



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VILLE VUORELA
KUNNOSSAPIDON KEHITTÄMINEN ELMAS-
KÄYTTÖVARMUUSANALYYSIN AVULLA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Seppo Virtanen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekuntaneuvoston kokouksessa 4. joulukuuta
2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

VUORELA, VILLE: Kunnossapidon kehittäminen ELMAS-käyttövarmuusanalyysin avulla

Diplomityö, 74 sivua, 3 liitesivua

Syyskuu 2015

Pääaine: Koneiden käyttövarmuus ja energiatehokkuus

Tarkastaja: professori Seppo Virtanen

Avainsanat: ELMAS, käyttövarmuus, simulointi, RCM, kunnossapito

Käyttövarmuuden hallinta on riskienhallinnan osa-alue, jossa keskitytään järjestelmän käyttövarmuutta vaarantavien teknisten riskien tarkasteluun. Tekniset järjestelmät muodostuvat tyypillisesti useista osajärjestelmistä ja laitteista, jotka keskinäisen vuorovaikutuksen johdosta mahdollistavat järjestelmälle asetettujen toimintojen suorittamisen. Näiden toimintojen ylläpitäminen vaatii niihin liittyvien teknisten riskien tunnistamisen, arvioinnin ja hallinnan. Tämä diplomityö kuvaa Ruukki (nykyinen SSAB) Raahan tehtaan tuotantokriittiselle valunosturille toteutetun ELMAS-käyttövarmuusanalyysin.

Ensisijaisena tavoitteena työssä oli analyysin kohteeksi valitun tuotantokriittisen prosessiosan käyttövarmuus- ja kustannusriskien tunnistaminen sekä kunnossapidon kehittäminen. Toisena tavoitteena oli luoda asiakasyritykselle systemaattinen toimintamalli tuotantokriittisten prosessiosien kustannusriskien hallintaan. Työkaluksi työn toteuttamiseen valittiin riskien tunnistamiseen, tapahtumalogiikan mallintamiseen sekä riskien simulointiin ja analysointiin kehitetty ELMAS-ohjelmisto.

ELMAS-käyttövarmuusanalyysissä sovellettiin FTA-, FMEA- ja RCM-analyysien ominaisuuksia sisältäen mallinnuksen, lähtötietojen arvioinnin, riskien simuloinnin, toimenpiteiden suunnittelun ja toimenpiteiden vaikutusten simuloinnin vaiheet. Valunosturin toimintaa tarkasteltiin laite- ja toimintohierarkiamallien avulla. Toimintohierarkiamallia hyödynnettiin nykytilan riskianalyysissä, jonka aikana kyettiin tunnistamaan potentiaalisimmat valunosturin kohteet ja vikamuodot, joihin tehtävillä toimenpiteillä olisi saavutettavissa merkittävimmät parannukset nosturin käyttövarmuuteen ja kustannuksiin.

Merkittävimmät vaikutukset saavutettiin erilaisten vaihtostrategioiden, muutos- ja saaneeraustöiden sekä kunnonvalvonnan toimenpiteiden avulla. Määritettyjen toimenpiteiden avulla on mahdollista vähentää lähes 23 prosenttia valunosturille riskianalyysissä kohdistuneista kustannusriskeistä. Työn aikana osoitettiin myös simuloinnin käyttökelpoisuus tukemaan erilaisia toimintaskenaarioiden ja investointien tarkasteluja. Erityisesti käyttövarmuuden, vikalogiikan ja eri kustannustekijät yhdistävät, suhteelliset riskitulosloket havaittiin mielenkiintoisiksi ja arvokkaiksi.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

VUORELA, VILLE: Maintenance development using ELMAS dependability analysis

Master of Science Thesis, 74 pages, 3 Appendix pages

September 2015

Major: Reliability and energy efficiency of machines

Examiner: Professor Seppo Virtanen

Keywords: ELMAS, dependability, simulation, RCM, maintenance

Dependability management is an integral part of risk management. It focuses on technical issues that may lead to system unavailability. Modern technical systems usually consist of numerous complex subsystems and devices that operate in mutual interaction enabling the system to fulfill its operative requirements. In order to maintain system's ability to fulfill its operative requirements a systematic method for identification, assessment and control of the technical risks is required. This master's thesis describes the ELMAS dependability analysis performed for the production critical molding crane at Ruukki (today SSAB) Raahe factory.

The main objective of the study was to identify dependability and cost risks and the maintenance development of chosen production critical process entity. Another objective was to create a systematic procedure for the customer organization to manage the cost risks of production critical process entities. The ELMAS Software, which is developed for risk identification, event logic modeling, risk simulation and analysis was chosen as a tool to carry out this task.

The features of FTA-, FMEA- and RCM-analysis were applied in the ELMAS dependability analysis including modeling, data evaluation, risk simulation, action planning and effects of actions simulation phases. The operation of the molding crane was studied through device and function hierarchy models. The function hierarchy model was utilized with the current state risk analysis pointing out the components and failure modes which maintenance actions have the best improvement potential on the dependability and costs of the crane.

The most significant effects were achieved through different replacement strategies, modification and renovation work together with condition monitoring actions. There is possibility to decrease almost 23 percent of the cost risks on the molding crane with the defined actions. The simulation of different operation scenarios and investments was also proven very useful during the work. Especially relative risk results which combine dependability, failure logic and different cost factors were found interesting and valuable.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö pohjautuu Ramentor Oy:n ja Ruukki (nykyinen SSAB) Raahen yhteistyössä toteuttamaan kunnossapidon kehitysprojektiin, jonka aikana tarkasteltiin yksi Raahen tehtaan valunostureista.

Haluan esittää kiitokseni kunnossapidon kehitysprojektiin osallistuneille Ruukki Raahen analyysiryhmän jäsenille hyvästä ryhmätyöhengestä, sitoutumisesta sekä ennakkoluulottomasta työskentelystä yhteisen tavoitteen eteen. Erityiskiitoksen esitän Ruukki Raahen Sami Pengerkoskelle sekä työn ohjaajalleni Ramentor Oy:n Miikka Tammelle heidän antamansa avun johdosta kehitysprojektin aikana muodostetun toimintamallin saattamiseksi diplomityön muotoon.

Kiitän lisäksi professori Seppo Virtasta hänen tarjoamastaan akateemisesta tuesta työn sisällön määrittämisessä sekä työn tarkastuksessa.

Maarit, muu kotiväki ja opiskelutoverit ansaitsevat myös suuret kiitokset ymmärryksestä sekä antamastaan tuesta opintojen loppuun saattamiseksi.

Tampereella, 21.8.2015

Ville Vuorela

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
1.1	Työn taustaa	1
1.2	Kohdeyritys	1
1.3	Työn tavoitteet ja kohteen valinta	2
1.4	Tutkimusmenetelmät ja työn vaiheet	3
2	KÄYTTÖVARMUUSTEKNIikka	4
2.1	Käyttövarmuuden käsitteet	4
2.2	Vikaantumisen ja korjattavuus	5
2.3	Luotettavuustekniikka	7
2.3.1	Korjaus-vika -prosessi	7
2.3.2	Vika-korjaus -prosessi	10
2.3.3	Käyttövarmuuden aikakäsitteet ja matemaattinen määrittely	11
2.4	Vikojen kehittyminen elinkaaren eri vaiheissa	14
2.4.1	Vikaantumismallit	15
2.4.2	Vikataajuuden soveltaminen luotettavuustarkastelussa	16
2.5	Järjestelmän luotettavuus	18
2.6	Käyttövarmuustiedot	21
3	KUNNOSSAPITO	23
3.1	Kunnossapidon määrittelmä	23
3.2	Kunnossapitolajit	24
3.3	Kunnossapidon kustannukset	26
4	KÄYTTÖVARMUUDEN ANALYSOINTI	28
4.1	Kvalitatiiviset menetelmät	29
4.2	Kvantitatiiviset menetelmät	33
5	RCM – LUOTETTAVUUSKESKEINEN KUNNOSSAPITO	34
5.1	Kohteen toiminnot ja suorituskyky	34
5.2	Toiminnan estävien vikojen tunnistaminen	35
5.3	Toiminnallisten vikojen aiheuttajien tunnistaminen	35
5.4	Mitä tapahtuu vikamuodon synnyttyä	36
5.5	Toiminnallisten vikojen luokittelu ja toimenpiteiden määrittely	36
6	ELMAS KÄYTTÖVARMUUDEN HALLINNAN TYÖKALUNA	40
6.1	Mallinnus	41
6.2	Simulointi	41
6.3	Analysointi	43
7	VALUNOSTURIN KÄYTTÖVARMUUSANALYYSI	45
7.1	Mallinnus	45
7.1.1	Laitehierarkiamalli	45
7.1.2	Toimintohierarkiamalli	46
7.1.3	Häiriöiden tunnistaminen	47
7.1.4	Toimintohierarkian erityispiirteet	48
7.2	Vikahistorian analysointi	50

7.3	Nykytilan riskianalyysi	51
7.3.1	Lähtötietojen arviointi.....	51
7.3.2	Riskien simulointi ja analysointi.....	55
7.4	Riskien pienentäminen	57
7.4.1	Vikamuotojen yksityiskohtainen arviointi.....	58
7.4.2	Soveltuvien ja tehokkaiden toimenpiteiden määrittely	60
7.4.3	Toimenpiteiden vaikutusten simulointi	62
8	YHTEENVETO	70
8.1	Analyysivaiheet ja tulokset	70
8.2	Menetelmän soveltuvuus.....	71
8.3	Mallien ylläpito ja päätöksenteko	72
	LÄHTEET.....	73

LIITE A: TOIMENPITEIDEN MÄÄRITTELY RCM-LOGIKKAKAAVIOSSA (PIILEVÄ VIKA)

LIITE B: VALUNOSTURIN VIKOJEN JAKAUTUMINEN HISTORIASSA

LIITE C: VALUNOSTURIN EPÄKÄYTETTÄVYYDEN JA VIKOJEN JAKAUTUMINEN RISKIANALYYSISSÄ

LYHENTEET, MERKINNÄT JA TERMIT

Lyhenteet:

ELMAS	Tapahtumalogiikan mallinnus- ja analysointiohjelmisto
ETA	Tapahtumapuuanalyysi (Event Tree Analysis)
FMEA	Vika- ja vaikutusanalyysi (Failure Mode and Effects Analysis)
FTA	Vikapuuanalyysi (Fault Tree Analysis)
HAZOP	Poikkeamatarkastelu (Hazard and Operability study)
HEA	Toimintovirheanalyysi (Human Error Analysis)
MDT	Keskimääräinen seisonta-aika (Mean Down Time)
MLDT	Korjauksen aloituksen keskimääräinen logistinen viive (Mean Logistics Delay Time)
MTBF	Keskimääräinen vikaantumisväli (Mean Time Between Failures)
MTTF	Keskimääräinen vikaantumisaika (Mean Time To Failure)
MTTR	Keskimääräinen korjausaika (Mean Time To Repair)
RBD	Luotettavuuslohkokaavio (Reliability Block Diagram)
RCM	Luotettavuuskeskeinen kunnossapito (Reliability Centered Maintenance)

Matemaattiset merkinnät:

A_{av}	Keskimääräinen käytettävyys
$f(t)$	Vikaantumisajan tiheysfunktio
$F(t)$	Vikaantumisajan kertymäfunktio
$g(t)$	Korjausajan tiheysfunktio
$G(t)$	Korjausajan kertymäfunktio
$h(t)$	Hasardifunktio
$I(t)$	Informaatiofunktio
$R(t)$	Luotettavuusfunktio
$X(t)$	Tilamuuttuja
$\lambda(t)$	Vikataajuus
λ	Vakiovikataajuus

Termit:

Katkosjoukko	Vikapuun huipputapahtuman toteuttava perustapahtumien tai perustapahtumien yhdistelmien joukko.
Kunnossapidettävyys	Kohteen kyky tulla määrättyissä olosuhteissa palautetuksi sellaiseen tilaan, jossa se kykenee suorittamaan siltä vaadittu toiminnon.
Kunnossapitovarmuus	Kunnossapito-organisaation kyky tarjota kohteelle tarpeen tullen sen tarvitsemat huoltoresurssit määrättyjen olosuhteiden vallitessa.
Käytettävyys	Kohteen kyky olla siltä vaadittavassa toimintakunnossa määrättyissä olosuhteissa halutulla ajanhetkellä, tai tietyn ajanjakson aikana olettaen, että kaikki tarvittavat resurssit ovat saatavilla.
Käyttövarmuus	Kohteen käytettävyyden ja siihen vaikuttavien tekijöiden muodostama kokonaisuus.
Mallinnus	Tarkasteltavan tapahtuman toiminnallisuuden tai ei-toivottujen tapahtumien syy-seurausketjujen kuvaaminen graafisesti.
Oireileva vika	Havaittavissa olevat muutokset kohteen toiminnassa, jotka kertovat vikaantumisen kehittymisen alkamisesta.
Perustapahtuma	Vikapuun juurisyy
P-F -käyrä	Osoittaa vian kehittymisen vaiheet vian alkamisesta toiminnallisen vian syntymiseen
Simulointi	Menetelmä tutkittavan järjestelmän tai ilmiön tietokoneavusteiselle käyttäytymisen tarkastelulle.
Toimintavarmuus	Todennäköisyys, että kohde toimii määritellyissä olosuhteissa ilman vikaantumista tarkastelujakson ajan.
Vikaantuminen	Kohteen siirtyminen tilaan, jossa se ei enää kykene suoriutumaan käyttäjän siltä edellyttämistä tehtävistä.
Vikaantumismalli	Kuvaa osan elinkaarenaikaisen vikaantumiskäyttäytymisen.

1 JOHDANTO

1.1 Työn taustaa

Käyttövarmuuden hallintaan soveltuvia analyysimenetelmiä on kehitetty viimeisten vuosikymmenten varrella useita - kvalitatiivisia sekä kvantitatiivisia. Osa näistä keskittyy riskien ja häiriöiden tunnistamiseen, osa syy-seurausketjujen ymmärtämiseen sekä kuvaamiseen, ja osa lisäksi riskien suuruuden arvioimiseen. Nämä menetelmät ovat olleet laajalti käytössä jo vuosikymmenien ajan ja niille kaikille löytyy oma paikkansa riskianalyyseiden joukosta.

Ongelmana on, että nämä menetelmät ovat usein perusteellisuuden tarpeisiin liian raskaita ja kömpelöitä. Lisäksi ne eivät aina sovellu kompleksisten kohteiden tai ongelmien analysointiin. Kun analyysin kohde ei ole turvallisuuskriittinen, tarvitaan tehokkaampia, kevyempiä ja joustavampia menetelmiä. Perusteellisuuden puolella mielenkiinto kohdistuu tyypillisesti kustannuksiin. Usein tavoitteena on tunnistaa tuotannon pullonkaulat, epäkäytettävyyden juurisyyt, analysoida parannuspotentiaaleja, suunnitella erilaisia parantavia toimenpiteitä ja vertailla erilaisia skenaarioita ja investointeja.

ELMAS (Event Logic Modeling and Analysis Software) on työkalu riskien tunnistamiseen, tapahtumalogiikan mallintamiseen sekä riskien simulointiin ja analysointiin. ELMAS sisältää sekä kvalitatiivisia että kvantitatiivisia analyysimenetelmiä ja yhdistää tunnettujen analyysimenetelmien parhaat puolet toimivaksi kokonaisuudeksi saman käyttöliittymän alle. ELMAS:n stokastista simulointimootoria pystyy hyödyntämään myös hyvin kompleksisten ja laajojen mallien analyyseissä.

Tämä diplomityö kuvaa Ruukki (nykyinen SSAB) Raahen tehtaan tuotantokriittiselle valunosturille toteutetun ELMAS-käyttövarmuusanalyysin taustat, toteutuksen ja tulokset.

1.2 Kohdeyritys

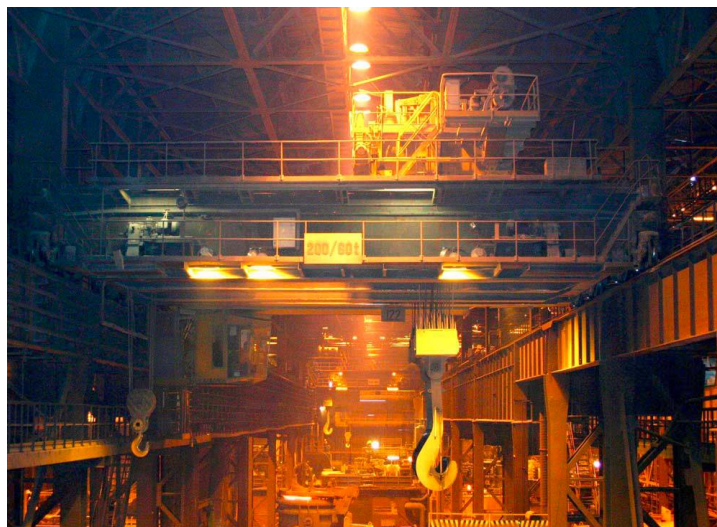
Rautaruukki on vuonna 1960 perustettu teräksen valmistukseen ja terästuotteiden jalostukseen erikoistunut yhtiö. Yhtiö perustettiin takaamaan Suomen laivanrakennus- ja metalliteollisuuden raaka-aineiden saanti. Rautaruukilla on ollut teräksenvalmistusta Raahessa 60-luvulta lähtien. Teräksen jatkojalostus kylmävalssauksen ja sinkityksen muodossa aloitettiin Hämeenlinnassa 70-luvulla. 1990-luvun alussa Rautaruukki laajensi toimintaansa rakennusteollisuuteen. [28]

Vuoteen 2004 saakka yhtiö tunnettiin Rautaruukki nimellä, jonka jälkeen konsernin eri yritykset alkoivat käyttää yhteistä Ruukki-markkinointinimeä. Ruukista tuli kesällä 2014 yhdistymisen myötä osa SSAB:tä. Maailmanlaajuisesti toimivalla teräsyhtiöllä on yhdistymisen myötä noin 17 300 työntekijää 50 maassa. SSAB valmistaa asiakkailleen pitkälle kehitettyjen lujien terästen ja nuorrutusterästen lisäksi nauha-, levy- ja putki-tuotteita sekä rakentamisen ratkaisuja. Yhtiön Ruotsin, Suomen ja Yhdysvaltojen teräs-tehtaiden vuotuinen teräksen tuotantokapasiteetti on 8,8 miljoonaa tonnia. [28]

1.3 Työn tavoitteet ja kohteen valinta

Työn ensisijaisena tavoitteena oli analyysin kohteeksi valitun tuotantokriittisen prosessiosan käyttövarmuus- ja kustannusriskien tunnistaminen sekä kunnossapidon kehittäminen. Toisena tavoitteena oli luoda asiakasyritykselle systemaattinen toimintamalli tuotantokriittisten prosessiosien kustannusriskien hallintaan. Perinteisiä taulukkomuotoisia analyysimenetelmiä, kuten vika- ja vaikutusanalyysi (FMEA) ja luotettavuuskeskeinen kunnossapito (RCM), oli jo aiemmin asiakasyrityksessä hyödynnetty, mutta ne oli koettu raskaiksi. Uudelta analyysimenetelmältä ja toimintamallilta kaivattiin joustavuutta, virtaviivaisuutta ja tehokkuutta, jotta sen soveltaminen onnistuisi myös käytännössä.

Kunnossapidon kehityskohteeksi valittiin tehtaan valutoimintaan keskeisesti osallistuva kuvassa 1 esitetty valunosturi n:o 123. Valunosturin valintaa analyysin kohteeksi puolsi kolme asiaa. Ensimmäinen asia oli tuotantokriittisyys. Toisena tekijänä olivat valunosturista tarjolla olleet aiemmat analyysit, joiden hyödynnettävyys osana nosturin kunnossapidon kehitystyötä haluttiin selvittää. Lisäksi vastaavanlaisia valunostureita löytyy Ruukki Raahen tehtaalta seitsemän kappaletta, joten historiatietoa ja kokemusta kohteen käyttövarmuudesta oli kertynyt runsaasti ja toisaalta analyysin tulokset olisivat helposti hyödynnettävissä kaikille nostureille.



Kuva 1. Valunosturi n:o 123

Analyysikohteeksi valittu valunosturi n:o 123 koostuu sillasta, päävaunusta ja apuvaunusta. Nosturin pitkät vaakasiirrot tehdään siltaa siirtämällä kulkukiskoja pitkin. Kun taas nosturin pää- ja apuvaunuja voidaan liikutella sillan päällä niiden omilla kulkukoillaan pitkäikäisyyssuunnassa. Päänoston avulla nostetaan ja siirretään täydet ja tyhjät terässenkat. Muut kuormat, kuten esimerkiksi välisenkan nosto ja terässenkan kallistus tehdään apunoston avulla. Päänoston avulla voidaan nostaa korkeintaan 200 tonnin kuormia ja vastaavasti apunostolla 60 tonnin kuormia. [22]

1.4 Tutkimusmenetelmät ja työn vaiheet

Työn teoriaosuudessa keskitytään kirjallisuuden avulla luomaan pohja määritelmille ja menetelmille, joita teknisten riskien hallintaan liittyy. Teoriaosuudessa lähdetään liikkeelle käyttövarmuustekniikan teoriasta ja tunnusluvuista (luku 2). Kunnossapidon toimenpidetyypit ja kunnossapitoon liittyvät kustannusriskit käsitellään teoriaosuuden toisessa osiossa (luku 3). Järjestelmien teknisten riskien analysointimenetelmiin tutustutaan käyttövarmuuden analysointi -luvun yhteydessä (luku 4). Työn kannalta merkittävien analyysimenetelmä, RCM sekä sen soveltamisessa hyödynnetty ELMAS-ohjelmisto, käydään yksityiskohtaisemmin läpi teoriaosuuden lopuksi (luvut 5 ja 6).

Työn soveltavassa osuudessa toteutettu ELMAS-käyttövarmuusanalyysi (luku 7) käsittelee seuraavat kokonaisuudet:

- Kohteeseen tutustuminen
- Valunosturin laite- ja toimintohierarkian mallinnus
- Vikahistorian analysointi
- Tunnistettujen tapahtumien arviointi
- Riskien simulointi ja analysointi
- Merkittävimpien vikamuotojen riskien pienentäminen
- Tulosten raportointi

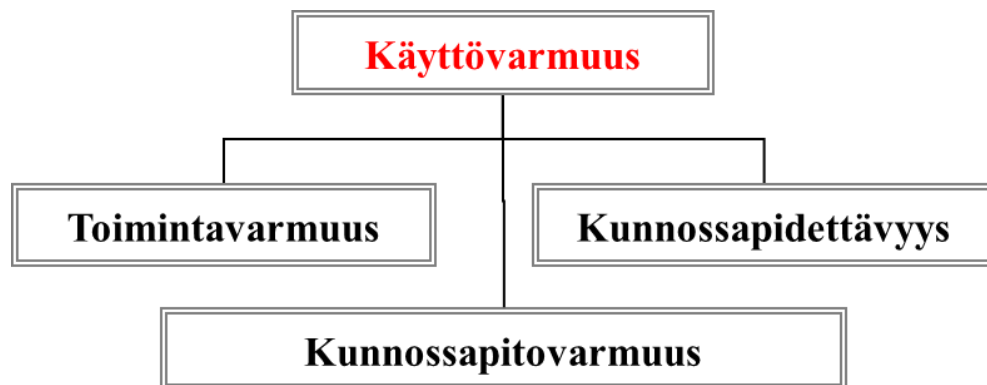
Analyysiryhmä koostui seitsemästä asiakasyrityksen luotettavuus-, mekaniikka- ja sähköasiantuntijasta sekä Ramentor Oy:n analyysin vetäjästä ja ELMAS-operaattorista. Työskentelytavoiksi analyysin toteuttamiseksi valittiin viikoittaiset työistuntopäivät, joihin osallistutettiin eri osastojen asiantuntijoita päivän sisällön mukaan. Aikaa varattiin myös istuntopäivien ulkopuolella tehtäville valmisteluille työistuntojen tehostamiseksi sekä siellä kerättyjen tietojen kokoamiseksi ja käsittelemiseksi. Toimintamallin mukainen ELMAS-käyttövarmuusanalyysi toteutettiin loppuvuodesta 2012 noin 3 kuukaudessa tavoitteiden mukaisessa aikataulussa.

2 KÄYTTÖVARMUUSTEKNIikka

Käyttövarmuustekniikan luvussa käydään kokonaisvaltaisesti läpi käyttövarmuustekniikkaan liittyvä teoria ja sen tunnuslukujen taustalla olevat matemaattiset määritelmät. Käyttövarmuustekniikan luku aloitetaan käyttövarmuuskäsitteiden esittelyllä. Luvun toisessa alaluvussa käydään läpi käyttövarmuuteen vaikuttavat vikaantumisen ja korjattavuuden osatekijät. Luotettavuustekniikan osuudessa tutustutaan käyttövarmuuden ja sen osatekijöiden matemaattisiin määritelmiin. Alaluvussa 2.4 perehdytään erilaisiin vikaantumismalleihin ja niille ominaisiin vikajakaumiin. Käyttövarmuustekniikan luku päättyy erilaisten järjestelmärakenteiden ja järjestelmän luotettavuustietojen keräämisessä hyödynnettävien tietolähteiden esittelyyn.

2.1 Käyttövarmuuden käsitteet

Osan aikaan liittyviä laatuominaisuuksia kuvataan kollektiivisen käyttövarmuus termin avulla. Käyttövarmuus ilmaisee osan kyvyn toimia ilman vikaantumista ja kyvyn olla palautettavissa toimintakuntoon osan vikaannuttua. Käyttövarmuus sisältää käytettävyyden ja siihen vaikuttavat kuvassa 2 esitetyt tekijät. [19,25]



Kuva 2. Käyttövarmuuden osatekijät ”perustuu lähteeseen [31]”.

Kohteen käyttövarmuus muodostuu kohteelle sen suunnittelu- ja valmistusvaiheessa muodostuneista teknisistä ominaisuuksista sekä kunnossapito-organisaation kyvystä ylläpitää kohteen teknisille ominaisuuksille asetettuja vaatimuksia. Myös kohteen käyttö- ja kunnossapitotavoilla voidaan perustellusti olettaa olevan merkittävä yhteys kohteen käyttövarmuuteen.

Käyttövarmuuteen vaikuttavia kohteen teknisiä ominaisuuksia kuvataan toimintavarmuuden ja kunnossapidettävyyden avulla. Toimintavarmuus kuvaa todennäköisyyttä, että kohde toimii määritellyissä olosuhteissa ilman vikaantumista tarkastelujakson ajan. Toimintavarmuudesta käytetään myös nimitystä luotettavuus. Kunnossapito-kirjassa on esitetty toimintavarmuuteen vaikuttavina tekijöinä [10, s. 36]:

- Konstruktio
- Rakenteellinen kunnossapidettävyys
- Asennus
- Huolto (tarve, toteutus)
- Käyttö
- Varmennus

Kunnossapidettävyys määritellään standardeissa kohteen teknisten ominaisuuksien muodostamaksi kyvykkyudeksi olla pidettävissä tai palautettavissa tilaan, jossa se pysyy suorittamaan vaaditun toiminnon. Määritelmään liittyy vaatimus, että kohteen ja kunnossapidon tulee suorittaa tehtävänsä määritellyissä olosuhteissa ja, että kunnossapidossa käytetään vaadittuja menetelmiä ja resursseja. [16,25] Kohteen kunnossapidettävyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat vian havaittavuus, huollettavuus ja korjattavuus [10, s. 37].

Kunnossapitovarmuus kuvaa kunnossapito-organisaation kyvykkyyttä suorittaa siltä vaadittu tehtävä vaadittuna aikana tehokkaasti kohteen käyttö- ja kunnossapitopaikan mukaisissa olosuhteissa. Kunnossapito-organisaation kyvykkyuteen vaikuttavia tekijöitä ovat kunnossapidon hallinnoinnin ja varaosien saatavuuden lisäksi toimintaan liittyvät rutiinit ja dokumentaatiot, unohtamatta päteviä kunnossapitäjiä ja heidän työssään tarvitsemiaan korjausvarusteita. [10,16]

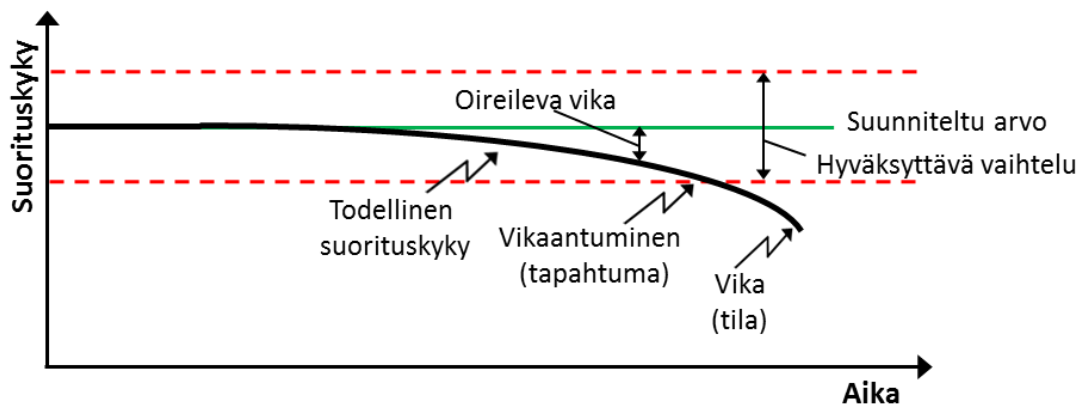
Teknisten järjestelmien toiminnan ja luotettavuusteknisten ominaisuuksien mittaamiseksi on olemassa erilaisia tunnuslukuja. Näitä tunnuslukuja hyödynnetään järjestelmän elinkaaren eri vaiheissa muun muassa kunnossapidon suunnittelussa ja kehittämisessä. Tässä yhteydessä tunnuslukuista on syytä esitellä käyttövarmuuden tunnusluku käytettävyys, joka kuvaa järjestelmän kokonaisvaltaista toimintakykyä. SFS-EN 13306 ja PSK 6201 standardit määrittelevät käytettävyyden kohteen kyvyksi olla tilassa, jossa se kykenee tarvittaessa suorittamaan vaaditun toiminnon tietyissä olosuhteissa olettaen, että vaaditut ulkoiset resurssit ovat saatavilla. Käyttövarmuuteen liittyviä tunnuslukuja käsitellään tarkemmin luvussa 2.3.3.

2.2 Vikaantuminen ja korjattavuus

Ennen toimintavarmuus määritelmän yksityiskohtaisempaa avaamista on syytä tarkastella vikaantumisen käsitettä. Yleisen määritelmän mukaan laite katsotaan vikaantuneeksi tilanteessa, jossa se ei enää kykene suoriutumaan käyttäjän siltä edellyttämistä

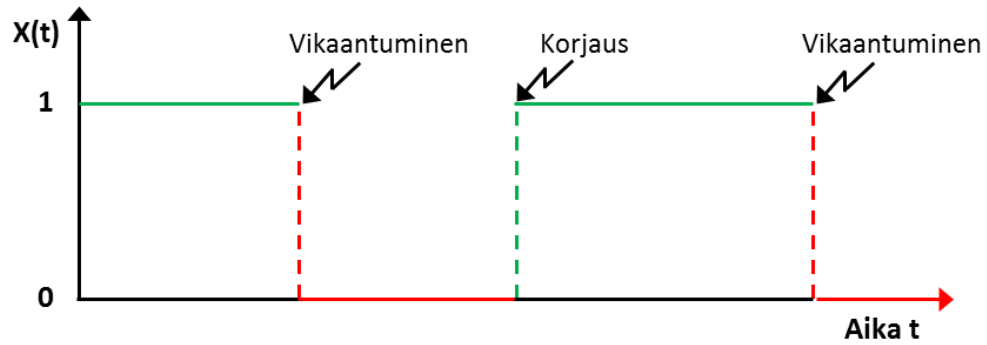
tehtävistä. Toisin sanoen laitteen toiminta poikkeaa ennalta määritellyissä vaatimuksissa. Käytännössä laitteen kunnossapidosta, käytöstä ja turvallisuudesta vastaavilla henkilöillä voi olla omat näkemyksensä laitteen vikaantumisen. Tarkastelevasta tahosta riippuen laite voidaan esimerkiksi tulkita vikaantuneen eri vaiheessa käyttöä, jos vaatimukset ymmärretään eri tavalla. [15, s. 46–51]

Vikaantumiselle on ominaista, ettei se synny itsekseen tai hetkessä, vaan jokaisella vikatilalla on olemassa niille ominainen vikaantumisen kehitysketju. Vika kehittyy lopulliseen laitteen toiminnan estävään tilaan sille ominaisen vikaantumismekanismien mukaisesti, mikäli vian kehitykseen ei puututa ajoissa. [10,15] Kuvassa 3 on esitetty laitteen vikatilaa edeltävä suorituskyvyn heikkeneminen kohti lopullista vikaantumista. Vikaantumista edeltävää sallitun rajan sisällä tapahtuvaa todellisen suorituskyvyn ja tavoitetasoa eroa nimitetään oireilevaksi viaksi tai häiriöksi, joka tyypillisesti on merkki vian kehittymisen alkamisesta. [19, s. 84] Vikaantumisen jälkeen laite on vikatilassa, kunnes se palautetaan normaalitilaan korjauksen avulla. Vikatilasta normaalitilaan palauttava vika-korjaus -prosessi on esitetty luvussa 2.3.2.



Kuva 3. Oireileva vika, vikaantuminen ja vika ”perustuu lähteeseen [19, s. 84]”.

Kuvasta voidaan havaita laitteen toiminnan yksinkertaistetusti muodostuvan kahdesta erilaisesta toiminnallisesta tilasta. Näiden toiminnallisten tilojen mukaan laite joko normaalitilassa suorituskyvyn ollessa hyväksyttävällä tasolla toimii tai suorituskyvyn pudotessa hyväksyttävän tason alapuolelle on vikaantuneena. Toiminnallisten tilojen avulla esitettynä laitteen vikaantumisen tarkoitetaan sen tilamuutosta normaalitilasta (1) vikatilaan (0). Kuvassa 4 on esitetty laitteen toiminnalliset tilat ajan funktiona tilamuuttujan $X(t)$ avulla. [12,19]



Kuva 4. Laitteen tilamuutokset ”perustuu lähteeseen [19, s. 16]”.

