

Aalto Yliopisto

Perustieteiden korkeakoulu

Raul Kleinberg

TURVALLISUUDELLE TÄRKEIDEN LAITTEIDEN KOESTUSTEN MERKITYS VIKOJEN HAVAITSEMISESSA

Kandidaatintyö

Espoo 23. maaliskuuta 2012

Työn valvoja: Prof. Ahti Salo

Työn ohjaaja: Suunnittelupäällikkö Kalle Jänkälä

AALTO-YLIOPISTO TEKNILLINEN KORKEAKOULU PL 11000, 00076 Aalto http://www.aalto.fi		KANDIDAATINTYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Raul Kleinberg			
Työn nimi: Turvallisuudelle tärkeiden laitteiden koestusten merkitys vikojen havaitsemisessa			
Tiedekunta: Informaatio- ja luonnontieteiden tiedekunta			
Tutkinto-ohjelma: Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma			
Pääaine: Systeemitieteet		Pääaineen koodi: Mat-2	
Vastuopettaja: Prof. Ahti Salo			
Ohjaaja: Suunnittelupäällikkö, TkL Kalle Jänkälä, Fortum Power and Heat Oy			
<p>Tiivistelmä:</p> <p>Loviisan ydinvoimalaitoksella on tuhansia erilaisia turvallisuudelle tärkeitä laitteita, joille sattuu käyttöhistoriansa aikana vikaantumisia. Tässä kandidaatintyössä kartoitetaan Loviisan ydinvoimalaitoksella sattuneiden vikaantumisten havaitsemistavat. Työssä selvitetään erityisesti laitoksella suoritettavien määräaikaiskoestusten merkitys vikojen havaitsemisessa. Määräaikaiskoestuksissa erilaisten laitteiden toimintakuntoisuus varmistetaan säännöllisin aikavälein, esimerkiksi venttiilit ajetaan auki ja kiinni sekä pumput käynnistetään.</p> <p>Työssä tarkastellaan laitetyypeistä venttiileitä, pumppuja ja dieselgeneraattoreita sekä erillisenä kokonaisuutena mittauksia. Työn aineistona oli Loviisan voimalaitosyksiköiden 1 ja 2 vikahistoria kummankin laitoksen kaupallisen käytön alusta vuoden 2011 alkuun saakka. Työssä tarkastellaan vikojen havaitsemistapojen merkitystä ensin koko vikahistorian ajalla, minkä jälkeen tarkastelu laajennetaan ydinvoimalaitoksen erilaisille järjestelmille. Seuraavaksi tutkitaan vikaantumisten havaitsemistapojen jakaantumista eri laitetyypeille. Lopuksi tarkastellaan erillisenä kokonaisuutena vikojen havaitsemistapojen osuuksia mittauksille.</p> <p>Työssä saatiin tilastollisesti merkitseviä tuloksia. Määräaikaiskoestukset havaittiin merkittävimmäksi vikojen havaitsemistavaksi. Eri järjestelmien väliltä löydettiin eroavaisuuksia vikojen havaitsemistapojen osuuksissa ja erityisesti määräaikaiskoestuksissa havaittujen vikojen osuuksissa. Myös laitetyyppien väliltä löydettiin eroavaisuuksia, mutta erot olivat kuitenkin pienempiä kuin esimerkiksi järjestelmien välillä. Mittauksille saatiin hyvin erilaiset tulokset verrattuna muihin laitetyyppeihin. Mittauksien kohdalla vioista havaittiin suurin osa oireista valvomossa.</p>			
Päivämäärä: 23.3.2012		Kieli: suomi	Sivumäärä: 19 + 1
Avainsanat: PRA, PSA, riskianalyysi, ydinvoima, määräaikaiskoestus			

Alkusanat

Työskenneltyäni kesän 2011 harjoittelijana Fortum Power and Heat Oy:n ydinturvallisuusosaston PRA-ryhmässä minulle tarjoutui mahdollisuus jatkaa osa-aikaisena harjoittelijana opintojeni ohessa. Esimieheni Kalle Jänkälä tarjosi minulle työtehtävää, josta pystyin kirjoittamaan myös kandidaatintyöni. Mahdollisuus työn ja opinnäytetyön yhdistämisestä oli minulle luonnollisesti erittäin mieluisa.

Haluan kiittää esimiestäni Kalle Jänkälää mielenkiintoisesta kandidaatintyön aiheesta, tarvittavasta ohjauksesta ja palautteesta työn aikana sekä PRA-ryhmää mukavasta työilmapiiristä. Lisäksi haluan kiittää professori Ahti Saloa kandidaatintyön valvonnasta.

Lopuksi kiitokset kuuluvat vanhemmilleni Arjalle ja Heikille sekä tyttöystävälleni Annalle kannustuksesta.

