



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LAURI KOUSA
KUNNOSSAPITOSTRATEGIAN KEHITTÄMINEN LAJITTELUKES-
KUKSESSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Kari T. Koskinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekunnassa 18.
marraskuuta 2016.

TIIVISTELMÄ

LAURI KOUSA: Kunnossapitostrategian kehittäminen lajittelukeskuksessa
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 58 sivua
Marraskuu 2016
Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Koneiden ja järjestelmien suunnittelu
Tarkastaja: professori Kari T. Koskinen

Avainsanat: Kunnossapito, käytettävyys, käyttövarmuus, luotettavuus, Analyytinen Hierarkiaproessi, Luotettavuuskeskeinen kunnossapito

Tämän työn tarkoituksena on tutkia erään pakettilajittelukoneen vikaantumista ja yksittäisistä vioista aiheutuvia seuraamuksia. Yksittäisen vian tuotannolle aiheuttama haitta on riippuvaista muun muassa vian kestosta, vikaantuvasta kohteesta ja siitä, kuinka usein yksittäinen vika ilmenee. Keräämällä yksityiskohtaista tietoa tutkittavalle kohteelle aikaisemmin tapahtuneista vikaantumisista, on todennäköisyyslaskennan keinoin mahdollista ennustaa kohteen käyttäytymistä. Tutkittavasta kohteesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä ja niiden suhteista luodaan malli, jonka avulla voidaan selvittää yksittäisen osatekijän toiminnan ja toimimattomuuden vaikutus koko järjestelmän toimintaan. Tutkimalla vioista kerättyä tietoa, voidaan tunnistaa tuotannolle haitallisimmat ja useimmin toistuvat viat, joiden ennaltaehkäisyllä on suuri vaikutus lajittelukoneen toimintaan.

Kunnossapito on olennainen osa kaikenlaista teollista tuotantoa. Kunnossapitoorganisaation tavoitteena on ylläpitää huollettavan kohteen käytettävyys sovitulla tasolla mahdollisimman pienin kustannuksin. Kustannuksia aiheutuu suoraan kunnossapitoon liitettävien kustannuksien lisäksi myös suunnitelluista sekä suunnittelemattomista tuotantokatkoksista. Suunnittelemattomat katkokset ovat tyypillisesti kaikkein suurimpia kunnossapitoon liittyviä kustannuseriä tuotannolle. Ennakoivalla kunnossapidolla pyritään aikaväliin, käyttöaikaan tai kunnonvalvontaan perustuvilla huolloilla pienentämään vikaantumisen todennäköisyyttä ja siten ehkäisemään tuotannon suunnittelemtonta keskeytymistä.

Työssä tarkasteltavalle lajittelukoneelle on olemassa laitetoimittajan määrittämä ennakkohuolto-ohjelma, jolla pyritään mahdollisimman tehokkaasti ennaltaehkäisemään vikojen syntyminen. Ennakkohuolto-ohjelman toteuttaminen sellaisenaan asettaa kuitenkin suuria haasteita kunnossapitoorganisaatiolle sekä tuotannolle suuresta huoltomäärästä johtuen. Tämän diplomityön toisena tavoitteena onkin tunnistaa kohteet, joissa ennakkohuolto-ohjelman kehittämisellä saavutetaan suurin hyöty.

ABSTRACT

KOUSA LAURI: The Improvement of Maintenance Strategy in the Sorting Center

Master of Science Thesis, 58 pages

November 2016

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Design of Machines and Systems

Examiner: Professor Kari T. Koskinen

Keywords: Maintenance, availability, dependability, reliability, Analytic Hierarchy Process, Reliability Centered Maintenance

The purpose of this thesis is to study failures and consequences of the failures in a parcel sorting machine. The consequences that one single failure can cause depend on the failures length, the time between failures and where the failure is occurring. It is possible to predict the behavior of the sorting machine by collecting and researching probabilities of the detailed information of the previous failure. By creating the model of the complete machine and its subsystems it is possible to simulate a single components effect to the whole system. The collected failure information can be used to recognize the most detrimental and common failures. The preventing of those failures has a huge impact to the state of the sorting machine.

The maintenance is an essential part in all form of the industry. The purpose of the maintenance organization is to ensure the availability of the item to function as required, at optimum costs. The costs are caused by direct maintenance costs and by planned and unpredictable outages of the production. Unpredictable outages are generally the most supreme part of the maintenance relative costs. Preventive maintenance is carried out by time-, production- and condition based maintenance and intended to reduce the probability of failure and the unpredictable outages of the production.

The sorter machine studied in this thesis has the preventive maintenance program created by the sorter supplier. The purpose of the program is to reduce efficiently the circumstances that may lead to failure. The implementing of the original preventive maintenance program is really challenging for both production and maintenance organization because of the massive amount of the maintenance routines. Another purpose of this Master of Science thesis is to identify the subsystems where the greatest benefits of the development of the maintenance program can be found.

ALKUSANAT

Haluan kiittää työnantajaani Maintpartner Oy:ta, joka on osaltaan mahdollistanut tämän diplomityön teon. Kiitos kaikille, jotka ovat edesauttaneet tämän työn onnistumisessa, erityisesti Antti Kilpiölle tämän työn ohjauksesta. Kiitos myös Tampereen Teknillisen Yliopiston professorit Seppo Virtaselle ja Kari T. Koskiselle avusta ja neuvoista työn edetessä.

Haluan kiittää tuesta myös avovaimoani Minnaa, joka on auttanut jaksamaan paitsi tämän työn, myös opintojen suorittamisessa alusta loppuun. Kiitos myös kotijoukoille, kaikille kavereilleni ja ystävälleni, jotka ovat tehneet tästä opiskeluajasta unohtumattoman kokemuksen. Ikimuistoiset hetket ja matkat erinäisten urheilujoukkojen ja speksikäiden ihmisten kanssa hymyilyttävät vielä pitkään.

Tampereella, 21.11.2016

Lauri Koussa

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	KUNNOSSAPIDON KÄSITTEET	3
2.1	Kunnossapidon lajit.....	3
2.2	Kunnossapitokustannukset	4
2.3	Käyttövarmuuden suunnittelu	6
2.4	Kunnossapitostrategia	7
2.5	Jaksotettu kunnossapito.....	8
2.6	Käytettävyyden aikakäsitteet.....	9
2.7	Vikapuu	10
2.8	Tapahtumien todennäköisyydet.....	12
2.9	Herkkyysanalyysi	14
3.	ANALYYTTINEN HIEARKIAPROSESSI.....	15
3.1	AHP-menetelmän teoria.....	15
3.2	Hyöty/kustannusanalyysi	19
4.	LAJITTELUKESKUS	21
4.1	Tarkasteltavan lajittelukeskuksen tuotanto	21
4.2	Pakettilajittelukone.....	22
4.2.1	Syöttölinjojen layout	25
4.2.2	Laitehierarkia	28
4.3	Vikadatan analysointi.....	29
5.	LAJITTELUKONEEN AHP-ANALYYSI.....	31
5.1	Lajittelukoneen osajärjestelmät.....	31
5.2	Vikadatan tarkastelu AHP menetelmällä	32
5.3	Laitetoimittajan ennakkohuoltosuunnitelma	37
5.4	Ennakkohuoltojen tarkastelu AHP menetelmällä	39
6.	JÄRJESTELMÄN KÄYTETTÄVYYS JA LUOTETTAVUUS	44
6.1	Osajärjestelmien käytettävyys	44
6.2	Järjestelmän epäluotettavuus.....	45
6.3	Herkkyysanalyysi Risk Reduction Worth (RRW) menetelmällä.....	48
6.4	Yleisimmät viat ja niiden korjaus.....	50
6.5	Yleisimpien vikojen poistaminen ja vaikutukset	51
7.	TARKASTELUJEN TULOKSET JA TOIMENPITEET.....	54
7.1	AHP-menetelmän tulokset	54
7.2	RCM-analyysin tulokset.....	55
	LÄHTEET.....	58

KUVALUETTELO

<i>Kuva 2.1 SFS-EN 13306 mukaiset kunnossapitolajit [1].....</i>	<i>3</i>
<i>Kuva 2.2 Käyttövarmuuden suunnittelu [4].....</i>	<i>6</i>
<i>Kuva 2.3 Vikapuu [4].....</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 2.4 A₁ tai A₂ realisoituu.</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 2.5 A₁ ja A₂ realisoituu.....</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 3.1 Kolmitasoinen hierarkiamalli [10].....</i>	<i>16</i>
<i>Kuva 4.1 Syöttölinja-alueen layout [13].....</i>	<i>27</i>
<i>Kuva 4.2 Pakettilajittelukoneen laitehierarkian osa.....</i>	<i>28</i>
<i>Kuva 5.1 Kylpyammekäyrä [4].</i>	<i>32</i>
<i>Kuva 5.2 Lajittelukoneen vikapuudiagrammi.</i>	<i>33</i>
<i>Kuva 6.1 Syöttölinjojen epäluotettavuusfunktiot.....</i>	<i>46</i>
<i>Kuva 6.2 Lajittelukoneen ja eri osajärjestelmien epäluotettavuusfunktiot.....</i>	<i>48</i>
<i>Kuva 6.3 Lajittelukoneen RRW-herkkyysanalyysi ajan funktiona.</i>	<i>49</i>
<i>Kuva 6.4 Lajittelukoneen epäluotettavuus eri aika-arvoilla.....</i>	<i>50</i>
<i>Kuva 6.5 Järjestelmän ja radan epäluotettavuus, kun pudonneiden pakettien aiheuttamat viat on poistettu.</i>	<i>52</i>

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 2.1 Loogiset portit [4].</i>	11
<i>Taulukko 3.1. Parivertailun tärkeysasteet (s. 6) [10].</i>	17
<i>Taulukko 3.2 Satunnaisindeksi (Random Index, RI). (s.21)[9].</i>	18
<i>Taulukko 3.3. Normeerausesimerkki.</i>	19
<i>Taulukko 4.1. Paketin minimi- sekä maksimidimensiot.</i>	23
<i>Taulukko 4.2 Syöttölinjojen ominaisuudet.</i>	26
<i>Taulukko 5.1 Vikojen määrä, pituus ja sijainti merkitys järjestelmän käyttövarmuudelle.</i>	34
<i>Taulukko 5.2 Vikojen määrä.</i>	35
<i>Taulukko 5.3 Vikojen kumulatiivinen kesto.</i>	35
<i>Taulukko 5.4 Osajärjestelmien vikaantumisen vaikutus koko järjestelmän käyttövarmuuteen.</i>	36
<i>Taulukko 5.5 Kootut tulokset.</i>	36
<i>Taulukko 5.6 Vikojen painotetut haittavaikutukset lajittelukoneen käyttövarmuudelle.</i>	37
<i>Taulukko 5.7. Ennakkohuoltojen huoltovälit ja määrät osajärjestelmätasolla.</i>	38
<i>Taulukko 5.8 Pysäytystä vaativien ja ilman pysäytystä tehtävien huoltojen kustannusten suuruus.</i>	40
<i>Taulukko 5.9 Huoltojen ja pysäytystä vaativien huoltojen määrät osajärjestelmittäin.</i>	41
<i>Taulukko 5.10 Ennakkohuoltojen painotetut kustannukset osajärjestelmäkohtaisesti.</i>	42
<i>Taulukko 5.11 Hyöty/kustannusanalyysi.</i>	42
<i>Taulukko 6.1. Lajittelukoneen eri osien käytettävyys.</i>	45
<i>Taulukko 6.2. Pudonneiden pakettien aiheuttamien vikojen osuus.</i>	51

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AHP	engl. Analytic Hierarchy Process, Analyyttinen hierarkia prosessi
RCM	engl. Reliability Centered Maintenance, luotettavuuskeskeinen kunnossapito
RRW	engl. Risk Reduction Worth - Herkkyysanalyysimenetelmä
A(t)	käytettävyys ajan t fuktiona
CI	engl. Consistency Index, konsistenssi
CR	engl. Consistency Ratio, konsistenssisuhde
F(t)	epäluotettavuus ajan t fuktiona
f(u)	epäluotettavuuden tiheysfunktio aikavälillä u
h(p(t))	oikean järjestelmän luotettavuus
h(1 _i (p(t)))	kuvitteellisen järjestelmän luotettavuus
I ^{RRW}	RRW-herkkyysanalyysin tärkeysmita
MTBF	engl. Mean Time Between Failures, keskimääräinen käyntiaika vikavälillä
MTBR	engl. Mean Time Between Repairs, keskimääräinen korjausten väli
MTTF	engl. Mean Time to Failure, keskimääräinen vikaväli
MTTR	engl. Mean Time to Restoration, keskimääräinen aika toimintakelpoisuuden palauttamiseen
N	normaalitila
P(X _i)	perustapahtuman X _i todennäköisyys
R(t)	luotettavuus ajan t fuktiona
RI	engl. Random Index, satunnaisindeksi
Q(t)	epäkäytettävyys ajan t fuktiona
TTR	engl. Time to Repair, ajanjakso viasta korjauksen valmistumiseen
w	AHP parivertailumatriisin prioriteettivektori
w(t)	vikaintensiteetti ajan t fuktiona
w _b	hyötyvektori
w _c	kustannusvektori
λ _{max}	AHP parivertailumatriisin suurin ominaisarvo
Ω	Otosavaruus

1. JOHDANTO

Kunnossapito on oleellinen osa kaikenlaista teollista tuotantoa. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan prosessit muuttuvat ja niiden entropia kasvaa. Kunnossapidon näkökulmasta tuo muutos tarkoittaa kulumista ja sen seurauksena rikkoutumista. Kunnossapito on keino vastustaa tätä muutosta. Kunnossapito-organisaation tarkoituksena on taata koneiden ja laitteiden jatkuva toiminta sovitulla tavalla. Nykyaikaisen ennakoivan kunnossapidon tavoitteena on tunnistaa riskit, niiden seuraukset ja ennaltaehkäistä viat jo ennen niiden syntymistä.

Nykyaikaiselle tuotannolle on tyypillistä erittäin korkea tietotekniikan ja automaation hyödyntäminen, suuri tuotantolaitteisiin sitoutunut pääoma ja suunnittelemattomien tuotantokatkosten suuret kustannukset. Tarkkaan suunniteltu tuotanto ei kestä toistuvia suunnittelemattomia katkoksia, jotka voivat aiheuttaa suuria ongelmia tuotantoketjussa. Pitkälle viety automaatio on myös olennainen osa nykyaikaista kappaletavaralogistiikkaa. Yritysten ja yksityisten kuluttajien lähettämien lähetysten lajittelu on erittäin tärkeä tekijä tarkkaan aikataulutetussa toimitusketjussa. Lähetysten lajittelu tapahtuu lajittelukeskuksissa, joissa pieni muutaman minuutin tuotantokatkos kriittisellä hetkellä voi pahimmillaan aiheuttaa useiden tuntien tai vuorokauden viivästyksen jakeluketjussa.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia erään lajittelukeskuksen tärkeimmän tekijän, pakettilajittelukoneen eri osien tärkeyttä tuotannolle. Jotta vikaantumisesta aiheutuvat seuraukset voidaan tunnistaa, täytyy järjestelmä tuntea kattavasti. Järjestelmästä luodaan toimintavarmuuskeskeisen kunnossapidon (Reliability Centred Maintenance, RCM) analysoinnin keinoin virtuaalinen malli, jonka avulla voidaan tutkia eri järjestelmän osien vaikutusta toisiinsa. Lajittelukone koostuu useasta eri osajärjestelmästä, joiden vikaantumisilla on hyvin erilaisia vaikutuksia tuotantoon. Toisen osajärjestelmän yksittäinen vikaantuminen ei vaikuta juurikaan koko lajittelukoneen käytettävyyteen tai luotettavuuteen, kun taas joidenkin osajärjestelmien käyttövarmuuden varmistaminen on elintärkeää koneen toiminnan kannalta. Tarkastelun kohteena on äskettäin käyttöön otettu lajittelukone, jonka vikaantumisesta ja ennakkohuoltojen vaikutuksesta on vielä suhteellisen vähän kokemusta. Lajittelukoneelle on myös määritetty erittäin kattava ennakkohuolto-ohjelma, jonka toteuttaminen määritetyllä tasolla aiheuttaa suuria haasteita tuotannollisten tavoitteiden toteutumiselle. Työn tarkoituksena on myös tutkia osajärjestelmille määritettyjen ennakkohuoltojen määrän suhdetta kyseisten osajärjestelmien tärkeydelle tuotannon kannalta.

Kun järjestelmän toiminta ja käyttäytyminen tunnetaan tarkasti, voidaan tunnistaa myös järjestelmän toiminnan kannalta haitallisimmat viat. Herkkyysanalyysin avulla on mah-

dollista selvittää järjestelmän kriittisimmät osajärjestelmät ja edelleen tunnistaa eniten käytettävyyteen ja luotettavuuteen vaikuttavat viat.

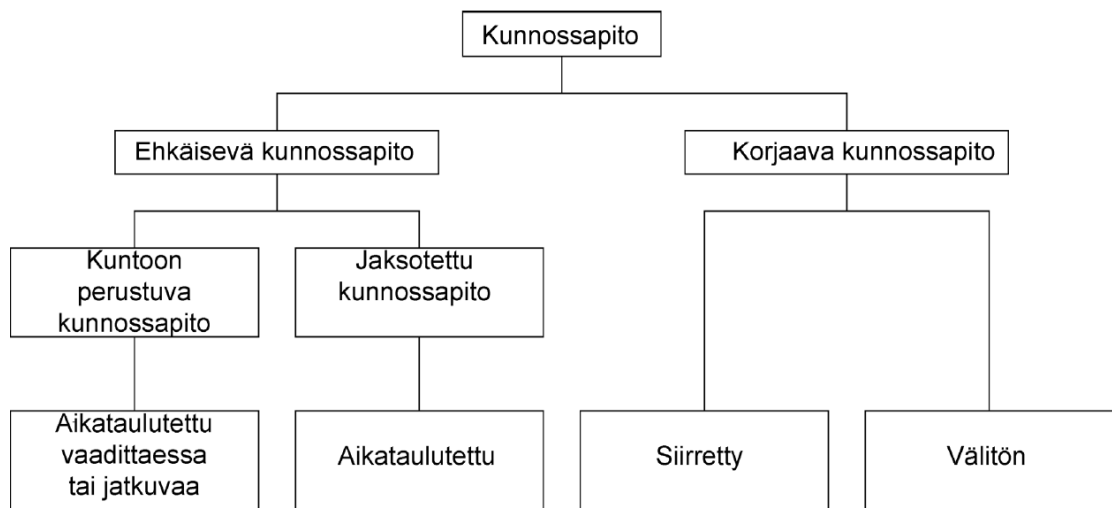
2. KUNNOSSAPIDON KÄSITTEET

Kunnossapito on merkittävä tekijä hyödykkeitä tuottavan järjestelmän käyttövarmuuden varmistamisessa. Erityisesti kunnossapitosopimuksia solmittaessa tarvitaan yksiselitteisiä, tarkoin määriteltyjä käsitteitä. Kaikki kunnossapidossa käytettävät termit tulee olla tarkoin määriteltyjä ja selvillä kaikille kunnossapidon ja tuotannon keskeisille osapuolille, jotta kunnossapidon kanssa tekemisissä olevilla olisi täydellisempi käsitys käytetystä kunnossapidon käsitteestä. [1]

2.1 Kunnossapidon lajit

Kunnossapito tarkoittaa yleisesti erilaisten asioiden, kuten esimerkiksi erilaisten prosessien, rakennusten, teiden, tietoverkoston tai viemäriverkoston pitämistä toimintakuntoisina [2]. Tässä työssä keskitytään teolliseen kunnossapitoon ja siihen liittyviin toimintoihin.

Kunnossapito luokitellaan tyypillisesti kahteen osa-alueeseen: suunniteltuihin huoltoihin ja vikaantumisista aiheutuviin toimenpiteisiin. SFS-EN 13306 standardin mukaisesti kunnossapito voidaan toiminnoiltaan jakaa kahteen osa-alueeseen: ehkäisevään (Preventive maintenance) ja korjaavaan kunnossapitoon (Corrective maintenance). Kunnossapidon eri osa-alueet ja niihin kuuluvat alemmat tasot on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 2.1 SFS-EN 13306 mukaiset kunnossapitolajit [1].

Korjaavan kunnossapidon keinoin vikaantunut osa palautetaan käyttökuntoon, eli korjataan [2]. Korjaava kunnossapito voi olla joko häiriökorjausta tai kunnostusta. Ehkäisevä kunnossapito on jaettu kuvan 2.1 mukaisesti edelleen kahteen osa-alueeseen: jaksotettuun ja kuntoon perustuvaan kunnossapitoon. Jaksotettu kunnossapito tarkoittaa ehkäisevää kunnossapitoa, joka tehdään ennalta määrättyjen aikajaksojen tai työjaksojen lukumäärän mukaan, mutta ilman edeltävää toimintakunnon tutkimusta [1]. Kuntoon perustuva kunnossapito sisältää tarkastuksia, kunnonvalvontaa ja testausta, tulosten analysointia ja näiden ohjaamat kunnossapitotoimet [1].

Kunnossapito on ajansaatossa kehittynyt yhä enenevässä määrin pois korjaavasta kunnossapidosta. Puhuttaessa ensimmäisen sukupolven kunnossapidosta, tarkoitetaan ensimmäisten koneiden rakennuksesta toiseen maailmansotaan asti kestänyttä ajanjaksoa, jolloin hyvin yksinkertaisia koneita huollettiin vikaantumisien seurauksena. Ennakoivat kunnossapitotoimet tarkoittivat tuolloin lähinnä putsauksia ja rasvauksia. Tekniikan kehittyessä kunnossapidosta tuli yhä systemaattisempaa ja tarkemmin johdettua, mutta vasta 1970 luvulla avaruusvarustelukilpailusta teollisiksi sovelluksiksi kehittyneet innovaatiot johtivat alan tarkempaan tutkimiseen. Yhä monimutkaisemmat koneet ja tarkemmin suunniteltu tehokas tuotanto ei enää sallinut jatkuvia pysähdyksiä ja kunnossapito alkoi kehittyä yhä enemmän ehkäisevän kunnossapidon suuntaan. [2]

Toimintavarmuuskeskeinen kunnossapito (*Reliability Centered Maintenance, RCM*) on alun perin siviili-ilmailun tarpeisiin 1960-luvun lopulla kehitetty menetelmä. RCM:n tavoitteena on luoda ehkäisevä kunnossapito-ohjelma, jolla saavutetaan tehokkaasti laitteistolta ja rakenteilta vaaditut turvallisuus- ja käytettävyystavoitteet. RCM-analysoinnin perusvaiheet ovat seuraavat:

- määritellään järjestelmän ja/tai osajärjestelmän rajat
- määritellään kunkin järjestelmän ja osajärjestelmän toiminnot
- tunnistetaan toiminnallisesti merkittävät kohteet
- tunnistetaan toiminnallisten vikaantumisten syyt
- ennustetaan vikaantumisten vaikutukset ja niiden todennäköisyys
- tunnistetaan soveltuvat ja tehokkaat kunnossapitotehtävät, jotka muodostavat alkuperäisen kunnossapito-ohjelman. [3]

2.2 Kunnossapitokustannukset

Kunnossapidolla on erittäin suuri merkitys kansantalouteen. Teollisuuden lisäksi aktiivista kunnossapitoa vaativat niin tieverkko, rakennukset kuin sähköverkostokin. Vaikka kunnossapitoa ajatellaan usein pakollisena kustannuksena, pitkällä tähtäimellä oikein hoidetulla kunnossapidolla saadaan merkittävästi jatkettua huollettavien laitteiden ja rakennusten käyttöikä, jolloin kokonaiskustannukset jäävät merkittävästi pienemmiksi.

Kunnossapito on tärkeä osa tuotantoa, myös taloudellisesti. Tuotantolaitoksen – kuten myös kunnossapidon – tärkein tavoite on tuottaa hyödykkeitä mahdollisimman tehokkaasti. Liiketoiminnan tuottavuus syntyy tuottojen ja kustannusten erotuksena. Tavoitteena on pitää kunnossapidon aiheuttamat kustannukset mahdollisimman alhaisella tasolla, mutta kuitenkin niin, että haluttu varmuus tuotannossa saadaan säilytettyä.

