



KRIITTISYYSANALYYSIN KEHITTÄMINEN PUUTEOLLISUUDEN TUOTANTOLAITOKSEEN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Tuotantotalouden diplomityö

2022

Veikko Lounakoski

Tarkastaja: Professori Janne Huiskonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Teknis-luonnontieteellinen

Tuotantotalous

Veikko Lounakoski

Kriittisyysanalyysin kehittäminen puuteollisuuden tuotantolaitokseen

Tuotantotalouden diplomityö

2022

94 sivua, 21 kuvaa, 9 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastaja: Professori Janne Huiskonen

Avainsanat: Kunnossapito, vikaantuminen, riskien hallinta, riskianalyysi, kriittisyysluokittelu, kriittisyysanalyysi, PSK 6800

Diplomityön tavoitteena oli kehittää puuteollisuuden tuotantolaitokseen sopiva kriittisyysanalyysi. Kriittisyysanalyysin pohjana käytettiin PSK 6800 standardia. Standardia sovellettiin tuotantolaitoksen tarpeiden mukaan ja testattiin kaksi kertaa. Testauksien jälkeen analyysia muokattiin parannusehdotuksien perusteella. Testausvaihe suoritettiin kohdeyrityksen kriittisimpään tuotantolinjaan, jonka kautta kaikki tuotteet kulkevat läpi.

Työn tuloksena saatiin toimiva kriittisyysanalyysi, jota voidaan hyödyntää puuteollisuuden tuotantolaitoksen laitteiden kriittisyyden määrittelyssä. Kriittisyysanalyysin avulla yritys saa selville tuotannon kannalta kriittiset laitteet. Jatkossa kunnossapitotoimet, resurssit sekä kehityssuunnitelmat voidaan kohdistaa ja priorisoida niille laitteille ja osa-alueille, jotka vaativat eniten panostusta.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Engineering Science

Industrial Engineering and Management

Veikko Lounakoski

Development of criticality analysis for a wood industry production plant

Master's thesis

2022

94 pages, 21 figures, 9 tables and 2 appendices

Examiner: Professor Janne Huiskonen

Keywords: Maintenance, failure, risk management, risk analysis, criticality classification, criticality analysis, PSK 6800

The aim of the thesis was to develop a criticality analysis suitable for a wood industry production plant. The PSK 6800 standard was used as the basis for the criticality analysis. The standard was applied according to the needs of the production plant and tested two times. After the testing, analysis was modified based on suggestions for improvement. The testing phase was performed on the target company's most critical production line, through which all the products pass.

The result of the work was a functional criticality analysis that can be used to determine the criticality of the machinery in a wood industry production plant. With the help of criticality analysis, the company can find out machines that are critical for production. In the future, maintenance activities, resources and development plans can be targeted and prioritized for those machines and areas that require the most investment.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö päätti neljän vuoden tuotantotalouden opinnot Lappeenrannassa. Työtä tehdessäni kesä kului viimeisten opintopisteiden keräämiseen ja muiden työtehtävien hoitamiseen. Työ on tehty Koskisen Oy:n Järvelän tuotantolaitokseen. Haluan kiittää Koskisen väkeä, joka mahdollisti diplomityön toteuttamisen. Erityiset kiitokset haluan antaa kunnossapitopäällikölle Antti Hänniselle ja muulle kunnossapidon väelle, jotka antoivat heti työsuhteen alussa vapauden ja vastuun tehdä omalla tavalla töitä. Näin mahtavia työkavereita on vaikea löytää.

Lisäksi haluan kiittää kaikkia työn toteuttamiseen osallistuneita, jotka tekivät kalenteriinsa tilaa muiden kiireiden ohella ja antoivat tarvittavan tuen diplomityön suorittamiseen. Yliopiston puolelle kiitokset professori Janne Huiskoselle, joka antoi positiivista ja rakentavaa palautetta koko prosessin ajan. Lopuksi vielä kiitokset avopuolisolleni, ystävilleni, vanhemmilleni ja veljille, jotka ovat aina olleet tukenani opinnoissa ja elämässä. En olisi pystynyt tähän ilman teitä ja olette erittäin tärkeä osa elämäniä.

Veikko Lounakoski

Lahdessa 03.08.2022

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit

K	Kriittisyysindeksi
p	Vikaantumisväli
K _{alaindeksi}	Kriittisyysindeksin osaindeksit
W _{alaindeksi}	Arviointikriteereiden painoarvot
M _{alaindeksi}	Arviointikriteereiden kertoimet
P ₁	Tuotantoyksikön painoarvokerroin
P ₂	Tuotantolinjan painoarvokerroin
P ₃	Prosessin painoarvokerroin
P ₄	Osaprosessin painoarvokerroin

Lyhenteet

PSK	Prosessiteollisuuden standardoimiskeskus
SFS	Suomen standardisoimisliitto
KNL	Tuotannon kokonaistehokkuus
CBM	Kuntoon perustuva kunnossapito: Condition based maintenance
TBM	Aikaperusteinen kunnossapito: Time-based maintenance
CM	Korjaava kunnossapito: Corrective maintenance
PM	Ennaltaehkäisevä kunnossapito: Preventive maintenance
PDM	Ennakoiva kunnossapito: Predictive maintenance
TPM	Tuottava kunnossapito: Total Productive Maintenance
RCM	Luotettavuuskeskeinen kunnossapito: Reliability-centered maintenance

BCM	Yrityskeskeinen kunnossapito: Business cantered maintenance
CAM	Käyttöomaisuuden hallinta: Capital asset management
ILS	Integroitu logistinen tuki: Integrated logistic support
RBM	Riskiperusteinen kunnossapito: Risk-Based Maintenance
HAZOP	Poikkeamatarkastelu: Hazard and Operability Study
VVA	Vika- ja vaikutusanalyysi: Fault Modes and Effects Analysis
VPA	Vikapuuanalyysi
TPA	Tapahtumapuuanalyysi
BN	Bayesin verkkomalli: Bayesian network modeling

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	10
1.1	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus	10
1.2	Tutkimuksen toteutus	11
1.3	Koskisen Oy	12
1.4	Raportin rakenne	13
2	Kunnossapito	14
2.1	Kunnossapidon tavoitteet	15
2.1.1	Tuotannon kokonaistehokkuus	15
2.1.2	Käyttövarmuus	16
2.2	Kunnossapitotoimien kehitys	17
2.3	Kunnossapitolajit.....	20
2.3.1	Korjaava kunnossapito.....	21
2.3.2	Jaksotettu kunnossapito	21
2.3.3	Parantava kunnossapito.....	22
2.4	Kunnossapitostrategiat	22
3	Vikaantuminen	26
3.1	Vikaantumisen syyt.....	27
3.2	Vikataajuus.....	29
3.3	Vikaantumisen eliminointi	30
4	Riskien hallinta.....	33
4.1	Riskianalyysi	35
4.1.1	Riskien tunnistaminen.....	36
4.1.2	Taajuusanalyysi	37
4.1.3	Seurausanalyysi	39
4.2	Riskianalyysityökalut.....	40

4.3	Riskimatriisi	43
5	Laitteiden kriittisyysluokittelu teollisuudessa – PSK 6800.....	46
5.1	Menetelmän kuvaus	47
5.2	Arviointikohteet ja painoarvot	49
5.3	Tuotannon painoarvokerroin.....	51
6	Tutkimuksen toteutus	54
6.1	Alustavat arviointikriteerit	55
6.2	PSK-testi 1	59
6.3	PSK-testi 2	66
6.4	Lopulliset arviointikriteerit	70
7	Tulokset.....	73
7.1	Arviointikriteereiden kertoimet.....	73
7.2	Kriittiset laitteet.....	76
7.3	Melko kriittiset laitteet	76
7.4	Vähän kriittiset laitteet	77
7.5	Ei kriittiset laitteet.....	78
8	Johtopäätökset	80
9	Yhteenveto.....	82
	Lähteet	84

Liitteet

Liite 1. Kriittisyyden laskentataulukko

Liite 2. Muokattu kriittisyyden laskentataulukko

Kuvaluettelo

Kuva 1. Tutkimuksen toteutuksen eri vaiheet

Kuva 2. Kunnossapidon kehitys

Kuva 3. Kunnossapitolajit (Muokattu: SFS-EN 13306 2010, s.13–14)

Kuva 4. Vikaantumisen eri vaiheet (Muokattu: Moubray 1997)

Kuva 5. Esimerkki vikaantumisen eri tasoista (Muokattu: Mikkonen 2009, s. 157)

Kuva 6. Ammekäyrä (Smith 2011, s. 21)

Kuva 7. "Korjauskierre" (Willmott 1994)

Kuva 8. Riskienhallintaprosessi (Muokattu: SFS-IEC 60300-3-9 2000, s. 28)

Kuva 9. Esimerkki riskimatriisista

Kuva 10. Kriittisyysluokittelun toteuttaminen (PSK 6800 2011, s. 3)

Kuva 11. Tuotannon vaikutuskertoimet (PSK 6800 2011, s. 5)

Kuva 12. Kriittisyysanalyysin arviointikriteerien testaus

Kuva 13. Kriittisyyden laskentataulukko (Testi 1: Ryhmä 1.)

Kuva 14. Kriittisyyden laskentataulukko (Testi 1: Ryhmä 2.)

Kuva 15. Kriittisyyden laskentataulukko (Testi 1: Ryhmä 2. muokattu)

Kuva 16. Kriittisyyden laskentataulukko (Testi 2: Ryhmä 1.)

Kuva 17. Kriittisyyden laskentataulukko (Testi 2: Ryhmä 2.)

Kuva 18. Kriittiset laitteet

Kuva 19. Melko kriittiset laitteet

Kuva 20. Vähän kriittiset laitteet

Kuva 21. Ei kriittiset laitteet

Taulukkoluetelo

Taulukko 1. Yleisimmät riskianalyysityökalut

Taulukko 2. Esimerkki PSK 6800 kriittisyysanalyysin käytöstä (PSK 6800 2011, s. 7)

Taulukko 3. Esimerkki turvallisuusriskin asteikkojen muotoilusta ja laskemisesta

Taulukko 4. Laitteet luokiteltu kriittisyyden mukaan (Testi 1.)

Taulukko 5. Laitteet luokiteltu kriittisyyden mukaan (Testi 2.)

Taulukko 6. Vikaantumisvälien jakauma

Taulukko 7. Tuotannon menetysten jakauma

Taulukko 8. Laatukustannusten jakauma

Taulukko 9. Ympäristöriskien jakauma

1 Johdanto

Kunnossapito on herättänyt tutkimuksissa suurta kiinnostusta sen tuotannolle tuoman lisäarvon takia. Todellisuudessa monessa tuotantolaitoksessa kunnossapito on jäänyt 1900-luvulle ja sieltä ei löydetä reittiä pois. Kunnossapidon kehittäminen on työläs prosessi ja välivaiheita halutaan ohittaa. Usein sovelletaan vaativia strategioita, kun halutaan nopeasti korjata kaikki kerralla. Tutkimusten tasolla strategiat vaikuttavat toimivilta, mutta ne ovat työläitä toteuttaa ja vaativat kunnossapidolta todella paljon. Kun nopeita tuloksia ei synny, strategia unohdetaan ja palataan takaisin vanhoihin toimintamalleihin.

Laitteiden kunnossapidon taloudellinen merkitys on suuri. Kunnossapitotyöt ja niissä käytetyt varaosat ja uudet komponentit ovat yritykselle merkittävä kustannus. Kuitenkin suuremmat kustannukset syntyvät, kun laitteet ja tuotantoprosessit eivät ole vikaantumisen seurauksena toiminnassa tai käyvät vajaalla kapasiteetilla. Kunnossapidon tärkein tehtävä onkin varmistaa tuotannon jatkuvuus. Tuotantoyrityksen kilpailukyky edellyttää lyhyitä läpäisyajoja ja suurta toimitusvarmuutta. Laitteiden halutaan toimivan nopeammin, pidempään ja tuotannon seisokit halutaan minimoida. Tästä syystä on tärkeää tietää millaisia kunnossapidon strategioita eri laitteisiin tulisi soveltaa niiden kriittisyyden perusteella. Laitteiden kriittisyys on tärkeää tietää myös varaosien hallinnan takia. Varaosien saatavuus voi vaihdella päivistä kuukausiin. Kriittinen linja ei voi seistä kuukausia odottaen varaosaa. Lisäksi varaosat saattavat olla varastoituna päivistä laitteen elinkaaren loppuun saakka, joten kaikille laitteille ei voida varastoida jokaista varaosaa. Laitteiden kriittisyydet tiedettäessä, kriittisten varaosien saatavuus pystytään varmistamaan.

1.1 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus

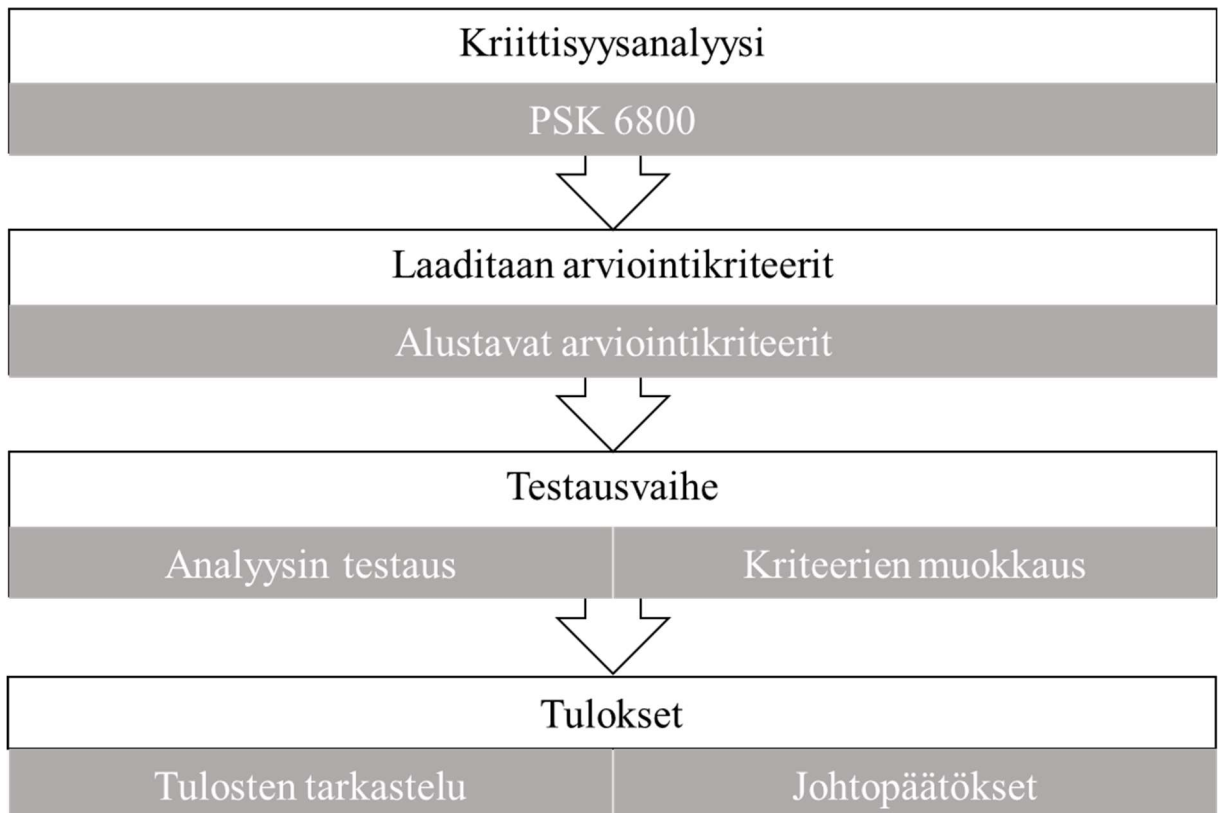
Tutkimuksen tavoitteena on kehittää puuteollisuuden tuotantolaitokseen kriittisyysanalyysi. Kriittisyysanalyysin avulla löydetään tuotannon kannalta kriittiset laitteet ja niiden kunnossapito-ohjelmia voidaan tarvittaessa kehittää. Lisäksi analyysin avulla kehitystoimenpiteet, investointihankkeet sekä merkittävimmät kunnossapitotoimet on mahdollista keskittää

kriittisille laitteille ja saada säästöjä muiden laitteiden osalta. Analyysissä saadaan selville kriittisten laitteiden suurimmat riskit tuotantovaikutusten-, kunnossapidettävyyden-, ympäristövaikutusten- ja turvallisuusvaikutusten osalta, joka helpottaa myös tuotannon suunnittelua, kun kriittisyystekijät tunnetaan tarkasti.

Tutkimus rajataan kriittisyysanalyysin kehittämiseen, jota testataan tuotantolaitoksen kriittisimmälle linjalle. Kriittisyysluokittelua ei jatketa muualle tuotantolaitokseen. Kriittisille laitteille annetaan jatkotoimenpide-ehdotukset, mutta jatkotoimenpiteitä ei suoriteta. Varaosien hallinta ja varaosien kriittisyyden määrittely rajataan työstä pois aiheen laajuuden takia ja koska siihen ei olla vielä valmiita. Myöskään järjestelmän tarkasteluun ei mennä, koska se ei tuo lisäarvoa tutkimukselle.

1.2 Tutkimuksen toteutus

Tutkimuksen keskeisimpinä lähteinä olivat prosessiteollisuuden standardoimiskeskuksen (PSK) ja Suomen standardisoimisliiton (SFS) standardit. Standardien tueksi etsittiin artikkeleista ja kirjoista eriäviä ja tukevia lähteitä. Diplomityö aloitettiin selvittämällä laitteiden kriittisyysluokitteluun soveltuvia menetelmiä. Koskisen Oy:n kanssa päätettiin edetä PSK 6800 standardin kanssa, jolla laitteiden kriittisyyttä arvioidaan matemaattisen laskentakaaavan avulla. Menetelmä oli ennalta tuttu ja tuotantolaitoksen tarpeisiin sopivin menetelmä. Menetelmää ei ollut ennen käytetty puuteollisuuden tuotantolaitoksessa ja tutkimukset PSK 6800 standardin muokattavuuteen liittyen ovat olleet puutteellisia. Kriittisyysanalyysin testausvaiheeseen ei ole panostettu, vaan on edetty suoraan luokittelemaan laitteita. Tästä syystä diplomityössä keskityttiin erityisesti kriittisyysanalyysin muokkaamisprosessiin ja tuloksena saataviin lopullisiin arviointikriteereihin. Kuvassa 1 esitetään työn toteutuksen eri vaiheet.



Kuva 1. Tutkimuksen toteutuksen eri vaiheet

Tutkimus aloitettiin laatimalla kriittisyysanalyysin alustavat arviointikriteerit ja painoarvot. Tämän jälkeen siirryttiin testausvaiheeseen. Testit suoritettiin laajalla otannalla lähettämällä kriittisyysanalyysi tarkkojen ohjeiden kanssa testiporukalle. Testien välissä suoritettiin tulosten tarkastelu pienemmällä porukalla, jossa käytiin läpi tulokset ja kehitysehdotukset. Arviointikriteerejä muokattiin testissä ja palaverissa heränneiden kehitysehdotuksien perusteella. Testivaihe toistettiin tarpeen mukaan kaksi kertaa, kunnes arviointikriteereihin ja painoarvoihin oltiin Koskisella tyytyväisiä. Tuloksena saatiin lopulliset arviointikriteerit ja linjan laitteet luokiteltuna kriittisyyden mukaan.

1.3 Koskisen Oy

Koskisen Oy on yli satavuotias puunjalostuksen perheyrittäjä. Koskisella on kolme eri tuotantolaitosta: Lastun- ja vanerin tuotantolaitos, sahan tuotantolaitos ja ohutvanerin ja viilun tuotantolaitos. Koskisen Oy:n tuotantolaitoksiin ei ole ennen suoritettu kriittisyysanalyysia ja näin ollen ei tiedetä, mitkä laitteet ovat tuotantolinjojen kriittisimpiä. Tuotantolaitoksien

tuotantomäärien kasvaessa ja laitteiden käyttöasteiden noustessa, on tullut aiheelliseksi suorittaa kriittisyysluokittelua. Tämä diplomityö suoritetaan lastun- ja vanerin tuotantolaitoksen 6314 linjaan. Tutkimuksen tulosten perusteella Koskisen Oy voi suorittaa kriittisyysanalyysin kaikille tuotantolaitoksen laitteille. Kriittisyysanalyysia voidaan myös soveltaa muissa tuotantolaitoksissa. Tarvittaessa testausprosessi voidaan toistaa uudestaan muissa tuotantolaitoksissa, jos koetaan laitteiden arviointikriteerien muuttuvan merkittävästi. Lisäksi Koskisen Oy on rakentamassa uutta puunkäsittelylaitosta ja on tärkeää, että uudet laitteet pystytään heti alusta lähtien luokittelemaan kriittisyyden perusteella.

1.4 Raportin rakenne

Luvussa 2 käydään läpi kunnossapidon eri osa-alueita, koska pääosin laitteiden kriittisyysluokittelu on kunnossapidolle suunnattu työkalu. Kunnossapidon päätavoitteena on tuotannon jatkuvuus eli vikaantumisen ehkäiseminen ja korjaaminen, joka mahdollistetaan laitteille sovellettavilla kunnossapitostrategioilla. Luvussa 3 tarkastellaan vikaantumista, jonka pääpainona on vikaantumisen syyt ja miten vikaantuminen voidaan eliminoida. Vikaantumisiin voidaan varautua riskien hallinnalla. Luvussa 4 käsitellään riskien hallintaa, joka koostuu vaarojen ja riskien tunnistamisesta eli riskianalyyseistä, johon löytyy erilaisia työkaluja. Riskianalyysijä ei voida kuitenkaan suorittaa kaikille laitteille ja siksi onkin tärkeää tietää tuotantolaitoksen kriittisimmät laitteet. Luvussa 5 tarkastellaan laitteiden kriittisyysanalyysijä teollisuudessa ja tarkemmin PSK 6800 standardia. Kriittisyysanalyysilla tunnistetaan tuotantolaitoksen kriittiset laitteet. Kriittisille laitteille voidaan suunnitella mahdolliset jatkotoimenpiteet: tarkemmat riskianalyysit, kriittiset varaosat ja uudistetut kunnossapitostrategiat.

2 Kunnossapito

Kunnossapito on kehittynyt vuosien saatossa, mutta lopullinen päämäärä on pysynyt samana eli varmistaa tuotannon jatkuvuus. Kunnossapidolle on olemassa erilaisia määritelmiä. Monet niistä ovat kaikenkattavia, mutta siirryttäessä käytäntöön esimerkiksi toimintasuunnitelmien laatiminen on vaikeaa standardien määritelmien perusteella. Tuotannon laitteista ja koneista käytetään myös monia eri määritelmiä, kuten kohde ja tuotannon välineet. ”Kunnossapito on kaikkien niiden teknisten, hallinnollisten ja johtamiseen liittyvien toimenpiteiden kokonaisuus, joiden tarkoituksena on säilyttää kohde tilassa tai palauttaa se tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon sen koko elinjakson aikana.” (PSK 6201 2011, s. 3) SFS-EN 13306 (2010, s. 5) mukaan kunnossapito kattaa kaikki kohteen elinjakson aikaiset tekniset, hallinnolliset ja liikkeenjohdolliset toimenpiteet, joiden tarkoituksena on ylläpitää tai palauttaa kohteen toimintakyky sellaiseksi, että kohde pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon. Lisäksi tekniset kunnossapidon toimenpiteet sisältävät kohteen tilan havainnoinnin, analysoinnin ja kunnossapidon aktiiviset toimenpiteet.

Simeu-Abazi & Sassine (2001) mukaan kunnossapidon päätarkoituksena on vähentää vikojen haitallisia vaikutuksia ja lisätä käytettävyyttä alhaisin kustannuksin suorituskyvyn lisäämiseksi ja luotettavuustason parantamiseksi. Dhillon (2002) määrittelee kunnossapidon kaikkina toimenpiteinä, jotka sopivat esineen/osan/laitteiston säilyttämiseksi tai palauttamiseksi tiettyyn tilaan. Moubray (1997) antaa käytännönläheisemmän ja yksityiskohtaisemman määritelmän kunnossapidolle. Hänen mukaansa kunnossapidon tavoitteena on tuotantovälineiden toiminnan varmistaminen koko niiden elinkaaren ajan. Valitaan ja käytetään kaikkein sopivimpia kunnossapidon menetelmiä, joilla hallitaan tuotantovälineiden vikaantumista ja vikaantumisen seurauksia. Varmistetaan omistajien, käyttäjien ja yhteiskunnan tyytyväisyys ja saadaan kaikkien kunnossapitoon vaikuttavien ihmisten aktiivinen tuki kunnossapidon toimille.

Tässä luvussa tarkastellaan kunnossapidon tavoitteita, kunnossapitolajeja, kunnossapitostrategioita ja miten kunnossapito on kehittynyt vuosien saatossa.