Vikaantumisen jälkeen järjestelmä, järjestelmän osa tai laite sen korjattavuudesta riippuen joko palautetaan korjauksen avulla takaisin normaalitilaan tai jätetään vikatilaan. Korjauksen avulla normaalitilaan palautettavia osia kutsutaan korjattaviksi osiksi ja vastaavasti ei-korjattaviksi osiksi kutsutaan osia, joita ei vian jälkeen syystä tai toisesta korjata. Järjestelmä koostuu eri määrästä korjattavia ja ei-korjattavia osia. Tilavaihteluiden ja tilojen kestojen avulla järjestelmälle ja sen korjattaville ja ei-korjattaville osille voidaan muodostaa erilaisia toimintaa kuvaavia tunnuslukuja. [12,19]

2.3 Luotettavuustekniikka

Käyttövarmuuden matemaattisen määritelmän ymmärtämiseksi on hyvä ensiksi muodostaa ymmärrys sen osatekijöihin. Näistä matemaattisista määritelmistä keskeisin käyttövarmuuden kannalta on osan toimintavarmuutta kuvaavan luotettavuuden ja siihen liittyvien tekijöiden määrittäminen. Osan luotettavuutta tarkastellaan korjaus-vika-prosessin avulla. Vastaavasti viasta palautumiseen liittyviä tekijöitä tarkastellaan vika-korjaus -prosessin avulla. Näin ollen korjattavan osan elinkaaren aikainen toiminta muodostuu toistuvasta korjaus-vika-korjaus -prosessista. [12,19]

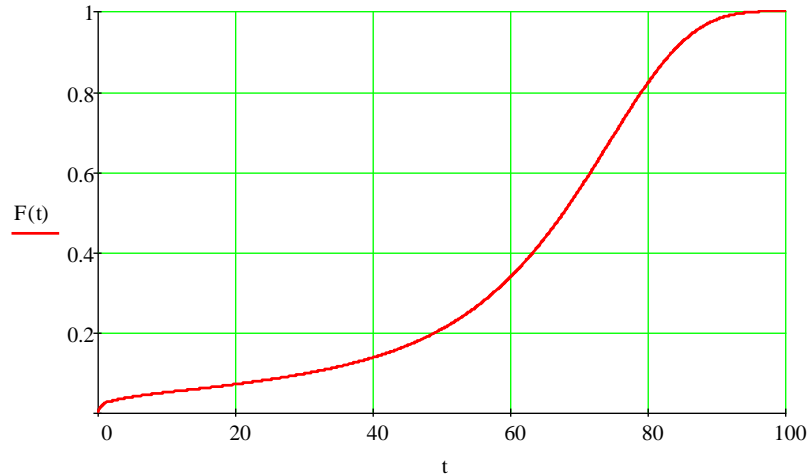
2.3.1 Korjaus-vika -prosessi

Osan luotettavuus muodostuu joukosta tieteen kahlitsevia tilastollisia funktioita, jotka mahdollistavat osan luotettavuuden mittaamisen [4, s. 93]. Osan luotettavuuden määrittäminen on luontevinta aloittaa kuvaamalla ensin osan vikaantumiskäyttäytyminen. Eräs tapa osan vikaantumiskäyttäytymisen kuvaamiseksi on muodostaa samanlaisten osien vikaantumisaajoista kuvaaja, jossa osien vikaantumisaajat arvotetaan kumulatiiviseksi esitykseksi välille [0, 1]. Tämä osien vikaantumisaajoista empiirisesti muodostettu kertymäesitys kuvaa osan epäluotettavuuden $F(t)$. Todennäköisyysesityksenä osan epäluotettavuus muuttuu yhtälössä 1 esitettyyn muotoon. [2,12,19]

$$F(t) = \Pr(T \leq t) \quad (1)$$

Kuvassa 5 on esitetty esimerkki epäluotettavuusfunktion kertymäkuvaajasta. Kertymäkuvaajan tulkintaa liittyy kaksi vaihtoehtoista tapaa. Uuden yksittäisen satunnaisesti

valitun osan kohdalla epäluotettavuuden funktio osoittaa vikaantumistodennäköisyyden hetkeen t mennessä. Vaihtoehtoisesti soveltamalla epäluotettavuuden funktiota joukkoon uusia osia sen tulkinta muuttuu osoittamaan hetkeen t mennessä vikaantuneiden yksilöiden osuutta koko joukosta. Epäluotettavuuden funktio osoittaa myös rajatulle aikavälille kertyneen vikaantumistodennäköisyyden yksilölle tai vikaantuneiden yksilöiden osuuden koko joukosta. [12,19]



Kuva 5. Epäluotettavuuden kertymäkuvaaja $F(t)$ [31].

Osan toimintavarmuutta kuvaava luotettavuus voidaan esittää yhtälössä 2 esitetyn luotettavuusfunktion $R(t)$ avulla, joka tunnetaan myös selviytymisfunktiona $S(t)$. Luotettavuusfunktio kuvaa todennäköisyyttä, jolla osa toimii ilman vikaantumista aikajakson $[0, t]$. Luotettavuusfunktion käyttöön sisällytetään oletus, että osa on hetkellä $t=0$ uutta vastaavassa kunnossa. Järjestelmän toimintavarmuus määräytyy sen osien luotettavuusfunktioiden muodostamana tuloksena. [12,19]

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2)$$

Edellä esitetyistä luotettavuusfunktioista voidaan johtaa epäluotettavuuden funktio $F(t)$ yhtälön 3 mukaisesti.

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (3)$$

Koska osa on hetkellä t joko toimiva tai vikaantunut, niin sen luotettavuus- ja epäluotettavuusfunktioilla on toisiaan täydentävä yhtälössä 4 esitetty ominaisuus.

$$F(t) + R(t) = 1 \quad (4)$$

Yhtälön 2 ja siitä johdettavien yhtälöiden käyttöön sisältyy yhtälöissä 5-8 esitetyt osan luotettavuutta ja epäluotettavuutta koskevat ehdot. Nämä ehdot osoittavat sekä osan luotettavuuden että epäluotettavuuden rajaavan sisälleen aina ykkösen suuruisen alueen.

$$\lim_{t \rightarrow 0} R(t) = 1 \quad (5)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0 \quad (6)$$

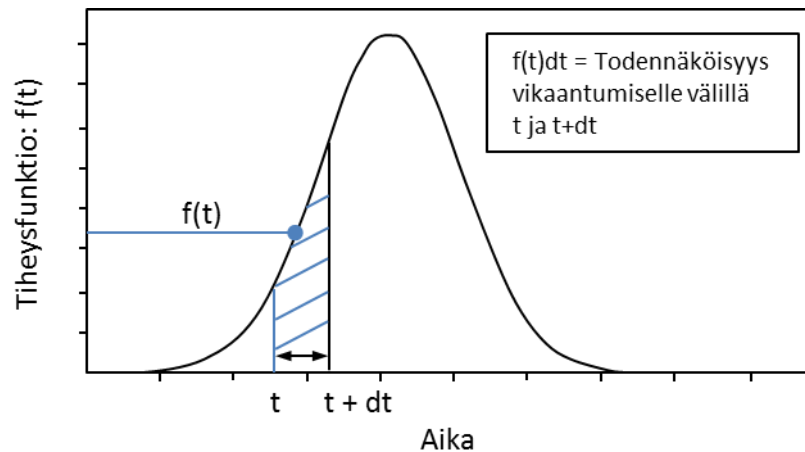
$$\lim_{t \rightarrow 0} F(t) = 0 \quad (7)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1 \quad (8)$$

Osan vikaantumiskäyttäytymistä voidaan kuvata myös vikaantumisaikojen todennäköisyystiheysfunktion avulla. Tiheysfunktiolla on yhtälössä 9 esitetty yhteys epäluotettavuuden funktion $F(t)$.

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) \quad (9)$$

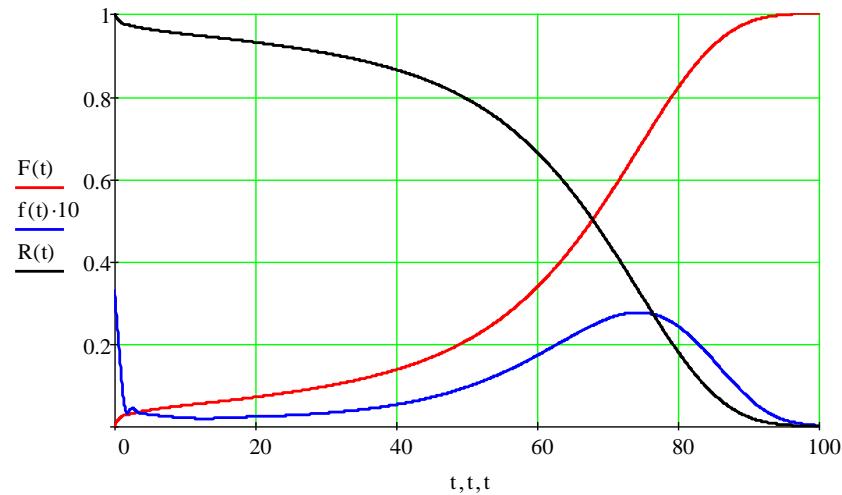
Kuvassa 6 on esitetty vikaantumisaikojen tiheysfunktio. Tiheysfunktio kuvaa todennäköisyydet eri vikaantumisajoille tai vaihtoehtoisesti todennäköisyyden vikaantumiselle tietyn ajanjakson aikana. [12,19]



Kuva 6. Vikaantumisaikojen tiheysfunktio ”perustuu lähteeseen [14, s. 63]”.

Vikaantumisaikojen tiheysfunktio voidaan muodostaa empiirisesti histogrammin avulla. Histogrammi osoittaa kunkin Δt pituisen jakson aikana vikaantuneiden osien määrät. Vikaantumisaikojen tiheydet muodostavat jatkuvan käyrän käyttämällä histogrammissa hyvin lyhyttä aika siirtymää Δt . [12,33]

Kuvan 7 kuvaajassa on esitetty $F(t)$ funktion lisäksi esimerkki vikaantumiskäyttäytymistä kuvaavasta tiheysfunktiosta $f(t)$ sekä luotettavuudesta $R(t)$. Kuvaajasta voidaan havaita yhtälössä 4 esitetty $F(t)$ ja $R(t)$ funktioiden komplementtisuus.



Kuva 7. Osan $F(t)$, $f(t)$ ja $R(t)$ funktioita [31].

Järjestelmän osien vikaantumiskäyttäytymistä voidaan tarkastella edellä esitetyistä funktioista johdettavalla yhtälössä 10 esitetyllä hasardifunktiolla $h(t)$. Hasardifunktiota nimitetään usein myös vikataajuusfunktioiksi. Hasardifunktio kuvaa osan vikaantumistodennäköisyyttä kyseisen osan elinkaaren eri aikoina välillä $(t, t + \Delta t]$ olettaen, että se on yhä hetkellä t toiminnassa. Hasardifunktio yhteydessä käytetään yleisesti myös merkintöjä $r(t)$ ja $z(t)$. [12,19,29]

$$h(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (10)$$

Hasardifunktiolla on yhtälön 11 mukainen yhteys keskimääräisten vikalukumäärän määrittämiseksi aikavälillä $(0, t)$. Tästä funktiosta käytetään nimitystä informaatiofunktio $I(t)$. [31]

$$I(t) = \int_0^t h(t)dt \quad (11)$$

Informaatiofunktioita voidaan hyödyntää epäluotettavuusfunktion määrittämisessä yhtälössä 12 esitetyllä tavalla.

$$F(t) = 1 - e^{-I(t)} \quad (12)$$

Edellä esitetyt funktioita hyödynnetään korjaus-vika -prosesseissa ja luvussa 2.3.3 esitettyjen toiminnallisten tunnuslukujen muodostamisessa.

2.3.2 Vika-korjaus -prosessi

Edellisessä luvussa esitettiin funktioita, joiden avulla voidaan kuvata osan korjaus-vika -prosessille ominainen normaalitilasta vikatilaa siirtymisen todennäköisyyttä ajansuhteen. Tässä luvussa tarkastellaan osan palauttamista vikatilasta normaalitilaan ja siihen

liittyviä funktioita. Vika-korjaus -prosessin yhteydessä tarkasteltavaa normaalitilaan siirtymistä kutsutaan korjaukseksi. [12,19]

Vika-korjaus -prosessin tarkastelu aloitetaan hetkestä $t=0$, joka vastaa kohteen vikaantumishetkeä. Todennäköisyys korjauksen valmistumiselle hetkeen t mennessä kuvataan korjausajan kertymäfunktion $G(t)$ avulla. Korjausajan kertymäfunktion pätee samat lainalaisuudet joihin tutustuttiin edellisessä luvussa vikaantumisaajan kertymäfunktion $F(t)$ yhteydessä. Se voidaan muodostaa määrättyä integraalina korjausajan tiheysfunktioista yhtälön 13 mukaisesti. [12,19]

$$G(t) = \int_0^t g(u)du \quad (13)$$

Korjausajan kertymäfunktion käyttö korjattaville osille edellyttää yhtälöissä 14–15 esitettyjen ehtojen toteutumista. Ei-korjattavan osan $G(t)$ on identtisesti nolla.

$$\lim_{t \rightarrow 0} G(t) = 0 \quad (14)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} G(t) = 1 \quad (15)$$

Korjausajan kertymäfunktioista voidaan johtaa korjausajan tiheysfunktio yhtälössä 16 esitetyn korjausajan kertymäfunktion aikaderivaatan avulla.

$$g(t) = \frac{d}{dt} G(t) \quad (16)$$

Vika-korjaus -prosessin korjausajan funktioita hyödynnetään kohteen kunnossapidettävyyden tunnuslukuja määrittäessä. Seuraavassa alaluvussa on tarkemmin kerrottu kohteen toimintaa ja kunnossapidettävyyttä kuvaavien tunnuslukujen muodostamisesta.

2.3.3 Käyttövarmuuden aikakäsitteet ja matemaattinen määrittely

Tässä alaluvussa esitellään käyttövarmuuden osatekijöille ominaiset aikakäsitteet sekä niiden matemaattinen yhteys aiemmin esitettyihin todennäköisyysfunktioihin. Esitettyjen aikakäsitteiden englanninkieliset lyhenteet ovat yleisesti käytössä kohteen toimintaa kuvaavina tunnuslukuina. Luvun lopussa on esitetty näiden tunnuslukujen yhteys kohteen käytettävyyden laskennassa.

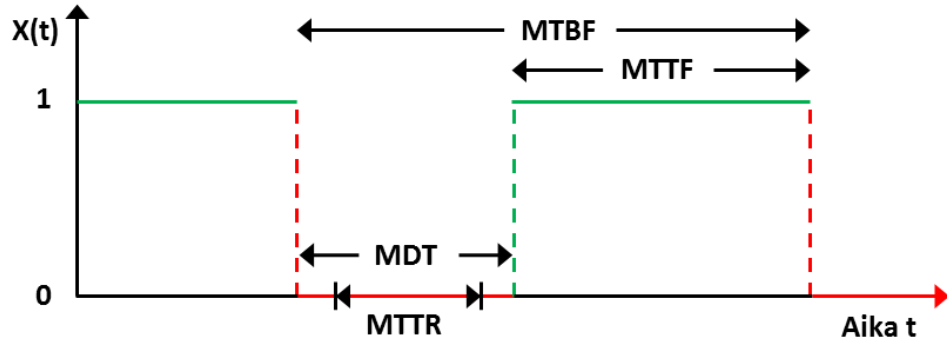
Kohteen toiminnasta voidaan muodostaa seuraavia kohteen toimintavarmuutta kuvaavia tunnuslukuja:

- Keskimääräinen vikaantumisaika (MTTF)
- Keskimääräinen vikaantumisväli (MTBF)

Kohteen kunnossapidettävyydestä ja kunnossapitovarmuudesta kertovia tunnuslukuja ovat vastaavasti:

- Keskimääräinen korjausaika (MTTR)
- Keskimääräinen seisonta-aika tai toipumisaika (MDT)

Kuvan 8 tilamuutoskuvaajassa on esitetty kunkin tunnusluvun laskentaan vaikuttavat tilamuutokset.



Kuva 8. Korjattavan osan keskimääräisen käyttäytymisen tunnusluvut ”perustuu lähteeseen [19, s. 368]”.

Keskimääräinen vikaantumisaika

Kohteen keskimääräistä vika vapaata toiminta-aikaa kuvataan keskimääräisen vikaantumisaajan MTTF (*Mean Time to Failure*) avulla. Tämä kohteen korjauksesta ensimmäiseen vikaan kuvaava tunnusluku muodostetaan vikaantumisaikojen keskiarvona yhtälön 17 mukaisesti.

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (17)$$

Keskimääräinen vikaantumisaajan yhtälö voidaan yksinkertaistaa jälkimmäiseen muotoon, jos tehdään oletus, että $MTTF < \infty$. Tästä seuraa, että $R(\infty)=0$. [12,19]

Keskimääräinen korjausaika

Vikaantuneen kohteen toiminnan palautumisen keskimääräistä kestoa mitataan keskimääräisellä korjausajalla MTTR (*Mean Time to Repair*). Tämä tunnusluku kuvaa kohteen kunnossapidettävyyden ominaisuuksia keskimääräisen tehollisen korjausajan muodossa. Tunnusluku määritetään korjausaikojen keskiarvona yhtälön 18 mukaisesti.

$$MTTR = \int_0^{\infty} t g(t) dt = \int_0^{\infty} 1 - G(t) dt \quad (18)$$

Korjausajan odotusarvon yhtälön esittäminen korjausajan kertymäfunktion avulla vaatii, että $G(\infty)=1$. [12, s. 279]

Keskimääräinen seisonta-aika

Käytettävyystarkasteluiden kannalta on oleellista huomioida kohteen toimintakyvyttömyysaika kokonaisvaltaisesti. Edellä esitetyn keskimääräisen korjausajan (MTTR) lisäksi kohteen toimintakyvyttömyysajassa tulisi huomioida siihen liittyvät kunnossapitovarmuutta heikentävät viiveet. Yhdessä nämä tekijät muodostavat kohteelle viasta syntyvän epäkäytettävyyssjakson, eli jakson jolloin kohde on ollut vikatilassa. Usein korjaukseen liittyvien viiveiden summa on suurempi teholliseen korjausaikaan verrattuna. Tästä syystä onkin oleellista huomioida vikatilasta toipuminen kokonaisvaltaisesti, pelkän tehollisen korjausajan sijasta. [19,21]

Kohteen vikaantumisista johtuvaa toimintakyvyttömyysaika tarkastellaan yhtälössä 19 esitetyn keskimääräisen seisonta-ajan MDT (*Mean Down Time*) avulla.

$$MDT = MTTR + MLDT \quad (19)$$

Tunnusluvun sisältämä MLDT (*Mean Logistics Delay Time*) kuvaa korjaukseen liittyvää keskimääräistä logistista viivettä. Näitä viiveitä kertyy varaosien, työkalujen, tarkastusvälineiden sekä henkilöresurssien odottamisesta. Vastineena MDT tunnusluvulle voidaan käyttää määrettä keskimääräinen toipumisaika MTTR (*Mean Time To Restoration*). [2,25]

Keskimääräinen vikaantumisväli

Kohteen toimintavarmuutta voidaan tarkastella myös keskimääräisen vikaantumisvälin MTBF (*Mean Time Between Failures*) avulla. MTBF määritellään yhtälön 20 mukaisesti keskimääräisen vikaantumisaajan ja keskimääräisen seisonta-ajan summana [29, s. 358].

$$MTBF = MTTF + MDT \quad (20)$$

Yhtälö voidaan yksinkertaistaa muotoon $MTBF=MTTF$, mikäli MDT on hyvin lyhyt MTTF-arvoon verrattuna [19, s. 22]. Tunnusluvun käyttö rajoittuu ainoastaan korjattavien kohteiden toimintavarmuuden tarkasteluihin.

Käytettävyys

Lyhenteellä A (*Availability*) ilmaistu käytettävyys on laaja termi, joka osoittaa kohteen odotetun ja toteutuneen välisen toimintasuhteen. Toisinaan englanninkielinen vastine

käytettävyydestä puhuttaessa on *dependability*. Käytettävyyttä voidaan tarkastella joko täsmällisesti hetken t käytettävyytenä tai vaihtoehtoisesti määritetyn jakson keskimääräisenä käytettävyytenä. [2, s. 9]

Kohteen käytettävyys hetkellä t voidaan laskea yhtälön 21 avulla.

$$A(t) = [1 + I'(t) \cdot MDT]^{-1} \quad (21)$$

Käytettävyys hetkellä t kuvaa todennäköisyyttä, jolla kohde on toimintakunnossa hetkellä t , olettaen että se oli uutta vastaavassa kunnossa hetkellä $t=0$. Kyseistä käytettävyydestä tarkastellessa on huomioitava, että tarkasteltava kohde on voinut kokea jo useita vikoja ja korjauksia hetkeen t mennessä. [2,12,31]

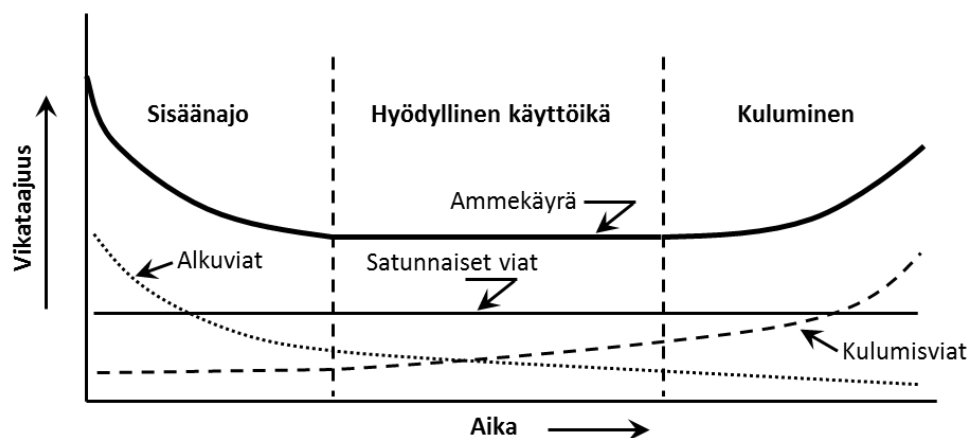
Keskimääräisen käytettävyyden avulla voidaan tarkastella todennäköisyyttä, jolla kohde on ollut toimintakunnossa tietyn jakson ajan. Keskimääräinen käytettävyys määritetyllä aikavälillä voidaan muodostaa aiemmin esitettyjen MTTF- ja MDT-tunnuslukujen avulla yhtälön 22 mukaisesti. [19, s. 370]

$$A_{av} = \frac{MTTF}{MTTF + MDT} \quad (22)$$

Molempien edellä esitettyjen käytettävyydestä muodostamiseen sisältyy oletus kohteen käytön ja kunnossapidon oikein suorittamisesta.

2.4 Vikojen kehittyminen elinkaaren eri vaiheissa

Järjestelmälle tai sen osalle on ominaista, että sen vikaantumiskäyttäytyminen muuttuu elinkaaren eri vaiheissa. Järjestelmän tai sen osan elinkaaren aikaisesta vikaantumiskäyttäytymisestä on tunnistettavissa kolme vaihetta. Nämä vaiheet kuvataan usein kohteen korjattavuudesta riippuen joko vika- tai hasarditaajuusesityksenä kuvassa 9 esitetyn ammekäyrän avulla.



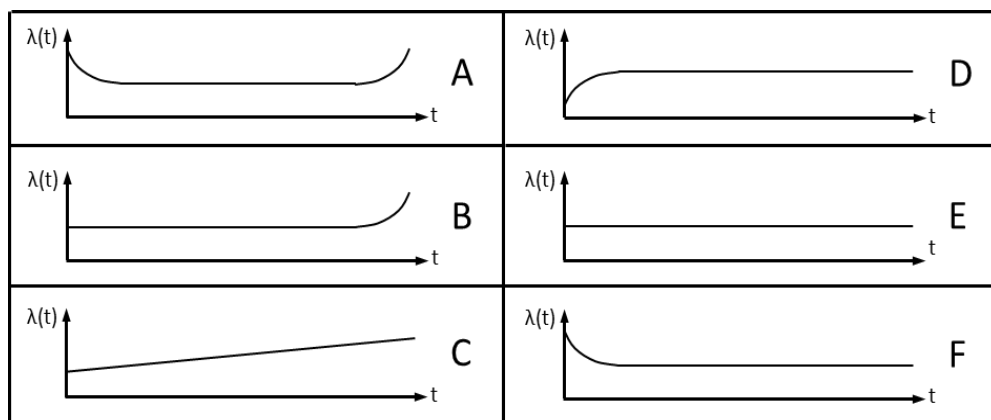
Kuva 9. Ammekäyrä ”perustuu lähteeseen [6, s. 21]”.

Ammekäyrä voidaan muodostaa sen taustalta tunnistettavien alkuvikojen, satunnaisten vikojen sekä kulumisvikojen vikaantumismallien summana. Vikaantumismallit muodostuvat kohteen elinkaaren eri aikoina hallitsevista vikaantumistavoista. Ammekäyrä pyrkii kuvaamaan useiden kohteelle ominaisten vikaantumistapojen aikaansaaman elinkaaren aikaisen vikaantumiskäyttäytymisen. [6,24]

Elinkaaren alussa järjestelmän vikaantumiskäyttäytymiselle on ominaista, että asennuksessa, valmistuksessa ja merkittävimmät suunnittelussa tehdyt virheet lisäävät järjestelmän sisäänajon aikaista vikaantumistodennäköisyyttä. Ajan kuluessa järjestelmän vikaantumistodennäköisyys laskee vakiintuen lopulta hyödylliselle käyttöiälle ominaiseen tasoon. Järjestelmän hyödyllisen käyttöiän vikaantumiskäyttäytymistä kuvataan ammekäyrän vakiovikataajuuden alueella. Hyödyllisen käyttöiän aikana syntyvät viat aiheutuvat satunnaisten käyttö- ja kunnossapitovirheiden lisäksi esimerkiksi liasta. Elinkaaren viimeisessä vaiheessa järjestelmän toimintaa toistuvasti häiritsevät vanhenemisesta, väsymisestä ja kulumisesta johtuvat viat. Tätä vikaantumiskäyttäytymisen vaihetta kutsutaan kulumisvikojen vaiheeksi. [1,7,24]

2.4.1 Vikaantumismallit

Perinteisen ammekäyrän rinnalle on tunnistettu myös muita vikaantumismalleja kuvaamaan kohteen elinkaarenaikaista vikaantumiskäyttäytymistä. Useampien vikaantumismallien tunnistamiselle on ollut tarvetta, koska ammekäyrä ei yksinään sovellu kaikkien teknisten järjestelmien vikaantumiskäyttäytymisen kuvaamiseen. Tyypilliset kuusi vikaantumismallia on esitetty kuvassa 10. Vikaantumismalleille on ominaista, että useimmat niistä muodostuvat yhdestä tai useammasta ammekäyrän taustalta tunnistettavasta vikaantumiskäyttäytymisen vaiheesta. [1, s. 26]



Kuva 10. Vikaantumismallit [7, s. 11].

Vikaantumismalleista ammekäyrä soveltuu parhaiten monimutkaisen järjestelmän tai sähköosien elinkaaren aikaisen vikaantumiskäyttäytymisen kuvaamiseen. Vastaavasti yksikertaisempien tai pienempien kokonaisuuksien elinkaaren aikaista vikaantumiskäyttäytymistä voidaan kuvata vikaantumismallien B-F avulla. [6, s. 20]

Vikaantumismallit voidaan ryhmitellä kahteen luokkaan käyttööän ja vikaantumistodennäköisyyden riippuvuuden suhteen. Kohteilla, joiden vikaantumiskäyttäytyminen noudattaa malleissa A-C esitettyjä tapoja havaitaan selvä käyttööän ja vikaantumistodennäköisyyden välinen riippuvuussuhde. Näitä vikaantumismalleja nimitetään kulumisvikojen malleiksi. Vastaavasti kohteet, joiden vikaantumiskäyttäytyminen noudattaa malleja D-F vikaantuvat käyttööistä riippumattomasti eli vikaantumiset noudattavat niin kutsuttuja satunnaisten vikojen malleja. [15, s. 129–143]

Edellä esitettyjen vikaantumismallien avulla kyetään luomaan syvällisempi ymmärrys laitteen elinkaarenaikaisesta vikaantumiskäyttäytymisestä. Laitteelle ominainen vikaantumismalli tai sen hallitseva vikaantumiskäyttäytymisen vaihe ohjaa soveltuvimman kunnossapitostrategian valinnassa laitteen vikaantumisten hallitsemiseksi kustannustehokkaasti. [7,21]

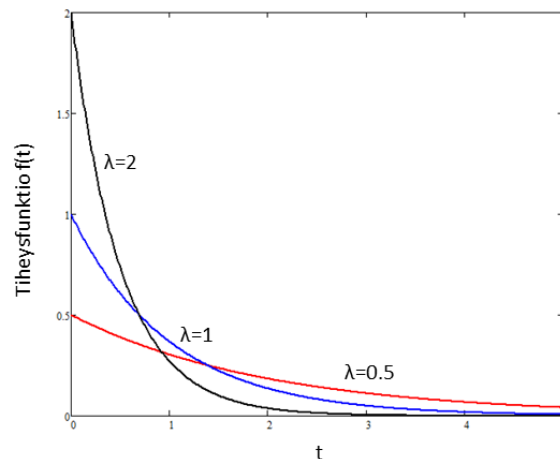
2.4.2 Vikataajuuden soveltaminen luotettavuustarkastelussa

Järjestelmän osien vikataajuuksille on ominaista, että ne ovat suurimman osan käyttööistä keskimäärin vakioita. Tästä syystä vakiovikataajuudella on tärkeä merkitys luotettavuustekniikassa. Satunnaismuuttujaa, joka on eksponenttijakautunut parametrilla λ , merkitään $X \sim \text{Exp}(\lambda)$. Tämän luotettavuustekniikassa yleisesti käytetyn jakauman tiheysfunktio on esitetty yhtälössä 23.

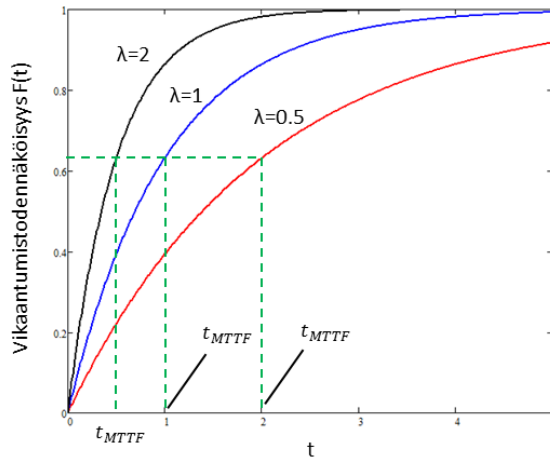
$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad t \geq 0 \quad (23)$$

Kun komponentin vikataajuus on vakio, niin sen keskimääräinen vikaantumisaika on $\text{MTTF} = 1/\lambda$. [20,24]

Kuvassa 11 on esitetty kolmen eri vakiovikataajuuden avulla muodostetut eksponenttijakauman tiheysfunktiot ja kuvassa 12 vastaavat kertymäfunktiot.



Kuva 11. Eksponenttijakauman tiheysfunktioita ”perustuu lähteeseen [1, s. 39]”.



Kuva 12. Eksponenttijakauman kertymäfunktioita ”perustuu lähteeseen [1, s. 39]”.

Kuvan 12 mukaisesti, jos laitteen vikataajuus on vakio, niin se vikaantuu 63.2 % todennäköisyydellä sen vikaantumisajan odotusarvoon (MTTF) mennessä [1, s. 38].

Weibull (1887–1979) on kehittänyt luotettavuustekniikassa hyvin yleisesti käytetyn jakauman ”Weibull-jakauma”, jonka yleiset ehdot on esitetty yhtälöissä 24–26 [12, s. 311–313].