Kunnossapidosta aiheutuu suoraan sekä välittömiä, että välillisiä kustannuksia. Välittömät kustannukset tarkoittavat suoraan liiketoiminnan harjoittamisesta aiheutuvia kustannuksia, kuten:

- Kunnossapitohenkilöstön kustannukset, kuten palkat
- varaosat ja muut materiaalit
- hankinta ja varastointikustannukset, sekä
- kunnossapidon yleiskustannukset, kuten hallinnointi ja kiinteistökulut. [2]

Tyypillisessä tilanteessa on määritetty kunnossapito-organisaation henkilöstömäärä sekä aika, jolloin kunnossapitohenkilöstöä on paikalla. Tämä ei välttämättä kata kokonaan tuotannollista aikaa. Tällaisissa tilanteissa on havaittu, että kunnossapidon läsnäolosta aiheutuvat kustannukset ovat suuremmat, kuin tuotannon keskeytymisen todennäköisyys ja siitä aiheutuvat kustannukset. Kunnossapito henkilöstön ollessa paikalla normaalin työajan puitteissa tehtävistä huoltotoimenpiteistä ei aiheudu lisäkustannuksia henkilöstökulujen osalta. Jotkin suuremmat, yleisesti puolivuotis- ja kerran vuodessa tehtävät huollot, vaativat tuotannolta niin pitkää seisakkaa, että niitä ei ole mahdollista tehdä normaalien työaikojen puitteissa. Huoltoihin tarvitaan mahdollisesti tavallista enemmän resursseja tai ne on suunniteltava pidempien tuotantokatkojen ajalle, esimerkiksi viikonloppuihin tai pyhäpäivien ajankohtiin. Perinteisesti paperitehtaiden ja voimalaitosten suuria huoltoseisokkeja on järjestetty Suomessa juhannuksen ja joulun pyhien aikaan. Viime vuosina järjestelyjä on kuitenkin yleisesti muutettu juhlapyhinä tehtävien töiden erittäin suurien kustannuksien vuoksi.

Välillisillä kustannuksilla tarkoitetaan kunnossapidon toimista aiheutuvia kustannuksia, joita on tyypillisesti vaikea kohdistaa suoraan eri kunnossapidon toiminnoille. Tällaisia kustannuksia ovat muun muassa:

- Epäkäytettävyyuskustannukset eli toteutumaton tuotanto
- hylky, eli tuotannon huono laatu
- tuotannonsuunnittelun lisäkustannukset, sekä
- epäsuhtaiset varastot. [2]

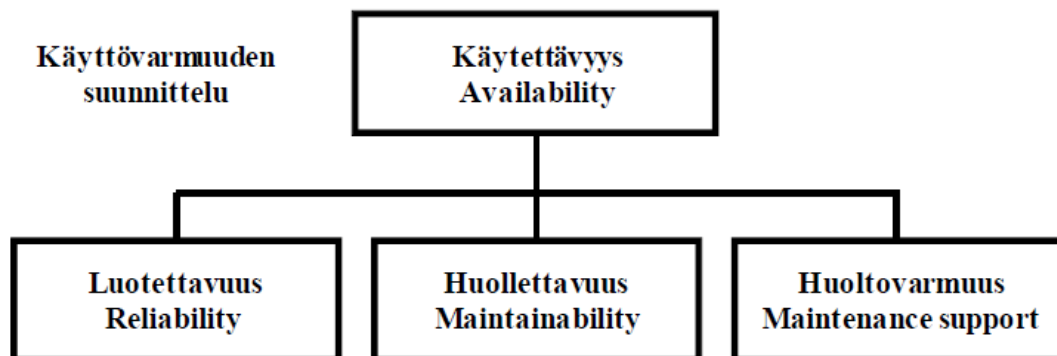
Välilliset kustannukset ovat suurempia kuin välittömät. Esimerkiksi paperikoneen viikaantuessa tukkeutuneen suuttimen hinta ja korjauksen suorittavan työntekijän henkilöstökulut voivat olla muutamia satoja euroja, mutta paperikoneen lyhytaikainenkin pysähtyminen voi aiheuttaa kymmenien tuhansien eurojen välilliset kustannukset.

Ehkäisevän kunnossapidon tavoitteena on aikataulutettujen tai käyttöaikoihin perustuvi- en ennakkohuoltojen ja kohteen aktiivisen kunnonvalvonnan avulla pitää yllä haluttua käytettävyyttä. Kohteen liiallinen huoltaminen aiheuttaa kuitenkin merkittäviä kustan- nuksia ja aiheuttaa luotettavuuden alenemista. Huoltotoimenpiteen suorittaminen sisäl- tää aina asennusvirheen mahdollisuuden. Ylimoitettu kunnossapito-organisaatio on merkittävä kustannuserä ja yhä toimintakykyisten osien vaihtaminen uusiin kasvattaa varaosien aiheuttamia kustannuksia.

2.3 Käyttövarmuuden suunnittelu

Käyttövarmuuden suunnittelu riippuu tarkasteltavan järjestelmän luonteesta. Järjestel- män osien tyypit voidaan jakaa kahteen pääryhmään: korjattavat järjestelmät ja ei- korjattavat perusosat. Korjattavat laitteet koostuvat tyypillisesti useista osakokonaisuuksista. Tällaisia ovat esimerkiksi lentokoneet ja kuljettimet. Ei-korjattavilla laitteilla eli perusosilla taas tarkoitetaan esimerkiksi laakereita, jotka vikaantumisen seurauksena vaihdetaan uuteen. Laitteen määrittäminen joko korjattavaksi tai ei-korjattavaksi riippuu kui- tenkin useasta tekijästä, kuten laitteen ominaisuuksista, käyttötarkoituksesta ja käyttä- jästä [4]. Samanlainen vaihdelaatikko voidaan toisaalla määrittää käytettäväksi uudel- leen ja toisaalla automaattisesti vaihtaa uuteen.

Keskeisimpiä kunnossapidon osa-alueita on laitteiston käyttövarmuus ja sen suunnittelu. Kuvassa 2.2 on esitelty käyttövarmuuden suunnitteluun liittyvien käsitteiden suhdetta toisiinsa.



Kuva 2.2 Käyttövarmuuden suunnittelu [4].

Käyttövarmuus tarkoittaa tarkasteltavan kohteen kykyä toimia vaadittaessa vaaditulla tavalla [1]. Käyttövarmuus sisältääkin kuvan 2.2 mukaisesti *käytettävyyden* ja siihen vaikuttavat osatekijät.

Käytettävyydellä tarkoitetaan todennäköisyyttä, että tarkasteltava laite toimii hetkellä t , kun tarkastelu tapahtuu hetkellä $t=0$. Kyseinen laite on saattanut kuitenkin vikaantua ja olla korjattavana ennen määriteltyä hetkeä t . Käytettävyyden käsitettä sovelletaankin

yleensä korjattaviin laitteisiin [4]. Käytettävyys muodostuu järjestelmän *luotettavuudesta*, *huollettavuudesta* ja *huoltovarmuudesta*.

Luotettavuudella tarkoitetaan todennäköisyyttä, että tarkasteltava laite ei ole vikaantunut hetkeen t mennessä, kun tarkastelu tapahtuu hetkellä $t=0$. Luotettavuus eroaa käytettävydestä siinä, että tarkasteltava laite ei saa vikaantua kertaakaan tarkasteluvälillä $[0,t]$. Luotettavuus käsitettä käytetään yleensä ei-korjattavien perusosien kanssa. Luotettavuudesta saatetaan usein puhua myös käsitteellä toimintavarmuus. [4].

Huollettavuus on todennäköisyys, että tarkasteltava laite on huollettavissa vaadittuun kuntoon ennalta määriteltyjen menetelmien ja resurssien mukaisesti [4].

Huoltovarmuus on kunnossapito-organisaation kyky ylläpitää laitteille ja toiminnoille asetettu huollettavuus ja luotettavuus [4].

2.4 Kunnossapitostrategia

Kunnossapitostrategia pitää sisällään kaikki ne toimenpiteet ja tehtävät, jotka vaaditaan kohteen halutun käytettävyuden saavuttamiseksi ja ylläpitämiseksi. Kunnossapitostrategia käsittää siten kaikkien korjattavien järjestelmien ja perusosien huoltotarpeen määrittelyn lisäksi myös osien vaihdon suunnittelun ja organisoinnin sekä luotettavuuden seurantamenetelmien määrittelyn. [4]

Kunnossapidon johdon tehtävänä on määrittää sen oma kunnossapitostrategia seuraavien tavoitteiden mukaisesti:

- varmistaa toiminnon vaadittu käytettävyys optimaalisilla kustannuksilla
- huomioida kohteeseen liittyvät turvallisuus- ja muut pakolliset vaatimukset
- huomioida mahdolliset ympäristövaikutukset
- säilyttää kohteen kunto ja/tai tuotteen palvelun laatu tarvittaessa huomioiden kustannukset. [1]

Edellä esitetyn SFS-EN 13306 standardin määrittelyn mukaisesti kunnossapitostrategian tärkeimpänä tavoitteena on määrittää kunnossapitostrategia niin, että sillä kyetään saavuttamaan riittävä käytettävyys mahdollisimman pienin kustannuksin. Kustannuksia kasvattavat muun muassa uusittavien osien hinta, työvoimakustannukset sekä korjauksesta aiheutuvat katkokset tuotannossa. Onkin löydettävä riittävä taso, jolla vaadittu käytettävyys saavutetaan. Käytettävyuden riittävä taso on usein määritelty tuotantoa suunniteltaessa. Täydelliseen 100 prosenttiseen käytettyyteen on käytännössä mahdollonta päästä tarkasteltaessa kokonaisia järjestelmiä. Satunnaiset pienet vikaantumiset järjestelmässä tulee sallia, kunhan käytettävyys säilyy suunnitellun tason yläpuolella.

2.5 Jaksotettu kunnossapito

Jaksotetulla kunnossapidolla (Predetermined Maintenance) tarkoitetaan kunnossapitoa, jossa tehtävien jaksottaminen perustuu aikatauluun tai työjaksojen lukumäärään [2]. Ennakkohuolto-ohjelmalla tarkoitetaan laitteille ennalta määritettyjä huoltoja ja tarkastuksia. Huolloille ja tarkastuksille on myös määritetty aikavälit, jolloin ne tulee suorittaa. Aikaväli voi olla suoraan kalenteriin perustuva, esimerkiksi kerran kuukaudessa tai koneen käyttöön perustuva, jolloin jokin huoltotoimenpide suoritetaan 10 000 tuotantotunnin välein.

Suomen Standardoimisliitto SFS määrittää SFS-IEC 60300-3-11 standardissa kunnossapito-ohjelman koostuva kahdentyyppisistä toimenpiteistä:

- ehkäisevän kunnossapidon tehtäväryhmä
- ei-suunniteltujen kunnossapitotehtävien ryhmä.

Ehkäisevän kunnossapidon tehtäväryhmällä tarkoitetaan toimenpiteitä, jotka suoritetaan määrättyin aikavälein tai kuntoon perustuen. Näitä toimenpiteitä ovat

1. voitelu/huolto
2. käytönaikainen/visuaalinen/automaattinen tarkastus
3. tarkastus/toiminnallinen testi/kunnonvalvonta
4. kunnostaminen
5. käytöstä poistaminen

ja niiden tarkoituksena on tunnistaa ja estää huonontuminen määritettyjen ominaisturvallisuuden ja -toimintavarmuus tasojen alapuolelle [5].

Ei-suunniteltujen kunnossapitotehtävien ryhmä käsittää toimenpiteet, jotka ovat seurausta:

1. löydöksistä määräaikaishuolloista
2. vikaraporteista tai uhkaavan vaurion oireista.

Näiden toimenpiteiden tarkoitus on palauttaa tai ylläpitää laite siinä kunnossa, että se täyttää hyväksyttävästi vaaditut toiminnot. Tavoitteena on tehdä juuri ne toimenpiteet, joilla kyseinen toimintataso saadaan ylläpidettyä. Ylimääräiset huoltotoimenpiteet nostavat kunnossapitokustannuksia ilman vastaavaa hyötyä toimintavarmuudessa, sekä pahimmillaan huonontavat toimintavarmuutta johtuen kunnossapitäjän aiheuttamien vikojen kasvaneesta vaikutuksesta. [5]

2.6 Käytettävyyden aikakäsitteet

Käytettävyys $A(t)$ ilmaisee järjestelmän tai yksittäisen laitteen todennäköisyyttä olla käytettävissä hetkellä t . *Epäkäytettävyys* $Q(t)$ tarkoittaa todennäköisyyttä, että laite on vikaantunut hetkellä t . Tarkasteltava järjestelmä tai laite on aina joko ehjä tai vikaantunut, joten

$$A(t) + Q(t) = 1. \quad [4] (1)$$

Tarkasteltaessa tiettyä ajanjaksoa T , keskimääräinen käytettävyys A voidaan esittää lausekkeella

$$A = \frac{N}{N+Q} = \left(1 + \frac{Q}{N}\right)^{-1}, \quad (2)$$

jossa N on normaalitilojen kesto aikajaksolla T ja Q on vikatilojen kesto aikavälillä T . Tällöin tiedetään myös, että

$$T = N + Q. \quad (3)$$

Toimintavarmuutta kuvataan termillä *MTBF (Mean Time Between Failure)*, joka tarkoittaa *vikaantumisvälin sisältämien käyntiaikojen keskiarvoa* [6]. *MTBF* lasketaan kaavalla

$$MTBF = \frac{1}{n} \sum_i X_i, \quad [6] (4)$$

jossa $\sum_i X_i$ on edellisen vian alkamisesta seuraavan vian alkamiseen olevien aikavälien summa, joka on jaettu niiden määrällä n .

Vikaintensiteetillä $w(t)$ tarkoitetaan järjestelmän vikaantumistodennäköisyyttä aikayksikköä kohti, edellyttäen että se oli uudenveroinen hetkellä $t=0$ [4]. Mikäli korjattavassa järjestelmässä ei voi esiintyä samanaikaisia vikoja tarkasteltavalla aikavälillä, on järjestelmän vikaintensiteetti sama kuin sen *vikataajuus* *ROCOF (Rate of Occurrence of Failures)*. Tällöin lyhyellä aikavälillä $t, t+\Delta t$ vikoja voi olla vain 0 tai 1. Vioittumisen todennäköisyyttä kuvaavassa intensiteettifunktiossa

$$w(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(N(t, t+\Delta t) \geq 1)}{\Delta t} \quad [4] (5)$$

P tarkoittaa todennäköisyyttä, $N(t, t+\Delta t)$ on vikojen lukumäärä aikavälillä $t, t+\Delta t$ ja Δt lyhyttä aikaväliä.

Vikaantumisvälin sisältämien käyntiaikojen keskiarvo *MTBF* saadaan laskettua kaavalla

$$MTBF = MTBR - MTTR, \quad [4] (6)$$

jossa *MTBR (Mean Time Between Repair)* tarkoittaa keskimääräistä aikaa korjausten välillä ja *MTTR (Mean Time To Repair)* tarkoittaa SFS 13306 standardin määrittelyn

mukaisesti *keskimääräistä toimintakyvyn palauttamiseen kuluvaan aikaan* [4][5]. MTTR saadaan laskettua kaavalla

$$MTTR = \frac{1}{n} \sum_i TTR_i, \quad [4] (7)$$

jossa TTR on ajanjakso viasta korjauksen valmistumiseen.

Satunnaissuure (random variable, stochastic variable) on suure, jonka saamat arvot riippuvat sattumasta. Tällainen voi olla esimerkiksi jonkin laitteen vikaantumisaika. Pelkien mahdollisten arvojen lisäksi on määritettävä, että millä todennäköisyydellä jokin tapahtuma voi sattua. Satunnaissuureita mallinnetaan joko parametrisillä tai ei-parametrisillä jakaumilla, joista jälkimmäiset ovat satunnaiskokeen havaintoja. Ei-parametristen mallien etuna on, ettei niissä tehdä oletuksia satunnaiskokeen tuottamien havaintojen ulkopuolelta. Se voi olla myös haitta, sillä otos ei tällöin ole välttämättä tarpeeksi kattava. Parametriset jakaumat, kuten *Eksponentti-*, *Normaali-* tai *Poissonjakauma* voidaan määritellä pienellä määrällä parametreja. Tiheys- ja kertymäfunktiot kertovat, että minkä arvon satunnaissuure voi saada ja millä todennäköisyydellä. [4]

Luotettavuudella tarkoitetaan todennäköisyyttä, jolla laite voi toimia vikaantumatta jonkin tietyn ajan. Tarkasteltaessa järjestelmää aikavälillä $[0,t]$, olettaen että järjestelmä oli uuden veroinen hetkellä $t=0$, luotettavuutta kuvataan kertymäfunktiolla

$$R(t) = \int_t^\infty f(u) du, \quad [4] (8)$$

jossa $f(u)$ on tarkasteltavien vika-aikojen *tiheysfunktio*. Mikäli vikataajuus tarkasteltavalla ajanjaksolla on vakio, on luotettavuutta kuvaava *kertymäfunktio*

$$R(t) = e^{-\lambda t}. \quad [4] (9)$$

Vastaavasti järjestelmän epäluotettavuus tarkoittaa todennäköisyyttä, että komponentti kokee ensimmäisen vian aikavälillä $[0,t]$, jolloin

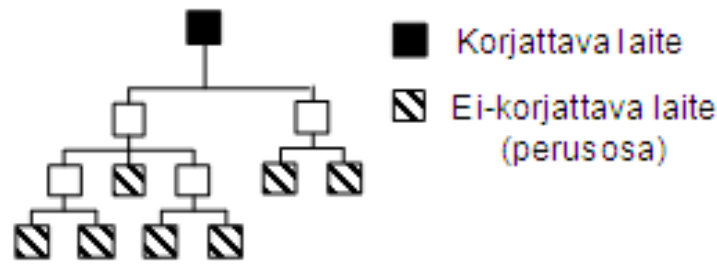
$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad [4] (10)$$

jossa parametri

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}. \quad [4] (11)$$

2.7 Vikapuu

Vikapuu on tutkittavaa järjestelmää kuvaava looginen malli. Vikapuuanalyysi on kehitetty 1960-luvulla järjestelmien turvallisuuden ja toimintavarmuuden parantamiseen. Mallissa TOP-tapahtumaan vaikuttavien tai sitä edistävien tapahtumien on kuvattu *loogisilla porteilla*. Kuvassa 2.3 loogiset portit on kuvattu valkoisilla neliöillä. [4]



Kuva 2.3 Vikapuu [4].

Vikapuun avulla korjattavan laitteen vikaantumistodennäköisyys on mahdollista laskea ei-korjattavien perusosien vikaantumistodennäköisyyksien avulla. Vikapuuta käytetään apuvälineenä käyttövarmuusmallin visualisoinnissa ja sen avulla voidaan helpommin osoittaa järjestelmän vikaantumiseen johtavat perussyyt. Perussyistä voidaan löytää sellaiset tapahtumat, jotka ovat itsessään riittäviä *TOP-tapahtuman* toteutumiselle. Vastaavalla päättelyllä voidaan löytää keinot TOP-tapahtuman estämiseksi. Vikapuun laadinnan onnistumiseksi laatijoiden tulee olla hyvin perillä järjestelmän ominaisuuksista ja käyttäytymisestä eri olosuhteissa [4]. Vikapuussa tapahtumia kuvataan loogisilla portteilla, jotka on esitetty taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1 Loogiset portit [4].

Portti	Suomennos	Merkintä	Selite
OR	tai	$A \cap B$	Lähtötapahtuma toteutuu, jos yksikin tulotapahtuma toteutuu
AND	ja	$A \cup B$	Lähtötapahtuma toteutuu, jos kaikki tulotapahtumat sattuvat samanaikaisesti
XOR	poissulkeva	$A \oplus B$	Lähtötapahtuma toteutuu, jos vain yksi tulotapahtumista toteutuu
K/N	äänestys	A / B	Lähtötapahtuma toteutuu, jos vähintään K verran N tulotapahtumasta toteutuu.
NOT	negaatio	$\neg A$	Tapahtuman negaatio.

Ajateltaessa esimerkkinä tuotantolinjaa, joka koostuu kahdesta tai useammasta peräkkäisestä kuljettimesta, koko tuotantolinjan pysähtymiseen riittää yhdenkin kuljettimen vikaantuminen. Tällöin tuotantolinjan vikapuumallinnuksessa käytetään *OR* operaattoria. Mikäli tuotantolinja koostuu kahdesta tai useammasta rinnakkaisesta identtisestä kuljettimesta ja vain yhden kuljettimen toiminta riittää, TOP-tapahtuma toteutuu vain kaikkien kuljettimien vikaantuessa. Tällöin kyseessä on *AND* operaattori. Toisaalta kuvitteellisen tuotantolinjan vaatiessa useamman linjan yhtäaikaista toimintaa tapahtumia kuvataan K/N operaattorilla, jolloin K kuljettimen vikaantuminen N määrästä kuljettimia aiheuttaa TOP-tapahtuman.

TOP-tapahtumaan johtavat tapahtumat aiheutuvat aina yhdestä tai useammasta *juurisyyistä*. Juurisyyllä tarkoitetaan ei-korjattavan osan vikaantumisen aiheuttavaa tapahtumaa tai tapahtumaketjua [4]. Juurisyyitä tapahtumalle voi olla myös useita; laakerin

rikkoutuminen on voinut aiheutua vierintäpinnoille joutuneista vieraista partikkeleista tai esimerkiksi liian suuren kuormituksen aiheuttamista murtumista laakerin vierintäpinnoissa jolloin irronneet partikkelit kuluttavat pintoja entisestään. Tapahtuman perimmäisen syyn löytäminen vaatii suurta perehtymistä kyseiseen vikaan ja asiantunte-
musta kyseisistä komponenteista tai laitteistoista.

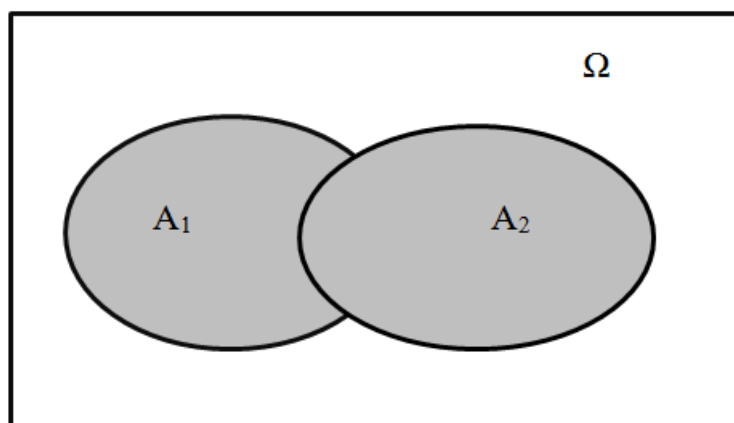
2.8 Tapahtumien todennäköisyydet

Todennäköisyyslaskennan tavoitteena on luoda matemaattisia malleja satunnaisuusluon-
toisten ilmiöiden mallintamiseksi. Pyrkimyksenä on luoda malli, jonka avulla on mah-
dollista ennustaa kuvattavan ilmiön tai tapahtumasarjan lopputulos mahdollisimman
realistisesti. Ehtona on, että kuvattava ilmiö on toistettavissa ja tapahtumat ovat toisis-
taan riippumattomia [7]. Tarkasteltava tapahtuma on usein riippuvainen monesta erilli-
sestä tapahtumasta. Tarkasteltaessa esimerkiksi jonkin laitteen vikaantumista, yhden
yksittäisen komponentin vikaantuminen ei välttämättä aiheuta vielä koko laitteen vi-
kaantumista, mutta riittävän monen rinnakkaisen komponentin hajoaminen voi aiheuttaa
suurenkin laitekokonaisuuden vikaantumisen.

Yksittäisen kokeen tulosta sanotaan alkeistapaukseksi. Kaikkien mahdollisten alkeista-
pauksien joukko on *otosavaruus* Ω . Tapahtuma A on otosavaruuden osajoukko $A \in \Omega$.
Useissa tapauksissa haluttu tapahtuma esitetään eri tapahtumien lausekkeena [7]. Tapaht-
tumien suhdetta toisiinsa voidaan kuvata graafisesti ns. *Venn-diagrammeilla*. Käytetään
esimerkkeinä toisistaan riippumattomia tapahtumia A_1 ja A_2 .