2.1 Kunnossapidon tavoitteet

Kunnossapito on avain laitteiden tehokkaan käytön ja tehokkaan tuotantoprosessin varmistamiseksi. Toistuvat viat tai toiminta huonossa kunnossa olevalla laitteella voi heikentää tuotteen laatua, lisätä energiankulutusta ja pienentää tuloja. Tästä syystä kunnossapidon tavoitteena ei ole vain korjata vikoja, vaan myös ennakoita ja estää tulonmenetyksiä johdon tasolla. Johtajien on analysoitava kaikki asiaankuuluvat tiedot arvioidakseen laitteiden kannattavuutta, tehdäkseen järkeviä investointipäätöksiä ja harkitakseen mahdollisia kustannussäästöjä. (Nguyen et al. 2013; Velmurugan & Dhingra 2015) Keskeisiä tavoitteita PSK 6201 (2011, s. 5) mukaan kunnossapidolle ovat korkea tuotannon kokonaistehokkuus (KNL) sekä käyttövarmuus. Laine (2010, s. 30) mukaan KNL on mittari, jota on seurattava jokaisessa tuotantolaitoksessa. Lisäksi merkittäviä tavoitteita ovat turvallisuus, ympäristön huomioiminen ja kustannustehokkuus.

2.1.1 Tuotannon kokonaistehokkuus

Kunnossapidon ulkoisista tavoitemuuttujista yksi tärkeimmistä on KNL, joka tulee englannin kielen lyhenteestä OEE (Overall Equipment Effectiveness). Ulkoisilla tavoitemuuttujilla tarkoitetaan liiketoimintalähtöisiä tunnuslukuja. KNL:n lisäksi ulkoisia tavoite muuttujia ovat esimerkiksi pääoman tuottoaste ja tuotteen elinkaarikustannukset. (PSK 7501 2010, s. 27) KNL on kolmen alla määritellyn osatekijän käytettävyyden (K), toiminta-asteen (N) ja laatukertoimen (L) tulo. (PSK 6201 2011, s. 8–9)

Käytettävyys määrittää tietyn ajanjaksona, sen ajan prosentuaalisen osuuden, jolloin kohde kykenee suorittamaan vaaditun toiminnon. Käytettävyys ei sisällä toiminta-asteeseen eikä laatuun liittyviä häviöitä. (SFS-EN 13306 2010, s. 8) Käytettävyyden laskentaan voidaan käyttää seuraavaa kaavaa:

$$K = \frac{\text{Käyntiaika}}{\text{Käyntiaika} + \text{Seisokkiaika}} \quad (1)$$

Toiminta-aste on toteutuneen tuotantomäärän suhde maksimituotantomäärään käyntiaikana. (PSK 6201 2011, s. 8) Toiminta-asteen laskentaan voidaan käyttää seuraavaa kaavaa:

$$N = \frac{\textit{Tuotanto}}{\textit{Nimellistuotantokyky} \times \textit{Käyntiaika (Tuotantoaika)}} \quad (2)$$

Laatukerroin määrittää myynti- tai jatkojalostuskelpoisen tuotannon osuuden kokonaistuotantomäärästä. (PSK 6201 2011, s. 9) Laatukertoimen laskentaan voidaan käyttää seuraavaa kaavaa:

$$L = \frac{\textit{Tuotanto} - \textit{Hylätty tuotanto}}{\textit{Tuotanto}} \quad (3)$$

Täydellisessä tuotannossa tuotantolaitteet toimivat lakkaamatta. Laitteet käyvät täydellä nopeudella eikä laatuhäviöitä synny, jolloin KNL-luku on 100 %. Tutkimusten perusteella teollisuuden keskimääräinen KNL on noin 60 %. (Jain et al. 2015; Kwon & Lee 2004) Monissa tuotantoprosesseissa tuotantomääriä voidaan nostaa ilman merkittäviä investointeja 10–50 % kunnossa- ja käynnissäpitoa tehostamalla. KNL:n paraneminen merkitsee sitä, että samalla työvoimalla, samoilla laitteilla ja samalla työaikamuodolla saadaan enemmän myytävää tuotantoa ja parempaa laatua. (Laine 2010, s. 241)

2.1.2 Käyttövarmuus

Vaadittu käyttövarmuustaso vaihtelee liiketoiminnoittain. Käyttövarmuustavoite perustuu yrityksen tavoitteisiin. Käyttövarmuus ei ole pelkkää tekniikkaa, vaan tekijöillä on merkittävä rooli. Käyttövarmuus on kyky toimia vaadittaessa vaaditulla tavalla. Tämä tarkoittaa kohteen kykyä olla tilassa, jossa se kykenee suorittamaan vaaditun toiminnon tietyissä olosuhteissa olettaen, että vaadittavat ulkoiset resurssit ovat saatavilla. (PSK 6201 2011, s. 9) Vaadittu käyttövarmuustaso vaihtelee liiketoiminnoittain. Käyttövarmuustavoite perustuu

yrittäjien tavoitteisiin. Käyttövarmuus ei ole pelkkää tekniikkaa, vaan tekijöillä on merkittävä rooli. Käyttövarmuus voidaan jakaa kolmeen eri elementtiin:

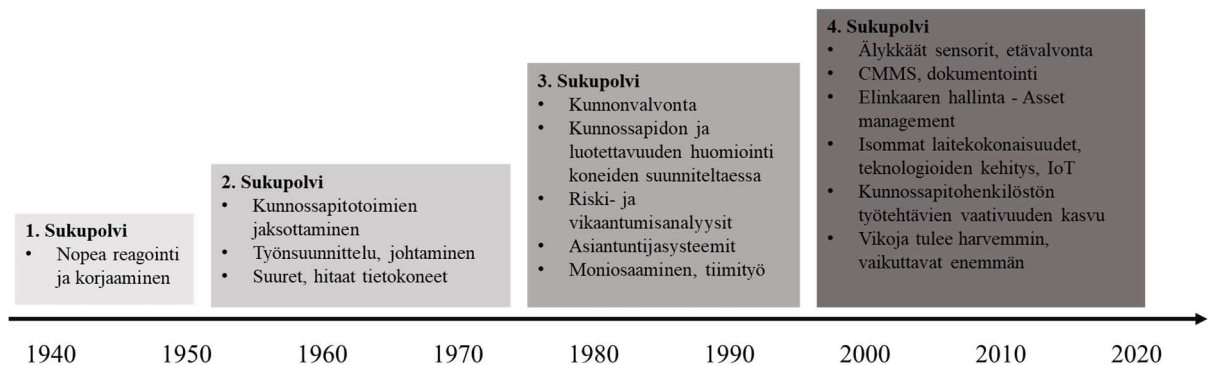
- Toimintavarmuus
- Kunnossapitovarmuus
- Kunnossapidettävyys

Toimintavarmuudella tarkoitetaan kohteen kykyä suorittaa vaadittu toiminto määrättyissä olosuhteissa vaaditun ajanjakson. Kunnossapitovarmuus kuvaa kunnossapito-organisaation kykyä suorittaa vaadittu tehtävä tehokkaasti määrättyissä olosuhteissa vaaditulla ajanhetkellä tai ajanjaksona. Kunnossapidettävyydellä tarkoitetaan kohteen kykyä olla pidettävissä tilassa tai palautettavissa tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon määritellyissä käyttöolosuhteissa, jos kunnossapito suoritetaan määritellyissä olosuhteissa käyttäen vaadittuja menetelmiä ja resursseja. (PSK 6201 2011, s. 9)

2.2 Kunnossapitotoimien kehitys

Viimeisien vuosikymmenien aikana teollinen kunnossapito on kehittynyt selviöstä strategiseksi ongelmaksi. Tänä aikana kunnossapidon rooli on muuttunut todella paljon. Aluksi kunnossapito oli vain väistämätön osa tuotantoa, nyt se on olennainen strateginen elementti liiketoiminnan tavoitteiden saavuttamiseksi. Nykyään kunnossapidon toimintoja ymmärretään ja arvostetaan organisaatioissa paremmin. Voidaan ajatella, että kunnossapidon johtamista ei enää pidetä turhana ja hidastavana toimintona, vaan sitä pidetään sisäisenä tai ulkoisena menestyksen kumppanina. (Kobbacy & Murthy 2008, s. 21) Kunnossapidossa tapahtuvien muutoksien takia Järviö & Lehtiö (2017) ehdottivat, että käsite kunnossapito korvattaisiin käsitteellä tuotanto-omaisuuden hoitaminen.

Kunnossapidon kehitys voidaan jakaa Järviö (2007, s. 19–20) mukaan neljään eri sukupolveen (Kuva 2):



Kuva 2. Kunnossapidon kehitys

Ensimmäisen sukupolven aikana koneita pystyttiin pitämään seisokissa ja koneet olivat yksinkertaisia. Koneet olivat ylimitoitettuja ja kestivät enemmän. Tämä johtui lukuisista varmuuskertoimista, joilla korjattiin mitoituksen laskennallinen epätarkkuus. Vikojen määrittäminen ja korjaaminen olivat helppoja toimenpiteitä. Ennakoiva kunnossapito rakentui pääasiassa puhdistamisesta, säätämisestä ja voiteluhuolloista. Tarvittava osaamistaso kunnossapidon henkilöstöltä oli matala.

Toinen sukupolvi käynnistyi toisen maailmansodan aikaan. Teollisuus joutui valmistamaan valtavia määriä sotatarvikkeita ja samaan aikaan kokeneet koneiden käyttäjät vietiin rintamalle. Osaamistaso vaihteli ja tuotantomäärät pyrittiin turvaamaan automaatiolla ja tuotantolinjojen pitkittämisellä. Monimutkaisemmat koneet toivat mukanaan paljon uusia vikoja, joka lisäsi kunnossapidon tarvetta ja hallittavuutta. Kilpailutilanteen jatkuva kiristyminen aiheutti sen, että yritysten kannattavuus riippui enemmän koneiden käytön tehokkuudesta. Tuloksena kehittyi ennakoiva kunnossapito, joka oli aluksi lähinnä jaksotettua huoltoa. Kun ehkäisevä kunnossapito tuli mukaan toimintaan, käsite kunnossapidon tehokkuudesta muuttui. Pää tavoitteena ei ollut enää korjata vikoja nopeasti, vaan estää vikojen syntyminen tehokkaasti (Kennedy et al. 2002). Kustannusten kasvaminen johti kunnossapidon suunnitteluun ja johtamiseen, joiden avulla pyrittiin pienentämään resurssien käytön kustannuksia siedettävälle tasolle ja lisäämään koneiden käytinvarmuutta.

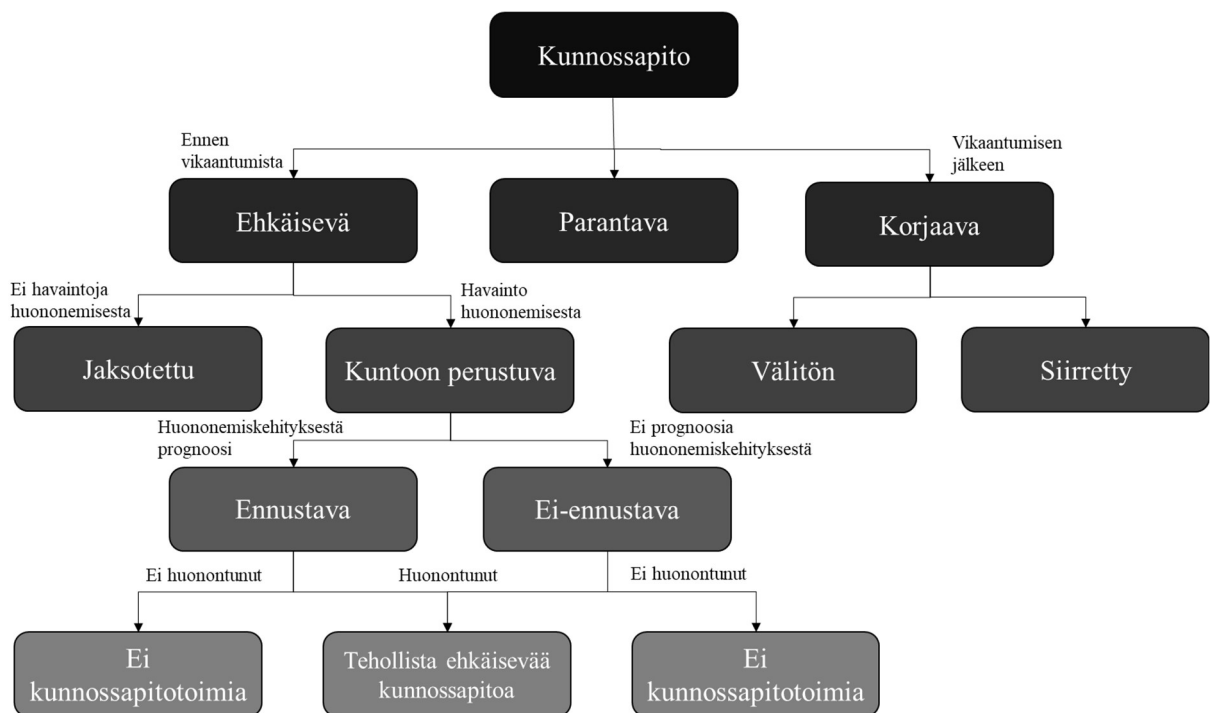
Kolmas sukupolvi käynnistyi 1970 luvulla, johtuen amerikkalaisten avaruusprojektien konseptien ja innovaatioiden käyttöönotosta teollisuudessa. Käyttövarmuusvaatimukset pystyttiin asettamaan uusille tasoille ja luotiin uusia lähestymistapoja, työkaluja ja tekniikoita kunnossapidolle. Uudet teknologiat muuttivat toiminnan painopistettä. Uusiutumiskyvystä ja uuden teknologian hallitsemisesta tuli kriittinen menestystekijä. Lisäksi kilpailu kiristyi ja muuttui maailmanlaajuiseksi. Tavaraa alettiin valmistamaan tilausta vastaan ja toimitusajat lyhenivät merkittävästi. Maailmankaupan vapautumisen ja globalisoitumisen myötä myös paikallisuuden merkitys kilpailutekijänä vähentyi. Tilalle nousivat laatu, osaaminen, edullinen hinta, ympäristöystävällisyys ja toimituslupausten pitäminen.

Neljäs ja käynnissä oleva sukupolvi alkoi 1990 luvulla mikroelektroniikan ja IT-teknologioiden läpimurron yhteydessä. Valmistusprosessien integraation ja automaation lisääntyminen on nostanut tuotantokoneiden hintoja. Tämän seurauksena puutekustannukset ovat kasvaneet suuremmiksi, kuin kunnossapidon korjauskustannukset. Uudet teknologiat, kuten elektroniikka, pneumatiikka, AI, sekä kompleksiset tuotantovälineet ovat muuttaneet kunnossapitäjien osaamisvaatimuksia, ja laitteiden etävalvonnan määrä on kasvanut. Kunnossapidon tietojärjestelmillä on saatu laitteen toimintaan liittyvä data hallintaan ja palvelemaan kunnossapitoa. Big datan ja siihen liittyvien teknologioiden odotetaan muuttavan radikaalisti tapaa, jolla teollista kunnossapitoa hallitaan. Kuitenkin tällä hetkellä monet yritykset keräävät suuria määriä tietoa tietämättä, kuinka järjestelmällisesti hyödyntää sitä (Marttonen-Arola 2022). Viimeisenä piirteenä nousee esiin verkostoitumisen merkitys toimittajien ja ulkoisien kunnossapitotoimien kanssa. Verkostoituminen on muuttanut toimintamalleja ja ajattelutapoja. Muutokset ovat tehostaneet toimintoja ja tuottavuutta merkittävästi. (Väänänen et al. 2003)

Vaikka on siirrytty jo neljänteen sukupolveen, vanhoja toimintatapoja ei olla unohdettu. IoT, AI ja big datan hyödyntäminen on monen yrityksen kohdalla vielä kaukana tulevaisuudessa. Monet kunnossapito-organisaatiot toimivat vielä Exceleiden ja Post It-lappujen varassa ja ovat kaukana kunnossapidon tuomasta lisäarvosta.

2.3 Kunnossapitolajit

”Kunnossapitolajit sisältävät toimenpiteitä, joilla saatetaan kohde haluttuun toimintakuntoon, todetaan kohteen toimintakunto, pidetään kohde halutussa toimintakunnossa, parannetaan kohteen käyttövarmuutta, tai jotka käyttävät kunnossapidon resursseja.” (PSK 6201 2011, s. 26) Kunnossapidon kehittymisen myötä on kunnossapitolajejakin tullut lisää. Kunnossapito voidaan jakaa kuvan 3 mukaisesti eri kunnossapitolajeihin ja niihin liittyviin toimenpidetyyppeihin.



Kuva 3. Kunnossapitolajit (Muokattu: SFS-EN 13306 2010, s.13–14)

Kunnossapitolajit jakautuvat korjaavaan kunnossapitoon (CM), ehkäisevään kunnossapitoon (PM) ja parantavaan kunnossapitoon. Seuraavissa luvuissa tarkastellaan kyseisiä kunnossapitolajeja ja niiden tarkentavia ominaispiirteitä.

2.3.1 Korjaava kunnossapito

”Korjaavaa kunnossapitoa (CM) tehdään vian tai muun poikkeaman havaitsemisen jälkeen tavoitteena palauttaa kohde tilaan, jossa se voi toteuttaa vaaditun toiminnon.” (PSK 6201 2011, s. 27) Korjaava kunnossapito jakaantuu välittömään- ja siirrettyyn korjaavaan kunnossapitoon. Siirretyllä korjaavalla kunnossapidolla tarkoitetaan kunnossapitotoimia, joita ei suoriteta heti vian havaitsemisen jälkeen, vaan viivästytetään ajan sallimissa puitteissa. Välitön korjaava kunnossapito suoritetaan heti vian havaitsemisen jälkeen, jotta vältetään haitallisilta seurauksilta. (SFS-EN 13306 2010, s. 15) Korjaava kunnossapito mahdollistaa kunnossapitotyövoiman ja laitteen ylläpitoon kulutetun rahan minimoimisen. Tämän lähestymistavan haittoja ovat arvaamaton ja vaihteleva tuotantokapasiteetti ja lisääntyneet kunnossapitokustannukset, kun joudutaan korjaamaan katastrofaalisia ennalta-arvaamattomia vikoja. (Swanson 2001)

2.3.2 Jaksotettu kunnossapito

”Jaksotettua kunnossapitoa tehdään ennalta määritettyjen aikajaksojen tai käytön määrän mukaan, mutta ilman edeltävää toimintakunnon tutkimusta. Jaksotetulla kunnossapidolla pyritään pienentämään vikaantumisen todennäköisyyttä tai hidastamaan kohteen toiminnan heikkenemisen etenemistä.” (PSK 6201 2011, s. 32) SFS-EN 13306 (2010, s. 13) käyttää jaksotetun kunnossapidon tilalla termiä ehkäisevä kunnossapito, jonka tarkoituksena on arvioida ja/tai vähentää kohteen heikentymistä ja vikaantumisen todennäköisyyttä. Ennakoiva kunnossapito perustuu arvioituun todennäköisyyteen, että laite vioittuu määritetyllä aikavälillä. Ennakkohuollot voivat olla laitteiden voitelua, osien vaihtoa, puhdistusta ja säätöä. Tuotantolaitteet voidaan myös tarkastaa ennakkohuoltojen yhteydessä mahdollisten kuluminen varalta. Ennakoivan kunnossapidon etuja ovat laitteiden rikkoutumisen todennäköisyyden pieneminen ja laitteiden käyttöiän pidentyminen. Ennaltaehkäisevän huollon haittana on tarve keskeyttää tuotanto määräajoin kunnossapitotöiden suorittamisen ajaksi. (Swanson 2001)

2.3.3 Parantava kunnossapito

”Kunnossapitoa, jonka tarkoituksena on parantaa kohteen toimintavarmuutta ja/tai kunnossapidettävyyttä ja/tai henkilö- ja ympäristöturvallisuutta muuttamatta kohteen vaadittua toimintoa.” (PSK 6201 2011, s. 32) SFS-EN 13306 (2010, s. 14) käyttää termiä parantaminen parantavan kunnossapidon sijasta, joka määritellään yhdistelmäksi kaikista teknisistä, hallinnollisista ja liikkeenjohdollisista toimenpiteistä, joilla on tarkoitus parantaa kohteen toimintavarmuutta ja/tai kunnossapidettävyyttä ja/tai turvallisuutta ilman, että alkuperäinen toiminto muuttuu.

2.4 Kunnossapitostrategiat

”Liikkeenjohdolliset keinot, joiden avulla saavutetaan kunnossapidon tavoitteet. Kunnossapitostrategian kautta määräytyvät kunnossapidon yleissuunnitelma, henkilöstöresurssit, kunnossapidon tilat ja välineet, laitteiston teknisen tiedon hallinta sekä kunnossapidon materiaalitoinnot.” (PSK 6201 2011, s. 16; SFS-EN 13306 2010, s. 5) Yksinkertaisimmillaan kunnossapitostrategia tarkoittaa sitä, miten kunnossapitotoimet priorisoidaan, aikataulutetaan ja toteutetaan. Strategian pitkän aikavälin tavoitteena on suunnata resurssit oikeisiin paikkoihin ja löytää toimiva tasapaino korjaavan, ennakoivan, mittauspohjaisen ja ennuste-pohjaisen kunnossapidon välillä. Esimerkiksi mitä tehdään itse, mitä ulkoistetaan ja huolto-toimintojen määrittely – ennakoiva/korjaava huolto.

Kirjallisuudessa kunnossapitostrategiaa ei ole tarkasti määritelty. Osa kirjoittajista määrittelee kunnossapitostrategian valinnaksi kuntoon perustuvan kunnossapidon (CBM) ja aikaperusteisen kunnossapidon (TBM) välillä. Kunnossapitostrategiaa voidaan tarkastella myös korjaavan kunnossapidon (CM), ennaltaehkäisevän kunnossapidon (PM) ja ennakoivan kunnossapidon (PDM) näkökulmasta. Joskus yllä olevaan luetteloon sisältyy myös uusia kunnossapitokonsepteja, kuten tuottava kunnossapito (TPM), luotettavuuskeskeinen ylläpito (RCM) tai riskiperusteinen kunnossapito (RBM). Käydään seuraavaksi läpi näitä kirjallisuudesta löytyviä kunnossapitostrategian määritelmiä ja merkityksiä.

Kelly (1997) mukaan kunnossapitostrategia on järjestelmällinen lähestymistapa tehtaiden ja laitteiden ylläpitoon, ja se vaihtelee tehtaasta toiseen. Strategia sisältää korjausten, vaihto- ja tarkastuspäätösten tunnistamisen, tutkimisen ja toteuttamisen, ja se koskee parhaan elinkaaren laatimista kullekin laitoksen yksikölle koordinoitusti tuotannon ja muiden asianomaisten toimintojen kanssa.

Pintelon & Gelders (1992) mukaan kunnossapitostrategia kuvaa, mitkä tapahtumat (esim. vika, ajan kuluminen, kunto) laukaisevat minkä tyyppisen huoltotoimenpiteen (tarkastus, korjaus tai vaihto). Näin ollen parhaan kestävän kunnossapitostrategian valinta riippuu useista tekijöistä, kuten esimerkiksi kunnossapidon tavoitteista, tehtaan tai huollettavan laitteen luonteesta, työnkulun fokuksista (prosessin fokus, tuotefokus) ja työympäristöstä. Dekker (1996) mukaan kunnossapitostrategia koostuu yhdistelmästä kunnossapidon toimintamalleja ja kunnossapitotekniikoita, jotka vaihtelevat tehtaasta toiseen.

Swanson (2001) esittää kolmenlaisia kunnossapitostrategioita, joissa yhdistellään eri kunnossapitolajeja:

- Reaktiivinen strategia (CM)
- Ennakoiva strategia (PM ja PDM)
- Aggressiivinen strategia (TPM)

Reaktiivisessa strategiassa laitteen annetaan käydä vikaantumiseen asti. Vikaantunut laite korjataan tai vaihdetaan uuteen. Reaktiivisen strategian toimet, kuten CM, palauttavat laitteen toimintakuntoon. Ennakoivassa strategiassa vikoja vältetään toimenpiteillä, jotka tarkkailevat laitteiden huononemista ja tekevät pieniä korjauksia laitteiden palauttamiseksi oikeaan kuntoon. Ennakoivan strategian toimet, mukaan lukien PM ja PDM, vähentävät odottamattomien laitevikojen todennäköisyyttä. Aggressiivisessa strategiassa mennään kohti kunnossapidon tuomaa lisäarvoa, eikä vain pyritä välttämään ja korjaamaan laitevikoja.

Aggressiivisen kunnossapitostrategian toimet, kuten TPM ja RCM, pyrkivät parantamaan laitteiden yleistä toimintaa.

Bevilacqua & Braglia (2000) pitävät jokaista kunnossapitolajia erillisenä strategiana. Gallimore & Penlesky 1988 puolestaan pitävät kunnossapitostrategiaa yhdistelmänä elementtejä, kuten kunnossapitolajeja, varalaitteita ja laitteiden päivityksiä. Tällä hetkellä yleisimmin tutkimuksissa esiin nousseet kunnossapitostrategiat (lähestymistavat/taktiikat) sisältävät RCM:n, TPM:n, yrityskeskeisen kunnossapidon (BCM), käyttöomaisuuden hallinnan (CAM) ja integroidun logistisen tuen (ILS). (Marcello et al. 2013; Nima et al. 2010) Kyseiset strategiat perustuvat kunnossapidon tuomaan lisäarvoon. Tutkimusten tasolla strategiat vaikuttavat toimivilta, mutta ne ovat työläitä toteuttaa ja vaativat kunnossapidolta todella paljon. Monessa tuotantolaitoksessa perusasiat ovat sillä mallilla, että niitä ei yksinkertaisesti voida tai ei ole järkevää soveltaa.

