata kartongin paksuusprofiilia. Kalanterointi suoritetaan viemällä rata kahden tai useamman telan muodostaman nippisysteemin läpi. (“Knowpap, Kalanterointi” 2024)

Kolmas tapa vaikuttaa kartongin ominaisuuksiin ovat erilaiset päällystysmenetelmät. Päällystys parantaa kartongin käyttöominaisuuksia käyttökohteesta riippuen ja sillä voidaan vaikuttaa merkittävästi kartongin ulkonäköön. Tällä on usein suuri merkitys kuluttajatuotteiden pakkauksissa. Tärkeimmät asiat, joihin päällystäminen vaikuttaa ovat visuaaliset ominaisuudet, kuten painettavuus, sileys, kiilto ja vaaleus. Erityisesti päällystys parantaa painettavuutta, koska painovärit eivät pääse paperin tai kartongin sisään ja painojälki on näin parempi. Sileys puolestaan paranee, kun päällysteaine täyttää pohjapaperin pinnalla olevat ohuemmat kohdat ja sileämmälle pinnalle painaminen on helpompaa. Kiiltoa saadaan parannettua yhdessä parantuneen sileyden kanssa. (“Knowpap, Päällystys” 2024; Paltakari 2009, s.13)



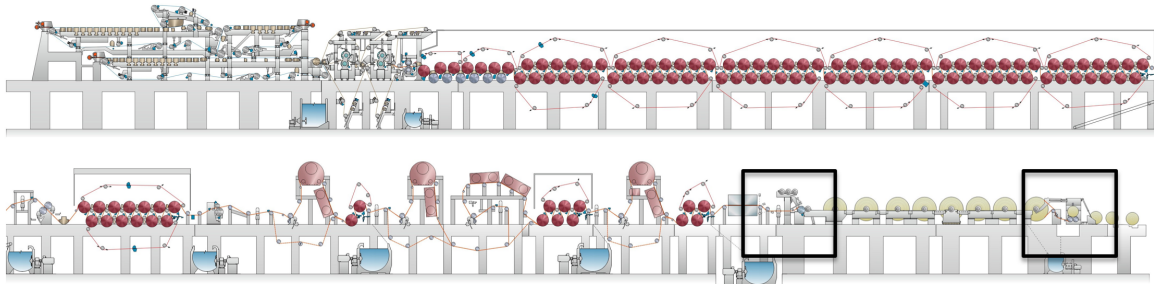
Kuvio 5. Jälkikäsittelyt

## 2.6 Rullain ja pituusleikkuri

Tasomaiseksi valmistettu kartonki rullataan rullaimella niin sanotuksi konerullaksi. Kartoninvalmistuksen jatkuvatoiminen prosessi katkeaa rullaimella ensimmäistä kertaa ja muuttuu jaksottaiseksi prosessiksi. (“Knowpap, Rullaus” 2024; Rautiainen 2009, s. 192-194) Rullaimen ja pituusleikkurin sijainnit on esitetty kuvassa 6.

Kartonkikoneen jälkeen valmis kartonki on rullattu rullaimella tampoeritelalle. Yhdessä ko-

nerullassa voi olla jopa 100 kilometriä kartonkia. Rulla kulkeutuu pituusleikkurille, jossa kartongista leikataan asiakkaalle sopivan levyisiä ja kokoisia asiakasrullia. Kartongin huonolaatuisista reunoista leikataan pituusleikkurilla pois muutamia senttejä, jotka ohjataan pulperiin, josta ne kulkeutuvat ennen pitkää takaisin prosessiin. (“Knowpap, Rullaus” 2024; Rautiainen 2009, s. 178-181)



Kuvio 6. Rullain ja pituusleikkuri

## 2.7 Kartonkikoneiden automaatio

Automaatio on osa modernia teollisuutta ja sille on asetettu useita erilaisia tavoitteita. Sen tavoitteina on vähentää tuotantokustannuksia, kasvattaa tuotannon määrää, optimoida raaka-aineita ja niiden käytön määrää, säätää prosessiparametreja sekä vähentää ihmisen tarvetta puuttua tuotantoprosessiin (“Knowpap, Järjestelmät” 2024). Teollisuudessa automaatiota käytetään tuotantoprosessien hallintaan ja jatkuvaan tehostamiseen. Sen avulla myös siirretään oleellista informaatiota prosessista käyttäjille (“Knowpap, Järjestelmät” 2024). Automaatio on eräänlainen kattokäsite, jota käytännössä toteutetaan erilaisten ohjausjärjestelmien, kuten kartonkitehtaissa yleisesti käytettyjen hajautettujen ohjausjärjestelmien, kautta.

Paperi- ja kartonkitehtaissa hyödynnetään automaatiota jokaisessa prosessin vaiheessa. Tavoitteena on kokonaistehokkuuden maksimointi, mikä käytännössä tarkoittaa kannattavuuden parantamista ja parempaa kilpailukykyä maailmanmarkkinoilla. Automaatiojärjestelmän avulla kartonkikoneelta kerätään runsaasti erilaista tietoa. Erilaisten mittausten, hälytysten, ohjausten ja säätöjen avulla pyritään saavuttamaan häiriötön, turvallinen, tehokas ja taloudellinen valmistusprosessi (Hägglom-Ahnger ja Komulainen 2000, s.235-242). Nämä saavutetaan (Leiviskä 2009, s. 192):



1. hallitsemalla materiaalivirtoja
2. hallitsemalla tuotteiden laatua
3. hallitsemalla toiminnan muutoksia, erityisesti lajinvaihtoja
4. ratakatkojen vianmäärityksellä
5. virheellisten tuotteiden vianmäärityksellä
6. laadunvaihteluiden vianmäärityksellä
7. muiden tuotantohäiriöiden vianmäärityksellä.

Kartongin- ja paperinvalmistus ovat tyyppiesimerkkejä prosessiteollisuudesta, jossa automaation avulla voidaan saavuttaa useita parannuksia ja säästöjä. Paperin- ja kartonginvalmistuksessa tuotantovolyymit ovat suuria ja tehtaat toimivat usein 24/7/365-periaatteella. Automaation hyödyntäminen sopiikin tällaiseen teollisuuteen erinomaisesti; jo pienet parannukset prosessissa tuovat merkittäviä taloudellisia säästöjä ja tehokkuuden parantumista. (“Knowpap, Järjestelmät” 2024)

### 3 Tuotantotehokkuuden mittaaminen

Tässä luvussa käsitellään tuotantotehokkuutta kuvaavia mittareita yleisesti sekä kartonginvalmistukseen sovellettuna. Yleisistä mittareista keskitytään kokonaistehokkuutta kuvaavaan tunnuslukuun Overall Equipment Effectiveness (OEE) ja sen seuraamisen tuomiin hyötyihin. Kartonginvalmistukseen liittyvissä mittareissa käsitellään pääasiassa aikahyötysuhdetta, materiaalihyötysuhdetta ja kokonaistehokkuutta.

#### 3.1 Kokonaistehokkuus, OEE

Nakajima lanseerasi tuottavan kunnossapidon ohjelman (total productive maintenance, TPM) 1980-luvulla. Sen tarkoituksena on parantaa tuottavuutta ja laatua sekä vähentää kustannuksia (Gupta ja Sachit 2016). Huollon merkitys on siirtynyt niin sanotusta välttämättömästä pahasta yhdeksi organisaatioiden strategiseksi tekijäksi kilpailukyvyn ylläpidossa. OEE on keskeinen mittari TPM-viitekehityksessä sekä Lean-ajattelussa (Tsarouhas 2019). Suomessa OEE:stä käytetään myös lyhennettä KNL, joka tulee sanoista käytettävyys, nopeus ja laatu ("Tuotantokoneiden kokonaistehokkuus OEE" 2013).

OEE:tä käytetään yleisesti teollisuudessa tunnistamaan ja mittaamaan koneiden tuottavuutta. Se mittaa tuotannon suorituskykyä suhteessa sen täyteen suorituskykyyn. Toisin sanoen OEE kertoo kuinka suuri osuus tuotannosta on oikeasti tuottavaa. 100 prosenttinen OEE:n arvo tarkoittaa tuotantolinjan tuottavan ainoastaan hyvää laatua maksiminopeudella ja ilman keskeytyksiä. OEE on noussut keskeiseksi KPI-mittariksi valmistavassa teollisuudessa. (Byod ja Suess-Wolf 2019) Se lasketaan kolmen komponentin tulona:

1. Käytettävyys (availability) tarkoittaa aikaa, jolloin tuotantolinja on käytettävissä.
2. Suorituskyky/nopeus (performance) tarkoittaa koneen tai tuotantolinjan nopeuden suhdetta sille suunniteltuun nopeuteen.
3. Laatu (quality) tarkoittaa myyntiin kelpaavien yksiköiden määrää suhteessa kaikkiin aloitettuun yksiköihin. Tätä kutsutaan myös termillä FPY eli first pass yield.

$$OEE = \text{Käytettävyys} * \text{Suorituskyky} * \text{Laatu} \quad (3.1)$$

Keskimääräinen arvo OEE:lle on 60 prosenttia ja hyvä arvo on 85 prosenttia (Sayuti, Julianda ja Fatimah 2019). OEE:n eri komponenteille on määritelty omat tavoitearvonsa erikseen. Nämä on kuvattu alla olevassa taulukossa (1):

OEE:n tekijät	Hyväksi määritelty taso
OEE	>85%
Käytettävyys	>90%
Suorituskyky	>95%
Laatu	>99.9%

Taulukko 1. OEE:n osatekijöiden tavoitearvot  
(Sayuti, Julianda ja Fatimah 2019)

OEE:n arvoja seuraamalla ja niitä kehittämällä saavutetaan muun muassa seuraavat edut (Sayuti, Julianda ja Fatimah 2019; Ademujimi ja Vittalds 2024):

1. OEE:n seuraaminen edistää laitteiden elinkaaren parempaa hallintaa vähentämällä niiden seisokkiaikaa ja ylläpitokustannuksia.
2. OEE:n avulla voidaan lisätä työvoiman tehokkuutta ja samanaikaisesti kasvattaa myös tuottavuutta, kun näkyvyys ja ymmärrys tehokkuuden kannalta tärkeisiin toimintoihin paranee. Tämä on mahdollista henkilökunnan paremman osaamisen ja vastuutuksen myötä.
3. OEE auttaa tunnistamaan pullonkauloja prosessissa ja siten parantaa tuottavuutta.
4. OEE:n avulla voidaan vähentää korjaustyötä (rework) valmistusprosessissa sekä vähentää hävikin määrää. Tämä kasvattaa ykköslaatuisten tuotteiden määrää ja suhdeluku hävikin ja tavoitelaatutason välillä paranee.

TPM:n ja OEE:n päätehtävänä on minimoida niin sanottua kuutta suurta tehokkuushäviötä, joita yleisesti pidetään tehokkuushäviöiden pääasiallisina syinä. Tehokkuushäviöiden ja TPM:n tehokkuuden välinen suhde viittaa sekä tuotteen laatuun että laitteiden saatavuuteen.

Tehokkuushäviöitä voi tapahtua milloin tahansa prosessin toiminta-aikana. Häviöt voivat olla näkyviä, kuten hävikki tai prosessin vaihdot ja viat, tai ne voivat olla näkymättömiä kuten prosessin hitaus tai säätö, joka joudutaan suorittamaan säännöllisesti tuotannon pitämiseksi toleranssien sisällä. Koneiden huollon osalta kaikkien prosessiteollisuuden yritysten tulee välttää kolmea tehokkuutta heikentävää asiaa eli seisokkeja, nopeushäviöitä ja virhe- tai laatuhäviöitä. Yleisesti näitä kuutta häviötä kutsutaan nimellä Kuusi Suurta Häviötä (Six Big Losses). Häviöt koostuvat seuraavista tekijöistä (Sayuti, Julianda ja Fatimah 2019) (“Six Big Losses in Manufacturing” 2024):

1. laitevika
2. asennus ja säätö
3. tyhjäkäynti ja lyhyet seisokit
4. alennettu nopeus
5. prosessivika
6. alhainen tuotto (low yield).

Nakajiman mukaan laitevika (1) sekä asennukset ja säädöt (2) luokitellaan seisokeiksi, mitkä vähentävät käytettävyyttä; tyhjäkäynti ja lyhyet seisokit (3) sekä alennettu nopeus (4) luokitellaan nopeushäviöiksi, mikä heikentää suorituskykyä. Lopuksi prosessivika (5) ja alhainen tuotto (6) katsotaan huonosta laadusta syntyneeksi virrehäviöksi. (Sayuti, Julianda ja Fatimah 2019)

### **3.2 Tuotantotehokkuutta kuvaavat mittarit kartongin valmistuksessa**

Tässä alaluvussa käsitellään tuotantotehokkuuden määritelmää pohjaten Zellcheming Production Indices For Paper Production (*Production Indices For Paper Production* 2005) ja Tappi TIP 0404-47 Paper Machine Performance Guidelines (*Paper Machine Performance Guidelines* 2022) -kokoelmiin. Kappale käsittelee pääasiassa Zellchemingin laskentastandardeja. Jos puhutaan Tapin laskentastandardeista, on se erikseen tekstissä mainittu.