- Tapahtumien A_1 ja A_2 yhdiste, joka tarkoittaa että A_1 tai A_2 *realisoituu*:

$$A_1 \cup A_2 = \{x \in \Omega: x \in A_1 \text{ tai } x \in A_2\} \quad [7] \quad (12)$$



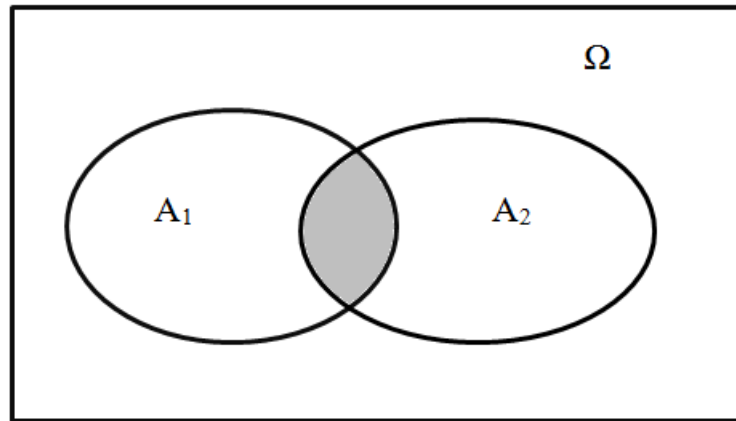
Kuva 2.4 A_1 tai A_2 *realisoituu*.

Kuvassa 2.4 on esitetty graafisesti Venn-diagrammilla tapaus, jossa alkeistapaus voi kuulua joko osajoukkoon A_1 , A_2 tai molempiin. Tällainen tapaus on esimerkiksi ”kortti

on musta tai ässä”, jolloin A_1 tarkoittaa mustia kortteja, A_2 ässiä ja molempien osajoukkojen toteutuminen mustaa ässää.

- Tapahtumien A_1 ja A_2 leikkaus, joka tarkoittaa että A_1 ja A_2 *realisoituu*:

$$A_1 \cap A_2 = \{x \in \Omega: x \in A_1, \in A_2\} \quad [7] (13)$$



Kuva 2.5 A_1 ja A_2 *realisoituu*.

Kuvan 2.5 tilanteessa alkeistapaus kuuluu molempiin osajoukkoihin A_1 ja A_2 . Tapaus on esimerkiksi tilanne, jossa ”kortti on musta, sekä ässä”.

Kunnossapidollisesta näkökulmasta on harvoin kiinnostavaa tietää erillisten yksittäisten komponenttien vikaantumistodennäköisyyksiä. Jotta voidaan määrittää korjattavan laitteen vikaantumisen todennäköisyys, on kuitenkin ensin tiedettävä tarkasteltavan laitteen vikaantumiseen johtavat tapahtuma ja niiden todennäköisyydet. Mikäli tiedetään vikaan perustapahtumien todennäköisyydet, voidaan edellä mainituista yhtälöistä johtaa seuraavat yleiset yhtälöt kolmen tai useamman perustapahtuman JA- ja TAI-portille. JA-portin yhtälö i -määrälle perustapahtumia on reaaliluku algebralla ilmaistuna

$$JA(P(X_i)) = \prod_{i=0}^{X_i} P(X_i), \quad [4] (14)$$

jossa $P(X_i)$ on perustapahtuman X_i todennäköisyys. Vastaavasti TAI-portin yhtälö on

$$TAI(P(X_i)) = 1 - \prod_{i=0}^{X_i} (1 - P(X_i)). \quad [4] (15)$$

Edellä mainittuja kaavoja (15) ja (16) käytettäessä on kuitenkin huomioitava mahdolliset ongelmat, joissa jokin tilanne ei oikeasti ole mahdollinen tai saattaa esiintyä saadussa yhtälössä useamman kerran. Siksi saatu tulos on aina tarkastettava Boolean sievennyksellä.

2.9 Herkkyysanalyysi

Järjestelmästä luodun vikapuun ja kappaleessa 2.8 käsiteltyjen menetelmien avulla voidaan määrittää todennäköisyydet järjestelmän eri osien vikaantumiselle, eli riskin toteutumiselle. Haluttaessa selvittää eri riskien osuutta TOP-tapahtuman toteutumiselle tai yksittäisten riskien eliminoimisen vaikututusta TOP-tapahtuman toteutumisen todennäköisyyteen, käytetään *herkkyysanalyysia*. Herkkyysanalyysin suorittamiseen on useita menetelmiä, joista yksi on *Risk Reduction Worth* (RRW). Menetelmän ideana on tarkastella, että kuinka suuri vaikutus yksittäisen riskin eliminoimisella on koko laitteen toimintaan. RRW:n yksikkönä toimii tärkeysmitta I^{RRW} , joka määritellään seuraavasti:

$$I^{RRW}(i|t) = \frac{1-h(p(t))}{1-h(I_i,p(t))}. \quad [8] \quad (16)$$

Kaavassa (17) tärkeysmitta $I^{RRW}(i|t)$ on oikean järjestelmän luotettavuuden $h(p(t))$ ja kuvitteellisen järjestelmän luotettavuuden $h(I_i,p(t))$ suhdeluku. Kuvitteellisessa järjestelmässä komponentti i on korvattu ”täydellisellä” komponentilla, jonka luotettavuus $p_i(t) \equiv 1$.

Kaavasta (10) tiedetään, että epäluotettavuus on luotettavuuden vastaluku, jolloin I^{RRW} voidaan ilmaista muodossa

$$I^{RRW}(i|t) = \frac{h_R(p(t))}{h_R(0_i,p(t))}, \quad (17)$$

jossa osoittajassa $h_R(p(t))$ on koko järjestelmän epäluotettavuus ja nimittäjässä $h_R(0_i,p(t))$ on järjestelmän epäluotettavuus tarkasteltavaa komponenttia i lukuun ottamatta.

Todellisissa sovellutuksissa komponentin korvaaminen täydellisellä on usein mahdotonta, joskin esimerkiksi operaattorin tekemien inhimillisten erehdysten aiheuttama riski voidaan joissain tapauksissa kokonaan eliminoida estämällä ihmisen mahdollisuus vaikuttaa prosessin toimintaan. Toisaalta automaattisen järjestelmän pettämisellekin on olemassa jokin todennäköisyys. Edellä mainitun kaltaisten muutoksien takia järjestelmän keskinäisiä vaikutussuhteita ja matemaattista mallia on kuitenkin pohdittava uudelleen.

3. ANALYYTTINEN HIEARKIAPROSESSI

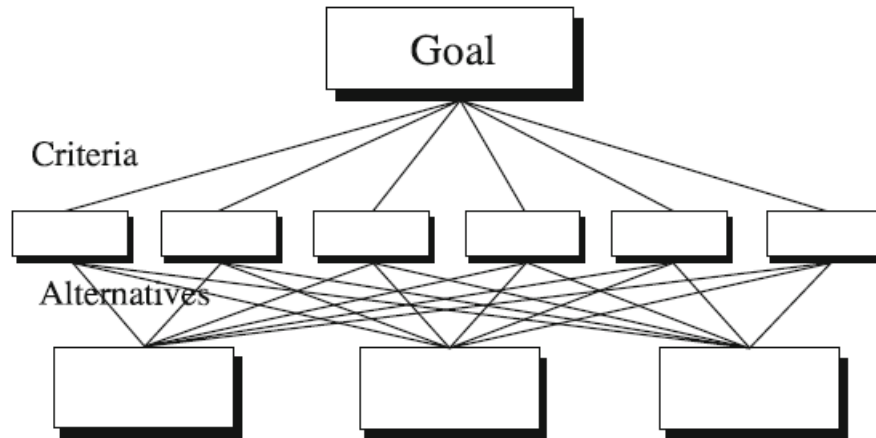
Kykymme mallintaa monimutkaisia järjestelmiä tai ongelmia on rajallinen. Ongelman sisältäessä useita mitattavia, kuten taloudellisia, fysikaalisia tai aikaan liittyviä ominaisuuksia, tai vaikeasti mitattavissa olevia asioita, kuten ihmisten käyttäytymistä, on tyyppillistä, että ongelmaa pyritään yksinkertaistamaan ratkaisun helpottamiseksi. Tällöin on vaarana, että koko ongelman määrittely ja siihen saatava ratkaisu vääristyvät. Ollakseen realistinen, määrittelemämme mallin tulee sisältää kaikki siihen liittyvät konkreettiset ja kvantitatiiviset tekijät [9]. Analyyttinen hierarkiaproessi (Analytic Hierarchy Process, AHP) on kehitetty edellä mainittujen kaltaisten monimutkaisten tilanteiden ratkaisuun.

On olemassa lukuisia vaihtoehtoisia menetelmiä erilaisten ilmiöiden mallintamiseen ja vertaamiseen. AHP menetelmän etuna on, että sillä voidaan mallintaa ilmiöitä, joiden osatekijöitä ei voida suoraan mitata jollain tietyllä suurella [9]. Tutkiessa esimerkiksi ostoskeskuksessa tarvittavien palveluiden tarpeellisuutta, ei ole olemassa tiettyä mittaussikköä, jolla voidaan suoraan vertailla vartijoiden ja siistijöiden tärkeyttä keskenään. Menetelmänä AHP soveltuu täten hyvin myös tuotantolaitoksen eri osien kriittisyyden tarkasteluun tilanteessa, jossa tarkkaa mittausdataa eri osuuksien vikaantumisista ei ole saatavilla. Tässä työssä käsiteltävä lajittelukone on juuri otettu käyttöön, eikä kaikista osatekijöistä ole saatavilla riittävästi tietoa.

3.1 AHP-menetelmän teoria

Kun tutkitaan ilmiötä tarpeeksi tarkasti, yksiköiden ja etenkin niiden välisten yhteyksien määrä kasvaa niin suureksi, että sitä on käytännössä mahdotonta hallinnoida järkevästi ilman siihen soveltuvia menetelmiä. Analyyttinen hierarkiamalli mahdollistaa monimutkaisen ilmiön jakamisen osiin, jolloin suuren ongelman ratkaisu pienten yksittäisten ilmiöiden tai ongelmien ratkaisun avulla on mahdollista. Yksittäisiä ilmiöitä tai ongelmia verrataan keskenään hierarkiarakenteen eri tasoilla.

Analyyttisen hierarkiaproessin yksinkertaisimmassa mallissa, kolmitasoisessa hierarkiassa esiintyy jo huomattavan monia vaihtoehtoja, kuten kuvasta 3.1 voidaan huomata.



Kuva 3.1 Kolmitasoinen hierarkiamalli [10].

Kuvassa 3.1 hierarkian ylimmällä tasolla on esitetty tarkastelun tavoite johon pyritään. Alimmalla rivillä on esitetty vaihtoehdot tavoitteeseen pääsemiseksi ja keskimmaisella rivillä kriteerit, joiden perusteella vaihtoehtoja verrataan keskenään [10]. Maaliksi voidaan määrittää esimerkiksi omakotitalon osto, jolloin kriteereinä voivat toimia sijainti, koko, ikä ja hinta. Kriteerien tärkeyttä tarkastelijalle voidaan vertailla keskenään omassa AHP matriisissa, jolloin kyseisen vertailun prioriteettivektorista saadaan painoarvokerroimet muiden vertailuiden tuloksille.

Eri vaihtoehtojen vertailu tapahtuu pareittain määrittämällä taulukon 3.1 mukaiset tärkeysasteet homogeenisille vaihtoehdoille. Kyseinen skaala on todettu tehokkaaksi vertailutavaksi paitsi käytännön kokemuksen, myös teoreettisen tutkimuksen perusteella [10].

Taulukko 3.1. Parivertailun tärkeysasteet [10].

Tärkeysaste	Määritelmä	Selitys
1	Tekijät yhtä tärkeitä	Tekijät vaikuttavat yhtä paljon tavoitteen saavuttamiseen
3	Toinen tekijöistä lievästi tärkeämpi	Kokemus ja arviot viittaavat toisen tekijän suurempaan merkitykseen.
5	Toinen tekijöistä selvästi tärkeämpi	Kokemus ja arviot osoittavat toisen tekijän suhteellisen merkityksen tärkeämmäksi
7	Toinen tekijöistä paljon tärkeämpi	Käytäntö on selvästi osoittanut tekijän tärkeyden ja sen domianssin suhteessa toiseen elementtiin
9	Toinen tekijöistä erittäin paljon tärkeämpi	Kokemus on osoittanut toisen tekijän absoluuttisen tärkeyden verrattaessa toiseen.

Parivertailumatriisin painoarvojen ratkaisuun on olemassa useita likimääräisiä menetelmiä, mutta tarkka tulos saadaan käyttämällä *ominaisarvometelmää*. Vaikka muilla menetelmillä on mahdollista päästä lähelle ominaisarvometelmän antamia tuloksia, voivat pienetkin erot vaikuttaa vaihtoehtojen saamien arvojen suuruuden järjestykseen ja näin johtaa vääriin päätelmiin [10].

Parivertailumatriisissa eri vaihtoehtojen keskinäisen vertailun tulokset kootaan ensin neliömatriisiin $A_{n \times n}$.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{a_1}{a_1} & \frac{a_1}{a_2} & \dots & \frac{a_1}{a_n} \\ \frac{a_2}{a_1} & \frac{a_2}{a_2} & \dots & \frac{a_2}{a_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{a_n}{a_1} & \frac{a_n}{a_2} & \dots & \frac{a_n}{a_n} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

jossa n on parivertailun vaihtoehtojen määrä. Matriisin ensimmäisellä rivillä suoritetaan vaihtoehdon 1 vertailu kaikkien muiden vaihtoehtojen suhteen. Mikäli vaihtoehto 1 on koettu lievästi vaihtoehtoa 2 tärkeämmäksi, kirjataan taulukon 3.1 mukaisesti osamääräksi

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{3}{1} = 3. \quad (19)$$

Vastaavasti lävistäjän vastapuolelle kirjataan luvun 3 käänteisluku $1/3$. Lävistäjän alapuoli muodostuukin yläkolmion vertailulukujen käänteisluvuista. Verrattaessa vaihtoehdon tärkeyttä itsensä kanssa osamäärä on aina 1. Seuraavaksi suoritetaan vertailu vaihtoehdon 2 ja 3 välillä ja vertailua jatketaan, kunnes kaikkia vaihtoehtoja on verrattu toisiinsa.

Voidaan kirjoittaa, että

$$Aw = \lambda_{max}w, \quad (20)$$

jossa λ_{max} on matriisin A suurin ominaisarvo ja vektori $w = (w_1, \dots, w_n)$ on parivertailun ominais- eli *prioriteettivektori* [10]. Yhtälö (21) voidaan kirjoittaa muotoon

$$(A - \lambda_{max})w = 0. \quad (21)$$

Yhtälölle (22) on olemassa ääretön määrä ratkaisuja. Prioriteettivektori normeerataan, jolloin

$$w_1 + w_2 + \dots + w_n = \sum_{i=1}^n w_n = 1. \quad (22)$$

Yhtälöiden (22) ja (23) avulla saadaan määritettyä matriisin A vaihtoehdoille $1 \dots n$ prioriteettivektori, joka kertoo vaihtoehtojen tärkeysjärjestyksen ja keskinäiset painoarvot.

Seuraavaksi määritetään matriisin yhdenmukaisuus, jolla selvitetään suoritettun parivertailun luotettavuus ja johdonmukaisuus. Yhdenmukaisuudella tarkoitetaan matriisin loogista ristiriidattomuutta, *konsistenssia*. Täydellisellä konsistenssilla tarkoitetaan esimerkiksi tapausta, jossa tapaus A on kolme kertaa todennäköisempi kuin B, B on kaksi kertaa todennäköisempi kuin C ja tapaus A on tällöin kuusi kertaa todennäköisempi kuin C. Konsistenssi lasketaan kaavalla

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}, \quad (23)$$

jossa n on matriisin neliömatriisin vaaka- tai pystyalkioiden lukumäärä. Tulos CI jaetaan seuraavaksi *satunnaisindeksillä* RI (*Random Index*), jolloin saadaan tulokseksi konsistenssisuhde, (*Consistency Ratio*, CR)

$$CR = \frac{CI}{RI}. \quad (24)$$

Taulukko 3.2 Satunnaisindeksi (*Random Index*, RI)[9].

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Taulukossa 3.2 esitetty satunnaisindeksi on Oak Ridge National Laboratoryssa kehitetty lukuarvo neliömatriiseille, joiden vaaka- ja pystyrivien määrä ≤ 15 . Luvut on saatu kehittämällä satunnaislukumatriiseja, joiden alkiot saavat satunnaisesti määritettyjä arvoja välillä $1/9, 1/8 \dots 8, 9$ ja lävistäjän vastapuolella on kyseisen luvun vastaluku [9][10]. Satunnaisindeksi RI ottaa huomioon suuremmissa matriiseissa helpommin syntyvät epäjohdonmukaisuudet. Mikäli matriisin konsistenssia mittaava arvo $CR \geq 0,10$, matriisin parivertailu ei ole tarpeeksi johdonmukainen [10]. Tällöin tehty vertailu on tarkistettava ja poistettava parivertailussa tehdyt epäjohdonmukaisuudet.

Mikäli vertailun kohteena olevasta asiasta on saatavilla mitattua dataa, parivertailua ei tarvitse suorittaa. Tällöin vertailun prioriteettivektori muodostetaan normeeraamalla kaikki vektorin alkiot. Normeeraamisella tarkoitetaan kyseisen alkion jakamista kaikkien alkioden summalla. Tällöin normeerattu arvo esittää kyseisen alkion osuutta koko massasta. Seuraavassa taulukossa on esitetty kolmen erityyppisen havainnon A, B ja C normeeraukset.

Taulukko 3.3. Normeerausesimerkki.

Havainto	Kpl määrä	Prioriteettivektori	%-osuus
A	1	0,1	10
B	5	0,5	50
C	4	0,4	40

$n=10$

Kuten taulukosta 3.3 voidaan huomata, normeerattu arvo vastaa kyseisen alkion prosentuaalista osuutta kokonaisotannasta. Esimerkissä havaintojen kokonaismäärä n on 10 kappaletta, jolloin esimerkiksi vaihtoehto C:n normeerattu arvo, eli prioriteettivektorin kolmas alkio on 0,4. Mitatun datan perusteella saatu prioriteettivektori ei tarvitse tarkastelua konsistenssin suhteen ja sitä voidaan käyttää jatkovertailussa samalla tavalla kuin parivertailun perusteella muodostettua prioriteettivektoria.

3.2 Hyöty/kustannusanalyysi

Vertailtaessa vaihtoehtojen paremmuutta, voidaan vaihtoehtojen ominaisuuksia vertailla usein sekä positiivisissa että negatiivisissa asioissa. Vertailtaessa esimerkiksi eri auto-vaihtoehtoja keskenään, voidaan positiivisina, eli hyödyllisinä ominaisuuksina vertailla tehoa, ulkonäköä ja tilavuutta ja negatiivisina eli kustannuksena hintaa, ikää ja polttoaineen kulutusta. Kustannuksien ei tarvitse olla konkreettisesti rahaan liittyviä, vaikka usein näin todellisuudessa onkin.

Hyöty- ja kustannusominaisuuksia tulee tarkastella erikseen, jolloin vertailumatriisien pohjalta voidaan muodostaa vaihtoehtojen hyöty- sekä kustannusvektorit. Vaikka hyötyvektori puoltaisikin selvästi esimerkiksi vaihtoehdon A valitsemista, voi siihen kohdistuvat kustannukset olla niin suuria, että lopullisesti parhaaksi vaihtoehdoksi valikoi-

tuu jokin muu. Vaihtoehtojen hyöty suhteessa kustannuksiin saadaan hyöty/kustannus analyysillä jakamalla hyötyvektori w_b kustannusvektorilla w_c , eli kaavalla

$$w = \frac{w_b}{w_c}. \quad [10] (25)$$

4. LAJITTELUKESKUS

Suomen sisäisessä kappaletavaraliikenteessä suuri osa kuljetuksista tapahtuu maanteitse. Yksityinen henkilö vie lähetyksensä haluamansa kuljetusyrityksen toimipisteeseen, josta lähetykset kuljetetaan kootusti terminaaliin ja edelleen lajittelukeskuksiin, joissa lähetysten varsinainen lajittelu suoritetaan. Tässä työssä käsiteltävässä lajittelukeskuksessa tapahtuva pakettilajittelu voidaan jakaa kahteen osaan, erikoislajitteluun ja normaalien lähetysten lajitteluun. Suurin osa lajittelusta suoritetaan pakettilajittelukoneella, jolla voidaan lajitella perinteisten pakettien lisäksi esimerkiksi muovipusseissa tai kirjekuorissa kuljetettavia lähetyksiä. Pakettilajittelukoneella lajiteltaville lähetyksille on kuitenkin tiettyjä rajoitteita, jonka vuoksi osa lähetyksistä joudutaan lajittelemaan erikoislajittelussa, jossa käsitellään paketit, jotka eivät muotonsa, mittojensa tai painonsa vuoksi sovellu käsiteltäviksi pakettilajittelukoneella, tai ovat erityisen helposti särkyviä. Erikoislajittelussa käsitellään myös paketit, joiden lajittelu ei jostain syystä ole onnistunut pakettilajittelukoneella.

4.1 Tarkasteltavan lajittelukeskuksen tuotanto

Logistiikka-ala on tietotekniikan ja internetin kehityksen seurauksena kohdannut suuria haasteita. Perinteisten kirjelähetysten määrä on supistunut sähköisen viestinnän yleistyessä jopa noin 20 prosenttia 2011 ja 2014 välillä [11]. Samanaikaisesti juuri tietotekniikan kehityksen mahdollistama nettikaupan yleistyminen on kasvattanut verkon kautta tilattavien tuotteiden määrää. Verkosta tilattavat tavarat eivät nykyään ole ainoastaan halpamaissa tuotettuja tuotteita tai hankalasti saatavia erikoistuotteita, vaan myös vaatteita ja muuta kulutustavaraa. Tilaamisen helppous ja suuri vaihtoehtojen määrä on siirtänyt ostosten tekemistä perinteisistä kivijalkakaupoista yhä enenevässä määrin verkkoon. Tavarantoimittajien suuri määrä ja lähetysten kasvava määrä aiheuttavat lähetysten lajittelulle suuria haasteita. Lähetysten kuljetus tapahtuu maassa, merellä ja ilmassa ja varsinainen lajittelu kuljetusverkoston solmupisteissä, suurissa lajittelukeskuksissa.

Lajittelukeskuksen tuotannossa esiintyy suuria säännöllisiä vaihteluita sekä vuorokautisella, viikoittaisella että vuosittaisella tasolla. Päivittäinen vaihtelu on seurausta toimittaja- ja asiakasyritysten ja noutopisteiden aukioloajoista ja fyysisestä etäisyydestä sekä suurien yksittäisten toimittajien, kuten ulkomaanlähetyksiä tuovien laivojen aikataulusta [12].

Tyypillinen asiakasyritys lopettaa tilausten vastaanottamisen iltapäivällä, pakkaa tuotteet ja toimittaa ne lajittelukeskukseen illalla. Suomesta lähetetyt lähetykset saapuvat lajittelukeskukseen ennen kello 19.00:aa ja ensimmäiset pitkän matkan valmiit kuormat

lähtevät seuraavaan kohteeseen kello 21.15 [12]. Tällöin tuotannolla on erittäin lyhyt ajanjakso, jonka aikana tietylle alueelle menevät lähetykset tulee olla lajiteltuna ja lastattuna lähtevään kuormaan. Kriittisimpänä ajanjaksona lajittelukonetta kuormitetaan tyypillisesti erittäin suurella kapasiteetilla, jolloin lyhytkin seisakki tuotannossa voi aiheuttaa suuria viivästyksiä ja vaatia tuotannon uudelleen suunnittelua. Myös aamuvuorossa lajitellaan tyypillisesti suuria määriä lähetyksiä, vaikka iltavuoron kaltaisia selkeitä piikkejä ei olekaan [12].

Vuorokauden aikana lajitellaan tyypillisesti noin 25 000 – 35 000 pakettia. Määrä ei vastaa lajittelukoneen maksimikapasiteettia, mutta lajittelupiikkien ajoittuminen muutamisiin tiettyihin hetkiin vaatii lajittelukoneelta suurta kapasiteettia. Aamu- ja iltavuorossa lajiteltujen lähetysten määrät ovat tyypillisesti 9 000-13 000, kun taas yövuorossa lajittelumäärä on noin 3 500 lähetystä. Lajittelussa on myös selviä toistuvia kuormituspiikkejä viikkotasolla, sillä ihmiset tyypillisesti tilaavat suuria määriä tavaraa viikonloppuisin, jolloin maanantaille kohdistuu kahden ja puolen vuorokauden aikana tilatut tarvikkeet. [12].