Pintelon et al. (2006) mukaan määritelmien suurin ongelma on, että ne keskittyvät vain muuttamaan kunnossapitostrategian useista osista. Tämä johtaa usein kunnossapitolajien yksinkertaistamiseen aivan kuten korjaavaan ja/tai ennaltaehkäisevään kunnossapitoon, jolloin jätetään huomioimatta kunnossapitolajien dynamiikka kokonaisuudessaan. Tämä voi olla yksi syy siihen, miksi yrityksen ylin johto jättää usein huomioimatta kunnossapidon pitäen sitä vain osana valmistuksen yleiskustannuksia.

Vaikka organisaatio noudattaa erilaisia kunnossapitostrategioita, laitteiden äkillisen vikaantumisen kustannukset ja vaikutukset ovat valtava ongelma organisaatioissa. Tämä liiketoimintaongelma johtaa Velmurugan & Dhingran (2015) osoittamiin tutkimuskysymyksiin liittyen kunnossapitostrategian muotoiluun ja valintaan:

- Miten soveltaa kunnossapitostrategioita kunnossapitotoiminnoissa?
- Miten valita laadittujen strategioiden joukosta paras kunnossapitostrategia ja kuinka toteuttaa strategiaa tehokkaasti?

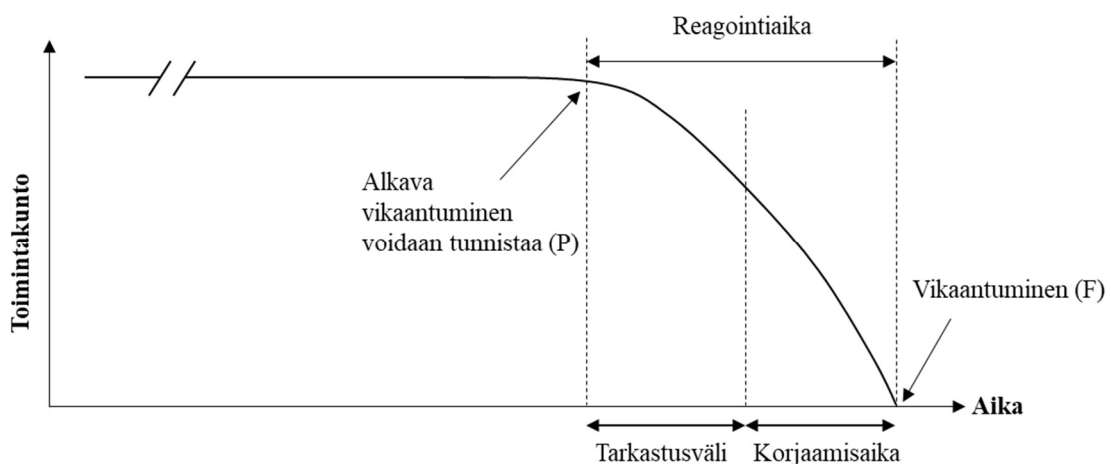
Nämä kysymykset pyörivät monen organisaation kunnossapitohenkilöstön mielessä. Vuosien saatossa kysymykset tulevat nousemaan esiin vielä enemmän kunnossapidon kehityksen myötä. Isommat kokonaisuudet yleistyvät ja prosessien hallinta yksinkertaistuu, mutta samalla linjat ja laitteet monimutkaistuvat. Tästä syystä koulutuksen ja tutkimuksen puutteet korostuvat ja joudutaan useammin turvautumaan ulkopuoliseen apuun. Kaukovalvonta tulee lisääntymään ja tuotannollisten yritysten on verkotuttava laite- ja palvelutoimittajien kanssa osaamisen varmistamiseksi. Etätyökalut (VR/AR, IOT jne.) helpottavat yritysten välistä verkottumista, mutta nostavat uuden ongelman liittyen kyberturvallisuuteen. Lisäksi monet tuotantolinjat tulevat myös elinkaarensa päähän ja organisaatioiden on otettava huomioon strategiassa elinkaarikustannukset ja lisäksi huomioitava kunnossapidon tuomat kustannukset uushankinnoissa.

Kunnossapitotoimien haastavuuden kasvaessa, myös laitteiden kriittisyysluokittelun merkitys kasvaa. Kun laitteet on kriittisyysluokiteltu, kunnossapitostrategia voidaan valita suoraan huollettavan laitteen kriittisyyden perusteella. Kunnossapitostrategian valinnasta tulee selkeää ja perusteltua. Esimerkiksi tuotannon kannalta kriittiselle moottorille suoritetaan ennaltaehkäisevä huolto joka vuosineljännes, moottorin kunnosta riippumatta. Tehtaan trukkien kohdalla voidaan toteuttaa korjaavaa strategiaa, koska niiden huoltotoimet eivät vaadi mitavia esivalmisteluja tai vie merkittävästi aikaa. Lisäksi yrityksellä on käytössä useampi trukki, joten yhden puuttuminen on helposti kompensoitavissa.

3 Vikaantuminen

Odottamattomat viat, niihin liittyvät seisokit, tuotannon menetys ja korkeammat kunnossapitokustannukset ovat suuria ongelmia missä tahansa prosessilaitoksessa. Vikaantumisesta syntyvät seuraukset voivat taloudellisten menetysten lisäksi aiheuttaa haittoja ympäristölle ja henkilöstön turvallisuudelle. (Krishnasamy et al. 2005)

Vikaantumisessa kohde menettää kyvyn suorittaa siltä vaaditun toiminnon (PSK 6201 2011, s. 17; SFS-EN 13306 2010, s. 10) Vikaantumisen ilmenemistä kutsutaan vikamuodoksi. Vikaantumisen tapahtuttua kohteessa on vika. Vikatilassa kohde ei pysty enää suorittamaan haluttua toimintoa lukuun ottamatta ehkäisevää kunnossapitoa, jotain muuta suunniteltua toimenpidettä tai ulkoisesta resurssienpuutteesta johtuvaa toimintakyvyttömyyttä. (PSK 6201 2011, s. 17) Koneiden ja laitteiden vikaantumisen eri vaiheita kuvataan usein PF-käyrällä. Käyrällä P tarkoittaa pistettä, jossa vikaantuminen alkaa ja F sitä pistettä, jossa kohde on vikaantunut. Kuvassa 4 esitetään tyypillinen PF käyrä.



Kuva 4. Vikaantumisen eri vaiheet (Muokattu: Moubray 1997)

Vika kehittyy näkymättömänä taustalla ja jonkin ajan kuluttua vika alkaa oireilla. Oireillessaan vika vaikeuttaa kohteen toimintaa, mutta ei estä sitä. Vian oirehtimisaika vaihtelee

mekanismista riippuen kymmenistä vuosista sekunnin murto-osiin. Jos vian oirehtimisaika on riittävän hidasta, jää vian tunnistamisen ja vikaantumisen väliin tarpeeksi reagointiaikaa suunnitella korjaavat toimenpiteet. (Moubray 1997) Jatkossa vikaantumisesta saatavaa dataa voidaan hyödyntää ennakkohuoltosuunnitelmia tehdessä, jos kyseessä on kulumisesta johtuva vika.

Tässä luvussa tarkastellaan vikaantumisen syitä, vikataajuutta eli kuinka usein vikoja syntyy ja miten vikaantumista voidaan eliminoida.

3.1 Vikaantumisen syyt

Vikaantuminen on väistämätön ilmiö prosessiteollisuudessa ja tästä syystä vaativien vikojen, ja luotettavuuden ennakoiminen on noussut johdolle tärkeään rooliin (Zio 2007). Nakajima (1989) mukaan vikaantumiseen on olemassa viisi pääsyytä:

- Laitteita ei käytetä oikealla tavalla. Oikeita tapoja ei tunneta tai suhtautuminen on väärä. Laitteiden käyttäjät havaitsevat vikoja, mutta eivät ryhdy toimenpiteisiin, koska laitteen käyttäjän toimenkuvaan ei kuulu korjaaminen. Vikojen raportointi saattaa olla työlästä ja osaaminen huonoa
- Käyttäjien ja kunnossapitäjien ammattitaito on liian vajavainen. Tarkastuksissa ei huomata oirehtivia vikoja, vaan oireet tulkitaan väärin sekä laitetta saatetaan käyttää ja kunnossapitäää väärin. Yleensä väärinkäyttö on tahatonta, joten sitä on vaikea huomata
- Laitteiden ikääntymisestä johtuvaa toimintakyvyn heikkenemistä ei havaita, korjata tai se hyväksytään
- Laitteen käyttöolosuhteet eivät ole optimaaliset, kuten esimerkiksi lika saattaa aiheuttaa lämpenemistä tai pienentää liikeratoja
- Laitteen suunnittelussa ei ole huomioitu todellista käyttöä tai käyttöolosuhteita

Laitteen toiminnan luotettavuutta voidaan parantaa tarttumalla kiinni vikaantumisen syihin. Vikaantumisen syiden selvittäminen on usein vaikeaa ja toiminta saattaa olla painottunut korjausten tekemiseen, eikä ammattitaito ja aika riitä lopullisen syyn selvittämiseen. Usein vikaa ei tulkita oikein ja niitä pidetään luonnollisina vanhenemiseen liittyvinä ilmiöinä ja hyväksytään sellaisenaan. (Järviö 2007, s. 61) Tästä syystä on tärkeää tietää, millä tasolla vikaantumisen syitä tarkastellaan. Kuvassa 5 on esitetty pumppuryhmän eri vioittumistasoja. Esimerkistä huomataan, että vikatasojen määrä kasvaa, mitä syvemmälle vaikutuksissa edetään, mutta samalla informaation ja työn määrä kasvaa. Tulee löytää taso, jolla vikaantumisen syyt voidaan tunnistaa riittävällä tarkkuudella oikean kunnonvalvontastrategian valitsemiseksi.



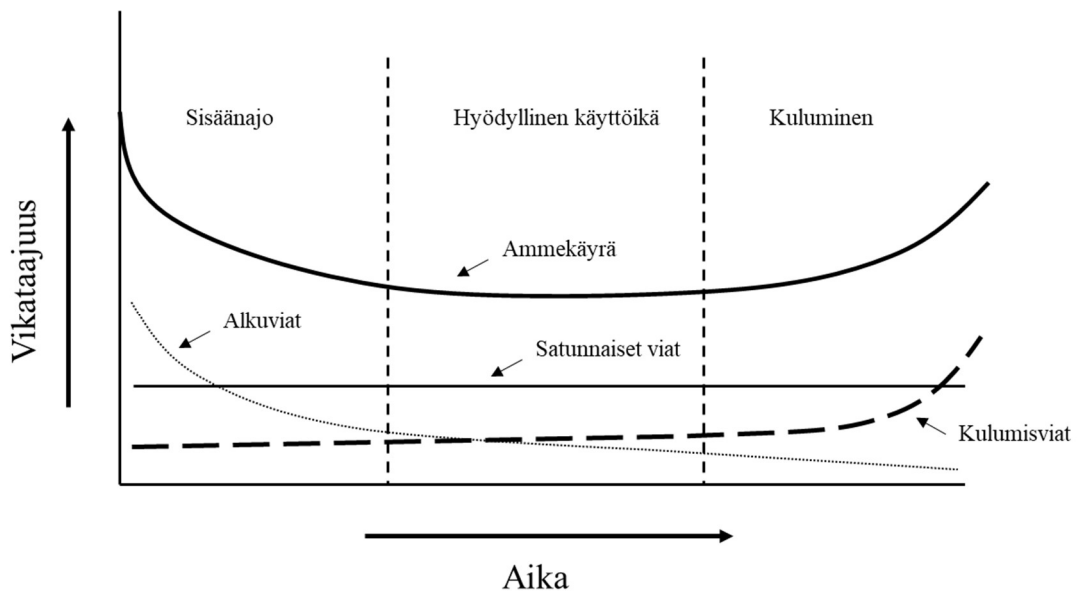
Kuva 5. Esimerkki vikaantumisen eri tasoista (Muokattu: Mikkonen 2009, s. 157)

Käytännössä sopivan informaatiotason määrittely on erittäin vaikeaa. Liian vähäinen informaatio johtaa pinnalliseen analyysiin, mutta analyysin jatkaminen liian pitkälle johtaa tasolle, johon ei voida enää vaikuttaa. Oikean tason löytämiseen tarvitaan laitteen ja sen

toiminnan hyvää tuntemusta. Yleisesti voidaan sanoa, että yksityiskohtaisempaa tasojen tarkastelua tarvitaan kohteissa, joissa edellytetään ennakoivaa kunnossapitoa ja karkeampi tarkastelu riittää kohteissa, joissa sovelletaan korjaavaa kunnossapitoa. (Mikkonen 2009, s. 156) Tästä voidaan johtaa myös päätelmä, että yksityiskohtaisempaa tasojen tarkastelua tarvitaan kriittisten laitteiden kohdalla ja ei-kriittisten laitteiden kohdalla riittää karkea tarkastelu.

3.2 Vikataajuus

Vikataajuus kuvaa järjestelmän keskimääräistä vikatiheyttä eli kuinka usein vikoja esiintyy. (Järviö 2004, s. 34) Vikataajuuden kuvaajana käytetään yleisesti ammekäyrää, joka havainnollistaa järjestelmän vikataajuutta eri elinkaaren vaiheissa (Kuva 6). Ammekäyrä itsessään ei riitä kuvaamaan käsitystä vikaantumisesta. Ammekäyrän lisäksi kuvaan on otettu Nolan & Heap (1978) tutkimuksessa löytämistä vikaantumismalleista alkuviat, satunnaiset viat ja kulumisviat.

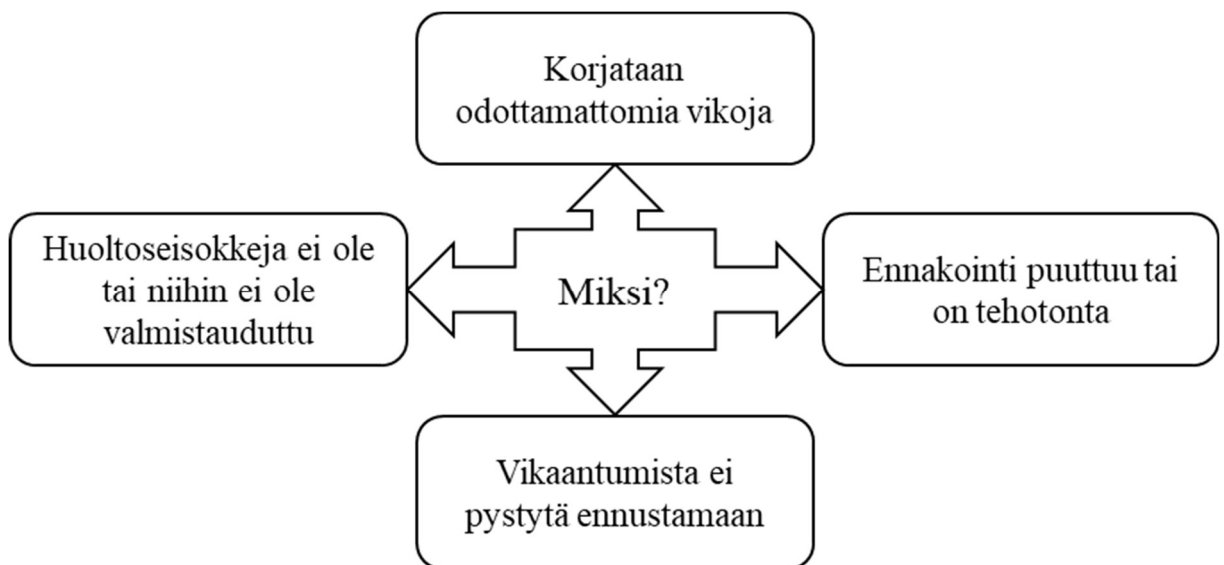


Kuva 6. Ammekäyrä (Smith 2011, s. 21)

Järjestelmän tai sen osan vikaantumiskäyttäytyminen muuttuu sen elinkaaren eri vaiheissa. Elinkaaren alussa järjestelmän vikaantumiselle on ominaista sisäänajossa ilmenevät ongelmat, kuten esimerkiksi suunnittelussa, valmistuksessa ja asennuksessa tehdyt virheet. Kun aikaa kuluu, vikaantumiskäyrä vakiintuu hyödyllisen käyttöiän tasolle. Hyödyllisen käyttöiän alueella oletetaan, että vioilla on vakio vikataajuus. Alueella vikaantuminen johtuu pääsääntöisesti satunnaisista käyttö- ja kunnossapitovirheistä ja lievistä kulumisista. Elinkaaren viimeisessä vaiheessa ammekäyrän kasvu johtuu vanhenemisesta aiheutuvista toistuvista kulumisista, jotka häiritsevät järjestelmän toimintaa. (Smith 2011; Bertsche 2008; Stapelberg 2009)

3.3 Vikaantumisen eliminointi

Lähtökohta vikaantumisen eliminoinnille on, että kaikki viat ovat seurausta muutoksista, joita tapahtuu ikääntymisen myötä laitetta käytettäessä. Muutosten havaitseminen jää usein tekemättä. Syynä voi olla esimerkiksi vajaatehoinen tarkastus, koneen rakenteen heikko huoltoystävällisyys ja koneen likaisuus. Toinen syykategoria on vikoihin sopeutuminen. Vikoihin saatetaan tottua ja ne hyväksytään osana normaalia toimintaa, vikojen vaikutus aliarvioidaan tai vikoja ei pidetä tärkeinä. Korjaavan kunnossapidon hallitsevaa roolia havainnollistetaan kuvassa 7.



Kuva 7. "Korjauskierre" (Willmott 1994)

Teollisuudessa voi olla todella haastavaa välttää vikaantumisia. Tästä syystä edelleen joudutaan turvautumaan korjaavaan kunnossapitoon. Ennakointia ei pystytä tekemään, koska data on puutteellista ja historiatietoja ei ole dokumentoitu. Datan puutteen takia huolto-oseisokkeja on vaikea suunnitella etukäteen ja joudutaan turvautumaan toimintatapaan, että mitä löytyy, kun kone ”avataan”. Tästä syystä myös vikaantumista ei pystytä ennustamaan ja joudutaan korjaamaan odottamattomia vikoja. Pyrittäessä vikaantumattomaan käyntiin Järviö (2007, s. 67) ehdottaa seuraavia lähestymistapoja:

- Pidetään kone kunnossa eli puhtaana. Kone putsataan säännöllisin väliajoin, voidellaan oikein ja kaikki osat ovat asianmukaisessa kunnossa
- Pidetään koneen toimintaedellytykset kunnossa, kuten esimerkiksi toimintalämpötilat, energian puhtaus (paineilma, hydraulikkaöljyt) ja koneen ympäristön siisteys
- Seurataan koneen tehoja ja kompensoidaan toimintakyvyn heikkeneminen. Usein koneen osia vaihdetaan korjaamisen yhteydessä. Jokainen käyttötunti kuitenkin aiheuttaa kulumista eli koneen kunnan muutosta epäedulliseen suuntaan
- Parannetaan koneen rakennetta esimerkiksi muuttamalla konetta käyttäjä tai huoltoystävällisemmäksi sekä korjaamalla suunnitteluvirheet
- Koulutetaan koneen käyttäjiä ja kunnossapitäjiä. Suurin osa vikaantumisista, johtuu koneen tahattomasta väärinkäytöstä. Asioita ei voi tehdä oikein, jos oikeaa tapaa ei tunneta

Kunnossapitostrategioiden tapaan kaikkia lähestymistapoja on mahdotonta soveltaa ja se ei ole järkevää saavutetun hyödyn perusteella. Lähestymistavat ovat verrannollisia kunnossapitostrategioihin, mutta ne antavat laajemman ja ympäripyöreämmän lähestymistavan kunnossapitotoimien suorittamiseen ja kehittämiseen.

Vikaantumiseen vaikuttaminen ei välttämättä vaadi vaativia kunnossapitostrategioita ja merkittäviä resursseja, vaan yleisellä siisteydellä ja säännöllisillä huolloilla päästään jo pitkälle.

Willmott (2000) on projekteissaan havainnut, että pienelläkin vaivalla pystytään vaikuttamaan vikaantumiseen ehkäisyyn:

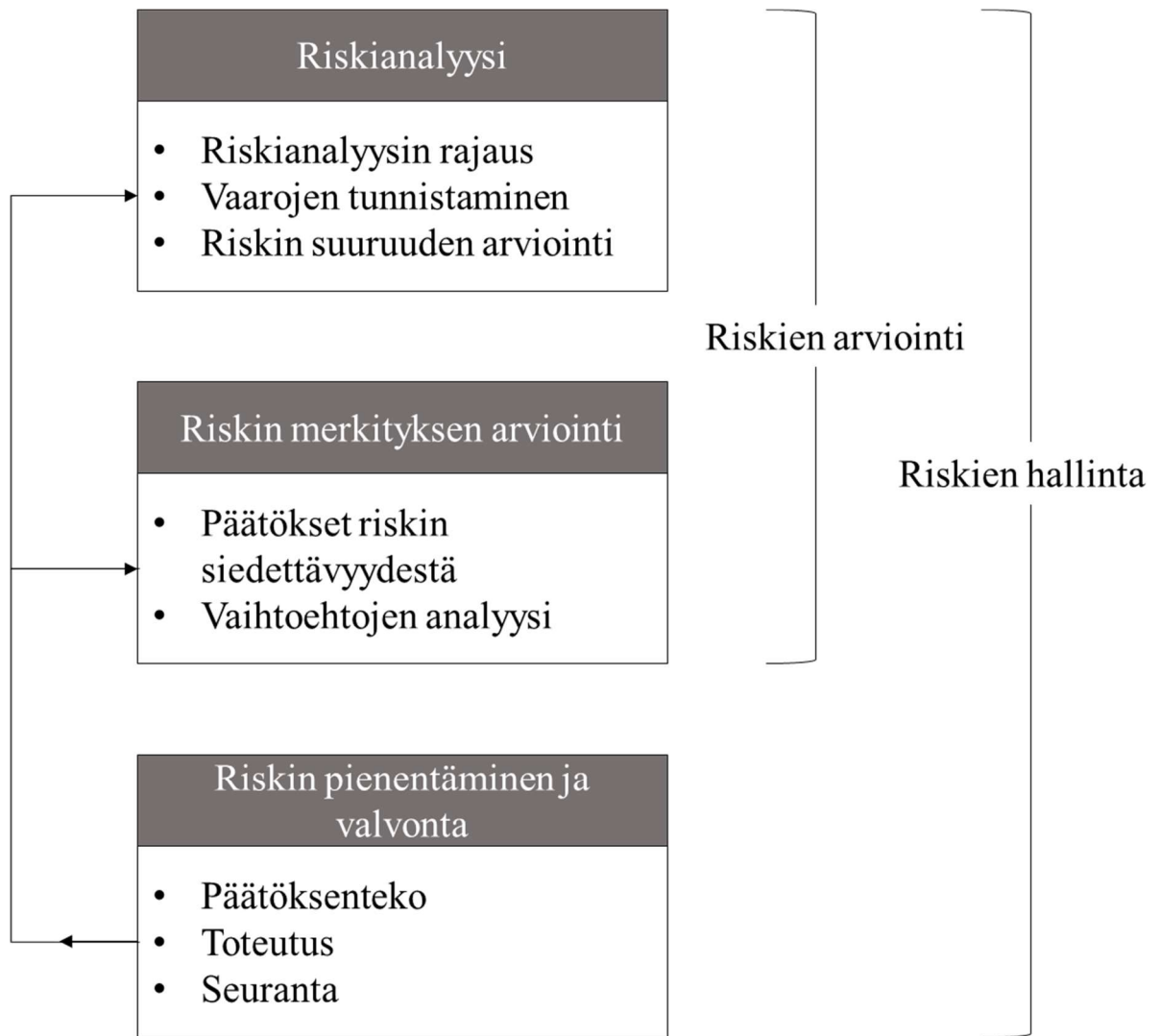
- 15 % vioista voidaan ehkäistä korjaamalla koneen rakenteita ja komponenttien luotettavuutta
- 25 % vioista voidaan ehkäistä toimivalla ennakkohuolto-ohjelmalla ja kunnonvalvonnalla
- 20 % vioista voidaan ehkäistä asianmukaisella, päivittäisellä tarkastuskäytännöllä sekä käyttämällä koneita oikein
- 40 % vioista voidaan ehkäistä pitämällä koneen toimintaympäristö ja -olosuhteet asianmukaisina

Listasta nousee esiin koneen toimintaympäristön ja -olosuhteiden suuri merkitys vikojen määrään. Koneiden siisteydellä voidaan teollisuudessa pudottaa vikaantumista 40 %. Kyseessä ei ole kuitenkaan suuri oivallus, vaan se voidaan saavuttaa normaalissa teollisuuden toimintaympäristössä. Siisteyden saavuttaminen teollisuuden tuotantolaitoksessa ei ole kuitenkaan helppoa ja se vaatii sitoutumista koko henkilökunnalta.