Raul Kleinberg

Espoossa 23. Maaliskuuta 2012

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	iii
Symboli- ja lyhenneluettelo	v
1. Johdanto.....	6
1.1. Taustaa	6
1.2. Työn tavoite.....	6
2. Työn tausta	7
2.1. Tarkasteltavat järjestelmät.....	7
2.2. Tarkasteltavat laitteet.....	8
2.3. Vikojen havaitseminen	8
3. Tutkimusongelma- ja menetelmät.....	10
3.1. Tutkimushistoria ja valitut perustapahtumat.....	10
3.2. Tutkimusmenetelmät ja tilastollinen testaus.....	10
3.2.1. Suhteellisten osuuksien vertailutesti.....	10
3.2.2. Jakaumaoletuksien testaaminen χ^2 -homogeenisuustestillä	12
3.2.3. Suhteellisen osuuden luottamusväli.....	13
4. Tulokset.....	14
4.1. Tarkasteluhistorian valinta	14
4.2. Vertailu järjestelmittäin	15
4.3. Vertailu laitetyypeittäin.....	17
4.3.1. Venttilien viat	18
4.3.2. Pumppujen viat.....	18
4.3.3. Dieselgeneraattoreiden viat	19
4.4. Mittaukset.....	20
5. Johtopäätökset.....	23
Viitteet.....	24
Liitteet	25

Symboli- ja lyhenneluettelo

- PSA/PRA Todennäköisyyspohjainen turvallisuus/riskianalyysi
- L01 Loviisa 1-voimalaitosyksikkö
- L02 Loviisa 2-voimalaitosyksikkö

1. Johdanto

1.1. Taustaa

Loviisan ydinvoimalaitoksella on tuhansia erilaisia turvallisuudelle tärkeitä laitteita ja komponentteja. Osa laitteista on laitoksen normaalilla tehoajolla jatkuvassa käytössä, kuten primääripiirin pääkiertopumput. Jotkut laitteet ovat vuoroittaiskäytössä. Monet turvallisuudelle tärkeät laitteet ovat kuitenkin laitoksen normaalikäytön aikana varalla. Pumput seisovat ja venttiilit ovat perustilassa. Tällaisten laitteiden toimintavarmuudesta mahdollisen vaateen tullessa ei olisi riittävää varmuutta ellei laitteille suoritettaisi määräaikaista koestuksia. Koestuksissa laitteiden toimintakuntoisuus varmistetaan. Pumput käynnistetään, venttiilit ajetaan auki ja kiinni.

Käyttöhistoriansa aikana laitteet vikaantuvat. Turvallisuudelle tärkeiden varalla olevien laitteiden viat havaitaan Loviisan ydinvoimalaitoksella yleensä määräaikaiskoestuksissa. Vikaantumisia havaitaan myös muilla tavoilla. Osa laitteiden vikaantumistavoista voi olla jatkuvassa valvonnassa, jolloin puhutaan monitoroiduista laitteista. Monitoroituja laitteita on automaatiojärjestelmissä. Esimerkiksi mittauksia valvotaan jatkuvasti. Jos mittauksen arvo poikkeaa sitä varmentavista rinnakkaisista mittauksista, valvomoon tulee hälytys ja vikaantuminen havaitaan välittömästi. Vikoja voidaan havaita myös esimerkiksi käyttötärpeen tullessa tai laitoksella suoritettavilla vuorokierroksilla. (Jänkälä, 2011).

1.2. Työn tavoite

Tässä työssä pyritään Loviisan ydinvoimalaitosten vikahistorian perusteella selvittämään turvallisuudelle tärkeiden laitteiden vikojen havaitsemistavat. Vikojen havaitsemistavat kerätään Loviisan voimalaitoksen vikahistoriasta. Kun vikojen havaitsemistavat on määritetty, pyritään erityisesti vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

- Mikä on eri havaitsemistapojen osuus vikojen havaitsemisessa?
- Mikä on määräaikaiskoestusten rooli vikojen havaitsemisessa?
- Miten vikoja havaitaan laitetyypeittäin ja järjestelmittain?
- Miten vikaantumiset havaitaan erilaisille mittauksille?

Työn tuloksia voidaan hyödyntää Loviisan ydinvoimalaitoksella määräaikaiskoestuksia ja määräaikaiskoestusvälejä arvioitaessa. Tulokset pyritään verifioimaan tilastollisilla menetelmillä.