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\sigma}\right)} , \text{ kun } t \geq \gamma \quad (24)$$

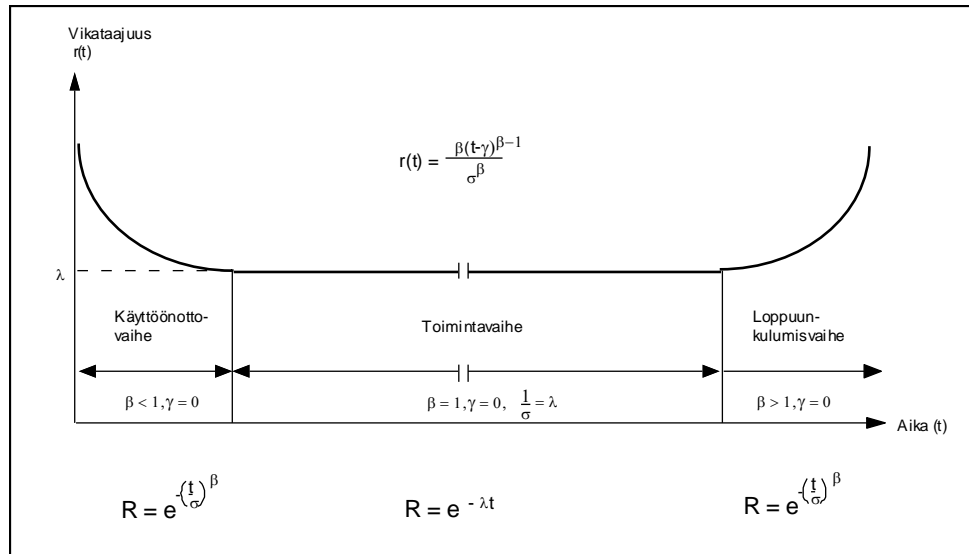
$$f(t) = \frac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\sigma^{\beta}} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\sigma}\right)^{\beta}} , \text{ kun } t \geq \gamma \quad (25)$$

$$r(t) = \frac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\sigma^{\beta}} , \text{ kun } t \geq \gamma \quad (26)$$

Kuvassa 13 on esitetty vikataajuuden $r(t)$ kuvaaja Weibull-jakauman mukaan. Weibull-jakauman avulla voidaan hyvin arvioida toimintavarmuutta komponentin elinkaaren eri vaiheissa. Weibull-jakaumassa on kolme parametria γ , σ ja β . Parametri γ ottaa huomioon tilanteen, jossa vikaantuminen voidaan perustellusti olettaa alkavaksi vasta ajan γ kuluttua. Usein γ :lle annetaan arvo 0, jolloin vikataajuuden käyttäytyminen määräytyy parametrien β ja σ mukaisesti. Parametria β kutsutaan muotoparametriksi ja σ skaalausparametriksi. Kun $\beta < 1$ on vikataajuus laskeva ja vastaavasti kun $\beta > 1$ se on kasvava. Kun $1 < \beta < 2$ jakauma on ns. vino, jolloin vikataajuus on alhainen alhaisella ajalla, eli kun t on pieni. Kun $\beta > 2$ jakauma alkaa lähestyä normaalijakaumaa. [12, s. 331]

Weibullin mukaan vakiovikataajuutta vastaa tapaus, kun $\beta = 1$. Tästä myös nähdään, kun $\beta = 1$ ja $\gamma = 0$, niin vikataajuus on vakio $\lambda = 1/\sigma$, eli tällöin $\sigma = \text{MTTF}$. Parametrin

β arvo määritellään pääosin kokeellisesti ja parametrille σ saadaan hyvin soveltuva arvo tilanteessa, kun $F(t) = 63\%$. [12, s. 331]



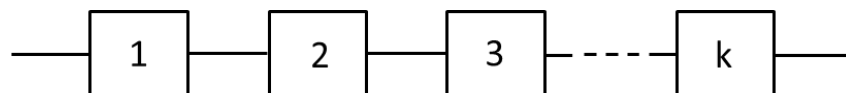
Kuva 13. Vikataajuus komponentin eliniän kolmessa vaiheessa Weibull-jakauman mukaan ”perustuu lähteeseen [32, s. 53]”.

2.5 Järjestelmän luotettavuus

Järjestelmä muodostuu osista, joiden välille on muodostunut erilaisia luotettavuusteknisiä kytköksiä. Järjestelmäosien toimintavarmuudet ja niiden väliset luotettavuustekniset kytkökset muodostavat järjestelmälle ominaisen toimintavarmuuden. Tässä luvussa esitetään järjestelmäosien tyypillisimmät luotettavuustekniset rakenteet sekä niiden järjestelmälle muodostaman luotettavuuden laskenta.

Sarjarakenne

Teknisten järjestelmien tyypillisin järjestelmärakenne on esitetty kuvan 14 lohkokaaviossa. Kyseistä järjestelmärakennetta nimitetään sarjarakenteeksi. Sarjarakenne muodostuu peräkkäisistä järjestelmäosista, jotka toimiessaan mahdollistavat järjestelmän toiminnan. Sarjarakenteen mukainen kokonaisuus vikaantuu välittömästi minkä tahansa sen järjestelmäosan vikaannuttua.



Kuva 14. Sarjarakenne [5, s. 29].

Sarjarakenteen mukaisen järjestelmän toimintavarmuus voidaan esittää sen järjestelmäosien luotettavuuksien tulona yhtälössä 27 esitetyllä tavalla.

$$R_s = R_1 R_2 R_3 \dots R_k , \quad (27)$$

jossa R_s on järjestelmän toimintavarmuus ja R_k yksittäisen järjestelmäosan toimintavarmuus. [5, s. 29]

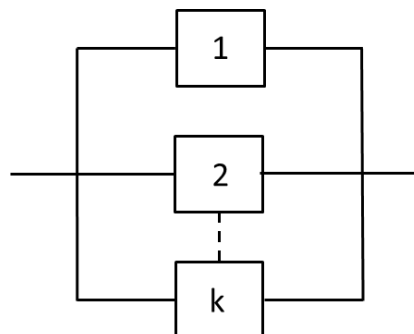
Redundanttiset järjestelmät

Järjestelmän toimintavarmuutta voidaan parantaa asettamalla useampia järjestelmäosia rinnakkain järjestelmätoiminnon aikaansaamiseksi. Tällaista järjestelmän toiminnan varmennusta nimitetään redundanttisuudeksi. Redundanttisen järjestelmän järjestelmäosat voivat normaalitilanteessa olla joko aktiivisia järjestelmän toimintaan osallistuvia tai passiivisia, osallistuen järjestelmän toimintaan vasta ensisijaisen järjestelmäosan vikaannuttua. Järjestelmän toimintaan aktiivisesti normaalitilanteessa osallistuvia järjestelmäosia voidaan kuvata rinnakkais- tai ryhmärinnakkaisrakenteen avulla. Vastaavasti normaalitilanteessa passiivisesti järjestelmän toimintaan osallistuvia järjestelmäosia voidaan kuvata standby-rakenteen avulla. [5,6]

Redundanttisille järjestelmille on ominaista se, että niiden toiminta ei vaarannu yksittäisten järjestelmäosien vikaantuessa. Järjestelmän toiminnan estymiseen vaaditaan useampien tai jopa kaikkien järjestelmäosien samanaikainen vikaantuneena oleminen. Yksittäisten järjestelmäosien vikaantumisella voi kuitenkin olla järjestelmän tuotantotehoa alentava vaikutus. [24, s. 467]

Rinnakkaisrakenne

Rinnakkaisrakenteessa järjestelmän toiminta muodostuu useamman samanlaisen järjestelmäosan samanaikaisesta toiminnasta. Rinnakkaisrakenteen omaava järjestelmä on toimintakykyinen yhdenkin siinä olevan järjestelmäosan ollessa toimintakykyinen. Rinnakkaisrakenteen lohkokaavio on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Rinnakkaisrakenne [5, s. 31].

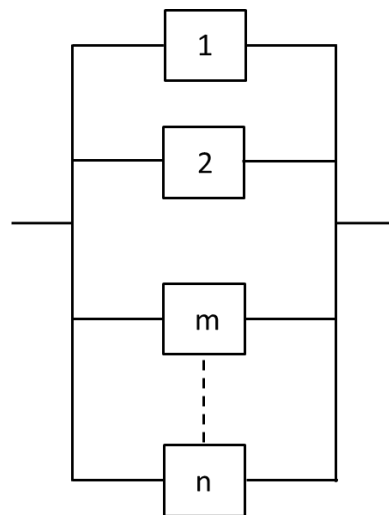
Rinnakkaisrakenteen mukaisen järjestelmän toimintavarmuus voidaan esittää sen järjestelmäosien luotettavuuksien avulla yhtälössä 28 esitetyllä tavalla.

$$R_{ps} = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_k), \quad (28)$$

jossa R_{ps} on rinnakkaisrakenejärjestelmän toimintavarmuus ja R_k yksittäisen järjestelmäosan toimintavarmuus. [5,24]

Ryhmärinnakkaisrakenne

Ryhmärinnakkaisrakenteen avulla kuvataan järjestelmää, jonka toiminnan edellytyksenä on, että vähintäänkin tietty määrä sen järjestelmäosista on toimivia. Normaalitylanteessa ryhmärinnakkaisrakenteen mukaisessa järjestelmässä on toiminnassa vaadittua suurempi määrä järjestelmäosia. Kuvan 16 lohkokaaviossa on esitetty n järjestelmäosasta muodostuvan järjestelmän ryhmärinnakkaisrakenne.



Kuva 16. Ryhmärinnakkaisrakenne [5, s. 32].

Samanlaisista itsenäisesti toimivista järjestelmäosista rakentuvan ryhmärinnakkaisrakenteen mukaisen järjestelmän toimintavarmuus muodostetaan järjestelmäosien luotettavuuden ja binomijakauman avulla yhtälön 29 mukaisesti.

$$R_{m/n} = \sum_{j=m}^n \binom{n}{j} R^j (1 - R)^{n-j}, \quad (29)$$

jossa n on järjestelmäosien lukumäärä rakenteessa

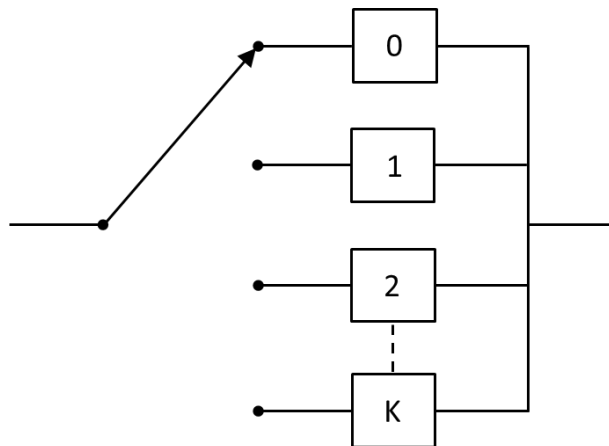
m on toiminnan edellytyksenä olevien toimivien järjestelmäosien lukumäärä

R on yksittäisen itsenäisesti toimivan järjestelmäosan toimintavarmuus

Sarja- ja rinnakkaisrakenteet ovat ryhmärinnakkaisrakenteen erikoistapauksia, joissa sarjarakenteen toimintaehtona on, että $m=n$. Vastaavasti toimintaehtona rinnakkaisrakenteelle on, että $m=1$. [5, s. 33]

Standby-rakenne

Standby-rakenteen mukainen järjestelmä muodostuu ensisijaisesta järjestelmäosasta sekä yhdestä tai useammasta valmiudessa olevasta järjestelmäosasta. Normaalitilanteessa järjestelmä toimii ensisijaisen järjestelmäosan avulla. Valmiudessa oleva järjestelmäosa otetaan käyttöön ainoastaan ensisijaisen järjestelmäosan vikaantuessa. Järjestelmän Standby-rakenne on esitetty kuvan 17 lohkokaaviossa.



Kuva 17. Standby-rakenne [5, s. 34].

Standby-rakenteen omaavan järjestelmän toimintavarmuus muodostetaan Poissonin lauseen avulla yhtälössä 30 kuvatulla tavalla. Yhtälössä järjestelmäosien vikataajuudet oletetaan vakioiksi yhtälön yksinkertaistamiseksi.

$$R_{sb}(t) = \sum_{j=0}^K \frac{(\lambda t)^j e^{-\lambda t}}{j!}, \quad (30)$$

jossa K on valmiudessa olevien järjestelmäosien määrä
 λ on yksittäisen järjestelmäosan vakiovikataajuus

Tyypillisesti teknisten järjestelmien rakenteiden voidaan havaita muodostuvan erilaisista järjestelmärakenteiden yhdistelmistä, joissa järjestelmän toiminta muodostuu yksin tai varmennetusti toimivista peräkkäisistä osajärjestelmistä. [5,6] Luvussa 4.1 esitellään menetelmiä järjestelmän ja sen järjestelmäosien luotettavuusteknisten ominaisuuksien mallintamiseksi.

2.6 Käyttövarmuustiedot

Järjestelmän toimintavarmuustarkastelut edellyttävät useiden erilaisten järjestelmätietojen hyödyntämisen. Järjestelmän luotettavuusmallin muodostamisessa tarvittavien järjestelmän toiminnan sekä toimintaympäristön kuvaavien teknisten tietojen lisäksi tarvi-

taan tietoa myös järjestelmän toiminnan estävistä vikaantumistavoista sekä niille ominaisista vikaantumis- ja toipumisajoista.

Järjestelmän luotettavuus- ja käyttövarmuustarkasteluissa tarvittavia tietoja saadaan useista eri lähteistä. Kokemusperäistä tietoutta järjestelmän toiminnasta ja vikaantumisista voidaan hankkia erilaisten asiantuntija-arvioiden muodossa. Arvioiden muodostamisessa voidaan hyödyntää sekä tehtaan omia että ulkopuolisia asiantuntijoita. Asiantuntija-arviosta heijastuu yksilön henkilökohtainen kokemus, ymmärrys ja näkemys tietystä teknisestä kysymyksestä. Asiantuntijoiksi valikoituvat henkilöt, joiden on tiedostettu heidän virkatovereiden keskuudessa omaavan paljon kokemusta ja tietämystä tarkastelun alla olevasta tapahtumasta. Asiantuntija-arviota voidaan pitää asiantuntijan omakohtaisena näkemyksenä tapahtuman todennäköisyydestä. Arvio tulevaisuudessa syntyvästä epävarmasta tapahtumasta pohjautuu henkilön aikaisempiin kokemuksiin vastaavista tapahtumista. Koska asiantuntijoiden arviot ovat heidän omakohtaisia näkemyksiään ja juurtuneet heidän kokemuksiinsa niin on tärkeää tarjota asiantuntijoille mahdollisuus tuottaa tieto muodossa, joka tukee heidän päättelyprosessia. [3,11]

Asiantuntija-arvioiden lisäksi erilaisilla tehdaskohtaisilla käyttökokemuksiin pohjautuvilla tiedoilla on merkittävää arvoa lopullisten arvioiden muodostamiseksi. Tällaisia tehdaskohtaisia tietoja ovat muun muassa vikaraportit, kunnossapitojärjestelmiin kerääntynyt historiatieto sekä muu kokemus vastaavanlaisista osista.

Käyttövarmuustiedon hankkimiseen voidaan käyttää myös erilaisia luotettavuustietokantoja. Tietokantoihin liittyvänä ongelmana on, että niiden tarjoamat yleisten komponenttien vikaantumisaikojen arvot perustuvat mahdollisesti jo vanhentuneeseen tietoon. Tarjolla on yhä toimialakohtaisia tietokantoja joiden sisältöä edelleen ylläpidetään. Toisena tietokantoihin liittyvänä ongelma nähdään se, että niissä esitettyä tietoutta ei aina voida rinnastaa oman järjestelmän toimintaan. Johtuen siitä, että tietokantoihin kerätyn datan pohjalla olevista järjestelmistä ja niiden toimintaolosuhteista ei ole täyttä tietoa saatavilla. [11]

Lopullisten luotettavuustietojen muodostamisessa on suotavaa käyttää mahdollisuuksien mukaan useammista lähteistä saatuja tietoja. Tietokantojen, historiatietojen ja muiden tehdaskohtaisten tietojen avulla kyetään tukemaan erityisesti asiantuntijoita heidän muodostaessaan arvioita. Eri lähteistä kerättyjen luotettavuustietojen yhdistämiseksi on olemassa erilaisia matemaattisia menetelmiä. Näissä menetelmissä voidaan muun muassa erilaisten painotusten avulla painottaa yksilöiden asiantuntijuutta sekä tietolähteiden tarjoamien tietojen soveltuvuutta tarkasteltavaan tilanteeseen. [11,31] Asiantuntija-arviot on nähty hyödyllisiksi varsinkin tarkasteluissa, joissa tietolähteet ovat niukat tai niihin on vaikea päästä käsiksi. Järjestelmän luotettavuus- ja käyttövarmuustarkasteluihin kuuluvat osana aina asiantuntija-arviot, jotka ovat osaltaan mukana soveltuvista tietolähteistä, mallin rakenteesta tai analyysimenetelmistä päätettäessä. [3]

3 KUNNOSSAPITO

Viime vuosikymmenten aikana tapahtunut laitteiden tekninen kehitys on johtanut entistä monimutkaisempien laitteiden syntyyn. Uusien kunnossapitotekniikoiden sekä kunnossapito-organisaatioiden ja niissä toimivien henkilöiden osaamisen kehittäminen on ollut tarpeen, jotta on kyetty vastaamaan asetettuihin toimintavaatimuksiin. Kunnossapito nähdään nykyään kokonaisvaltaisena lisäarvon tuottajana osana tuotantoa, jonka myötä voidaan paremmin vastata toiminnan kiristyneisiin turvallisuus-, ympäristö-, tuotanto-, laatu- sekä käytettävyysvaatimuksiin. [15, s. 1]

Seuraavassa alaluvussa tarkastellaan kirjallisuuden ja standardien mukaista kunnossapidon määritelmää ja sen merkitystä ylläpitää ja kehittää kohteen elinkaarenaikaista toimintakykyä. Luvussa 3.2 käydään läpi kunnossapitolajit, joiden avulla kohteen toimintakykyä voidaan ylläpitää tai palauttaa vikaantumista edeltävälle tasolle.

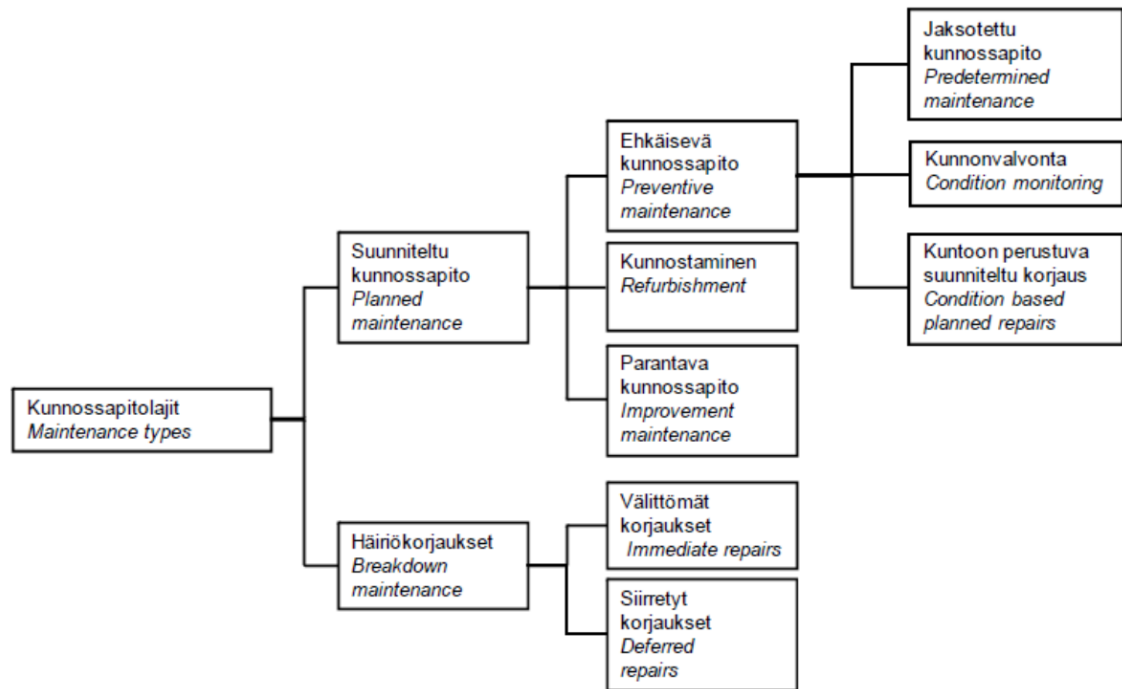
3.1 Kunnossapidon määritelmä

Kunnossapito määritellään PSK 6201 standardissa seuraavasti: ”Kunnossapito on kaikkien niiden teknisten, hallinnollisten ja johtamiseen liittyvien toimenpiteiden kokonaisuus, joiden tarkoituksena on säilyttää kohde tilassa tai palauttaa se tilaan, jossa se pysyy suorittamaan vaaditun toiminnon sen koko elinjakson aikana”. Määritelmässä mainitulla kohteen tilan säilyttämisellä tai palauttamisella tarkoitetaan kohteen luontaisen suorituskyvyn säilyttämistä tai palauttamista kohteelle suunnittelun, valmistuksen ja asennuksen myötä muodostuneessa suorituskyykytasossa. Kohteen suorituskyvyn nostaminen luontaisen suorituskyvyn yläpuolelle ei kunnossapidon avulla ole mahdollista [15, s. 24].

Kunnossapidon määritelmän ohjaamana kunnossapito tulisi nähdä toiminnallisena kokonaisuutena, joka vastaa kohteen toimintaedellytysten ylläpitämisestä. Kunnossapidon päällimmäisenä tavoitteena on tarjota kohteelle sen tuotantovaatimusten mukainen toimintavarmuus ja käytettävyys. Kasvaneista toimintavarmuus- ja käytettävyysvaatimuksista johtuen myös kunnossapitoa on tullut kehittää suunnitelmallisemmaksi. Vähentyneiden tuotannonmenetysten lisäksi suunnitelmallisemmän kunnossapidon avulla voidaan saavuttaa pidempi elinkaari laitteille, minimoida kriittisten laitteiden yllättävät viat sekä parantaa kunnossapitohenkilöstön työturvallisuutta. [5,15]

3.2 Kunnossapitolajit

Kunnossapidon suunnitelmallisuudesta riippuen kohteelle tehtävät kunnossapidolliset toimenpiteet voidaan jakaa joko suunniteltuun kunnossapitoon tai häiriökorjauksiin. Näistä käytetään usein myös nimityksiä proaktiivinen, eli ennakoiva kunnossapito tai reaktiivinen, eli korjaava kunnossapito. PSK 7501 standardin mukainen kunnossapitolajien jaottelu on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Kunnossapitolajit [17, s. 32].

Nimensä mukaisesti suunnitellun kunnossapidon toimenpiteet pyrkivät reagoimaan vikaantumisiin ennen niiden syntymistä. Suunnitellun kunnossapidon toimenpiteiden avulla kohteen toimintakyky joko aika ajoin palautetaan alkuperäiselle tasolle tai sitä ylläpidetään alkuperäisellä tasolla erilaisten ylläpitävien toimenpiteiden avulla. Vastaa- vasti häiriökorjaukset reagoi vikoihin vasta niiden synnyttyä. Soveltuvimman ja tehok- kaimman kunnossapitostrategian ja siihen liittyvien toimenpiteiden suoritusvälien mää- ritys edellyttää syvällisempää tuntemusta laitteen vikaantumiskäyttäytymisestä, vikaan- tumisen kehittymisestä sekä sen vaikutuksista. [21]

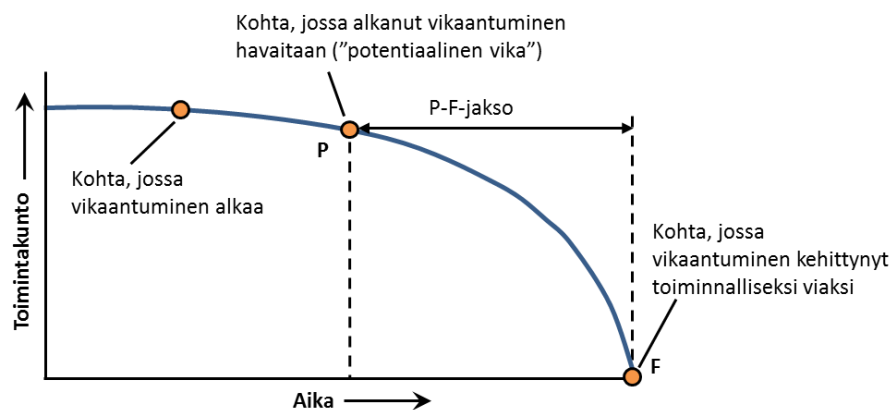
Ehkäisevä kunnossapito

Ehkäisevä kunnossapito on säännöllisesti suoritettavaa kohteen käyttöominaisuuksia ylläpitävää tai heikentyneen toimintakyvyn palauttavaa toimintaa. Ilman edeltävää toi- mintakunnon tutkimusta suoritettavia aikataulutettuja toimenpiteitä nimitetään jaksote- tuksi kunnossapidoksi. Jaksotetun kunnossapidon toimenpiteet muodostuvat erilaisista huolloista, joilla ylläpidetään kohteen toimintakykyä. Tällaisia toimenpiteitä ovat muun

muassa erilaiset tarkastukset, säädöt, puhdistukset, rasvaukset, öljynvaihdot ja suodattimien vaihdot. [10,16]

Kohteen oireilevia vikoja voidaan tunnistaa tarkkailemalla kohteen fyysisten ominaisuuksien heikkenemistä kunnonvalvonnan tai tarkastusten avulla. Tunnistettujen oireilevien vikojen korjaus toteutetaan suunnitellusti ennen oireilevan vian kehittymistä pysäyttäväksi viaksi. Tätä oireilevien vikojen tunnistamisen ja suunnitellun korjauksen toimenpiteiden kokonaisuutta nimitetään kuntoon perustuvaksi kunnossapidoksi. Kunnonvalvonnan tai tarkastusten avulla tehtävä kohteen kunnon tarkkailu voi olla aikataulutettua, jatkuvaa tai vaadittaessa tehtävää. Kunnonvalvonta käsittää aistihavainnoin tai mittalaittein tehtävät kohteen kunnon tarkastus-, valvonta- sekä analysointitoimenpiteet. [10,16]

Kunnonvalvonta soveltuu erityisesti kohteille, joiden vikaantuminen on käyttöiästä riippuvaa ja vian kehittymisen alkaminen kyetään tunnistamaan havaittavien muutosten avulla. Lisäksi vikaantumisen kehittyminen ei saa olla liian nopeaa, jotta oireileva vika on mahdollista tunnistaa mahdollisimman varhaisessa vaiheessa riittävän reagointiajan saavuttamiseksi. Kuvassa 19 on esitetty tarkastusvälin mitoituksessa hyödynnettävä vikaantumisen P-F-käyrä.



Kuva 19. P-F-käyrä ”perustuu lähteeseen [7, s. 21]”.

P-F-käyrä osoittaa vian kehittymisen eri vaiheet vikaantumisen alkamisesta kohteen toiminnan estävän vikaantumisen syntyyn saakka. P-F-jakso kuvaa reagointiaikaa, joka on käytettävissä vian havaitsemiseen sekä sen korjaamiseen ennen kuin se johtaa toiminnan yllättävään keskeytymiseen toiminnallisen vian muodossa. Alkanen vian suunniteltuun korjaukseen käytettävissä oleva aika kasvaa mitä aikaisemmassa vaiheessa P-F-jaksoa alkanut vikaantuminen havaitaan. Vian on mahdollista kehittyä toiminnalliseksi viaksi, mikäli tarkastusväliksi asetetaan P-F-jaksoa pidempi aikaväli. Sopivimmaksi tarkastusväliksi ehdotetaan yleisesti tarkastusväliä, joka vastaa puolta P-F-jakson pituudesta. On huomioitava, että P-F-jaksoon voi liittyä merkittävää vaihtelua, jolloin tarkastusväli tulisi määrittää lyhimmän todennäköisimmän P-F-jakson mukaisesti. [7, s. 21–23]

Kunnostaminen

Kunnostamisessa kohteen toimintakyky palautetaan alkuperäiseen tasoon kohteen kunnosta riippumatta ennalta määrätyn eliniän täytyessä. Kunnostamisesta käytetään yleisesti myös nimitystä määräaikaishuolto. Huollettavasta kohteesta riippuen sen toimintakyvyn palauttaminen voi vaatia myös tiettyjen siinä olevien osien määräaikaista vaihtoja kunnostamisen yhteydessä. Kunnostaminen soveltuu käyttöiästä riippuvien vikaantumisten ehkäisemiseen tai niiden seurausten pienentämiseen. [15, s. 134–135]

Parantava kunnossapito

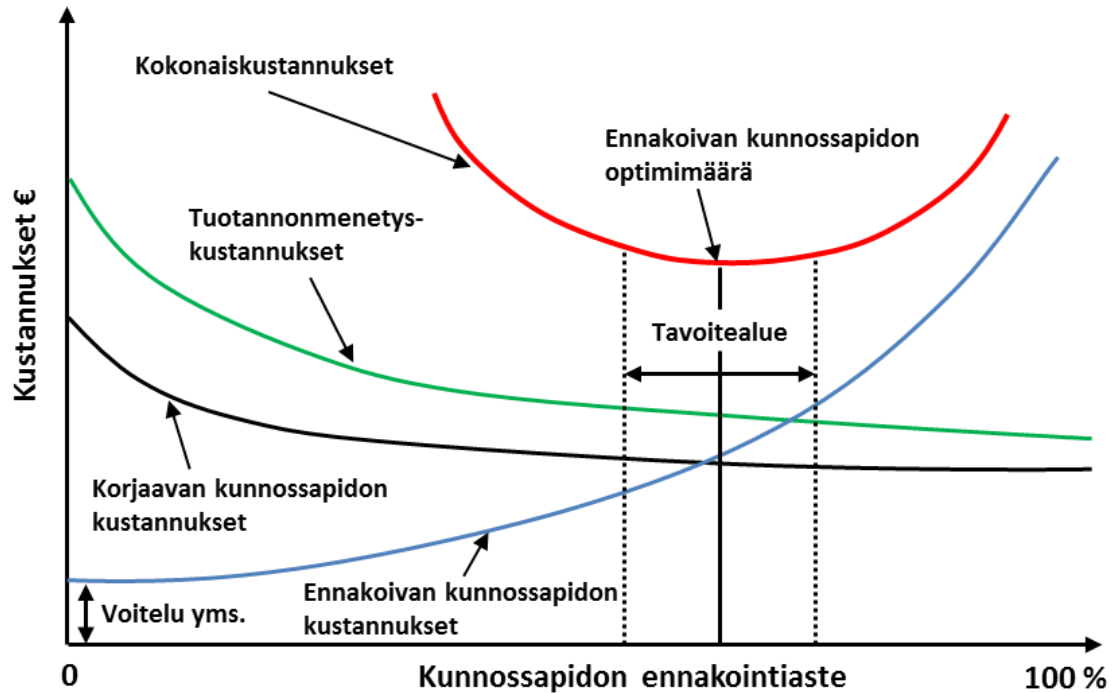
Kertaluonteisesti suoritettavat parantavan kunnossapidon toimenpiteet ovat ennakoivan kunnossapidon erikoistapauksia. Parantava kunnossapito pyrkii kohteen rakennetta tai toimintaa muuttamalla parantamaan kohteen toimintavarmuutta tai kunnossapidettävyyttä [16, s. 23].

Häiriökorjaukset

Kohteen toimintakyky sekä käyttöturvallisuus palautetaan alkuperäiseen tasoon häiriökorjauksen avulla, mikäli vikaantumiseen reagoidaan vasta vian synnyttyä. Vian seurauksista riippuen häiriökorjaus voi olla joko siirretty tai välitön korjaus. Seurauksiltaan merkittävimmät häiriökorjaukset suoritetaan välittömästi, kun taas vähäisempiä seurauksia aiheuttavat häiriökorjaukset voidaan mahdollisuuksien mukaan siirtää suoritettaviksi myöhempinä ajankohtina. [16, s. 23]

3.3 Kunnossapidon kustannukset

Korjaavaa kunnossapitoa pidetään yleisesti kunnossapitolajeista kalliimpana ennakoivaan kunnossapitoon verrattuna [23, s. 21]. Kunnossapidon kehittämisellä ennakoivampaan suuntaan voidaan vähentää korjaavan kunnossapidon kustannusten ja tuotannonmenetyskustannusten myötä myös kokonaiskustannuksia kuten kuvassa 20 on havainnollistettu.



Kuva 20. Ennakoivan kunnossapidon vaikutus kokonaiskustannuksiin ”perustuu lähteeseen [13]”.

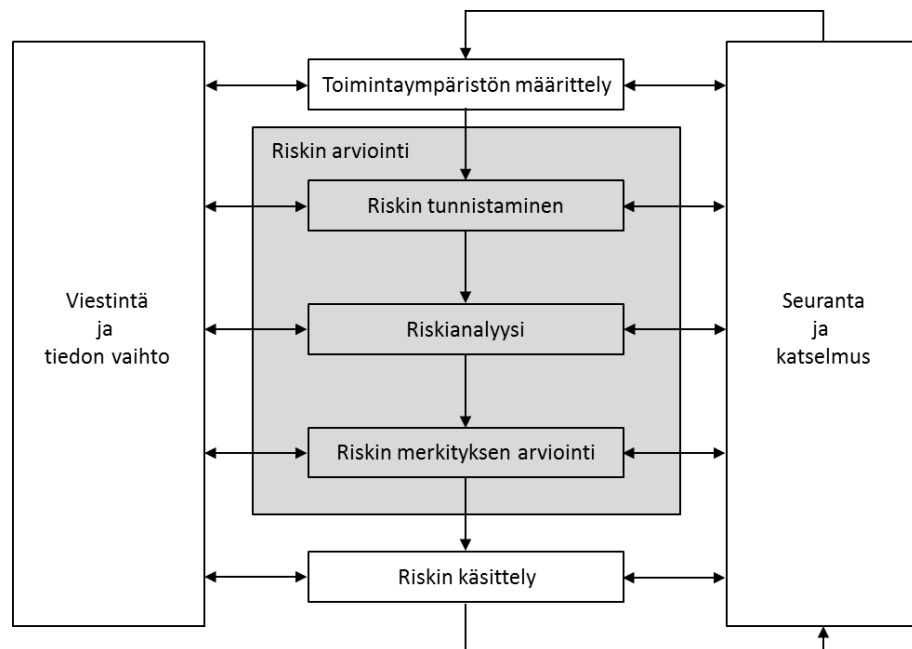
On syytä kuitenkin huomata, että kaikkia vikaantumisia ei voida estää vaikka ennakoivaa kunnossapitoa lisättäisiinkin. Liiallinen ennakoiva kunnossapito taas kasvattaa kokonaiskustannuksia kasvaneiden ennakoivan kunnossapidon kustannusten myötä. Lisäksi liian usein suoritettavat purkamista vaativat toimenpiteet voivat jopa lisätä yllättävien vikojen määrää kunnossapidon aikana syntyneistä virheistä johtuen. Oleellista onkin pyrkiä löytämään ennakoivan ja korjaavan kunnossapidon suhde, jolla kokonaiskustannusten minimi voidaan saavuttaa. [21,23]

4 KÄYTTÖVARMUUDEN ANALYSOINTI

Tekniset järjestelmät muodostuvat tyypillisesti useista osajärjestelmistä ja komponenteista, jotka keskinäisen vuorovaikutuksen johdosta mahdollistavat järjestelmälle asetettujen toimintojen suorittamisen. Näiden toimintojen ylläpitäminen vaatii niihin liittyvien teknisten riskien tunnistamisen, arvioinnin ja hallinnan. [19] Järjestelmän toimintaan liittyviä teknisiä riskejä voidaan tarkastella muun muassa käyttövarmuusanalyysin avulla. Käyttövarmuusanalyysi on riskien analysointimenetelmä, jossa keskitytään järjestelmän käyttövarmuutta vaarantavien teknisten riskien tarkasteluun. Käyttövarmuusanalyysi on osa riskien arviointia yhdessä:

- riskin tunnistamisen ja
- riskin merkityksen arvioinnin kanssa.