4 Riskien hallinta

Riskien hallinta on johtamisperiaatteiden, menettelytapojen ja käytäntöjen järjestelmällistä hyödyntämistä riskien analysoimiseksi, merkityksen arvioimiseksi ja valvomiseksi (SFS-IEC 60300-3-9 2000, s. 10). Riskienhallinnan päätavoitteena on minimoida suurten vikojen ja onnettomuuksien esiintyminen vähentämällä niiden esiintymisen todennäköisyyttä, vähentää hallitsemattomien vikatapahtumien ja onnettomuuksien vaikutuksia ja siirtää riskiä (Modarres et al. 2017).

Riskienhallintaprosessi liittää yhteen monia eri elementtejä riskin alustavasta tunnistamisesta ja analysoinnista riskin siedettävyyden arviointiin. Lisäksi se auttaa mahdollisten riskiä pienentävien ratkaisujen tunnistamisessa, tarkoituksenmukaisten valvonta- ja parannustoimenpiteiden valinnassa, toteuttamisessa ja seurannassa. Riskienhallintaprosessia selvennetään kuvassa 8.



Kuva 8. Riskienhallintaprosessi (Muokattu: SFS-IEC 60300-3-9 2000, s. 28)

Prosessiteollisuuden riskinarviointimenetelmiä on monia. Vaikka perinteisillä riskinarviointimenetelmillä on ollut tärkeä rooli suurten riskien tunnistamisessa ja turvallisuuden ylläpitämisessä prosessilaitoksissa, niiden haittana on, että ne ovat staattisia ja käyttävät yleisiä vikatietoja. (Meel & Seider 2006; Shalev & Tiran 2007) Edellä mainittu riskinhallintaprosessi toimii hyvänä viitekehyksenä, jotta staattisuudelta vältytään. Dynaaminen riskienhallinta pystyy ottamaan huomioon kaikki uudet tiedot ja mukautumaan dynaamiseen ympäristöön, joka on hallitseva prosessiteollisuuden riski- ja turvallisuusanalyysissä.

Tässä luvussa tarkastellaan riskianalyysin elementtejä, eri riskianalyysityökaluja ja riskimatriisin hyödyntämistä riskien hallinnassa.

4.1 Riskianalyysi

Vikaantumisesta aiheutuvaa riskin suuruutta voidaan arvioida eri riskianalyyseillä. Riskin suuruudella tarkoitetaan vikaantumisen vaikutusta ja todennäköisyyttä. Riskianalyysi on tehokas työkalu tapaturmia ehkäisevien strategioiden kehittämiseen ja lieventämistoimenpiteiden suunnitteluun (Bhandari et al. 2015; Zio 2007). Riskianalyysin kohteena voi olla laite, tuote, suorite, tai palvelu kokonaisuutena tai jokin niiden osa tai toiminto. Riskianalyysijä on kvantitatiivisia ja kvalitatiivisia. Kvalitatiivinen lähestymistapa on yleisimmin käytetty ja sen tulokset toimivat perustana kvantitatiiviselle tarkastelulle. (Plummer 2007) Tämä johtuu siitä, että aina ei ole tarkoituksenmukaista tehdä kaikista riskeistä yksityiskohtaista kvantitatiivista taajuus- ja seurausanalyysiä. Stapelberg (2009, s. 530–531) jakaa riskit kolmeen eri kategoriaan:

- Sietämätön riski
- Siedettävä riski
- Merkityksetön riski

Sietämättömät riskit eivät ole hyväksyttäviä missään tilanteessa. Kyseessä voi olla esimerkiksi riski, joka vaikuttaa vakavasti työntekijöiden työterveyteen ja -turvallisuuteen. Siedettävää riskejä taas pidetään hyväksyttävänä. Siedettävän riskin saavuttamiseksi on suoritettu riskiä alentavia toimenpiteitä. Sietämättömän riskin muokkaaminen siedettäväksi tarjoaa joi-tain hyötyjä esimerkiksi säästettyinä kustannuksina, kun onnettomuus tai loukkaantuminen saadaan ennaltaehkäistyä. Vähäiset riskit katsotaan niin pieniksi, että ennaltaehkäiseviä toimenpiteitä ei tarvita.

Ennen kuin riski voidaan hallita tehokkaasti, riski on analysoitava. Riskianalyysi on hyödyllinen työkalu riskien ja niiden hallintaratkaisuihin liittyvien lähestymistapojen tunnistamiseen. Lisäksi riskianalyysi tarjoaa objektiivista tietoa päätöksenteolle ja lainsäädännön

vaatimusten täyttämiseen. Riskianalyysi on jäsenelty prosessi, jonka tavoitteena on tunnistaa tarkasteltavasta toiminnasta, laitteistosta tai järjestelmästä johtuvien haitallisten seurausten todennäköisyys ja laajuus (SFS-IEC 60300-3-9 2000, s. 6; Modarres et al. 2017). Riskianalyysi pyrkii vastaamaan seuraavaan kolmeen kysymykseen:

- Mikä voi mennä väärin (riskien tunnistaminen)?
- Mikä on sen todennäköisyys (taajuusanalyysi)?
- Mitkä ovat sen seuraukset (seurausanalyysi)?

Riskianalyysin kokonaistavoite on tarjota rationaalinen perusta riskiä koskeville päätöksille. Päätökset voidaan tehdä osana laajempaa riskien hallintaprosessia vertaamalla riskianalyysin tuloksia siedettävän riskin kriteereihin. Monissa tilanteissa on tarve arvioida hyötyjä tapauskohtaisesti tasapainoisen päätöksen tekemiseksi. Siedettävän riskin kriteereihin liittyvä aihepiiri on hyvin monimutkainen pitäen sisällään yhteiskunnallisia, taloudellisia ja poliittisia näkökohtia. (SFS-IEC 60300-3-9 2000, s. 12–14)

4.1.1 Riskien tunnistaminen

Riskien tunnistaminen sisältää tutkittavan kohteen systemaattisen tarkastelun, jolla tunnistetaan kohteelle luontaiset vaaratyyppit sekä tavat, joilla ne voisivat toteutua. Aikaisempien sattuneiden onnettomuuksien kuvaukset ja kokemus aiemmista riskianalyyseistä voi antaa käyttökelpoista tietoa riskien tunnistamisprosessiin. Riskien arviointiin liittyy usein subjektiivisuutta ja tunnistetut riskit eivät aina ole ainoat, jotka voivat aiheuttaa uhkaa kohteelle. Tunnistetut riskit tulee tarkastella kaiken asianmukaisen uuden tiedon valossa. Riskien tunnistamismenetelmät jakautuvat SFS-IEC 60300-3-9 (2000, s. 22) mukaan kolmeen eri ryhmään:

- Vertailevat menetelmät, kuten esimerkiksi tarkastuslistat, vaaraindeksit ja kokemustiedon katselmukset

- Perusmenetelmät, kuten esimerkiksi poikkeamatarkastelu (HAZOP) sekä vika- ja vaikutusanalyysi (VVA)
- Induktiiviset päättelytekniikat, kuten esimerkiksi tapahtumapuun tapaiset loogiset kaaviot

Perusmenetelmät on kehitetty ohjaamaan työryhmää käyttämään riskien tunnistamiseen kaukokatseisuutta yhdessä tietämyksensä kanssa. Tähän pyritään esittämällä sarja ”mitä jos?” kysymyksiä. Vertailevien menetelmien, perusmenetelmien ja induktiivisten päättelytekniikoiden lisäksi on myös olemassa muita tekniikoita. Niitä voidaan käyttää vaativiin ongelmiin parantamaan riskien tunnistamista ja riskien suuruuden arvioinnin mahdollisuuksia. Tällaisia menetelmiä ovat esimerkiksi Sneak analyysi, Delphi menetelmä ja ihmisen luotettavuusanalyysi.

Riippumatta käytettävistä tekniikoista on tärkeää, että riskien tunnistamisprosessissa kiinnitetään riittävästi huomiota ihmisen ja organisaation virheille. Ihmisen ja organisaation virheen sisältävät onnettomuusskenaariot pitäisi liittää riskien tunnistamisprosessiin, eikä suunnata tarkastelua pelkästään ”tekniisiin” näkökulmiin.

4.1.2 Taajuusanalyysi

Taajuusanalyysiä käytetään arvioitaessa vaarojen tunnistamisvaiheessa tunnistetun ei-toivotun tapahtuman todennäköisyyttä. Tapahtumataajuuksien arvioimiseen käytetään SFS-IEC 60300-3-9 (2000, s. 22–24) mukaan yleisesti kolmea lähestymistapaa:

- Käytetään asianmukaisia historiatietoja
- Määritetään tapahtumataajuudet ennustamalla käyttäen analyttisiä tai simulointitekniikoita
- Käytetään asiantuntijoiden arvioita

Tekniikoita voidaan käyttää yhdessä tai erikseen. Ensimmäiset kaksi lähestymistapaa täydentävät toisiaan ja siksi niitä tulisi käyttää rinnakkain. Tällä tavalla tekniikoita voidaan käyttää riippumattomina tarkistuksina toisilleen ja auttaa lisäämään tulosten luotettavuutta. Kun edellä mainittuja tekniikoita ei voida käyttää tai ne eivät ole riittäviä, voidaan turvautua asiantuntijoiden antamiin arviointeihin.

Asianmukaista historiatietoa käytettäessä määritetään taajuus, jolla tapahtumat ovat esiintyneet aikaisemmin ja tehdään arvioita niiden esiintymistaajuudesta tulevaisuudessa. Käytettävän tiedon pitää olla tarkasteltavaan järjestelmään, laitteeseen tai toimintaan sekä myös kohdeorganisaation toiminnallisiin standardeihin soveltuva.

Tapahtumien taajuuden ennustamisessa käytetään tekniikoita kuten vikapuuanalyysi (VPA) ja tapahtumapuuanalyysi (TPA). Kun historiatietoja ei ole käytettävissä tai ne eivät riitä, on tarpeen johtaa tapahtumien taajuudet kohteen ja siihen liittyvien vikamuotojen analyysillä. Käyttökokemuksista tai julkisista tietolähteistä etsitään numeeriset tiedot kaikille mahdollisille ei-toivotuille tapahtumille, kuten esimerkiksi laitteiston vikaantuminen ja ihmisen virhe. Tapahtumat yhdistetään ei-toivottujen tapahtumien taajuuden arvioimiseksi. Kun käytetään ennustavia tekniikoita, pitää varmistaa, että analyysissä huomioidaan yhteisvikaantumisen mahdollisuus, joka aiheutuu useiden eri osien tai komponenttien satunnaisesta vikaantumisesta. Simulointitekniikoiden avulla voidaan tuottaa taajuusarvoja laitteiston ja rakenteen vioille, jotka aiheutuvat ikääntymisestä ja muista huononemisprosesseista

Asiantuntija-arvioissa käytetään kaikkea soveltuvaa ja käytettävissä olevaa tietoa mukaan lukien historiatiedot, kohteeseen liittyvät tiedot, kokeelliset tiedot ja suunnittelutiedot. Asiantuntija-arvioiden tuottamiseen on olemassa useita formaaleja menetelmiä. Menetelmät tekevät arvioiden käytön näkyväksi ja avoimeksi ja tarjoavat tukea sopivien kysymysten muodostamisessa. Käytettäviin menetelmiin kuuluvat Delphi-menetelmä, parittaiset vertailut, luokittelu ja absoluuttisen todennäköisyyden arvioinnit.

4.1.3 Seurausanalyysi

Seurausanalyysiä käytetään arvioitaessa mahdollisen ei-toivotun tapahtuman esiintymisen todennäköistä vaikutusta. Seurausanalyysin tulee SFS-IEC 60300-3-9 (2000, s. 16) mukaan:

- perustua valittuihin ei-toivottuihin tapahtumiin;
- kuvata kaikki ei-toivotusta tapahtumasta aiheutuvat seuraukset;
- ottaa huomioon olemassa olevat varautumiskeinot seurausten pienentämiseksi yhdessä kaikkien asianmukaisten olosuhteiden kanssa, joilla on vaikutus seurauksiin;
- antaa seurausten tunnistamisessa käytetyt kriteerit;
- tarkastella sekä välittömiä seurauksia että niitä, jotka saattavat ilmetä tietyn ajan kuluessa;
- tarkastella sekundäärisiä seurauksia, kuten niitä, jotka liittyvät viereisiin laitteistoihin ja järjestelmiin.

Seurausanalyysi kattaa esiintyvän ei-toivotun tapahtuman vaikutuksen arvioinnin ihmisiin, omaisuuteen tai ympäristöön. Yleensä ulkopuolisten ihmisten tai työntekijöiden turvallisuuden liittyvissä riskilaskelmissa arvioidaan eri ympäristöissä ja eri etäisyyksillä tapahtumapaikasta oleva ihmismäärä, joka voi kuolla, loukkaantua tai altistua ei-toivotun tapahtuman esiintyessä.

Ei-toivotut tapahtumat käsittävät yleensä tilanteita kuten myrkyllisten materiaalien päästöt, tulipalot, räjähdykset ja hajoamiset. Seurausmalleja tarvitaan ennustettaessa uhrien ja muiden vaikutusten määrää. Päästömekanismien, päässeen materiaalin tai energian käyttäytymisen tuntemus mahdollistaa ennusteiden tekemisen päästön vaikutuksista kaikilla etäisyyksillä päästölähteestä kunakin ajankohtana. Vaikutusten arviointiin on monia menetelmiä alkaen yksinkertaisista analyttisistä lähestymistavoista hyvin monimutkaisiin

tietokonemalleihin. On varmistettava, että menetelmät ovat sopivia tarkasteltavana olevaan ongelmaan.

4.2 Riskianalyysityökalut

SFS-IEC 60300-3-9 (2000, s. 20) mukaan käyttökelpoinen riskianalyysityökalu yleisesti ilmentää seuraavia ominaisuuksia:

- Työkalu on tieteellisesti pätevä ja sopiva tarkasteltavaan järjestelmään
- Työkalu antaa tulokset muodossa, joka auttaa riskin luonteen ymmärtämistä ja valvontaa
- Työkalu soveltuu erilaisille käyttäjille siten, että analyysi on jäljitettävissä, toistettavissa ja verifioitavissa

Kun päätös riskianalyysin tekemisestä on tehty sekä sen tavoitteet ja rajaus on määritetty, menetelmä tai menetelmät pitäisi valita SFS-IEC 60300-3-9 (2000, s. 20) mukaan perustuen seuraaviin tekijöihin:

- Järjestelmän kehitysvaihe. Järjestelmän varhaisessa kehitysvaiheessa voidaan käyttää karkeampia menetelmiä. Analyysia pitää tarkentaa, kun enemmän tietoa on käytettävissä
- Tutkimuksen tavoitteet. Analyysin tavoitteilla on suora vaikutus käytettäviin menetelmiin. Esimerkiksi, jos tehdään vertaileva tutkimus eri vaihtoehtojen kesken, saattaa olla hyväksyttävää käyttää karkeita seurausmalleja niihin järjestelmän osiin, joihin erot eivät vaikuta
- Järjestelmän ja analysoitavan vaaran tyyppi

- Vakavuuden mahdollinen taso. Analyysin syvyyttä koskevan päätöksen tulee heijastaa alkuperäistä havaintoa seurauksista, vaikka käsitys saatetaan joutua muuttamaan sen jälkeen, kun alustava arviointi on tehty
- Vaatimus työmäärälle, asiantuntemuksen tasolle ja resursseille. Yksinkertainen menetelmä hyvin sovellettuna antaa parempia tuloksia kuin monimutkaisempi menettelytapa puutteellisesti toteutettuna. Analyysiin käytetyn panostuksen pitää olla suhteessa analysoitavien riskien mahdolliseen tasoon
- Järjestelmätiedon ja luotettavuustietojen käytettävyys. Jotkut menetelmät vaativat enemmän järjestelmätietoa ja luotettavuustietoja kuin toiset
- Analyysin muuttamisen/päivittämisen tarve. Analyysia saatetaan joutua muuttamaan/päivittämään tulevaisuudessa ja jotkut menetelmät ovat tässä suhteessa helpommin uudistettavissa kuin toiset
- Säädöksistä ja sopimuksista aiheutuvat vaatimukset

Soveltuvien tekijöiden arvioinnin jälkeen pystytään valitsemaan käytettäväksi kohteelle sopiva riskianalyysityökalu tai työkalut. Taulukossa 1 esitetään ja kuvataan lyhyesti lähteisiin Parikka & Ahlroos (2002), Komonen (2002) ja SFS-IEC 60300-3-9 (2000, s. 24) perustuen joukko yleisimpiä riskianalyysityökaluja.

Taulukko 1. Yleisimmät riskianalyysityökalut

Menetelmä	Kuvaus ja käyttö
Tapahtumapuuanalyysi	Vaarojen tunnistamis- ja taajuusanalyysitekniikka, joka käyttää induktiivista päättelyä erilaisista alkutapahtumista aiheutuvien mahdollisten seurausten määrittämiseksi
Vika- ja vaikutusanalyysi & vika-, vaikutus- ja kriittisyysanalyysi (FMECA)	Vaarojen tunnistamisen ja taajuuden analysoinnin perusmenetelmä, joka analysoi kohteena olevan laiteyksikön kaikki vikamuodot ja niiden vaikutukset sekä muihin komponentteihin että järjestelmään
Vikapuuanalyysi	Vaarojen tunnistamis- ja taajuusanalyysitekniikka, joka alkaa ei toivotusta tapahtumasta ja määrittää kaikki siihen johtavat tapahtumaketjut. Tapahtumat esitetään graafisesti
Poikkeamatarkastelu (HAZOP)	Vaarojen tunnistamisen perusmenetelmä, joka arvioi systemaattisesti järjestelmän osat ja tutkii miten poikkeamat suunnittelutavoitteista voivat sattuua ja voivatko ne aiheuttaa ongelmia
Ihmisen luotettavuusanalyysi	Taajuusanalyysitekniikka, joka tarkastelee ihmisen vaikutusta kohteen toimintaan ja arvioi ihmisen virheiden vaikutusta luotettavuuteen
Vaara-analyysi	Vaarojen tunnistamis- ja taajuusanalyysitekniikka, jota voidaan käyttää aikaisessa suunnittelun vaiheessa vaarojen tunnistamiseen ja niiden kriittisyyden arviointiin
Luotettavuuslohkokaavio	Taajuusanalyysitekniikka, joka muodostaa kohteen ja sen redundanssien mallin kohteen kokonaisluotettavuuden arvioimiseksi

Tutkimuksissa esiintyy myös muita riskianalyysityökaluja. Useassa tutkimuksissa esiintyvä Bayesian verkkomallin (BN) on kätevä työkalu prosessin suorituskyvyn mallintamiseen, varsinkin kun halutaan parantaa kohteen luotettavuutta havaittujen tietojen valossa. Monet tutkimukset käsittelevät työkalua kohteiden analysoimiseen yksinään (Bensi et al. 2013; Lampis & Andrews 2009; Heckerman & Wellman 1995), mutta nykyään BN työkalua hyödynnetään usein vikapuuanalyysin ja rusetianalyysin (Bow-tie diagram) kanssa. (Bobbio et al. 2001; Khakzad et al. 2013; Cai et al. 2013; Abimbola et al. 2015). BN on graafinen malli, joka koostuu solmuista ja suunnatuista linkeistä, jotka vastaavasti edustavat satunnaismuuttujia ja niiden todennäköisyysriippuvuuksia (Mahadevan et al. 2001; Geweke 2007). Muuttajat voivat edustaa kohteen komponenttien tiloja tai niiden kapasiteettia ja vaatimuksia. BN tarjoaa kätevän tavan mallintaa komponenttien tilojen välisiä riippuvuuksia, mikä on melko vaikeaa useimmissa klassisissa riskianalyysityökaluissa. (Pagès & Gondran 1986)

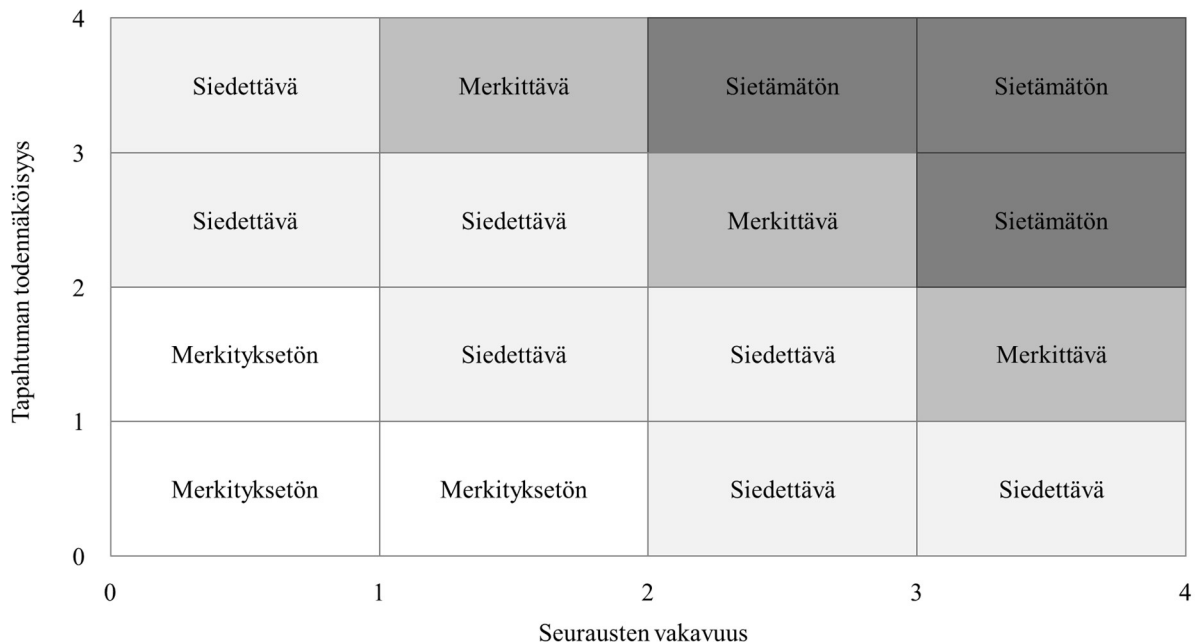
Riskianalyysityökaluja on monia ja joskus saattaa olla tarpeen käyttää useampaa kuin yhtä työkalua. Työkalun valinnan perustelut tulee esittää niiden asianmukaisuuden ja sopivuuden kannalta. Jos niiden soveltuvuudesta ja sopivuudesta on epävarmuutta, tulee käyttää vaihtoehtoisia menetelmiä ja verrata tuloksia. Yhdistettäessä eri tutkimusten tuloksia, menetelmien ja tulosten pitää olla yhteensopivia. Jos riskianalyysiltä vaaditaan tukea jatkuvalla riskienhallintaprosessille, analyysi tulee laatia ja dokumentoida sellaisella tavalla, että se voidaan ylläpitää koko kohteen elinjakson ajan. Analyysia tulee päivittää, kun merkittävää uutta tietoa tulee käyttöön ja johtamisprosessin tarpeet muuttuvat.

4.3 Riskimatriisi

Järjestelmän, laitteiston tai toiminnan riskien arviointi saattaa tuottaa suuren määrän mahdollisia onnettomuusskenaarioita. Tällaisissa tilanteissa on perusteltua luokitella onnettomuusskenaariot kvalitatiivisesti ja sijoittaa ne eri riskin tasoja ilmaisevaan riskimatriisiin. Näin pystytään keskittämään kvantifiointi niihin skenaarioihin, joiden arvioidaan aiheuttavan suurimmat riskit. (SFS-IEC 60300-3-9 2000, s. 22) Riskimatriisi kehitettiin Yhdysvaltojen ilmavoimien Electronic System Centressä (Garvey & Lansdowne 1998). Riskimatriisista on sen perustamisesta lähtien tullut yksi laajimmin käytetyistä kvalitatiivisista

riskinarviointitekniikoista, joka on otettu teollisuudessa laajalti käyttöön sen yksinkertaisuuden ja tehokkuuden vuoksi. Monet tutkijat ovat kuvanneet riskimatriisia puolikvantitatiiviseksi lähestymistavaksi (Ni et al. 2010; Aven 2008). Kuitenkin, jos molemmat riskin perusteet: tapahtuman todennäköisyys ja seurausten vakavuus ilmaistaan kvalitatiivisesti, riskimatriisista tulee puhtaasti kvalitatiivinen lähestymistapa.

Riskimatriisien käyttö johtaa yleensä matalien tai vähäpätöisten riskien putoamiseen pois jatkotarkasteluista. Riskimatriiseja on monia erilaisia, asteikot saattavat vaihdella ja kategorioita voi olla lisää tarkasteltavasta kohteesta ja teollisuudenalasta riippuen (Yu 2018; Amyotte & Khān 2019; Sutton 2015). Kuvassa 9 on esimerkki tavanomaisesta riskimatriisista, jossa riskit jaetaan merkityksettömiin, siedettäviin, merkittäviin ja sietämättömiin.



Kuva 9. Esimerkki riskimatriisista

Jokainen käytetty matriisi ja kaikkien tarkasteltujen onnettomuusskenaarioiden arvioidut sijainnit pitää dokumentoida, riippumatta siitä ovatko ne myöhemmin yksityiskohtaisten kvantitatiivisten analyysien kohteena. Kvantitatiivinen riskianalyysi vaatii sekä ei-toivotun tapahtuman taajuuden tai todennäköisyyden että siihen liittyvien seurausten vakavuuden

arvioita, jotta riskille saadaan mitta. Joissain tapauksissa yhden parametrin arvio saattaa olla riittävä, esimerkiksi kun laskelmat osoittavat seurausten olevan merkityksettömiä tai taajuuden olevan erittäin alhainen.