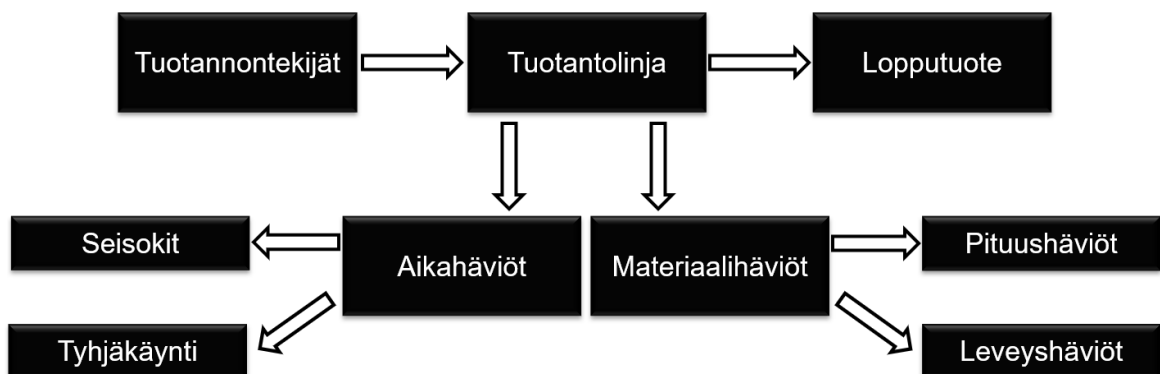
Zellcheming on sellu- ja paperikemistien ja -insinöörien yhdistys, joka perustettiin Berliinissä vuonna 1905. Se on alan vanhin teknis-tieteellinen yhdistys. (“Zellcheming, About Us” 2024) Tappi on voittoa tavoittelematon vapaaehtoisvetoinen yhdistys. Yhdistyksen päätoimiala on paperi- ja pakkausteollisuus, mutta sillä on jäseniä myös muun muassa bioenergian ja kestävän kehityksen aloilta. (“About Tappi” 2024)

### 3.2.1 Taustaa

Zellchemingin standardi kuvaa minkä tahansa paperi- tai kartonkikonelinjan tärkeimpien tuotantotietojen laskemiseen tarvittavat perustiedot. Tarkasteltavan systeemin rajat alkavat kartonkikoneen peränsyöttöpumpulta ja päättyvät tehtaan porteille, kun tuotteet lähtevät asiakkaille. (*Production Indices For Paper Production* 2005)

Tappin TIP tarjoaa vertailukohtat paperikoneen suorituskyvyn arvioimiseksi tärkeimmässä paperi- ja kartonkilajeissa. Vertailukohtat (benchmarks) ovat kehittäneet paperin valmistajien työntekijät, kudosvalmistajat, laitetoimittajat ja alan konsultit. (*Paper Machine Performance Guidelines* 2022)

Kartongin valmistuslinjan häviöt koostuvat aikahäviöistä ja materiaalihäviöistä. Kuvassa 7 on esitetty tuotantolinjalla tapahtuvat häviöt. Aikahäviöt edelleen koostuvat seisokkeihin ja tyhjäkäyntiin kuluva ajasta. Materiaalihäviöt puolestaan koostuvat pituushäviöistä ja leveyshäviöistä.



Kuvio 7. Tuotantolinjan häviöt (*Production Indices For Paper Production* 2005)

Kartongin valmistuksessa on muutamia tärkeitä suureita, jotka on hyvä ymmärtää. Neliöpaino on yksi tärkeimmistä kartongin mitattavista suureista. Se kertoo kartongin massan suhteessa pinta-alaan. Neliöpainoa kuvataan yksiköllä g/m<sup>2</sup>. Eri neliöpainoisilla kartongeilla on usein erilaisia ominaisuuksia sekä vaikutuksia valmistusprosessiin. Neliöpaino määrittelee esimerkiksi sen, kuinka nopeasti kartonkikonetta ajetaan.

### 3.2.2 Ajan määritelmät kartongin valmistuksessa

Ajan määritelmä kartongin valmistuksessa koostuu neljästä pääkategoriasta, jotka käsitellään tässä alaluvussa. Niin kartonginvalmistuksessa kuin tehdastuotannossa yleensäkin, on ajalla merkitävä rooli tuotantoprosessia arvioitaessa ja kehitettäessä. Ajan kategoriat ovat kalenteriaika, käytettävissä oleva enimmäistuotantoaika, käytettävissä oleva tuotantoaika ja toteutunut tuotantoaika, jotka on esitetty alla olevassa kuvassa (8).



Kuvio 8. Ajan määräytyminen (*Production Indices For Paper Production 2005*)

Kalenteriajalla tarkoitetaan yhtä vuotta. Ajan yksikkönä laskuissa käytetään tuntia. Kalenteriaika vastaa 8760 tuntia (365 \* 24t) ja karkausvuonna 8784 tuntia (366 \* 24t). Käytettävissä oleva enimmäistuotantoaika saadaan kun kalenterivuodesta vähennetään aika, jolloin tuotantolinja ei ole käytettävissä ulkoisten tekijöiden vaikutuksesta.

Aika, jolloin tuotantolinja ei ole käytettävissä ulkoisten tekijöiden vaikutuksesta koostuu ajasta, jolloin tuotantolinja ei ole käytettävissä tuotantolinjan ja työntekijöiden puutteen vuoksi sekä ajasta, jolloin tuotantolinja ei ole käytettävissä siitä huolimatta, että työntekijät olisivat käytettävissä. Aika, jolloin tuotantolinja ei ole käytettävissä tuotantolinjan ja työntekijöiden puutteen vuoksi jakautuu kolmeen alakategoriaan:

1. Seisokit lakien ja säädösten takia (työehtosopimukset, kansalliset vapaapäivät ja ei-jatkuva

tuotanto).

2. Työsopimusten aiheuttamat seisokit (esimerkiksi kesälomat).

3. Lakkojen aiheuttamat seisokit.

Aika, jolloin tuotantolinja ei ole käytettävissä vaikka työntekijöitä olisi paikalla, jakautuu viiteen alakategoriaan;

1. Isot konelinjan uudistukset tai suunnitellut isommat huoltotoimenpiteet (jos kesto > 48t).

2. Yllättävät koneen vikaantumiset (jos kesto > 48t).

3. Tilausten puuttuminen (jos kesto > 24t).

4. Sähkön tai raaka-aineiden puuttuminen (jos kesto > 24t).

5. Yllättävä ja poikkeuksellinen tapahtuma (esimerkiksi suurpalo, myrsky tai tulva) (jos kesto > 24t).

Käytettävissä oleva enimmäistuotantoaika kuvastaa aikaa, jolloin tuotantolinjan pitäisi olla valmiudessa tuottamaan kartonkia. Se lasketaan alla olevan kaavan mukiaan:

$$t_m = t_k - t_e \quad (3.2)$$

$t_m$  = käytettävissä oleva enimmäistuotantoaika,

$t_k$  = kalenteriaika,

$t_e$  = aika, jolloin konelinja ei ole käytettävissä.

Seisokkiaika koostuu suunnittelemattomista seisokeista ja suunnitelluista seisokeista. Seisokkiaika alkaa siitä, kun peränsyöttöpumppu laitetaan pois päältä eikä massaa enää tule viiralle. Vastaavasti aika loppuu silloin, kun pumppu laitetaan uudestaan päälle ja massa virtaa viiralle. Seisokki luokitellaan suunnittelemattomaksi, mikäli seuraavat ehdot täyttyvät:

1. Koneen vikaantuminen (jos kesto < 48t).

2. Tuotannolliset katkot (pesut, kudosten tai päänvientiköyden vaihto).
3. Katko raaka-aineiden tai henkilökunnan puutteen vuoksi (jos kesto < 24t).
4. Katko, koska yhtään tampusuoritusta ei ole vapaana.

Seisokki lasketaan suunnitelluksi seisokiksi, jos sen ajankohta on päätetty vähintään 12 tuntia etukäteen. Edelleen poistamalla seisokkeihin kuluva aika, saadaan käytettävissä oleva tuotantoaika:

$$t_a = t_m - t_s \quad (3.3)$$

$t_a$  = käytettävissä oleva tuotantoaika,

$t_m$  = käytettävissä oleva enimmäistuotantoaika,

$t_s$  = seisokkeihin kuluva aika.

Todellinen tuotantoaika saadaan, kun käytettävissä olevasta tuotantoajasta vähennetään vielä tyhjäkäyntiaika. Tyhjäkäyntiaika sisältää neljä eri aikakategoriaa, jotka käsitellään alla. Kuvassa 9 on esitelty tyhjäkäynnin ja seisokin ero. Tyhjäkäyntiaikaa voi olla erillään seisokista mutta seisokkiajan jälkeen koneen käynnistykseen kuluva aika on tyhjäkäyntiaikaa. Tyhjäkäyntiaika lasketaan kaavalla:

$$t_i = t_{\text{startti}} + t_{\text{katko}} + t_{\text{huolto}} + t_{\text{lajinvaihto}} \quad (3.4)$$

$t_i$  = tyhjäkäyntiaika,

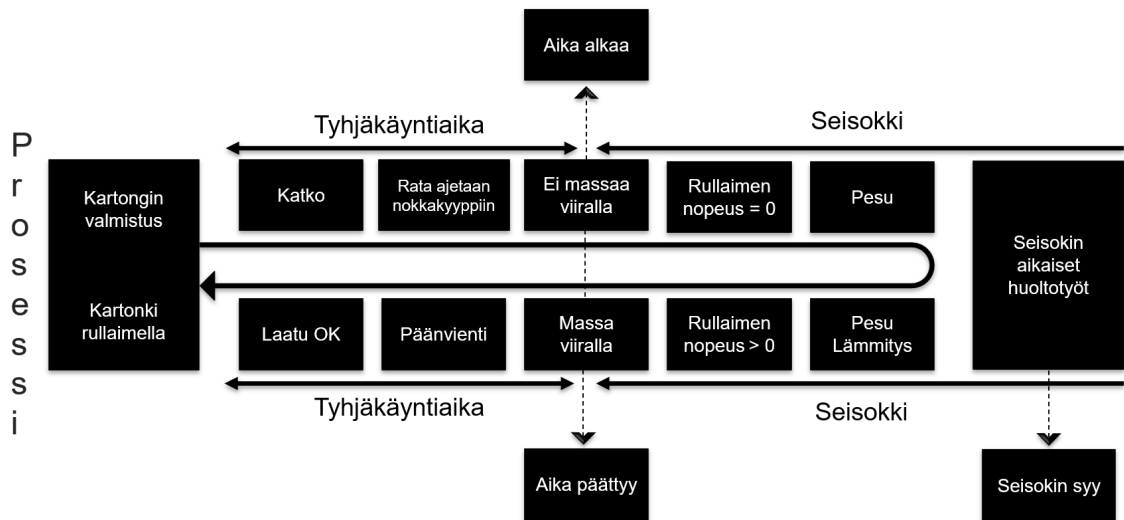
$t_{\text{startti}}$  = starttiin kuluva aika,

$t_{\text{katko}}$  = katkoon kuluva aika,

$t_{\text{huolto}}$  = huoltotöihin kuluva aika,

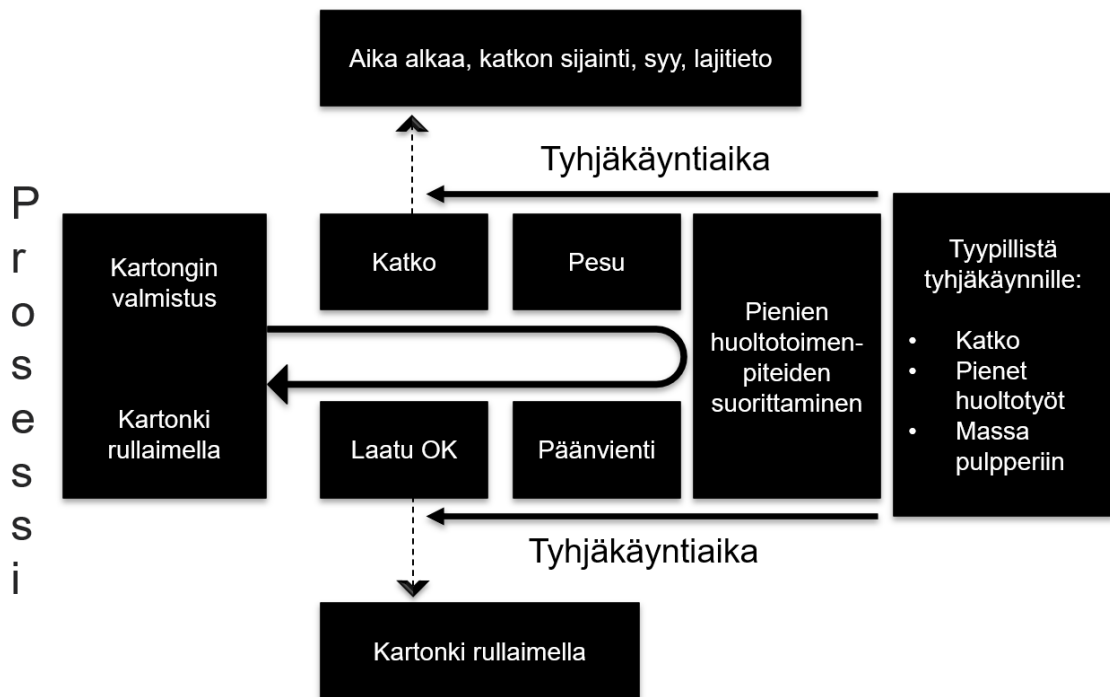
$t_{\text{lajinvaihto}}$  = lajinvaihtoon kuluva aika.