Käyttövarmuusanalyysiä voidaan hyödyntää myös laajemmin kuvassa 21 esitetystä riskienhallinnan kokonaisuudesta aina toimenpiteiden suunnittelusta riskien seurantaan saakka. [26]



Kuva 21. Riskienhallintaprosessi [26, s. 20].

Järjestelmän teknisten riskien kokonaisvaltaiseen hallintaan tulisi sisällyttää sekä kvalitatiivisia että kvantitatiivisia menetelmiä [31]. Seuraavissa luvuissa on esitetty riskien arvioinnin kvalitatiivisia ja kvantitatiivisia menetelmäominaisuuksia.

4.1 Kvalitatiiviset menetelmät

Järjestelmän toimintaan liittyvien riskien vähentämiseksi on ensisijaisen tärkeää tunnistaa riskin aiheuttavat häiriöt, koska vain tunnistettuihin riskeihin on mahdollista vaikuttaa. Järjestelmän toimintaa vaarantavien häiriöiden tunnistamisen lisäksi tulisi muodostaa myös ymmärrys niiden välisistä kausaliteeteista. Näitä järjestelmän toiminnan kehittämisen yhteydessä toteutettavia häiriöiden tunnistamisen ja tapahtumaketjujen mallinnuksen vaiheita tarkastellaan riskianalyysin kvalitatiivisessa osuudessa. [31]

Tyypillisiä häiriöiden tunnistamisen menetelmiä ovat:

- Vika- ja vaikutusanalyysi, FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*)
- Poikkeamatarkastelu, HAZOP (*Hazard and Operability study*)
- Toimintovirheanalyysi, HEA (*Human Error Analysis*)

Näistä menetelmistä poikkeamatarkastelu ja toimintovirheanalyysi keskittyvät järjestelmän toimintaympäristöön ja ihmisten toimintaan liittyvien riskien tarkasteluun. Kun taas vika- ja vaikutusanalyysissä tarkastellaan ja arvioidaan järjestelmän teknisiä riskejä. [31] Menetelmistä ainoastaan vika- ja vaikutusanalyysi on kuvattu laajemmin tämän luvun yhteydessä johtuen sen soveltamisesta tässä diplomityössä.

Vika- ja vaikutusanalyysi

Vika- ja vaikutusanalyysi (FMEA) on systemaattinen ja jäsenneilty järjestelmän toimintavarmuuden tarkastelumenetelmä. FMEA pyrkii tunnistamaan ja arvioimaan yksityiskohtaisesti analysoitavalle kohteelle ominaiset laite- ja komponenttiviatiat. Analyysin aikana tunnistettujen vikaantumistapojen, eli vikamuotojen yksityiskohtaisemman arvioinnin avulla muodostetaan perusta riskien mitoittamiselle ja ehkäisytoimenpiteiden tunnistamiselle ja priorisoinnille. [1,19]

FMEA soveltuu käytettäväksi eri vaiheissa järjestelmän elinkaarta, aina suunnittelun varhaisen vaiheen toiminnan tarkasteluista, käytönaikaiseen toiminnan kehittämiseen. Tyypillisesti FMEA suoritetaan niin kutsuttuna ”bottom-up” menetelmänä, mutta FMEA voidaan vaihtoehtoisesti toteuttaa myös ”top-down” lähestymisenä, joka tunnetaan myös nimellä toiminnallinen FMEA. [7,24]

FMEA:n toteuttaminen ”bottom-up” menetelmän mukaisesti sisältää seuraavat vaiheet:

- Valitaan kohteen osa analysoitavaksi
- Tunnistetaan osan potentiaaliset vikamuodot
- Valitaan vikamuoto arvioitavaksi
 - Määritetään vikamuodon aiheuttajat
 - Määritetään vikamuodon kehittymisen ominaispiirteet
 - Arvioidaan sen eri kohdetasojen aiheuttamat vaikutukset

- Toistetaan edelliset vaiheet kaikille kohteen osille ja niiden vikamuodoille

FMEA:n ”bottom-up” menetelmätavassa kohteen jokainen osa analysoidaan yksityiskohtaisesti. Tästä johtuen tietomäärä saattaa kasvaa suureksi, joka voi hankaloittaa vikamuotojen priorisointia sekä vikamuodon, vian aiheuttajan ja seurauksen väliset yhteydet voivat sekoittua. Lisäksi erilaisten vikakombinaatioiden aiheuttamia seurauksia on hyvin hankala tunnistaa. [7,19] Kuvassa 22 on esitetty meridieselmoottorin nokka-akselin voitelupumpulle tehty ”bottom-up” FMEA.

FMEA "Bottom-up"	Laitte: Nokka-akselin voitelupumppu					
	Kohde	Vikamuoto	Vian aiheuttaja	Vian ominaispiirre	Vian vaikutus	
					Paikalliset vaikutukset	Toiminnallinen vika
15.1	Pysähtyy käynnin aikana (pääpumppu) (havaittava)	Pumpun moottorivika Pumpun jumituminen Vika pumpun ohjauksessa Pumpun kytkin vikaantunut	Satunnainen vika, kulumisvika Satunnainen vika, kulumisvika Satunnainen vika, kulumisvika Kulumisvika	Häiriö nokka-akselin voitelussa. Tarvitaan varapumpun käynnistys	Ei voiteluöljyn virtausta nokka-akselille	Lyhyt moottorin pysäytys, kunnes varavoiteluöljypumppu saatu käynnistettyä
15.2	Käynnistyy ennen aikaisesti/ toimii liian pitkään (varapumppu)					Ei merkittävää vaikutusta tarkasteltavan kohteen kannalta
15.3	Toimii alentuneella nostokorkeudella/ tiilavuusvirralla (pääpumppu) (havaittava)	Kulunut pumpun juoksupyörä	Kulumisvika	Riittämätön voiteluöljyn paine tai tilavuusvirta nokka-akselille, johtaan painehälytykseen. Tarvitaan varapumpun käynnistys	Voiteluöljyn tilavuusvirta nokka-akselille alle 10.3 m ³ /h Voiteluöljyn paine nokka-akselille alle 4 bar	Lyhyt moottorin pysäytys, kunnes varapumppu saatu käynnistettyä

Kuva 22. Voitelupumpun "bottom-up" FMEA ”perustuu lähteeseen [7, s. 49]”.

”Top-down” menetelmätavassa lähdetään liikkeelle päinvastaisessa suunnassa ”bottom-up” menetelmään verrattuna. Menetelmätavassa järjestelmän toiminnot ja toiminnot estävät toiminnalliset viat tunnistetaan ja priorisoidaan ennen vikamuotojen tunnistamista ja arviointia. Tällä tavoin analyysissä keskitytään ainoastaan vikamuotoihin, joilla on merkittävimmät seuraukset järjestelmän turvallisen toiminnan kannalta. Tunnistettujen vikamuotojen yksityiskohtaisempi arviointi tehdään kuten ”bottom-up” menetelmässä. [7,19]

Tämä menetelmätapa soveltuu erityisesti suunnitteluvaiheessa tehtäville järjestelmän toiminnan tarkasteluille. Lisäksi menetelmää sovelletaan järjestelmän kunnossapidon suunnittelussa luotettavuuskeskeisen kunnossapidon yhteydessä (RCM). Menetelmätavan heikkoutena on, ettei se voi taata kaikkien toiminnolle ominaisten vikamuotojen tunnistamista. [7,19]

Tapahtumaketjujen mallinnus

Häiriöiden tunnistamisen jälkeen häiriötekijöiden väliset syy-seuraussuhteet voivat olla vielä epäselviä tarkasteltavan tapahtuman syntymisessä. Näiden tapahtumaketjujen kuvaamiseksi on olemassa erilaisia mallinnusmenetelmiä, joiden avulla voidaan osoittaa häiriötekijöiden ja seurausten väliset tapahtumaketjut. Tapahtumaketjut voidaan mallin-

taa joko lopputapahtumasta tai vaihtoehtoisesti alkutapahtumasta etenevinä esityksinä. Menetelmää, jossa mallinnus toteutetaan lopputapahtumasta kohti alkutapahtumaa, kutsutaan deduktiiviseksi analyysiksi. Vastaavasti induktiiviseksi analyysiksi kutsutaan mallinnusmenetelmää, jossa edetään alkutapahtumista kohti lopputapahtumaa. [24,31]

Mallinnuksessa tyypillisesti käytettäviä menetelmiä ovat:

- vikapuuanalyysi, FTA (*Fault Tree Analysis*)
- luotettavuuslohkokaavio, RBD (*Reliability Block Diagram*)
- tapahtumapuuanalyysi, ETA (*Event Tree Analysis*)

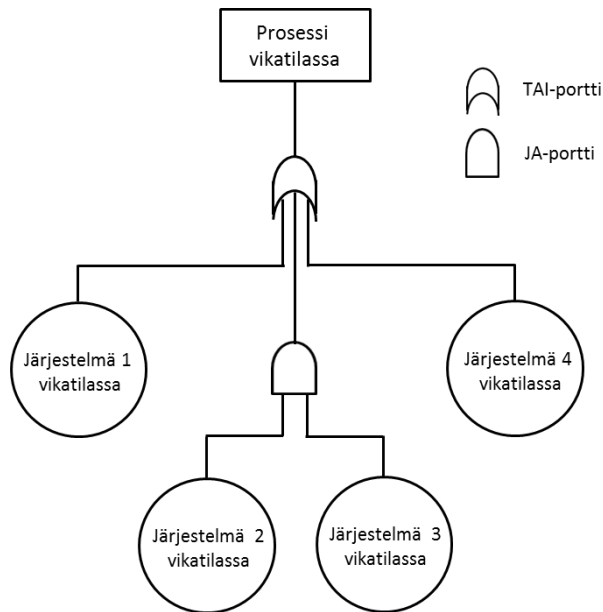
Häiriöiden syy-seuraussuhteiden mallinnus ja analysointi muodostaa pohjan teknisten kokonaisuuksien luotettavuuden, turvallisuuden ja riskien kvantitatiivisille tarkasteluille. Mallinnusmenetelmistä laajemmin tässä luvussa esitetään ainoastaan diplomityön soveltavassa osuudessa käytetty vikapuuanalyysi. Luotettavuuslohkokaavio poikkeaa vikapuuanalyysistä siinä määrin, että siinä kuvataan kuinka järjestelmä toimii. Näin ollen se on vikapuuanalyysin komplementtiesitys. Tapahtumapuuanalyysissa tapahtumien todennäköisyyksiä tarkastellaan vikapuusta poiketen ehdollisina todennäköisyyksinä. Muutoin menetelmässä sovelletaan samoja periaatteita vikapuuanalyysin kanssa. [24,31]

Vikapuuanalyysi

Vikapuuanalyysi on graafinen kuvaus useiden rinnakkain ja peräkkäin tapahtuvien vikojen yhdistelmistä johtaen tarkasteltavaan ei-toivottuun tapahtumaan. Viat voivat tässä yhteydessä liittyä varsinaisiin komponenttien vikaantumisiin, mutta yhtä lailla ne voivat olla inhimillisiä virheitä tai muita tapahtumia, jotka tapahtuessaan voivat johtaa tarkasteltavaan ei-toivottuun tapahtumaan. Vikapuu kuvaa perustapahtumien loogisten vuorovaikutussuhteiden avulla huipputapahtuman syntymiseen johtavat tapahtumaketjut ylhäältä alas rakentuvana deduktiivisena esityksenä. [8,12]

Puurakenteen ylimmällä tasolla tarkasteltavaa ei-toivottua tapahtumaa kutsutaan huipputapahtumaksi, TOP-tapahtumaksi. Puurakenteen alimman tason tapahtumia kutsutaan perustapahtumiksi. Perustapahtumilla voi olla erilaisia vaikutuksia huipputapahtuman syntymiseen. Perustapahtumasta voi yksinkertaisimmillaan seurata suoraan huipputapahtuman syntyminen tai huipputapahtuman syntymiseen voidaan vaatia erilaisia perustapahtumien kombinaatioita. Näitä ylemmän vikapuutason aiheuttavia perustapahtumakombinaatioita kootaan porttitapahtumiksi vikapuuhun. Porttitapahtumien perustapahtumilta vaatimia toteutumisehtoja kuvataan loogisten porttiehtojen avulla. Porttiehtoina käytettäviä operaattoreita ovat OR, AND, k/n, XOR, PriorityAND ja NOT-operaattorit. [8,12] Porttiehtojen avulla kuvataan kuinka monta tai missä järjestyksessä perustapahtumien tulee tapahtua porttitapahtuman syntymiseksi. Porttitapahtuman synnyttyä tapahtuma siirtyy puurakenteessa seuraavalle tasolle joko seuraavan porttitapahtuman tai

huipputapahtuman aiheuttajaksi. Kuvassa 23 on esitetty yksinkertainen esimerkki vika-
puusta, joka kuvaa prosessin vikatilan syntymisen.



Kuva 23. Esimerkki vikapuun rakenteesta ”perustuu lähteeseen [31]”.

Esimerkissä esitetyn prosessin vikatilan syntymiseen riittää järjestelmien 1 tai 4 yksittäinen vikaantuminen tai vaihtoehtoisesti järjestelmien 2 ja 3 yhteisvika. Toisin sanoen järjestelmät 1 ja 4 sekä järjestelmien 2 ja 3 muodostama kokonaisuus toimivat prosessin kannalta sarjassa ollen kytkettynä TAI-portin avulla prosessin vikatilan syntymiseen. Järjestelmät 2 ja 3 toimivat prosessin kannalta rinnakkain, jolloin niiden muodostaman kokonaisuuden vikaantumiseen liittyvää ehtoa kuvataan JA-portin avulla tarkoittaen, että molempien järjestelmäosien tulee olla samanaikaisesti vikaantuneena.

Vikapuussa kuvatun järjestelmän kvalitatiivisiin menetelmäominaisuuksiin kuuluu katkosjoukkojen määrittäminen. Katkosjoukolla tarkoitetaan perustapahtumien joukkoa, joiden samanaikainen tapahtuminen johtaa huipputapahtuman toteutumiseen. Järjestelmä voi muodostua isosta määrästä perustapahtumia, jolloin kaikkien mahdollisten katkosjoukkojen käsittely hankaloituu. Tällöin on syytä pyrkiä yksinkertaistamaan katkosjoukkojen tunnistamista niin, että tyypillisimmät ja vähiten perustapahtumia sisältävät katkosjoukot tunnistettaisiin. Tyypillisimpien katkosjoukkojen poistaminen kokonaan vaikuttaisi suoraan järjestelmän toimintaan. Katkosjoukkoja, jotka tyypillisesti löytyvät järjestelmän vikaantumisten taustalta nimitetään minimikatkosjoukoiksi. Minimikatkosjoukolle on ominaista, että mikäli siitä kyettäisiin poistamaan yksittäinen perustapahtuma, niin tällöin se ei enää olisi katkosjoukko. [12, s. 227–228]

4.2 Kvantitatiiviset menetelmät

Järjestelmän toiminnan tarkastelu vikapuuanalyysin avulla ei rajoitu ainoastaan kvalitatiivisiin tarkasteluihin vaan se tarjoaa myös mahdollisuuden järjestelmän kvantitatiivisille eli määrällisille tarkasteluille. Järjestelmän toimintaa voidaan tarkastella kvantitatiivisesti laskemalla Boolean algebraa käyttäen minimikatkosjoukkojen todennäköisyydet niiden perustapahtumien todennäköisyyksien avulla ja laskemalla tämän jälkeen yhteen katkosjoukkojen todennäköisyydet. [1, 30]

Kvantitatiivisen arvioinnin päätteeksi saadaan selville huipputapahtuman todennäköisyys. Tämän lisäksi selvyyttä saadaan hallitsevista katkosjoukoista sekä merkittävimmistä perustapahtumista, jotka osaltaan ovat edistämässä huipputapahtuman toteutumista. Toiminnan kannalta merkittävien perustapahtumien tunnistaminen on hyödyllistä muun muassa kunnossapidon strategioista päätettäessä kustannustehokkaan luotettavuuden ja riskienhallinnan toteuttamiseksi järjestelmälle. [30, s. 112]

Vastaavasti FMEA-analyysiin voidaan tuoda kvantitatiivisia menetelmäominaisuuksia arvioimalla tunnistettujen vikamuotojen toteutumisesta sekä niiden aiheuttamien seurausten merkitystä. Tällöin puhutaan varsinaisesti vika-, vaikutus- ja kriittisyysanalyysistä (FMECA). [24, s. 80] FMECA:n ”top-down” menetelmätavan soveltamisesta kunnossapidon kehittämisessä on kerrottu seuraavassa RCM-menetelmää käsittelevässä luvussa.

5 RCM – LUOTETTAVUUSKESKEINEN KUNNOSSAPITO

Luotettavuuskeskeinen kunnossapito (RCM) on kvantitatiivinen analyysimenetelmä, jonka avulla pyritään kehittämään teknisen järjestelmän kunnossapitoa niin, että varmistetaan järjestelmän toimintakyky sen nykyisessä toimintaympäristössä käyttäjien järjestelmältä vaatimalla suorituskyvyllä. Analyysimenetelmänä RCM ohjaa kunnossapitotoimenpiteitä merkittävimpien järjestelmän toimintaa vaarantavien tapahtumien ehkäisemiseksi tai niistä seuraavien seurauksien pienentämiseksi. Keskeisenä osana RCM:ää on vikaantumistapojen tunnistaminen, priorisointi ja yksityiskohtaisempi arviointi toiminnallisen ”top-down” FMECA:n avulla. Kohteen toimintavaatimukset täyttävän kunnossapito-ohjelman luomiseksi tarkasteltavalle kohteelle esitetään RCM:n aikana seitsemävaiheinen kysymyspolku. [15,21,23]

Kysymyspolku muodostuu seuraavista kohteelle esitettävistä kysymyksistä:

- Mitkä ovat kohteen toiminnot ja suorituskykystandardit sen tämänhetkisessä toimintaympäristössä?
- Mitä tapahtuu, kun kohde vikaantuu (mitkä toiminnot jäävät tapahtumatta)?
- Mikä aiheuttaa kohteen kunkin toiminnon puuttumisen tai vajaatoiminnan?
- Mitä tapahtuu kunkin vikaantumisen yhteydessä?
- Mitä vahinkoja kukin vikaantuminen aiheuttaa?
- Mitä voidaan tehdä kunkin vikaantumisen ennustamiseksi tai ehkäisemiseksi?
- Mitä tehdään, jos sopivaa ennakoivaa toimenpidettä ei löydy?

Yllä esitetyt RCM-menetelmän seitsemän kysymystä ohjaavat tunnistamaan kohteelle ominaisia tapahtumien syy-seuraussuhteita ja arvioimaan tapahtumia ja seurauksia yksityiskohtaisemmin tapahtumien merkittävyuden luokitteluksi. Tapahtumien yksityiskohtaisemman arvioinnin ja luokittelun jälkeen menetelmässä pyritään löytämään keinoja, joilla tapahtumaan liittyvää riskiä voitaisiin pienentää. [15,21,23] RCM-menetelmälle ominaisten vaiheiden sisältö käydään tarkemmin läpi seuraavien alalukujen aikana.

5.1 Kohteen toiminnot ja suorituskyky

Kohteen toimintojen ja niihin liittyvien suorituskykyvaatimusten määrittämisellä luodaan kehykset kohteen toiminnallisuuksille. Kohteen toiminnot kuvataan nykyinen toi-

mintaympäristö huomioiden ja suorituskykyvaatimukset määritetään prosessin ja käyttäjien vaatimusten sekä kohteen sisäänrakennetun suorituskyvyn pohjalta. Vaaditun suorituskyvyn ei tulisi kuitenkaan olla kohteen sisäänrakennettua suorituskykyä suurempi. Useimmiten kohteelta vaadittujen toiminnallisuuksien takaaminen edellyttää kunnossapidolta kohteen toiminnallisuuksia säilyttäviä ja ylläpitäviä toimia. [15,21,23]

Teknisillä järjestelmillä on tyypillisesti useita toimintoja. Nämä toiminnot voidaan jakaa pää- ja sivutoimintojen luokkaan. Päätoimintojen luokka sisältää toiminnot, jotka kuvaavat ensisijaiset syyt kohteen olemassaololle, eli mitä kohteen odotetaan tekevän. Sivutoiminnot ovat tyypillisesti hankalammin hahmotettavissa kuin päätoiminnot, vaikka seuraukset niihin liittyvillä vikaantumisilla voivat olla merkittävämmät. Sivutoiminnot liittyvät tyypillisesti,

- ympäristösuojauksen
- turvallisuuden/rakenteellisen eheyden
- ohjauksen/varastoinnin/mukavuuden
- ulkonäön
- suojauksen
- taloudellisuuden/tehokkuuden

toiminnallisiin osa-alueisiin. Sivutoimintojen voidaan yksinkertaistetusti sanoa pyrkivän avustamaan kohdetta päätoimintojen suorittamiseksi turvallisesti ja tehokkaasti. [15,21,23]

5.2 Toiminnan estävien vikojen tunnistaminen

Kohteen sanotaan olevan toiminnallisesti vikaantunut tilanteessa, jossa kohde ei enää pysty täyttämään käyttäjän siltä vaatimaa toimintoa halutulla suorituskyvyllä. Kohteen toiminnallisuuden estävistä vioista käytetään nimitystä toiminnallinen vika. Toiminnallinen vika ei ainoastaan ole tila, jossa kohteen toiminto estyy kokonaan vaan se voi käsittää myös tilanteet, joissa kohde edelleen toimii, mutta suorituskyky on laskenut käyttäjän kohteelta vaatiman tason alapuolelle. Toiminnallisen vian käsite sisältää myös tilanteet, joissa kohteen suorituskyky ylittää kohteelta vaaditun suorituskyvyn. Toiminnallisten vikojen tunnistamisella vastataan RCM:n toiseen kysymyksen. [15,21,23]

5.3 Toiminnallisten vikojen aiheuttajien tunnistaminen

Seuraavassa RCM menetelmävaiheessa pyritään tunnistamaan toiminnallisten vikojen aiheuttajia, eli syytä toiminnallisille vioille. Toiminnallisten vikojen aiheuttajia kutsutaan vikamuodoiksi. Vikamuodot kuvaavat osalle ominaisia vikaantumistapoja, jotka tapahtuessaan voivat aiheuttaa kohteen toiminnallisen vikaantumisen. Vikamuoto voidaan myös ymmärtää vian ilmenemismuotona. [15,21,23]

RCM-menetelmässä vikamuotojen tunnistus ja yksityiskohtaisempi arviointi toteutetaan suorittamalla FMEA kullekin toiminnalliselle vialle. Vikamuotojen tunnistaminen ja arviointi vaatii hyvää tuntemusta kohteesta ja sen toiminnasta. Vikamuotojen tunnistaminen ja arviointi ovat tärkeä vaihe analyysiä, sillä myöhemmässä vaiheessa analyysiä toimenpiteiden suunnittelu kohdistuu juuri tunnistettujen vikamuotojen ehkäisemiseen ja niiden aiheuttajien poistamiseen. Tunnistettujen vikamuotojen määritelmien tulee sisältää vikamuotojen lisäksi myös riittävän yksityiskohtaiset kuvaukset vikamuotojen aiheuttajista soveltuvien kunnossapitotoimenpiteiden valitsemiseksi. [15,21,23]

Kohteen toiminnallisuuteen vaikuttavia vikamuotoja ovat vikamuodot, joita on esiintynyt aikaisemmin samassa tai samantyyppisessä laitteistossa ja joita ehkäistään nykyisillä ehkäisevän kunnossapidon toimenpiteillä. Näiden lisäksi tunnistettavien vikamuotojen joukkoon kuuluvat vikamuodot, joita toistaiseksi ei ole kohteella esiintynyt, mutta joiden uskotaan tulevaisuudessa olevan mahdollisia.

5.4 Mitä tapahtuu vikamuodon synnyttyä

Tässä analyysivaiheessa arvioidaan vaikutuksia, joita tunnistetut vikamuodot tapahtuessaan synnyttävät, eli määritetään mitä tapahtuu vikamuodon synnyttyä. Vikamuodon kohdalla arvioitavat vaikutukset liittyvät:

- vikamuodon havaittavuuteen
- henkilö- ja ympäristöturvallisuuden vaarantuvuuteen
- tuotannon vaarantuvuuteen
- vikamuodosta syntyviin aineellisiin vahinkoihin ja
- korjaustoimenpiteisiin.

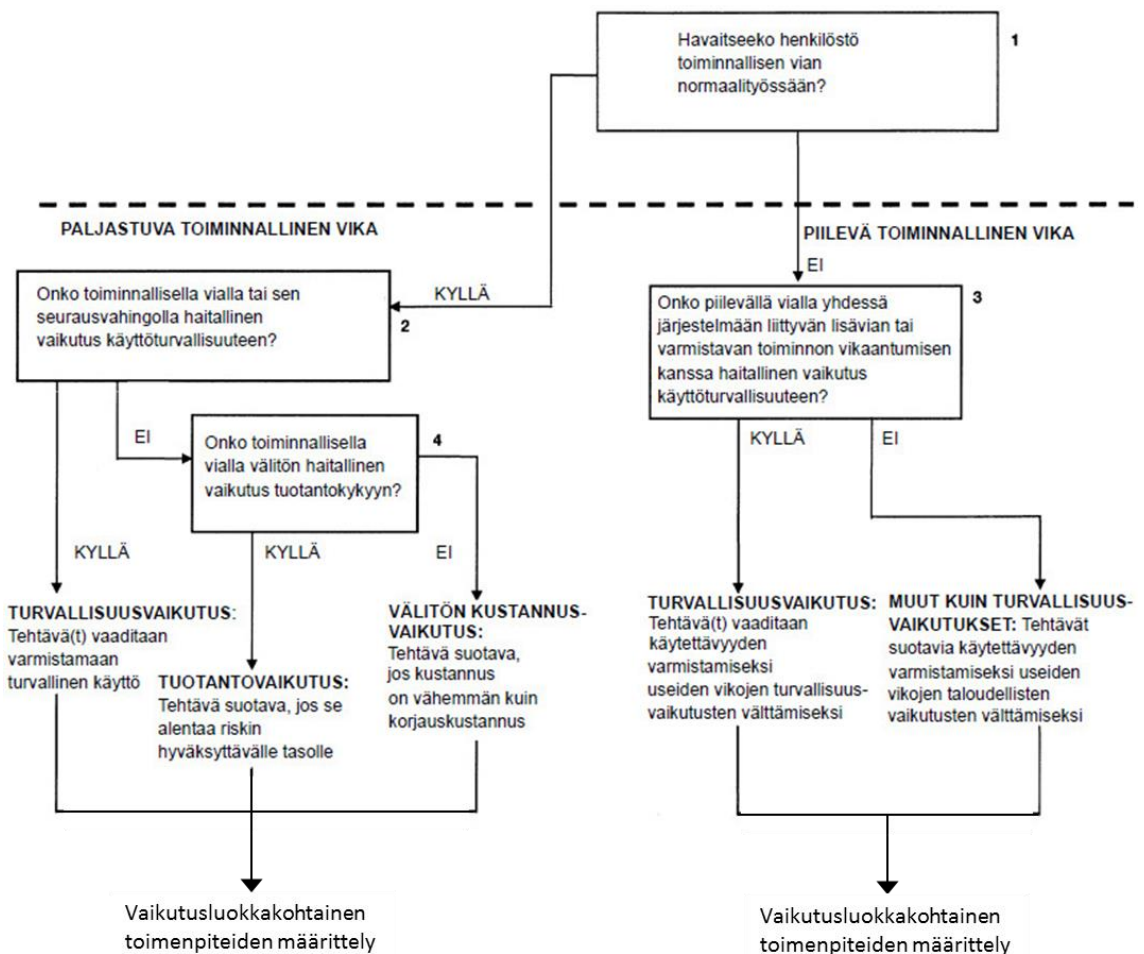
Vikamuotojen vaikutusten arvioinnista saatavaa tietoa hyödynnetään vikojen seurausten arvioinnissa analyysin seuraavassa vaiheessa. Arvioinnista saadulla tiedolla on keskeinen rooli myös ennakoivan kunnossapidon tarpeellisuudesta päätettäessä. Tästä syystä vikamuodon vaikutukset olisikin arvioitava olettaen, että ennakoivaa kunnossapitoa ei tällä hetkellä tehtäisi. [15,21,23]

5.5 Toiminnallisten vikojen luokittelu ja toimenpiteiden määrittäminen

Vikamuotojen aiheuttamat toiminnalliset viat luokitellaan niiden seurausten luonteen ja vakavuuden perusteella analyysin seuraavassa vaiheessa. Toiminnallisten vikojen luokittelu ohjaa toimenpiteiden suunnittelua merkittävimpien vikamuotojen ehkäisemiseksi tai niiden seurausten pienentämiseksi. RCM käyttää kaksitasoista päätöksentekologiikkaa soveltuvimman ja tehokkaimman kunnossapitostrategian määrittämiseksi. [15,23,27]

Seurausten määrittäminen

Toiminnallisesta viasta aiheutuvat seuraukset luokitellaan kuvassa 24 esitetyn ensimmäisen tason logiikkakaavion avulla. Logiikkakaaviossa toiminnalliselle vialle esitetään sarja kysymyksiä, joihin vastaamalla toiminnallinen vika ohjautuu sille ominaisimpaan seurausvaikutusluokkaan. Toiminnallisten vikojen seuraukset jaetaan niiden havaittavuuden suhteen piileviin ja havaittaviin turvallisuus-, tuotanto- tai kustannusvaikutuksiin KYLLÄ/EI -kysymysjoukon päätteeksi. Vian havaittavuus määritellään käyttökäytännön normaalityöntekijöiden kannalta katsottuna, eli havaitseeko käyttökäytännön toiminnallisen vian normaalityöntekijöiden ohessa. [27]

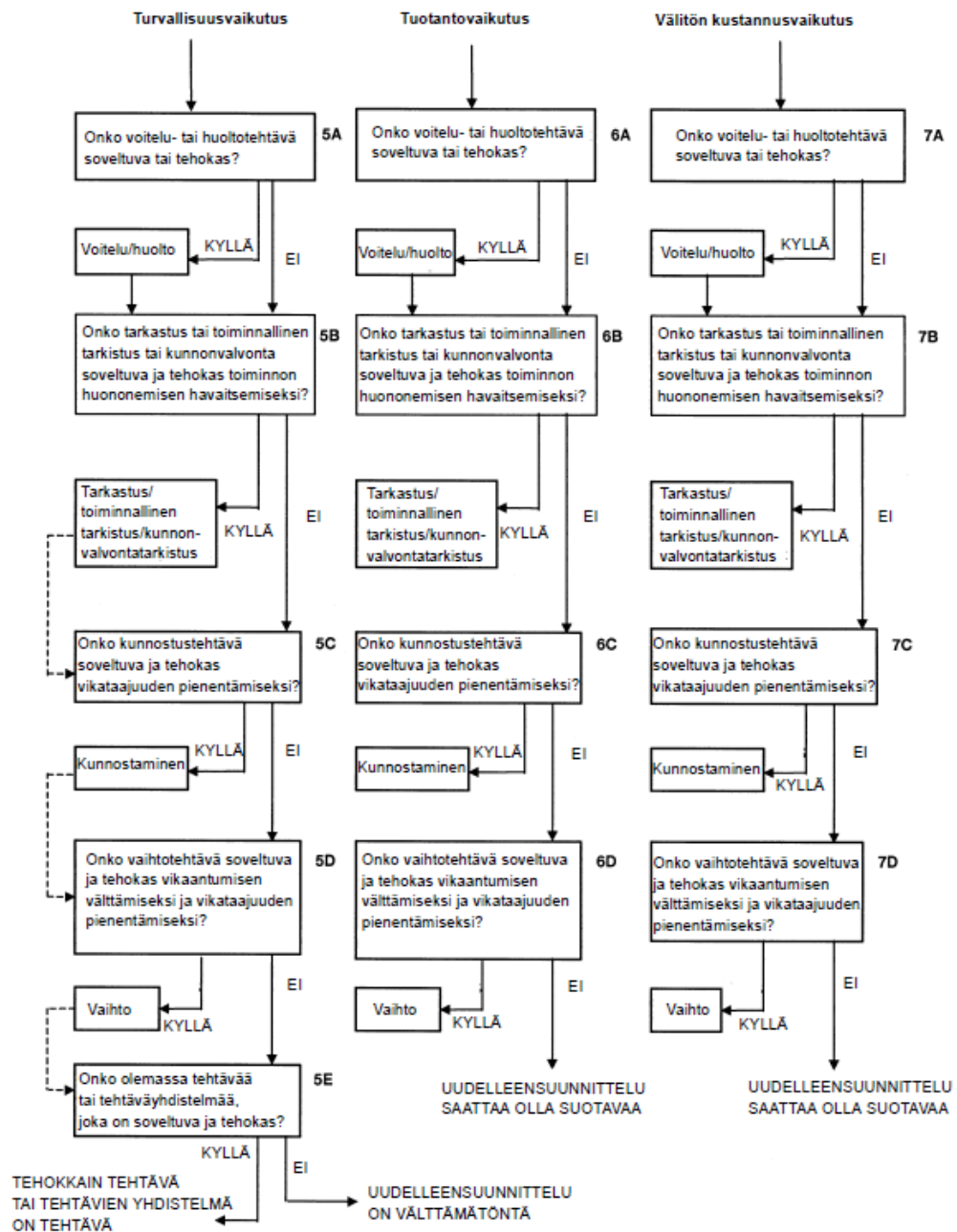


Kuva 24. Toiminnallisten vikojen vaikutusten luokittelu 1. tason RCM-logiikkakaaviossa [27, s. 32].