Lähialueille jaettavat lähetykset lajitellaan hyvin tarkasti pienillekin postinumeroalueille. Illan ja yön aikana lajitellut lähetykset kuljetetaan joko suoraan määränpäähänsä, tai toiseen lajittelukeskukseen jatkolajittelua varten, jolloin ensimmäinen lajittelu tehdään karkeasti ja lopullinen hienolajittelu tehdään toisessa lajittelukeskuksessa lähellä määränpäättä [12].

Kuluttajille suuntautuvassa pakettilajittelussa on myös selkeitä sesonkeja vuositasolla, joista ylivoimaisesti suurin on joulukuusi. Jouluseasonki alkaa marraskuun alussa ja kestää joulukuun asti [12]. Muita tuotantomääriin vaikuttavia ajankohtia ovat alkuvuoden alennusmyynnit ja ystävänpäivä. Näiden vaikutus tuotantomääriin on kuitenkin joulukuusi edeltävää aikaa vähäisempi. Kesälomakausi vaikuttaa myös ihmisten kulutukseen ja kesän lajittelumäärät ovat huomattavasti muuta vuotta pienemmät. Kunnossapidon näkökulmasta tämä on otollista aikaa suurien vuosittaisten huoltojen suorittamiselle pienempien tuotantomäärien mahdollistaessa pidemmät seisonta-ajat. Toisaalta kesälomakausi asettaa haasteita myös kunnossapidon resurssien riittävyydelle.

4.2 Pakettilajittelukone

Tässä työssä käsiteltävä pakettilajittelukone on suunniteltu käsittelemään pientä, tyypillisesti kuluttajille menevää kappaletavaraa. Lajiteltavat kappaleet voivat olla esimerkiksi pahvilaatikoita, muovilaatikoita tai muovipusseja. Lajittelijan teoreettinen maksimilajittelukapasiteetti on 9000 pakettia tunnissa. Lajittelukone voidaan jakaa neljään päätasoon:

1. syöttölinjat 1, 2 ja 3
2. rata

3. jakelujärjestelmä
4. käyttöjärjestelmä.

Terminaaliin saapuneet paketit syötetään ensin syöttölinjalle, jossa paketit seuraavaksi eritellään toisistaan. Erottelu voidaan suorittaa käsin siirtämällä paketteja liukuhihnalla tai koneellisesti syöttölinjan 1 *singulaattorilla*. Erottelun jälkeen paketista mitataan tilavuus ja paino. Lajittelukoneelle on määritelty paketin minimi- sekä maksimidimensiot ja ne on esitelty taulukossa 4.1 [13].

Taulukko 4.1. *Paketin minimi- sekä maksimidimensiot.*

Mitat	Vähintään	Enintään	Keskiarvo
Pituus (mm)	$L_{\min} = 150\text{mm}$	$L_{\max} = 1000\text{mm}$	-
Leveys (mm)	$W_{\min} = 150\text{mm}$	$W_{\max} = 600\text{mm}$	-
Korkeus (mm)	$H_{\min} = 10\text{mm}$	$H_{\max} = 600\text{mm}$	-
Paino (kg)	$m_{\min} = 0,1\text{kg}$	$m_{\max} = 35\text{kg}$	10kg

Paketin äärimittojen ja painon mittaamisella on tarkoitus paitsi seuloa koneeseen kelpaamattomat kappaleet pois tuotannosta, se on myös laskutusperuste suuremmille asiakkaille. Konenäöllä ei kuitenkaan saada seulottua kaikkia tuotantoon kelpaamattomia paketteja. Paketti voi olla esimerkiksi pyöreä, jolloin se voi pudota kuljettimelta tai lamellilta. Lähetys voi myös olla auennut, jolloin sen sisältöä voi pudota koneeseen ja ympäristöön lajittelun yhteydessä.

Lähetyksestä luetaan mittaamisen lisäksi tiedot viivakoodin avulla, joka sisältää tiedot paketin lähettäjistä ja vastaanottajasta. Viivakoodin luenta tapahtuu syöttölinjoilla sekä radalla sijaitsevilla kameratunneleissa [12]. Viivakoodin luennassa ongelmia voi ilmaantua esimerkiksi asiakaspalautusten yhteydessä, mikäli paketissa on jotain ylimääräisiä viivakoodeja, tai paketin pakkauspuusi on liian ohut, jolloin lukija saattaa havaita esimerkiksi vaatteessa olevan viivakoodin ja lähetys lajitellaan tunnistamattomana [14].

Paketista mitatut ja luetut tiedot lähetään lajittelukonetta käyttävään järjestelmään, joka lähettää tiedot edelleen ylempään tietokantaan, jonka avulla hoidetaan muun muassa laskutus ja paketin sijaintitietojen toimittaminen vastaanottajalle ja lähettäjälle. Joissain tapauksissa laskutustiedot on tallennettu lähetykselle jo aikaisemmin, jolloin paketin kokotietoja hyödynnetään ainoastaan lajitteluprosessissa. Paketin sijaintitiedot ovat myös oleellinen kilpailutekijä, sillä useat alalla toimivat kilpailijat tarjoavat yhä tarkempaa reaaliaikaista tietoa lähetysten sijainnista ja ennustetusta saapumisajasta [12].

Kuljettuaan syöttölinjaston läpi paketti saapuu sisääntuontiyksikölle. Järjestelmä etsii seuraavan kyseisen syöttölinjan kohdalle saapuvan vapaan lamellin ja sisääntuontiyksikkö kiihdyttää paketin tarkkaan määritetyllä hetkellä ja nopeudella lamellin tai lamellien päälle. Tässä vaiheessa järjestelmässä on tarkka tieto paketin sijainnista, dimensioista ja määränpäästä.

Varsinainen kuljetinrata on kahdeksikon muotoinen ja paketit kulkevat sillä toisiinsa liitetyillä 549 vanerisella *lamellilla*, jotka kulkevat pysähtymättä erikseen määritettävällä vakionopeudella. Kahdeksikon keskiosassa rata kulkee päällekkäin kahdessa kerroksessa. Yksittäinen paketti vie normaalisti yhden lamellin, mutta pisimmät paketit syötetään kahden lamellin päälle.

Radalta paketti siirretään *jakelujärjestelmään*. Jakelujärjestelmä koostuu suuresta määrästä erilaisia luisuja. Luisun tarkoituksena on hallitusti kuljettaa ja kerätä radalta siirretyt lähetykset haluttuun paikkaan. Kunkin luisun tietoihin on ohjelmoitu tietty postinumeroalue tai muu toiminto. Muu toiminto voi olla esimerkiksi ”*hukkaluisu*”, johon tunnistamattomat paketit syötetään. Paketin tullessa sille määritellyn luisun kohdalle lamelli kallistuu ja lähetykset siirtyvät hallitusti luisuun ja valuu painovoiman avulla luisun pohjalle. Jakelujärjestelmän luisut voidaan jakaa neljään tyyppiin fyysisten ja toiminnallisten ominaisuuksien perusteella:

- 64 suoraa luisua
- 27 tuplaspiraaliluisua
- 21 spiraaliluisua
- 1 ylivuotoluisu. [13]

Suorista luisuista käytetään myös nimitystä automaattiluisut, sillä paketit tippuvat suoraan luisun alle varattuun häkkiin, eikä henkilökuntaa tarvita pakettien järjestelyyn. Automaattiluisuissa pakettien koko on rajattu alle 2 kg painoiseen pienikokoisiin lähetyksiin, jotta painavat paketit eivät pudotessaan riko aiemmin häkkiin pudonneita lähetyksiä.

Tuplaspiraali- ja spiraaliluisut ovat toimintaperiaatteeltaan samanlaisia. Molemmissa luisuissa paketti liukuu painovoiman avulla alaosan rullaradalle, josta työntekijät asettavat ne häkkeihin. Spiraaliluisuissa paketin kokoa ei ole erikseen rajoitettu, joten reunaehdot muodostuvat pakettikoneelle yleisesti määritetyistä minimi- ja maksimidimensioista. Kahdeksikon muotoisen radan keskiosassa rata kulkee kahdessa kerroksessa, jossa myös tuplaspiraaliluisut sijaitsevat. Tuplaspiraaliluisuihin voidaan kaataa paketteja radan kahdesta eri osasta. Tällöin myös luisujen teoreettinen kapasiteetti on suurempi, mikäli lajitteluhenkilöstö ehtii poistaa lähetykset luisulta ennen sen täyttymistä. Spiraaliluisuihin on tyypillisesti ohjelmoitu vastaavat postinumerot kuin automaattiluisuihin, joten ainoastaan paketin koko toimii rajoittavana tekijänä siinä, kumpaan luisuun lähetykset lajitellaan. Mikäli mittatietojen luenta jostain syystä epäonnistuu, lähetykset lajitellaan varotoimenpiteenä spiraaliluisuun [12].

Järjestelmä tunnistaa luisujen täyttymisasteen luisussa sijaitsevien valokennojen avulla. Mikäli järjestelmä tunnistaa jollekin paketille tarkoitetun luisu olevan täynnä, paketti kiertää rataa kunnes kierroksille määritetty maksimimäärä ylittyy. Tämän jälkeen lähetykset siirretään ylivuotoluisun kautta uudelleen ensimmäiselle syöttölinjalle. Jos sama

paketti palautuu vielä uudestaan ylivuotoluisuun, se siirretään käsinlajitteluun kuljetin-
hihnaa pitkin. Yhtä tarkoitusta varten voidaan ohjelmoida myös kaksi tai useampia luisu-
sija, mikäli on tiedossa että kyseinen postinumero tai muu peruste tulee kuormittamaan
lajittelua. Pakettien koko vaikuttaa oleellisesti luisujen täyttymisen nopeuteen. Vaikka
koneen lajittelumäärät eivät olisi tavallisesta poikkeavia, voi luisujen kuormitus olla
suurta, mikäli esimerkiksi tietylle alueelle on menossa suuria määriä isokokoisia lähe-
tyksiä [12].

Mistä tahansa luisusta voidaan erikseen määrittää järjestelmälle niin sanottu hukkaluisu.
Hukkaluisun tarkoituksena on vastaanottaa lähetykset, joiden viivakoodin luenta on
epäonnistunut tai niissä on havaittu muunlainen poikkeama [14]. Luenta voi epäonnis-
tua useasta syystä. Viivakoodin tulostusjälki voi esimerkiksi olla suttuinen tai vaurioitu-
nut kuljetuksessa tai viivakoodia ei löydy järjestelmästä. Mikäli radalla sijaitsevan ka-
meratunnelin kameranäkö ei tunnista koodia, siitä otettu valokuva ohjautuu videokoo-
daukseen, jossa etäyhteyden päässä oleva ihminen pyrkii tunnistamaan koodin. Jos koo-
dia ei tunnisteta, kyseinen lähetykset ohjataan hukkaluisuun. Radalla on kaksi anturia, joi-
den avulla tunnistetaan lamellilla huonosti olevat lähetykset sekä tilanteet, joissa yhdelle
lamellille on joutunut useampia paketteja syöttövirheen seurauksena.

Nykyisin suuri osa kuluttajille suuntautuvasta vaatelähetyksistä lähetään muovipusseis-
sa, jotka ovat suuri haaste koneelliselle lajittelulle. Muovipussit päätyvät herkästi telo-
jen, kuljetushihnojen tai lamellien väliin ja aiheuttavat tällöin pahojakin vikaantumisia.
Muovipussien vaihteleva pinnan laatu on myös ongelmallinen niissä tapauksissa, joissa
lähetykset on saapunut ulkomailla ja siihen joudutaan liimaamaan Suomen standardia vas-
taava lajittelutunnus [12].

4.2.1 Syöttölinjojen layout

Pakettilajittelukoneessa on kolme syöttölinjaa, jotka poikkeavat hieman toisistaan. Kai-
killa linjoilla on sama teoreettinen maksimikapasiteetti ja kaikki syöttölinjat pystyvät
käsittelemään taulukossa 4.1 esitettyjen minimi- ja maksimidimensioiden välille rajoi-
tettuja lähetyksiä. Samanlaisten perustoimintojen lisäksi syöttölinjastoilla on kuitenkin
hieman eroavaisuuksia, jotka on esitetty seuraavassa taulukossa.

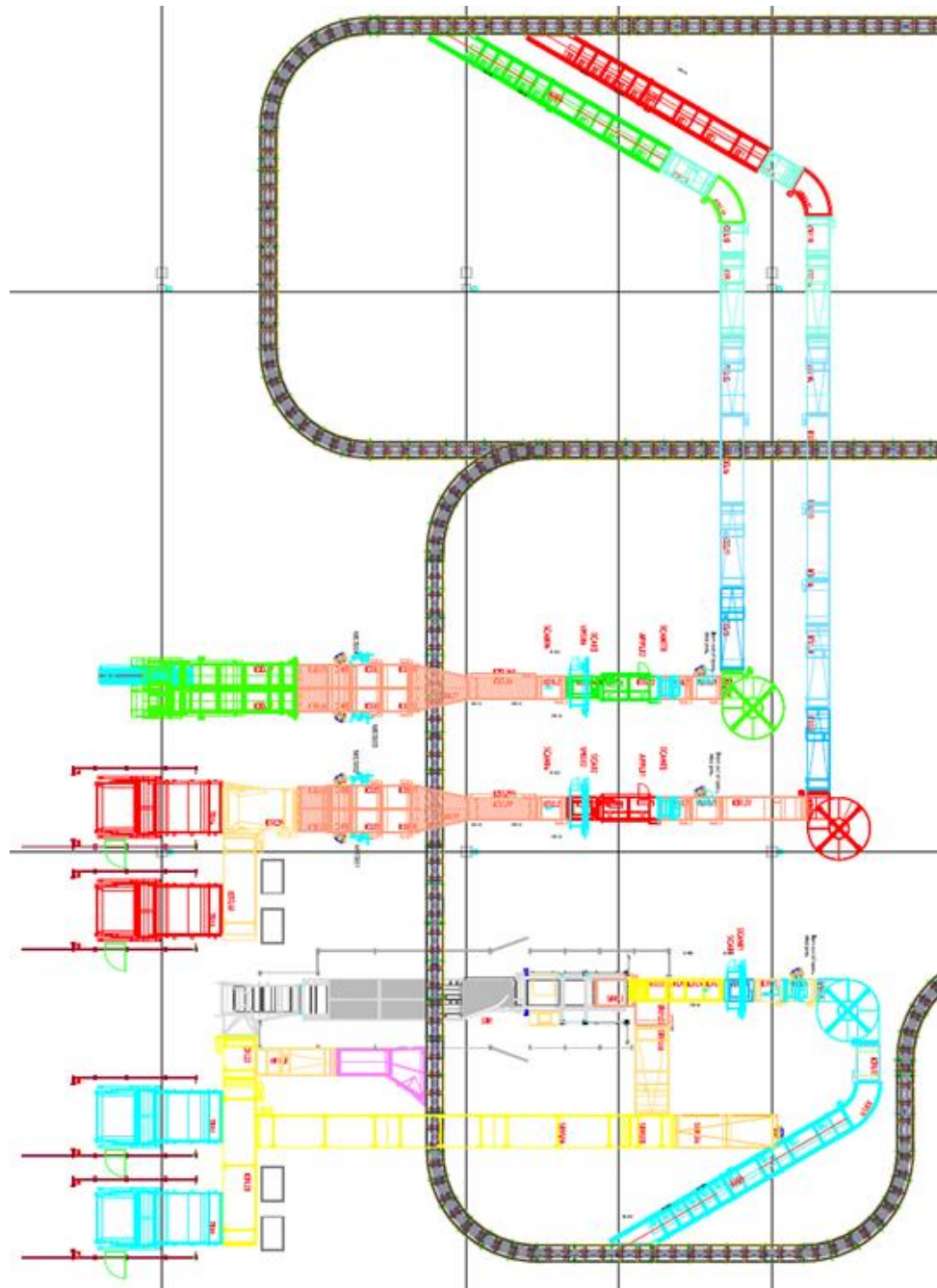
Taulukko 4.2 Syöttölinjojen ominaisuudet.

	Syöttölinja 1	Syöttölinja 2	Syöttölinja 3
Lähetysten erottelu	Automaattinen	Käsin	Käsin
Radalta palaavien lähetysten uudelleenlajittelu	Kyllä	Ei	Ei
Ylilaputus	Ei	Kyllä	Kyllä
Kaatolaitteet	2	2	Ei*

*rullakosyöttölinja

Ensimmäisellä syöttölinjalla pakettien erottelu tunnistusta ja mittausta varten hoidetaan koneautomaation avulla singulaattoriksi kutsutulla yksiköllä. Toisella ja kolmannella linjalla lajittelu hoidetaan käsin kahden tuotantotyöntekijän toimesta. Taulukosta 4.2 nähdään myös, että radalta tunnistamattomina palaavat lähetykset ohjataan ylivuotoluisun avulla ensimmäiselle syöttölinjalle, josta ne ohjautuvat joko uudelleenlajitteluun tai käsinlajitteluun. Ulkomailta Suomeen saapuvat paketit pitää merkitä lajittelevan yrityksen omilla lähetystunnuksilla. Tällöin lähetysten alkuperäiset tiedot luetaan järjestelmään jo olemassa olevasta lapusta ja lähetysten pohjaan tulostetaan uudella lähetystunnuksella varustettu tarrapintainen paperi. Paperi liimataan linjastolla lähetykseen, jotta myöhemmät lajittelu ja jakelujärjestelmät tunnistavat lähetysten. Tätä toimintoa kutsutaan ylilaputukseksi. Ylilaputustoiminto löytyy toiselta ja kolmannelta syöttölinjalta.

Lähetysten syöttö linjastoille tapahtuu ensimmäisellä ja toisella syöttölinjalla kaatolaitteiden avulla. Yhteen kaatolaitteeseen mahtuu vaihtoehtoisesti kaksi rullakkoa tai yksi häkki, joka tuodaan laitteeseen trukilla. Tämän jälkeen häkki tai rullakot lukitaan paikalleen ja kaatolaite kippaa lähetykset hallitusti syöttölinjan ensimmäiselle kuljettimelle. Häkin tai rullakkojen tyhjennyttyä syöttölaite palaa alkuperäiseen asentoon ja prosessi alkaa alusta. Kolmannella syöttölinjalla lähetystunnuksia voidaan syöttää ainoastaan rullakoista. Rullakot kallistetaan niin, että rullakossa olevat lähetykset liukuvat kuljettimelle, joka ohjaa lähetykset eteenpäin erottelua varten.



Kuva 4.1 Syöttölinja-alueen layout [13].

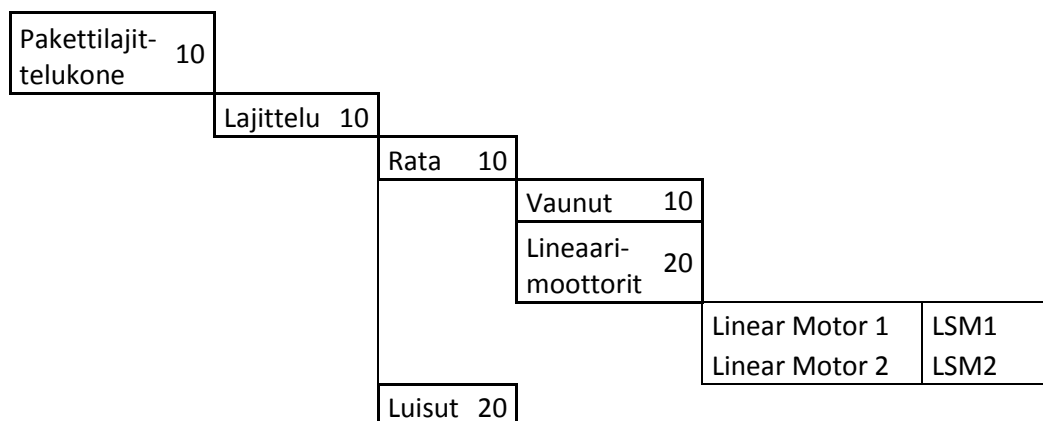
Kuvassa 4.1 nähdään syöttölinja-alueen sijoittelu ylhäältä päin kuvattuna. Ensimmäinen syöttölinja sijaitsee kuvan alalaidassa, toinen keskimmäisenä ja kolmas kuvan keskellä. Ensimmäisen syöttölinjan kaksi kaatolaitetta on kuvattu vaalean sinisellä ja toisen syöttölinjan kaatolaitteet punaisella. Kuvan keskellä vasemmassa laidassa sijaitsevat vihreät kuljettimet ovat kolmannen syöttölinjan rullakkosyöttölinjastot. Ensimmäisen syöttölinjan harmaalla merkityt kuljettimet kuuluvat singulaattoriin, joka suorittaa lähetysten koneellisen erottelun. Toisen ja kolmannen syöttölinjan käsin tehtävä lähetysten erottelu tehdään vaaleanpunaisella merkittyjen kuljettimien kohdalla. Tämän jälkeen lähetysten dimensiot mitataan ja lähetykset nostetaan spiraalikuljettimilla korkeammalla kulkevan

radan tasolle. Spiraalikuljettimet näkyvät kuvassa 4.1 suurina ympyröinä. Seuraavaksi lähetykset kuljetetaan sisääntuontyksiköille, jotka syöttävät paketit radalla kulkeville lamelleille. Ensimmäisen syöttölinjan sisääntuontyksikkö näkyy kuvan oikeassa alalaidassa vaalean sinisenä, toisen syöttölinjan sisääntuontyksikkö yläreunassa punaisella ja kolmannen syöttölinjan sisääntuontyksikkö vihreällä. Kuvassa harmaalla näkyvä rata koostuu kahdesta eri silmukasta. Kuvan alemmassa silmukassa rata kulkee myötä päivään ja ylemmässä silmukassa vastapäivään. Keskiosassa rata kulkee kahdessa kerroksessa.

4.2.2 Laitehierarkia

Kunnossapidossa on tärkeää ymmärtää ja pystyä mallintamaan laitteen toiminnallisuuksia ja rakennetta. Mallinnus toteutetaan pääsääntöisesti muodostamalla tarkasteltavasta laitteistosta laitehierarkia. Hierarkiassa koko laitos tai laite on jaettu toiminnallisuuden ja tarkoituksen perusteella eri hierarkiatasoille. Kunnossapidon näkökulmasta tasot riippuvat muun muassa järjestelmän monimutkaisuudesta, komponenttien luokse päästävydestä ja kunnossapitohenkilöstön taidoista. Hierarkian ylimpänä tasona voi esimerkiksi olla tehdas ja alemmina tasoina seuraavat järjestelmä, osajärjestelmä ja yksittäinen komponentti. [3]

Laitehierarkiaa luotaessa laitteille muodostetaan samalla tunnus, jonka perusteella kunnossapitojärjestelmä voi kohdistaa tapahtumia, kuten esimerkiksi kustannuksia, varaosia ja vikaantumistietoja tietyille komponenteille. Laite- tai komponenttitunnuksien luomiseen on useita erilaisia menetelmiä, joista yksi on esitelty seuraavassa kuvassa.



Kuva 4.2 Pakettilajittelukoneen laitehierarkian osa.

Työssä tarkasteltavan pakettilajittelukoneen hierarkian osa on esitetty kuvassa 4.2. Hierarkia on muodostettu laitetoimittajan aineistojen ja koneen toiminnallisuuksien perusteella. Hierarkia on pyritty muodostamaan siten, että koko järjestelmän toimintaa kuvaavan vikapuun luominen on mahdollisimman helppoa. Järjestelmätasona toimii *Pakettilajittelukone*, jonka ensimmäisenä osajärjestelmä on *lajittelu*. *Lajittelu* on jaettu

edelleen *luisuihin* ja *rataan* ja niin edelleen kunnes viidennellä tasolla ovat komponentit. Komponenteilla tarkoitetaan tässä tapauksessa hierarkian tarkinta tasoa, kuten yksittäistä toimilaitetta, kuten kuljetinta tai luisua. Hierarkiajakoa on mahdollista jakaa vieläkin pidemmälle, esimerkiksi jokaisen hihnan tai laakerin tasolle, mutta sitä ei toistaiseksi ole pidetty tarpeellisena. Yksi tapa laitetunnuksen luomiselle on lisätä alemman tason tunnusnumero edellisen perään. Kuvasta 4.2 nähdään esimerkiksi, että luisujen laitetason tunnus on 101020 ja toisen lineaarimoottorin tunnus on 10101020LSM2.