Kuvio 9. Tyhjäkäyntiajan ja seisokkiajan muodostuminen valmistusprosessissa (*Production Indices For Paper Production 2005*)

Tyhjäkäyntiaikaan sisältyy neljä erikseen määriteltyä aikakategoriaa. Tyhjäkäyntiaika koostuu siis koneen käynnistämiseen, katkoon, huoltotöihin ja kartonkilajin vaihtoon kuluva ajasta. Kuvassa 10 on hahmotettu tyhjäkäyntiajan muodostumista kartongin valmistusprosessiin liitettynä.



Kuvio 10. Tyhjäkäyntiaika valmistusprosessissa (*Production Indices For Paper Production* 2005)

Käynnistysaika alkaa siitä kun massa on viiralla ja imutelan vakuumit ovat päällä. Käynnistysaikaan kuuluu päänvientiin menevä aika joko suunnitellun tai suunnittelemattoman seisokin jälkeen. Se loppuu, kun kartonki jälleen rullautuu rullaimella. Käynnistysaika määritellään eri tavalla kuin katkoaika, koska päänvienti seisokin jälkeen voi viedä kauemmin kuin katkon jälkeen. Käynnistysaikaan kuuluu myös aika, joka tarvitaan tuotannon alasajoon kartonkikoneella eli aika, jolloin massa on viiralla mutta kartonki ei rullaudu rullaimella.

Katkoaika alkaa siitä, kun tuotanto keskeytyy odottamattoman syyn seurauksena. Katkon aikana massa on viiralla ja imutelan vakuumit ovat päällä, mutta kartonki ei rullaudu rullaimelle. Katkot dokumentoidaan niin, että siitä selviää missä kohtaa rata on katkennut. Katkoaikaan kuuluu kartonkikoneen pesuun kuluva aika katkon jälkeen, päänvientiin kuluva aika ja odotusaika, että kartonki saavuttaa laatuvaatimukset mutta ei rullaudu rullaimella.

Huoltotyöaika alkaa kun tuotanto keskeytyy pienen huoltotyön tai tuotannollisen työn seu-

rauksena. Raportointi jaetaan kunnossapidon ja tuotantopsyiden välillä. Massa on viiralla ja imutelan vakuumit ovat päällä mutta kartonki ei rullaudu rullaimella.

Lajinvaihtoaika lasketaan ajaksi, jolloin lajinvaihdon aikana kartonki ei rullaudu rullaimelle vaan rata ajetaan pulpperiin. Jos kartonki rullataan rullaimelle, se lasketaan materiaalihäviöksi. Lajinvaihtoaika alkaa silloin kun tehdään päätös lajinvaihdosta (joko jonkun järjestelmän kautta tai manuaalisesti, kun näin ohjeistetaan). Lajinvaihtoaika loppuu kun kartonki on saavuttanut laatuvaatimuksensa.

Taulukkoon 2 on kerätty ohjearvot tyhjäkäyntiin liittyville aikakategorioille (*Paper Machine Performance Guidelines 2022*). Ohjearvot ovat prosentteina käytettävissä olevasta enimmäistuotantoajasta. Katkoajan tavoite on alle kolme prosenttia, suunnitellun kunnossapidon ohjearvo on alle puolitoista prosenttia ja suunnittelemattoman kunnossapidon puolestaan alle yhden prosentin. Lajin vaihtoon käytetty aika riippuu siitä kuinka montaa lajia kartonkikoneella tuotetaan sekä, kuinka usein lajia vaihdetaan. Lajinvaihdon ohjearvo on nollassa neljään prosenttia.

	Prosenttiosuus saatavilla olevasta ajasta
Katkot	< 3.0
Suunniteltu kunnossapito	< 1.5
Suunnittelematon kunnossapito	< 1.0
Muu toiminta	< 1.0
Lajin vaihto	0-4

Taulukko 2. Aikakategorioiden ohjearvot (*Paper Machine Performance Guidelines 2022*)

Tyhjäkäyntiaika ja seisokkiaika yhdessä muodostavat menetetyn tuotantoajan. Tuotantoaika vastaavasti lasketaan miinustamalla menetetty tuotantoaika käytettävissä olevasta enimmäistuotantoajasta. Molempien aikamääreiden kaavat on esitetty alla:

$$t_l = t_s + t_i \quad (3.5)$$

$t_l$  = menetetty tuotantoaika,

$t_s$  = seisokit,

$t_i$  = tyhjäkäyntiaika.

$$t_p = t_m - t_l \quad (3.6)$$

$t_p$  = tuotantoaika,

$t_m$  = käytettävissä oleva enimmäistuotantoaika,

$t_l$  = menetetty tuotantoaika.

### 3.2.3 Aikaan liittyvät tunnusluvut

Ajanmääritelmien avulla voidaan laskea aikaan liittyviä tunnuslukuja. Käyttöaste (operating rate) on yksi tyypillisistä mittareista prosessiteollisuudessa sen helpon laskentatavan ja seurattavuuden vuoksi. Käyttöaste kuvaa aikaa, jolloin konelinjalla olisi teoriassa mahdollista tuottaa kartonkia. Se lasketaan alla kuvatulla tavalla:

$$\eta = \frac{t_m}{t_k} * 100 \quad (3.7)$$

$\eta$  = käyttöaste,

$t_m$  = käytettävissä oleva enimmäistuotantoaika,

$t_k$  = kalenteriaika.

Aikahyötysuhde (time efficiency) lasketaan jakamalla tuotantoaika käytettävissä olevalla enimmäistuotantoajalla. Tappi käyttää aikahyötysuhteesta termiä käyttöaste (uptime), mutta tunnuslukujen laskentakaavat ovat samanlaiset. (*Paper Machine Performance Guidelines*

2022) Aikahyötysuhde kuvaa sitä, kuinka paljon koneen käytettävissä olevasta tuotantoajasta on todellisuudessa ollut tuotantoaika. Se lasketaan alla olevan kaavan mukaisesti:

$$\eta_{\text{aika}} = \frac{t_p}{t_m} * 100 \quad (3.8)$$

$\eta_{\text{aika}}$  = aikahyötysuhde,

$t_p$  = tuotantoaika,

$t_m$  = käytettävissä oleva enimmäistuotantoaika.

### 3.2.4 Pinta-alan määritelmät

Aikaan liittyvät tunnusluvut eivät ota huomioon materiaalihukkaa, joten niiden lisäksi on kehitetty määritelmiä ja tunnuslukuja, joilla voidaan tarkastella kartonkikoneella tapahtuvia materiaalihäviöitä. Materiaalihyötysuhteen (area efficiency) laskentaan tarvitaan tiedot materiaalihäviöistä. Materiaalihäviöt tarkoittavat kaikkia korjauksia, jotka nettotuotantopinta-alaan tehdään hylätyn tuotannon, varasto- tai asiakaspalautusten ja uudelleenrullamisten perusteella. Häviöt raportoidaan jokaisen prosessivaiheen jälkeen, ja hylätty tuotanto kirjataan hylkäyspäivälle valmistuspäivän sijaan. Leveyden häviöt ennen leikkuria kuuluvat valmistusprosessissa syntyviin leveyshäviöihin eikä niitä huomioida materiaalihyötysuhteen laskennassa. Materiaalihäviöt lasketaan alla olevan kaavan mukaisesti:

$$A_{\text{menetetty}} = A_{\text{hylätty}} + A_{\text{palautukset (varasto)}} + A_{\text{palautukset}} - A_{\text{uudelleenrullaus}} \quad (3.9)$$

$A_{\text{menetetty}}$  = menetetty tuotanto,

$A_{\text{hylätty}}$  = hylätty tuotanto leikkurin jälkeen,

$A_{\text{palautukset (varasto)}}$  = palautukset omalta varastolta,

$A_{\text{palautus}}$  = palautukset asiakkaalta,

$A_{\text{uudelleenrullaus}}$  = uudelleenrullauksen kautta myytäväksi kelpaava.

Myytävä pinta-ala on se osuus tuotannosta, joka myydään loppuasiakkaille. Se on leikkurin jälkeisen tuotannon ja hylätyn tuotannon erotus. Myytävä pinta-ala lasketaan seuraavasti:

$$A_{\text{myytävä}} = A_{\text{netto}} - A_{\text{menetetty}} \quad (3.10)$$

$A_{\text{myytävä}}$  = myytävä tuotanto,

$A_{\text{netto}}$  = leikkurin jälkeinen tuotanto,

$A_{\text{menetetty}}$  = menetetty tuotanto.

### 3.2.5 Materiaalihiötysuhde

Materiaalihiötysuhde koostuu kolmesta eri komponentista: tuotannon pinta-alatehokkuudesta, pituushyötysuhteesta ja leveyshyötysuhteesta. Materiaalihiötysuhteen ensisijainen laskentatapa on pinta-alan kautta mutta se voidaan laskea myös painoperusteisesti. Painoperusteisessa laskennassa ongelmana on esimerkiksi neliöpainon lisääntyminen päällystyksessä (Hägglom-Ahnger ja Komulainen 2000, s. 253).

Tuotannon pinta-alatehokkuus (finishing efficiency) huomioi kaikki pinta-alahäviöt, jotka pienentävät leikkurin jälkeistä tuotantoa. Tässä siis huomioidaan kaavoissa 3.9 ja 3.10 mainitut tekijät. Tuotannon pinta-alatehokkuus lasketaan myytävän tuotannon suhteena leikkurin jälkeiseen tuotantoon alla olevan kaavan mukaisesti:

$$\eta_{\text{pinta-ala}} = \frac{A_{\text{netto}} - A_{\text{menetetty}}}{A_{\text{netto}}} = \frac{A_{\text{myytävä}}}{A_{\text{netto}}} * 100 \quad (3.11)$$

$\eta_{\text{pinta-ala}}$  = tuotannon pinta-alatehokkuus,

$A_{\text{netto}}$  = leikkurin jälkeinen tuotanto,

$A_{\text{menetetty}}$  = menetetty tuotanto,

$A_{\text{myytävä}}$  = myytävä tuotanto.

Pituushyötysuhde kuvaa leikkurilla olevan kartongin pituuden suhdetta kartongin pituuteen rullaimella. Käytännössä se kertoo, kuinka paljon pohja- tai pintahylkyä prosessissa syntyy. Pituushyötysuhde lasketaan kaavalla:

$$\eta_{\text{pituus}} = \frac{I_{\text{leikkuri}}}{I_{\text{rullain}}} * 100 \quad (3.12)$$

$\eta_{\text{pituus}}$  = pituushyötysuhde,

$I_{\text{leikkuri}}$  = pituus leikkurilla,

$I_{\text{rullain}}$  = pituus rullaimella.

Leveyshyötysuhde lasketaan keskimääräisen leikkurille tulevan rullan leveyden ja keskimääräisen tilauskohtaisen rullan leveyden perusteella. Leveyshyötysuhde kertoo, kuinka paljon leikkurille tulevan rullan leveydestä säilyy leikkausprosessin jälkeen.

$$\eta_{\text{leveys}} = \frac{w_{\text{tilaus}}}{w_{\text{rulla}}} * 100 \quad (3.13)$$

$\eta_{\text{leveys}}$  = leveyshyötysuhde,

$w_{\text{tilaus}}$  = keskimääräinen tilauskohtainen rullan leveys leikkurilla,

$w_{\text{rulla}}$  = keskimääräinen rullan leveys leikkurilla.

Materiaalihyötysuhde koostuu edellä mainituista hyötysuhteista ja se lasketaan näiden komponenttien tulona. Tämä tunnusluku kuvaa kuinka paljon rullaimelle tulleesta kartongista saadaan hyödynnettyä ja myytyä loppuasiakkaille. Materiaalihyötysuhde lasketaan alla olevan kaavan mukaan:

$$\eta_{\text{materiaali}} = \eta_{\text{pinta-ala}} * \eta_{\text{pituus}} * \eta_{\text{leveys}} \quad (3.14)$$

$\eta_{\text{materiaali}}$  = materiaalihyötysuhde,

$\eta_{\text{pinta-ala}}$  = tuotannon pinta-alatehokkuus,

$\eta_{\text{pituus}}$  = pituushyötysuhde,

$\eta_{\text{leveys}}$  = leveyshyötysuhde.