5 Laitteiden kriittisyysluokittelu teollisuudessa – PSK 6800

Kriittisyys on ominaisuus, joka kuvaa kohteeseen liittyvän riskin suuruutta. Kohde on kriittinen, jos siihen liittyvä riski ei ole hyväksyttävällä tasolla. Riskejä voi olla esimerkiksi henkilöiden loukkaantuminen, merkittävät aineelliset vahingot, tuotannon menetys tai muihin ei hyväksyttäviin seurauksiin liittyvä riski. (PSK 6800 2011, s. 2; Krishnasamy et al. 2005; Mikkonen 2009, s. 148) Laitteiden kriittisyysluokitteluun on olemassa kotimainen PSK standardisoimisyhdistyksen laatima standardi PSK 6800, jota tarkastellaan lisää tässä luvussa. Ulkomaisissa tutkimuksissa on käytetty esimerkiksi Preference ranking Organization Method for Enrichment of Evaluation (PROMETHEE) -menetelmää. Menetelmässä tehdään lista johdon mielestä tärkeistä kriteereistä ja laitteet luokitellaan niiden mukaan matemaattisten kaavojen avulla. Menetelmä toimii hyvin samalla tavalla, kun PSK 6800 standardi, mutta se on huomattavasti laajempi ja vaatii tarkempia tietoja käyttökohteesta. (Gugaliya et al. 2019) Toinen yleisesti käytetty kriittisyysluokittelumenetelmä on Equipment Criticality Rating (ECR), joka vastaa myös PSK 6800 standardia. PROMETHEE tapaan menetelmässä mennään todella pitkälle matemaattisissa kaavoissa ja soveltuvuus eri käyttötarkoituksiin rajautuu vaaditun datan takia. (Pertiwi et al. 2019)

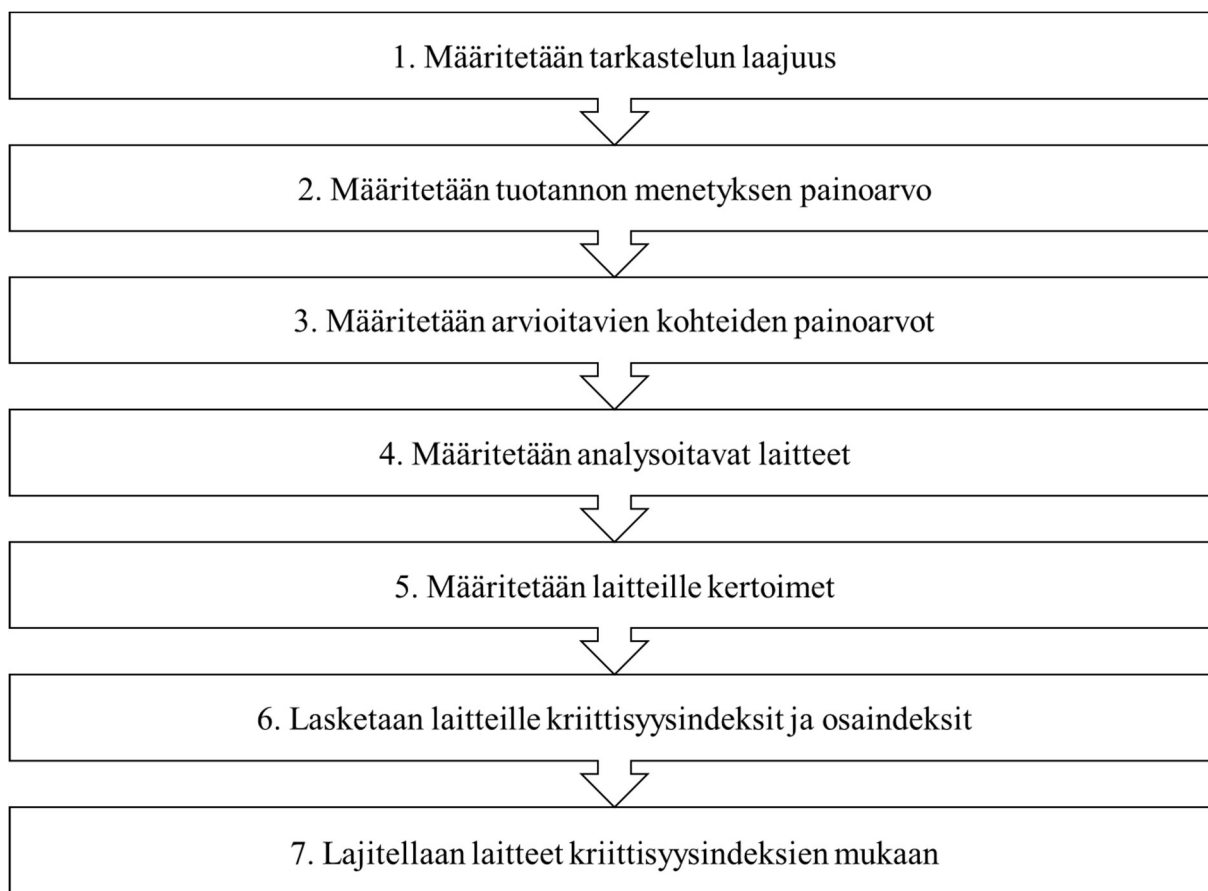
Kriittisyysluokittelua käytetään kunnossapitosuunnitelman lähtötiedon tuottamiseen. Kriittisyysluokittelu auttaa löytämään prosessin pullonkaulat, ympäristö- ja turvallisuusriskit. Kriittisyysluokittelua voidaan myös käyttää hankintavaiheen tukena määriteltäessä hankittavan laitteen ominaisuuksia, laatutasoa ja vastaanottokriteerejä. (Mikkonen 2009, s. 148) Kriittisyysluokittelun tuloksena saadaan tarkastellun alueen laitteet järjestettynä niiden kriittisyyden mukaan. Kun luokittelun parametrit on valittu oikein ja arviointia tehdessä on käytetty riittävästi eri osa-alojen asiantuntijuutta, on analyysin tulos yleensä luotettava.

Tässä luvussa tarkastellaan PSK 6800 menetelmää, kuinka menetelmää käytetään ja miten sitä pystyy muokkaamaan luotettavuuden säilyessä.

5.1 Menetelmän kuvaus

PSK 6800 standardi kuvaa menettelyn teollisuuden eri kohteiden kriittisyyden arviointiin. Menetelmässä kriittisyyttä arvioidaan taloudellisten vaikutusten, henkilöturvallisuuden ja ympäristövaikutusten näkökulmista. Analyysin muokattavuus eri tarpeisiin on mahdollistanut sen käytön monella eri toimialalla. Standardia on käytetty laajalti eri tuotantolaitoksissa, kuten esimerkiksi voimalaitoksissa, paperin tuotantolaitoksessa, lennostossa ja kemian tuotantolaitoksessa (Haapakoski 2020; Vähänen 2019; Nurkka 2016; Heino 2015; Salmia 2019).

Kuvassa 10 on esitetty laitteiden kriittisyyden arvioinnin eri vaiheet. Aluksi määritetään tarkastelun laajuus. Tarkastelun ulkopuolelle voidaan jättää sellaiset komponentit, jotka yleisen kokemuksen mukaan eivät rikkoudu tai ovat turhia laitteen toiminnan kannalta. Tämän jälkeen määritetään tuotannon menetyksen painoarvo (W_p) ja arvioidaan sopivatko taulukossa 2 annetut muut painoarvot sovellettavalle teollisuuden toimialalle. Tarvittaessa muutetaan standardissa annettuja painoarvoja. Sen jälkeen listataan standardin taulukkolaskentaohjelmaan (Liite 1) tarkasteltavat laitteet ja valitaan tarkasteltaville laitteille käytettävät kertoimet. Ohjelma laskee laitteiden kriittisyysindeksin (K) ja sen osaindeksit (K_s , K_e , K_p , K_q ja K_r) käyttäen hyväksi annettuja parametreja. (PSK 6800 2011, s. 3)



Kuva 10. Kriittisyysluokittelun toteuttaminen (PSK 6800 2011, s. 3)

Kriittisyysluokittelu tehdään lajittelemalla laitteet kriittisyysindeksin K mukaiseen järjestykseen. Kriittisyysindeksille päätetään raja-arvo, jonka ylittyessä laite luokitellaan kriittiseksi tuotannon toteutumisen kannalta. (PSK 6800 2011, s. 7) Kriittisyysindeksin laskemiseen käytetään seuraavaa kaavaa:

$$K = p \times (W_s \times M_s + W_e \times M_e + W_p \times M_p + W_q \times M_q + W_r \times M_r) \quad (4)$$

jossa p on vikaantumisväli, W :t arviointikohteiden painoarvoja ja M :t arviointikohteiden kertoimia. Yhtälössä käytettävät termit esitetään tarkemmin taulukossa 2.

5.2 Arviointikohteet ja painoarvot

Kriittisyysanalyysin havainnollistamiseksi käydään läpi taulukon 2 esimerkki kriittisyysanalyysin käytöstä.

Taulukko 2. Esimerkki PSK 6800 kriittisyysanalyysin käytöstä (PSK 6800 2011, s. 7)

Kohde	Painoarvo [W]	Vikaantumisväli [p]	Kerroin [M]	Valintakriteeri
Turvallisuus- ja ympäristövaikutukset	Turvallisuusriskit $W_s = 30$	1 = Pitkä vikaantumisväli esimerkiksi yli 5 vuotta 2 = Pitkähkö vikaantumisväli esimerkiksi 2 – 5 vuotta 4 = Lyhyehkö vikaantumisväli esimerkiksi 0,5 – 2 vuotta 8 = Lyhyt vikaantumisväli esimerkiksi 0 – 0,5 vuotta	$M_s = 0$	Ei turvallisuusriskiä
			$M_s = 2$	Vähäinen turvallisuusriski
			$M_s = 4$	Kohtalainen turvallisuusriski
			$M_s = 8$	Merkittävä turvallisuusriski
			$M_s = 16$	Vakava turvallisuusriski
	Ympäristöriskit $W_e = 20$		$M_e = 0$	Ei ympäristöriskiä
			$M_e = 2$	Vähäinen ympäristöriski
			$M_e = 4$	Kohtalainen ympäristöriski
			$M_e = 8$	Merkittävä ympäristöriski
			$M_e = 16$	Vakava ympäristöriski
Tuotantovaikutukset	Tuotannon menetykset $W_p = 0 \dots 100$	$M_p = 0$	Laitteen toimimattomuudella ei merkitystä osaprosessille tai osastolle	
		$M_p = 1$	Laitteen toimimattomuus pysäyttää osaprosessin tai osaston hetkeksi (esimerkiksi ≤ 3 h)	
		$M_p = 2$	Laitteen toimimattomuus pysäyttää osaprosessin tai osaston lyhyeksi ajaksi (esimerkiksi ≤ 10 h)	
		$M_p = 3$	Laitteen toimimattomuus pysäyttää osaprosessin tai osaston merkittäväksi ajaksi (esimerkiksi 10 - 24 h)	
		$M_p = 4$	Laitteen toimimattomuus pysäyttää osaprosessin tai osaston pitkäksi ajaksi (esimerkiksi >24 h)	
	Laatukustannus $W_q = 30$	$M_q = 0$	Laitteen toimimattomuus ei aiheuta lopputuotteen laatukustannuksia.	
		$M_q = 1$	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa lopputuotteen laatukustannuksia, jotka vastaavat hetkellistä tuotannonmenetystä (esimerkiksi ≤ 1 h)	
		$M_q = 2$	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa lopputuotteen laatukustannuksia, jotka vastaavat lyhytaikaista tuotannonmenetystä (esimerkiksi ≤ 3 h)	
		$M_q = 3$	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa lopputuotteen laatukustannuksia, jotka vastaavat merkittävää tuotannonmenetystä (esimerkiksi 3-8 h)	
		$M_q = 4$	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa lopputuotteen laatukustannuksia, jotka vastaavat pitkäaikaista tuotannonmenetystä (esimerkiksi >8 h)	
Korjaus- tai seurauskustannukset $W_r = 20$	$M_r = 0$	Korjauskustannuksilla tai seurauskustannuksilla ei ole merkitystä suhteessa muihin menetyksiin.		
	$M_r = 1$	Vähäiset korjauskustannukset tai seurauskustannukset, jotka vastaavat hetkellistä tuotannonmenetystä (esimerkiksi ≤ 2 h)		
	$M_r = 2$	Keskinkertaiset korjauskustannukset tai seurauskustannukset, jotka vastaavat lyhytaikaista tuotannonmenetystä (esimerkiksi ≤ 10 h)		
	$M_r = 3$	Korkeat korjauskustannukset tai seurauskustannukset, jotka vastaavat merkittävää tuotannonmenetystä (esimerkiksi 10-24 h)		
	$M_r = 4$	Korkeat korjauskustannukset tai seurauskustannukset, jotka vastaavat pitkäaikaista tuotannonmenetystä (esimerkiksi >24 h)		

Laitetason kriittisyyteen vaikuttavat turvallisuus- ja ympäristötekijät sekä tuotantovaikutukset sekä korjaus- ja seurauskustannukset. Laitostason painoarvokertoimien vaikutus pitää aina arvioida erikseen turvallisuuden ja ympäristön kriittisyyden kannalta. Turvallisuuden ja

ympäristön kriittisyys on verrannollinen vain tarkasteltavan teollisuusalan sisällä. Esimerkiksi kemianteollisuudessa tapahtunut vakava turvallisuus- tai ympäristöriski on usein tuhoisampi kuin jollain toisella teollisuuden alalla. Turvallisuusriskillä tarkoitetaan henkilön terveyteen kohdistuvaa vaaran mahdollisuutta.

Tuotannonvaikutuksen esimerkiksi standardissa on otettu tuotannon menetys ja laatu-kustannukset. Tuotannon menetyksellä tarkoitetaan menetettyä tuotantoaika, joka on aiheutunut suunnittelemattomasta seisokista. Tuotannon menetystä kuvaava painoarvokerroin W_p esitellään erikseen luvussa 4.3. Kerroin kasvaa suhteessa menetettyyn tuotantoaikaan. Laatu-kustannuksilla tarkoitetaan standardissa kustannuksia, jotka aiheutuvat ylimääräisistä toimenpiteistä, joilla saatetaan tuotteen laatu alkuperäisesti suunnitellulle tasolle tai tuote joudutaan myymään laatuvirheen takia halvemmalla. Kerroin kasvaa suhteessa menetettyyn laitoksen tuotantoaikaan. Tuotannon vaikutusten lisäksi standardissa tarkastellaan erikseen korjaus- tai seurauskustannuksia. Korjauskustannuksia syntyy laitteen vikaantumisen yhteydessä ja seurauskustannuksia silloin, kun laitteen vikaantuminen johtaa laitteen vaurioitumiseen tai jonkin toisen laitteen vikaantumiseen. Kerroin kasvaa suhteessa menetettyyn laitoksen tuotantoaikaan.

Arviointikohteille määritetään painoarvot (W), ja laitteille määritellään kertoimet (M) asteikkojen mukaan. Alaindeksillä kirjaimissa ilmaistaan mikä arviointikohde on kyseessä. Asteikkona on hyvä käyttää numeraalista väliä, jos se on mahdollista, kuten esimerkiksi laitteen toimimattomuus pysäyttää osaprosessin tai osaston hetkeksi (esimerkiksi ≤ 3 h). Taulukosta 2 on otettu esimerkiksi turvallisuusriskin kriittisyysindeksin asteikkojen muotoilu ja laskeminen (Taulukko 3).

Taulukko 3. Esimerkki turvallisuusriskin asteikkojen muotoilusta ja laskemisesta

$M_s = 0$	Ei turvallisuusriskiä	Laitteen vikaantuminen ei aiheuta loukkaantumisen- tai terveysturvaa
$M_s = 2$	Vähäinen turvallisuusriski	Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa lievän loukkaantumisen tai sairastumisen.

$M_s = 4$	Kohtalainen turvallisuusriski	Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa vakavan sairastumisen tai loukkaantumisen, josta jää pysyvä haitta
$M_s = 8$	Merkittävä turvallisuusriski	Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa yhden tai useamman kuolonuhrin.
$M_s = 16$	Vakava turvallisuusriski	Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa yhden tai useamman kuolonuhrin ja vakavan vaaratilanteen tehtaan ympäristössä.

Turvallisuusriskin kerroin M_s on eksponentiaalisesti suureneva. Kerroin on nolla, kun laitteen vikaantuminen ei aiheuta turvallisuusriskiä ja kriittisimmillään 16, kun laitteen vikaantuminen aiheuttaa vakavan turvallisuusriskin. Laitteen kriittisyysindeksi K_s lasketaan turvallisuuden kannalta seuraavalla tavalla:

$$K_s = p \times (W_s \times M_s) \quad (5)$$

jossa p on vikaantumisväli, W_s on turvallisuusriskin painoarvo ja M_s on turvallisuusriskin kerroin. Kriittisyysindeksit lasketaan samalla tavalla arviointikohteesta riippumatta.

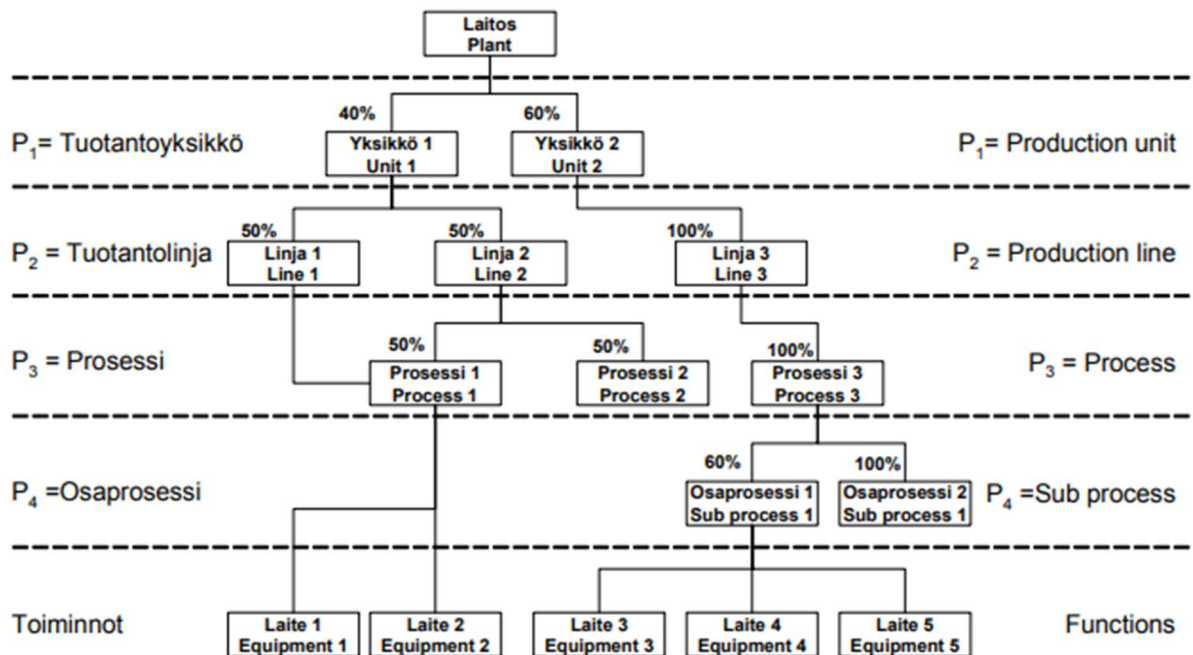
5.3 Tuotannon painoarvokerroin

Tässä luvussa tarkastellaan tuotannon menetyksen painoarvokertoimen eri osatekijöitä ja sen laskemista. Tuotannon menetyksen painoarvokertoimen laskemiseen käytetään seuraavaa yhtälöä:

$$W_p = P_4 \times P_3 \times P_2 \times P_1 \quad (6)$$

jossa P_1 on tuotantoyksikön kerroin, P_2 on tuotantolinjan kerroin, P_3 on prosessin kerroin ja P_4 on osaprosessin kerroin.

Kuvassa 11 esitetään laitoksen prosessihierarkian vaikutus yhtälössä 6 esitettyihin tuotannon painoarvokertoimiin $P_1 \dots P_4$. Prosessihierarkia on yleinen malli, jota voidaan muokata teollisuusalaakohtaisesti. Painoarvokertoimia määrittettäessä tuotoksena käytetään joko tuotannon määrää, arvoa tai siitä saatavaa tuottoa. Painoarvokertoimet kuvaavat tuotantolaitoksen prosessitekniisten toimintojen keskinäistä riippuvuutta.



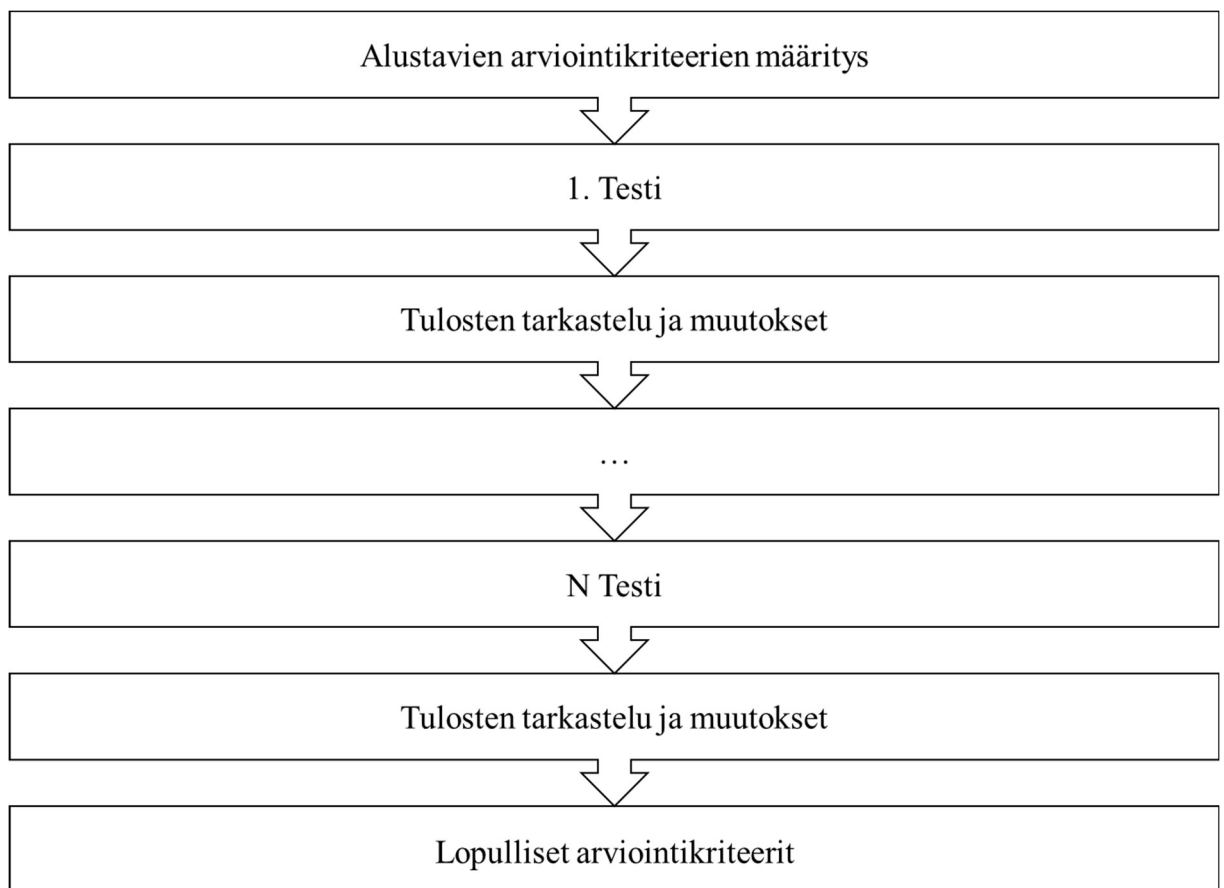
Kuva 11. Tuotannon vaikutuskertoimet (PSK 6800 2011, s. 5)

Laitoksen painoarvokerroin on aina 100 %, joten sitä ei tarvitse ottaa huomioon laskuissa. Tuotantoyksikön painoarvokertoimella tarkoitetaan sen suhteellista osuutta koko laitoksen tuotoksesta ja tuotantolinjan painoarvokertoimella tarkoitetaan sen suhteellista osuutta koko tuotantoyksikön tuotoksesta. Tuotantoyksikköjen ja tuotantolinjojen painoarvokertoimien summa on aina 100 %. Esimerkiksi mikäli tuotantolaitos sisältää vain yhden tuotantoyksikön, sen painoarvokerroin on 100 %, jos tuotantolaitos käsittää kaksi identtistä tuotantoyksikköä, niiden painoarvokertoimet ovat 50 %.

Prosessin ja osaprosessin painoarvokerroin riippuu sen lähtövirran välttämättömyydestä palvelimilleen kohteille. Jos prosessin tai osaprosessin toimimattomuus pysäyttää tuotantolinjan, sen painoarvokerroin on 100 %. Prosessit ja osaprosessit voivat olla kytkettyinä joko rinnan tai sarjaan. Sarjaan kytkettyjen prosessien ja osaprosessien painoarvokertoimet ovat keskenään samat.