4.3 Vikadatan analysointi

Järjestelmän vikaantumisista kertova vikadata on saatu kunnossapitohenkilöstön kirjausten perusteella. Aina koneen käydessä paikalla oleva kunnossapitohenkilöstö kirjaa mobiilisovelluksella vian alkamisajankohdan hetkellä, jolloin koneen käyttäjä ilmoittaa koneen vikaantuneen. Kunnossapitohenkilöstö paikallistaa ja korjaa vian ja tämän jälkeen raportoi laitteen, johon vika kohdistui sekä kellonajan, jolloin järjestelmä on taas käytettävissä. Kunnossapitojärjestelmään jää jälki kyseisen laitteen vikaantumisajankohdasta, vian kestosta ja sijainnista. Raportoinnin yhteydessä kirjataan myös lyhyt selite korjausprosessista ja mahdollisuuksien mukaan myös oletus vian aiheuttajasta.

Heikki Pernu toteaa Käyttövarmuuden ja Kunnossapidon perusteet kurssimateriaalissaan, että kerättyjen vikaantumistilastojen oikeellisuus, tarkkuus ja datan määrä ovat ratkaisevia vikadatan käyttökelpoisuutta arvioitaessa [4]. Vikadatan perustuessa kunnossapitohenkilöstön raportointiin inhimillisten tekijöiden vaikutus datan laatuun on suuri. Mikäli virheitä esiintyy paljon lyhyessä ajassa, raportointi voi viivästyä muiden vikojen korjaamisen seurauksena. Viivästyminen voi johtaa unohduksiin esimerkiksi vika-aikojen suhteen tai pahimmillaan koko vian kirjaamatta jättämiseen.

Myös vian kohdistaminen oikeaan laitteeseen voi olla hankalaa riippuen vian selkeydestä. Kuljettimen vetohihnan ollessa paikoiltaan tapahtuma on helppo kohdistaa oikein kyseiselle kuljettimelle. Paketin tippuessa lamellin päältä putoaminen on voinut aiheutua monista syistä. Lähetys voi olla vääränlainen ja lajittelukoneeseen sopimaton, esimerkiksi pyöreä. Tällöin kyse on käyttäjävirheestä, sillä lähetyksiä joilla on muotonsa puolesta mahdollisuus pudota, ei tulisi syöttää koneeseen. Toisaalta syöttökuljettimen kiihdytyksessä on voinut tapahtua jonkinlainen virhe, paketti on voinut luistaa hihnan päällä, jolloin juurisyynä voi olla väärä materiaalivalinta kiihdytyshihnassa. Syötön ajoitus on voinut olla myös jostain muusta syystä väärä ja paketti on päätyntä lamellin reunalle ja pudonnut radan mutkassa. Radassa on kahdessa kohdassa IOC (*Item On Cover*) -anturi, joka tutkii lamellin ja sitä kuljettavan vaunun välistä tilaa, johon lähetykset yleensä jäävät jumiin. IOC-anturin huomattessa lähetyksen se pysäyttää radan ja antaa hälytyksen järjestelmään. Huomattava osa edellä mainitun kaltaisista vikatilanteista on kohdistettu IOC1 tai IOC2 antureihin, vaikka ne todellisuudessa ovat toimineet juuri niin kuin on tarkoituskin. Varsinaisia lähetyksen putoamiseen johtavia tapahtumia on

kuitenkin yksittäisessä tapauksessa erittäin vaikea saada selville lähetysten erittäin suuren määrän takia.

5. LAJITTELUKONEEN AHP-ANALYYSI

Analyyttinen hierarkiaproessi mahdollistaa erinäisten asioiden tutkimisen ja vertailun, vaikka esimerkiksi mitattua dataa tarkasteltavista kohteista ei olisi olemassa. Tässä työssä tarkasteltava kone on ollut käytössä vasta muutamia kuukausia, jolloin esimerkiksi kaikkia ennakkohuoltoja ei ole vielä ehditty suorittaa. Tarkasteltavalta ajanjaksolta on kuitenkin raportoitu lukuisia vikoja, jolloin vikadatan avulla tehtävä vertailu on mahdollista.

5.1 Lajittelukoneen osajärjestelmät

Laitehierarkiassa ylimpänä eli päätasona on järjestelmä. Tämän jälkeen hierarkiassa seuraavat osajärjestelmät, jotka voidaan jakaa aina pienempiin osiin, kunnes viimeisenä tarkimpana hierarkiatasona on yksittäinen komponentti. AHP tarkastelua varten laitteisto on jaettu viiteen osajärjestelmään:

- 1) Syöttölinja 1
- 2) Syöttölinja 2
- 3) Syöttölinja 3
- 4) Rata
- 5) Käyttöjärjestelmä.

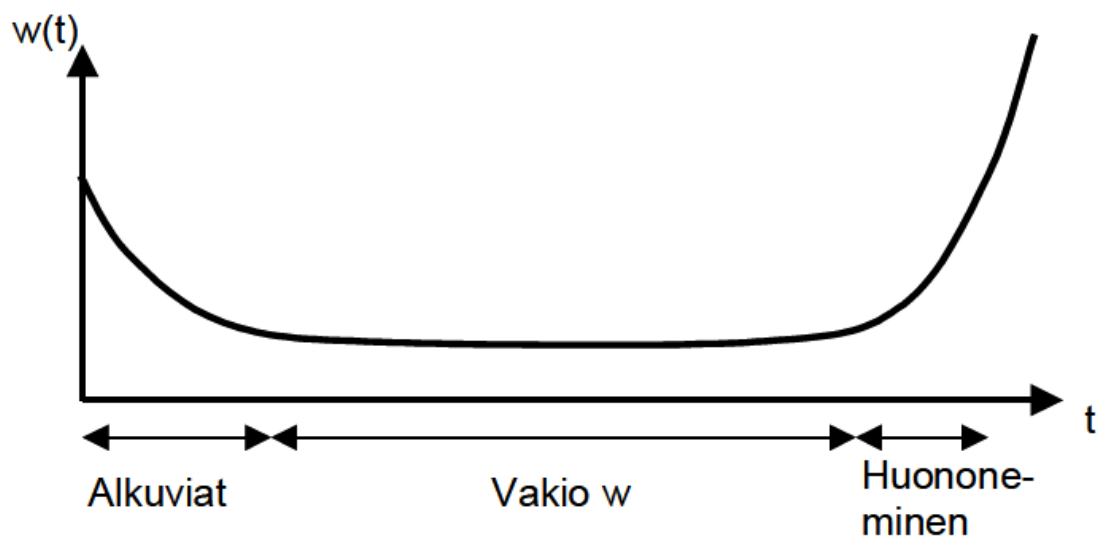
Jako poikkeaa hieman laitetoimittajan tekemästä jaottelusta. Jakelujärjestelmä on jätetty kokonaan pois vikatarkastelujen osalta, sillä luisuissa esiintyvien vikojen määrä on tyyppillisesti hyvin vähäinen. Lisäksi yksittäisen luisun vikaantuessa sen vaikutus tuotantoon on minimaalinen suuren luisukapasiteetin ansiosta. Jakelujärjestelmään kohdistuu ainoastaan 5 erilaista huoltoa, joista neljä on puolivuositain tehtäviä luisujen pintojen ja valokennojen puhdistuksia. Pintoihin tarttuu usein lähetyksistä irtoavia lähetystarroja tai muita teippejä. Nämä epäpuhtaudet lisäävät luisun pinnan kitkaa ja aiheuttavat näin haittaa luisun toiminnassa. Huollot on suhteellisen nopea toteuttaa ja puhdistuksen tarve helposti visuaalisesti havaittavissa. Huoltojen vähentäminen tai huoltovälien pidentäminen jakelujärjestelmän osalta ei tuo suurta hyötyä huoltojen kokonaiskuormittavuutta ajatellen.

Syöttölinjat on otettu tarkasteluun linjatasolla niiden hieman erilaisten käyttötarkoitusten vuoksi. Linjan 1 suuri automaatioaste mahdollistaa linjan tehokkaan käytön varsin pienin resurssein. Lisäksi ylivuotoluisun kautta järjestelmästä palautuvat paketit johdetaan takaisin ensimmäiselle syöttölinjalle. Edellä mainituista syistä linjan 1 käyttöaste on kaikkein suurin. Näin sen vikaantumisen vaikutukset järjestelmään ovat muita syöt-

tölinjoja merkittävämmät. Syöttölinjan 3 kuormitus on vähäisintä, sillä kyseisen linjan alkupäässä ei ole kaatolaitetta. Toisaalta kolmas syöttölinja on ainoa rullakoissa kuljettavien pakettien lajitteluun suunniteltu syöttölinja. Näiden pakettien osuus kokonaismäärästä on kuitenkin kohtalaisen pieni.

5.2 Vikadatan tarkastelu AHP menetelmällä

Ensiksi tilannetta lähdetään tarkastelemaan tähän mennessä kertyneiden vikojen avulla. Tarkastelussa käytettävät vikatilastot on kerätty kunnossapitohenkilöstön raportointijärjestelmästä. Tilastoissa ei ole käyttöönottoa seuranneita ensimmäistä kahta kuukautta, sillä kunnossapitojärjestelmä oli vielä tällöin tekeillä, eikä raportointi ollut mahdollista. Tyypillisesti järjestelmän käyttöönottovaiheessa esiintyy varsinaiseen käyttövaiheeseen verrattaessa huomattavan paljon vikoja, jotka johtuvat mahdollisista suunnittelu- ja asennusvirheistä, sekä virheistä järjestelmän käytössä. Vastaavasti järjestelmän elinkaaren lopussa vikataajuus alkaa nousta huomattavasti järjestelmän osien kuluessa loppuun. Edellä mainitun kaltaisen elinkaaren intensiteettifunktiosta käytetään nimitystä *kylpyammekäyrä* (Kuva 5.1). Ennakkohuoltojen toteuttamisella tai laiminlyönneillä ei voida juurikaan käytännössä vaikuttaa aivan elinkaaren sisäänajovaiheen tyypillisiin vikoihin.

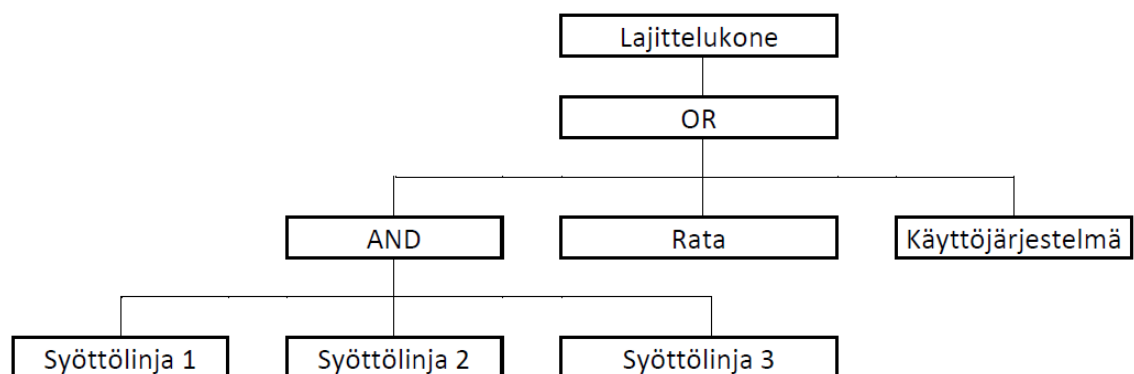


Kuva 5.1 Kylpyammekäyrä [4].

Kuvassa 5.1 on esitetty intensiteettifunktio, jossa näkyvät korjattavan järjestelmän sisäänajoon liittyvien vikojen suuri määrä, vakio vikataajuus sekä huononeminen, jossa järjestelmä on tullut hyödyllisen käyttöikänsä päähän. Tällöin vikataajuus kasvaa merkittävästi. Kuvan 5.1 mukaista intensiteettifunktiota kutsutaan ”kylpyammekäyräksi”. Kylpyammekäyrämäistä intensiteettifunktiota ei kuitenkaan ole olemassa, vaan se muodostetaan koneen eri vaiheiden intensiteettifunktioiden avulla. Varsinaisen käyttövaiheen keston voidaan vaikuttaa pidentävästi käyttämällä laitteistoa suunnitellun mukai-

sesti ja suorittamalla tarpeelliset huollot toimivan kunnossapitostrategian mukaisesti. Tässä työssä käsiteltävän lajittelukoneen tarkastelujakso ajoittuu alkuvika-jakson loppuosaan. Tarkastelujakso on suhteellisen lyhyt verrattaessa koko koneen elinkaareen, joten siitä ei voi havaita mahdollista vikavälien tasoittumista niin sanotulle vakio-tasolle.

Työssä käsiteltävän pakettilajittelukoneen vikatilastoista on nähtävissä vikojen määrä, vikojen keskimääräinen kesto, sekä laite jossa kyseinen vika on esiintynyt. Eri laitteissa esiintyviä vikojen vaikutus koko järjestelmän toimivuuteen riippuu kyseisen laitteen asemasta laitehierarkiassa. Vikapuun avulla voidaan kuvata eri osioiden vikaantumisen vaikutusta koko järjestelmään.



Kuva 5.2 Lajittelukoneen vikapuudiagrammi.

Kuvassa 5.2 on esitetty lajittelukoneen AHP tarkastelun mukaisen viiden päätason vika-puudiagrammi. Kuvasta nähdään, että yhden syöttölinjan vikaantuminen ei itsessään aiheuta lajittelukoneen vikaantumista. Mikäli konetta kuormitettaisiin täydellä kapasiteetilla, yhden tai kahden syöttölinjan vikaantuminen aiheuttaa jäämiä koneen lajittelu-tehossa, muttei varsinaista vikaantumista. Kaikkien syöttölinjojen vikaantuminen yhtä aikaa aiheuttaa kuitenkin lajittelukoneessa vikatilanteen, samoin kuin radan tai käyttö-järjestelmän vikaantuminen.

Rata on vikaantunut koko radan ollessa pysähtynyt. Yhden tai useamman lamellin vi-kaantuminen kohdistuu kyllä rataan, mutta niiden ei voida katsoa vikaannuttavan koko ”rata” ylätasoa. Näin ollen edellä mainitun kaltaiset viat on seulottu pois rataan liitty-västä vikadatatista.

Kukin syöttölinja koostuu useasta kymmenestä peräkkäisestä kuljettimesta, jolloin yh-denkin vikaantuminen aiheuttaa koko syöttölinjan vikaantumisen. Syöttölinjan anturit tunnistavat edelle pysähtyneen paketin ja automatiikka pysäyttää seuraavan kuljettimen. Mikäli vikaantuminen tapahtuu syöttölinjan viimeisessä kuljettimessa, rata alkaa täyttyä kuljetinyksikkö kerrallaan. Tällöinkin linja täyttyy kuitenkin niin nopeasti, ettei kysei-

sestä puskuriajasta ole tuotannon kannalta erityistä merkitystä. Näin ollen koko tuotantolinjan voidaan ajatella vikaantuvan samalla hetkellä kuin mikä tahansa sen kuljettimista vikaantuu.

Järjestelmän vikaantumisten kohdentaminen oikein on haastavaa, sillä järjestelmävirhe voi aiheuttaa esimerkiksi vikaantumisen jonkin yksittäisen postinumeron lajittelussa tai ongelmia tietuustyypisten pakettien tunnistamisessa. Järjestelmään kohdistettuja vikoja ei raportoitu tarkastelujakson aikana kertaakaan.

Seuraavassa AHP-matriisissa on verrattu vikojen määrää, kestoa ja sijaintia keskenään parivertailulla. Vertailun perusteena on käytetty vertailtavien ominaisuuksien haitallisuutta järjestelmän käyttövarmuudelle. Vikojen sijainnilla tarkoitetaan vikaantuvan laitteen tärkeyttä järjestelmän käyttövarmuuden kannalta.

Taulukko 5.1 *Vikojen määrä, pituus ja sijainti merkitys järjestelmän käyttövarmuudelle.*

	Määrä	Kesto	Sijainti	Prioriteetti-vektori
Vikojen määrä	1	1/3	1/7	0,088
Vikojen kesto	3	1	1/3	0,243
Vian sijainti pakettikoneessa	7	3	1	0,669

$$\lambda_{\max} = 3,007, Cr = 0,006$$

Taulukon 5.1 parivertailu on erittäin johdonmukainen, sillä vertailun konsistenssia kuvaava arvo $Cr=0,006$ kriittisen rajan ollessa 0,1. λ_{\max} on matriisin suurin ominaisarvo, jonka perusteella normeerattu prioriteettivektori on laskettu kaavalla (22). Prioriteettivektorin alkioista huomataan, että vikojen määrällä ei ole juurikaan merkitystä käyttövarmuuden kannalta. Suuri määrä lyhyitä vikoja ei aiheuta tuotannossa radikaaleja ongelmia ja viivästyksiä, vaikka laitteiston käyttäjän kokemukseen se voi vaikuttaa hyvinkin negatiivisesti. Sen sijaan vikojen kesto ja erityisesti se mihin vika kohdistuu, on tuotannon kannalta merkityksellistä. Pitkäkestoinen vika jossakin syöttölinjoista ei tuotantomäärästä riippuen aiheuta välttämättä myöhästymisiä, mutta mahdollisesta tuotannon uudelleenjärjestelyistä aiheutuu vaivaa ja kustannuksia. Vian kohdistuminen rataan tai käyttöjärjestelmään pysäyttää koko tuotannon, oli kyse lyhyestä tai pitkästä viasta. Tällöin vaikutus on erittäin kriittinen järjestelmän käyttövarmuuden kannalta.

Vikojen määriä eri laitetason välillä ei ole tarpeen ratkaista parivertailulla, sillä vikojen määrien suhteet saadaan ratkaistua tarkoilla arvoilla vikadataan kerättyjen vikojen avulla. Taulukkoon 5.2 on koottu eri osajärjestelmien vikojen määrät. Kaikkiaan vikoja oli tarkastelujakson aikana raportoitu AHP tarkasteluun valituille viidelle laitetasolle 258 kappaletta. Vikojen normalisoidut arvot on saatu jakamalla kyseisen laitetason vikamäärä vikojen kokonaismäärällä n .

Taulukko 5.2 Vikojen määrä.

	Vikojen määrä	%-osuus	Normalisoitu arvo
Syöttölinja 1	107	41,5%	0,415
Syöttölinja 2	60	23,3%	0,233
Syöttölinja 3	34	13,2%	0,132
Rata	57	22,1%	0,221
Käyttöjärjestelmä	0	0,0%	0,00

$n=258$

Taulukossa 5.2 on esitetty AHP tarkasteluun valittujen osajärjestelmien viat. Vioista lähes puolet on kohdistunut ensimmäiseen syöttölinjaan. Toiseen syöttölinjaan ja rataan kohdistuneiden vikojen osuus on likimain sama, noin 60 kappaletta. Tarkastelujakson aikana käyttöjärjestelmään ei raportoitu ainuttakaan vikaa, joten sen osuus on 0.

Seuraavassa taulukossa on koottuna osajärjestelmien vikatilojen kumulatiivinen kesto tunteina, eli epäkäytettävyys $Q(h)$. Epäkäytettävyys on saatu summaamalla kaikkien tietylle osajärjestelmän tai sitä alemmalle hierarkiatasolle tarkastelujakson aikana raportoitujen vikojen kestot yhteen.

Taulukko 5.3 Vikojen kumulatiivinen kesto.

Vikojen kumulatiivinen kesto	Epäkäytettävyys $Q(h)$	%-osuus	Omaisvektori
Syöttölinja 1	39,18	51,3	0,513
Syöttölinja 2	21,50	27,0	0,270
Syöttölinja 3	6,87	8,6	0,086
Rata	10,33	13,0	0,130
Käyttöjärjestelmä	0,00	0,00	0,000

$n=77,88$

Tarkastelujakson aikana lajittelukone tai jokin sen osajärjestelmistä on ollut pysähdyksissä yhteensä 77,88 tuntia. Taulukosta 5.3 nähdään, että kumulatiivisesti tarkasteltuna yli puolet vikatiloista on kohdistunut ensimmäiseen syöttölinjaan. Myös toisen syöttölinjan kumulatiivinen epäkäytettävyys on suhteellisesti verrattuna korkeampi kuin muilla osajärjestelmillä. Nämä poikkeamat selittyvät neljällä samanlaisella vikatilanteella, joissa muovipussi oli juuttunut spiraalikuljettimen lamellien väliin ja rikkonut rakenteita. Kolme edellä mainituista vioista kohdistui ensimmäiseen syöttökuljettimeen ja aiheuttivat yhteensä 14,5 tunnin vikatilat.

Seuraavassa taulukossa on tarkasteltu parivertailulla eri osajärjestelmien tärkeyttä järjestelmän käytettävyyden kannalta. Vertailussa osajärjestelmiä verrataan keskenään sen perusteella, että kumpi aiheuttaa vikaantuessaan suuremmat välilliset kustannukset sekä enemmän haittaa koko järjestelmän käyttövarmuudelle.

Taulukko 5.4 Osajärjestelmien vikaantumisen vaikutus koko järjestelmän käyttövarmuuteen.

Vian sijainti pakettikoneessa.	Syöttölinja 1	Syöttölinja 2	Syöttölinja 3	Rata	Käyttöjärjestelmä	Omaisvektori
Syöttölinja 1	1	2	3	1/7	1/7	0,078
Syöttölinja 2	1/2	1	2	1/9	1/9	0,049
Syöttölinja 3	1/3	1/2	1	1/9	1/9	0,035
Rata	7	9	9	1	1	0,419
Käyttöjärjestelmä	7	9	9	1	1	0,419

$$\lambda_{\max} = 5,116, Cr = 0,026$$

Taulukon 5.4 parivertailun suurin ominaisarvo $\lambda_{\max}=5,116$. Vertailu on myös hyvin johdonmukainen, sillä vertailun $Cr=0,026$. Prioriteettivektorista nähdään, että rata sekä käyttöjärjestelmä ovat selkeästi kriittisimpiä järjestelmän käyttövarmuuden kannalta, sillä molemmat aiheuttavat vikaantuessaan koko järjestelmän vikaantumisen. Syöttölinjan 1 kautta kulkee myös ylivuotoluisun kautta lajittelujärjestelmästä palautuvat paketit, jonka vuoksi syöttölinja 1 on parivertailussa muita linjoja tärkeämpi. Tästä huolimatta ensimmäisen syöttölinjan vikaantuminen ei kuitenkaan aiheuta koko järjestelmän välitöntä vikaantumista.

Taulukoissa 5.2, 5.3 ja 5.4 tehtyjen osajärjestelmien vertailujen prioriteettivektorit on koottu alla olevaan taulukkoon.

Taulukko 5.5 Kootut tulokset

	Määrä	Kesto	Sijainti
Syöttölinja 1	0,415	0,513	0,078
Syöttölinja 2	0,233	0,270	0,049
Syöttölinja 3	0,132	0,086	0,035
Rata	0,221	0,130	0,419
Käyttöjärjestelmä	0,00	0,00	0,419

Taulukosta 5.5 voidaan huomata, että määrän lisäksi myös kestollisesti suurin osa vioista on kohdistunut ensimmäiseen syöttölinjaan. Sijainti-sarakkeesta nähdään, että sen tai muiden syöttölinjojen sijainti laitehierarkiassa ei kuitenkaan ole kovinkaan kriittinen käyttövarmuuden kannalta. Sen sijaan radan ja käyttöjärjestelmän mahdollinen vikaantuminen on lajittelukoneen kannalta hyvinkin kriittistä. Taulukossa 5.1 tutkittiin parivertailulla vikojen eri ominaisuuksien - määrän, keston ja vikaantumisen - vaikutusta järjestelmän käytettävyyteen. Parivertailusta saatiin edellä mainituille ominaisuuksille seuraavat kertoimet:

- vikojen määrä 0,088
- vikojen kesto 0,243

- vikaantumisen vaikutus 0,669.

Seuraavaan taulukkoon on koottu taulukon 5.5 tulokset painotettuina edellä mainituilla kertoimilla. Esimerkiksi Syöttölinjan 1 vikojen keston suhteellinen painoarvo 0,125 saadaan kertomalla 0,513 kertoimella 0,243. Painoarvo sarakeeseen laskettu kyseisen rivin summa, joka tarkoittaa kyseisellä rivillä mainitun osajärjestelmän vikaantumisesta aiheutuvaa kokonaishaittaa. Kokonaishaitta tarkoittaa suhteellista arvoa siitä, kuinka haitallista kyseisen laitetasen vikaantuminen on pakettikoneen toiminnan kannalta.