Tappi määrittelee materiaalihyötysuhdetta vastaavan tunnusluvun, joka määritellään myytävien tonniin osuutena rullaimelle tehdyistä tonneista (*Paper Machine Performance Guidelines* 2022). Tämä on yksinkertaisempi tapa laskea hävikin määrää tehtaalla, mutta tunnusluku ei ole täysin verrattavissa edellä mainittuun Zellchemingin materiaalihyötysuhteeseen. Myytävän tuotannon osuus lasketaan kaavalla:

$$\text{Myytävän tuotannon osuus} = \frac{\text{Myytävät tonnit}}{\text{Rullaimen tonnit}} * 100 \quad (3.15)$$

### 3.2.6 Kokonaistehokkuus

Kokonaistehokkuus (overall efficiency) yhdistää aikahyötysuhteen ja materiaalihyötysuhteen. Kokonaistehokkuutta pidetään yhtenä kartonginvalmistuslinjan suorituskyvyn tärkeimpänä mittarina konelinjan tehokkuutta arvioitaessa. Kokonaistehokkuuden heikkous on siinä, että se ei ota huomioon kaikkia tuotannontekijöitä kuten energiankultusta.

Kokonaistehokkuus perustuu käytettävissä olevaan enimmäistuotantoaikaan. Kaikki aikahäviöt ja materiaalihäviöt rullaimen ja tehtaan porttien välillä on huomioitu tässä laskennassa. (*Production Indices For Paper Production* 2005) Kokonaistehokkuus lasketaan alla olevan kaavan mukaisesti:

$$\eta_{\text{tuotanto}} = \eta_{\text{aika}} * \eta_{\text{materiaali}} \quad (3.16)$$



$\eta_{\text{tuotanto}}$  = kokonaistehokkuus,

$\eta_{\text{aika}}$  = aikahyötysuhde,

$\eta_{\text{materiaali}}$  = materiaalihyötysuhde.

Tappi määrittelee koneen kokonaistehokkuuden (OME) käyttöasteen ja myytävän tuotannon osuuden tulona. Tappi määrittelee lisäksi kokonaistehokkuuden (OEE) OME:n ja nopeustehokkuuden tulona. Nopeustehokkuus lasketaan todellisen nopeuden ja tavoitenopeuden suhteena. Tavoitenopeus määritellään usein tehtaiden itsensä toimesta eikä yhtä yleispätevää määritelmää ole. Tavoitenopeutena voidaan muun muassa käyttää lajille mitoitettua nopeutta tai lajin parasta kuukausikeskiarvoa edeltävän vuoden ajalta. (*Paper Machine Performance Guidelines* 2022) Tappin määritelmä OEE:lle vastaa alaluvussa 3.1 esitettyä yleistä määritelmää OEE:lle.

Tapin koneen kokonaistehokkuus (OME) ja Zellchemingin kokonaistehokkuus ovat toisiaan vastaavat tunnusluvut. Tunnuslukujen laskennoissa on kuitenkin pieniä eroja, jotka vaikuttavat tunnuslukujen arvoon. Zellchemingin materiaalihyötysuhde ei huomioi leveyden häviöitä rullaimelta leikkurille, jolloin hyötysuhteesta tulee korkeampi.

Taulukossa 3 on esitetty tunnuslukujen ohjearvot lainerikartongille. Lainerikartonki on ulkopakkaukskartonkia, jota käytetään esimerkiksi aaltopahvin valmistuksessa. Lainerikartonkien tyypillinen neliöpainoalue on 125-350 g/m<sup>2</sup> (Gullichsen ja Paulapuro 2000). Työn tutkimuksessa käytettävä data on kerätty koneelta, joka valmistaa lainerikartonkeja.

Tunnusluku	Havaittu vaihteluväli	Hyvä suorituskky
Aikahyötysuhde	80-97%	95%
Materiaalihyötysuhde	85-99%	98%
Kokonaistehokkuus	73-95%	93%

Taulukko 3. Lainerikartongin tunnuslukujen ohjearvot (*Paper Machine Performance Guidelines* 2022)

Nykyään parhaiden kartonkikoneiden tuotantotehokkuus on yli 90 prosenttia. Käytännössä

tämä taso voidaan saavuttaa vähentämällä katkoja ja katkoihin kuluva-aikaa. Esimerkiksi köydetön päänvienti on yksi syyistä, joiden vuoksi tyhjäkäyntiaika on vähentynyt. (Karlsson 2010)

## 4 Tutkimusasetelma

Tässä luvussa keskitytään työn empiiriseen osuuteen. Alussa esitellään työn konteksti ja työssä käytetyt työkalut, minkä jälkeen käydään läpi käytännön toteutuksen vaiheet.

### 4.1 Tutkimuksen tausta ja käytetyt työkalut

Empiirisen osuuden tarkoituksena oli tutkia, miten alaluvussa 3.2 esiteltyjä tunnuslukuja voidaan laskea saatavilla olevasta datasta. Lisäksi tutkittiin, miten tunnuslukuja voidaan visualisoida ja pohdittiin, millaisia tapoja tunnuslukujen vaihteluiden analysointiin on. Näiden lisäksi tarkasteltiin koneen suoriutumista suhteessa sen mitoitukseen.

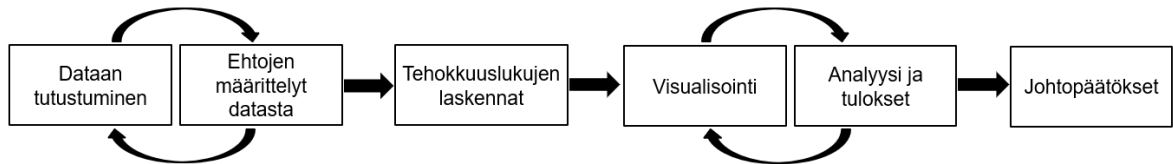
Tutkimuksessa käytetty data on kerätty erään kartonkikoneen automaatiojärjestelmän tiedonkeruun kautta. Data on yhden vuoden ajalta. Suurin osa muuttujista on kerätty minuutin välein, tällaisia muuttujia on 1230 kappaletta. Osa mittauksista kerätään jokaisesta valmiista konerullasta, jolloin dataa tulee noin yhden tunnin välein. Data sisältää 525 600 riviä ja 1876 saraketta.

Pääasiallisina työkaluina tutkimuksessa on käytetty Python-ohjelmointikieltä sekä Pythonille rakennettuja datatieteeseen ja visualisointiin kehitettyjä funktiokirjastoja. Python valikoitui työkaluksi kirjoittajan oman mielenkiinnon ja osaamisen kautta, mutta erityisesti myös edellä mainittujen lukuisten datatieteisiin keskittyvien kirjastojensa vuoksi. Tutkimuksessa käytettyjä funktiokirjastoja ovat muun muassa Pandas, Numpy, Matplotlib, Seaborn ja Scipy. Koodit kirjoitettiin Pythonille tarkoitetuissa ohjelmointiympäristössä Spyderissa.

### 4.2 Tutkimuksen toteutus

Kuvassa 11 on esitetty tutkimusprosessin kulku. Prosessi alkoi dataan tutustumisella ja ehtojen määrittelyllä, jotka tarvittiin tunnuslukujen laskentaa varten. Ehtojen määrittely vaati useamman iteraation, jotta ne pystyttiin määrittelemään mahdollisimman tarkasti. Ehtojen määrittely ja dataan tutustuminen vaativat signaalien visualisointia ja erilaisten tunnuslukujen (minimi, maksimi, keskiarvo, keskihajonta ja niin edelleen) tarkasteluja. Kun määrittel-

tyihin ehtoihin oltiin tyytyväisiä, laskettiin datasta valitut tunnusluvut. Tunnuslukuja visualisoi-  
 tiin eri tavoilla (muun muassa palkkikuvaaja, trendi, rullaava ikkuna). Visualisointia sekä  
 analyysia ja tulosten käsittelyä tehtiin iteratiivisesti. Lopuksi muodostettiin johtopäätökset.



Kuvio 11. Tutkimusprosessin kulku

#### 4.2.1 Datan esikäsittely

Tutkimus aloitettiin tutustumalla dataan. Aluksi tutkittiin millaisia muuttujia data sisältää. Datasta poistettiin 12 saraketta, jotka sisälsivät yli 90 prosenttisesti tyhjiä arvoja (NaN, Not a number). Lisäksi datasta poistettiin kaikki sarakkeet, jotka sisälsivät pelkästään yhtä arvoa. Tällaisia sarakkeita oli 168 kappaletta. Yhteensä datasta poistettiin 180 saraketta, jotka eivät sisältäneet tutkimuksen kannalta oleellista informaatiota.

#### 4.2.2 Tunnuslukujen laskeminen

Ensimmäisenä datasta tunnistettiin Zellchemingin standardin mukaiset aikamääreet erilais-  
 ten ehtojen avulla. Aikaa, jolloin konelinja ei ole käytettävissä ja seisokkiaikaa ei pystyt-  
 ty erottamaan. Alle 48 tuntia kestäneitä seisokkeja päädyttiin käsittelemään seisokkiaikana  
 ja yli 48 tuntia kestäneitä seisokkeja päädyttiin käsittelemään aikana, jolloin konelinja ei  
 ole käytettävissä. Aikarajaksi päätettiin 48 tuntia alaluvun 3.2.2 perusteella. Tutkimuksessa  
 käytetyssä datassa ei ollut saatavilla tietoa massapumppujen päällä olost, jolloin päädyttiin  
 käyttämään jokaisen kerroksen sakeamassavirtauksen (l/s) tietoa. Kun massavirtaus on 0, ei  
 myöskään massapumppu ole päällä. Alla olevassa taulukossa (4) on esitelty, millä ehdoilla  
 ajanjaksot tunnistettiin.

Ajanjakso	Ehto
Aika, jolloin konelinja ei ole käytettävissä	Massapumppu on ollut pois päältä yli 48 tuntia
Käytettävissä oleva enimmäistuotantoaika	Kalenteriaika, josta on vähennetty yli 48 tuntia kestäneet seisokit eli aika, jolloin konelinja ei ole käytettävissä
Seisokkiaika	Massapumppu on ollut pois päältä alle 48 tuntia
Käytettävissä oleva tuotantoaika	Kalenteriaika, josta on vähennetty seisokkiaika ja aika, jolloin konelinja ei ole käytettävissä
Tyhjäkäyntiaika	Aika, jolloin massapumppu on päällä mutta kartonki ei rullaudu rullaimelle
Tuotantoaika	Aika, jolloin kartonki rullautuu rullaimelle

Taulukko 4. Ajanjaksojen määrittely datasta

Dataan tutustuttaessa ymmärrettiin, että saatavilla olevan datan avulla ei ole mahdollista laskea kaikkia alaluvussa 3.2 esiteltyjä tunnuslukuja. Kokonaistehokkuuden toista pääkomponenttia, materiaalihyötysuhdetta, ei voida laskea, koska datasta puuttuu muun muassa tieto hylätyn tuotannon määrästä. Samasta syystä myöskään OEE:tä ei voitu laskea. Puuttuvia tietoja ei voida luotettavasti arvioida tai koostaa muista tiedoista, mistä johtuen tuotantotehokkuuden mittarina päädyttiin käyttämään aikaan liittyviä tunnuslukuja, joita laskettiin kolme kappaletta.

Lasketut tunnusluvut ovat aikahyötysuhde, aikahyötysuhde ilman seisokkeja ja käyttöaste. Aikahyötysuhde ja käyttöaste jäljittelevät mahdollisimman tarkasti Zellchemingin laskentastandardin mukaisia vastaavia tunnuslukuja ja ne on laskettu samoilla kaavoilla (kaavat 3.7 ja 3.8). Kolmas tunnusluku, aikahyötysuhde ilman seisokkeja, kertoo toteutuneen tuotantoajan suhteesta käytettävissä olevaan tuotantoaikaan. Erona aikahyötysuhteeseen on se, että tässä tunnusluvussa huomioidaan ainoastaan tyhjäkäyntiaika. Tunnusluku kehitettiin osana tutkimusprosessia, jotta pystytään vertailemaan todellisen tuotantoajan suhdetta käytettävissä olevaan tuotantoaikaan. Käytännössä tunnusluvusta nähdään, kuinka paljon käytettävissä olevaa tuotantoaika on kulunut tyhjäkäyntiin. Zellchemingin määrittelemän aikahyötysuhteen laskennassa huomioidaan tyhjäkäyntiajan lisäksi alle 48 tunnin seisokit. Aikahyötysuhde

ilman seisokkeja lasketaan alla olevan kaavan mukaan:

$$\eta_{\text{ei seisokkeja}} = \frac{t_p}{t_a} * 100 \quad (4.1)$$

$\eta_{\text{ei seisokkeja}}$  = aikahyötysuhde ilman seisokkeja,

$t_p$  = tuotantoaika,

$t_a$  = käytettävissä oleva tuotantoaika.