Ensimmäisen vaiheen logiikkakaavion päätteeksi toiminnallinen vika on luokiteltu sen seurausvaikutuksen mukaisesti. Toiminnallisen vian seurausvaikutusluokituksesta riippuen sen aiheuttaville vikamuodoille esitetään erilaisia toimenpiteitä toiminnalliseen vikaan liittyvien riskien poistamiseksi tai vähentämiseksi päätöslögiikan seuraavassa vaiheessa. [15,23,27]

Toimenpiteiden määrittäminen

Päätöslogiikkakaavion toisessa vaiheessa kunkin toiminnallisen vian aiheuttaville vikamuodoille esitetään niiden kunnossapidettävyyteen liittyviä kysymyksiä soveltuvien ja tehokkaiden huoltotehtävien määrittämiseksi. Kysymyspolun aikana vikamuodolle esitettävät KYLLÄ/EI- kysymykset riippuvat sen aiheuttaman toiminnallisen vian seurausvaikutusluokituksesta. Havaittavissa olevan toiminnallisen vian aiheuttaville vikamuodoille esitettävät logiikkakaavion toisen vaiheen kysymyspolut on esitetty kuvassa 25. Vastaavat piilevän toiminnallisen vian aiheuttaville vikamuodoille esitettävät kysymyspolut on esitetty liitteessä A. [27]



Kuva 25. Toimenpiteiden määrittely 2. tason RCM-logiikkakaaviossa [27, s. 34].

Vaikutusluokasta riippumatta vikamuodolle ehdotetaan toimintakykyä ylläpitävää voitelu- tai huoltotyötä kysymyspolun ensimmäisessä vaiheessa. Riippumatta ehdotetun voitelu- tai huoltotyön soveltuvuudesta ja tehokkuudesta, vikamuodolle ehdotetaan tarkastus- tai kunnonvalvonnantoimenpiteitä kysymyspolun seuraavassa vaiheessa. Toimenpiteiden määrittely voidaan lopettaa tässä vaiheessa kysymyspolkua tuotanto- tai kustannusvaikutuksia aiheuttavan vikamuodon kohdalla, mikäli toimenpidetyyppiehdotus on soveltuva ja tehokas. Mikäli toimenpide ei ole soveltuva eikä tehokas, edetään kysymyspolussa seuraavaan toimenpidetyyppiehdotukseen. Vastaavasti turvallisuusvaikutuksia aiheuttavan vikamuodon kohdalla kysymyspolkua edetään loppuun saakka riippumatta aiemmassa toimenpidetyyppiehdotuksessa löytyneestä toimenpiteestä. [15,23,27]

Logiikkakaavion kysymyspolun päätteeksi vikamuodolle syntyy ehdotus soveltuvimmasta toimenpidetyypistä tai toimenpidetyyppien yhdistelmästä. Toimenpiteen katsotaan soveltuvan vikamuodon ehkäisemiseen, mikäli sillä on kyky tunnistaa vikamuodon aiheuttajia ja sen avulla voidaan alentaa vikamuodosta aiheutuvat seuraukset hyväksyttävälle tasolle. Toimenpiteiden määrittelyn yhteydessä tulee toimenpiteiden soveltuvuuden lisäksi arvioida toimenpiteiden tehokkuutta. Soveltuvan toimenpiteen arvioidaan olevan tehokas, mikäli se alentaa vikamuodon seurauksia enemmän kuin itse huoltotoimenpide vaatii suoraa ja epäsuoraa kustannuksia. Mikäli soveltuvaa ja tehokasta ennakkoivaa toimenpidettä ei kysymyspolun päätteeksi ole vikamuodolle kyetty löytämään, niin tällöin vian etsinnän ja uudelleensuunnittelun toimenpiteiden tarkastelu olisi vähintäänkin suotavaa riskien vähentämiseksi. [15,23]

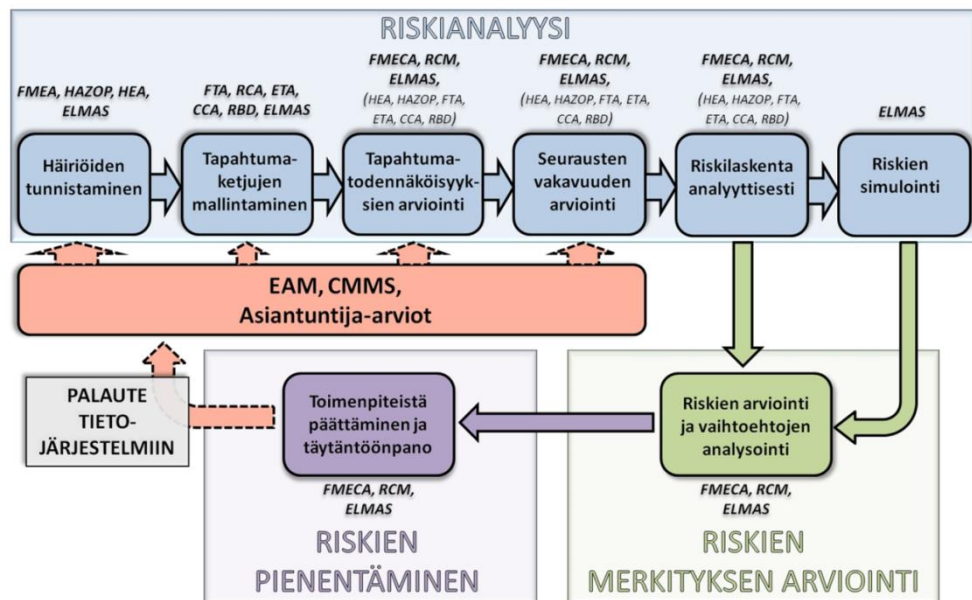
Analyysin päätteeksi toimenpiteet kootaan toimenpidelistaukseksi, jonka mukaisesti tarkasteltavan kohteen toimintakykyä jatkossa ylläpidetään. Toimenpiteiden jalkauttamisen onnistumisella on merkittävä rooli analyysin aikana määritetyillä toimenpiteillä saavutettavien parannusten realisoitumisessa. Uhkana kuitenkin on, että toimenpiteiden suorittamisessa palataan vanhaan toimintamalliin, mikäli uusien toimenpiteiden jalkauttamisessa epäonnistutaan. Tästä johtuen toimenpiteiden jalkauttamisesta ja seurannasta vastaavien henkilöiden tulee olla sitoutuneita vieden määrätietoisesti uusia toimintamalleja ja toimenpiteitä niitä suorittavien henkilöiden tietoisuuteen. [15,23]

6 ELMAS KÄYTTÖVARMUUDEN HALLINNAN TYÖKALUNA

ELMAS-ohjelmisto (Event Logic Modeling and Analysis Software) on tapahtumalogiikan mallintamisen ja analysoinnin työkalu. ELMAS-ohjelmisto sisältää yleisimmät kvantitatiiviset ja kvantitatiiviset riskianalyyssimenetelmät tukemaan kokonaisvaltaista riskienhallintaa. Riskianalyyssien toteuttamiseksi ELMAS-ohjelmisto tarjoaa muun muassa FTA, RBD, ETA ja FMECA analyysimenetelmät. [18]

ELMAS-ohjelmiston ensimmäiset ohjelmistoversiot syntyivät Tampereen teknillisessä yliopistossa toteutettujen TEKES-tutkimusprojektien tuloksena. Vuodesta 2006 lähtien ELMAS-ohjelmiston myynnistä ja kehityksestä on vastannut Ramentor Oy, tarjoten asiakkailleen myös tuotteisiin ja menetelmiin liittyvää koulutusta, asiantuntija- ja sovel-luspalveluita. [18]

Kuvassa 26 esitetään ELMAS-ohjelmiston tarjoamien ominaisuuksien soveltuvuus yksittäisten riskianalyyssivaiheiden toteutuksessa sekä laajemmassa riskienhallinnan kokonaisuudessa.



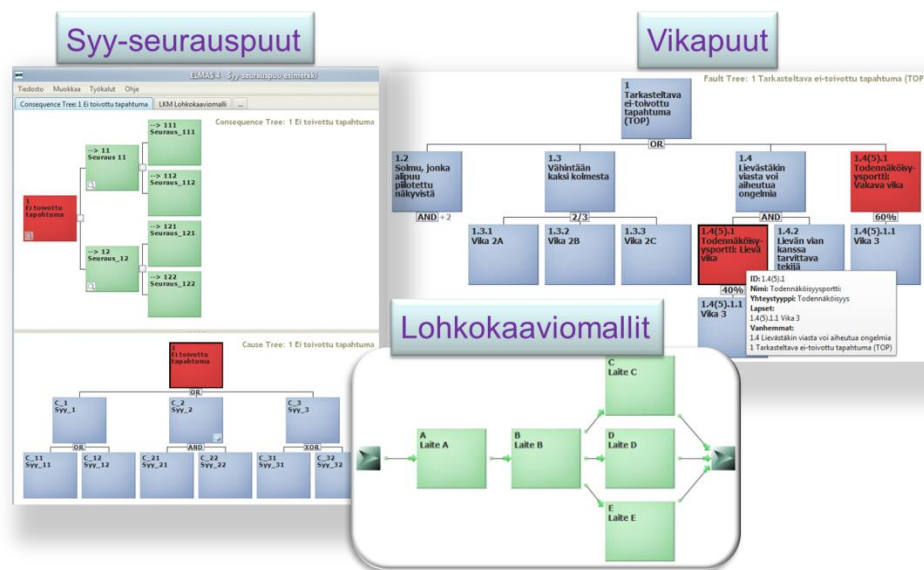
Kuva 26. ELMAS-ohjelmisto osana kokonaisvaltaista riskienhallintaa [18].

Toteutettavasta analyysimenetelmästä riippumatta analyysivaiheet voidaan jakaa ELMAS-ohjelmistossa mallinnus-, simulointi- ja analysointivaiheeseen. Kvalitatiivisten analyysimenetelmien toteuttaminen ei vaadi simulointivaiheen suorittamista, kun taas kvantitatiiviset analyysimenetelmät tarjoavat mahdollisuuden tarkasteltavan kohteen käyttäytymisen simuloinnille. Seuraavissa alaluvuissa on kerrottu yksityiskohtaisemmin ELMAS-ohjelmiston mallinnus-, simulointi- ja analysointiominaisuuksista. [18]

6.1 Mallinnus

Mallinnuksen avulla tutkittavasta kokonaisuudesta luodaan graafinen ELMAS-malli. Mallissa esitetään loogisia ehtoja hyödyntäen tarkasteltavan kokonaisuuden toiminta tai tapahtumaketjut tarkasteltavan ei-toivotun tapahtuman taustalla. Tarkasteltavalla kokonaisuudella voidaan mallinnuksen yhteydessä tarkoittaa mitä tahansa kokonaisuutta tai tapahtumaa, jonka toiminta tai syntyminen voidaan esittää kausaalisen rakenteen avulla.

ELMAS-ohjelmisto tarjoaa tapahtumaketjujen yksityiskohtaiseen mallintamiseen kuvassa 27 esitetyt ylhäältä alas rakentuvat vikapuut, vasemmalta oikealle rakentuvat lohkokaaviot ja syy-seurauspuut. Lisäksi voidaan käyttää mallityyppien yhdistelmiä tarkempien sisäisten rakenteiden kuvaamiseen. [18]



Kuva 27. ELMAS mallinnusmenetelmät [18].

6.2 Simulointi

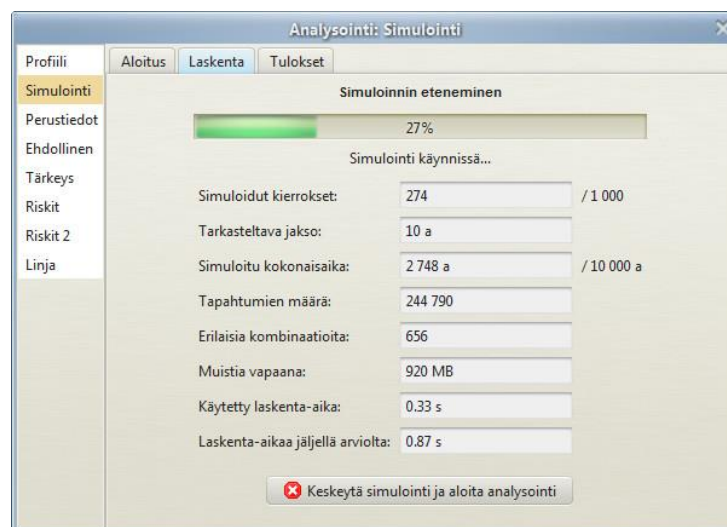
Simuloinnilla tarkoitetaan tutkittavan järjestelmän tai ilmiön tietokoneavusteista käyttäytymisen tarkastelua. Simulointi edellyttää loogikkaa sisältävän matemaattisen mallin lisäksi arvioita muun muassa perustapahtumien toteutumisesta ja kestoista. Mallissa kuvatut tapahtumat voivat olla luonteeltaan joko satunnaisia, eli stokastisia tai ei-satunnaisia, eli deterministisiä. Satunnaisia tapahtumia sisältäviä malleja simuloitaessa

puhutaan stokastisesta simuloinnista, eli simuloinnista saatavat tuloksetkin ovat satunnaismuuttujia. Tapahtumien satunnaisuuden lisäksi mallissa kuvatun järjestelmän tai ilmiön käyttäytyminen saattaa muuttua ajan suhteen ollen joko staattista tai dynaamista. Staattisen mallin avulla kuvataan ajan suhteen muuttumattoman järjestelmän tai ilmiön käyttäytymistä. Vastaavasti dynaaminen malli huomioi järjestelmässä tai ilmiössä ajan suhteen tapahtuvat muutokset. [9]

ELMAS-ohjelmisto tarjoaa erilaisia simulointimenetelmiä tutkittavan järjestelmän tai ilmiön dynaamisuudesta sekä tapahtumien satunnaisuudesta riippuen. Seuraavat simulointimenetelmät ovat käytössä ELMAS-ohjelmistossa:

- Analysointi: Simulointi (Staattinen malli, jossa tapahtumat stokastisia tai deterministisiä)
- Analysointi: Raportti (Staattinen malli, jossa tapahtumat deterministisiä)
- Dynaaminen: Simulointi (Dynaaminen malli, jossa tapahtumat stokastisia tai deterministisiä)
- Dynaaminen: Raportti (Dynaaminen malli, jossa tapahtumat deterministisiä)

Kuvassa 28 on esitetty simuloinnin edistyminen ELMAS Analysointi: Simulointi – käyttöliittymässä.



Kuva 28. ELMAS simuloinnin edistyminen [18].

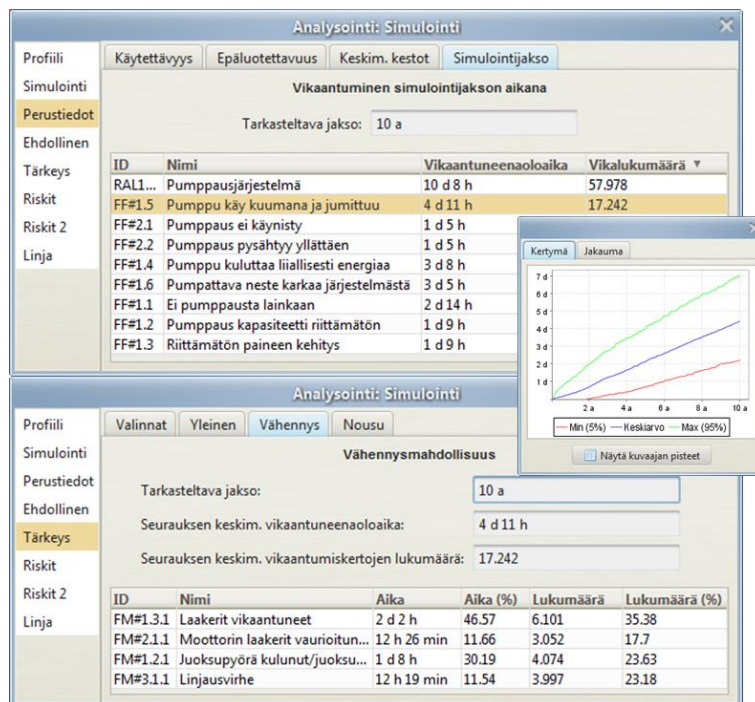
Simuloinnin aikana käydään läpi haluttu määrä simulointikierroksia, joista jokainen kierros vastaa ennen simulointia määritettyä tarkasteltavaa jaksoa. Simuloinnin tarkkuutta voidaan kasvattaa simulointikierroksia lisäämällä. Tämä pätee erityisesti simuloinneissa, joiden malleissa on mukana harvoin tapahtuvia tai suuren hajonnan omaavia tapahtumia. Pelkästään deterministisiä lähtötietoja sisältävien mallien simulointi on simuloinnin erikoistapaus, jossa täsmälliset simulointitulokset voidaan muodostaa yhden simulointikierroksen avulla. Tämä siitä johtuen, että tapahtumien syntyyn ei liity satunnaisuutta kuten stokastisilla tapahtumilla. [18]

6.3 Analysointi

ELMAS-ohjelmisto tarjoaa erilaisia tulostuksia simulointitulosten analysoimiseksi. Simulointitavasta riippuen tulostuksissa tarjotaan simulointituloksia hiukan eri muodoissa. Simuloinnista saatavat tulostukset osoittavat tulokset joko keskiarvoisina tai täsmällisinä tuloksina riippuen tapahtumien stokastisuudesta. Stokastisia tapahtumia sisältävien mallien simuloinnista saatavat tulostukset osoittavat simulointikierrosten aikana muodostuneet keskiarvoiset tulokset. Vastaavasti deterministisiä lähtötietoja sisältävien mallien tulostusten tulokset esitetään täsmällisinä tuloksina. [18]

Luotettavuus- ja käyttövarmuustulokset

Tarkasteltavan kohteen käyttövarmuutta ja siihen liittyviä tekijöitä voidaan tarkastella analysointityökalun tarjoamien solmujen tilojen vaihteluun ja keston liittyvien simulointitulosten lisäksi halutun ehdon voimassaolon mukaisesti tai solmujen tärkeystulosten pohjalta. Tarkasteltavan kohteen vikaantuneenaoloajan ja vikalukumäärien tulokset on esitetty kuvan 29 tulostuksessa. Tulostuksessa on lisäksi esitetty merkittävimmän kokonaisuuden vikaantuneenaoloajan sekä vikalukumäärien vähennyspotentiaalit. [18]



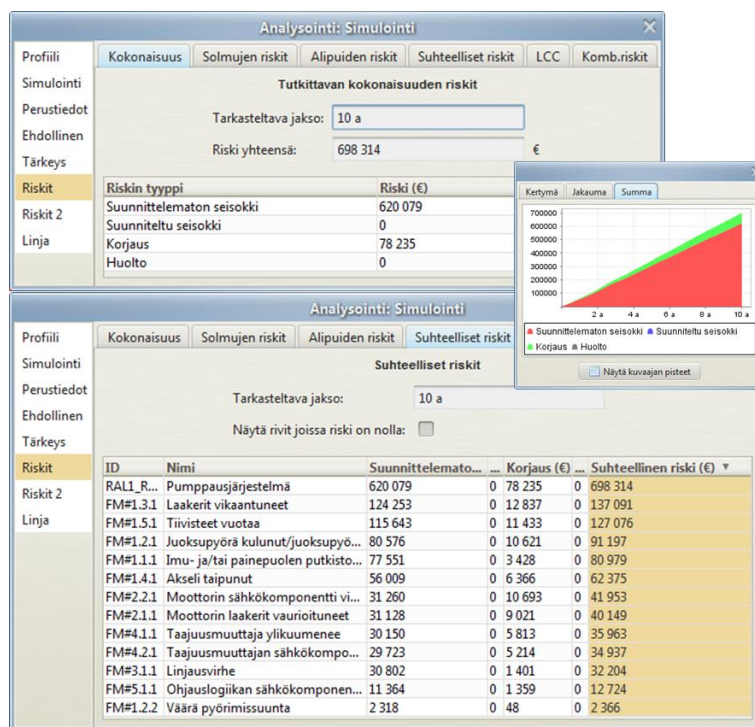
Kuva 29. Kriittisyydet käyttövarmuuden suhteen [18].

Tulostusten tuloksia voidaan tarkastella yksityiskohtaisemmin erilaisten kuvaajien avulla. Stokastisia tapahtumia sisältävät tulostukset tarjoavat tapahtumista erilaisia kertymä-, jakauma- ja summakuvaajia. Kertymä- ja jakaumakuvaajista voidaan nähdä keskimääräisen tuloksen lisäksi myös tapahtumien 90 prosentin luottamusväli 5 ja 95

prosentin kvantiilien avulla. Vastaavasti deterministisiä tapahtumia voidaan tarkastella tulosnäkymissä täsmällisten kertymä- ja summakuvaajien avulla. Perustulosten lisäksi tulosnäkyymiin on mahdollista muodostaa omia kuvaajia ja raportteja dynaamisen koodin parametreista ja listoista analysoitaessa dynaamisen simuloinnin tuloksia. [18]

Kustannusriskitulokset

Tarkasteltavalle kohteelle simuloinnin aikana muodostuneita kustannusriskejä ja resursitarpeita voidaan tarkastella analysointityökalun riskituloksista. Kuvan 30 tulosnäkylässä on esitetty tarkasteltavan kohteen epäkäytettävyydestä aiheutuneet kokonaisriskit sekä kokonaisriskin jakautuminen kohteen perustapahtumille.



Kuva 30. Kriittisyydet kustannusten suhteen [18].

Luotettavuus-, käytettävyys- ja kustannusriskitulosten analysoinnin myötä muodostuu kokonaisvaltainen kuva tarkasteltavalle kohteelle ominaisista riskeistä sekä niihin liittyvistä parannuspotentiaaleista. Simulointi ja tulostenanalysointi tarjoavat mahdollisuuden nopeisiin muutosvaikutustarkasteluihin. Muutosvaihtoehdot liittyvät tyypillisesti vikojen ehkäisemiseksi tai ennakoimiseksi tehtäviin kunnossapitotoimenpiteisiin, laite kahdennuksiin, toipumisaikojen lyhentämiseen esimerkiksi varaosien hankintaviiveitä lyhentämällä. [18]

7 VALUNOSTURIN KÄYTTÖVARMUUSANALYYSI

Tässä luvussa esitellään työn soveltavan osuuden aikana muodostettu toimintamalli valunosturin toimintaan liittyvien teknisten riskien tunnistamiseksi ja arvioimiseksi sekä riskien merkittävyyden simulointi ja analysointi valunosturin kunnossapidon kehityskohteiden tunnistamiseksi. Valunosturin riskien hallitsemiseksi merkittävimmille tunnistetuille vikamuodoille pyrittiin löytämään soveltuvia ja tehokkaita toimenpiteitä kustannusriskien vähentämiseksi työn soveltavan osuuden päätteeksi.

ELMAS-käyttövarmuusanalyysi sisälsi seuraavat vaiheet:

- Valunosturin laite- ja toimintohierarkian mallinnus
- Vikahistorian analysointi
- Nykytilan riskianalyysi
 - Vikaantumis- ja toipumisaikojen sekä kustannusten arviointi
 - Riskien simulointi ja analysointi
- Merkittävimpien vikamuotojen riskien pienentäminen

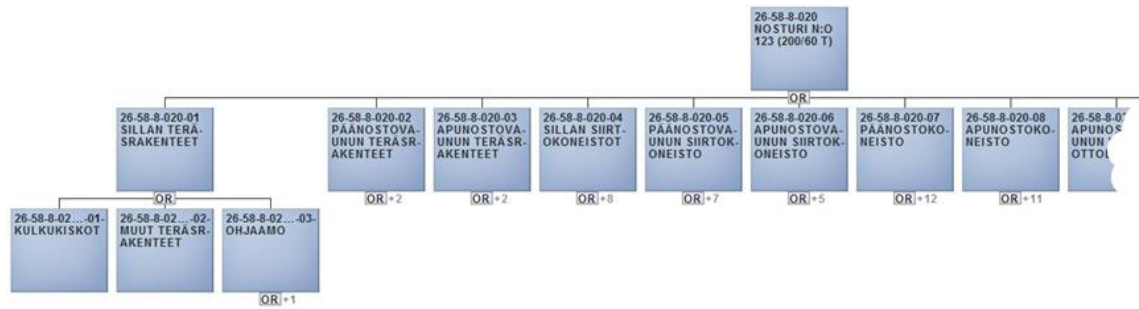
ELMAS-käyttövarmuusanalyysin vaiheiden tarkempi sisältö käydään yksityiskohtaisemmin läpi seuraavien alalukujen aikana.

7.1 Mallinnus

Valunosturin mallinnus aloitettiin nosturin laitehierarkian mallinnuksella. Mallinnus toteutettiin suoraviivaisesti kunnossapidon tietojärjestelmän tarjoaman laitehierarkian mukaisesti. Laitehierarkian mallintamisen jälkeen mallinnusta jatkettiin valunosturin toiminnallisuuksien sekä toiminnot estävien tapahtumaketjujen mallinnuksella.

7.1.1 Laitehierarkiamalli

Valunosturin laitehierarkiamallissa kuvattiin valunosturi sen osajärjestelmien ja laiteryhmiä muodostaman hierarkisen laiterakenteen avulla. Laitehierarkiamalli muodostettiin hyödyntäen kunnossapidon tietojärjestelmän laitehierarkian laitetunnuksia ja -nimiä. Osa nosturin laitehierarkiamallista on esitetty kuvassa 31.

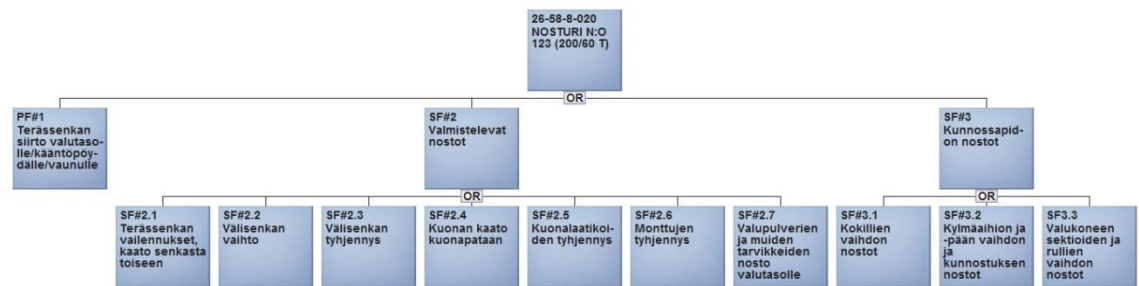


Kuva 31. Valunosturin laitehierarkiamalli.

Luotu laitehierarkiamalli on visuaalinen kuvaus tarkasteltavasta kohteesta, osoittaen kohteen rajaukseen sisältyvät kokonaisuudet. Mallin avulla nopeutetaan analyysiin osallistuvien kykyä hahmottaa tarkasteltava kohde ilman epätietoisuutta siitä, mistä osista analyysiin tietoa kaivataan. Tämän lisäksi laitehierarkiamallia voidaan hyödyntää muun muassa kunnossapidon tietojärjestelmiin kerääntyneen tapahtumahistorian analysoinnissa.

7.1.2 Toimintohierarkiamalli

Käyttövarmuusanalyysin seuraavassa vaiheessa valunosturille luotiin kohteen toiminnot kuvaava toimintohierarkiamalli. Ensimmäisessä vaiheessa valunosturin toimintohierarkiseen malliin sisällytettiin kuvassa 32 esitetyt toiminnot.

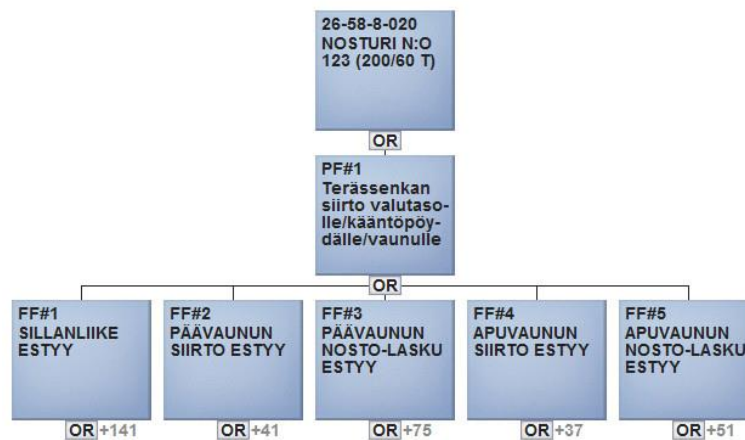


Kuva 32. Valunosturin toiminnot.

Nosturin päätoiminto kuvataan PF#-tunnuksen (*Primary Function*) avulla ja vastaavasti sivutoiminnot SF#-tunnuksien (*Secondary Function*) avulla. Sivutoiminnot on lisäksi ryhmitelty valmisteleviin ja kunnossapidon nostoihin mallin luettavuuden helpottamiseksi.

Mallinnuksen edetessä valunosturin toimintohierarkiamallia päädyttiin tarkastelemaan syvällisemmin ainoastaan päätoiminnon kautta. Ensisijaisena syynä tähän oli merkittävin tuotannollinen vaikutus, joka valunosturin päätoimintoon tunnistettiin liittyvän. Lisäksi mallinnuksen seuraavassa vaiheessa päätoiminnolle tunnistettavien toiminnallisten vikojen havaittiin olevan samoja sivutoimintojen kanssa. Valunosturin päätoiminnon

sekä päätoiminnon estävät toiminnalliset viat esittävä toimintohierarkiamalli on esitetty kuvassa 33.



Kuva 33. Valunosturin toimintohierarkiamalli.

Valunosturille tunnistetut FF#-tunnuksella (*Functional failure*) kuvatut toiminnalliset viat liittyivät sillan ja nostovaunujen liikkeiden tai nostojen estymiseen. Kuhunkin toiminnalliseen vikaan liittyy jokin laitehierarkiamallissa kuvattu laitekokonaisuus. Toiminnallisessa hierarkiassa nämä laitekokonaisuudet on määritetty kunkin toiminnallisen vian alapuolelle, kuvaten syitä joiden johdosta kyseinen nosturin toiminnallinen kokonaisuus voi vikaantua.

7.1.3 Häiriöiden tunnistaminen

Toimintohierarkiamallin alimmalle tasolle määritettiin laitteille ominaiset vikaantumistavat eli vikamuodot. Vikamuodot kuvaavat mallissa syitä, jotka tietyllä todennäköisyydellä johtavat merkitykseltään erilaisiin toiminnallisiin vikoihin. Vikamuotojen tunnistamisella on merkittävä rooli analyysin jatkoa ajatellen, sillä myöhemmässä vaiheessa suunniteltavat toimenpiteet kohdistetaan kriittisimmille vikamuodoille tai niiden aiheuttajille.

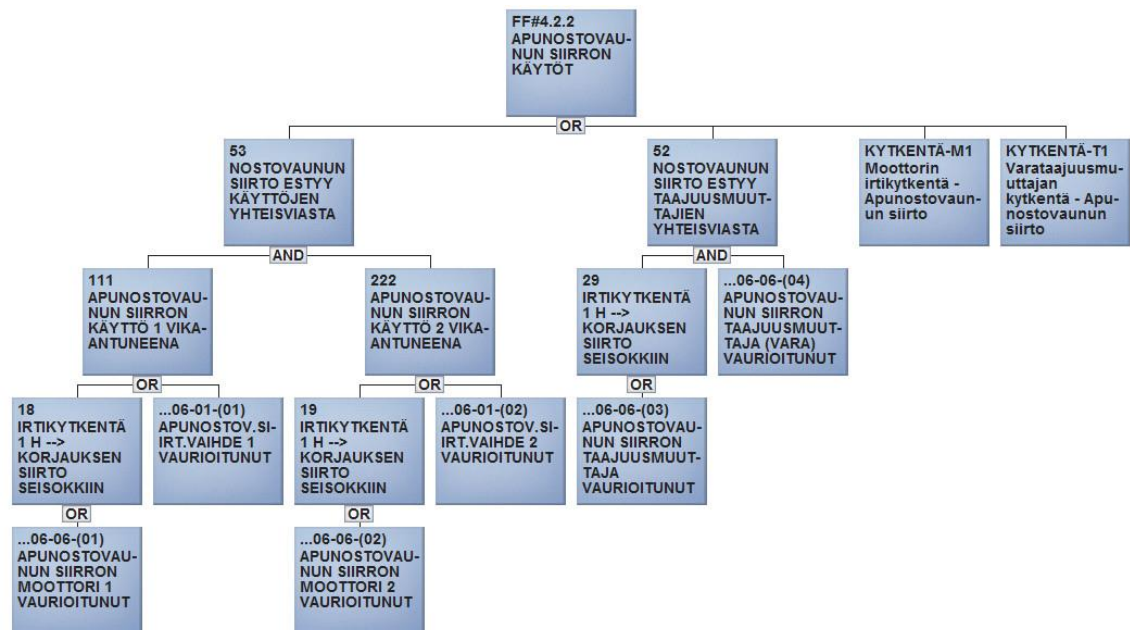
Analyysiin sisällytyt vikamuodot voidaan jakaa seuraaviin luokkiin:

- Historian aikana esiintyneet vikamuodot
- Nykyisellään ennakkohuollonkeinoin poistettavat vikamuodot
- Vikamuodot, jotka eivät vielä ole tapahtuneet mutta, joiden tapahtumisen uskotaan olevan mahdollista

Vikamuotojen tunnistamisessa hyödynnettiin aiemmin nostureille tehtyjä FMEA- ja RCM-analyysejä. Aiemmissa analyyseissä tunnistettujen vikamuotojen lisäksi tunnistettiin myös uusia vikamuotoja.

7.1.4 Toimintohierarkian erityispiirteet

Toimintohierarkiseen malliin luotiin erityisrakenne niiltä osin, joissa yksittäinen vika-
muoto johtaa ainoastaan lyhyeen nosturin käytön estymiseen. Erityisrakenteet huomioi-
vat mahdollisuuden useamman samanaikaisen vikamuodon syntymiselle johtaen merkit-
tävämpiin seurauksiin kuin yksittäisen vian tapahtuessa. Kuvassa 34 on esitetty apunos-
tovaunun siirtokoneiston vikaantumiseen liittyvä erityisrakenne.



Kuva 34. Apunostovaunun käyttöjen vikaantuminen toimintohierarkiamallissa.