Taulukko 5.6 Vikojen painotetut haittavaikutukset lajittelukoneen käyttövarmuudelle.

	Vikojen määrä	Vikojen kesto	Sijainti	Painoarvo	Järjestys
Kerroin	0,088	0,243	0,669		
Syöttölinja 1	0,0364	0,125	0,0522	0,213	3
Syöttölinja 2	0,0205	0,066	0,0328	0,119	4
Syöttölinja 3	0,0115	0,021	0,0234	0,056	5
Rata	0,0194	0,032	0,2803	0,331	1
Käyttöjärjestelmä	0,00	0,00	0,2803	0,280	2

Taulukosta 5.6 nähdään, että erityisesti osajärjestelmien sijainti vaikuttaa merkittävästi niiden kriittisyyteen toiminnan kannalta. Käyttöjärjestelmään ei kuitenkaan ole vikaantunut tarkastelujakson aikana, joten rataa kohdistuneet viat ovat olleet eniten haitaksi koneen käytettävyydelle. Ensimmäinen syöttölinjan vikaantumien on selvästi muita syöttölinjoja haitallisempaa, sillä sen painoarvo on kaksi kertaa toista syöttölinjaa suurempi. Tämä johtuu jonkin verran muita syöttölinjoja tärkeämmästä asemasta laitehierarkiassa ja suurista vikamääristä ja suuresta kumulatiivisesta kestosta.

5.3 Laitetoimittajan ennakkohuoltosuunnitelma

Laitetoimittaja on määrittänyt sekä omille että alihankkijoidensa valmistamille tuotteille tietyt ennakkohuoltotoimenpiteet ja huoltovälit riittävän käytettävyyden takaamiseksi. Kyseisen ennakkohuolto-ohjelman noudattaminen on monissa tapauksissa myös yksi ehto takuun säilymiselle. Tässä työssä käsiteltävän lajittelukoneen toimittajan ennakkohuolto-ohjelmassa on yhteensä 295 erilaista huolto-, tarkastus- ja puhdistustoimenpidettä, joista suuri osa on määritelty tehtäväksi päivittäin tai viikoittain taulukon 5.7 mukaisesti.

Taulukko 5.7. Ennakkohuoltojen huoltovälit ja määrät osajärjestelmätasolla.

Päätasot	Päivittäin	Viikottain	Kuukausittain	3 kuukauden välein	Puoli-vuosittain	Vuosittain
Syöttölinjat	35	32	42	7	92	32
Rata	2	0	6	1	19	10
Jakelu-järjestelmä	0	0	0	1	4	0
Käyttö-järjestelmä	6	4	3	1	1	0

Kuten taulukosta 5.7 huomataan, määrällisesti suurin osa ennakkohuolloista kohdistuu syöttölinjoihin. Taulukon ennakkohuollot on määritetty aina yhdelle kuljettimelle tai muulle syöttölinjan toimilaitteelle. Kun otetaan huomioon, että ensimmäinen syöttölinja koostuu 23:sta, toinen syöttölinja 40:stä ja kolmas syöttölinja 36 kuljettimesta tai muusta toimilaitteesta, on suoritettavia ennakkohuoltoja todellisuudessa moninkertainen määrä. Moisen ennakkohuoltomäärän suorittaminen vaatisi suuren kunnossapito-organisaation lisäksi niin paljon huoltoaikaa koneelta, ettei järjestelmän käyttöastetta saada lähellekään haluttua tasoa.

Huoltojen aiheuttamat haittavaikutukset tuottavuudelle vaihtelevat suuresti. Suuri osa tarkastuksista on silmämääräisiä tai esimerkiksi kuunteluun perustuvia. Tällöin järjestelmän pysäyttämistä ei tarvita, vaan tarkastukset voidaan suorittaa normaalin ajon yhteydessä. Ainoana haittana voidaan pitää ennakkohuoltotoimenpiteiden aikana tapahtuvaa vikaantumistilannetta, jossa kunnossapitohenkilöstö ei välttämättä ole heti käytettävissä vian selvitykseen ennakkohuoltojen suorittamisen takia.

Tuotannon ja kunnossapito-organisaation yhdessä suunnitteleamalla tuotannon ja ennakkohuoltojen viisaalla ajoittamisella voidaan myös selkeästi pienentää huoltokatkojen tuotannolle aiheuttamia haittavaikutuksia. Lajittelumäärissä voidaan selkeästi havaita kausittaisia vaihteluita niin vuorokausi-, viikko- kuin kuukausitasollakin. Käytettäessä lajittelukonetta pienillä lajittelumäärillä voidaan esimerkiksi sulkea yksi syöttölinja kolmesta ennakkohuoltoja varten ilman, että tuotanto jää jälkeen sen hetkisestä tavoitteestaan.

Verrattaessa radalle tehtäviä ennakkohuoltoja syöttölinjojen ennakkohuoltoihin, huomataan määrän olevan merkittävästi pienempi, sekä huoltovälien olevan pidempiä. Tästä huolimatta huoltojen sovittaminen tuotannon vaatimuksiin on huomattavasti hankalampaa. Radan pysäyttäminen katkaisee aina koko tuotannon ja osa huolloista on hyvinkin pitkäkestoisia, jopa useita työpäiviä. Tuotanto mahdollistaa harvoin moisia pysähdyksiä normaaleina tuotantoaikoina, joten huollot on keskitettävä ajankohdille, jolloin lajittelukonetta ei käytetä. Tällaisissa tapauksissa tuotanto ei kärsi, mutta huoltojen suorittaminen tuotantoaikojen ulkopuolella aiheuttaa muita kustannuksia. Kunnossapitohenkilöstö joutuu suorittamaan huollot ylitöinä tai hankkimaan ylimääräisiä huoltoresursseja; jois-

sain tapauksissa molempia. Ylimääräisten palkkakustannusten vaikutus on kuitenkin yleensä hyvin pieni verrattaessa pysäytetyn tuotannon aiheuttamiin kustannuksiin.

5.4 Ennakkohuoltojen tarkastelu AHP menetelmällä

Laitetoimittajan ennakkohuolto-ohjelman mukaisten huoltojen toteuttaminen ohjelman mukaisesti sitoisi suuren määrän kunnossapitohenkilöstöä sekä vaatisi koneelta paljon huoltokatkoja. Molemmat edellä mainitut tekijät aiheuttavat kustannuksia. Asiakkaan tulee säilyttää tarvittava käytettävyyys päivittäisen tuotannon onnistumiseksi. Ennakkohuoltojen suorittamisen tuotannolle aiheuttamia haittoja määriteltäessä tulee huomioida:

- 1) *Vaikutus tuotantoon:* Tarvitseeko tuotantoa pysäyttää ennakkohuollon suorittamisen ajaksi?
- 2) *Huoltoaika:* Mikäli laite tarvitsee pysäyttää huoltotoimenpiteiden ajaksi, kauan kyseinen laite on poissa käytöstä.
- 3) *Keskeytyksen vaikutus tuotantoon:* Pystytäänkö laitteen tai linjan tuotanto korvaamaan huoltotöiden aikana muulla linjalla.
- 4) *Huoltojen ajoitus:* Milloin huoltotöiden aiheuttaman tuotannon pysähtymisen vaikutus on mahdollisimman vähäinen.
- 5) *Huoltojen aiheuttamat kustannukset:* Varaosien ja henkilöstön aiheuttamat kulut.

Useat ennakkohuollot eivät vaadi huollettavan laitteen pysäyttämistä huoltojen suorittamisen ajaksi. Toimenpiteet voivat olla esimerkiksi silmämääräisiä tai ääneen perustuvia tarkastuksia. Tällaisten tarkastusten suorittaminen on myös suhteellisen nopeaa, eikä näin ollen kuormita kunnossapitoresursseja. Kaikkien tarkastusluontoisten ennakkohuoltojen suoritusta ei voida kuitenkaan automaattisesti olettaa olevan tehtävissä ilman tuotantokatkoja. Esimerkiksi telojen pintojen tai hihnojen tarkastus voi vaatia suojiin poistoa tai kyseisen toimilaitteen pysäytystä turvallisuussyistä tai tarkempaa tarkastelua varten. Tällaisissa tapauksissa huollon toteutus voi aiheuttaa koneelle pitkänkin pysäytyksen, vaikka varsinainen tarkastus olisi nopea suorittaa. Toisaalta joitain konkreettisia huoltotoimenpiteitä voidaan tehdä myös koneen käydessä. Esimerkiksi laakereiden rasvaukset tai optisten antureiden puhdistus paineilman avulla ei aina vaadi koneen pysäytystä.

Huoltotoimenpiteiden vaatiessa laitteiston pysäyttämistä voidaan huoltojen huolellisella suunnittelulla vaikuttaa pysäytyksestä aiheutuvien haittavaikutusten suuruuteen merkittävästi, vaikkakin varsinaiseen huoltotoimenpiteeseen kuluvaan aikaan on usein vaikea vaikuttaa. Mikäli usein tehtävän huollon suorittamiseksi tarvitsee purkaa paljon suojuksia tai muuta koneistoa, voidaan harkita rakenteiden muuttamista niin, että huollettavaan laitteistoon on helpompi päästä käsiksi. Muutostyöt eivät kuitenkaan saa vaikuttaa haitallisesti laitteen toimintaan tai turvallisuuteen. Myös kunnossapitohenkilöstön huolellisella perehdyttämisellä voidaan lyhentää huoltoihin kuluva aikaa.

Mikäli käytettävissä on useita rinnakkaisia järjestelmiä, voidaan huoltotyöt suunnitella yhdessä tuotannon kanssa niin, että tuotanto siirretään väliaikaisesti pois yksittäiseltä linjalta huoltotöiden ajaksi. Tässä työssä käsiteltävän pakettikoneen syöttölinjojen viikko tai kuukausihuollot voidaan ajoittaa tuotannon kannalta hiljaisille ajanjaksoille. Syöttölinjan 1 huoltoajaksi voidaan esimerkiksi sopia maanantai kello 9.00-12.00, jolloin tuotanto siirretään väliaikaisesti kokonaan syöttölinjoille 2 ja 3. Vastaavasti syöttölinjojen 2 ja 3 huoltopäiviksi voidaan sopia esimerkiksi tiistai ja keskiviikko.

Ennakkohuoltojen ajankohtia suunniteltaessa on tärkeää tiedostaa tuotannon käyttöasteen vaihtelut. Suuressa osassa huollettavista kohteista ei ole mahdollisuutta siirtää tuotantoa rinnakkaisille linjoille huoltotöiden ajaksi. Tällöin huolto-organisaation tulee yhdessä tuotannon kanssa sopia huoltoajankohdista, jolloin tuotantoon kohdistuva haitta olisi mahdollisimman vähäistä. Lyhyitä huoltokatkoja voidaan ajoittaa esimerkiksi asiakkaan taukojen ajaksi. Tuotantokatkokset voivat olla esimerkiksi seurausta ruokatauoista tai vuoron tai ajo-ohjelman vaihdoista. Edellä mainittujen kaltaisten tuotantokatkosten suunnittelu on kuitenkin hyvin paljon riippuvaista valmistettavasta tuotteesta ja tuotannon yleisestä rakenteesta. Esimerkiksi voimalaitosta tai paperikonetta ei ole kannattavaa tai usein edes mahdollista pysäyttää hetkellisesti. Lajittelukoneen ylös- ja alasajo on kuitenkin nopeaa ja helppo toteuttaa lyhyeksikin ajaksi, jolloin taukoja on mahdollista järjestää eri vuorojen ja lajitteluohjelmien vaihtamisen yhteyteen.

Huollot voidaan jakaa kahteen eri luokkaan sen perusteella, että tarvitseeko huollettavaa laitetta pysäyttää kyseisen ennakkohuollon tai tarkastuksen suorittamiseksi. Ilman huollettavan kohteen pysäytystä tehtävät huollot eivät aiheuta tuotannolle välillisiä kustannuksia. Tarkastusluonteisissa huoltotoimenpiteissä ei yleisesti tarvita varaosia, joten ainoa kyseisiin huoltoihin kohdistuva välitön kustannus on huoltoja suorittavan kunnossapitoresurssin niihin käyttämä aika. Pysäytystä vaativissa huolloissa välilliset kustannukset ovat merkittävästi suuremmat tuotannon pysäyttämisen takia. Vaikka tuotantoa voidaan joissain tapauksissa ohjata muualle, tuotannolle aiheutuva haitta on tässä tapauksessa merkittävästi suurempi. Seuraavassa taulukossa on verrattu AHP-parivertailulla pysäytystä vaativien huoltojen ilman pysäytystä tehtävien huoltojen välittömien ja välillisten kustannusten suuruutta.

Taulukko 5.8 Pysäytystä vaativien ja ilman pysäytystä tehtävien huoltojen kustannusten suuruus.

	Pysäytystä vaativat huollot	Ilman pysäytystä tehtävät huollot	Prioriteettivektori
Pysäytystä vaativat huollot	1	7	0,875
Ilman pysäytystä tehtävät huollot	1/7	1	0,125

$$\lambda_{\max}=2, Cr=0,00$$

Taulukossa 5.8 on tehty erityyppisten huoltojen parivertailu, jonka prioriteettivektorista saadaan kertoimet myöhemmälle kustannustarkastelulle. Vertailussa pysäytystä vaativien huoltojen arvioitiin aiheuttavan selvästi suuremmat kustannukset kuin ilman pysäytystä tehtävät huollot. Kahdelle vaihtoehdolle tehtävä parivertailumatriisi on automaattisesti täysin konsistentti, eli se ei voi olla ristiriidassa keskenään.

Taulukossa 5.7 on luetteloitu kaikille laitetasoille suunnitellut ennakkohuollot. Seuraavaan taulukkoon on koottu laitetasojen huoltojen määrät vuositasolla, sekä niiden suhteellinen osuus kaikista huolloista. Huollot on jaettu edellisten AHP-tarkastelujen mukaisesti viidelle eri osajärjestelmälle. Päivittäin suoritettavia huoltoja on katsottu olevan vuodessa 365 kappaletta, viikoittaisia 52 ja niin edelleen. Taulukkoon on listattu myös pysäytystä vaativat huollot vuositasolla, sekä niiden suhteellinen osuus kaikista pysäytystä vaativista huolloista. Vaikka esimerkiksi syöttölinjoissa on useista samanlaisia kuljettimia, on tällaisen kuljettimen yksittäinen ennakkohuolto yksinkertaistuksen vuoksi huomioitu yhtenä huoltona, vaikka oikeasti sama toimenpide jouduttaisiin toteuttamaan useaan eri laitteeseen. Mikäli edellä mainittu esimerkki huomioitaisiin omana huoltona jokaiselle samanlaiselle toimilaitteelle, olisi kenties tarpeen tarkastella esimerkiksi lamelleille kohdistettua yksittäistä huoltoa 547 eri huoltona. Tästä syystä kaikkia huoltoja käsitellään yksittäisinä ja niiden toistaminen on huomioitu niiden viemää aikaa arvioitaessa.

Taulukko 5.9 *Huoltojen ja pysäytystä vaativien huoltojen määrät osajärjestelmittäin.*

	Huoltojen kokonaismäärä	Pysäytystä vaativat huollot	Pys. vaat. Prioriteettivektori	Ilman pysäytystä tehtävät huollot	Ilman pys. prioriteettivektori
Syöttölinja 1	14725	8295	0,400	6430	0,310
Syöttölinja 2	12257	6214	0,300	6043	0,292
Syöttölinja 3	11158	6135	0,296	5023	0,242
Rata	866	82	0,004	784	0,038
Käyttöjärjestelmä	2440	1	0,000	2439	0,118

$n_{\text{koko}}=41446$, $n_{\text{pysäytys}}=20727$, $n_{\text{ei pysäytystä}}=20719$

Laitetoimittajan määrittämän ennakkohuolto-ohjelman huoltojen kokonaismäärä on niin valtava, että sitä on käytännössä mahdotonta toteuttaa. Kuten taulukosta 5.9 voidaan huomata, erillisiä yksittäisiä huoltoja on vuodessa yhteensä 41 446 kappaletta, joka tarkoittaa keskimäärin lähes 800 huoltoa viikossa. Vaikka huolloista vain puolet vaatii huollettavan laitteen pysäytystä, veisi huoltojen toteutus alkuperäisen ennakkohuolto-ohjelman mukaisesti miltei kaiken mahdollisen tuotantoajan ja vaatisi kunnossapitoorganisaatiolta mittavat resurssit. Taulukosta nähdään myös, että huolloista yli 90 prosenttia kohdistuu syöttölinjoihin. Tämä johtuu siitä, että jokaiselle kuljetintyypille on määritetty omat ennakkohuolto-ohjelmansa. Kuljettimien huolto-ohjelmissa on useita päivittäin tehtäviä huoltoja, jotka kasvattavat nopeasti huoltojen yhteismäärää. Radan ja

käyttöjärjestelmän huolloista suurin osa voidaan tehdä ilman pysäytyksiä järjestelmään. Vertailu ei ota huomioon huoltoihin kuluvaan aikaan, sillä siitä ei vielä tässä vaiheessa ole tarkkaa tietoa. Vertailu ei ota myöskään kantaa mahdollisiin huoltojen laiminlyönneistä aiheutuvien seurauksien vakavuuteen. Huoltoja on käsitelty ainoastaan kappalemääräisesti, jolloin yksityiskohtaisemman tarkastelun perusteella saadut tulokset voivat olla myös hieman toisenlaisia.

Seuraavassa taulukossa lasketaan painotetut arvot ennakkohuoltojen aiheuttamille kokonaiskustannuksille. Taulukon 5.8 parivertailun prioriteettivektorin arvot toimivat osajärjestelmien kertoimina taulukon 5.9 prioriteettivektoreille.

Taulukko 5.10 Ennakkohuoltojen painotetut kustannukset osajärjestelmäkohtaisesti.

	Pysäytystä vaativat huollot	Ilman pysäytystä tehtävät huollot	Prioriteettivektori	Järjestys
Kerroin	0,875	0,125		
Syöttölinja 1	0,350	0,039	0,389	1
Syöttölinja 2	0,262	0,036	0,299	2
Syöttölinja 3	0,259	0,030	0,289	3
Rata	0,003	0,004	0,008	5
Käyttöjärjestelmä	0,000	0,014	0,015	4

Taulukon 5.10 tuloksista huomataan, että syöttölinjoille kohdistuvat selkeästi rataa ja käyttöjärjestelmää suuremmat kokonaiskustannukset. Prioriteettivektorin arvoista nähdään, että suurimmat kustannukset kohdistuvat juuri ensimmäiselle syöttölinjalle ja ylivoimaisesti vähiten kustannuksia syntyy rataan kohdistuvista ennakkohuolloista.

Taulukossa 5.6 esitettyjä haittavaikutuksia koneen käytettävyydelle voidaan ajatella käänteisesti osajärjestelmien tärkeytenä koko laitteiston toiminnan kannalta. Mitä suurempi haitta jonkin osajärjestelmän vikaantumisesta on tuotannolle, sitä tärkeämpi se on tuotannon kannalta. Toisin sanoen tarkasteltavan laitetason toimintakykyisenä pysyminen on yhtä tärkeää, kuin sen vikaantuminen on haitallista. Järjestelmän toimintakykyisenä pysymistä voidaan ajatella hyötynä, kun taas ennakkohuoltoihin käytettävää rahaa, resursseja ja tuotantoaikaan voidaan käsitellä kustannuksena. Tällöin voimme soveltaa ongelman ratkaisuun hyöty/kustannus-analyysia.

Taulukko 5.11 Hyöty/kustannusanalyysi.

	Hyöty w_b	Kustannus w_c	w	Järjestys
Syöttölinja 1	0,213	0,389	0,548	3
Syöttölinja 2	0,119	0,299	0,398	4
Syöttölinja 3	0,056	0,289	0,194	5
Rata	0,331	0,008	41,38	1
Käyttöjärjestelmä	0,280	0,015	18,67	2

Hyöty/kustannusanalyysin tulos lasketaan kaavalla (26) ja lopputuloksena saatavan hyötysuhde $w:n$ lukuarvo tarkoittaa saatavan hyödyn suuruutta samaan kohteeseen kohdistettuihin kustannuksiin verrattuna. Mitä suurempi hyötysuhde, sitä suurempi hyöty saadaan suhteellisesti pienemmillä kustannuksilla. Taulukon 5.11 tuloksista nähdään, että erityisesti radan hyöty/kustannussuhde on erittäin hyvä. Tällöin radan jokseenkin pienen ennakkohuoltomäärän suorittamista sellaisenaan voidaan pitää hyvin järkevänä, sillä radan toiminta on erittäin tärkeää koko lajittelukoneen toiminnalle. Sen sijaan syöttölinjoja, erityisesti kolmatta, kuormittaa erittäin suuri ennakkohuoltomäärä suhteessa osajärjestelmän tärkeyteen tuotannossa. Tällöin mahdolliset ennakkohuoltojen optimointitoimenpiteet on järkevää keskittää juuri edellä mainittujen matalan hyöty/kustannussuhteen kohteisiin.

6. JÄRJESTELMÄN KÄYTETTÄVYYS JA LUO- TETTAVUUS

Koneen eri osien vikaantuminen vaikuttaa koko järjestelmän vikaantumiseen eri tavoin. Tietyn osan pitkäkestoinen vikaantuminen ei välttämättä aiheuta juurikaan menetyksiä tuotannossa, pienimuotoisia tuotannon uudelleenjärjestelyjä lukuun ottamatta, mutta toisen osan lyhyt vikaantuminen kriittisellä hetkellä voi aiheuttaa suuria tuotannollisia tappioita. Toimintavarmuuskeskeisen kunnossapidon (RCM) menetelmillä voimme tutkia tähän mennessä kertyneen vikadatan mukaisten vikojen vaikutusta eri osajärjestelmiin ja koko lajittelukonejärjestelmään.

6.1 Osajärjestelmien käytettävyys

Tarkasteltaessa pakettilajittelukoneen käytettävyyttä tietyllä aikavälillä, tulee kokonaiskäyttöajassa huomioida vikojen aiheuttamien katkojen lisäksi ne ajanjaksot, jolloin järjestelmä ei suunnitellusti ole käytössä. Tässä työssä käsiteltävän pakettilajittelukoneen viikoittainen suunniteltu tuotantoaika alkaa sunnuntai-iltapäivällä kello 15.00 ja loppuu perjantai-iltana kello 22.00. Päivittäin tuotannossa pidetään lisäksi kahden tunnin tuotannollinen tauko arkaamuisin vuorojen vaihdon välissä kello 06.00-08.00 [14]. Tällöin yhden viikon suunnitelluksi tuotantoajaksi saadaan

$$t_{vko} = 7 \times 24h - 5 \times 2h - 31h = 127h. \quad (26)$$

Työssä tarkasteltava aikaväli on maanantai 00:00:00 7.12.2016 – tiistai 00:00:00 31.5.2016. Tällöin koko määritellyn aikavälin suunniteltu tuotantoaika on

$$T = 25t_{vko} + 22h = 3197. \quad (27)$$

Tarkasteltavalle aikavälille osuu 7 arkipyhäpäivää, joista suuri osa ajoittuu joulua edeltävään aikaan. Arkipyhien kohdalla koneen käyttöajat sovitaan tuotannon kanssa pääsääntöisesti tapauskohtaisesti ja varsinkin joulua edeltävänä aikana tuotantoa harvoin keskeytetään viikolle osuvien pyhäpäivien takia. Tästä syystä tuotantoaika on laskettu koko tarkasteltavalle aikavälille kaavan (27) mukaisesti. Lisäksi kaavassa (28) on huomioitu tiistain 31.5.2016 22 tuotantotuntia. Taulukossa 5.3 on esitetty eri järjestelmän osien kumulatiiviset epäkäytettävyysajat aikavälillä T . Kun vähennämme epäkäytettävyysajan Q suunnitellusta käyttöajasta T , voimme laskea eri järjestelmän osien käytettävyyden A kaavalla (2).

Taulukko 6.1. Lajittelukoneen eri osien käytettävyys.