6 Tutkimuksen toteutus

Tutkimuksen toteutus aloitettiin kriittisyysanalyysin alustavien kriteerien määrittämisellä, jonka jälkeen analyysin toimivuutta aloitettiin testaamaan. Kriittisyysluokittelun testausvaihe suoritettiin tuotantolaitoksen kriittisimpään 6314 linjaan, jonka kautta kaikki tuotteet kulkevat. Testauksien jälkeen analysoitiin tuloksia ja tehtiin tarvittavia muutoksia analyysiin. Viimeisen testin jälkeen muodostettiin lopulliset arviointikriteerit ja todennettiin analyysin käytettävyys. Kuvassa 12 havainnollistetaan testausprosessia ja sen eri vaiheita. Testausprosessia voidaan hyödyntää tällaisenaan myös muilla toimialoilla.



Kuva 12. Kriittisyysanalyysin arviointikriteerien testaus

Tutkimus aloitettiin laatimalla kriittisyysanalyysin laskentataulukkoon alustavat arviointikriteerit ja painoarvot. Alustavat arviointikriteerit laadittiin pohjautuen standardin

esimerkkikriteereihin ja muihin tutkimuksiin. Tämän jälkeen siirryttiin testausvaiheeseen. Testit suoritettiin kahdessa eri ryhmässä: kunnossapidon ja tuotannon. Kunnossapidon testiryhmään (Ryhmä 1) valittiin sähkön ja mekaanisen kunnossapidon esimiehiä ja asentajia. Tuotannon testiryhmään (Ryhmä 2) valittiin tiimiesimies, prosessivastaava ja kunnossapidon esimies, joka toimi opastajana käydessä linjaa läpi. Testien välissä suoritettiin tulosten tarkastelu. Tulosten tarkastelu suoritettiin palaverina, jossa käytiin läpi tulokset ja kehitysehdotukset. Palaveriin osallistui kunnossapitopäällikkö, tuotantopäällikkö ja tuotekehityspäällikkö. Arviointikriteerejä muokattiin testissä ja palaverissa heränneiden kehitysehdotusten mukaan. Viimeisen testin jälkeen saatiin lopulliset arviointikriteerit, joihin oltiin Koskisella tyytyväisiä.

6.1 Alustavat arviointikriteerit

Tutkimuksen toteutus aloitettiin laatimalla tuotantolaitoksen tarpeisiin pohjautuvien arviointikohteiden, arviointikriteerien ja painoarvojen määrittely. Tärkeiksi kriteereiksi arvioitiin vikaantumisväli, luokse pääsevyys, tuotannon menetys, laatukustannus, turvallisuusriskit ja ympäristöriskit. Luokse pääsevyydellä on korvattu standardin antama korjaus- tai seurauskustannus, jonka mittaaminen koettiin vaikeaksi ja sivuavan liikaa tuotannon menetystä. Seuraavaksi esitellään tarkemmin laaditut arviointikriteerit.

Vikaantumisväli (p)

p = 1	Vikaantumisväli > 1 vuosi
p = 2	Vikaantumisväli 6-12kk
p = 4	Vikaantumisväli 1kk-6kk
p = 6	Vikaantumisväli < 1kk

Vikaantumisvälillä arvioidaan laitteen toimintakuntoa. Vikaantumisvälillä tutkimuksessa tarkoitetaan sitä, kuinka pitkä aika keskimäärin laitteen viimeisimpien vikaantumisien välillä on. Vikaantumisvälin kasvaessa laitteen kerroin pienenee. Vikaantumisvälin kertoimia

muokattiin standardin antamista pitkistä aikaväleistä huomattavasti lyhyempiin. Pitkäksi vikaantumisväliksi arvioitiin yli 1 vuosi ja 6-12kk. Näille päätettiin kertoimiksi yksi ja kaksi, jotka ovat samat kuin standardissa. Lyhyehköksi vikaantumisväliksi arvioitiin 1-6kk, jonka kertoimeksi päätettiin standardin antama neljä. Lyhyeksi vikaantumisväliksi arvioitiin alle 1kk ja sen kerrointa laskettiin standardin antamasta kasista kuuteen, koska ei koettu, että kertoimen tulisi tuplaantua noin lyhyellä vikaantumisvälin muutoksella.

Luokse pääsevyys (W_r), painoarvo 10

$M_r = 0$	alle 30 min
$M_r = 1$	30 min–4h
$M_r = 2$	4–12h
$M_r = 3$	12–24h
$M_r = 4$	Yli 24h

Luokse pääsevyydellä arvioidaan ajallisesti laitteen luokse pääsyä kunnossapitotehtävien suorittamista varten. Tutkimuksessa luokse pääsevyydellä tarkoitetaan aikaa, joka kuluu työn aloittamiseen. Työn aloittamisen viivästykset voi johtua laitteen sijainnista tai laitteen jäähtymistä johtuvasta odotuksesta. Kerroin kasvaa aloittamisajan kasvaessa. Asteikot muodostettiin työvuorojen perusteella. Merkitys laitteen kriittisyyden kannalta on pienempi ja siksi painoarvo laskettiin kymmeneen. Luokse pääsevyydellä korvattiin standardin antama korjaus- ja seurauskustannukset. Sen koettiin mittaavan samoja asioita tuotannon menetyksen kanssa, ja erillistarkastelua ei koettu tarpeelliseksi.

Tuotannon menetys (W_p), painoarvo 100

$M_p = 0$	Ei vaikutusta
$M_p = 1$	Vähäinen vaikutus alle 2h
$M_p = 2$	Kohtalainen vaikutus 2-8h

$M_p = 3$ Merkittävä vaikutus 8-24h

$M_p = 4$ Pitkä vaikutus >24h

Tuotannon menetyksen painoarvokerroin (W_p) määriteltiin arvioimalla, kuinka moneen tehtaassa valmistamaan tuotteeseen kyseistä tuotantolinjaa käytetään. Arvioitavan kohteen 6314 tuotannon menetyksen painoarvo on 100, koska tuotantolinjaa käytetään jokaisen tehtaassa valmistettavan tuotteen valmistuksessa. Jatkotutkimuksessa on mahdollista huomioida yhtälön 2 käyttö W_p :n määrittämisessä. Tutkimuksessa tuotannon menetyksellä tarkoitetaan linjan seisomista vikaantumisen sattuessa.

Laatukustannus (W_q), painoarvo 30

$M_q = 0$ Laitteen vikaantuminen ei aiheuta laatukustannuksia

$M_q = 1$ Laitteen vikaantuminen aiheuttaa vähäisiä lopputuotteen laatukustannuksia

$M_q = 2$ Laitteen vikaantuminen aiheuttaa merkittäviä lopputuotteen laatukustannuksia

Laatukustannuksilla arvioidaan laitteen vikaantumisesta aiheutuvia ylimääräisiä toimenpiteitä, joilla tuotteen laatu palautetaan alkuperäisesti suunnitellulle tasolle tai tuote joudutaan myymään laatuvirheen takia halvemmalla. Tutkimuksessa laatukustannuksia mitataan asentajien ja operaattoreiden ja muun henkilökunnan tietämyksen perusteella, koska dataa laatuun liittyvistä virheistä ei ole. Tästä syystä asteikkoja muokattiin selkeämmiksi ja poistettiin kertoimien asteikkoja. Jos laitteen toimimattomuudesta ei aiheudu laatukustannuksia, kerroin on 0. Jos aiheutuu vähäisiä laatukustannuksia, kerroin on 1. Kerroin on 2, jos aiheutuu merkittäviä laatukustannuksia. Laatukustannusten painoarvoarvona pidettiin standardin antama 30.

Turvallisuusriskit (W_s), painoarvo 30

$M_s = 0$	Laitteen vikaantuminen ei aiheuta loukkaantumis- tai terveysturvaa
$M_s = 2$	Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa lievän loukkaantumisen tai sairastumisen
$M_s = 4$	Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa vakavan sairastumisen tai loukkaantumisen, josta jää pysyvä haitta
$M_s = 8$	Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa yhden tai useamman kuolonuhrin
$M_s = 16$	Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa yhden tai useamman kuolonuhrin ja vakavan vaaratilanteen tehtaan ympäristössä

Turvallisuusriskeillä arvioidaan henkilön terveyteen kohdistuvan vaaran mahdollisuutta. Tutkimuksessa turvallisuusriskiä mitataan edeltävien tapauksien perusteella ja tarkastelemalla laitteen mahdollista vikaantumista ja työntekijän mahdollista sijaintia. Turvallisuusriskien painoarvona pidettiin standardin antama 30. Myös standardissa annetut eksponentiaalisesti kasvavat kertoimet pidettiin samoina.

Ympäristöriskit (W_e), painoarvo 20

$M_e = 0$	Laitteen vikaantuminen ei aiheuta ympäristön saastumisen vaaraa
$M_e = 2$	Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa ympäristön likaantumista laitosalueella
$M_e = 4$	Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa paikallista laitosalueen saastumista
$M_e = 8$	Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa laitosalueen ja lähiympäristön saastumista
$M_e = 16$	Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa saastumista laitosalueella ja laajalla alueella sen ympäristössä, jonka korjaaminen vaatii suuria taloudellisia panostuksia ja palautuminen voi kestää useita vuosia

Ympäristöriskeillä arvioidaan laitosalueelle tai sen ulkopuolelle kohdistuvaa ympäristön saastumisen mahdollisuutta laitteen vikaantuessa. Tutkimuksessa turvallisuusriskiä mitataan

edeltävien tapauksien perusteella ja tarkastelemalla laitteen mahdollista vikaantumista ja sen aiheuttamia ympäristöriskejä. Ympäristöriskien painoarvona pidettiin standardin antama 20. Myös standardissa annetut eksponentiaalisesti kasvavat kertoimet pidettiin samoina.

6.2 PSK-testi 1

Alustavilla arviointikriteereillä suoritettiin ensimmäinen testi, jonka tavoitteena oli kokeilla, miten arviointikriteerit toimivat ja miten niitä tarvitsee muokata. Lisäksi haluttiin nähdä, kuinka erilaisia näkemyksiä laitteiden kriittisyydestä kunnossapidon ja tuotannon henkilökunnalta löytyy. Testin suorittamiseen annettiin aikaa kaksi viikkoa. Testiin sisältyi laskentataulukko, testausohjeet ja palautekysely. Laitteen 631428 tarkastelu unohdettiin, koska sen tarkastelu on turha linjan toiminnan kannalta. Kriittisyyden raja-arvoksi määriteltiin kunnossapitopäällikön, tuotantopäällikön ja tuotekehityspäällikön kanssa 1000 pistettä. Seuraavaksi tarkastellaan ryhmien tuloksia ja kehitysehdotuksia.

Ryhmien välillä syntyi merkittäviä eroja laitteiden kriittisyysindeksien välillä. Erojen takia oli tarpeen tarkastella laitteiden kriittisyysindeksien välisiä eroja ryhmien välillä ja mistä erot johtuvat. Tarkastelun helpottamiseksi laitteita ei ole luokiteltu kriittisyyden mukaan, vaan laitteet ovat samassa järjestyksessä. Laitteet on värikoodattu laitteen kriittisyyskategorian mukaan. Lisäksi taulukossa on värikoodattu kriittisyyden osaindeksejä, jotta nähdään mistä korkea kriittisyysluokka laitteella johtuu. Ryhmän 1 kriittisyysanalyysin tulokset esitetään kuvassa 13.

RYHMÄ 1.	Vikaantumisväli (1...6)	Turvallisuus (0...16)	Ympäristö 0...16	Tuotannon menetys (0...4)	Laatukustannus (0...2)	Luoksepääsevyys (0...4)	Kriittisyysindeksi	Kriittisyyden osaindeksit				
Toimintopaikan tunniste	Painoarvot W -->	30	20	100	30	10	K	Ks	Ke	Kp	Kq	Kr
631402	6	2	0	1	0	0	960	360	0	600	0	0
631404	4	2	0	1	0	0	640	240	0	400	0	0
631406	4	2	0	1	0	0	640	240	0	400	0	0
631408	1	2	4	2	0	0	340	60	80	200	0	0
631410	1	2	0	0	0	0	60	60	0	0	0	0
631412	1	2	4	0	0	0	140	60	80	0	0	0
631414	1	2	0	0	0	0	60	60	0	0	0	0
631416	2	2	0	1	1	0	380	120	0	200	60	0
631418	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631420	6	2	0	2	1	0	1740	360	0	1200	180	0
631422	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631424	6	2	0	2	1	0	1740	360	0	1200	180	0
631426	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631428							0	0	0	0	0	0
631430	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631432	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631434	2	2	0	1	1	0	380	120	0	200	60	0
631436	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631438	2	2	0	1	1	0	380	120	0	200	60	0
631440	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631442	1	2	4	2	0	0	340	60	80	200	0	0
631444	2	2	4	2	0	0	680	120	160	400	0	0
631446	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631448	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631450	2	2	4	2	0	0	680	120	160	400	0	0
631452	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631454	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631456	4	2	4	2	0	0	1360	240	320	800	0	0
631458	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631460	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631462	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631464	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631466	1	4	0	2	0	0	320	120	0	200	0	0
631468	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631470	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631472	4	2	0	1	0	0	640	240	0	400	0	0
631474	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631480	2	2	2	2	0	0	600	120	80	400	0	0
631482	2	2	2	2	0	0	600	120	80	400	0	0
631484	4	2	2	2	0	0	1200	240	160	800	0	0
631486	2	2	2	2	0	0	600	120	80	400	0	0
631488	4	2	2	2	0	0	1200	240	160	800	0	0
631490	4	2	2	2	0	0	1200	240	160	800	0	0
631491	4	2	2	2	0	0	1200	240	160	800	0	0
631492	1	4	2	2	0	0	360	120	40	200	0	0
631494	1	4	2	2	0	0	360	120	40	200	0	0

Kuva 13. Kriittisyyden laskentataulukko (Testi 1: Ryhmä 1.)

Ryhmän 2 kriittisyysanalyysin tulokset esitetään kuvassa 14.

RYHMÄ 2.	Vikaantumisväli (1...6)	Turvallisuus (0...16)	Ympäristö 0...16	Tuotannon menetys (0...4)	Laatukustannus (0...2)	Luoksepääsevyys (0...4)	Kriittisyysindeksi	Kriittisyyden osaindeksit				
Toimintopaikan tunniste	Painoarvot W -->	30	20	100	30	10	K	Ks	Ke	Kp	Kq	Kr
631402	6	2	0	1	0	0	960	360	0	600	0	0
631404	4	2	0	1	0	0	640	240	0	400	0	0
631406	6	2	0	1	0	0	960	360	0	600	0	0
631408	1	0	4	2	0	0	280	0	80	200	0	0
631410	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631412	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631414	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631416	2	0	0	2	1	0	460	0	0	400	60	0
631418	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631420	6	2	4	2	1	0	2220	360	480	1200	180	0
631422	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631424	6	2	4	2	1	0	2220	360	480	1200	180	0
631426	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631428							0	0	0	0	0	0
631430	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631432	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631434	4	0	0	1	1	0	520	0	0	400	120	0
631436	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631438	4	0	0	1	1	0	520	0	0	400	120	0
631440	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631442	1	0	4	2	0	0	280	0	80	200	0	0
631444	4	2	4	2	0	0	1360	240	320	800	0	0
631446	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631448	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631450	4	2	4	2	0	0	1360	240	320	800	0	0
631452	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631454	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631456	6	2	4	2	0	0	2040	360	480	1200	0	0
631458	2	2	0	2	0	0	520	120	0	400	0	0
631460	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631462	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631464	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631466	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631468	2	2	0	2	0	0	520	120	0	400	0	0
631470	4	2	0	2	0	0	1040	240	0	800	0	0
631472	2	2	0	2	0	0	520	120	0	400	0	0
631474	4	2	0	2	0	0	1040	240	0	800	0	0
631480	2	2	2	2	0	0	600	120	80	400	0	0
631482	2	2	2	2	0	0	600	120	80	400	0	0
631484	4	2	2	2	0	0	1200	240	160	800	0	0
631486	2	2	2	2	0	0	600	120	80	400	0	0
631488	6	2	2	2	0	0	1800	360	240	1200	0	0
631490	6	2	2	2	0	0	1800	360	240	1200	0	0
631491	4	2	2	2	0	0	1200	240	160	800	0	0
631492	4	2	2	2	0	0	1200	240	160	800	0	0
631494	2	2	2	2	0	0	600	120	80	400	0	0

Kuva 14. Kriittisyyden laskentataulukko (Testi 1: Ryhmä 2.)

Kuten kuvista 13 ja 14 nähdään, kriittisyyden osaindeksit jakautuivat tasaisesti, joten erot ryhmien tulosten välillä johtuvat määritetyistä vikaantumisväleistä. Vikaantumisvälejä arvioitiin tuotannon porukassa kokemuserusteisesti ja kunnossapidon ryhmässä kunnossapidon järjestelmän kirjausten perusteella. Tarkemmalla tarkastelulla huomattiin, että vikaantumisväleissä oli merkittäviä eroja ryhmien välillä. Esimerkiksi laitteet 631470 ja 631474, jotka

ryhmän 2 tuloksista löytyvät kriittisistä laitteista ja ryhmän 1 tuloksista ei kriittisistä laitteista. Ryhmä 1 on antanut molemmille laitteille vikaantumisväliksi 1, kun taas ryhmä 2 antoi molemmille laitteille 4. Todettiin, että muokataan ryhmän 2 tuloksiin ryhmän 1 vikaantumisvälit, koska kokemuseräisten vikaantumisvälien tarkastelu ei tuo tutkimukselle lisäarvoa. Muokatut ryhmän 2 tulokset löytyvät kuvasta 15.

RYHMÄ 2. Toimintopaikan tunniste	Vikaan- tumisväli (1...6)	Turvallisuus (0...16)	Ympäristö 0...16	Tuotannon menetys (0...4)	Laatukustan- nus (0...2)	Luokse- pääsevyys (0...4)	Kriitti- syyss- indeksi	Kriittisyyden osaindeksit				
	Painoarvot W -->	30	20	100	30	10	K	Ks	Ke	Kp	Kq	Kr
631402	6	2	0	1	0	0	960	360	0	600	0	0
631404	4	2	0	1	0	0	640	240	0	400	0	0
631406	4	2	0	1	0	0	640	240	0	400	0	0
631408	1	0	4	2	0	0	280	0	80	200	0	0
631410	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631412	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631414	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631416	2	0	0	2	1	0	460	0	0	400	60	0
631418	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631420	6	2	4	2	1	0	2220	360	480	1200	180	0
631422	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631424	6	2	4	2	1	0	2220	360	480	1200	180	0
631426	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631428							0	0	0	0	0	0
631430	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631432	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631434	2	0	0	1	1	0	260	0	0	200	60	0
631436	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631438	2	0	0	1	1	0	260	0	0	200	60	0
631440	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631442	1	0	4	2	0	0	280	0	80	200	0	0
631444	2	2	4	2	0	0	680	120	160	400	0	0
631446	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631448	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631450	2	2	4	2	0	0	680	120	160	400	0	0
631452	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631454	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631456	4	2	4	2	0	0	1360	240	320	800	0	0
631458	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631460	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631462	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631464	1	2	0	1	0	0	160	60	0	100	0	0
631466	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631468	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631470	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631472	4	2	0	2	0	0	1040	240	0	800	0	0
631474	1	2	0	2	0	0	260	60	0	200	0	0
631480	2	2	2	2	0	0	600	120	80	400	0	0
631482	2	2	2	2	0	0	600	120	80	400	0	0
631484	4	2	2	2	0	0	1200	240	160	800	0	0
631486	2	2	2	2	0	0	600	120	80	400	0	0
631488	4	2	2	2	0	0	1200	240	160	800	0	0
631490	4	2	2	2	0	0	1200	240	160	800	0	0
631491	4	2	2	2	0	0	1200	240	160	800	0	0
631492	1	2	2	2	0	0	300	60	40	200	0	0
631494	1	2	2	2	0	0	300	60	40	200	0	0

Kuva 15. Kriittisyyden laskentataulukko (Testi 1: Ryhmä 2. muokattu)

Kuvaa 13 ja 15 vertailemalla huomataan, että vikaantumisvälien korjaamisen jälkeen suurimmat epäkohdat korjaantuivat. Tarkastelun helpottamiseksi laitteet yleensä luokitellaan eri kriittisyyskategorioihin. Tutkimuksissa laitteita on luokiteltu neljään tai kuuteen kategoriaan. Koskisen henkilökunnan kanssa päädyttiin ratkaisuun, että on selkeää luokitella laitteet neljään eri kategoriaan. Kuuden kategorian ei koettu tuovan etua tarkastelulle, vaan vaikeuttavan jatkotoimenpiteiden suunnittelua. Yli 1000 kriittisyysindeksin laitteet muodostavat kriittisten laitteiden ryhmän. 501–1000 kriittisyysindeksin ryhmässä ovat melko kriittiset laitteet. 101–500 kriittisyysindeksin ryhmässä ovat vähän kriittiset laitteet. 0–100 kriittisyysindeksin laitteet muodostavat ei kriittisen ryhmän. Taulukossa 4 esitetään laitteet jaoteltuna kriittisyysindeksien mukaan neljään eri kategoriaan.

Taulukko 4. Laitteet luokiteltu kriittisyyden mukaan (Testi 1.)

	0–100	101–500	501–1000	> 1000
Ryhmä 1.	4 kpl	26 kpl	9 kpl	7 kpl
Ryhmä 2.	9 kpl	13 kpl	12 kpl	12 kpl
Ryhmä 2. (muok.)	9 kpl	21 kpl	8 kpl	8 kpl

Jaottelun perusteella nähdään, että testien tulokset ovat hyvin samankaltaisia. Tämä kertoo siitä, että kunnossapidossa ja tuotannossa ajatellaan laitteiden arviointikriteereistä samalla tavalla. Lisäksi se kertoo myös arviointikriteerien toimivuudesta, kun tuotantolaitoksen sisällä saadaan samoja tuloksia. Tätä väitettä tukee myös kriittisyysanalyysistä saatu palaute. Palautteiden perusteella alustaviin kriteereihin oltiin jo tyytyväisiä. Muutamia kehityskohteita kuitenkin löytyi, joita tarkastellaan seuraavaksi.

Tuotannon testiryhmä koki, että arviointikriteerejä ei tarvitse muokata. Kokemusta kriittisyysanalyysistä ei ollut, joten ei tiedetty, mitä muuta voitaisiin edes mitata. Ryhmä halusi kuitenkin tarkennusta ympäristö- ja turvallisuusriskeihin. Haluttiin tietää, lasketaanko tulitöiden päästöt ympäristöriskeihin ja tarkoitetaanko turvallisuusriskillä rikkoutumishetkeä

vai kaikkea toimintaa rikkoon tuminen ja kuntoon saamisen välillä. Näiden kommenttien perusteella asteikkojen kuvauksia tarkennettiin tulospalaverissa.

Kunnossapidon testiryhmä jäi kaipaamaan korjaus- tai seurauskustannuksia, jotka poistettiin alustavista kriteereistä, koska se mittasi samoja asioita, kun tuotannon menetys. Testiryhmä koki myös vikaantumisvälin asteikoissa olevan liian suuria hyppäyksiä. Aiheista pidettiin tarkentava palaveri, jossa haettiin tarkennusta muutosehdotuksiin. Palaverissa selvisi myös, että luokse pääsevyyden merkitystä kriittisyyden kannalta kyseenalaistettiin. Koettiin, että melkein kaikilla laitteilla kerroin on 0. Palaverissa ehdotettiin, että vikaantumisväliin lisätään asteikko 1kk-3kk ja kasvatetaan kertoimia, jolloin arviointikriteereiksi tulisi:

Vikaantumisväli (p)

p = 1	Vikaantumisväli > 1 vuosi
p = 2	Vikaantumisväli 6-12kk
p = 4	Vikaantumisväli 3kk-6kk
p = 6	Vikaantumisväli 1kk-3kk
p = 8	Vikaantumisväli < 1kk

Korjaus- ja seurauskustannuksiksi ehdotettiin tuotannon menetyksen sijaan kustannuksia mittaavia arviointikriteerejä:

Korjaus-/seurauskustannus (W_p)

M _p = 0	Laitteen toimimattomuudesta aiheutuu ≤ 1 000€ kustannukset
M _p = 1	Laitteen toimimattomuudesta aiheutuu 1 000-5 000€ kustannukset
M _p = 2	Laitteen toimimattomuudesta aiheutuu 5 000-20 000€ kustannukset
M _p = 4	Laitteen toimimattomuudesta aiheutuu > 20 000€ kustannukset

Testiryhmien kehitysehdotuksia ja kuvien 13–15 tuloksia käytiin läpi tulospalaverissa. Palaverissa keskityttiin erityisesti tarkastelemaan ristiin ryhmien tuloksia ja olisiko tarvittavaa muokata arviointikriteereiden painoarvoja.