Datasta olisi ollut mahdollista määritellä lisäksi muitakin alaluvussa 3.2.2 esiteltyjä ajanjaksoja, kuten lajinvaihtoon tai koneen käynnistykseen kuluva aika. Näitä ei tarvittu hyötysuhteiden laskemiseen, joten ne jätettiin pois. Alla on esitetty (taulukko 5) kolmelle edellä mainitulle tunnusluvulle lasketut arvot yhden vuoden ajalta. Aikahyötysuhteelle laskettu arvo on lainerikartongeille havaittujen arvojen (taulukko 3) vaihteluvälin alarajalla.

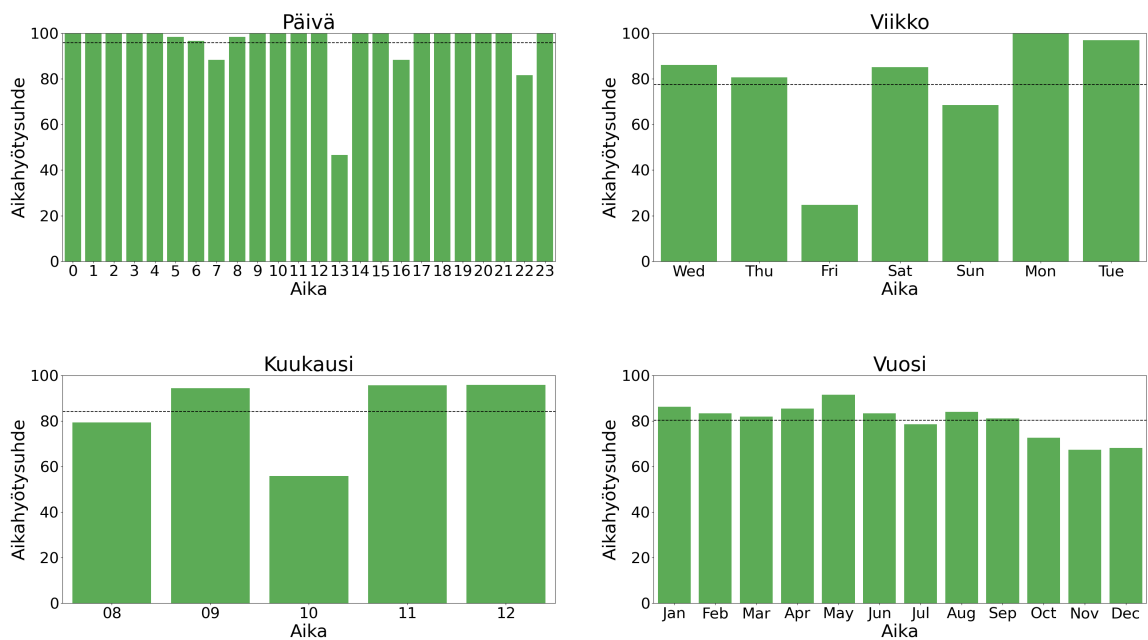
Tunnusluku	Arvo
Käyttöaste	65%
Aikahyötysuhde	80%
Aikahyötysuhde ilman seisokkeja	91%

Taulukko 5. Lasketut aikahyötysuhteet vuoden ajalta

Alla on kuvattu kaikki kolme hyötysuhdetta (kuvat 12, 13, 14) satunnaisina ajanhetkinä päivän, viikon ja kuukauden ajalta, sekä koko vuodelta. Ajanjakson keskiarvo on merkitty kuvaajiin mustalla katkoviivalla. Tunnuslukujen laskemisen lisäksi on oleellista visualisoida tunnuslukuja eri tavoilla ja eri ajanjaksoilla. Visuaalinen tarkastelu helpottaa hahmottamaan ajanjaksojen välisiä eroja. Tällainen esitystapa tarjoaa selkeämmän käsityksen hyötysuhteiden vaihtelusta ja mahdollistaa niiden tarkemman analysoinnin. Esimerkiksi tehtailla päivätason visualisoinnit auttavat ymmärtämään edellisen päivän suoriutumista. Useat yhtiöt, esimerkiksi pörssi-yhtiöt, puolestaan seuraavat ja raportoivat liiketoimintansa kehittymistä kvar-

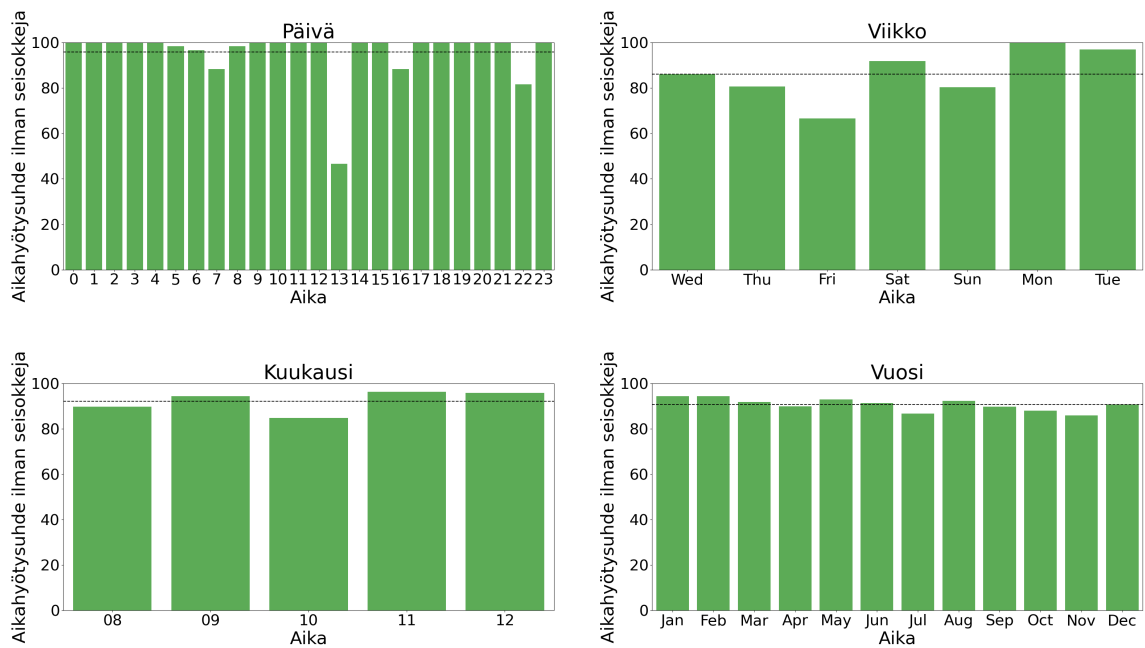
taaleittain, jolloin kuukausittainen seuranta mahdollistaa reagoinnin liiketoiminnan muutoksiin. Edellä mainituista syistä johtuen tunnuslukujen tarkastelu eri ajanjaksoilla on tärkeää.

Aikahyötysuhteeseen vaikuttavat katkot ja alle 48 tuntia kestäneet seisokit. Lyhyellä aikavälillä hyötysuhteissa voi olla huomattavaa vaihtelua. Kuten kuvassa 12 näkyy, yhden tunnin aikana hyötysuhde on ollut noin 50 prosentin tasolla. Pidemmän aikavälin tarkasteluissa vaihtelut tasoittuvat. Aikahyötysuhteen visuaalisella tarkastelulla nähdään toteutuneen tuotantoajan suhde käytettävissä olevaan enimmäistuotantoaikaan, eli aikaan jolloin konelinja olisi teoriassa valmiudessa tuottamaan kartonkia.



Kuvio 12. Aikahyötysuhde

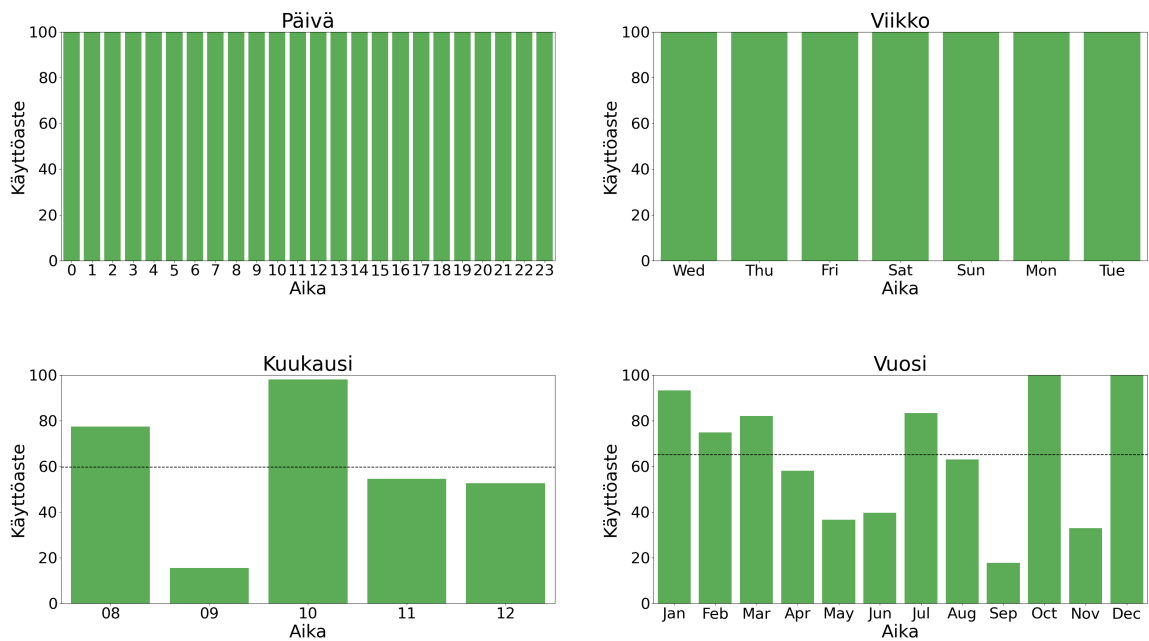
Aikahyötysuhde ilman seisokkeja huomioi nimensä mukaisesti ainoastaan tyhjäkäyntiajan eikä lainkaan seisokkeja. Tästä syystä se saa aikahyötysuhdetta korkeampia arvoja. Tyhjäkäyntiaika, eli pääasiassa katkot, eivät tyypillisesti kestä muutamaa tuntia pidempään, jolloin hyötysuhde pysyy korkealla. Tästä tunnusluvusta nähdään ne päivät, viikot ja kuukaudet, jolloin tyhjäkäyntiaikaa on ajallisesti tapahtunut eniten. Kuvassa 13 on esitetty aikahyötysuhde ilman seisokkeja.



Kuvio 13. Aikahyötysuhde ilman seisokkeja

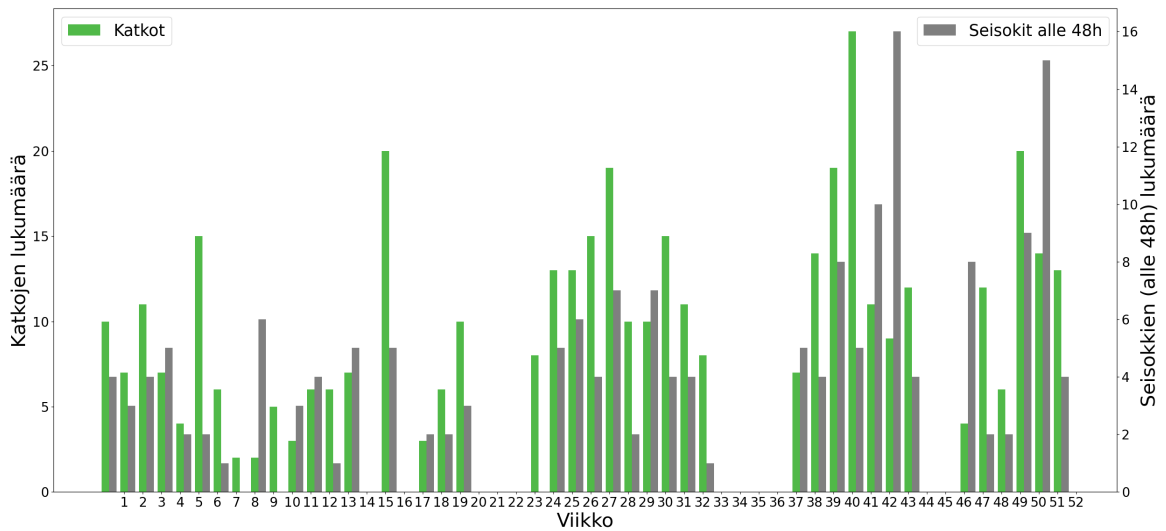
Käyttöasteeseen vaikuttaa yli 48 tunnin pituiset seisokit eli aika, jolloin konelinja ei ole käytettävissä. Kuten kuvasta 14 nähdään, muutamana kuukautena konelinja on ollut käytettävissä koko kuukauden, mutta huonoimmillaan käyttöaste on ollut vain noin 15 prosenttia. Alhaiseen käyttöasteeseen voivat olla syinä esimerkiksi isot konelinjan uudistukset tai tilausten puuttuminen ja siitä johtuva tuotannonrajoitusseisokki. Syitä sille, että konelinja ei ole ollut käytettävissä, käsiteltiin alaluvussa 3.2.2.