	Q (h)	MTTR (min)	A
Syöttölinja 1	39,18	22,90	0,988
Syöttölinja 2	21,5	21,50	0,993
Syöttölinja 3	6,87	12,12	0,998
Rata	10,33	10,88	0,997
Käyttöjärjestelmä	0	0	1

$T=3197$

Tarkastellulla ajanjaksolla $T=[0, 3197]$ lajittelukoneen eri osa-alueet ovat olleet vikaantuneena yhteensä 77,88 tuntia. Raportoiduista vioista selvästi suurin osa on kohdistunut ensimmäiseen syöttölinjaan tarkastellessa sekä määriä että kumulatiivista seisonta-aikaa Q . Vikojen suuri määrä selittyy sillä, että ensimmäistä syöttölinjaa myös käytetään selvästi muita syöttölinjoja enemmän. Ensimmäisen ja toisen syöttölinjan vikojen keskimääräinen korjausaika on myös muita järjestelmätasoa suurempi. Suurin yksittäinen tekijä on molemmilla linjoilla sattuneet spiraalikuljettimen vikaantumiset. Kaikissa neljässä tapauksessa spiraalikuljettimen lamellien väliin on jäänyt kiinni muovipussiin pakattu lähetys, joka on kiilautuessaan rikkonut kuljettimen lamelleja. Ensimmäisellä syöttölinjalla edellä mainittuja vikoja on yhteensä 14,5 tuntia ja toisella syöttölinjalla 8 tuntia. Kolmannella syöttölinjalla kyseisiä vikoja ei ole esiintynyt tarkastelujakson aikana.

Taulukosta 6.1 nähdään koneen eri laitetasoille lasketut käytettävyydet. Ensimmäistä syöttölinjaa lukuun ottamatta eri järjestelmän tasot ovat olleet vikaantuneena alle 1% prosenttia kokonaisajasta. Vaikka ensimmäinen syöttölinjan käytettävyys on vain 0,988, se ei ole kuitenkaan aiheuttanut koko lajittelun pysähtymiseen johtaneita vikoja, sillä tarkasteluajana ei ole raportoitu yhtäaikaista vikoja kaikilta kolmelta syöttölinjalta. Tällöin koko lajittelukoneen käytettävyys on sama kuin radan käytettävyys, sillä käyttöjärjestelmä ei ole tarkastelujakson aikana vikaantunut kertaakaan. On kuitenkin huomattava, että järjestelmän aiheuttamia virheitä on usein vaikea tunnistaa. Käyttöjärjestelmän totaalinen kaatuminen on helppo havaita, mutta tiettyyn laitetasoon kohdistuvat vikatilat käsitetään helposti kyseisen laitteiston viaksi.

6.2 Järjestelmän epäluotettavuus

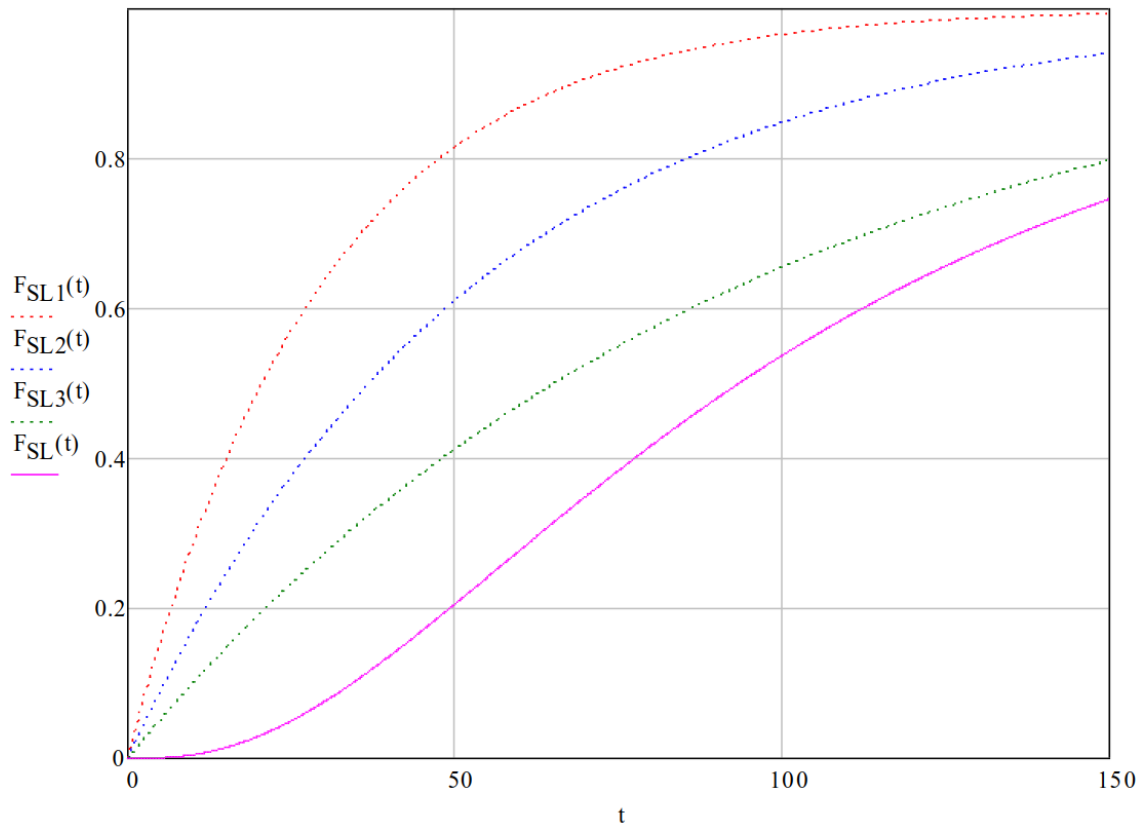
Järjestelmän epäluotettavuus kuvaa todennäköisyyttä, jolla se vikaantuu tietyn ajan kuluessa. Järjestelmän eri osien keskimääräinen aika edellisen vian korjauksesta seuraavaan vikaantumiseen on saatu laskettua kunnossapitajärjestelmästä kerätyn vikadatan avulla ja tulokset on esitetty taulukossa 6.1. Yksittäisen osajärjestelmän epäluotettavuuden kertymäfunktio on mallinnettu eksponenttijakaumalla. Tässä työssä käytetty vikadatan on kerätty lyhyeltä ajanjaksolta laitteiston koko elinkaareen nähden, joten vikaantumisen ei näiltä osin ole tarpeen huomioida osien ja laitteiston vanhenemista. Yksittäis-

sen osajärjestelmän eksponenttijakautunut epäluotettavuuden kertymäfunktio saadaan laskettua kaavojen (10) ja (11) avulla. Keskimääräinen käyntiaikojen vikaväli $MTBF$ saadaan laskettua vikadatasta.

Tarkastellessa kuvassa 5.2 esitetyn vikapuudiagrammin mukaisen järjestelmän epäluotettavuutta, prosessi kannattaa jakaa kahteen osaan vikapuun JA sekä TAI porttien mukaisesti. Syöttölinjojen vikaantumiset aiheuttavat koko järjestelmän vikaantumisen vain, jos kaikki syöttölinjat vikaantuvat yhtäaikaaisesti. Syöttölinjojen epäluotettavuudelle saadaan johdettua lauseke kaavan (15) avulla. Kaikkien syöttölinjojen epäluotettavuus F_{SL} ajan hetkellä t on

$$F_{SL}(t) = F_{SL1}(t)F_{SL2}(t)F_{SL3}(t), \quad (28)$$

jossa F_{SL1} on ensimmäisen, F_{SL2} toisen ja F_{SL3} kolmannen syöttölinjan epäluotettavuus hetkellä t . Piirretään kaikkien kolmen syöttölinjan epäluotettavuuden kertymäfunktiot seuraavaan kuvaajaan



Kuva 6.1 Syöttölinjojen epäluotettavuusfunktiot.

Kuvassa 6.1 on esitetty syöttölinjojen epäkäytettävyyssfunktiot ajan t funktiona eksponenttijakauman avulla. Y-akseli kuvaa todennäköisyyttä, jolla kyseinen laite vikaantuu hetkeen t mennessä edellisestä korjauksesta. Esimerkiksi 50 tunnin kuluttua edellisen vian korjaamisesta ensimmäinen syöttölinja on vikaantunut yli 80 prosentin todennäköisyydellä, kun taas kolmannen syöttölinjan vikaantumisen todennäköisyys on vastaavalle

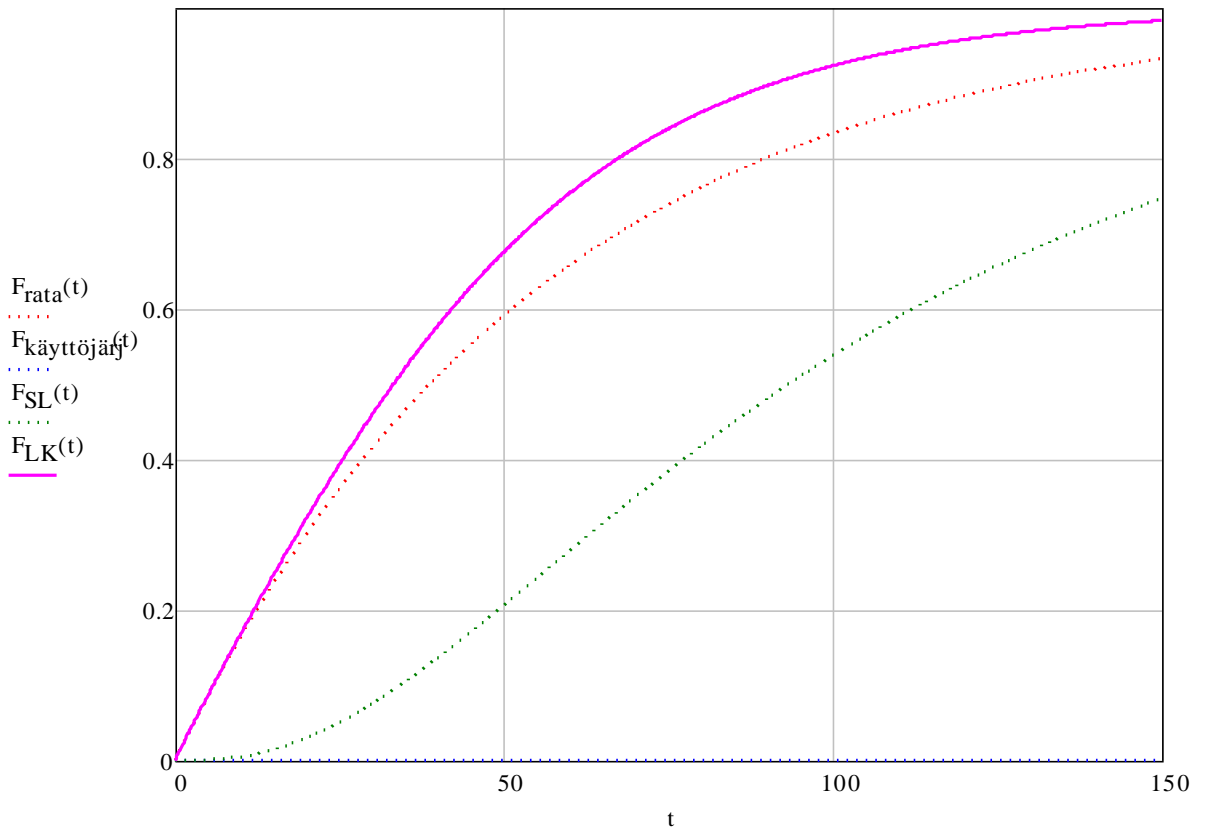
ajanjaksolle noin 40 prosenttia. Kertymäfunktio $F_{SL}(t)$ kuvaa todennäköisyyttä, jolla kaikki kolme syöttölinjaa ovat vikaantuneet yhtäaikaaisesti. Huomioitavaa on, että syöttölinjojen yhteistä vikaantumista kuvaava kertymäfunktio olettaa, ettei muiden syöttölinjojen vikoja korjata ennen viimeisenkin syöttölinjan vikaantumista. Todellisessa tilanteessa, jossa keskimääräinen vikojen korjausaika $MTTR$ vaihtelee syöttölinjojen osalta välillä 12-23 minuuttia, on kaikkien kolmen syöttölinjan yhtäaikainen vikaantumisen todennäköisyys huomattavasti pienempi. Esimerkiksi koko 25 viikon tarkastelujakson aikana ei kertaakaan käynyt tilannetta, jossa kaikki kolme syöttölinjaa olisivat olleet yhtäaikaaisesti vikaantuneina.

Koko järjestelmän vikaantuminen voi aiheutua syöttölinjojen yhtäaikaisen vikaantumisen lisäksi myös radan tai käyttöjärjestelmän vikaantumisesta. Koko lajittelukoneen epäluotettavuus F_{LK} hetkellä t saadaan johdettua kaavasta (16) seuraavasti:

$$F_{LK}(t) = 1 - (1 - F_{SL}(t))(1 - F_{rata}(t))(1 - F_{käyttöjärj}(t)), \quad (29)$$

jossa $F_{rata}(t)$ on radan epäkäytettävyys hetkellä t ja $F_{käyttöjärj}(t)$ on käyttöjärjestelmän epäkäytettävyys hetkellä t .

Koko lajittelukoneen vikaantumisen aiheuttavat kolmen syöttölinjan yhtäaikaisen vikaantumisen lisäksi radan tai järjestelmän vikaantuminen, joiden epäkäytettävyysfunktiot on esitetty seuraavassa kuvaajassa.



Kuva 6.2 Lajittelukoneen ja eri osajärjestelmien epäluotettavuusfunktiot.

Kuvasta 6.2 nähdään yksittäisten järjestelmätasojen lisäksi myös koko lajittelukoneen epäluotettavuuden kertymäfunktio. F_{rata} tarkoittaa radan epäluotettavuutta. Käyttäjärjestelmän epäluotettavuus $F_{käyttäjärj}$ on tasan 0 kaikilla t :n arvoilla, sillä

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} = \frac{1}{\infty} \rightarrow 0, \quad (30)$$

jolloin kertymäfunktio

$$F_{käyttäjärj}(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-0} = 1 - 1 = 0. \quad (31)$$

Kuvasta 6.2 huomataan, että lajittelukoneen epäkäytettävyyden kertymäfunktion kuvaaja mukailee vahvasti radan kertymäfunktiota. Tarkastelujakson mukaisella vikataajuudella lajittelukone vikaantuu 40 prosentin todennäköisyydellä 25 tuntia edellisen vian korjaamisesta ja yli 80 prosentin todennäköisyydellä 75 tuntia edellisen vian korjauksesta.

6.3 Herkkyysanalyysi Risk Reduction Worth (RRW) menetelmällä

Edellisessä kappaleessa tutkimme osajärjestelmien epäluotettavuuden vaikutusta koko järjestelmän epäluotettavuuteen. Tutkimuksen aineistona käytettiin kunnossapitohenkilöstön raportoimaa dataa. Tiedämme myös, että yksittäisen syöttölinjan vikaantuminen ei aiheuta ongelmia koneen käytettävyydessä ja että järjestelmä ei vikaantunut kertaakaan tarkastelujakson aikana. Tällöin voidaan helposti tehdä oletus, että rataan kohdistuvien vikojen vähentäminen parantaisi merkittävästi koneen käytettävyyttä ja pienentäisi vikaantumisen todennäköisyyttä ajan funktiona. Oletuksen paikkansa pitävyys voidaan tarkistaa suorittamalla tutkittavalle laitteistolle herkkyysanalyysi.

Koko lajittelukoneen epäluotettavuuden kertymäfunktio voidaan muodostaa kaavoilla (29) ja (30). Tällöin epäluotettavuus $F_{LK}(t)$ on

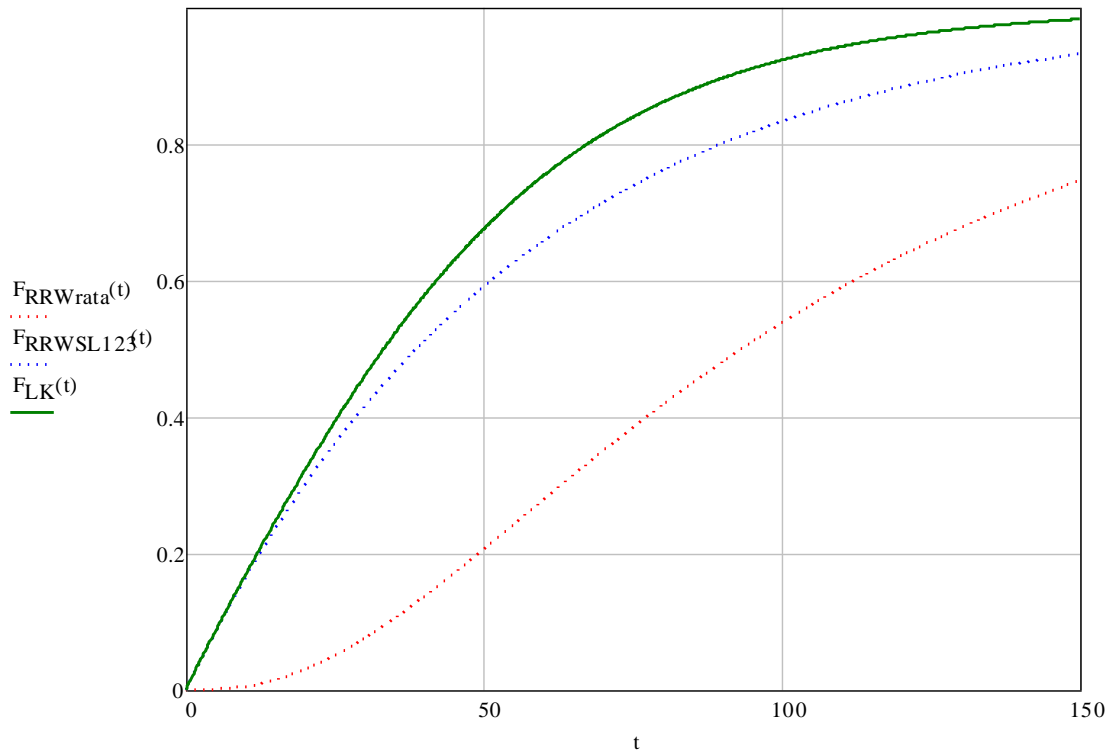
$$F_{LK}(t) = 1 - (1 - F_{rata}(t)) (1 - F_{käyttäjärj}(t)) (1 - (t) F_{SL2}(t) F_{SL3}(t)) \quad (32)$$

Toisaalta tiedetään, että $F_{käyttäjärj}(t) = 0$ kaikilla t :n arvoilla, joten herkkyysanalyysiä ei järjestelmän osalta tarvita. Tällöin kaava sievenee muotoon

$$F_{LK}(t) = 1 - (1 - F_{rata}(t)) (1 - F_{SL1}(t) F_{SL2}(t) F_{SL3}(t)) \quad (33)$$

ja tarkastelu suoritetaan syöttölinjojen ja radan suhteen. Kaava (18) merkitsee alkupe räisen järjestelmän ja muokatun järjestelmän, jossa jokin osajärjestelmä toimii täydellisesti, suhdelukua. Suhdeluvun sijasta muodostamme kuvaajat yhtälöille, joissa kukin osajärjestelmä toimii vuorollaan täydellisesti. Kaavasta (33) voidaan päätellä, että jokaisen syöttölinjan vaikutus järjestelmään on yhtä suuri, sillä minkä tahansa korvaami-

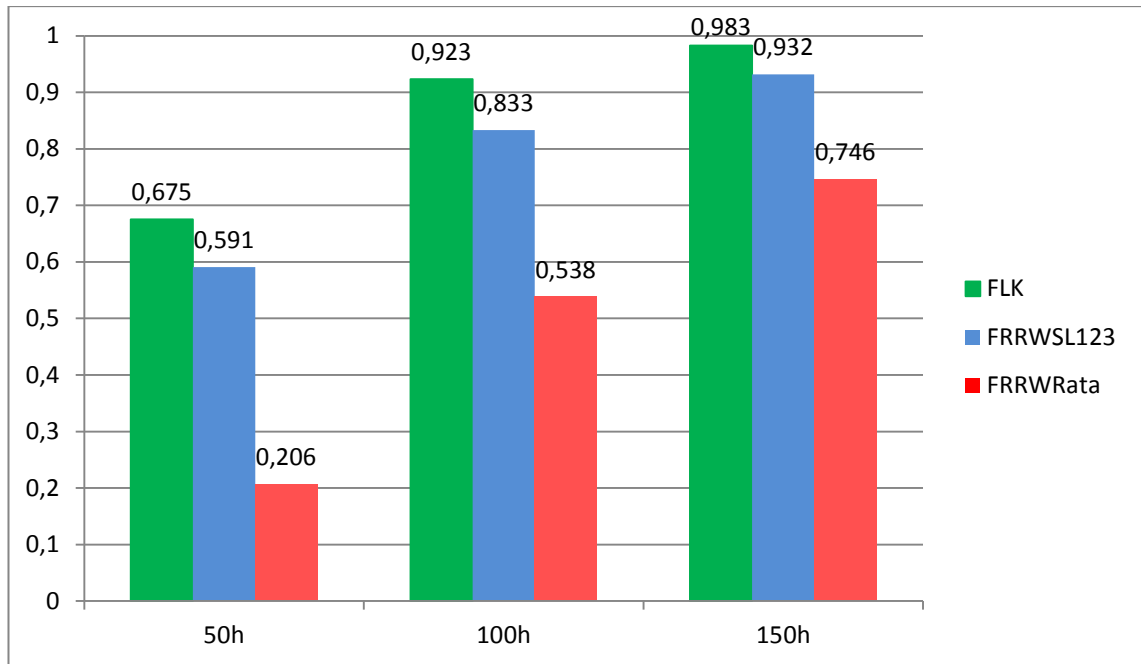
nen arvolla 0 muodostaa funktion tuloksi 0:n. Seuraavaan kuvaajaan on koottu epäluotettavuuden kertymäfunktiot, jossa kukin osajärjestelmä on korvattu täydellisellä vikaantumattomalla komponentilla.



Kuva 6.3 Lajittelukoneen RRW-herkkyysanalyysi ajan funktiona.

Kuvassa 6.3 $F_{LK}(t)$ on koko lajittelukoneen nykyinen epäluotettavuuden kertymäfunktio. $F_{RRW_{rata}}(t)$ kuvaa tilannetta, jossa lajittelukoneen rata-järjestelmätaso on korvattu täydellisellä vikaantumattomalla laitteella, eli kaavassa (34) epäluotettavuus $F_{rata}(t)=0$ kaikilla t :n arvoilla. Vastaavasti $F_{RRW_{SLI23}}(t)$ kuvaa tilannetta jossa mikä tahansa lajittelukoneen syöttölinjoista on korvattu täydellisesti toimivalla syöttölinjalla, jolloin $F_{SL1}(t)=0$, $F_{SL2}(t)=0$ tai $F_{SL3}(t)=0$. Tällöin tulo $F_{SL1}(t)F_{SL2}(t)F_{SL3}(t)=0$ kaikilla t :n arvoilla.

Kuvan 6.3 kuvaajasta $F_{RRW_{SLI23}}(t)$ huomataan, että syöttölinjojen korvaaminen täydellisesti toimivilla syöttölinjoilla ei merkittävästi vaikuta lajittelukoneen epäluotettavuuteen, etenkin ensimmäisen kahdenkymmenen tunnin aikana. Sen sijaan radan vikaantumisen estäminen vaikuttaa todella merkittävästi koko järjestelmän epäluotettavuuteen. Seuraavassa pylväsdiagrammissa on esitetty eri tarkastelujen tarkat arvot eri aika-arvoilla 50, 100 ja 150 tuntia.



Kuva 6.4 Lajittelukoneen epäluotettavuus eri aika-arvoilla.

Kuvasta 6.4 nähdään, että tarkastellessa järjestelmän vikaantumisen todennäköisyyttä, ero on erittäin merkittävä etenkin silloin, kun edellisen vian korjauksesta on kulunut lyhyt aika. Järjestelmän nykyinen epäluotettavuus on kolminkertainen verrattuna siihen, että rata olisi korvattu täydellisellä komponentilla, kun edellisen vian korjauksesta on kulunut 50 tuntia aikaa. Vikaantumattomien syöttölinjojen tapauksessa ero nykyiseen on vain noin 10 prosenttia. Ero eri vertailujen välillä pienenee ajan kasvaessa, mutta tästä huolimatta radan vikaantumattomuus vaikuttaa epäluotettavuuteen selkeästi syöttölinjoja enemmän.