Palaverissa tarkennettiin ympäristö- ja turvallisuusriskien kuvauksia tuotannon kysymysten pohjalta. Ympäristöriskeihin ei lasketa tulitöiden päästöjä ja turvallisuusriskillä tarkoitetaan pelkkää rikkoutumishetkeä. Kunnossapidon ehdotuksista korjaus- ja seurauskustannuksia ei otettu mukaan tarkasteluun. Todettiin, että ehdotetulla tai millä tahansa asteikolla arviointikriteeri ei tuo lisäarvoa kriittisyysanalyysiin ja mittaaminen on todella vaikeaa. Päätettiin myös pitää luokse pääsevyys edelleen tarkastelussa. Vaikka suurimmalla osalla laitteista kerroin on 0, on tärkeää tietää ne harvat linjojen laitteet, joille pääsy on vaikeaa. Vikaantumisväliin tuotiin ehdotuksen mukaisesti yksi väliasteikko lisää. Ehdotuksen kertoimia pienennettiin hieman, koska ei haluttu kasvattaa vikaantumisvälin painoarvoa. Vikaantumisvälin arviointikriteereiksi muodostui:

Vikaantumisväli (p)

p = 1	Vikaantumisväli > 1 vuosi
p = 2	Vikaantumisväli 6-12kk
p = 3	Vikaantumisväli 3kk-6kk
p = 4	Vikaantumisväli 1kk-3kk
p = 6	Vikaantumisväli < 1kk

Tulospalaverissa haluttiin vielä tarkentaa ohjeita sähkökeskusten ja logiikkojen tarkasteluun. Keskuksia tulee tarkastella omina laitteinaan, eli kaikkia sähkö- tai logiikka vikoja ei laiteta keskuksien piikkiin, vaan mietitään, mikä on todennäköisin vika keskuksissa ja millaisia seurauksia sillä on. Lisäksi haluttiin korostaa, että tarkastellaan nimenomaan laitteiden todennäköisimpiä vikoja. Kyseiset tarkennukset ja korostukset toteutuvat jo tuloksissa,

vaikka niitä ei ohjeissa ole tuotu esille. Arviointikriteereille ja ohjeille tehtiin kyseiset muutokset ja testi lähetettiin uudestaan testiryhmille. Testiryhmille lähetettiin myös tulosityhteenvedo, jossa käytiin läpi testien tulokset, kehitysehdotukset ja tehdyt muutokset.

6.3 PSK-testi 2

Muokatuilla arviointikriteereillä suoritettiin toinen testi, jonka tavoitteena oli varmistaa riittävätkö testaukset, vai tarvitseeko analyysia vielä muokata. Testin suorittamiseen annettiin aikaa kaksi viikkoa. Testiin sisältyi edellisen testin yhteenvedo, muokattu laskentataulukko, muokatut testausohjeet ja palautekysely. Testi suoritettiin samalla tavalla, kuin testi 1. Ainut muutos oli, että ryhmä 2 jätti vastaamatta vikaantumisväliin, koska ryhmällä ei ole käytössä järjestelmän vikaantumisdataa. Ryhmän 1 vikaantumisvälit lisättiin ryhmän 2 tuloksiin samalla tavalla, kun testissä 1. Ryhmän 1 kriittisyysanalyysin tulokset esitetään kuvassa 16. Laitteet on luokiteltu kuvassa kriittisyyden mukaan.

RYHMÄ 1.	Vikaantumisväli (1...6)	Turvallisuus (0...16)	Ympäristö 0...16	Tuotannon menetys (0...4)	Laatukustannus (0...2)	Luoksepääsevyys (0...4)	Kriittisyysindeksi	Kriittisyyden osaindeksit				
Toimintopaikan tunniste	Painoarvot W -->	30	20	100	30	10	K	Ks	Ke	Kp	Kq	Kr
631420	6	0	0	2	1	0	1380	0	0	1200	180	0
631424	6	0	0	2	1	0	1380	0	0	1200	180	0
631456	4	0	4	2	0	0	1120	0	320	800	0	0
631488	4	0	2	2	0	0	960	0	160	800	0	0
631490	4	0	2	2	0	0	960	0	160	800	0	0
631491	4	0	2	2	0	0	960	0	160	800	0	0
631484	3	0	2	2	0	0	720	0	120	600	0	0
631402	6	0	0	1	0	0	600	0	0	600	0	0
631444	2	0	4	2	0	0	560	0	160	400	0	0
631450	2	0	4	2	0	0	560	0	160	400	0	0
631480	2	0	2	2	0	0	480	0	80	400	0	0
631482	2	0	2	2	0	0	480	0	80	400	0	0
631486	2	0	2	2	0	0	480	0	80	400	0	0
631406	4	0	0	1	0	0	400	0	0	400	0	0
631404	3	0	0	1	0	0	300	0	0	300	0	0
631472	3	0	0	1	0	0	300	0	0	300	0	0
631408	1	0	4	2	0	0	280	0	80	200	0	0
631442	1	0	4	2	0	0	280	0	80	200	0	0
631416	2	0	0	1	1	0	260	0	0	200	60	0
631434	2	0	0	1	1	0	260	0	0	200	60	0
631438	2	0	0	1	1	0	260	0	0	200	60	0
631492	1	0	2	2	0	0	240	0	40	200	0	0
631494	1	0	2	2	0	0	240	0	40	200	0	0
631446	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631448	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631452	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631454	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631458	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631460	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631466	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631418	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631422	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631426	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631430	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631432	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631436	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631462	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631464	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631468	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631470	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631474	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631412	1	0	4	0	0	0	80	0	80	0	0	0
631410	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631414	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631440	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Kuva 16. Kriittisyyden laskentataulukko (Testi 2: Ryhmä 1.)

Ryhmän 2 kriittisyysanalyysin tulokset esitetään kuvassa 17. Laitteet on luokiteltu kuvassa kriittisyyden mukaan.

RYHMÄ 2.	Vikaantumisväli (1...6)	Turvallisuus (0...16)	Ympäristö 0...16	Tuotannon menetys (0...4)	Laatukustannus (0...2)	Luoksepääsevyys (0...4)	Kriittisyysindeksi	Kriittisyyden osaindeksit				
Toimintopaikan tunniste	Painoarvot W -->	30	20	100	30	10	K	Ks	Ke	Kp	Kq	Kr
631420	6	0	4	2	1	0	1860	0	480	1200	180	0
631424	6	0	4	2	1	0	1860	0	480	1200	180	0
631456	4	0	4	2	0	0	1120	0	320	800	0	0
631488	4	0	2	2	0	0	960	0	160	800	0	0
631490	4	0	2	2	0	0	960	0	160	800	0	0
631491	4	0	2	2	0	0	960	0	160	800	0	0
631484	3	0	2	2	0	0	720	0	120	600	0	0
631402	6	0	0	1	0	0	600	0	0	600	0	0
631472	3	0	0	2	0	0	600	0	0	600	0	0
631444	2	0	4	2	0	0	560	0	160	400	0	0
631450	2	0	4	2	0	0	560	0	160	400	0	0
631480	2	0	2	2	0	0	480	0	80	400	0	0
631482	2	0	2	2	0	0	480	0	80	400	0	0
631486	2	0	2	2	0	0	480	0	80	400	0	0
631416	2	0	0	2	1	0	460	0	0	400	60	0
631406	4	0	0	1	0	0	400	0	0	400	0	0
631404	3	0	0	1	0	0	300	0	0	300	0	0
631408	1	0	4	2	0	0	280	0	80	200	0	0
631442	1	0	4	2	0	0	280	0	80	200	0	0
631434	2	0	0	1	1	0	260	0	0	200	60	0
631438	2	0	0	1	1	0	260	0	0	200	60	0
631492	1	0	2	2	0	0	240	0	40	200	0	0
631494	1	0	2	2	0	0	240	0	40	200	0	0
631418	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631432	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631446	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631448	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631452	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631454	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631458	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631466	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631468	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631470	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631474	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631422	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631426	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631430	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631436	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631460	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631462	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631464	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0
631410	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631412	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631414	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631440	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Kuva 17. Kriittisyyden laskentataulukko (Testi 2: Ryhmä 2.)

Kuvaa 16 ja 17 vertailemalla huomataan, että ryhmien väliset tulokset ovat hyvin samankaltaisia, eikä ryhmien välillä ei syntynyt merkittäviä eroja laitteiden kriittisyysindeksien välillä. Muutama huomioita asia kuitenkin löytyi. Ryhmä 2 antoi laitteille 631420 ja 631424 ympäristöriskin kertoimeksi neljä, joille ryhmä 1 antoi kertoimeksi nolla. Tällä ei kuitenkaan

ollut kriittisyysluokittelun kannalta merkitystä. Taulukossa 5 esitetään laitteet luokiteltuna kriittisyysindeksien mukaan neljään eri kategoriaan.

Taulukko 5. Laitteet luokiteltu kriittisyyden mukaan (Testi 2.)

	0–100	101–500	501–1000	> 1000
Ryhmä 1.	15 kpl	20 kpl	7 kpl	3 kpl
Ryhmä 2.	11 kpl	23 kpl	8 kpl	3 kpl

Luokittelussa eroja syntyi viiden eri laitteen välillä: 631472, 631470, 631474, 631468 ja 631432. Kaikissa laitteissa erot johtuivat tuotannon menetyksen kertoimesta. Ryhmä 1 määritteli kyseisille laitteille tuotannon menetyksen kertoimeksi 1 ja ryhmä 2 kertoimeksi puolestaan 2.

Ryhmiä palautteiden perusteella tehtyihin muutoksiin oltiin tyytyväisiä. Turvallisuusriskin arviointikriteerin kuvaukseen tehtyyn tarkennukseen oltiin erityisen tyytyväisiä ja sillä oli iso vaikutus kriittisyysindeksiin. Turvallisuusriskin rajoittaminen vikaantumishetkeen tiputti kaikki turvallisuuskertoimet nolnaan. Tästä johtuen kriittiset laitteet muun muassa tippuivat puoleen. Lisäksi pieniä eroja kriittisyysindeksiin syntyi vikaantumisväliin tuodun lisäasteikon myötä. Kriittisyysindeksi laski muutaman laitteen kohdalla, koska vikaantumisvälin kerroin tippui neljästä kolmeen.

Ryhmillä ei enää tullut kehitysehdotuksia. Ryhmät kokivat, että kriittisyysanalyysi on toimiva ja arviointikriteereillä löydetään kriittiset laitteet. Tulospalaverissa käytiin vielä tulokset läpi ja todettiin, että kriteereitä ei tarvitse muokata. Kriittisyysanalyysi löytää kriittiset laitteet ja näin ollen testin tuloksia voidaan käyttää lopullisessa analyysissä.

6.4 Lopulliset arviointikriteerit

Lopulliset arviointikriteerit saatiin 2. testin jälkeen. Lopullisiksi arviointikriteereiksi muoutuivat vikaantumisväli, luokse pääsevyys, tuotannon menetys, laatukustannus, turvallisuusriskit ja ympäristöriskit. Seuraavaksi esitellään lopulliset arviointikriteerit.

Vikaantumisväli (p)

p = 1	Vikaantumisväli > 1 vuosi
p = 2	Vikaantumisväli 6-12kk
p = 3	Vikaantumisväli 3kk-6kk
p = 4	Vikaantumisväli 1kk-3kk
p = 6	Vikaantumisväli < 1kk

Luokse pääsevyys (Wr), painoarvo 10

Mr = 0	alle 30 min
Mr = 1	30 min–4h
Mr = 2	4–12h
Mr = 3	12–24h
Mr = 4	Yli 24h

Tuotannon menetys (Wp), painoarvo 100

Mp = 0	Ei vaikutusta
Mp = 1	Vähäinen vaikutus alle 2h
Mp = 2	Kohtalainen vaikutus 2-8h
Mp = 3	Merkittävä vaikutus 8-24h

$M_p = 4$ Pitkä vaikutus >24h

Laatukustannus (Wq), painoarvo 30

$M_q = 0$ Laitteen vikaantuminen ei aiheuta laatukustannuksia

$M_q = 1$ Laitteen vikaantuminen aiheuttaa vähäisiä lopputuotteen laatukustannuksia

$M_q = 2$ Laitteen vikaantuminen aiheuttaa merkittäviä lopputuotteen laatukustannuksia

Turvallisuusriskit (Ws), painoarvo 30

$M_s = 0$ Laitteen vikaantuminen ei aiheuta loukkaantumis- tai terveysvaaraa

$M_s = 2$ Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa lievän loukkaantumisen tai sairastumisen

$M_s = 4$ Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa vakavan sairastumisen tai loukkaantumisen, josta jää pysyvä haitta

$M_s = 8$ Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa yhden tai useamman kuolonuhrin

$M_s = 16$ Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa yhden tai useamman kuolonuhrin ja vakavan vaaratilanteen tehtaan ympäristössä

Ympäristöriskit (We), painoarvo 20

$M_s = 0$ Laitteen vikaantuminen ei aiheuta ympäristön saastumisen vaaraa

$M_s = 2$ Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa ympäristön likaantumista laitosalueella

$M_s = 4$ Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa paikallista laitosalueen saastumista

$M_s = 8$ Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa laitosalueen ja lähiympäristön saastumista

$M_s = 16$ Laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa saastumista laitosalueella ja laajalla alueella sen ympäristössä, jonka korjaaminen vaatii suuria taloudellisia panostuksia ja palautuminen voi kestää useita vuosia

Lopulliset arviointikriteerit ovat hyvin lähellä alustavia arviointikriteerejä, mutta eroavat merkittävästi standardissa ja muissa tutkimuksissa käytetyistä arviointikriteereistä. Alustavien arviointikriteereiden muodostamisessa pyrittiin hakemaan selkeää ja yksinkertaista kokonaisuutta ja siinä onnistuttiin. Suurimpia muutoksia tehtiin arviointikriteerien kuvauksiin ja pieniä muutoksia tehtiin kriteerien asteikkoihin ja kertoimiin. Voidaan väittää, että standardin muokkaamisessa kannattaa käyttää paljon aikaa alustavien kriteerien määrittämiseen, jotta testausvaiheessa ei tuhlaudu aikaa ilmiselvien ongelmien muokkaamiseen.

7 Tulokset

Lähtökohtana testeillä oli saada tietoa menetelmän soveltuvuudesta puuteollisuuden tuotantolaitokseen. Testien avulla muokattiin arviointikriteereitä ja kehitettiin, analysointimenetelmää tuotantolaitoksen tarpeisiin sopivaksi. Kriittisyysanalyysin tekemiseen muodostettiin myös lopuksi tarkat ohjeet, joiden perusteella kuka tahansa voi analyysin suorittaa. Lisäksi laskentataulukkoa automatisoitiin ja selkeytettiin (Liite 2.). Taulukko antaa suoraan värikoodauksen ja kriittisyysluokituksen analyysin suorittajalle. Lopputuloksena saatiin puuteollisuuden tuotantolaitokseen sopiva kriittisyysanalyysi ja 6314 linjan laitteet luokiteltuna kriittisyyden mukaan.

Tässä luvussa tarkastellaan lopullisilla arviointikriteereillä suoritetun kriittisyysanalyysin tuloksia. Ensin tarkastellaan arviointikriteereille annettuja kertoimia ja sitten analysoidaan luokitellut ryhmät ja käsitellään kriittisyyteen vaikuttavat tekijät. Ryhmien tulosten samankaltaisuuden takia tulospalaverissa päätettiin käyttää pelkästään ryhmän 1 tuloksia. Lisäksi jatkossa kriittisyysanalyysiä suoritettaessa kunnossapidon ja tuotannon ryhmät tulisi yhdistää. Kaksien tuloksien saaminen ei enää hyödytä, kun testausvaiheesta edetään pois.

7.1 Arviointikriteereiden kertoimet

Seuraavaksi käsitellään kriittisyysanalyysin arviointikriteereille annettuja kertoimia. Laskentataulukkoon lisättiin osio, joka antaa automaattisesti arviointikriteereille annettujen kertoimien lukumäärät. Ensimmäiseksi tarkastellaan vikaantumisväliä, joka on merkittävä osa kriittisyysindeksiä, koska se toimii osaindeksien summien kertoimena. Vikaantumisvälien jakaumaa tarkastellaan taulukossa 6.

Taulukko 6. Vikaantumisvälien jakauma

Vikaantumisväli	Laitteiden lkm.
1	26
2	8
3	3
4	5
6	3

26 laitteella vikaantumisväli on yli vuoden ja kahdeksalla laitteella vikaantumisväli on 6–12 kk. Kolmella laitteella vikaantumisväli on 3–6 kk ja viidellä laitteella vikaantumisväli on 1–3 kk. Alle kuukauden vikaantumisvälin laitteita on kolme eli 7 % kaikista laitteista. Seuraavaksi tarkastellaan tuotannon menetystä, joka on osaindekseistä selkeästi merkittävin sen suuren painoarvon takia. Tuotannon menetysten jakaumaa tarkastellaan taulukossa 7.

Taulukko 7. Tuotannon menetysten jakauma

Tuotannon menetys	Laitteiden lkm.
0	4
1	18
2	23
3	0
4	0

Vain neljällä laitteella linja ei seiso, jos laite vikaantuu. 18:sta laitteella linja seisoo alle 2 h ja 23 laitteella linja seisoo 2–8 h. 8–24 h ja yli 24 h seisokkeja aiheuttavia laitteita ei linjalta löydy. Seuraavaksi tarkastellaan laatukustannuksia, jotka todettiin haastavaksi mitata. Laatukustannusten jakaumaa tarkastellaan taulukossa 8.

Taulukko 8. Laatukustannusten jakauma

Laatukustannus	Laitteiden lkm.
0	40
1	5
2	0

40 laitteella vikaantuminen ei aiheuta laatukustannuksia ja viidellä laitteella vikaantuminen aiheuttaa vähäisiä lopputuotteen laatukustannuksia. Merkittäviä lopputuotteen laatukustannuksia aiheuttavia laitteita linjalta ei löydy. Seuraavaksi tarkastellaan ympäristöriskejä, joka on todella tärkeä osa nykyajan toimintaa ja yrityksen julkikuvaa. Ympäristöriskien jakaumaa tarkastellaan taulukossa 6.

Taulukko 9. Ympäristöriskien jakauma

Ympäristöriskit	Laitteiden lkm.
0	30
2	9
4	6
8	0
16	0

30 laitteella vikaantuminen ei aiheuta ympäristön saastumisen vaaraa ja 9 laitteella vikaantuminen voi aiheuttaa ympäristön likaantumista laitosalueella. Kuudella laitteella vikaantuminen aiheuttaa paikallista laitosalueen saastumista. Laitteita, joiden vikaantuminen voi aiheuttaa laitosalueen ja lähiympäristön saastumista ei ole. Myöskään laitteita, joiden vikaantuminen voi aiheuttaa saastumista laitosalueella ja laajalla alueella sen ympäristössä, jonka korjaaminen vaatii suuria taloudellisia panostuksia ja palautuminen voi kestää useita vuosia ei ole.

Luokse pääsevyydelle ja turvallisuusriskeille ei tehty jakaumaa, koska kriteerien kertoimet kaikille laitteille olivat 0. Kaikkien laitteiden luokse päästään alle 30 minuutissa ja laitteiden

vikaantuminen ei aiheuta loukkaantumis- tai terveysvaaraa. Laitteiden turvallisuuden eteen on tehty vuosien varrella todella paljon työtä ja tehdään edelleen. Tämä näkyy myös tuloksissa.

7.2 Kriittiset laitteet

Kriittisillä laitteilla kriittisyysindeksi ylittää 1000 pistettä. Ryhmässä on kolme laitetta 631420, 631424 ja 631456. Kriittiset laitteet muodostavat seitsemän prosentin kokonaisuuden analysoidusta linjasta. Laitteiden suuri kriittisyysindeksi johtuu tiheästä vikaantumisvälistä ja vikaantumisesta aiheutuvasta tuotannon menetyksestä. Lisäksi lievää painoarvoa annettiin laatuksennuksille ja ympäristöriskeille. Kriittisten laitteiden tulokset löytyvät kuvasta 18.

RYHMÄ 1.	Vikaantumisväli (1...6)	Turvallisuus (0...16)	Ympäristö 0...16	Tuotannon menetykset (0...4)	Laatukustannus (0...2)	Luokse pääsevyys (0...4)	Kriittisyysindeksi	Kriittisyyden osaindeksit				
Toimintopaikan tunniste	Painoarvot W -->	30	20	100	30	10	K	Ks	Ke	Kp	Kq	Kr
631420	6	0	0	2	1	0	1380	0	0	1200	180	0
631424	6	0	0	2	1	0	1380	0	0	1200	180	0
631456	4	0	4	2	0	0	1120	0	320	800	0	0

Kuva 18. Kriittiset laitteet

Laitteilla 631420 ja 631424 tuotannon menetyksen osaindeksi on 1200 pistettä ja laatuksennusten osaindeksi on 180 pistettä. Laitteella 631456 tuotannon menetyksen osaindeksi on 800 pistettä ja ympäristöriskin osaindeksi 320. Laitteelle 631456 löytyy varasuunnitelma, jolla tuotannon riski voidaan minimoida, mutta ympäristöriskin kertoimen syyt tulisi kartoittaa ja selvittää pystytäänkö riskiä jollain tavalla minimoimaan.

7.3 Melko kriittiset laitteet

Melko kriittisillä laitteilla kriittisyysindeksi on 501–1000. Ryhmässä on seitsemän laitetta ja laitteet muodostavat 16 % kokonaisuuden analysoidusta linjasta. Laitteiden

kriittisyysindeksit johtuvat korkeasta vikaantumisvälistä ja ympäristöriskien ja tuotannon menetyksen osaindeksistä. Melko kriittisten laitteiden tulokset löytyvät kuvasta 19.

RYHMÄ 1.	Vikaantumisväli (1...6)	Turvallisuus (0...16)	Ympäristö 0...16	Tuotannon menetyks (0...4)	Laatukustannus (0...2)	Luokse pääsevyys (0...4)	Kriittisyysindeksi	Kriittisyyden osaindeksit				
	Toimintopaikan tunniste	Painoarvot W -->	30	20	100	30	10	K	Ks	Ke	Kp	Kq
631488	4	0	2	2	0	0	960	0	160	800	0	0
631490	4	0	2	2	0	0	960	0	160	800	0	0
631491	4	0	2	2	0	0	960	0	160	800	0	0
631484	3	0	2	2	0	0	720	0	120	600	0	0
631402	6	0	0	1	0	0	600	0	0	600	0	0
631444	2	0	4	2	0	0	560	0	160	400	0	0
631450	2	0	4	2	0	0	560	0	160	400	0	0

Kuva 19. Melko kriittiset laitteet

Tuloksista nousee esiin laitteet 631488, 631490 ja 631491, jotka lähentelevät 1000 pisteen rajaa. Laitteiden korkeat pisteet johtuvat tuotannon menetyksen osaindeksistä, joka on 800 pistettä. Laitteita voisi harkita nostettavaksi kriittisten laitteiden kategoriaan suuren tuotannon menetyksen merkityksen takia. Laitteiden 631444 ja 631450 vikaantuminen voi aiheuttaa paikallista laitosalueen saastumista. Laitteille löytyy varasuunnitelmat, joten tuotannon menetyksen riski pystytään minimoimaan. Laitteille tulisi suorittaa ympäristöriskien kartoitus ja selvittää pystytäänkö riskeihin vaikuttamaan millään tavalla vai pystytäänkö niiden kanssa elämään.

7.4 Vähän kriittiset laitteet

Vähän kriittisillä laitteilla kriittisyysindeksi on 101–500. Ryhmässä on 20 laitetta ja laitteet muodostavat 44 % kokonaisuuden analysoidusta linjasta. Laitteiden kriittisyysindeksit johtuvat vikaantumisvälistä ja ympäristöriskien, laatukustannusten ja tuotannon menetyksen osaindeksistä. Vähän kriittisten laitteiden tulokset löytyvät kuvasta 20.

RYHMÄ 1.	Vikaantumisväli (1...6)	Turvallisuus (0...16)	Ympäristö 0...16	Tuotannon menetys (0...4)	Laatukustannus (0...2)	Luokse pääsevyys (0...4)	Kriittisyysindeksi	Kriittisyyden osaindeksit				
								Ks	Ke	Kp	Kq	Kr
Toimintopaikan tunniste	Painoarvot W -->	30	20	100	30	10	K					
631480	2	0	2	2	0	0	480	0	80	400	0	0
631482	2	0	2	2	0	0	480	0	80	400	0	0
631486	2	0	2	2	0	0	480	0	80	400	0	0
631406	4	0	0	1	0	0	400	0	0	400	0	0
631404	3	0	0	1	0	0	300	0	0	300	0	0
631472	3	0	0	1	0	0	300	0	0	300	0	0
631408	1	0	4	2	0	0	280	0	80	200	0	0
631442	1	0	4	2	0	0	280	0	80	200	0	0
631416	2	0	0	1	1	0	260	0	0	200	60	0
631434	2	0	0	1	1	0	260	0	0	200	60	0
631438	2	0	0	1	1	0	260	0	0	200	60	0
631492	1	0	2	2	0	0	240	0	40	200	0	0
631494	1	0	2	2	0	0	240	0	40	200	0	0
631446	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631448	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631452	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631454	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631458	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631460	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0
631466	1	0	0	2	0	0	200	0	0	200	0	0

Kuva 20. Vähän kriittiset laitteet

Vähän kriittisten laitteiden tuloksista ei nouse esille suuria huomioitavia asioita. Kriittisyysindeksit noudattelevat tuotannon menetyksen osaindeksin pisteitä. Ympäristöriskeistä ja laatukustannuksista tulee kymmenien pisteiden kasvu kriittisyysindeksiin, mutta vikaantumisvälin ollessa 6-12kk tai yli vuosi voidaan ne jättää pienelle huomiolle. Sopivan välin tullessa laitteille tulisi suorittaa ympäristöriskien ja laatukustannusten kartoitus.