Kuvio 14. Käyttöaste

Kuvassa 15 on esitetty katkojen ja alle 48 tuntia kestäneiden seisokkien lukumäärät viikottain. Katkojen ja seisokkien lukumäärät eivät suoranaisesti tarkoita alhaisia tunnuslukuja. Suurempi vaikutus tunnuslukuihin on katkojen ja seisokkien kestoilla. Katkojen ja seisokkien lukumäärien tarkastelu aikahyötysuhteiden lisäksi tarjoaa kattavamman kuvan tuotannon sujuvuudesta. Vaikka katkot ja seisokit olisivat lyhyitä, niiden vaikutukset tuotantoprosessiin voivat silti olla merkittäviä. Toistuvat katkot aiheuttavat tuotannon keskeytyksiä, mikä häiritsee tuotannon sujuvuutta ja heikentää kokonaistehokkuutta. Usein toistuvat katkot voivat viitata toistuviin prosessiongelmiiin, jotka vaativat huomiota ja korjaavia toimenpiteitä.



Kuvio 15. Katkojen ja alle 48 tuntia kestäneiden seisokkien lukumäärät viikottain.

#### 4.2.3 Mitoitustuotantoon vertailu

Aikaan liittyvien tunnuslukujen lisäksi tutkittiin koneen suoriutumista suhteessa koneelle mitoitettuun tuotantoon. Uuden kartonkikonelinjan myynnin yhteydessä koneelle päätetään mitoitusarvot muun muassa konekonseptin sekä koneella valmistettavan kartonkilajin ja neliöpainon mukaan. Käytännössä mitoitustuotantoon vertailu antaa tietoa siitä, miten konelinja toimii suhteessa sille suunniteltuun tuotantoon. Mitoitustuotantoon vertailu on tärkeää siksi, että sen avulla opitaan mitoittamaan uusia konelinjoja oikein sekä asiakkaan tarpeen mukaan. Alla olevissa taulukoissa (6, 7) on esitetty tutkimuksessa käytetylle konelinjalle mitoitettu tuotanto (t/h) ja nopeus (m/min) lajeittain.

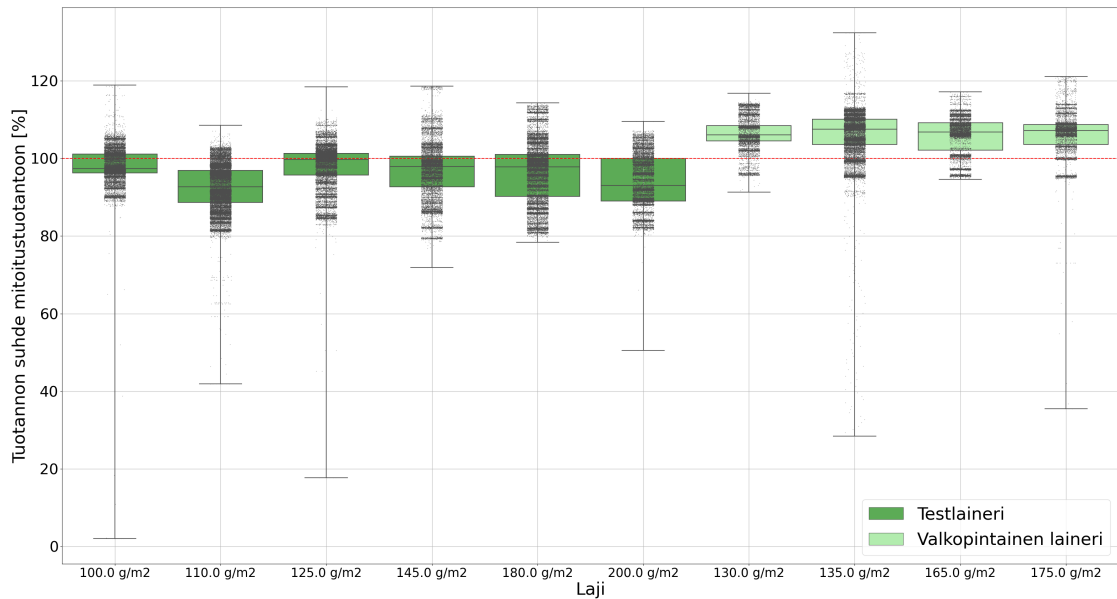
	100 g/m <sup>2</sup>	110 g/m <sup>2</sup>	125 g/m <sup>2</sup>	145 g/m <sup>2</sup>	170 g/m <sup>2</sup>	180 g/m <sup>2</sup>	200 g/m <sup>2</sup>	230 g/m <sup>2</sup>
Nopeus rullaimella (m/min)	1300	1200	1050	900	788	720	630	560
Bruttotuotanto rullaimella (t/h)	41,5	50,3	50,3	50,3	50,3	50,3	50,3	50,3

Taulukko 6. Mitoitukset lajeittain testlainerille

	100 g/m <sup>2</sup>	115g/m <sup>2</sup>	120 g/m <sup>2</sup>	130 g/m <sup>2</sup>	135 g/m <sup>2</sup>	150 g/m <sup>2</sup>	165 g/m <sup>2</sup>	175 g/m <sup>2</sup>
Nopeus rullaimella (m/min)	1170	1134	945	907	840	810	710	648
Bruttotuotanto rullaimella (t/h)	46,8	50,3	50,3	50,3	50,3	50,3	50,3	50,3

Taulukko 7. Mitoitukset lajeittain valkopintaiselle lainerille

Kuvassa 16 on visualisoitu mitoitustuotantoa laatikkokuvaajalla, joka kuvaa datan jakautumaa. Kuvan perusteella viidellä kuudesta testlainerista ei keskimäärin ajeta niille mitoitettua tuotantoa, eli ne alisuoriutuvat. Koska todellinen tuotantomäärä jää jatkuvasti alle mitoitettun tuotannon, voidaan arvioida, että jossain tuotantoprosessin vaiheessa esiintyy sellaisia ongelmia, jotka estävät ajamasta mitoitustuotantoa. Toisaalta on myös mahdollista, että tuotanto on mitoitettu virheellisesti. Valkopintaisilla lainereilla puolestaan kaikkia lajeja ajetaan keskimäärin yli niille mitoitettun tuotannon. Toisin kuin testlaineri, valkopintainen laineri näyttää ylisuoriutuvan. Ajallinen tarkastelu voisi osoittaa, onko ali- tai ylisuoriutumisen yhteydessä johonkin tiettyyn ajanjaksoon. Useilla lajeilla tuotannon vaihtelu on suurta. Valkopintaisissa lainereissa pienin vaihtelu on 130 ja 165 neliöpainoisilla lajeilla. Testlainerilla pienimmät vaihtelut ovat 145 ja 180 neliöpainoisilla lajeilla.



Kuvio 16. Tuotannon suhde mitoitustuotantoon lajeittain

#### 4.2.4 Ajatuksia tuotantotehokkuuden vaihteluiden analyysiin

Tunnuslukujen laskemisen ja visualisoinnin lisäksi tutkimuksessa haluttiin pohtia tapoja, joilla tuotantotehokkuuden vaihteluita voitaisiin analysoida. Tutkimuksessa kokeiltiin ainakin korrelaatiota, ristikorrelaatiota ja koneoppimista. Jokaista analyysiä kokeiltiin useammalle eri kohdemuuttujalle, kuten aikahyötysuhteelle.

Muutamia asioita on hyvä huomioida analyysissä. Kartonkilajit voivat erota ominaisuuksiltaan ja esimerkiksi niihin käytettyjen kemikaalien osalta, jolloin jokaista lajia olisi hyvä tarkastella erikseen. Lisäksi tarkastelemalla lyhyempää ajanjaksoa kerrallaan minimoidaan todennäköisyys tehtailla tapahtuneisiin muutoksiin (esimerkiksi uudet kudokset) ja niiden vaikutukset analyysiin.

Käsitellään esimerkkitapauksena korrelaatioanalyysi aikahyötysuhteelle. Aikahyötysuhde kertoo työssä käsitellyistä hyötysuhteista parhaiten tuotannon sujuvuudesta, koska se huomioi tyhjäkäyntiajan ja alle 48 tuntia kestäneet seisokit. Korrelaatiolla tarkoitetaan Pearsonin tulo-momenttikorrelaatiokerrointa, joka kuvaa muuttujien välistä lineaarista riippuvuutta (“Tilastokeskus” 2024). Aikahyötysuhteelle etsittiin korrelaatioita eniten ajatulle kartonkilajille ja

ajanjaksollisesti yhdelle päivälle. Aikahyötysuhteeseen korreloivia signaaleja löytyi useita. Yksi mahdollisesti aikahyötysuhteeseen vaikuttanut tekijä oli CSF-arvo eli Canadian Standard Freeness (korrelaatiokerroin  $r=0.68$ ), joka tarkoittaa massan suotautumisvastusta. Muutokset CSF:n arvossa kertovat muutoksista massan laadussa. Massan laadun muutokset ovat siis mahdollisesti vaikuttaneet aikahyötysuhteen vaihteluun.

Korrelaation lisäksi tutkimuksessa kokeiltiin muitakin tapoja, kuten ristikorrelaatiota, tuotantotehokkuuden havainnointiin ja vaihteluiden syiden tutkimiseen. Ristikorrelaatio etsii korrelaatioita jollain viivellä. Se auttaa löytämään tilanteet, joissa yksi signaali ennustaa toisen signaalin muutoksia tietyn ajan kuluttua. Tutkimuksessa ristikorrelaatioita pyrittiin löytämään 1-10 minuutin viiveillä. Datassa ei ollut sellaisia viiveitä, jotka olisivat nousseet analyysissä esille, joten ristikorrelaatio ei tuonut mitään uutta tietoa.

Korrelaatioita laskettiin useammalle ajanhetkelle ja näitä tuloksia verrattiin keskenään, mutta mitkään signaalit eivät erottuneet joukosta. Useille eri päiville laskettiin korrelaatiot, mutta niiden perusteella ei voitu löytää selkeitä syitä muutoksiin tuotantotehokkuudessa. Usein syyt voivat olla nimenomaan yksittäisten tapahtumien aiheuttamia, mikä tekee yleispätevien syiden löytämisen vaikeaksi.

Näiden lisäksi testattiin myös muutamia koneoppimismalleja. Mallien sovittamisessa haasteena oli se, että dataa ei ollut riittävän pitkältä ajalta eikä se ollut riittävän kattavaa, jotta mallit olisivat voineet tehdä luotettavia ennusteita. Data ei ollut riittävän kattavaa siinä mielessä, että joitain tuotantotehokkuuteen oleellisesti vaikuttavia asioita ei datassa ole lainkaan.

Yhteenvedon voidaan todeta, että vaikka eri analyysimenetelmät tarjoavat arvokasta tietoa tuotantotehokkuuden parantamiseksi, niiden käyttöön liittyy haasteita. Riittävän tiheästi, riittävän kattavasti ja riittävän pitkältä ajalta kerätty data voisi parantaa esimerkiksi koneoppimismallien luotettavuutta.

## 5 Tulokset

Tässä luvussa käsitellään luvussa 4 toteutetun tutkimuksen tuloksia. Luvussa pohditaan, miten hyvin tunnuslukujen laskennassa onnistuttiin, miten saatuja tuloksia voidaan hyödyntää sekä käsitellään millaisia haasteita tuotantotehokkuuden analysointiin liittyy.

### 5.1 Tutkimuksen tulokset

Tutkimuksessa tarkasteltiin kartonkikoneen tuotantotehokkuutta erilaisten tunnuslukujen avulla. Empiirinen osuus keskittyi tutkimaan, miten tunnusluvut voidaan laskea saatavilla olevasta datasta, joka on kerätty kartonkikoneen automaatiojärjestelmästä. Aikahyötysuhde ja käyttöaste jäljittelevät Zellchemingin laskentastandardeja mahdollisimman tarkasti. Kolmas tunnusluku, aikahyötysuhde ilman seisokkeja, kuvaa tuotantoajan suhdetta käytettävissä olevaan tuotantoaikaan, eikä se perustu mihinkään teoriaosuudessa käsiteltyyn tunnuslukuun. Se kehitettiin, jotta pystytään vertailemaan kuinka paljon tyhjäkäyntiaikaa on ollut suhteessa käytettävissä olevaan tuotantoaikaan.