Apunostovaunun siirtokoneiston erikoistapaukset liittyivät vikaantuneiden siirtomotto-
reiden ja taajuusmuuttajan irtikytkentöihin. Seurauksena yksittäisen siirron käytön tai
taajuusmuuttajan vikaantumisesta apunostovaunun siirron arvioitiin estyvän vikaantu-
neen laitteen irtikytkennän ajaksi. Irtikytkentöihin liittyvät kestot määritettiin KYT-
KENTÄ-M1 ja -T1 solmuihin.

Irtikytkentöjen ja siitä seuraavien laitteiden korjausten odotusten huomioiminen tarkas-
teltavan kokonaisuuden toiminnan tarkasteluissa edellytti ELMAS:n dynaamisten omi-
naisuuksien käyttöä. Laitteiden vikaantumisen jälkeiseen toipumiseen liittyvät dynami-
set ominaisuudet määritettiin dynaamisten ohjelmakoodien avulla. Ohjelmakoodien
avulla toiminta voitiin kuvata mahdollisimman tarkasti vastaamaan käytäntöä. Ohjel-
makoodi määritettiin laitekohtaisesti solmun editoriin niiden laitteiden osalta joihin dy-
naamisuuksia viasta toipumiseen liittyi. Ohjelma 1 esittää apunostovaunun siirtomotto-
rin vikaantumiseen liittyvän dynaamisen ohjelmakoodin.


```

//Jos solmu siirtyy odottamaan korjausta
if (THIS_NODE.getState() != THIS_NODE.getPreviousState() &&
THIS_NODE.getState() == 10) {
    //niin irtikytkentä alkaa, kunhan sitä ei ole jo tehty
    if (GET_NODE("KYTKENTÄ-M1").getState() == STATE_OK &&
        GET_NODE("18").getPreviousState() == STATE_OK &&
GET_NODE("19").getState() == STATE_OK) {
        GET_NODE("KYTKENTÄ-M1").startRepair();
    }
}

//Kun korjauksen odottaminen loppuu, se korjataan suunniteltuna
seisokkina
if (THIS_NODE.getPreviousState() == 10 && THIS_NODE.getState() ==
STATE_OK) {
    //jolloin korjaus on välitön
    THIS_NODE.startRepair();
    THIS_NODE.addStartOperationEvent(0);
}

//Yhteisvian tapahtuessa välitön jakauman mukainen korjaus
if (THIS_NODE.getState() != STATE_OK && GET_NODE("53").getState() !=
STATE_OK) {
    //Mutta vain, jos solmu odottaa korjausta
    if (THIS_NODE.getState() == 10) {
        THIS_NODE.startRepair();
    }
}
}

```

Ohjelma 1. Apunostovaunun siirtomoottori 1. korjauksen dynaaminen ohjelmakoodi.

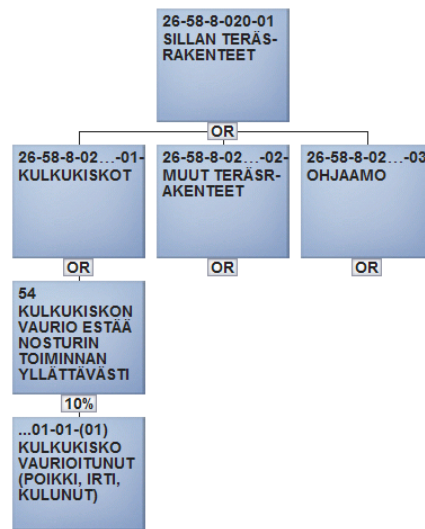
Ohjelmakoodin mukaisesti vikaantumisen jälkeen siirtomoottori 1 kytketään irti. Irtikytkennästä seuraa lyhyt valunosturin toiminnan estävä tila KYTKENTÄ-M1 solmuun määritetyn irtikytkennän keston mukaisesti. Tämän jälkeen moottori siirtyy odottamaan seuraavaa suunniteltua seisokkia, jossa korjaus voidaan suorittaa ilman tuotannollisia seurauksia. Tässä tapauksessa voidaan puhua seisokkiin siirretystä häiriökorjauksesta. Korjauksen odotusaika määräytyy solmun editoriin syötetyn korjauksen odotusajan - jakauman mukaisesti.

Siirtomoottorille suoritetaan välitön korjaus, mikäli sen vikaantumisen jälkeinen korjauksen odotusaika täyttyy. Vastaavasti, jos siirtomoottorin 1 rinnalla toimiva siirtomoottori 2 tai sen vaihde vikaantuu moottorin 1 korjauksen odotuksen aikana, niin tällöin molemmat vikaantuneet laitteet korjataan välittömästi. Tämän tapahtumaketjun aiheuttama nosturin epäkäytettävyysjakson pituus määräytyy siirtomoottoreille määritettyjen korjausajan-jakaumien mukaisesti.

ELMAS-ohjelmiston kehitystyön myötä nykyisellä ELMAS-ohjelmistolla voidaan vastaavanlaiset tapahtumaketjut kuvata korjausportin avulla. Korjausportti mahdollistaa tapahtuman keston määrittämisen suoraan porttitasolle juurisolmuille arvioitavien toimimisaikojen sijaan.

Seuraustodennäköisyys

Eräiden vikamuotojen kohdalla toimintohierarkkisessa mallissa käytettiin seuraustodennäköisyyttä kuvaamaan vikamuodosta aiheutuvaa merkittävämpää seurausta. Kuvassa 35 on esitetty sillan kulkukiskojen vaurioitumiselle tunnistettu merkittävämpi seuraus ja siihen liittyvä seuraustodennäköisyys.



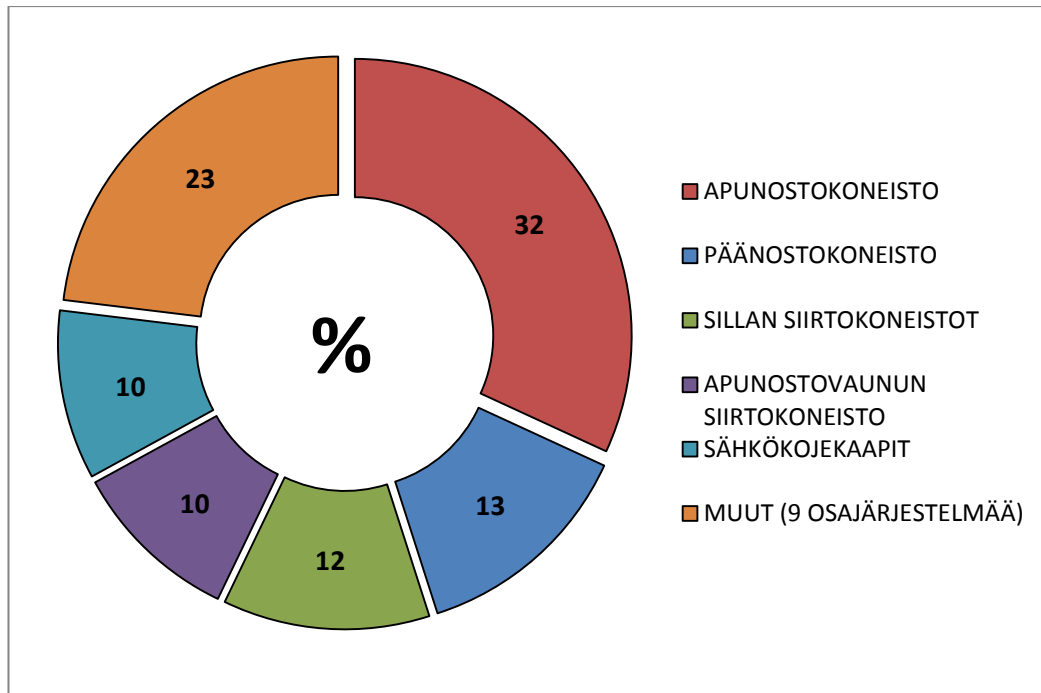
Kuva 35. Vikamuodon seurausvaikutuksen arviointi.

Näin kuvatuille tapahtumille oli ominaista niiden hidas kehittyminen, jolloin niihin uskottiin olevan mahdollisuus vaikuttaa ennen niiden kehittymistä toiminnan estäväksi viaksi. Vikamuodoille ominaiset seuraustodennäköisyydet kuvattiin ELMAS:n tarjoamien todennäköisyysporttien avulla.

7.2 Vikahistorian analysointi

Valunosturin käyttövarmuutta tarkasteltiin aluksi laitehierarkiamalliin siirretyn vikahistorian avulla. Kunnossapidon tietojärjestelmään kertynyt vikahistoria kohdistettiin Microsoft Excel-rajapintaa hyödyntäen valunosturin laitehierarkiamalliin. Vikahistoriaa kerättiin analysoitavaksi viimeisen vajaan 4 vuoden ajalta. Analysoitu vikahistoria sisälsi ainoastaan yllättävät pysäyttävät häiriötapahtumat. Ennakoivia toimenpiteitä ja huoltoihin siirrettyjä häiriökorjauksia ei vikahistorian tarkastelun yhteydessä analysoitu.

Kaaviossa 1 on esitetty tarkastelujaksolla syntyneiden yllättävien pysäyttävien vikojen jakautuminen nosturin osajärjestelmien kesken.



Ympyräkaavio 1. Nosturin yllättävien vikojen jakautuminen historiassa.

Kaaviosta havaitaan apunostokoneiston olleen merkittävin (32 %) osajärjestelmä yllättävien pysäyttävien vikojen aiheuttajana. Osajärjestelmät, joihin tarkastelujaksolla on kohdistunut vain harvoja vikatapahtumia, ovat yhdessä aiheuttaneet lähes neljänneksen (23 %) kaikista yllättävistä vioista. Tarkempi vikaosuuksien jakautuminen nosturin osajärjestelmä- ja laiteryhmätasolla on esitetty liitteen B taulukossa.

7.3 Nykytilan riskianalyysi

ELMAS-ohjelmistolla mallinnettua laitekokonaisuuksia sisältävää toimintohierarkiamallia hyödynnettiin ELMAS-käyttövarmuusanalyysin seuraavassa vaiheessa – nykytilan riskianalyysissä. Analyysivaiheen tuloksena saatiin selville eri vikamuotojen merkittävyydet kohteen toiminnallisuuden ja kustannusten kannalta. Seuraavan vaiheen toimenpiteiden suunnittelussa keskityttiin löytämään keinoja tässä vaiheessa merkittävimmiksi nousseiden vikamuotojen poistamiseksi tai niiden seurausten vähentämiseksi.

7.3.1 Lähtötietojen arviointi

Mallinnuksen aikana tunnistetut vikamuodot arvioitiin yksityiskohtaisemmin analyysin seuraavassa vaiheessa. Yksityiskohtaisemman arvioinnin yhteydessä laitteen vikaantumista arvioitiin sille ominaisen vikaantumiskäyttäytymisen sekä vian vaikutusten muodossa. Vikaantumista ja sen vaikutuksia arvioitiin yksityiskohtaisemmin

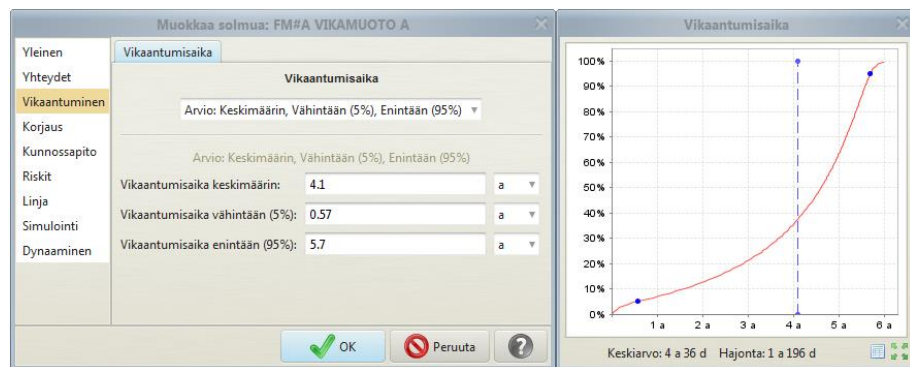
- esiintymistiheyden,
- toipumisajan,
- resurssi- ja varaosakustannusten

avulla. Eräiden yksittäisten mekaanisten vikaantumisten yhteydessä otettiin lisäksi kantaa nykyiseen käyttöikään. Vikaantumisiin liittyvien lähtötietojen lisäksi oli tarpeen määrittää valunosturille tuntikohtainen tuotannonmenetyskustannus, jota vikojen aiheuttamasta toipumisajasta syntyy.

Lähtötietojen kokoaminen toteutettiin ensisijaisesti asiantuntija-arvioiden avulla. Aiempien analyysien tietoja sekä vikahistorian analysoinnin aikana kerättyjä historiatietoja käytettiin tukemaan asiantuntija-arvioita niiltä osin kuin sitä oli saatavilla. Lähtötietojen arvioinnin myötä muodostui mahdollisuus nosturin toiminnan tarkastelulle simuloinnin avulla analyysin myöhemmässä vaiheessa.

Vikaantumisaika

Tunnistettujen vikamuotojen tapahtumatodennäköisyyksien arviointi toteutettiin mekaanisesta sekä sähkö-automaatio kunnossapidosta vastaavien asiantuntijaryhmien avulla. Tapahtumatodennäköisyyksien arviointiin valittiin ELMAS:n menetelmävaihtoehdoista kuvassa 36 esitetty keskimäärin, vähintään (5 %), enintään (95 %) – menetelmä.



Kuva 36. Vikaantumisen arviointi ELMAS Arvio: keskimäärin, vähintään (5 %), enintään (95 %) – menetelmällä.

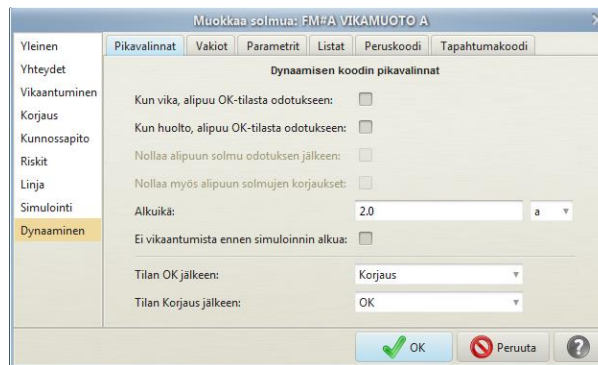
Menetelmässä vikaantumisen toteutumista arvioidaan keskimääräisen vikaantumisajan arvion lisäksi arvioimalla vikaantumisajalle myös 5 % ja 95 % -kvantiilit. Vikaantumisajan 5 % -kvantiili osoittaa ajan johon suurimman osan osista uskotaan selviävän ilman vikaantumista. Toisin sanoen ainoastaan 5 prosenttia kaikista osista tai vaihtoehtoisesti yksittäisellä uudella osalla on 5 prosentin todennäköisyys vikaantua ennen tuota aikaa. Vastaavasti vikaantumisajan 95 % -kvantiili osoittaa ajan johon mennessä suurimman osan osista uskotaan vikaantuneen vähintään kerran. Uudella osalla on 5 prosentin mahdollisuus vikaantua vasta 95 % -kvantiiliin määritetyn vikaantumisajan jälkeen.

Menetelmän avulla on mahdollista muodostaa monipuolisia funktioita osoittamaan osan vikaantumiskäyttötymisen satunnaisuutta tai aikasidonnaisuutta. Osan vikaantumiskäyttötymistä voidaan tarkastella arvioiden pohjalta muodostetusta vikaantumistodennäköisyyden kertymäkuvaajasta. Arviointimenetelmän erikoistapauksena kohteen vi-

kaantuminen voidaan arvioida pelkän keskimääräisen vikaantumisajan avulla. Tällöin menetelmä käsittelee arvion satunnaisena tapahtumana eksponenttijakauman avulla.

Käyttöikä

Merkittävää aikasidonaisuutta omaavat vikaantumiset arvioitiin edellisen vaiheen vikaantumisajan arvioinnissa täysin uuden laitteen näkökulmasta. Kuvassa 37 esitetyllä nykyisen käyttöiän määrittämisellä pyrittiin kiinnittämään tarkastelujakson alkupisteeksi näiden laitteiden nykyinen ikä vikaantumisajan kertymäkuvaajassa. Nykyinen käyttöikä määritettiin vikamuotokohtaisesti alkuikä-syötteenä.

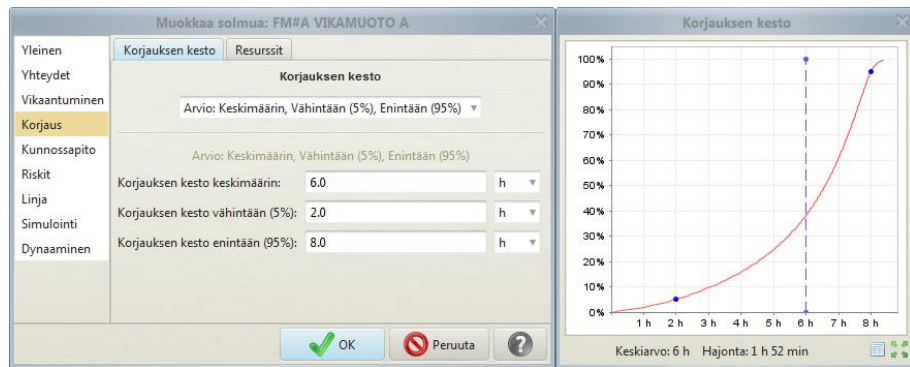


Kuva 37. Nykyisen käyttöiän määrittäminen.

Käyttöiän määrittäminen oli tarpeen erityisesti laitteilla, joiden vikaantumiskäyttäytymisessä oli tunnistettavissa aikasidonaisuutta, joissa vikaantumistodennäköisyys muuttuu ajan kuluessa laitteiden vanhetessa.

Toipumisaika

Toipumisaikojen arviolla kuvattiin viasta syntyvää epäkäytettävyysjaksoa. Tehollisen korjausajan lisäksi toipumisajan arvioon sisällytettiin kaikki viiveet, jotka vian etsimiseen, varaosien ja asentajien odotukseen kuluvat. Vikamuotokohtaiset toipumisajat arvioitiin analyysiryhmän asiantuntijoiden toimesta kuvassa 38 esitetyllä ELMAS:n korjauksen kesto keskimäärin, vähintään (5 %), enintään (95 %) – menetelmällä.



Kuva 38. Toipumisen arviointi ELMAS Arvio: Keskimäärin, Vähintään (5 %), Enintään (95 %) – menetelmällä.

Menetelmä käyttäytyy vastaavalla tavalla, josta aiemmin vikaantumisaikojen arvioiden yhdessä kerrottiin. Tässä tapauksessa jakauma kuvaa todennäköisyyskertymät erimittaisille toipumisajoille.

Resurssi- ja varaosakustannukset

Vikamuodon korjaukseen liittyviä resurssi- ja varaosakustannuksia arvioitiin vikamuotokohtaisesti. ELMAS-asetuksissa luotiin haluttu resurssiryhmä ja määritettiin resurssiryhmän henkilölle tuntihinta resurssikustannusten arvioimiseksi. Kuvassa 39 esitettyyn vikamuotokohtaiseen resurssitaulukkoon arvioitiin vikamuodon korjaukseen tarvittavien asentajien lukumäärä sekä yksittäisen asentajan kohdalta vian löytämiseen, korjauksen valmisteluihin ja itse korjaukseen kuluva aika. Keskimääräinen varaosakustannus arvioitiin kiinteiden kustannusten tietokenttään.

Resurssi	Lukumäärä	Kesto-aika
Asentaja	2	4.0 h

Resurssien kustannukset: 400.0 €
Kiinteät kustannukset: 150.0 €

Kuva 39. Resurssi- ja varaosakustannusten arviointi.

Resurssikustannustaulukon osoittama resurssikustannus muodostuu korjaukseen osallistuvien henkilöiden lukumäärän, kestoajan ja resurssiryhmälle määritetyn tuntihinnan tulona. Resurssi- ja varaosakustannuksiin määritetyt kustannukset syntyvät aina kyseisen vikamuodon syntyessä simulointijakson aikana.

Muut lähtötiedot

Vaikka toimintohierarkiamallissa valunosturin toimintaa tarkasteltiin ainoastaan päätoiminnon avulla, niin tuotannonmenetykustannusten määrittämisessä oli syytä huomioida nosturin toiminta kokonaisvaltaisesti. Tästä johtuen valunosturin tuntikohtaisen tuotannonmenetykustannuksen määrittämisessä oli huomioitava tuotannon nostojen lisäksi myös valmistelevat ja kunnossapidon nostot, joihin nosturi myös osallistuu. Nosturin yllättävällä vikaantumisella on erilaiset kustannukset nosturin tehtävästä riippuen. Tuotannonmenetyksen tuntihinta muodostettiin alla esitetyn yhtälön 31 mukaisesti.

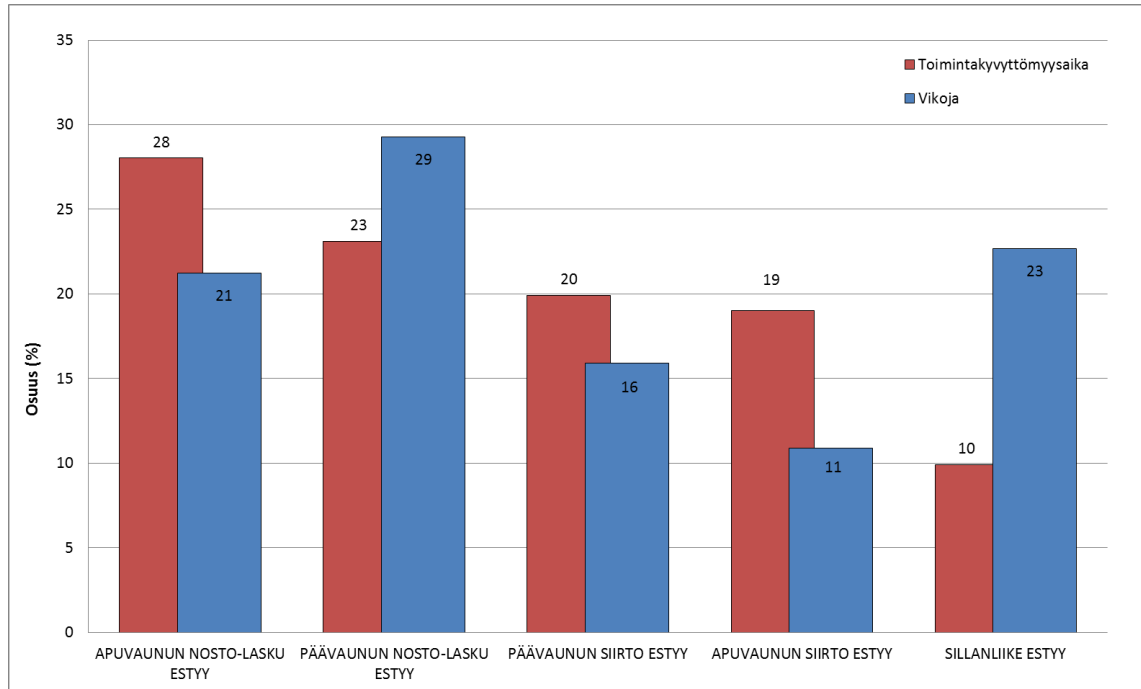
$$\left(\frac{PF\#1 \text{ osuus}}{\text{Käyttöaste}} \times tm_1\right) + \left(\frac{SF\#2 \text{ osuus}}{\text{Käyttöaste}} \times tm_2\right) + \left(\frac{SF\#3 \text{ osuus}}{\text{Käyttöaste}} \times tm_3\right) = tm_{yht} \quad (31)$$

Yhtälössä PF# ja SF# osuus kuvaa valunosturin kyseistä toimintoa kalenterivuoden aikana keskimäärin suorittamaa osuutta. Käyttöaste kuvaa valunosturin suunniteltua käyttöaikaa kalenterivuoden aikana. Muuttuja tm_x kuvaa toimintokohtaisen tuotannonmenetyksen tuntihintaa. Muuttuja tm_{yht} kuvaa valunosturin yhteenlaskettua keskimääräistä tuotannonmenetyksen tuntihintaa.

Lähes kaikkien yllättävien vikojen arvioitiin syntyvän nosturin suorittaessa jotakin sen tehtävistä. Tämä huomioitiin tuotannonmenetyksen keskimääräisen tuntihinnan muodostamisessa vertaamalla kutakin tehtäväosuutta nosturin käyttöasteeseen. Simuloinnissa tätä kustannusriskitekijää jyvitetään nosturin osille niiden nosturille aiheuttaman toimintakyvyttömyysajan mukaisesti.

7.3.2 Riskien simulointi ja analysointi

Valunosturin toimintohierarkisen mallin simulointi tehtiin ELMAS:n dynaamisen simuloinnin avulla. Dynaaminen simulointi oli tarpeen, koska useisiin mallissa kuvattuihin erikoistapauksiin liittyi dynaamisuutta viasta seuraavien kytkentälogiikoiden sekä nykyisen käyttöiän muodossa. Asiakasyrityksen toiveesta tulosten analysoinnin yhteydessä simulointitulokset tullaan esittämään tässä työssä ainoastaan suhteellisina osuuksina kokonaisuudesta. Suhteellisten osuuksien lisäksi tuloksia voidaan tarkastella konkreettisesti tekijälle ominaisen yksikön mukaisesti riskitekijäkohtaisesti. Työistuntojen aikana simuloinnin tuloksia tarkasteltiin riskitekijäkohtaisen yksikön mukaisesti. Kuva 40 esittää 10 vuoden tarkastelujaksolle riskien simuloinnissa kertyneiden toimintakyvyttömyysaikojen ja vikalukumäärien jakautumisen nosturin päätoiminnon estävien toiminnallisten vikojen kesken.



Kuva 40. Toimintakyvyttömyysajan ja vikojen jakautuminen toiminnallisten vikojen kesken.

Kuvasta havaitaan pää- ja apunoston olevan tarkastelujaksolla merkittävimmät kokonaisuudet toimintakyvyttömyysajan sekä vikalukumäärien suhteen. Pää- ja apunostolle kertyvä toimintakyvyttömyysaika (23 % + 28 %) ja viat (29 % + 21 %) vastaavat noin puolta nosturin toimintakyvyttömyysajasta ja vioista. Sillan liikkeen havaitaan olevan vikalukumäärällisesti (23 %) yksi merkittävimmistä kokonaisuuksista, mutta lyhyistä toipumisajoista johtuen sen toimintakyvyttömyysaika jää kymmenesosaan koko nosturin toimintakyvyttömyysajasta. Vastaavasti kuvaajasta havaitaan apuvaunun siirron viikaantuvan harvemmin (11 %), mutta omaavan pitkiä toipumisaikoja johtaen noin viidenneksen (19 %) osuuteen toimintakyvyttömyysajan aiheuttajana nosturilla.

Taulukko 1 esittää tarkemmin toimintakyvyttömyysajan sekä vikojen jakautuminen nosturin osajärjestelmien kesken. Taulukko osoittaa lisäksi nosturin toiminnallisille vioille ja osajärjestelmille simuloinnin aikana muodostuneiden kustannusriskien jakautumisen.

Taulukko 1. Nosturin osajärjestelmien toimintakyvyttömyysajan, vikojen sekä kustannusriskien jakautuminen.

Järjestelmä	Toiminnallinen vika	Osajärjestelmä	Toimintakyvyttömyysaika (%)	Vikojen (%)	Kustannusriski (%)
NOSTURI N:O 123			100	100	100
	APUVAUNUN NOSTO-LASKU		28	21	26
		APUNOSTOKONEISTO	14	11	14
		APUVAUNUN NOSTO-LASKU OHJAUSLAIT.	14	10	12
	PÄÄVAUNUN NOSTO-LASKU		23	29	24
		PÄÄVAUNUN NOSTO-LASKU OHJAUSLAIT.	12	10	11
		PÄÄNOSTOKONEISTO	11	19	14
	PÄÄVAUNUN SIIRTO		20	16	18
		PÄÄNOSTOVAUNUN SIIRTOKONEISTO	16	5	14
		PÄÄVAUNUN SIIRTO OHJAUSLAITTEET	4	6	4
		PÄÄNOSTOVAUNUN TERÄSRAKENTEET	0	5	0,2
	APUVAUNUN SIIRTO		19	11	18
		APUNOSTOVAUNUN SIIRTOKONEISTO	14	4	14
		APUVAUNUN SIIRTO OHJAUSLAITTEET	5	5	4
		APUNOSTOVAUNUN TERÄSRAKENTEET	0	2	0,1
	SILLANLIIKE		10	23	13
		SILLAN SIIRTOKONEISTOT	4	8	7
		SILLANLIIKKEEN OHJAUSLAITTEET	4	6	4
		SILLAN TERÄSRAKENTEET	2	9	2

Kunkin seuraustekijän osalta merkittävimmät osajärjestelmät on korostettu taulukkoon punaisella. Taulukon kustannusriskitulokset toimivat ohjaavana tekijänä merkittävimpiä parannuspotentiaaleja omaavien kohteiden tunnistamisessa. Kustannusriskituloksissa yhdistetään toimintakyvyttömyysajan sekä vikakertojen muodostamat riskit. Toimintakyvyttömyysajalta syntyvä kustannus on sidottu toipumisaikaan kun taas jokainen yksittäinen vika aiheuttaa vialle ominaisen korjauskerran kustannuksen. Nosturin laiteryhmittäiselle muodostunut toimintakyvyttömyysaika ja vikojen jakautuminen on esitetty liitteen C taulukossa.

7.4 Riskien pienentäminen

Nykytilan riskianalyyssissä merkittävimmiksi muodostuneille taulukossa 2 esitetyille vikamuodoille pyrittiin analyysin seuraavassa vaiheessa löytämään soveltuvia ja tehokkaita keinoja vikamuodon ehkäisemiseksi tai siitä aiheutuvien seurausten pienentämiseksi. Ennen varsinaisten toimenpiteiden suunnittelua merkittävimmät vikamuodot arvioidtiin yksityiskohtaisemmin. Vikamuotojen yksityiskohtaisempi tarkastelu aloitettiin riskianalyyssin kustannusriskitulosten mukaisessa järjestyksessä. Näin pystyttiin keskittymään olennaiseen ja säästämään merkittävästi analyysiryhmän resursseja. Tämän analyysivaiheen aikana käsiteltiin noin viidennes vikamuodoista yksityiskohtaisemmin.

Taulukko 2. Merkittävimmät vikamuodot kustannusriskin suhteen.

Vikamuoto	Osasto	Kustannusriski (%)
PÄÄNOSTON KÖYDENPAINAJAN RAJA ESTÄÄ TARPEETOMASTI KÖYDEN KELAUTUMISEN	Sähkö	3,2
APUNOSTON KÖYDENPAINAJAN RAJA ESTÄÄ TARPEETOMASTI KÖYDEN KELAUTUMISEN	Sähkö	3,1
PÄÄNOSTON NOSTOKÖYSI NOUSSUT URALTA	Sähkö	3,1
APUNOSTON NOSTOKÖYSI NOUSSUT URALTA	Sähkö	3,1
APUNOSTON MOOTTORI VAURIOITUNUT	Sähkö	2,7
PÄÄNOSTON YLÄTURVARAJA (PUNTTIRAJA) EI PYSÄYTÄ	Sähkö	2,7
APUNOSTON YLÄTURVARAJA (PUNTTIRAJA) EI PYSÄYTÄ	Sähkö	2,6
PÄÄNOSTON NOSTOKÖYDEN LUJUUS HEIKKENEE	Mekaniikka	2,3
APUNOSTOVAUNUN SIIRRON JA NOSTO-LASKU ENERGIANSIIRTOKETJU VIKAANTUNUT	Sähkö	2,3
APUNOSTOV.SIIRT.KANTOPYÖRÄT TELI 3	Mekaniikka	2,3
APUNOSTOV.SIIRT.KANTOPYÖRÄT TELI 2	Mekaniikka	2,2
APUNOSTON ALA-/YLÄKÖYSIPYÖRÄ VAURIOITUNUT	Mekaniikka	2,2
APUNOSTOV.SIIRT.KANTOPYÖRÄT TELI 1	Mekaniikka	2,2
APUNOSTOV.SIIRT.KANTOPYÖRÄT TELI 4	Mekaniikka	2,2
PÄÄNOSTOV.KANTOPYÖRÄT TELI 2	Mekaniikka	2,1
PÄÄNOSTOV.KANTOPYÖRÄT TELI 1	Mekaniikka	2,1
APUNOSTON YLÄTURVARAJA (PUNTTIRAJA) PYSÄYTTÄÄ TARPEETOMASTI	Sähkö	2,1
PÄÄNOSTON YLÄTURVARAJA (PUNTTIRAJA) PYSÄYTTÄÄ TARPEETOMASTI	Sähkö	2,0
PÄÄNOSTON VAIHDE VAURIOITUNUT	Mekaniikka	1,9
PÄÄNOSTOVAUNUN SIIRRON MOOTTORI 1 VAURIOITUNUT	Sähkö	1,6
PÄÄNOSTOV.SIIRT.VAIHDE 2 VAURIOITUNUT TELI 4	Mekaniikka	1,6
PÄÄNOSTOV.SIIRT.VAIHDE 1 VAURIOITUNUT TELI 3	Mekaniikka	1,5
APUNOSTOV.SIIRT.VAIHDE 2 VAURIOITUNUT	Mekaniikka	1,5
APUNOSTOV.SIIRT.VAIHDE 1 VAURIOITUNUT	Mekaniikka	1,5
PÄÄNOSTOV.KANTOPYÖRÄT TELI 3	Mekaniikka	1,4
PÄÄNOSTOV.KANTOPYÖRÄT TELI 4	Mekaniikka	1,4
PÄÄNOSTON JARRU EI AVAUDU	Mekaniikka	1,3
APUNOSTON JARRU EI AVAUDU	Mekaniikka	1,3
APUNOSTOVAUNUN SIIRRON RAJA VIKAANTUNUT	Sähkö	1,1
SILLANSIIRRON RAJA VIKAANTUNUT	Sähkö	1,1
APUNOSTON TAKOMETRI (ABSOLUUTTIAANTURI) VAURIOITUNUT	Sähkö	1,1
PÄÄNOSTOVAUNUN SIIRRON RAJA VIKAANTUNUT	Sähkö	1,1
KULKUKISKO VAURIOITUNUT (POIKKI, IRTI, KULUNUT)	Mekaniikka	1,1
PÄÄNOSTOV.SIIRT. JARRU EI AVAUDU	Mekaniikka	1,0
APUNOSTON YLÄ- TAI ALARAJA (HIDASTUS- TAI PYSÄYTYSRAJA) EI HIDASTA EIKÄ PYSÄYTÄ	Sähkö	0,9
PÄÄNOSTON KOUKKUJEN VAURIOITUMINEN	Mekaniikka	0,9
PÄÄNOSTON YLÄ- TAI ALARAJA (HIDASTUS- TAI PYSÄYTYSRAJA) EI HIDASTA EIKÄ PYSÄYTÄ	Sähkö	0,9
APUVAUNUN SIIRRON RELEISSÄ TAI KONTAKTOREISSA VIKA	Sähkö	0,9
PÄÄVAUNUN NOSTO-LASKU RELEISSÄ TAI KONTAKTOREISSA VIKA	Sähkö	0,9
PÄÄNOSTON KÖYSITELA VAURIOITUNUT	Mekaniikka	0,9

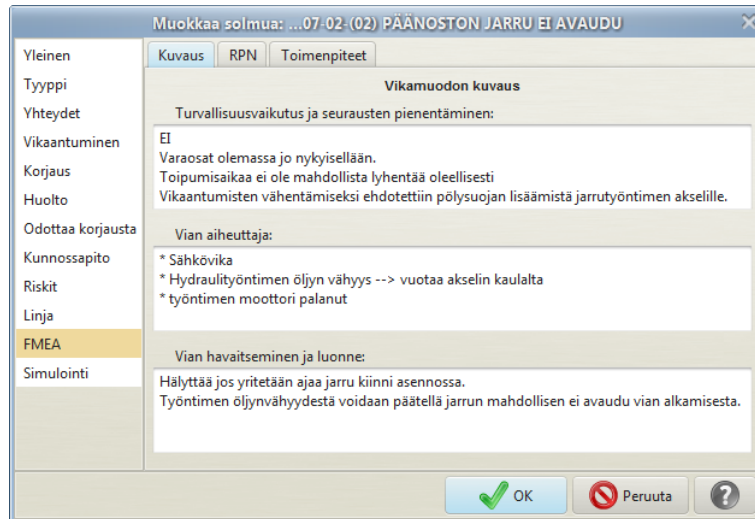
Riskianalyysissä merkittävimmiksi mekaniikan kokonaisuuksiksi toimenpiteiden suunnittelua ajatellen nousivat telien, vaihteiden ja jarrutyöntimien viat. Vastaavasti merkittävimmät toimenpidetarkasteluita vaativat sähköön kokonaisuudet sisälsivät erilaisten rajavikojen lisäksi moottoreiden vikoja. Näiden vikakokonaisuuksien lisäksi käsiteltiin myös yksittäisiä vikoja liittyen muun muassa kulkukiskoihin, köysiteloihin ja energiansiirtokejuun.