7.5 Ei kriittiset laitteet

Ei kriittisillä laitteilla kriittisyysindeksi on 0–100. Ryhmässä on 15 laitetta ja laitteet muodostavat 33 % kokonaisuuden analysoidusta linjasta. Ei kriittisten laitteiden tulokset löytyvät kuvasta 21.

RYHMÄ 1.	Vikaantumisväli (1...6)	Turvallisuus (0...16)	Ympäristö 0...16	Tuotannon menetys (0...4)	Laatukustannus (0...2)	Luokse pääsevyys (0...4)	Kriittisyysindeksi	Kriittisyyden osaindeksit					
								Ks	Ke	Kp	Kq	Kr	
Toimintopaikan tunniste	Painoarvot W -->	30	20	100	30	10	K						
631422	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0	0
631426	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0	0
631430	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0	0
631432	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0	0
631436	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0	0
631462	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0	0
631464	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0	0
631468	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0	0
631470	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0	0
631474	1	0	0	1	0	0	100	0	0	100	0	0	0
631412	1	0	4	0	0	0	80	0	80	0	0	0	0
631410	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631414	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631440	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Kuva 21. Ei kriittiset laitteet

Ei kriittisistä laitteista ei nouse esille huomioitavia tekijöitä. Vikaantumisväli on kaikilla yli vuoden ja maksimissaan linja seisoo kaksi tuntia. Laitteen 631412 ympäristöriskeille voi suorittaa tarvittaessa riskikartoituksen.

8 Johtopäätökset

Tutkimuksessa päästiin asetettuun tavoitteeseen. Koskiselle saatiin kehitettyä puuteollisuuden tuotantolaitokseen sopiva kriittisyysanalyysi, jolla löydetään tuotantolaitoksen kriittiset laitteet. Voidaan myös todeta, että PSK 6800 standardi soveltuu käytettäväksi puuteollisuudessa. Kriittisyysanalyysiä pystytään käyttämään koko tuotantolaitokseen ja saadaan luokiteltua laitteet kriittisyyden mukaan. Suurimmat kriittisyysluokittelun ongelmat liittyivät sen toteutukseen ja käytäntöön vientiin. Tärkeintä kriittisyysluokittelussa on, että kriittisyysanalyysin tuloksena saadaan selkeä ja perusteltu laitteiden kriittisyyksien jaottelu, jonka tulokset viedään käytäntöön. Useissa tapauksissa käytettävä menetelmä on liian raskas ja aikaa vievä prosessi, minkä takia käytäntöön vienti voi jäädä vaiheeseen. Tähän kiinnitettiin tutkimuksessa huomiota ja saatiin luotua käytännöllinen ja helposti toistettava kriittisyysanalyysi.

Jatkotutkimusaiheiksi nousi esille kriittisyysluokitelluille laitteille suoritettavat toimenpiteet, kuten varaosien kriittisyyden määrittely, ennakkohuoltosuunnitelmien muokkaaminen ja riskianalyysit. Kaikille kriittisille laitteille ei voida varastoida korvaavaa laitetta, joten kriittisyyttä pystytään minimoimaan varaosien kriittisyyden tarkastelulla. Kun tunnistetaan tärkeimmät vikaantuvat laitteet, tunnistetaan myös niiden komponentit ja pystytään selvittämään varaosien toimitusajat. Kun kriittisimmät varaosat tunnistetaan, voidaan varmistaa niiden jatkuva saatavuus varaosavarastosta tai toimittajalta.

Teoreettisessa osuudessa esitettyjä kunnossapitostrategioita voidaan soveltaa ennakkohuoltosuunnitelmissa laitteen kriittisyyden mukaan. Tutkimuksen jälkeisenä työnä tarkennettavat huoltosuunnitelmat vaikuttavat kunnossapidon suunnitelmallisuuden kehittymiseen, kriittisten laitteiden toiminta varmistetaan tehokkaammin ja saadaan kokonaiskäsitys prosesseista. Laitteille pystytään priorisoimaan huoltotyöt ja resursointi. Ennakkohuollot osataan kohdistaa kriittisimmille laitteille ja yli- tai alihuollolta vältytään. Kriittisyysluokituksen ansiosta osataan myös valita oikeat huoltotoimenpiteet ja -välit vikojen ehkäisemiseksi. Lisäksi kiireen keskellä kriittisyysluokittelun ansiosta nähdään työkuormasta heti kriittisimmät laitteet ja kunnossapitotyöt, joihin resurssit voidaan kohdentaa ensimmäisenä.

Tuotannon ja turvallisuuden kannalta kriittisimmät laitteet huolletaan ja korjataan mahdollisimman nopeasti, vähemmän kriittiset myöhemmin.

Kriittisten laitteiden riskien pienentämiseen ehdotetaan tarkempaa analyysiä. Teoreettisessa osuudessa esitettyjä riskianalyysejä yritys voi käyttää kriittisten laitteiden riskien arvioimiseen. Näin löydetään mahdolliset vikaantumisen riskit ja arvioida, että onko vikaantumisesta aiheutuva riski hyväksyttävissä vai ei. Kunnossapidon resurssit ovat kuitenkin rajalliset ja on ymmärrettävää, että tähän ei välttämättä ole aikaa. Vähintään jatkossa tulisi suorittaa juurisyysanalyysiä vikaantumisen sattuessa. Juurisyysanalyysillä löydetään vikaantumisen perimmäiset syyt ja häiriön toistuminen poistetaan, eikä vain perustella kaikkia vikaantumisia kulumisella.

Ylläpidollisesti merkittävää on jatkotoimenpiteisiin ryhtyminen ja niistä pitäminen kiinni. Kriittiset varaosat selvitetään ja niiden saatavuus varmistetaan. Ennakkohuoltosuunnitelmia muokataan kriittisyysluokittelen mukaiseksi ja suunnitelmaa noudatetaan. Tärkeää on myös jatkaa kriittisyysanalyysien tekoa koko tuotantolaitokseen. Lisäksi uusien linjojen tullessa laitteille voidaan heti suorittaa kriittisyysanalyysi. Kriittisyysanalyysi voidaan tehdä joko suunnitteluvaiheessa tai linjan saapuessa. Suunnitteluvaiheessa voidaan heti tunnistaa kriittisiä toimintoja ja laitetta voidaan muokata tarvittaessa. Jos riskeihin ei voida vaikuttaa rakenteellisesti, niihin osataan varautua ja ne voidaan pyrkiä minimoimaan parhaalla tavalla.

Tutkimuksen rajoitteena oli epäkohdat ja puutteet järjestelmän tiedoissa. Työraporteissa oli puutteita ja tietoa tuotannon vaikutuksista ei ollut saatavilla. Lisäksi työt usein kohdistuivat liian ylätasolle laitehierarkiassa ja kirjatut korjausajat eivät olleet riittävän yksityiskohtaisia, jolloin mukana ovat siirtymiset korjaamon, kohteen ja varasto välillä, osien etsimiset, hallinnollinen odotusaika, kuten raportointi järjestelmään. Näin ollen ei tiedetä, mikä työn suorittamisessa on vienyt aikaa. Tästä syystä testauksessa jouduttiin osittain turvautumaan tehtaan henkilökunnan arvioihin. Kyseiset ongelmat huomioitiin myös arviointikriteerejä ja asteikkoja määriteltäessä, kun mietittiin mitä oikeasti pystytään mittaamaan. Samoja ongelmia on tullut myös esille muissa tutkimuksissa.

9 Yhteenveto

Diplomityön tavoitteena oli kehittää puuteollisuuden tuotantolaitokseen sopiva kriittisyysanalyysi. Diplomityö tehtiin Koskisen Oy:lle, koska tuotantolaitoksen laitteille ei ollut suoritettu kriittisyysluokittelua ja siihen ei löytynyt valmista työkalua. Tuotantolaitoksien tuotantomäärien kasvaessa ja laitteiden käyttöasteiden noustessa, oli tullut aiheelliseksi suorittaa kriittisyysluokittelua. Tutkimuksen toteutusvaihe suoritettiin tuotantolaitoksen kriittisimpään linjaan. Muiden linjojen laitteiden kriittisyysluokittelu jää yrityksen vastuulle. Kriittisyysanalyysin pohjana käytettiin PSK 6800 standardia, koska menetelmä oli ennalta tuttu ja helposti muokattavissa. Menetelmää ei ollut ennen käytetty puuteollisuuden tuotantolaitoksessa ja tutkimukset PSK 6800 muokattavuuteen liittyen olivat puutteellisia. Tästä syystä diplomityössä keskityttiin erityisesti kriittisyysanalyysin muokkaamisprosessiin.

Tutkimuksen toteutusvaiheessa oli kolme eri ryhmää. Tiivis tulosten tarkasteluryhmä, joka analysoi ja teki taustatyön kriittisyysanalyysin muokkaamisessa ja kaksi testausryhmää. Tulosryhmä koostui kunnossapitopäälliköstä, tuotantopäälliköstä ja tuotekehityspäälliköstä. Testausryhmä 1 koostui tuotannon operaattorista, lähiesimiehestä ja kunnossapidon insinööristä, joka toimi opastajana käydessä linjaa läpi. Testausryhmä 2 koostui sähkön ja mekaanisen kunnossapidon esimiehistä ja asentajista. Useammilla testausryhmillä ja tiiviillä tulosryhmällä saatiin varmistettua paras mahdollinen tietotaito ja aikataulun pitäminen.

Tutkimus aloitettiin laatimalla tulosryhmän kanssa kriittisyysanalyysin alustavat arviointikriteerit ja painoarvot. Tämän jälkeen siirryttiin testausvaiheeseen, jossa laskentalomake, palautelomake ja tarkat ohjeet lähetettiin testausryhmille. Testausryhmät saivat suorittaa testin omalla aikataululla annetun takarajan puitteissa. Tämä toistettiin kaksi kertaa, kunnes arviointikriteereihin ja painoarvoihin oltiin Koskisella tyytyväisiä. Testien välissä tulokset ja kehitysehdotukset käytiin läpi tulosryhmän kanssa. Arviointikriteerejä muokattiin tulosten ja palaverissa heränneiden kehitysehdotuksien perusteella. Lopullisiksi arviointikriteereiksi testausten jälkeen valikoitui vikaantumisväli, luokse pääsevyys, tuotannon menetys, laatu-kustannus, turvallisuusriskit ja ympäristöriskit.

Toisen testin jälkeen kriittisyysanalyysiä ei enää tarvinnut muokata, joten tuloksia pystyttiin käyttämään virallisessa kriittisyysluokittelussa. Ryhmien samankaltaisten tulosten takia tulospalaverissa päätettiin lopullisessa analyysissä käyttää pelkästään ryhmän 1 tuloksia. Lisäksi jatkossa kriittisyysanalyysiä suoritettaessa kunnossapidon ja tuotannon ryhmät tulisi yhdistää. Kaksien tuloksien saaminen ei enää hyödytä, kun testausvaiheesta edetään pois. Tarkemmassa analyysissä huomattiin, että kriittisyysanalyysi toimii halutulla tavalla. Laitteiden kriittisyysindeksit perustuivat laitteen vikaantumisväliin ja tuotannon menetyksen kertoimeen, jota painoarvoja ja asteikkoja määritettäessä haluttiin. Vikaantumisvälin merkitys on suuri, koska se on osaindeksien summan kerroin ja tuotannon menetyksen merkitys johtuu sille annetusta isosta painoarvosta. Ympäristöriskeillä ja laatukustannuksilla oli pieni merkitys kriittisyysindeksiin. Luokse pääsevyyden merkitys oli kaikilla laitteilla 0, eli laitteiden luokse päästään alle 30 minuutissa. Myöskään laitteiden vikaantuminen ei aiheuta loukkaantumis- tai terveysvaaraa eli kaikkien laitteiden turvallisuusriskien kerroin oli 0.

Työn käytännön tuloksena saatiin käyttövalmis kriittisyysanalyysi puuteollisuuden tuotantolaitokseen ja selkeä kriittisyysanalyysin muokkaamisprosessi, jota voidaan hyödyntää jatkossa muilla toimialoilla. Lisäksi 6314 linjan laitteet saatiin kriittisyysluokiteltua. Työn teoreettiset tulokset antavat lukijalle tarvittavat taustatiedot kriittisyysanalyysin muokkaamiseen, toteuttamiseen ja jatkotoimenpiteiden suunnitteluun. Lisäksi tulosten perusteella voidaan väittää, että kunnossapidosta tehdyt tutkimukset ovat aikaansa edellä. Käytännön todellisuus tuotannonlaitoksissa on vielä jäljessä kehityksestä, vaikka töitä kehityksen eteen tehdään todella paljon. Laitteiden kriittisyysluokittelun voidaankin väittää olevan iso askel kohti nykypäivän kunnossapitoa ja kunnossapidon tuomaa lisäarvoa.

Lähteet

Abimbola, M., Khan, F., Khakzad, N. & Butt, S. 2015. Safety and risk analysis of managed pressure drilling operation using Bayesian network. *Safety science*. Vol. 76, s. 133–144.

Ahonen, T. 2005. Järjestelmien käyttökokemustietojen yhdistäminen ja hyödyntäminen vikaantuvuuden ennustamisessa. Espoo: Valtion tieteellinen tutkimuskeskus.

Amyotte, P. & Khān, F. 2019. *Methods in chemical process safety*. Cambridge, Massachusetts: Academic Press.

Aven, T. 2008. A semi-quantitative approach to risk analysis, as an alternative to QRAs. *Reliability engineering & system safety*. Vol. 93, nro. 6, s. 790–797.

Bensi, M., Kiureghian, A. D. & Straub, D. 2013. Efficient Bayesian network modeling of systems. *Reliability engineering & system safety*. Vol. 112, s. 200–213.

Bertsche, B. 2008. *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering: Determination of Component and System Reliability*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Bevilacqua, M. & Braglia, M. 2000. Fuzzy modelling and analytical hierarchy processing as a means of quantifying risk levels associated with failure modes in production systems. *Journal of Technology, Law, and Insurance*. Vol. 5, nro. 3, s. 125-134.

Bhandari, J., Abbassi, R., Garaniya, V. & Khan, F. 2015. Risk analysis of deepwater drilling operations using Bayesian network. *Journal of loss prevention in the process industries*. Vol. 38, s. 11–23.

Bobbio, A., Portinale, L., Minichino, M. & Ciancamerla, E. 2001. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. *Reliability engineering & system safety*. Vol. 71 nro. 3, s. 249–260.

Cai, B., Liu, Z., Tian, X., Zhang, Y. & Ji, R. 2013. Application of Bayesian Networks in Quantitative Risk Assessment of Subsea Blowout Preventer Operations. *Risk analysis*. Vol. 33 nro. 7, s. 1293–1311.

Dekker, R. 1996. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 52, nro. 3, s. 229-240.

Dhillon, B. S. 2002. *Engineering Maintenance: A Modern Approach*. CRC Press, New York, NY.

Gallimore, K. F. & Penlesky, R. J. 1988. A framework for developing maintenance strategies”, *Production and Inventory Management Journal*. Vol. 29, nro. 1, s. 16–22.

Garvey, P. R. & Lansdowne, Z. F. 1998. Risk Matrix: An Approach for Identifying, Assessing, and Ranking Program Risks. *Air Force Journal of Logistics*. Vol. 22, s. 18-21.

Geweke, J. 2007. Bayesian Model Comparison and Validation. *The American economic review*. Vol. 97, nro. 2, s. 60–64.

Gugaliya, A., Boral, S. & Naikan, V. N. A. 2019. A hybrid decision making framework for modified failure mode effects and criticality analysis: A case study on process plant induction motors. *The International journal of quality & reliability management*. Vol. 36, nro. 8, s. 1266–1283.

Haapakoski, P. 2020. Voimalaitoksen kunnossapidon kehittäminen: Laitteiden kriittisyysluokittelu ja kriittisten laitteiden varaosataseen optimointi.

Heckerman, D. & Wellman, M. P. 1995. Bayesian networks: Real-World Applications of Bayesian Networks. *Communications of the ACM*. Vol. 38, nro. 3, s. 27–30.

Heino, V. 2015. Kriittisyysanalyysin kehittäminen kemianalan tuotantolaitokseen.

Kwon, O. & Lee, H. 2004. Calculation methodology for contributive managerial effect by OEE as a result of TPM activities. *Journal of quality in maintenance engineering*. Vol. 10, nro. 4, s. 263–272.

Laine, H. S. 2010. Tehokas kunnossapito: tuottavuutta käynnissäpidolla. Helsinki: KP-Media.

Jain, A., Bhatti, R. S. & Singh, H. 2015. OEE enhancement in SMEs through mobile maintenance: a TPM concept. *The International journal of quality & reliability management*. Vol. 32, nro. 5, s. 503–516.

Järviö, J. 2004. Kunnossapito. 2. p. Rajamäki: KP-Media.

Järviö, J. 2007. Kunnossapito. 4. p. Helsinki: KP-Media.

Järviö, J. & Lehtiö, T. 2017. Kunnossapito: tuotanto-omaisuuden hoitaminen. Rajamäki: KP-Tieto.

Kelly, A. 1997. Maintenance Strategy Business Centred Maintenance. Elsevier and Butterworth-Heinemann, New York, NY.

Kennedy, W. J., Patterson, W. & Frienddall, L. D. 2002. An overview of recent literature on spare parts inventories. *International journal of production economics*. Vol. 76, nro. 2, s. 201–215.

Khakzad, N., Khan, F. & Amyotte, P. 2013. Quantitative risk analysis of offshore drilling operations: A Bayesian approach. *Safety science*. Vol. 57, s. 108–117.

Kobbacy, K. A. H. & Murthy, D. N. P. 2008. *Complex System Maintenance Handbook*. London: Springer-Verlag London Limited.

Komonen, K. 2002. A cost model of industrial maintenance for profitability analysis and benchmarking. *International journal of production economics*. Vol. 79, nro. 1, s. 15–31.

Krishnasamy, L. Khan, F. & Haddara, M. 2005. Development of a risk-based maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant. *Journal of loss prevention in the process industries*. Vol. 18, nro. 2, s. 69–81.

Lampis, M. & Andrews, J. D. 2009. Bayesian belief networks for system fault diagnostics. *Quality and reliability engineering international*. Vol. 25, nro. 4, s. 409–426.

Mahadevan, S., Zhang, R. & Smith, N. 2001. Bayesian networks for system reliability reassessment. *Structural safety*. Vol. 23, nro. 3, s. 231–251.

Marcello, B., Davide, C. & Marco, F. 2013. An integer linear programming approach to maintenance strategies selection. *International Journal of Quality & Reliability Management*. Vol. 30, nro. 9, s. 991-1016.

Marttonen-Arola, S. 2022. Modeling the wasted value of data in maintenance investments. *Journal of quality in maintenance engineering*. Vol. 28, nro. 1, s. 213–232.

Meel, A. & Seider, W. D. 2006. Plant-specific dynamic failure assessment using Bayesian theory. *Chemical engineering science*. Vol. 61, nro. 21, s. 7036–7056.

Mikkonen, H. (2009) *Kuntoon perustuva kunnossapito: käsikirja*. Helsinki: KP-Media.

Modarres, M., Kaminskiy, M. & Krivtsov, V. 2017. *Reliability engineering and risk analysis: a practical guide*.

Moubray, J. 1997. *Reliability-centered maintenance*. 2. p. New York: Industrial Press.

Nguyen, T. P. K., Yeung, T. G. & Castanier, B. 2013. Optimal maintenance and replacement decisions under technological change with consideration of spare parts inventories. *International journal of production economics*. Vol. 143, nro. 2, s. 472–477.

Ni, H., Chen, A. & Chen, N. 2010. Some extensions on risk matrix approach. *Safety science*. Vol. 48, nro. 10, s. 1269–1278.

Nima, S., Dragan, B. & Andrew, K. S. J. 2010. Impact of the use-based maintenance policy on the performance of cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research*. Vol. 48, nro. 8, s. 2233-2260.

Nolan, F. S. & Heap, H. F. 1978. *Reliability-Centered Maintenance*. U. S. Department of Commerce.

Nurkka, J. 2016. Satakunnan lennoston maalaitteiden huoltotoiminnan kehittäminen.

Pagès, A. & Gondran, M. 1986. *System reliability: evaluation and prediction in engineering*. London: North Oxford Academic.

Parikka, R. & Ahlroos, T. 2002. Tuotteen turvallisuuden ja käyttövarmuuden suunnittelu: Nykytilanteen kartoitus. VTT Technical Research Centre of Finland. Tutkimusraportti BVAL73-011175.

Pertiwi, S., Hermawan, W. & Prahmawati, E. 2019. Maintenance Cost Reduction of Paddy Seed Production Machinery by Implementing Preventive Maintenance System. IOP conference series. *Materials Science and Engineering*. Vol. 557, nro. 1, s. 12075.

Pintelon, L. M. & Gelders, L. F. 1992. Maintenance management decision making. *European Journal of Operational Research*. Vol. 58, nro. 3, s. 301–317.

Pintelon, L., Pinjala, S. K., Verecke, A. Raouf, A. BenDaya, M. & Duffuaa, S. 2006. Evaluating the effectiveness of maintenance strategies. *Journal of quality in maintenance engineering*. Vol. 12, nro. 1, s. 7–20.

Plummer, F. B. 2007. *Project engineering: The essential toolbox for young engineers*. Amsterdam: Butterworth-Heinemann.

PSK 6201. 2011. *Kunnossapito: käsitteet ja määritelmät*. 4. p. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.

PSK 6800. 2008. *Laitteiden kriittisyysluokittelu teollisuudessa*. 4. p. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.

PSK 7501. 2010. *Prosessiteollisuuden kunnossapidon tunnusluvut*. 2. p. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.

Salmia, A. 2019. *Sahalinjan kriittisyysanalyysi*.

SFS-EN 13306. 2010. *Kunnossapidon terminologia*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-IEC 60300-3-9. 2000. *Luotettavuusjohtaminen osa 3: Käyttöopas*. Luku 9: Teknisten järjestelmien riskianalyysi.

Shalev, D. M. & Tiran, J. 2007. Condition-based fault tree analysis (CBFTA): A new method for improved fault tree analysis (FTA), reliability and safety calculations. *Reliability engineering & system safety*. Vol. 92, nro. 9, s. 1231–1241.

Simeu-Abazi, Z. & Sassine, C. 2001. Maintenance integration in manufacturing systems: from the modelling tool to evaluation. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*. Vol. 13, nro. 2, s. 267-285.

Smith, D. J. 2011. *Reliability, maintainability, and risk practical methods for engineers*. 8. p. Oxford: Elsevier Ltd.

Stapelberg, R. F. 2009. *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*. London: Springer London.

Sutton, I. 2015. *Process risk and reliability management*. 2. p. Oxford: GPP.

Swanson, L. 2001. Linking maintenance strategies to performance. *International Journal of Production Economics*. Vol. 70, nro. 3, s. 237-244.

Vahanen, M. 2019. Paperikoneen mekaanisten laitteiden kriittisyysluokittelu ja ennakko-huollon tilanteen selvitys.

Velmurugan, R. S. & Dhingra, T. 2015. Maintenance strategy selection and its impact in maintenance function: A conceptual framework. *International journal of operations & production management*. Vol. 35, nro. 12, s. 1622–1661.

Väänänen, M., Nieminen, T. & Jokinen, J. 2003. Kunnossapidon tietojärjestelmät - osa yrityksen tiedonhallintaa. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu.

Willmott, P. 1994. Total productive maintenance. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Willmott, P. & McCarthy, D. 2000. TPM - a Route to World Class Performance: A Route to World Class Performance. Oxford: Elsevier Science & Technology.

Zio, E. 2007. An introduction to the basics of reliability and risk analysis. Singapore: World Scientific.

Yu, X. 2018. Risk assessment of the maintenance process for onshore oil and gas transmission pipelines under uncertainty. Reliability engineering & system safety. Vol. 177, s. 50–67.

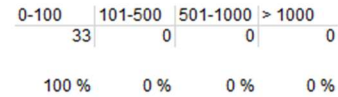
Liite 2. Muokattu kriittisyyden laskentataulukko

Laitos:
 Kriittisyyden luokittelun kohde:
 Tekijät:
 Versio:
 Päiväys:

Kriittisyyden raja-arvo 1000
 Tuotannon menetyksen painoarvokerroin $\frac{1000}{100}$

	Vikaantumisväli (1_6)	Turvallisuus (0_16)	Ympäristö (0_16)	Tuotannon menetys (0_4)	Laatukustannus (0_2)	Luokse pääsevyys (0_4)	Kriittisyyden osaindeksit					
Toimintopaikan tunniste	Painoarvot W -->	30	20	100	30	10	K	Ks	Ke	Kp	Kq	Kr
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0

Kriittisyyden indeksikategoriat



Vikaantumisväli	Asteikko	6	4	3	2	1
	Kpl	0	0	0	0	0
Turvallisuusriskit	Asteikko	16	8	4	2	0
	Kpl	0	0	0	0	0
Ympäristöriskit	Asteikko	16	8	4	2	0
	Kpl	0	0	0	0	0
Tuotannon menetys	Asteikko	4	3	2	1	0
	Kpl	0	0	0	0	0
Laatukustannukset	Asteikko	2	1	0		
	Kpl	0	0	0		
Luokse pääsevyys	Asteikko	4	3	2	1	0
	Kpl	0	0	0	0	0