Aikahyötysuhteet onnistuttiin laskemaan riittävän luotettavasti. Aikaa, jolloin tuotantolinja ei ole käytettävissä, ja seisokkiaikaa ei pystytty suoraan datan perusteella erottamaan toisistaan, jolloin päädyttiin määrittelemään alle 48 tuntia kestäneet seisokit seisokkiajaksi ja yli 48 tuntia kestäneet seisokit ajaksi, jolloin tuotantolinja ei ole käytettävissä. Aikahyötysuhteiden numeerinen tarkastelu antaa nopean ja yksinkertaisen kuvan kartonkikoneen ajallisesta suoriutumuksesta. Visuaalinen tarkastelu auttaa ymmärtämään ajanjaksojen välisiä eroja sekä auttaa löytämään ajanjaksoja, joita kannattaa mahdollisesti tutkia tarkemmin. Tarkemmassa tutkimuksessa voidaan selvittää mitä koneella ja tehtaalla on kyseisenä ajanjaksona tehty tai onko tehtaalla tapahtunut jotain, joka on vaikuttanut aikahyötysuhteisiin. Lisäksi voi olla tarpeellista katsoa, mitä kartonkilajeja kyseisenä ajanjaksona on ajettu ja tutkia, milloin tarkalleen aikahyötysuhde on ollut matalalla.

Kuten todettu, tutkimuksessa laskettiin kolme aikaan liittyvää tunnuslukua. Useampien aikahyötysuhteiden laskemisella saatiin kattavampi kuva tuotantoprosessin eri osa-alueista. Yksittäinen mittari ei riitä kunnolla kuvaamaan koko kartonkikoneen ajallista tehokkuutta, mut-

ta useampien mittareiden tarkastelu voi osoittaa erilaisia ongelmakohtia prosessissa. Eri aikahyötysuhteet auttavat tunnistamaan erilaisia aikahäviöihin liittyviä tekijöitä sekä niiden aiheuttamia vaikutuksia. Lisäksi useamman aikahyötysuhteen tarkastelu helpottaa kohdentamaan toimenpiteitä oikein. Kun voidaan määrittää, missä tuotantoprosessin vaiheessa on parantamisen varaa, voidaan keskittää huomio niihin. Jos esimerkiksi huomataan, että aikahyötysuhde ilman seisokkeja on matalalla tasolla, voidaan keskittyä etsimään ratkaisuja tyhjäkäyntiajan, eli muun muassa katkoajan, minimoimiseen.

## 5.2 Tutkimuksen haasteet

Vaikka aikahyötysuhteiden laskennassa onnistuttiin, kohdattiin tutkimuksessa myös haasteita. Tutkimuksessa käytetty data ei ollut riittävän kattavaa, jotta siitä olisi voitu laskea materiaalihyötysuhde ja siten kokonaistehokkuus tai OEE. Datasta puuttui muun muassa tiedot pohja- ja pintahylyn määrästä. Siksi tuotantotehokkuuden mittareina päädyttiin käyttämään aikaan liittyviä tunnuslukuja. Materiaalihyötysuhde on kuitenkin oleellinen osa kartonkikoneen tehokkuuden arviointia. Se mittaa kuinka paljon tuotantoa leikkurilla, ja sen jälkeen, menee hylkyyn. Ilman materiaalihyötysuhdetta ei voida laskea myöskään kokonaistehokkuutta. Tunnuslukujen puuttuminen estää konelinjan tehokkuuden kokonaiskuvan hahmottamisen.

Tunnuslukujen laskennan lisäksi tutkimuksessa pohdittiin tapoja tunnuslukujen analysointiin. Analyysi osoittautui haasteelliseksi useammasta eri tekijästä johtuen. Alla on esitelty tutkimuksessa kohdattuja haasteita:

1. Datan ulkopuolelle jää paljon oleellista tietoa asioista, jotka vaikuttavat prosessin ajettavuuteen ja siten tuotantotehokkuuteen. Esimerkiksi tieto koneessa käytettävien kudoksien iästä, massaan lisätyistä kemikaaleista sekä raaka-aineen laadusta ei usein sisälly automaatiojärjestelmästä kerättyyn dataan. Tällaisen tiedon puuttuminen vaikeuttaa perusteellista analyysia ja oikeiden johtopäätösten tekemistä tuotantoprosessin ongelmista. Lisäksi alhaiseen tuotantoon voi olla syynä myös ulkopuoliset tekijät. Kartongin heikentynyt kysyntä ja siten alhainen tilauskanta voivat johtaa siihen, että tuotantoa ei kannata tehdä niin paljon kuin koneelle on mitoitettu. Tämä tarkoittaa, että pelkästään datan analysointi ei riitä, vaan pitäisi

huomioida myös esimerkiksi markkinoiden tilanne ja ulkoiset olosuhteet.

2. Useiden muuttujien välillä on vahva keskinäinen korrelaatio, mikä tekee todellisen vian paikantamisesta haastavaa. Siksi on tärkeää ymmärtää muuttujien välisiä suhteita ja niiden vaikutuksia prosessiin. Yksittäisten signaalien vaikutusten selvittäminen ja vertailu on hidasta ja vaatii tarkempaa tarkastelua. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi visuaalisin keinoin, kuten tarkastelemalla signaaleja trendeinä ja hajontakuvaajina. Visuaalinen tarkastelu auttaa hahmottamaan, miten signaalit käyttäytyvät yhdessä ajan kuluessa. Esimerkiksi, jos kaksi signaalia nousevat ja laskevat samanaikaisesti, visuaalinen tarkastelu voi paljastaa, onko toinen näistä signaaleista toisen syy vai seuraus.

3. Signaalien kuvaukset ovat epäselviä eivätkä välttämättä kerro riittävän tarkasti, mikä koneen osa on kyseessä tai edes että mitä signaali tarkoittaa. Epäselvät kuvaukset tekevät vaikeaksi ymmärtää, miten tiettyyn signaaliin pitäisi reagoida, mikä hidastaa ongelmien ratkaisua.

4. Vaikka tuotantotehokkuuden vaihteluun löydettäisiin mahdollisia syitä, pitäisi prosessiparametreihin tehtäviä muutoksia kuitenkin testata ja arvioida. Todellisuudessa vasta kun valmistusprosessiin tehdään muutoksia, voidaan sanoa onko oikeat syyt tuotantotehokkuuden vaihteluille löydetty.



## 6 Pohdinta

Tässä kappaleessa pohditaan, miten tehty tutkimus vastaa työn tutkimuskysymyksiin. Lisäksi pohditaan tutkimuksen merkitystä. Luvun lopussa käsitellään mahdollisia jatkotutkimusaiheita.

### 6.1 Tutkimuskysymyksiin vastaaminen

Tutkimuksen alussa määriteltiin tutkimuskysymykset, joihin työssä lähdettiin etsimään vastausta. Alla on esitelty työn tutkimuskysymykset sekä vastaukset niihin:

*1. Mitkä ovat keskeisimmät mittarit, joilla kartonkikoneiden tuotantotehokkuutta voidaan mitata ja arvioida?*

Tutkimuksessa löydetyt keskeisimmät mittarit, joilla voidaan kuvata kartonkikoneiden tuotantotehokkuutta ovat aikahyötysuhde, materiaalihyötysuhde ja näiden yhdistelmänä kokonaistehokkuus, sekä OEE. Taulukossa 8 on esitetty kartonkikoneiden tuotantotehokkuuden mittaamisen ja suorituskyvyn arvioinnin keskeisimmät tunnusluvut.

Tunnusluku	Käyttötarkoitus
Käyttöaste	Kuvaa osuutta kalenteriajasta, jolloin kartonkilinja on teoriassa valmiudessa tuottamaan kartonkia
Aikahyötysuhde	Kuvaa aikaa, jolloin konelinja tuottaa kartonkia ilman häiriöitä, eli tyhjäkäyntiä tai seisokkeja
Pituushyötysuhde	Kuvaa prosessissa syntyvän pohja- tai pintahylyn määrää
Leveyshyötysuhde	Kuvaa kuinka paljon rullan leveydestä menetetään leikkurilla
Tuotannon pinta-alatehokkuus	Kuvaa kuinka paljon leikkurin jälkeisestä tuotannosta saadaan myytyä asiakkaille
Materiaalihyötysuhde	Yhdistää pituushyötysuhteen, leveyshyötysuhteen ja tuotannon pinta-alatehokkuuden
Kokonaistehokkuus	Yhdistää aikahyötysuhteen ja materiaalihyötysuhteen
Nopeustehokkuus	Kuvaa toteutuneen nopeuden suhdetta tavoitenoiteen
OEE	Yhdistää kokonaistehokkuuden ja nopeustehokkuuden

Taulukko 8. Tuotantotehokkuuden tunnusluvut kartonginvalmistuksessa

*2. Miten kartonkikoneiden tuotantotehokkuutta voidaan havainnoida saatavilla olevan datan ja käytettävien mittareiden avulla?*

Jotta kartonkikoneiden tuotantotehokkuutta voidaan havainnoida saatavilla olevan datan ja käytettävien mittareiden avulla, tulee data ensin kerätä ja esikäsittää. Esikäsittelyvaiheessa datan puuttuvat arvot käsitellään, virheelliset arvot korjataan ja data muokataan sellaiseen muotoon, että sitä voidaan jatkokäsitellä. Tämän jälkeen datasta voidaan laskea tunnusluvut ja visualisoida ne.

Tunnuslukujen laskentaa varten pitää tutkia, miten dataan voidaan koostaa erilaiset ehdot, jotka tunnuslukujen laskentaan tarvitaan. Laskettuja tunnuslukuja voidaan havainnoida visuaalisesti muun muassa trendien, palkkikuvaajien ja hajontakuvaajien avulla. Visualisointi auttaa hahmottamaan, mihin kannattaa kiinnittää huomiota, jos haluaa tehdä tarkempaa analyysiä. Lisäksi visualisointi auttaa tunnistamaan ajanjaksojen välisiä eroja.

Tässä tutkimuksessa käytetystä datasta pystyttiin laskemaan riittävän tarkasti aikaan liittyvät hyötysuhteet. Ajan, jolloin tuotantolinja ei ole käytettävissä ja seisokkiajan eroa ei pystynyt datan perusteella sanomaan, jolloin seisokkiajaksi määriteltiin alle 48 tuntia kestäneet seisokit. Loput tapaukset, joissa massapumppu on ollut pois päältä yli 48 tuntia ovat aikaa, jolloin konelinja ei ole käytettävissä.

Datan saatavuus riippuu konelinjasta, mutta yleisesti ottaen aikaan liittyvät hyötysuhteet pystytään laskemaan useimmilta konelinjoilta. Ehdot, joilla ajat määritellään laskentoja varten tulee katsoa tapauskohtaisesti ja koostaa saatavilla olevista tiedoista. Esimerkiksi tässä tutkimuksessa massapumppujen päälläolotietona käytettiin eri kerrosten sakeamassavirtausten tietoja.

### *3. Miten tuotantotehokkuuden vaihteluita voidaan tutkia?*

Kartonkikoneiden tuotantotehokkuuden vaihteluiden tutkiminen edellyttää monipuolista data-analyysiiä ja riittävää prosessituntemusta. Analyysi kannattaa aloittaa keskittymällä tiettyyn ajanjaksoon, kuten viikkoon tai kuukauteen. Tämä auttaa rajaamaan muutokset toimintaympäristössä, esimerkiksi kudosten vaihdokset, jolloin analyysin tulokset ovat luotettavampia. Sopivan ajanjakson voi löytää tunnuslukuja visualisoimalla. Analyysimenetelmät tulee valita tapauskohtaisesti. On tärkeää testata useita analyysimenetelmiä, jotta löydetään tilanteeseen parhaiten sopivat työkalut. Näiden lisäksi on syytä pohtia, löytyykö datasta riittävästi tietoa luotettavan analyysin tekemiseen. Jos data on erityisen puutteellista, voivat analyysien tulokset ja niistä tehtävät johtopäätökset olla virheellisiä.

## **6.2 Tutkimuksen merkitys**

Tutkimuksen suurimmat hyödyt liittyvät tunnuslukujen antamaan objektiiviseen näkemykseen konelinjan suorituskyvystä. Yhden konelinjan kohdalla voidaan tarkastella tunnuslukujen ajallista vaihtelua ja seurata tuotantotehokkuuden kehittymistä eri ajanjaksoilla. Tuotantotehokkuuden seuraaminen mahdollistaa sen, että laskevaan tehokkuuteen voidaan reagoida nopeammin. Jo pienetkin parannukset konelinjojen tehokkuudessa ovat taloudellisesti merkittäviä. Useamman konelinjan kohdalla puolestaan voidaan vertailla, miten konelinjat suoriutuvat toisiinsa nähden. Näin ollen voidaan selvittää, minkälaisia arvoja tunnusluvuil-

le on kartonkiteollisuudessa mahdollista saavuttaa, ja minkälaisia arvoja yritysten kannattaa tavoitella. Kartongin valmistajille hyötynä on omien konelinjojen tuotantotehokkuuden ajallinen vertailu sekä niiden keskinäinen vertailu. Kartonkikoneitoimittajille toisaalta hyötynä on toimittamiensa konelinjojen keskinäinen vertailu sekä riippumattoman tiedon saaminen.