2. Työn tausta

2.1. Tarkasteltavat järjestelmät

Loviisan voimalaitos jakautuu kokonaisuutena useisiin kymmeneen eri järjestelmiin, joista tähän työhön valikoitui käsiteltäväksi yhteensä 13 eri järjestelmää:

- EY Dieselgeneraattorit
- RA Tuorehöyryputkisto
- RL Syöttövesipiiri
- RR Primääripiirin seisontajäähdytys
- RV Laitosisäveden syöttö
- TC Primääriveden puhdistus
- TF Reaktorin välijäähdytyspiiri
- TH Hätäjäähdytysjärjestelmä
- TJ Hätälisävesijärjestelmä
- TK Normaali lisävesi- ja vuotojenkeruujärjestelmä
- TQ Sprinklerijärjestelmä
- VF Sivumerivesipiiri
- YD Pääkiertopumput

Järjestelmät TC, TK ja YD ovat laitoksen primääripiirin järjestelmiä. TC-järjestelmä puhdistaa primääripiirin veden epäpuhtauksista, joita ovat lähinnä korroosiotuotteet. TK-järjestelmän jatkuva tehtävä on vastaanottaa primäärijäähdytteen valvotut vuodot. YD-järjestelmän kuusi pääkiertopumppua ylläpitävät primäärijäähdytteen virtausta reaktorissa.

Järjestelmät RA, RL, RR ja RV ovat sekundääripiirin järjestelmiä. RA-järjestelmä toimittaa tuorehöyryn höyrystimistä turbiineihin ja RL-järjestelmä pitää höyrystimien vedenpinnat asetusarvoissaan reaktorin tehokäytön aikana. RR-järjestelmä ylläpitää jäähdytyskiertoa laitoksen seisokissa, jotta reaktorissa syntyvä jälkilämpö siirtyy höyrystimistä lämmönsiirtimien kautta meriveteen. RV-järjestelmän tehtävänä on korvata sekundääripiirin vesihäviöt.

EY-, TF-, TH-, TJ-, TQ- ja VF-järjestelmät ovat turvallisuusjärjestelmiä. EY-järjestelmä varmentaa laitoksen sähkösaannin häiriötilanteissa. Järjestelmät TH, TQ, TV ja VF muodostavat hätälämmönsiirtoketjun, jonka avulla reaktorin jälkilämpöteho siirretään

mereen. TJ-järjestelmä vastaa boorihappopitoisen lisäveden pumppaamisesta primääripiiriin, mikäli normaali lisävesijärjestelmä ei pysty ylläpitämään riittävää jäähdytemäärää primääripiirissä. (Fortum Power and Heat Oy, 2012). Mittauksia kerättiin lisäksi muutamista muista järjestelmistä, jotka on käsitelty erikseen mittauksia käsittelevässä luvussa.

2.2. Tarkasteltavat laitteet

Laitteiden osalta työssä keskitytään pumppuihin, venttiileihin ja dieselgeneraattoreihin. Tarkasteltavia venttiileitä löytyy kaikista edellisessä kappaleessa käsitellyistä järjestelmistä ja tarkasteltavia pumppuja järjestelmistä EY, RL, TF, TH, TJ, TK, TQ ja VF. Dieselgeneraattoreita on tarkastelussa 4 kappaletta, jotka kaikki ovat järjestelmässä EY tunnuksilla EY01-04. Myös puhaltimien tarkastelua harkittiin, mutta puhaltimien vähäisen vikamäärän takia niitä ei otettu tarkasteluun. Lisäksi tarkastellaan erilaisia mittauksia, jotka voivat olla termostaatteja, pinnan-, lämpötila- tai painemittauksia.

2.3. Vikojen havaitseminen

Voimalaitoksella tapahtuneet vikaantumiset kerätään laitoksen vikahistoriaan. Vikaantumisista kirjataan ylös useita tietoja tarkasti määriteltyjen kategorioiden mukaan. Tässä työssä vikaantumisiin liittyvistä tiedoista kiinnostavia ovat

- Päivämäärä
- Kz-tunnus
- Vian vaikutus laitteeseen (B)
- Vian havaitsemistapa (A)
- Vioittumistapa (H)
- Koestusväli (T)

Kz-tunnus identifioi laitteen käyttöpaikan. Kz-tunnus sisältää tiedon laitoksesta, laitteen redundanttisuudesta ja järjestelmästä. Jos laite on redundanttinen, sen toiminta on varmennettu vähintään yhdellä samanlaisella laitteella. Toisilleen redundanttisen laitteiden toiminnan täytyy olla toisistaan riippumatonta. Lisäksi kz-tunnuksesta selviää laitteen prosessiosa, laitekoodi ja juokseva numero. (Kelavirta, 2010).