7.4.1 Vikamuotojen yksityiskohtainen arviointi

Vikamuotojen yksityiskohtaisemmalla arvioinnilla pyrittiin keräämään kaikki oleellinen tieto toimenpiteiden määrittämiseksi. Vikamuodon arvioinnissa vikamuodolle esitettiin kysymyksiä seuraaviin asiakokonaisuuksiin liittyen:

- Turvallisuusvaikutus ja seurausten pienentäminen
- Vian aiheuttaja
- Vian havaitseminen ja luonne

Päänoston jarrulle ominaiselle vikaantumiselle suoritettu yksityiskohtainen vikamuodon arviointi on esitetty kuvassa 41.



Kuva 41. Vikamuodon yksityiskohtainen arviointi.

Turvallisuusvaikutus ja seurausten pienentäminen

Tällä kysymyskentällä pyrittiin selvittämään vikamuodon aiheuttamien paikallisten turvallisuusvaikutusten mahdollisuus. Paikallisella turvallisuusvaikutuksella selvitettiin liittyikö vikamuodon syntymiseen tai sen korjaukseen merkittäviä turvallisuusriskejä vaikka vikamuodon aiheuttamalla toiminnallisella vialla ei turvallisuusvaikutuksia olisiakaan. Turvallisuusvaikutusten lisäksi tässä kentässä otettiin kantaa nykyiseen varaosapolitiikkaan, johon tehtävillä muutoksilla voitaisiin vaikuttaa muun muassa toipumisaikoihin. Lisäksi istunnoissa kirjattiin tähän kenttään muita mieleen nousseita ajatuksia vikamuodon seurausten pienentämiseksi.

Vian aiheuttaja

Tähän kenttään kirjattiin tyypillisimmät syyt vikamuodon syntymiselle. Jatkossa toimenpiteiden suunnittelussa pyrittiin löytämään keinoja tämän kentän aiheuttajien poistamiselle tai havaitsemiselle ennen kuin ne johtavat vikamuodon aiheuttamaan toiminnalliseen vikaan.

Vian havaitseminen ja luonne

Vikamuodon havaitsemiskeinot, kuten esimerkiksi järjestelmän hälytykset tai värähtelymittaukset kuvattiin vian havaitsemisen yhteyteen. Vikaantumisen luonteen arvioinnissa tarkasteltiin muun muassa vikaistorian avulla vikaantumisen aikasidonnaisuutta, eli oliko vikamuodon syntymiselle määritettävissä ajasta riippuvaa toistuvuutta. Lisäksi kentässä otettiin kantaa vian mahdollisiin oirehtimisaikoihin.

7.4.2 Soveltuvien ja tehokkaiden toimenpiteiden määrittäminen

Soveltuvien toimenpiteiden tai toimenpiteiden yhdistelmä määritettiin käyttäen kuvassa 42 esitettyä RCM-päätöslogiikkakaaviota. Toimenpiteiden määrittämisessä tarkasteltiin erityyppisten toimenpiteiden soveltuvuutta vian aiheuttajien poistamiseksi tai havaitsemiseksi ennen niiden aiheuttaman yllättävän vian syntymistä.

The screenshot shows a software window titled "Muokkaa solmua: ...07-02_(02) PÄÄMÖSTÖN JARRU EI AVAUDU". The window has a menu bar with options: Kunnossapito-päätöspuu, Ehkäisevä, Tarkastus, Kunnostus, Ennakkovaihto, Etsintä, Uudelleensuunnittelu, and Vika sallittu. The main content area is divided into several sections, each with a text box and radio buttons for "Kyllä" (Yes) or "Ei" (No):

- Voitelu- ja huoltotoimenpiteet:** "Onko ominaisuuksia ylläpitävä voitelu- tai huoltotoimenpide soveltuva ja tehokas? Ennen päätöksentekoa suunnittele huoltotoimenpiteen yksityiskohdat välilehdellä "Ehkäisevä"." (Right: "Öljypinnan tarkastus ja öljyn lisäminen 16 vikon välein")
- Tarkastukset ja kunnonvalvonta:** "Onko tarkastus, toiminnallinen tarkastus tai kunnonvalvonta soveltuva ja tehokas toiminnon huononemisen havaitsemiseksi? Ennen päätöksentekoa suunnittele huoltotoimenpiteen yksityiskohdat välilehdellä "Tarkastus". Jos soveltuva ja tehokas huoltotoimenpide löytyy, voidaan kyselypöytä päätää tälle tasolle." (Right: "Toiminnantarkastus kerran viikkoon.")
- Kunnostustoimenpiteet:** "Onko kunnostustoimenpide soveltuva ja tehokas vikataajuuden pienentämiseksi? Ennen päätöksentekoa suunnittele huoltotoimenpiteen yksityiskohdat välilehdellä "Kunnostus". Jos soveltuva ja tehokas huoltotoimenpide löytyy, voidaan kyselypöytä päätää tälle tasolle." (Right: "Ei soveltuva")
- Vaihtotoimenpiteet:** "Onko vaihtotoimenpide soveltuva ja tehokas vikaantumisen välttämiseksi ja vikataajuuden pienentämiseksi? Ennen päätöksentekoa suunnittele huoltotoimenpiteen yksityiskohdat välilehdellä "Ennakkovaihto". Jos soveltuva ja tehokas huoltotoimenpide löytyy, voidaan kyselypöytä päätää tälle tasolle." (Right: "Ei soveltuva")
- Toimenpideyhdistelmä:** "Onko olemassa toimenpideyhdistelmää, joka on soveltuva ja tehokas? Kunnossapidon toimenpiteiden yksityiskohdat suunnitellaan omilla välilehdillä. Muut olenneiset toimenpiteet (esim. koulutus, ohjeistus, badunvalvonta, ...) määritetään kootusti "PMEA"-sivun välilehdellä "Toimenpiteet"." (Right: "Toiminnantarkastus kerran viikkoon. Öljypinnan tarkastus ja öljyn lisäminen 16 vikon välein")
- Uudelleensuunnittelu:** "Uudelleensuunnittelu on suotavaa. Onko uudelleensuunnittelu soveltuva ja tehokas tapa vikataajuuden pienentämiseksi? Ennen päätöksentekoa suunnittele ehdotettavat toimenpiteet tarkemmin välilehdellä "Uudelleensuunnittelu"." (Right: "Pölysuojan suunnittelu (haitarikumit tai vastaava)")

At the bottom, there is a text box for "Ehdotettu toimenpide: Akatauluttettu kunnossapito" and a "Päätöspuun lopputulos:" field. The window footer shows "ELMAS RAMOptim Dynamic v4.4.97 (17.12.2012)" and buttons for "OK", "Peruuta", and "Ohje".

Kuva 42. Toimenpiteiden määrittäminen toisen vaiheen RCM-päätöslogiikkakaaviossa.

Edellisten vaiheiden vikamuotojen yksityiskohtainen arviointi sekä vikaantumisaikojen arvioon mukainen vikaantumiskäyttötymien toimivat ohjaavina tekijöinä päätöslogiikkakaaviossa eri toimenpidetyyppejä mietittäessä. Kohteelle ominaisen vikaantumiskäyttötymien avulla kyettiin rajaamaan tietyn tyyppiset toimenpidetyypit pois soveltuvien toimenpiteiden joukosta. Esimerkiksi aikasidonnaisille vikaantumisille soveltuvinta toimenpidetyyppejä tuli hakea erilaisista kunnostus- tai vaihtotoimenpiteistä.

Toimenpiteen yksityiskohtainen määrittäminen

Toimenpiteet määritettiin yksityiskohtaisemmin toimenpidetyyppien-välilehdille kuvassa 43 esitetyn tarkastustoimenpide-esimerkin mukaisesti. Toimenpiteen yksityiskohtaisempi määrittäminen sisälsi toimenpidetyypille ominaisten erikoisvalintojen lisäksi toimenpidettä kuvaavat perustiedot.

The image shows two overlapping software windows. The left window, titled 'Muokkaa solmua: ...07-01 (01) PÄÄNOSTON VAIHDE VAURIOITUNUT', displays a list of tasks under the 'Kunnossapito' category. The selected task is 'Päänoston vaiht...' with a frequency of 45.0 days, a lead time of 60.0 days, a probability of 0.9, and a duration of 0.0 hours. The right window, titled 'Toimenpide: Päänoston vaihteiden värähtelymittaukset', shows the configuration for this task. It includes fields for 'Tyyppi' (Kunnonvalvonta), 'Nimi' (Päänoston vaihteiden värähtelymittaukset), 'Kuvaus', and 'Kommentit'. Below these are input fields for 'Toistoväli' (45.0 d), 'Oirehtimisaika' (60.0 d), 'Todennäköisyys' (0.9), and 'Seisokin kesto' (0.0 h). At the bottom, there is a table for resources and cost fields.

Resurssi	Lukumäärä	Kesto-aika
Asentaja	1	2.0 h

Resurssien kustannukset: 80.0 €
 Kiinteät kustannukset: 0.0 €
 Huoltotyö: Huolto

Kuva 43. *Tarkastustoimenpiteen yksityiskohtainen määrittäminen.*

Esimerkin kuvassa esitettyä tarkastustoimenpidetyyppiä voidaan käyttää erityyppisten tarkastustoimenpiteiden vaikutusten vertailuun aina silmämääräisestä tarkastuksesta erilaisiin kunnonvalvontamenetelmiin. Tämän analyysin yhteydessä tarkastustoimenpidetyyppiä hyödynnettiin ainoastaan värähtelymittaustoimenpiteiden yhteydessä. Analyysissä värähtelymittaustoimenpiteen määrittämisessä käytetyistä perus- ja erikoisvalinnoista on kerrottu tarkemmin seuraavissa luetteloissa.

Tarkastustoimenpiteelle käytetyt perustietokentät:

- **Käytössä:** Kuvaava kuinka simulointi huomioi toimenpiteen. Mikäli valittuna toimenpide mukana simuloinnissa, muutoin simulointi ei huomioi toimenpiteen vaikutuksia vikaantumisiin ja kustannuksiin.
- **Tyyppi:** Toimenpiteelle kirjattiin tähän kenttään tarkempi huoltotyyppi toimenpiteen luokitteluksi.
- **Nimi:** Työn nimi
- **Kuvaus:** Tarkempi kuvaus työstä ja sen suorittamisesta
- **Kommentit:** Tähän kenttään oli mahdollista kirjata tietoja työn suorittamisesta vaadittavista luvista, valmisteluista, erotuksista ja turvallisuushuomioista.

Tarkastustoimenpiteelle käytetyt erikoisvalintojen tietokentät:

- **Toistoväli:** Toimenpiteen toistoväli simuloinnin aloituksen jälkeen
- **Oirehtimisaika:** Arvio vikamuodolle ominaisesta vian oirehtimisajasta
- **Todennäköisyys:** Todennäköisyys, jolla oirehtivan vian aikana tehdyllä tarkastuksella voidaan havaita vikaantumisen alkaminen kaikki epävarmuustekijät huomioiden.
- **Seisokin kesto:** Toimenpiteen aiheuttaman pysäytyksen kesto. Simulointi käyttää tätä määritystä toimenpiteen pysäyttävyyden huomioimisessa.
- **Työn resurssit:** Toimenpiteen suorittamiseen tarvittavat resurssiryhmien henkilöiden määrät ja resurssiryhmän henkilön käyttämät työn kestot voidaan määrittää tähän taulukkoon.
- **Kiinteät kustannukset:** Toimenpiteen tarvike- ja varaosakustannukset voidaan määrittää tähän kenttään.
- **Huoltotyö:** Tällä määrittämisellä toimenpide voidaan ohjata tiettyyn aiemmin määritettyyn jatkotoimenpiteeseen.

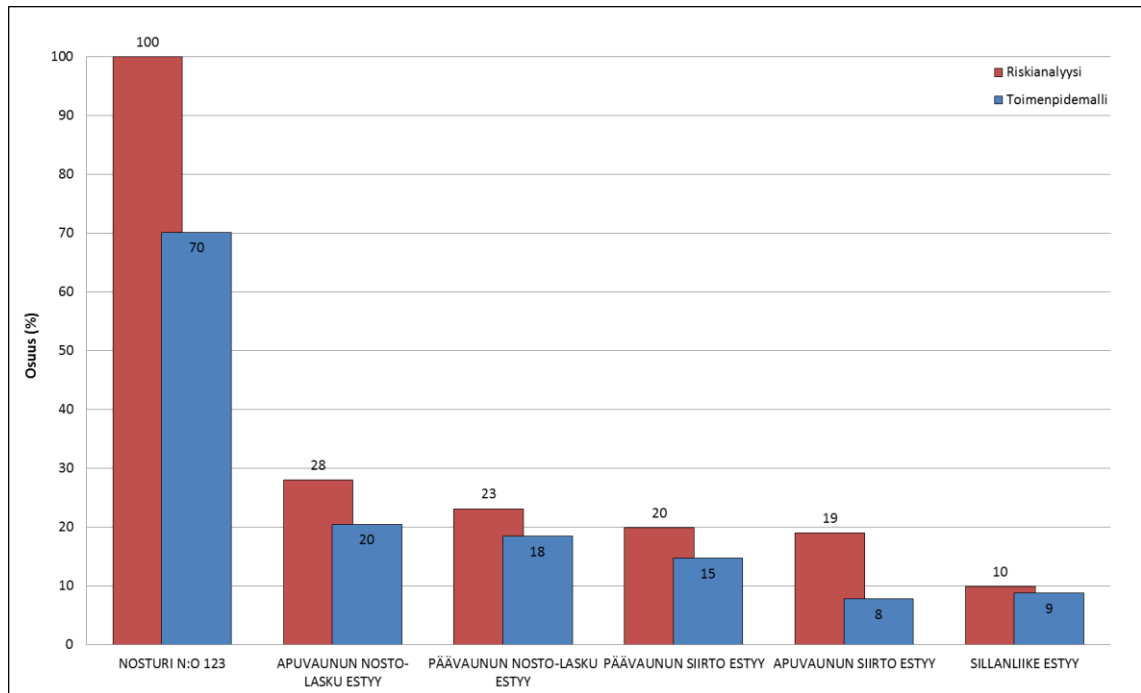
Toimenpidetyypin välilehdellä esitettävät erikoissyötteet vaihtelevat toimenpidetyypeittäin tarjoten tyypillisimmät syötteet käytettäväksi kunkin toimenpidetyypin kohdalla. Toimenpidetyyppikohtaisten erikoissyötteiden sisällön ymmärtämisellä on merkittävä rooli toimenpiteen tehokkuustarkasteluissa, sillä niihin tehdyillä virheellisillä syötteillä on suora vaikutus simuloinnin aikana syntyviin tuloksiin. Toimenpiteen yksityiskohtaisemman määrittämisen myötä toimenpiteen tehokkuutta kyettiin tarkastelemaan simuloinnin avulla.

7.4.3 Toimenpiteiden vaikutusten simulointi

Merkittävimmille vikamuodoille määritettyjen toimenpiteiden tehokkuutta tarkasteltiin simuloinnin avulla analyysin seuraavassa vaiheessa. Simulointi toteutettiin nykytilan riskianalyysissä käytetylle 10 vuoden tarkastelujaksolle toimenpiteiden vaikutusten vertailemiseksi.

Toimintakyvyttömyysaika

Kuvassa 44 esitetään nosturin toimintakyvyttömyysajan jakautuminen sen toiminnallisten vikojen kesken ja verrataan nykytilan riskianalyysin ja toimenpidemallin tuloksia keskenään. Punaiset pylväät kuvaavat nykytilan riskianalyysin tuloksia ja siniset toimenpidemallin tuloksia. Kaikki tulokset esitetään suhteellisina osuuksina nykytilan riskianalyysin kokonaistoimintakyvyttömyysaikaan nähden. Näin sinisten pylväiden toimintojen summaksi ei tule 100 % vaan 70 % ja tulosten vertailu on helppoa.

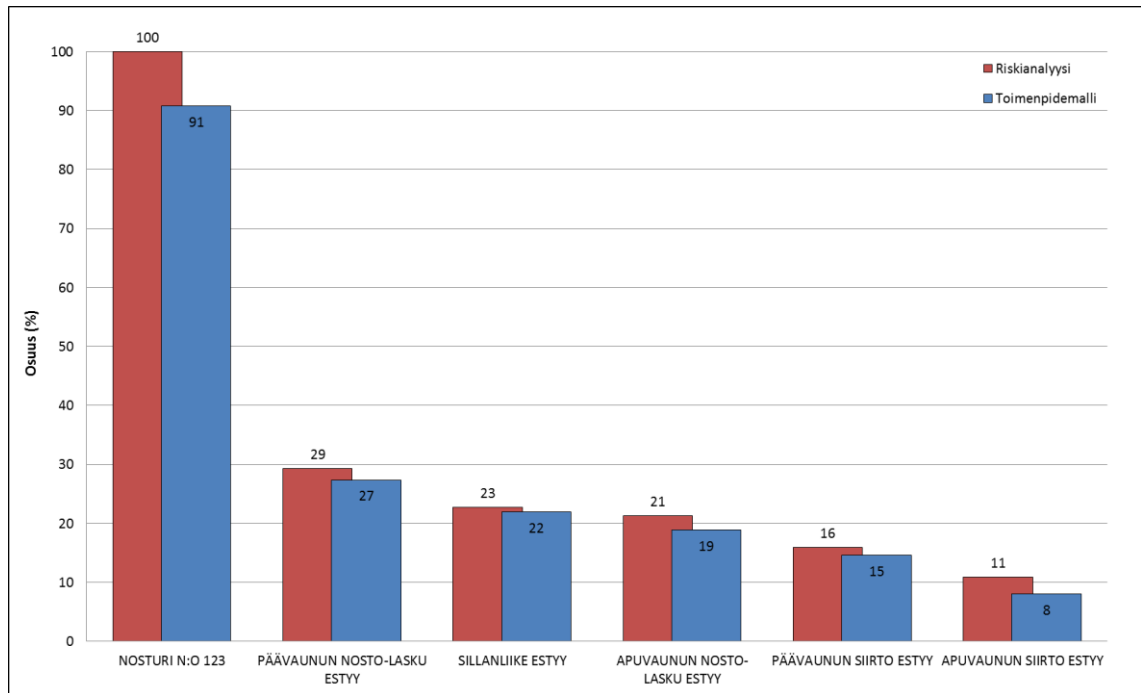


Kuva 44. Valunosturin toimintakyvyttömyysajan jakautuminen.

Kuvasta havaitaan toimenpiteillä saavutettavan nosturin nosto-lasku ja siirtoihin lähes kolmanneksen $((100\% - 70\%)/100\%)$ vähemmän toimintakyvyttömyysaika riskianalyysin mukaiseen tilanteeseen nähden. Merkittävin toimintakyvyttömyysajan pudotus saavutetaan apuvaunun siirrossa, johon tehtävillä toimenpiteillä nosturin toimintakyvyttömyysaika vähenisi noin 11 prosenttia $((19\% - 8\%)/100\%)$. Tämä parannus merkitsee lähes 58 prosentin $((19\% - 8\%)/19\%)$ pudotusta apuvaunun siirron toimintakyvyttömyysajassa.

Vikalukumäärät

Valunosturille kertyneiden toiminnallisten vikojen osuudet on esitetty kuvassa 45. Vikalukumäärissä toimenpiteiden tuoman muutoksen havaitaan olevan vähäisempää (9 %) toimintakyvyttömyysaikaan verrattuna.



Kuva 45. Valunosturin vikojen jakautuminen.

Syynä vähäiseen vikalukumäärien pudotukseen on muun muassa se, että toimenpiteet kohdistettiin vikamuotoihin, jotka syntyessään aiheuttavat kustannusriskien mukaisesti merkittäviä toimintakyvyttömyysajan jaksoja nosturille. Näille vikamuodoille oli tyypillistä, että ne eivät lukumäärällisesti olleet tarkastelujaksolla merkittävimpien vikojen joukossa. Vastaavasti merkittävimmät vikalukumäärien taustalta tunnistettavat vikamuodot aiheuttavat nosturille ainoastaan vähäisen määrän toimintakyvyttömyysaikaa sekä korjauskerran kustannuksia.

Taulukkoon 3 on koottu riskianalyysin sekä toimenpiteiden muodostamat toimintakyvyttömyysajat ja vikalukumäärät osajärjestelmätasolle saakka. Lisäksi taulukon sarake MUUTOS 1 kuvaa toimenpiteillä saavutettavan parannuksen järjestelmätasolle lasketuna. Taulukon sarake MUUTOS 2 puolestaan kuvaa parannuksen suuruutta toiminnallisen vian tai osajärjestelmätasolle laskettuna.

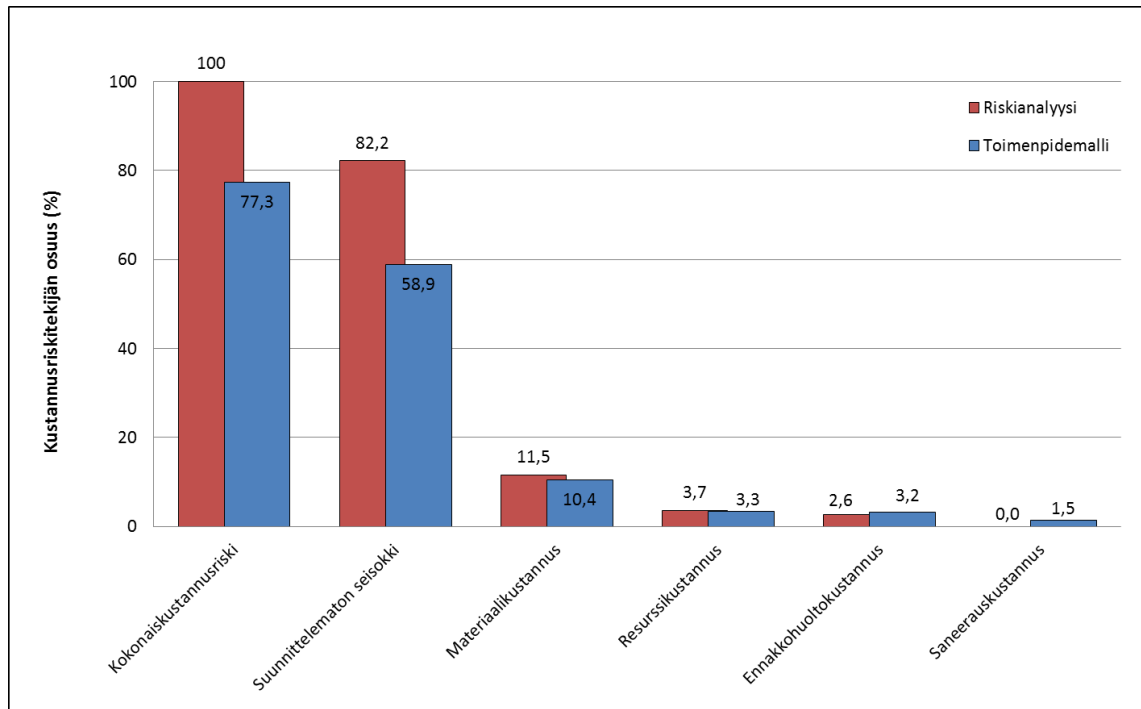
Taulukko 3. Toimenpiteiden vaikutukset.

Järjestelmä	Toiminnallinen vika	Osajärjestelmä	Toimintakyvyttömyysaika (%)				Vikoja (%)			
			RISKIANALYYSI	TOIMENPIDE-MALLI	MUUTOS 1	MUUTOS 2	RISKIANALYYSI	TOIMENPIDE-MALLI	MUUTOS 1	MUUTOS 2
NOSTURI N:O 123			100	70	-30		100	91	-9	
	APUVAUNUN NOSTO-LASKU		28	20	-8	-27	21	19	-2	-11
	APUNOSTOKONEISTO		14	11,5	-3	-18	11,4	10,7	-1	-6
	APUVAUNUN NOSTO-LASKU OHJAUSLAIT.		14	9	-5	-36	9,8	8,2	-2	-17
	PÄÄVAUNUN NOSTO-LASKU		23	18	-5	-20	29	27	-2	-7
	PÄÄVAUNUN NOSTO-LASKU OHJAUSLAIT.		12	9,5	-2	-20	10	8,6	-1	-13
	PÄÄNOSTOKONEISTO		11,1	8,9	-2	-20	19,3	18,7	-1	-3
	PÄÄVAUNUN SIIRTO		20	15	-5	-26	16	15	-1	-8
	PÄÄNOSTOVAUNUN SIIRTOKONEISTO		16	10,8	-5	-33	5,2	3,9	-1	-25
	PÄÄVAUNUN SIIRTO OHJAUSLAITTEET		3,9	3,9	0	-1	6,2	6,2	0	-1
	PÄÄNOSTOVAUNUN TERÄSRAKENTEET		0	0	0	0	4,5	4,5	0	1
	APUVAUNUN SIIRTO		19	8	-11	-59	11	8	-3	-26
	APUNOSTOVAUNUN SIIRTOKONEISTO		14,1	5,3	-9	-63	4,1	1,5	-3	-64
	APUVAUNUN SIIRTO OHJAUSLAITTEET		4,9	2,5	-2	-49	5,3	5	0	-5
	APUNOSTOVAUNUN TERÄSRAKENTEET		0	0	0	0	1,5	1,5	0	2
	SILLANLIKE		10	9	-1	-12	23	22	-1	-3
	SILLAN SIIRTOKONEISTOT		4,1	3,5	-1	-15	7,5	6,9	-1	-8
	SILLANLIIKKEEN OHJAUSLAITTEET		3,9	3,9	0	0	6,2	6,2	0	-1
	SILLAN TERÄSRAKENTEET		2	1,4	-1	-28	8,9	8,8	0	-1

Merkittävimmät parannukset valunosturin toimintakyvyttömyysaikaan saavutetaan tulostaulukkaan punaisella korostetuilla pää- ja apunostovaunun siirtokoneistoihin sekä apunoston ohjauslaitteille tehtävien toimenpiteiden avulla. Näihin osajärjestelmiin tehtävillä toimenpiteillä saavutetaan noin 19 prosentin parannus kokonaistoimintakyvyttömyysaikaan. Tämä vastaa noin 63 prosenttia (19 % / 30 %) koko nosturin toimintakyvyttömyysajan muutoksesta. Vastaavasti noin 60 prosenttia (5,5 % / 9 %) vikalukumäärien kokonaisuutoksesta saavutetaan edellä mainittuihin osajärjestelmiin tehtävien toimenpiteiden avulla. Tulostaulukosta havaitaan yksittäisistä osajärjestelmistä erityisesti apuvaunun siirtokoneistoon tehtävillä toimenpiteillä olevan merkittävä vaikutus nosturin toimintakyvyttömyysajan (9 % / 30 % = 30 %) sekä vikalukumäärien (2,5 % / 9 % = 28 %) vähentymisessä.

Kustannusriskit

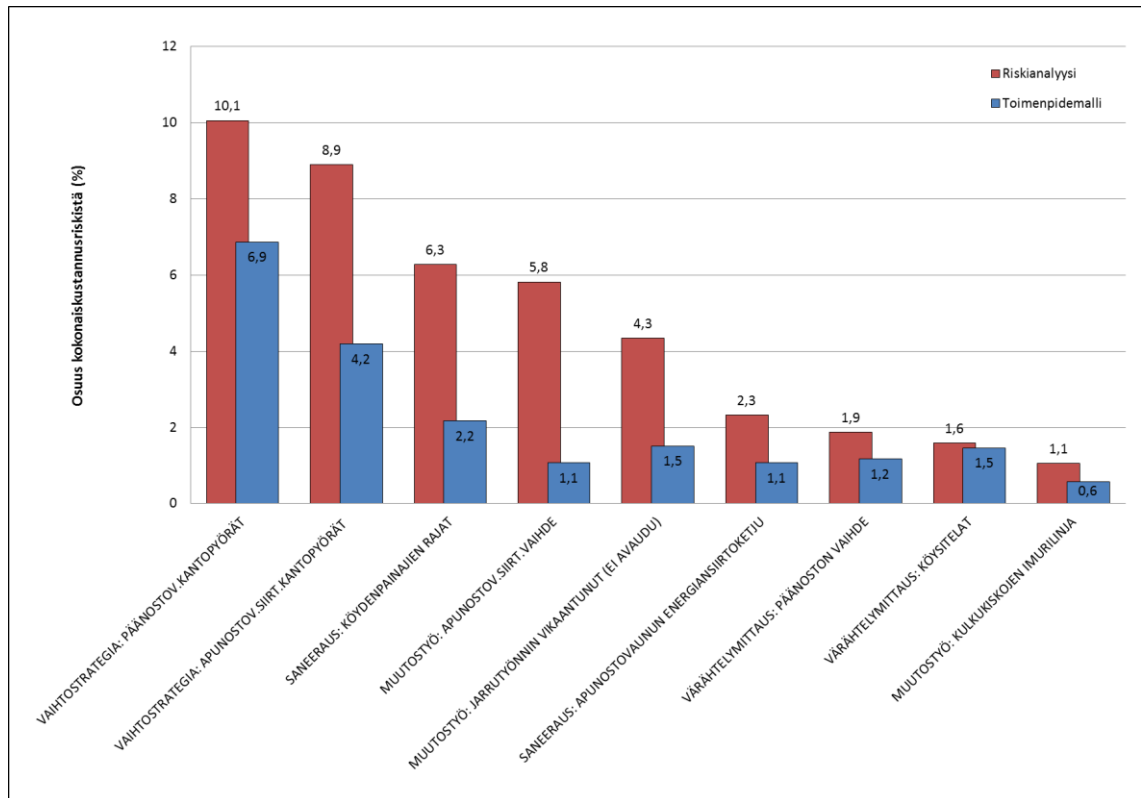
Toimenpiteiden vaikutuksista saadaan kokonaisvaltainen toimintakyvyttömyysajan ja vikalukumäärät yhdistävä näkemys kuvassa 46 esitettyjen nosturin kustannusriskitulosten avulla. Toimenpiteiden avulla valunosturilta on mahdollista vähentää lähes neljännes (22,7 %) sille 10 vuoden tarkastelujaksolla muodostuneista kokonaiskustannusriskeistä.



Kuva 46. Nosturin kustannusriskin muodostuminen.

Merkittävin parannus kustannusriskitekijöiden osalta saavutetaan vähentyneinä tuotannonmenetyksinä. Tuotannonmenetysten muodossa suunnittelemattomista seisokeista syntyvä kustannusriski putoaa lähes neljänneksen (82,2 % - 58,9 % = 23,3 %) riskianalyysin tilanteeseen nähden. Toimenpiteiden toteuttaminen kasvattaa hiukan (0,6 %) ennakkohuoltojen kustannuksia. Toimenpidemallin toimenpiteet sisälsivät myös joitakin nosturin osia, joissa saneerauksen nähtiin olevan paras vaihtoehto toimintakyvyn parantamiseksi. Näiden toteuttaminen kasvattaa nosturin kokonaiskustannusriskejä saneeraus-kustannusten muodossa 1,5 % tarkastelujakson aikana.