### **6.3 Ehdotukset jatkotutkimusaiheiksi**

Ensimmäinen jatkotutkimusaihe olisi kehittää reaaliaikaisia analytiikka- ja tekoälymalleja ennakoimaan tuotantotehokkuuden muutoksia. Tämä edellyttäisi datan keräämistä merkittävästi pidemmältä aikaväliltä kuin mitä tässä tutkimuksessa käytettiin. Lisäksi datasta olisi oleellista löytyä lähes kaikki tuotantotehokkuuteen vaikuttavat tekijät, jotta malleista saataisiin mahdollisimman tarkkoja ja suurin osa epävarmuustekijöistä jäisi pois. Tekoäly kuitenkin voisi auttaa tunnistamaan poikkeamia prosessissa reaaliajassa ja reagoimaan tuotannon häiriöihin ennen kuin ne vaikuttavat merkittävästi tehokkuuteen.

Toinen jatkotutkimusaihe olisi datan koostaaminen useammista lähteistä ja koostetun datan hyödyntäminen tuotantotehokkuuden parantamisessa. Tässä tutkimuksessa käytettiin ainoastaan kartonkikoneen automaatiojärjestelmästä saatua dataa. Automaatiojärjestelmästä saatavan datan lisäksi tietoa voitaisiin koostaa huoltoraporteista ja häiriöaikaraporteista. Tavoitteena olisi saada laaja, toisiinsa liittyvä tietokokonaisuus, joka mahdollistaisi koko prosessin tehokkuuden tarkastelun datan perusteella. Haasteena tässä on datan kerääminen eri lähteistä ja kerätyn datan koostaminen yhteen.

Kolmas jatkotutkimusaihe olisi laskea tässä tutkimuksessa lasketut tunnusluvut muille kartonkikoneille. Tällaisen tutkimuksen suorittaminen osoittaisi sen, miten helposti tutkimus on toistettavissa uudelle datalle ja eri kartonkikoneille. Käytännössä tämä tarkoittaisi sitä, että tutkimuksessa pitäisi tarkastella, miten ajan määrittelyihin tarvittavat ehdot voidaan koostaa uudesta datasta, jotta laskennat olisivat vertailukelpoisia. Tutkimuksen laajentaminen yhden uuden koneen sijaan useammalle koneelle mahdollistaisi eri koneiden suorituskyvyn keskinäisen vertailun. Näin voitaisiin nähdä, miten esimerkiksi samaa kartonkilajia tuottavat tehtaot vertautuvat keskenään.

Neljäs jatkotutkimusaihe olisi tutkia, miten työssä käsiteltävät tunnusluvut voidaan viedä

laskettavaksi kartonkikoneen automaatiojärjestelmään. Tavoitteena olisi saada laskettua tunnusluvut reaaliajassa. Alkuvaiheessa suoritettaisiin nykytilan analyysi ja tarpeiden kartoitus. Tämän jälkeen etsittäisiin parhaat tavat integroida laskennat osaksi automaatiojärjestelmää. Lopuksi arvioitaisiin järjestelmän toimivuutta ja mahdollisia kehityskohteita käyttäjäkokemusten perusteella.

## 7 Yhteenveto

Tuotantotehokkuuden mittaaminen on keskeistä konelinjojen suorituskyvyn ymmärtämisessä. Tässä diplomityössä tutkittiin, millaisia tuotantotehokkuuden mittareita käytetään kartongin valmistuksessa. Lisäksi tutkittiin miten löydettyjä mittareita voidaan laskea, visualisoida ja analysoida kartonkikoneen automaatiojärjestelmän kautta kerätystä datasta.

Tutkimuksessa onnistuttiin laskemaan käyttöaste, aikahyötysuhde ja aikahyötysuhde ilman seisokkeja. Nämä tunnusluvut antavat kattavan kuvan konelinjan ajallisesta saatavuudesta. Laskettujen aikahyötysuhteiden numeerinen tarkastelu tarjoaa nopean ja yksinkertaisen kuvan konelinjan ajallisesta suoriutumisesta. Lisäksi niiden visuaalinen tarkastelu auttaa ymmärtämään ajanjaksojen välisiä eroja. Useampien aikahyötysuhteiden tarkasteleminen antaa kattavamman kuvan tuotantoprosessin eri osa-alueista, ja ne voivat osoittaa erilaisia ongelmakohtia prosessissa, joita yksittäinen mittari ei riittäisi kuvaamaan. Konelinjojen suorituskyvystä saatava tieto on arvokasta käytännön päätöksenteossa ja tuotannon optimoinnissa.

Materiaalihyötysuhteen, kokonaistehokkuuden tai OEE:n laskeminen ei ollut mahdollista, koska data ei sisältänyt kaikkia hyötysuhteiden laskemiseen tarvittavia tietoja eikä niitä voitu arvioida riittävän luotettavasti. Tietojen puuttuminen estää tunnuslukujen laskemisen ja siten konelinjan tehokkuuden kokonaiskuvan hahmottamisen.

Tunnuslukujen laskemisen ja visualisoinnin lisäksi pohdittiin millaisia tapoja tuotantotehokkuuden vaihteluiden analysointiin on. Analyysin haasteina olivat puutteellinen data, muuttujien välinen vahva korrelaatio, signaalien epäselvät kuvaukset sekä tarve testata prosessimuutoksia todellisessa tuotantoympäristössä. Näiden haasteiden vuoksi korostettiin kattavamman datan keräämisen tärkeyttä luotettavampien tulosten saamiseksi.

## Lähteet

“About Tappi”. 2024. Viitattu 26. helmikuuta 2024. <https://www.tappi.org/menus/functiona-l-navigation/About-Us/>.

Ademujimi, Toyosi ja Prabhu Vittalds. 2024. “Model-Driven Bayesian Network Learning for Factory-Level Fault Diagnostics and Resilience.” *Sustainability* 16 (2): 513. <https://doi.org/doi:10.3390/su16020513>.

Bixler, Ted S. 2008. “Remote monitoring and expert diagnostic support for the pulp and paper industry”, 181–191.

Byod, Rob ja Robert Suess-Wolf. 2019. “OEE and wire processing”. *Assembly* 62 (11): 2WP–7WP. <https://doi.org/10.1080/00194506.2011.696369>.

Gullichsen, Johan ja Hannu Paulapuro. 2000. *Papermaking science and technology. Paper and Board Grades*. 2. painos. Nide 18. Helsinki: Fapet Oy.

Gupta, Pradeep ja Vardhan Sachit. 2016. “Optimizing OEE, Productivity and Production Cost for Improving Sales Volume in an Automobile Industry Through TPM: A Case Study.” *International Journal of Production Research* 54 (10): 2976–2988. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1145817>.

Hägglom-Ahnger, Ulla ja Pekka Komulainen. 2000. *Paperin ja kartongin valmistus*. Helsinki: Opetushallitus.

Juneja, Pradeep Kumar, A.K. Ray ja R. Mitra. 2011. “Model Predictive Control of Important Parameters in a Paper Machine Headbox”. *Indian Chemical Engineering* 53 (3): 170–181. <https://doi.org/10.1080/00194506.2011.696369>.

Karlsson, Markku. 2010. *Papermaking science and technology. Papermaking Part 2, Drying*. 2. painos. Nide 9. Helsinki: Paper Engineers’ Association/Paperi ja Puu Oy.

“Knowpap, Järjestelmät”. 2024. Viitattu 8. maaliskuuta 2024. [https://www.knowpap.com/extranet/suomi/automation/user\\_interfaces/2\\_control\\_systems/control\\_systems/ui.htm](https://www.knowpap.com/extranet/suomi/automation/user_interfaces/2_control_systems/control_systems/ui.htm).

“Knowpap, Kalanterointi”. 2024. Viitattu 5. maaliskuuta 2024. [https://www.knowpap.com/extranet/suomi/knowpap\\_system/user\\_interfaces/board\\_machines\\_new/calendering.htm](https://www.knowpap.com/extranet/suomi/knowpap_system/user_interfaces/board_machines_new/calendering.htm).

“Knowpap, Kuivatusosa”. 2024. Viitattu 5. maaliskuuta 2024. [https://www.knowpap.com/extranet/suomi/knowpap\\_system/user\\_interfaces/board\\_machines\\_new/machine/frame\\_kuivatusosa.htm](https://www.knowpap.com/extranet/suomi/knowpap_system/user_interfaces/board_machines_new/machine/frame_kuivatusosa.htm).

“Knowpap, Massa- ja vesijärjestelmät”. 2024. Viitattu 15. helmikuuta 2024. [https://www.knowpap.com/extranet/suomi/paperboard\\_technology/3\\_stock\\_handling/0\\_general/frame.htm](https://www.knowpap.com/extranet/suomi/paperboard_technology/3_stock_handling/0_general/frame.htm).

“Knowpap, Pintaliimaus”. 2024. Viitattu 5. maaliskuuta 2024. [https://www.knowpap.com/extranet/suomi/knowpap\\_system/user\\_interfaces/board\\_machines\\_new/sizing.htm](https://www.knowpap.com/extranet/suomi/knowpap_system/user_interfaces/board_machines_new/sizing.htm).

“Knowpap, Päällistys”. 2024. Viitattu 5. maaliskuuta 2024. [https://www.knowpap.com/extranet/suomi/knowpap\\_system/user\\_interfaces/board\\_machines\\_new/coating.htm](https://www.knowpap.com/extranet/suomi/knowpap_system/user_interfaces/board_machines_new/coating.htm).

“Knowpap, Rullaus”. 2024. Viitattu 5. maaliskuuta 2024. [https://www.knowpap.com/extranet/suomi/paperboard\\_technology/9\\_reeling/1\\_reeling/frame.htm](https://www.knowpap.com/extranet/suomi/paperboard_technology/9_reeling/1_reeling/frame.htm).

“Knowpap, Viiraosa”. 2024. Viitattu 20. helmikuuta 2024. [https://www.knowpap.com/extranet/suomi/knowpap\\_system/user\\_interfaces/board\\_machines\\_new/machine/frame\\_viiraosa.htm](https://www.knowpap.com/extranet/suomi/knowpap_system/user_interfaces/board_machines_new/machine/frame_viiraosa.htm).

Kong, Lingbo, Zhengyi Tao, Liu Huanbin ja Zhang Dinghua. 2016. “Effect of Operating Parameters on the Drying Performance of Multicylinder Paper Machine Dryer Section.” *Drying Technology* 34 (13): 1641–1650. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1139588>.

Leiviskä, Kauko. 2009. *Papermaking science and technology. Process and Maintenance Management*. 2. painos. Nide 14. Helsinki: Paper Engineers’ Association/Paperi ja Puu Oy.

Li, Jigeng, Lingbo Kong ja Huanbin Liu. 2012. “Dryer Section Energy System Measurement and Energy-Saving Potential Analysis for a Paper Machine”. *Measurement and control* 45 (8): 228–254. <https://doi.org/10.1177/002029401204500803>.

Nilsson, Lars. 2014. “Air flow and compression work in vacuum dewatering of paper”. *Drying technology* 32 (1): 39–46. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.809732>.



Paltakari, Jouni. 2009. *Papermaking science and technology. Pigment Coating and Surface Sizing of Paper*. 2. painos. Nide 11. Helsinki: Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy.

*Paper Machine Performance Guidelines: TIP 0404-47*. 2022. TAPPI.

*Production Indices For Paper Production*. 2005. Zellcheming / The Finnish Paper Engineers' Association.

Rautiainen, Pentti. 2009. *Papermaking science and technology. Papermaking Part 3, Finishing*. 2. painos. Nide 10. Helsinki: Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy.

Roux, Jean-Claude ja Martine Rueff. 2012. "Characterization of the fiber–water separation process through a suction box of a single-wire pilot paper machine". *Separation and Purification Technology* 92:136–142. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.07.034>.

Sayuti, M, Syarifuddin Julianda ja Fatimah. 2019. "Analysis of the Overall Equipment Effectiveness (OEE) to Minimize Six Big Losses of Pulp machine: A Case Study in Pulp and Paper Industries." *OP Conference Series: Materials Science and Engineering* 536 (1): 12136. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/536/1/012136>.

"Six Big Losses in Manufacturing". 2024. Viitattu 6. maaliskuuta 2024. <https://www.oeec.com/oeec-six-big-losses/>.

"Tilastokeskus". 2024. Viitattu 4. toukokuuta 2024. <https://stat.fi/meta/kas/korrelaatio.html>.

Tsarouhas, Panagiotis. 2019. "Improving Operation of the Croissant Production Line Through Overall Equipment Effectiveness (OEE): A Case Study." *International Journal of Productivity and Performance Management* 68 (1): 88–108. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-02-2018-0060>.

"Tuotantokoneiden kokonaistehokkuus OEE". 2013. Viitattu 25. maaliskuuta 2024. [https://www.prosessitaito.fi/Tuotantokoneiden\\_kokonaistehokkuus\\_OEE.pdf](https://www.prosessitaito.fi/Tuotantokoneiden_kokonaistehokkuus_OEE.pdf).

"Zellcheming, About Us". 2024. Viitattu 26. helmikuuta 2024. <https://www.zellcheming.de/en/the-association/about-us>.