6.4 Yleisimmät viat ja niiden korjaus

Edellisessä kappaleessa todettiin, että juuri rataan kohdistuneet viat ovat olleet kaikkein merkittävimpiä koko pakettikoneen toiminnan kannalta. Samaan tulokseen päästiin myös kappaleen 5.4 AHP-tarkastelussa, jonka perusteella radan vikaumisesta on eniten haittaa lajittelukoneen käytettävyydelle, kuten taulukosta 5.6 voidaan huomata.

Tarkastellessa rataan kohdistettua vikadataa, voidaan sieltä selkeästi erottaa useimmin toistuvia vikoja. Eniten pysähdyksiä on aiheuttanut IOC 1 tai IOC 2 antureiden aiheuttamat hälytykset. IOC antureiden tehtävänä on tarkkailla vaunujen välejä ja radan pintaa ylimääräisiltä esineiltä, jotka käytännössä poikkeuksetta ovat vaunujen väleihin pudonneita paketteja. Lisäksi pysähdyksiä ovat aiheuttaneet myös muualle pudonneiden pakettien noudot. Todellisuudessa näitä noutoja on huomattavasti enemmän, mutta ne on pyritty ajoittamaan tehtäväksi tuotannon taukojen aikaisesti, jolloin tuotantokatkoja ei pääse syntymään eivätkä poistot tällöin vaikuta lajittelukoneen käytettävyyteen.

Yhteensä pudonneiden pakettien aiheuttamia vikoja oli tarkastelujakson aikana kertynyt 50 kappaletta ja näiden vikojen yhteenlaskettu vika-aika on 3,67 tuntia. Alla olevassa taulukossa on esitetty vertailu pudonneiden pakettien aiheuttamien osuus radan kokonaisvikamäärästä ja epäkäytettävyydestä.

Taulukko 6.2. Pudonneiden pakettien aiheuttamien vikojen osuus.

	Pakettien aiheuttamat viat	Rata Alkuperäinen	Prosenttiosuus
Vikamäärä (kpl)	50	57	87,8
Epäkäytettävyys (h)	3,67	10,33	35

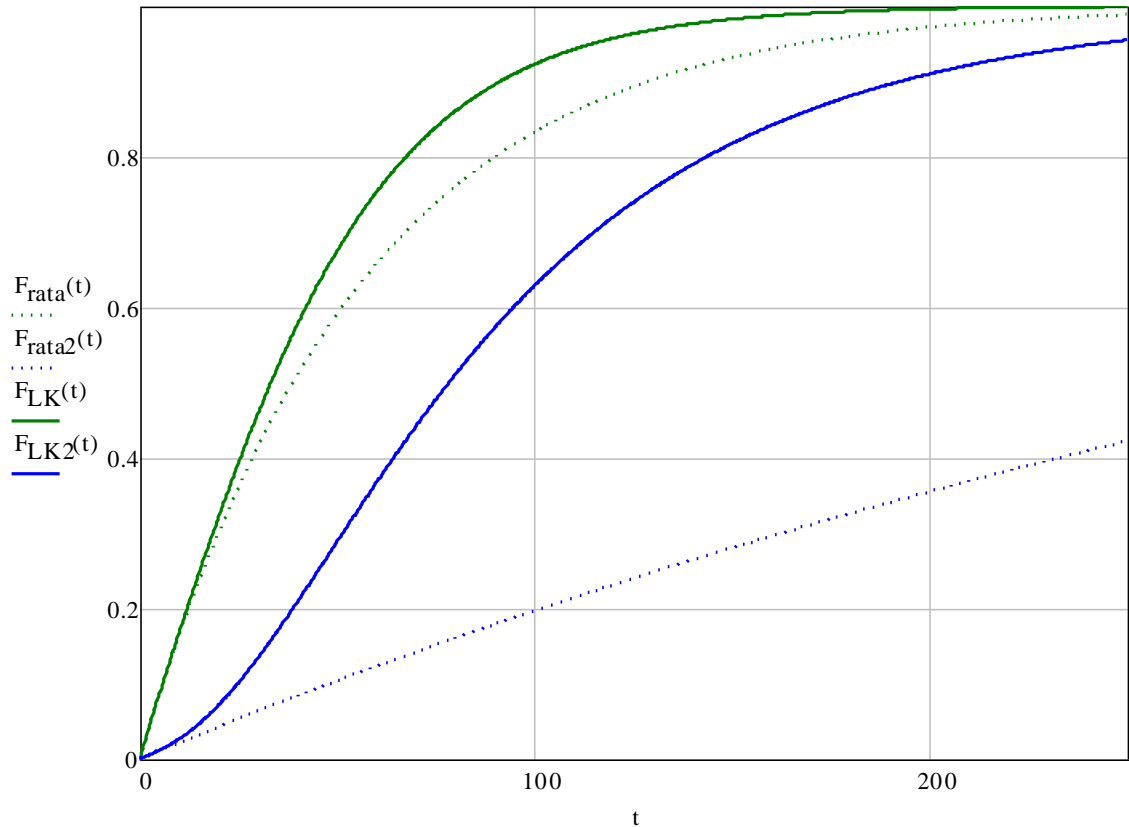
Määrällisesti liki 90 prosenttia vioista aiheutuu vaunuista pudonneista paketeista, kuten taulukosta 6.2 voidaan huomata. Toisaalta yhteenlaskettu epäkäytettävyysaika on vain 35 prosenttia kaikkien vikojen aiheuttamasta ajasta. Tämä johtuu siitä, että pudonneet paketit ovat pääsääntöisesti helppoa ja nopeaa poistaa radalla liikkuvien lamellien välisestä tai verkkojen päältä. IOC1 anturi sijaitsee radalla heti ensimmäisen syöttölinjan jälkeen ja IOC2 anturi toisen ja kolmannen syöttölinjan jälkeen. Järjestelmä on ohjelmoitu pysäyttämään vaunu, jonka yhteydessä vieras esine on havaittu, suoraan huoltotason kohdalle jolloin paketti tai muu häiriötekijä on helppo poistaa. IOC antureille raportoiduista vioista 15 on kohdistunut IOC1 anturiin ja 26 IOC2 anturiin. Loput 9 pudonneisiin paketteihin liittyvistä vioista on kohdistettu muihin radan alatasoihin ja näissä tapauksissa lähetykset ovat pudonneet suojaverkkoihin. Pakettien on havaittu putoavan usein muutamalle tietylle kohdalle rataa ympäröiviin verkkoihin ja kulkua näihin kohteisiin on parannettu. Muita merkittäviä radan epäkäytettävyyteen vaikuttaneita olivat kellopulsianturin virheet ja yksittäiset hajonneet vaunut, joiden korjausta varten rata oli pysäytetty.

Putoava paketti voi kuitenkin pahimmillaan aiheuttaa hyvinkin suuria ongelmia. Mikäli kova paketti pääsee kiilautumaan liikkuvan radan ja esimerkiksi kiinteän tukirakenteen väliin, se voi aiheuttaa suurta tuhoa. Toisessa tapauksessa paketti voi rikkoutua ja pakkettin sisältöä joutua radan sisään, jossa se voi kiilautua esimerkiksi vaunuja ohjaavien renkaiden ja radan väliin. Tarkastelun kohteena olevalle lajittelukoneelle edellä mainittuja tapauksia ei ole vielä sattunut, mutta pidempään käytössä olleilla lajittelukoneilla vastaavia tapauksia on kertynyt lukuisia.

6.5 Yleisimpien vikojen poistaminen ja vaikutukset

Poistamalla pudonneiden pakettien aiheuttamat viat kokonaan, radan pysähdykset saadaan vähenemään 90 prosentilla. Tiedetään myös, että radan toiminta on yhdessä käyttöjärjestelmän kanssa kaikkein kriittisin koko lajittelukoneen toiminnan kannalta. Seuraavassa kuvassa on esitetty radan sekä lajittelukoneen epäluotettavuuden kertymäfunktio tilanteessa, jossa pudonneiden pakettien aiheuttamat viat on poistettu kokonaan vi-

kadastasta. Edellä mainittuihin kuvaajiin viitataan alaindeksillä ”2”. Kuvassa 6.5 on vertailukohtana myös alkuperäisestä vikadastasta muodostetut epäluotettavuuden kertymäfunktiot F_{rata} ja F_{LK} .



Kuva 6.5 Järjestelmän ja radan epäluotettavuus, kun pudonneiden pakettien aiheuttamat viat on poistettu.

Pudonneiden pakettien aiheuttamien vikojen poistamisella on erittäin suuri vaikutus pakettilajittelukoneen toimintavarmuuteen, kuten kuvasta 6.5 voidaan huomata. Erityisesti tilanteissa, joissa edellisen vian korjaamisesta on kulunut vähän aikaa, on ero kuvaajien F_{LK2} ja F_{LK} välillä erittäin suuri. Esimerkiksi ajanhetkellä $t=40$ on tämän hetkisen lajittelukoneen vikaantumisen todennäköisyys $F_{LK}(40)=0,578$ liki kolminkertainen verrattuna todennäköisyyteen $F_{LK2}(40)=0,209$.

Paketit voivat pudota radalle tai lamellien väliin kahdesta eri syystä. Kiihdytyskuljettimet, jotka toimivat viimeisinä kuljettimina ennen paketin siirtymistä lamelleille eivät toimi kunnolla tai paketti on koneeseen kelpaamaton. Kiihdytyskuljettimiin liittyvä ongelma voi olla jokin tai jotkin seuraavista:

- paketti luistaa kiihdytyshihnan päällä
- kuljetinhihnan nopeus on väärä
- kuljetinhihnan ajoitus on väärä
- paketti on väärässä kohtaa kuljetinhihnaa pituussuunnassa
- paketti on väärässä kohtaa kuljetinhihnaa leveysuunnassa.

Kaikki edellä mainitut vaihtoehdot ovat tilanteita, joihin kunnossapito-organisaatio voi vaikuttaa huoltotoimenpiteiden avulla. Paketin luistaminen hihnan päällä voi aiheutua huonokuntoisesta hihnasta, tai liian nopeasta kiihdytyksestä. Hihnan kunnon tarkastus kuuluu ennakkohuolto-ohjelmaan, mutta liian nopean kiihdytyksen aiheuttaman luiston huomaaminen on huomattavasti hankalampaa. Hihnan kiihdytysnopeutta, samoin kuin ajoitusta ja pyörimisnopeutta voidaan muuttaa koneen parametreilla. Paketin väärä sijainti kuljettimen pituussuunnassa voi olla seurausta ajoitusvirheestä aikaisemmilla kuljettimilla tai ongelmista sijaintia mittaavissa valokennoissa. Paketti on voinut myös törmätä radan reunukseen tai takertua muuhun radalla olevaan kohtaan, joka on tyypillinen aiheuttaja myös väärälle sijainnille leveysuunnassa. Oikean juurisyyyn löytämiseksi tarvitaankin usein tarkkaa asiaan radan ja syöttölinjojen toimintaan perehtymistä ja aktiivista tarkkailua pitkällä aikavälillä.

Putoaminen voi aiheutua myös siitä, että paketti on koneeseen kelpaamaton esimerkiksi muotonsa takia. Mikäli paketti on pallomainen tai rullamainen, se voi pyörähtää hallitsemattomasti hihnalla, jolloin sen paikkatiedot hukkuvat tai lamellilla, jolloin se todennäköisimmin putoaa lamellilta. Paketti voi myös tarttua kuljetinhihnaan tai kuljettimien reunuksiin irronneiden pakkausmateriaalien vuoksi. Roikkuva pakkausteippi tai -kelmu voi helposti tarttua ympäröiviin rakenteisiin. Muovipusseissa kuljetettavia lähetyksiä ei myöskään aina saada eroteltua singulaattorin suorittamassa konelajittelussa, jolloin järjestelmä saattaa luulla päällekkäisiä muovipusseja yhdeksi lähetykseksi. Lajittelukoneen nykyinen konenäkö mittaa paketin ääridimensiot, muttei tunnista muotoja. Tällöin kunnossapito-organisaatiolla ei ole realistisia mahdollisuuksia vaikuttaa pakettien muodosta johtuviin ongelmiin. Tällöin vääränlaisen paketin joutuminen lajitteluun on koneen käyttäjän vastuulla. Lajittelussa työskentelevien ihmisten tulisi pystyä erottelemaan lajitteluun kelpaamattomat paketit ja ohjata ne suoraan käsin tehtävään lajitteluun.

7. TARKASTELUJEN TULOKSET JA TOIMENPITEET

Lajittelukoneen vikaantumisen vaikutuksia on tutkittu tässä työssä kahdella eri menetelmällä. Molempia tutkimusmenetelmiä, Analyyttistä hierarkiaprosessia (AHP) ja toimintavarmuuskeskeistä kunnossapitoa (RCM) varten lajittelukone jaettiin seuraavaan viiteen osajärjestelmään toiminnallisuksiensa perusteella:

- Syöttölinja 1
- Syöttölinja 2
- Syöttölinja 3
- Rata
- Käyttöjärjestelmä

7.1 AHP-menetelmän tulokset

AHP-tutkimuksen perusteena käytettiin tarkastelujakson ajalta kerätyn vikadatan lisäksi perusteltuja päätelmiä järjestelmien keskinäisistä vaikutussuhteista. Analyyttisellä hierarkiaprosessilla tutkittiin vikojen määrän, keston ja vikaantuvan kohteen vaikutusta järjestelmän käyttövarmuuteen. AHP:n perusteella järjestelmän toiminnan kannalta kaikkein haitallisinta on radan vikaantuminen. Osajärjestelmän vikaantumisen aiheuttamien haittavaikutusten suuruutta voidaan ajatella myös kyseisen osajärjestelmän tärkeytenä koko järjestelmän käyttövarmuuden kannalta. Analyyttisen hierarkiaprosessin avulla osajärjestelmät saatiin luokiteltua seuraavaan tärkeysjärjestykseen:

1. Rata
2. Käyttöjärjestelmä
3. Syöttölinja 1
4. Syöttölinja 2
5. Syöttölinja 3

Analyyttisellä hierarkiaprosessilla tarkasteltiin myös eri osajärjestelmille tarkoitettuja ennakkohuoltoja. Laitetoimittajan määrittämän ennakkohuolto-ohjelman toteuttamiseen sellaisenaan on käytännössä mahdotonta. Erityisesti syöttölinjoihin kohdistuvat usein tehtävät huollot kuormittavat kunnossapitohenkilöstöä. Vaikka huolloista noin puolet voidaan tehdä pysäyttämättä huollettavaa olevaa laitteistoa, on kokonaishuoltomäärä liian suuri suhteessa yhdessä tuotannon kanssa määritettyihin huoltoaikoihin. Ennakkohuolto-ohjelman perusteella lajittelukoneelle tulee suorittaa vuosittain n. 41 000 huoltoa

tai tarkastusta. Osajärjestelmille kohdistettujen huoltojen määrää ja järjestelmien tärkeyden suhdetta verrattiin hyöty/kustannus analyysillä. Analyysin tuloksena saadut suhdeluvut vaihtelivat suuresti:

- Syöttölinja 1 (0,548)
- Syöttölinja 2 (0,398)
- Syöttölinja 3 (0,194)
- Rata (41,38)
- Käyttöjärjestelmä (18,67)

Sulkeissa ilmoitettu suhdeluku tarkoittaa osajärjestelmälle suunnitellulla huoltomäärällä saavutettavaa hyötyä. Tarkastelun perusteella esimerkiksi radan tärkeys järjestelmän toiminnan kannalta on erittäin suuri suoritettavien huoltojen määrään nähden. Vertailusta ei kuitenkaan tule tehdä suoria päätelmiä huoltojen mahdollisista vähennyksistä. Ennakkohuoltojen vertailussa ei ole otettu huomioon huoltojen tai tarkastusten todellisia kestoja, eikä niiden mahdollisista laiminlyönneistä aiheutuvia seurauksia.

7.2 RCM-analyysin tulokset

RCM-analyysia varten lajittelukoneesta luotiin vikapuumalli, jonka avulla saatiin mallinnettua eri osajärjestelmien vikaantumisen vaikutus koko lajittelukoneen epäluotettavuuteen. Vikapuun perusteella havaittiin, että lajittelukone vikaantuu vain, mikäli kaikki syöttölinjat vikaantuvat yhtä aikaisesti, tai rata tai käyttöjärjestelmä vikaantuu. Laskennassa hyödynnettiin vikadataa, jonka perusteella laskettiin eri osajärjestelmien keskimääräiset vikaantumisaajat. Vikaantumisaikojen perusteella luotiin jokaisen osajärjestelmän, sekä koko lajittelukoneen kumulatiivisen epäkäytettävyyden kertymäfunktiot. Käyttöjärjestelmälle ei koko tarkastelujakson aikana raportoitu yhtään vikaa, joten sillä ei ollut vaikutusta lajittelukoneen epäkäytettävyyteen.

Eri osajärjestelmille tehtiin Risk Reduction Worth-herkkyysanalyysi, jonka perusteella päädyttiin samaan tulokseen kuin AHP-menetelmällä: radan vikaantuminen vaikuttaa eniten järjestelmän luotettavuuteen. Ero on myös hyvin merkittävä. Mikäli radan vikaantuminen saataisiin estettyä kokonaan, lajittelukoneen vikaantumisen todennäköisyys $F_{RRWRata}$ hetkeen $t=50$ mennessä olisi vain noin kolmannes nykyisestä todennäköisyydestä F_{LK} , kun täysin vikaantumattomilla syöttölinjoilla vikaantumisen todennäköisyys $F_{RRWSL123}$ olisi vain noin kymmenen prosenttia nykyistä tilannetta pienempi.

Radan vikaantumisen selvästi yleisin aiheuttaja ovat lamelleilta pudonneet paketit. Miltei 90 prosenttia radan vikaantumisista oli tarkastelujakson aikana aiheuttanut radalle pudonnut lähetys. Lähetysten putoamiselle on useita mahdollisia juurisyyitä, joista muutamiiin voidaan vaikuttaa koneen huolloilla, tarkastuksilla ja säädöillä: Lähetys voi olla väärällä paikalla kuljettimella, joka syöttää lähetysten lamellille tai kuljettimen asetukset voivat olla säädetty väärin, jolloin lähetysten kiihdytys ei tapahdu oikein. Lähetyk-

sen putoaminen voi olla myös tuotannosta riippuvaa, jolloin putoamisen on aiheuttanut koneeseen kelpaamaton lähetys. Tällöin lähetys on saattanut pudota esimerkiksi pyöreän muotonsa tai revenneiden pakkausmateriaalien takia. Vaikka lähetyksen putoaminen oli määrällisesti ylivoimaisesti suurin radan vikaantumisen aiheuttaja, ainoastaan 35 prosenttia epäkäytettävyysajasta johtui pudonneista paketeista, sillä niiden poistaminen radalta tai rataa ympäröiviltä verkoilta on pääsääntöisesti nopeaa.

RCM-analyysin tulokset perustuvat pääosin kahteen tekijään: lajittelukoneesta tähän mennessä raportoituun vikadataan sekä lajittelukoneen vikapuumallin mukaiseen epäluotettavuusfunktioon. Vikojen raportointi tapahtuu kulloinkin vuorossa olevan kunnossapitohenkilön toimesta, joten datassa on mahdollista olla inhimillisistä tekijöistä johtuvia virheitä. On mahdollista, että joitain vikoja on esimerkiksi epäselvissä tapauksissa raportoitu väärälle laitteelle, tai pahimmillaan jätetty kokonaan raportoimatta. Esimerkiksi käyttöjärjestelmälle ei raportoitu yhtään vikaa, vaikka on hyvin mahdollista, että joissain tapauksissa vian aiheuttaja on liittynyt pikemminkin järjestelmään, kuin sillä hetkellä toimintakyvyttömään laitteeseen. Vikojen ilmenemisen todennäköisyydet laskettiin ainoastaan olemassa olevan vikadatan perusteella. Vaikka kyseisellä tarkastelujaksolla käyttöjärjestelmään ei ilmentynyt yhtään vikaa, on kuitenkin erittäin todennäköistä, että jossain vaiheessa myös käyttöjärjestelmä tulee vikaantumaan. Vikojen tarkastelujakso on myös suhteellisen lyhyt ja lajittelukoneen elinkaaren alkupäässä.

Toinen RCM-analyysin tuloksiin oleellisesti vaikuttava tekijä on vikapuumalli, jossa järjestelmä katsotaan vikaantuneeksi vain kaikkien syöttölinjojen yhtäaikaisen vikaantumisen, radan tai käyttöjärjestelmän vikaantumisen seurauksena. Todellisuudessa radoilla on kuitenkin hieman erilaisia käyttötarkoituksia ja esimerkiksi ensimmäisellä syöttölinjalla ei voida lajitella ulkomailta tulevia lähetyksiä. Pääsääntöisesti yhden tai kahden syöttölinjan vikaantuminen ei kuitenkaan estä lajittelukoneen toimintaa, vaikka aiheuttaakin toimenpiteitä tuotannon uudelleenjärjestämiseksi.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia lajittelukoneen osajärjestelmien vaikutusta koko lajittelukoneen käytettävyyteen ja luotettavuuteen. Huolimatta lajittelukoneesta luodussa vikapuumallissa tehdyistä yksinkertaistuksista, on molemmista tutkimusmenetelmistä selkeästi havaittavissa, että juuri radan toimintakuntoisena pysyminen on erittäin tärkeää koko lajittelukoneen toiminnan kannalta. Suurimman vianaiheuttajan, pudonneiden lähetysten, eliminointi on mahdollista yksinkertaisilla ja selkeillä toimenpiteillä. Huoltohenkilöstön tulee varmistaa sisään tuontiyksikköjen jatkuva virheetön toiminta. Tuotannon tulee puolestaan pystyä estämään lajittelukoneeseen kuulumattomien pakettien joutuminen tuotantoon.

Toinen tämän työn tavoitteista oli tunnistaa kehityskohteet suuren ennakkohuoltomäärän järjeistämiseksi. Määrällisesti 90 prosenttia nykyisen ennakkohuolto-ohjelman huolloista kohdistuu syöttölinjoihin, vaikka sekä AHP että RCM analyysien mukaisesti

niillä on rataan ja käyttöjärjestelmään verrattuna pieni vaikutus lajittelukoneen käytettävyyteen ja luotettavuuteen.

LÄHTEET

- [1] Suomen Standardisointimisliitto SFS, SFS-EN 13306 Kunnossapito. Kunnossapidon terminologia, Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, 2010, 55 p.
- [2] J. Järviö, T. Piispa, T. Parantainen, T. Åström, Kunnossapito, 4th ed. Oy Kotkan Kirjapaino Ab, Hamina, 2007, 283 p.
- [3] SFS-Standardisointi, SFS-IEC 60300-1 Luotettavuusjohtaminen. Osa 3: Käyttöopas. Luku 9: Teknisten järjestelmien riskianalyysi, SESKO ry, 2000, 47 p.
- [4] H. Pernu, Käyttövarmuuden ja kunnossapidon perusteet (MEI-60300), 2015, .
- [5] S. Suomen Starndoimisliitto, SFS-IEC 60300-3-11 Luotettavuuden hallinta. Osa 3-11: Sovellusohje. Toimintavarmuuskeskeinen kunnossapito, 2001, 90 p.
- [6] R. Heinonkoski, Koneautomaation kunnossapito, 2. uud. p. ed. Opetushallitus, Helsinki, 2004, 207 sivua p.
- [7] A. Perttula, K. Vattulainen, T. Suurhasko, Todennäköisyyslaskenta. Opintomoniste kurssille MAT-20501. 9th ed. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Tampere, 2010, 93 p.
- [8] M. Rausand, A. Høyland, System reliability theory : models, statistical methods, and applications, 2nd ed. ed. Wiley-Interscience, Hoboken (NJ), cop. 2004, .
- [9] T.L. Saaty, The analytic hierarchy process : planning, priority setting, resource allocation, McGraw-Hill, New York, 1980, 287 s p.
- [10] T.L. Saaty, L.G. Vargas, Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process, 2nd ed. 2012. ed. 2012, XIII, 345p. 106 illus., 5 illus. in color p.
- [11] O. Posti, Posti Vuosikertomus 2014, Posti, web page. Available (accessed 4.2.2016): <http://annualreport2014.posti.com/liiketoimintaryhmat/opuscapita>.
- [12] J. Hurme, Tuotannon esimies, Lajittelukeskuksen tuotannon esimiehen haastattelu 29.9.2016, .
- [13] B.G. Crispland, Post Center of Lieto, E-Doc, 2015.
- [14] J. Niemelä, Haastattelu, kunnossapitoasentaja, .