Toimenpiteittäin jaoteltuna merkittävimmät kustannusvaikutukset valunosturilla saavutettaisiin erilaisten vaihtostrategioiden, muutos- ja saneeraustöiden tai kunnonvalvonnan avulla. Merkittävimmät toimenpidekohtaiset kustannusvaikutukset esitetään kuvassa 47.



Kuva 47. Toimenpiteiden kustannusvaikutukset.

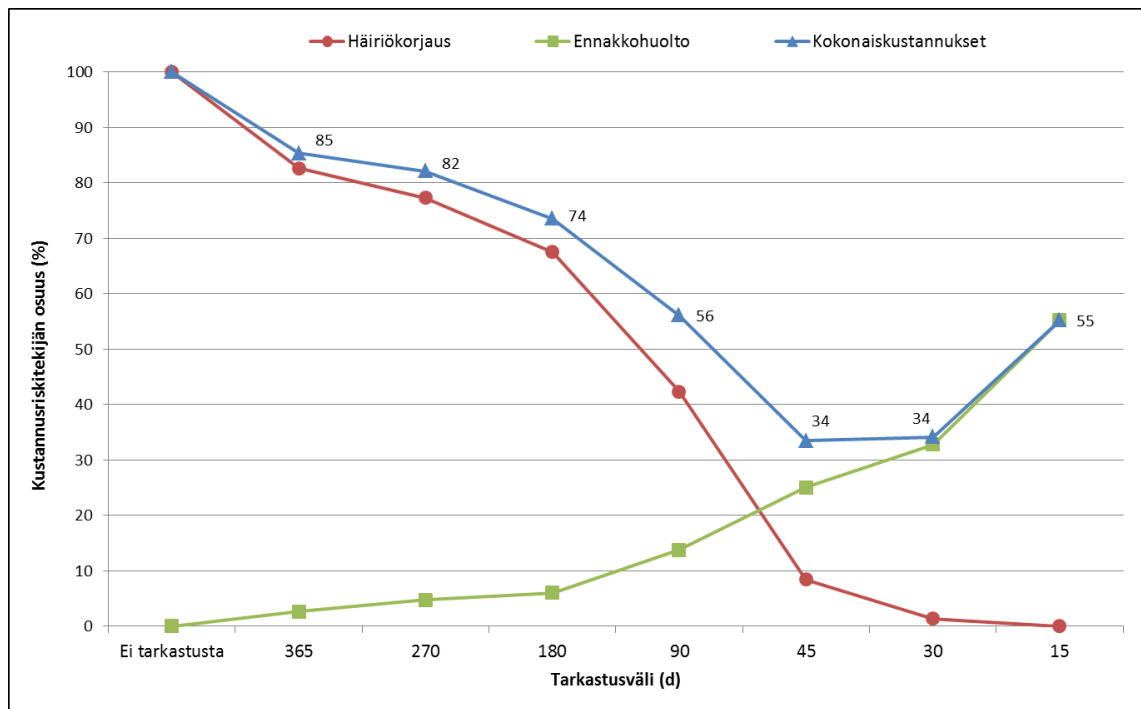
Valunosturin kustannusriskeistä kantopyörien vaihtostrategialla saavutettavat kustannussäästöt ovat merkittävät (7,9 %). Tämä tarkoittaa, että riskianalyysissä kantopyöriin kohdistunutta kustannusriskiä voidaan vaihtostrategialla vähentää yli 40 prosenttia ($(19\% - 11,1\%) / 19\% = 41\%$). Vaihtostrategia sisältää yhteisesti sovitun toimintamallin, jossa tietyn laukaisevan tapahtuman synnyttyä vaihtostrategian mukaiset toimenpiteet käynnistetään.

Köydenpainajien rajojen ja energiasiirtoketjun saneerauksen havaitaan olevan kustannusten kannalta järkevää. Saneeraustoimenpiteillä on mahdollista vähentää nosturille kohdistuneita kustannusriskejä yli 5 prosenttia. Merkittävimmät muutostyöt kohdistuivat apunostovaunun siirron alkavan vaihdevian indikoinnin, jarrutyöntimien suojauksen sekä kulkukiskojen imurilinjan imukyvyn parantamiseen. Näillä muutostöillä arvioitiin saavutettavan noin 8 prosentin kustannussäästöt nosturin toiminnassa. Muutos- ja saneeraustöillä saavutettavia kustannussäästöjä tarkasteltaessa on syytä huomioida, että toimenpiteiden parantaviin vaikutuksiin liittyy tavallista enemmän epävarmuutta. Päätöksentekoa voidaan helpottaa tarkastelemalla toimenpiteen vaikutuksia useamman vaikutusskenaarioiden avulla. Parhaimmillaan vaikutus käyttövarmuuteen ja kokonaiskustannuksiin on positiivinen jo pessimistisimmälläkin skenaariolla.

Päänoston vaihteen sekä köysitelojen värähtelymittauksilla on saavutettavissa vähäisempiä kustannusriskisäästöjä tarkastelujakson aikana. Usein tarkastus- tai mittausvälin valintaan vaikuttaa myös käytännönteekijät kuten esimerkiksi resurssit, joita toimenpi-

teen suorittamiseksi on käytettävissä. Käytäntöön liittyvistä tekijöistä johtuen tarkastusväliksi voidaan joutua valitsemaan kustannusten minimin tuottamaa tarkastusväliä pidempi väli, kuten tämänkin analyysin yhteydessä päädyttiin valitsemaan. Tästä syystä värähtelymittausten avulla saavutettavat kustannussäästöt jäivät parannuspotentiaaliin nähden vähäisemmiksi.

Tarkastusvälin vaikutus kustannustekijöihin esitetään kuvassa 48. Kuvan kuvaaja on muodostettu päänostovaihteen värähtelymittauksista, mutta vastaava tarkastusvälin mitoitustimenetelmä soveltuu myös muidenkin tarkastustoimenpiteiden tehokkuuden tarkasteluun. Tämän analyysin yhteydessä päänoston vaihteen arvioitiin oireilevan noin 60 päivän ajan ennen pysäyttävää toiminnallista vikaantumista. Lisäksi arvioitiin 90 prosenttia alkavista vioista havaittavan toimenpiteen avulla, mikäli värähtelymittaus suoritetaan alkavan vian oireilun aikana.



Kuva 48. Tarkastusvälin vaikutus päänoston vaihteen kustannusriskitekijöihin.

Kuvaajasta havaitaan miten simuloinnista saatavat ennakkohoillon kustannukset kasvavat tarkastusvälin lyhentyessä ja vastaavasti yllättävien häiriökorjausten osuus vähenee. Kokonaiskustannusten minimi saavutetaan 30–45 päivän tarkastusvälistä. Tarkastusväliksi tulisi valita 30 päivää, mikäli lähes kaikki vikaantumiset halutaan korjata suunnitellusti ilman häiriökorjauskustannuksia. Tarkastusväliä voidaan pidentää 45 päivää, mikäli osa vikaantumista sallitaan syntyvän yllättävästi aiheuttaen häiriökorjauskustannuksia. Kaiken kaikkiaan kokonaiskustannukset voidaan pudottaa kolmanneksen oikealla tarkastusvälistä oirehtimisaikaan nähden. Liian lyhyestä tarkastusvälistä taas seuraa kokonaiskustannusten merkittävää kasvua kohonneiden ennakkohoilkustannusten muodossa.

Muut toimenpiteet

Analyysin aikana määritettiin saneeraus- ja muutostöiden lisäksi myös muita kertaluonteisia toimenpiteitä. Tällaisia toimenpiteitä olivat muun muassa erilaiset ohjeistusten kehittämiset ja selvitystyö uuden huoltotason lisäämisestä tarkastustoimenpiteen suorittamisen helpottamiseksi. Tämän tyyppisten kertaluonteisten toimenpiteiden vaikutuksia vikaantumisiin ei tämän analyysin yhteydessä tarkasteltu tarkemmin simuloinnin avulla. Erityisesti ohjeistuksen kehittämisellä uskottiin olevan merkittävä vaikutus eräiden käyttäjälähtöisten vikamuotojen ehkäisemisessä tai nopeuttamaan viasta toipumisessa.

Nosturin toimintakyvyn ylläpitäminen sisälsi myös erilaisia tarkastus- ja määräaikaivaihtotöitä. Nämä työt olivat suurimmalta osalta kuuluneet jo aiempaan ennakkohuolto-ohjelmaan. Tämän analyysin aikana näiden toimenpiteiden todettiin edelleen olevan soveltuvia ja tehokkaita vikojen ehkäisemisessä. Näin ollen niiden suorittamista voitiin suositella tehtäväksi aiempaan tapaan.

8 YHTEENVETO

Työn tavoitteiden mukaisesti työn aikana luotiin systemaattinen toimintamalli valunosturin kunnossapidon kehittämiseksi ELMAS-käyttövarmuusanalyysiä hyödyntäen. ELMAS-käyttövarmuusanalyysissä sovellettiin FTA-, FMEA- ja RCM-analyysien parhaita puolia niin, että syntyi joustava, virtaviivainen ja tehokas menetelmä monipuolisen ja kokonaisvaltaisen riskianalyysin toteuttamiseksi sekä parantavien toimenpiteiden suunnittelemiseksi. ELMAS-käyttövarmuusanalyysi muodostui mallinnuksen, lähtötietojen arvioinnin, riskien simuloinnin, toimenpiteiden suunnittelun ja toimenpiteiden vaikutusten simuloinnin vaiheista.

8.1 Analyysivaiheet ja tulokset

Mallinnuksen yhteydessä valunosturin toimintaa tarkasteltiin kahden erillisen mallin avulla. Mallinnuksen ensimmäisen vaiheen valunosturin laiterakenteen kuvaavan laitehierarkiamallin havaittiin tukevan analyysiryhmän työskentelyä kohteen rajaamisessa sekä mallinnukseen tutustumisessa. Laitehierarkiamallia hyödynnettiin myös kunnossapidon tietojärjestelmiin kerääntyneen historiatiedon analysoinnissa.

Mallinnuksen seuraavassa vaiheessa luotiin kohteen toimintohierarkiamalli, jonka muodostamisessa laitehierarkiamalli toimi hyvänä pohjana. Laitehierarkisia kokonaisuuksia sisältävä toimintohierarkiamalli soveltuu kohteen toiminnallisuuksien tarkasteluun ja toiminnallisuutta heikentävien tapahtumien tunnistamiseen sekä parantavien toimenpiteiden kustannustehokkaaseen suunnitteluun. Mallinnuksen aikana jouduttiin tukeutumaan dynaamiseen ohjelmakoodiin niiltä osin, joissa valunosturin toiminnan kuvaaminen riittävän yksityiskohtaisesti ei ollut mahdollista pelkkien loogisten porttiehtojen avulla.

Nykytilaa kuvaavan riskianalyysin toteuttamiseksi analyysin seuraavassa vaiheessa toimintohierarkiamallin vikamuodoille arvioitiin lähtötietoja niiden esiintymistiheyden, toipumiseen sekä korjausresursseihin ja -kustannuksiin liittyen. Tämän analyysivaiheen voidaan sanoa olevan yksi työläimmistä, mutta samalla myös merkittävimmistä analyysin jatkon kannalta. Analyysivaiheelle on ominaista se, että analyysin vetäjän on kyettävä esittämään kysymyksensä asiantuntijan ymmärtämällä tavalla. Tämä edellyttää vetäjältä riittävää teknistä ymmärrystä kulloinkin tarkasteltavasta mekaniikan, sähkön tai automaation osiosta.

Nykytilan riskianalyyssissä kyettiin tunnistamaan potentiaalisimmat valunosturin kohteet ja vikamuodot, joihin tehtävillä toimenpiteillä olisi saavutettavissa merkittävimmät parannukset nosturin toimintakyvyttömyysaikaan, vikalukumääriin ja tuotannonmenetyskustannuksiin. Toimenpiteet kohdistettiin näiden vikamuotojen ehkäisemiseen tai niiden seurausten vähentämiseen analyysin seuraavassa vaiheessa. Soveltuvan toimenpiteen määrittäminen edellytti vikamuotojen yksityiskohtaisempaa arviointia paikallisen turvallisuusvaikutuksen, seurausten pienentämisen, vian aiheuttajien, havaitsemisen ja luonteen muodossa. Näiden arvioiden tukemana vikamuodolle määritettiin soveltuva toimenpide vikamuodon ehkäisemiseksi tai seurausten vähentämiseksi RCM-päätöslogiikkaa hyödyntäen. Soveltuvien toimenpiteiden tehokkuuden arvioinnissa hyödynnettiin ELMAS:n stokastista simulointia. Näin toimenpiteille oli löydettävissä tehokkaat suoritusvälit käyttövarmuus ja kustannukset huomioiden.

Merkittävimmät vaikutukset saavutettiin erilaisten vaihtostrategioiden, muutos- ja saneeraustöiden sekä kunnonvalvonnan toimenpiteiden avulla. Määritettyjen toimenpiteiden avulla on mahdollista vähentää lähes neljännes valunosturille riskianalyyssissä kohdistuneista kustannusriskeistä. Valunosturilla syntyvät vikalukumäärät eivät vähentyneet merkittävästi. Syynä tähän oli se, että toimenpiteet kohdistettiin vikamuodoille, jotka aiheuttavat nosturille merkittävän määrän toimintakyvyttömyysaika ja sitä kautta tuotannonmenetyskustannuksia. Analyysin aikana kirjattiin ylös myös kertaluonteisia toimenpiteitä, joiden vaikutuksia vikaantumisiin ei analyysin yhteydessä arvioitu. Tällaisia toimenpiteitä olivat muun muassa ohjeistukset käyttäjälähtöisten ongelmien vähentämiseksi sekä selvitystyö tarkastustason lisäämisestä nosturin kunnossapitoa helpottamaan.

8.2 Menetelmän soveltuvuus

Konkreettisten toimenpide-ehdotusten lisäksi työn aikana tarjottiin syventävä opastus valunosturin käyttövarmuusmalleihin sekä projektin aikana syntyneeseen systemaattiseen toimintamalliin. Asiakasyritys voi hyödyntää muodostettuja laite- ja toimintohierarkiamalleja lähes sellaisenaan muiden nostureiden käyttövarmuustarkasteluiden yhteydessä. Yleisemmin systemaattista toimintamallia järjestelmän teknisten riskien tarkastelulle ja riskien hallitsemiseksi voidaan soveltaa myös muihin tuotantokriittisiin kohteisiin.

Työn aikana osoitettiin simuloinnin tarjoamien mahdollisuuksien käyttökelpoisuus tukemaan erilaisia toimintaskenaarioiden ja investointien tarkasteluja. Simuloinnin tarjoamat, käyttövarmuuden, vikalogiikan ja eri kustannustekijät yhdistävät, suhteelliset riskitulokset havaittiin erityisen mielenkiintoisiksi ja arvokkaiksi. Suhteellisissa riskituloksissa koko järjestelmän epäkäytettävyyuskustannukset jyvitetään vikamuodoille siinä suhteessa kuin ne niitä aiheuttavat. Tämä tuo hyvin konkreettisesti esiin esimerkiksi

yksittäisen vikamuodon aiheuttaman kustannusriskin koko valunosturille huomioiden kaikki kustannustekijät.

8.3 Mallien ylläpito ja päätöksenteko

Riskienhallinta on jatkuva prosessi, jonka tehtävänä on tunnistaa, arvioida ja hallita tarkasteltavalle järjestelmälle ominaisia riskejä. Järjestelmän riskeille on tyypillistä, että ne muuttuvat ajan kuluessa järjestelmän vanhetessa tai prosessin muuttuessa. Tästä johtuen jatkuvan parantamisen kannalta on tärkeää ylläpitää tämän työn aikana muodostettuja käyttövarmuusmalleja. Mallien ylläpitämisen yhteydessä malleihin siirretään säännöllisin väliajoin uudet historiatapahtumat sekä arvioidaan tapahtumahistorian pohjalta määritettyjen toimenpiteiden kykyä ylläpitää kohteen toimintaa kustannustehokkaasti. Jos katselmoinnin yhteydessä tunnistetaan uusia vikamuotoja tai aiemmin tehtyjä arvioita halutaan tarkentaa, on käyttövarmuusanalyysi syytä päivittää ja tarkastella riskejä ja toimenpiteitä uusimman tiedon valossa. Ylläpitämällä käyttövarmuusmalleja säännöllisesti pystytään reagoimaan järjestelmässä tai prosessissa tapahtuneisiin muutoksiin hyvissä ajoin.

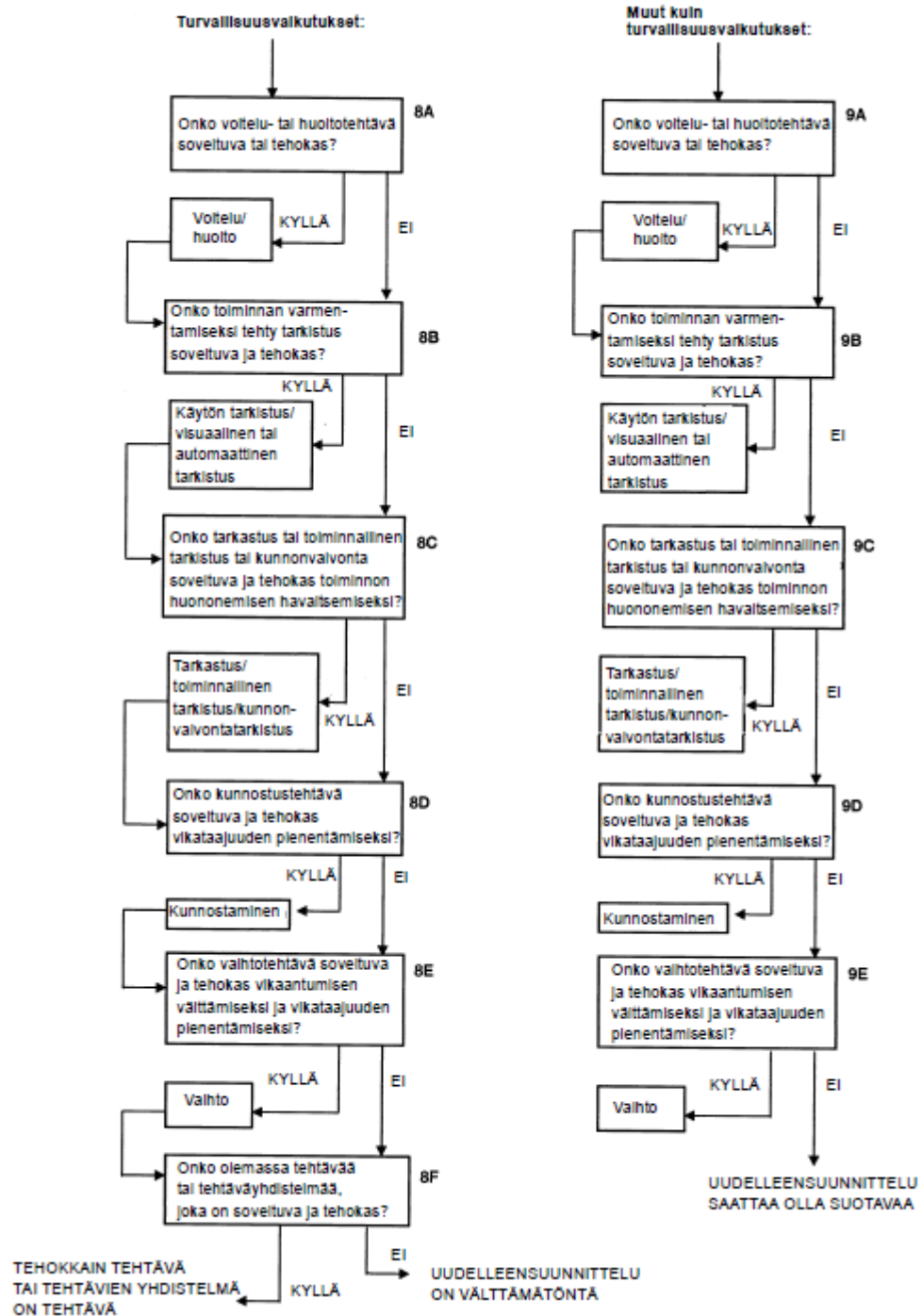
Analyysien lähtötietoina käytettäviin arvioihin liittyy luonnollisesti epävarmuutta. ELMAS-käyttövarmuusanalyysin tarjoamat tulokset eivät ole absoluuttinen totuus tilanteesta vaan ennuste, jonka pohjana on käytetty paras saatavilla oleva tieto järjestelmän epäkäytettävyyden ja kustannusriskien kannalta olennaisista asioista. Epävarmuus on syytä tiedostaa, mutta päätöksiä pitää pystyä tekemään epävarmuudesta huolimatta. Etenkin merkittävien päätösten tulisi kuitenkin pohjautua aina tarkimpaan ja kattavimpaan saatavilla olevaan tietoon asiasta. Juuri tästä diplomityön yhteydessä kehitetyssä toimintamallissa ja ELMAS-käyttövarmuusanalyysissä onkin kyse - tiedon jalostamisesta päätöksenteon tueksi.

LÄHTEET

- [1] B. Bertsche, A. Schanz, K. Pickard, Reliability in Automotive and Mechanical Engineering - Determination of Component and System Reliability, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008, 492 p.
- [2] A. Birolini, Reliability Engineering - Theory and Practice, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010, 610 p.
- [3] J.M. Booker, L.A. McNamara, Expert Knowledge in Reliability Characterization - A Rigorous Approach to Eliciting, Documenting, and Analyzing Expert Knowledge, in: E. Nikolaidis (ed.), D.M. Ghiocel (ed.), S. Singhal (ed.), Engineering Design Reliability Handbook, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA, 2005, pp. 271-301.
- [4] D. Crowe, A. Feinberg, Reliability Statistics Simplified, in: D. Crowe (ed.), A. Feinberg (ed.), Design for reliability, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA, 2001, pp. 91–120.
- [5] B.S. Dhillon, Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 2006, 214 p.
- [6] D. J. Smith, Reliability, Maintainability and Risk - Practical methods for engineers, Oxford, Elsevier Ltd, 2011, 436 p.
- [7] Guidance notes on Reliability-Centered Maintenance, American Bureau of Shipping, Houston, 2004, 145 p.
- [8] D.F. Haasl, N.H. Roberts, F.F. Goldberg, W.E. Vesely, Fault Tree Handbook, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., USA, 1981, 209 p.
- [9] V. Ikonen, Tuotantolinjan dynaaminen simulointi ja kokonaistehokkuus, Käyttövarmuuden suunnittelun ja kunnossapidon perusteet (KSU-4310) kurssimateriaali, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2008, 26 s.
- [10] J. Järviö, T. Piispa, T. Parantainen, T. Åström, Kunnossapito, Kunnossapitoyhdistys ry, Hamina, 2007, 208 s.
- [11] J. Konola, J. Salmikuukka, Käyttövarmuustakuut ja niiden määrittäminen. in: K. Holmberg (ed.), Käyttövarmuuden ja elinjaksotuoton hallinta. VTT Valmistustekniikka, Käyttöttekniikka, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1998, s. 7-17.
- [12] H. Kumamoto, E.J. Henley, Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists, IEEE Press, New York, 1996, 597 p.
- [13] Kunnossapidon perusteet: Kunnossapidon käsitteet ja määritelmät, Opetushallitus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.2.2014): http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet_2-1_kunnossapidon_kasitteet_ja_maaritelmät.html.
- [14] J.W. McPherson, Reliability Physics and Engineering: Time-To-Failure Modeling, Springer, New York, 2010, 318 p.
- [15] J. Moubray, Reliability-Centered Maintenance, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1997, 423 p.
- [16] PSK 6201, Kunnossapito - Käsitteet ja määritelmät = Maintenance - Terms and definitions, PSK Standardisointiyhdistys ry, 2011, 30 s.

- [17] PSK 7501, Prosessiteollisuuden kunnossapidon tunnusluvut = Key performance indicators of maintenance for use in process industry, PSK Standardisointiyhdistys ry, 2010, 32 s.
- [18] Ramentor Oy, Sisäinen materiaali.
- [19] M. Rausand, A. Høyland, System Reliability Theory - Models, Statistical Methods and Applications, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004, 636 p.
- [20] S. Ross, Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists, Elsevier Inc., Oxford, 2009, 647 p.
- [21] RCM GUIDE For Facilities and Collateral Equipment, National Aeronautics and Space Administration, 2008, 472 p.
- [22] Ruukki Oyj, Sisäinen materiaali.
- [23] A.M. Smith, G.R. Hinchcliffe, RCM - gateway to world class maintenance. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2004, 337 p.
- [24] R.F. Stapelberg, Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design, Springer, London, 2009, 827 p.
- [25] SFS-EN 13306, Kunnossapito. Kunnossapidon terminologia = Maintenance. Maintenance terminology, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, 2010, 53 s.
- [26] SFS-EN 31010, Riskien hallinta. Riskien arviointimenetelmät = Risk management. Risk assessment techniques, Suomen Standardisoimisliitto Helsinki, 2013, 165 s.
- [27] SFS-IEC 60300-3-11, Luotettavuuden hallinta. Osa 3-11: Sovellusohje. Toimintavarmuuskeskeinen kunnossapito = Dependability management. Part 3-11: Application guide. Reliability centred maintenance, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, 2001, 90 s.
- [28] SSAB and Ruukki have joined forces, SSAB, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.6.2015): http://www.ssab.com/Global/SSAB/Media/140729_SSAB_Ruukki_Closing_presentation_EXTERNAL.pdf?epslanguage=en.
- [29] I. Sutton, Process Risk and Reliability Management - Operational Integrity Management, Elsevier Inc., Burlington, Massachusetts, USA, 2010, 850 p.
- [30] A.K. Verma, A. Srividya, D.R. Karanki, Reliability and Safety Engineering, Springer-Verlag, London, 2010, 535 p.
- [31] S. Virtanen, P-E. Hagmark, Käyttövarmuuden ja kunnossapidon perusteet (KSU-4310) kurssimateriaali, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2009.
- [32] S. Virtanen, Reliability in Product Design – Specification of dependability requirements. Otaniemi. Publication Nr. B23, 1996, 81 s.
- [33] R. Walpole, R. Myers, S. Myers, K. Ye, Probability & Statistics for Engineers & Scientists, Pearson Education, Inc., Boston, Massachusetts, USA, 791 p.

LIITE A: TOIMENPITEIDEN MÄÄRITTELY RCM-LOGIIKKAKAAVIOSSA (PIILEVÄ VIKA)



LIITE B: VALUNOSTURIN VIKOJEN JAKAUTUMINEN HISTORIASSA

Järjestelmä	Osajärjestelmä	Laiteryhmä	Vikojen osuus (%)
NOSTURI N:O 123 (200/60 T)			100
	SILLAN TERÄSRAKENTEET		5
		MUUT TERÄSRAKENTEET	1
		OHJAAMO	4
	PÄÄNOSTOVAUNUN TERÄSRAKENTEET		0
	APUNOSTOVAUNUN TERÄSRAKENTEET		0
	SILLAN SIIRTOKONEISTOT		12
		SILLAN SIIRT.VAIHTEET	1
		SILLAN KANTOPYÖRÄT	1
		SILLANSIIRRON MOOTTORIT	3
		SILLANSIIRRON RAJAT	2
	PÄÄNOSTOVAUNUN SIIRTOKONEISTO		1
		PÄÄNOSTOV.KANTOPYÖRÄT	1
	APUNOSTOVAUNUN SIIRTOKONEISTO		10
		APUNOSTOVAUNUN SIIRRON MOOTTORIT	9
	PÄÄNOSTOKONEISTO		13
		KÖYSIVAAKAT	4
		PÄÄNOSTON MOOTTORIT	5
		PÄÄNOSTON RAJAT	3
	APUNOSTOKONEISTO		32
		APUNOSTOKOUKKU 60T	3
		NOSTOKÖYSI	7
		PUNNITUSVAAKA (APUNOSTO)	2
		APUNOSTON RAJAT	14
		APUNOSTON MOOTTORIT	5
	APUNOSTOVAUNUN VIRRANOTTOLAITTEET		1
	MERKINANTOLAITTEET		0
	SÄHKÖKOJEKAAPIT		10
		KOJEKAAPPI B-E1 APUNOSTO	1
		KOJEKAAPPI Z-E1 LOGIIKKA	1
		OHJAUSPULPETTI E74 OIKEA	3
		RADIO-OHJAUKSEN KAAPPI	1
		VAAKALAITTEET LOGIIKKA Z-E3	1
	NOSTURIN VIRRANOTTOLAITTEET.		2
	KESKUSVOITELULAITTEET		0
	NOSTURI N:O 123 (200/60 T)		13

LIITE C: VALUNOSTURIN EPÄKÄYTETTÄVYYDEN JA VIKOJEN JAKAUTUMINEN RISKIANALYYSISSÄ

Järjestelmä	Toiminnallinen vika	Osajärjestelmä	Laiteryhmä	Toimintakyvyttömyysaika (%)	Vikoja (%)
NOSTURI N:O 123				100	100
	APUVAUNUN NOSTO-LASKU			28	21
		APUNOSTOKONEISTO		14	11
		APUNOSTON MOOTTORIT		4,5	1,5
		NOSTOKÖYSI		3,7	7,5
		APUNOSTON KÖYSIPYÖRÄT		2,5	0,1
		APUNOSTON JARRUT		2,1	1,2
		APUNOSTON KÖYSITELAT		0,9	0,1
		APUNOSTON VAIHTEET		0,4	0,0
		APUNOSTOKOUKKU 60T		0,0	0,0
		APUVAUNUN NOSTO-LASKU OHJAUSLAITTEET		14	10
		APUNOSTON RAJAT		10,4	4,4
		APUNOSTOVAUNUN SIIRRON JA NOSTO-LASKU ENERGIANSIIRTOKETJU		2,5	0,3
		APUVAUNUN NOSTO-LASKU RELEISSÄ TAI KONTAKTOREISSA VIKA		1,0	0,7
		APUVAUNUN NOSTO-LASKU LOGIIKKA HÄIRIÖLLÄ		0,0	0,0
	PÄÄVAUNUN NOSTO-LASKU			23	29
		PÄÄVAUNUN NOSTO-LASKU OHJAUSLAITTEET		12	10
		PÄÄNOSTON RAJAT		10,2	4,4
		PÄÄVAUNUN NOSTO-LASKU RELEISSÄ TAI KONTAKTOREISSA VIKA		1,0	0,7
		PÄÄNOSTOVAUNUN SIIRRON JA NOSTO-LASKU KAAPELOINTI		0,7	0,4
		PÄÄVAUNUN NOSTO-LASKU LOGIIKKA HÄIRIÖLLÄ		0,0	0,0
		PÄÄNOSTOKONEISTO		11	19
		NOSTOKÖYDET		3,7	7,5
		PÄÄNOSTON JARRUT		2,1	1,2
		PÄÄNOSTON VAIHTEET		1,9	0,0
		200 T KUORMAUSELIN		1,6	8,3
		PÄÄNOSTON MOOTTORIT		0,9	1,0
		PÄÄNOSTON KÖYSITELAT		0,9	0,1
		PÄÄNOSTON KÖYSIPYÖRÄT		0,0	0,0
	PÄÄVAUNUN SIIRTO			20	16
		PÄÄNOSTOVAUNUN SIIRTOKONEISTO		16	5
		PÄÄNOSTOV. KANTOPYÖRÄT		11,3	1,2
		PÄÄNOSTOVAUNUN SIIRRON MOOTTORIT		2,5	1,0
		PÄÄNOSTOV. SIIRT. JARRUT		1,5	2,2
		PÄÄNOSTOV. SIIRT. KYTKIMET		0,7	0,7
		PÄÄVAUNUN SIIRTO OHJAUSLAITTEET		4	6
		PÄÄNOSTOVAUNUN SIIRRON RAJAT		1,2	0,8
		PÄÄVAUNUN SIIRRON RELEISSÄ TAI KONTAKTOREISSA VIKA		1,0	0,8
		PÄÄNOSTOVAUNUNSIIRRON (PAIKANMITTAUS) ABSOLUUTTIAANTURI		0,9	0,9
		PÄÄNOSTOV. SIIRT. VIRANSYÖTTÖ		0,7	0,4
		PÄÄVAUNUN SIIRRON LOGIIKKA HÄIRIÖLLÄ		0,0	0,0
		PÄÄNOSTOVAUNUN TERÄSRAKENTEET		0	5
	APUVAUNUN SIIRTO			19	11
		APUNOSTOVAUNUN SIIRTOKONEISTO		14	4
		APUNOSTOV. SIIRT. KANTOPYÖRÄT		10,1	0,9
		APUNOSTOVAUNUN SIIRRON MOOTTORIT		4,1	3,3
		APUVAUNUN SIIRTO OHJAUSLAITTEET		5	5
		APUNOSTOVAUNUN SIIRRON JA NOSTO-LASKU ENERGIANSIIRTOKETJU		2,6	0,3
		APUNOSTOVAUNUN SIIRRON RAJAT		1,3	0,8
		APUVAUNUN SIIRRON RELEISSÄ TAI KONTAKTOREISSA VIKA		1,0	0,7
		APUVAUNUN SIIRRON LOGIIKKA HÄIRIÖLLÄ		0,0	0,0
		APUNOSTOVAUNUN TERÄSRAKENTEET		0	2
	SILLANLIIKE			10	23
		SILLAN SIIRTOKONEISTOT		4	8
		TELJEN VOIMANSIIRROSSA ONGELMIA		2,8	2,9
		SILLAN SIIRT. JARRUT		1,1	1,9
		SILLAN SIVUOHJAUSPYÖRÄT		0,2	0,1
		SILLANLIIKKEEN OHJAUSLAITTEET		4	6
		SILLANSIIRRON RAJAT		1,9	1,1
		SILLANLIIKKEEN RELEISSÄ TAI KONTAKTOREISSA VIKA		1,0	0,7
		SILLANSIIRRON (PAIKANMITTAUS) ABSOLUUTTIAANTURI VAURIOITUNUT		0,9	0,9
		SILLANLIIKKEEN LOGIIKKA HÄIRIÖLLÄ		0,0	0,0
		SILLAN TERÄSRAKENTEET		2	9
		KULKUKISKOT		1,1	0,2
		MUUT TERÄSRAKENTEET		0,8	5,0
		OHJAAMO		0	3,8