Vian vaikutus laitteeseen (B) merkitään numerolla 1,2,3 tai 4. Numerointi tarkoittaa seuraavaa:

1. Vika estää käytön
2. Huolto/korjaus estää käytön
3. Ei vaikutusta käyttöön

4. Ei vaikutusta käyttöön käyttöjaksolla

Tässä työssä kiinnostavat vikatapaukset ovat ainoastaan B=1-tapauksia eli kriittisiä vikaantumisia, jotka aiheuttavat välittömästi laitteen epäkäytettävyyden. Suurin osa vioista on ei-kriittisiä. Ei-kriittinen vika ei aiheuta laitteelle lainkaan epäkäytettävyyttä tai vasta vian korjauksesta aiheutuu epäkäytettävyyttä. (Jänkälä ym., 2010).

Vian havaitsemistapa (A) merkitään kokonaisluvulla väliltä 1-9 seuraavasti

1. Oireista valvomossa
2. Muuten havaittu (välittömästi vian synnyttyä)
3. Vuorokierroksella
4. Määräaikaiskoestuksen yhteydessä
5. Ennakkohuoltotyön yhteydessä
6. Käyttötarpeen tullessa
7. Kunnon/laadunvalvonnan yhteydessä
8. Korjauksen tai korjauksen jälkeisen koekäytön yhteydessä
9. Satunnaisesti

Koska työssä pyritään selvittämään määräaikaiskoestusten merkitys vikaantumisten havaitsemisessa, ovat luonnollisesti "A=4"-tapaukset erityisen kiinnostavia. Vioittumistavat on jaettu periaatteessa 24 eri kategoriaan, mutta tässä työssä keskitytään ainoastaan kahteen, jotka ovat

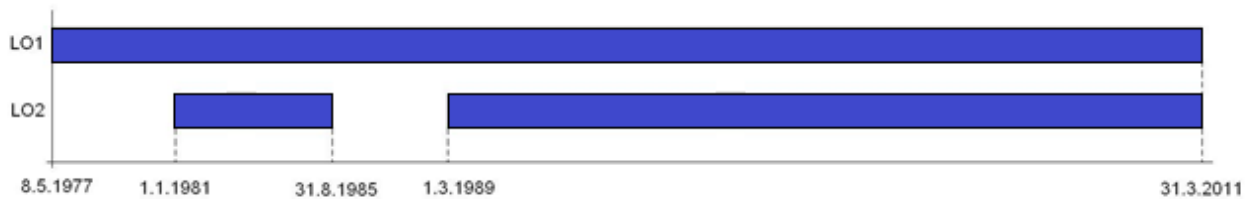
- A Epäonnistunut käynnistyminen, avautuminen, tilanmuutos, signaali tai jännitekytkentä
- B Epäonnistunut pysähtyminen, sulkeutuminen, tilanmuutos

Pumpuille ja generaattoreille huomioidaan vain vikaantumistapa A eli epäonnistunut käynnistyminen. Venttiileille huomioidaan sekä A- että B-vikaantumiset, jotka tarkoittavat joko epäonnistunutta avautumista tai sulkeutumista. Mittauksille huomioidaan vain vikaantumistyyppi A eli epäonnistunut signaali. (Jänkälä ym., 2010).

3. Tutkimusongelma- ja menetelmät

3.1. Tutkimushistoria ja valitut perustapahtumat

Loviisan voimalaitoksen kerättyä vikahistoriaa on hyödynnetty tässä työssä kuvan 1 mukaisesti. LO1:n osalta on ollut käytettävissä vikahistoria laitoksen kaupallisen käytön alusta 8.5.1977. LO2:n osalta vikahistoriaa on hyödynnetty käytön alusta 1.1.1981 lähtien, mutta vikahistoria sisältää aukon ajalla 1.9.1985–28.2.1989. Kummankin laitoksen osalta vikahistoriaa on ollut käytettävissä 31.3.2011 asti.



Kuva 1: Loviisan voimalaitoksen vikojen keräyshistoria

Perustapahtuma ja huipputapahtuma ovat todennäköisyyspohjaiseen riskianalyysiin liittyviä käsitteitä. Perustapahtumat ovat erilaisia komponenttien vikatapahtumia. Määrittämällä eri perustapahtumien todennäköisyydet ja niiden väliset riippuvuussuhteet voidaan määrittää huipputapahtuman todennäköisyys ja näin kvantifioida systeemin riskit. Otetaan esimerkkinä jäähdytyskierto, jota ylläpitää kaksi pumppua. Normaalitylanteessa kummatkin pumput seisovat ja onnettomuustilanteessa ne käynnistetään. Perustapahtumana on pumpun epäonnistunut käynnistyminen. Kummankin pumpun epäonnistunut käynnistyminen johtaa huipputapahtumaan, joka on epäonnistunut jäähdytys. (Modarres, 2006, 48-49).

Työhön valituista 13 voimalaitoksen järjestelmästä otettiin tarkasteluun yhteensä 433 laitteelle kohdistettua perustapahtumaa, joita laitoksien vikahistoriasta kerättiin yhteensä 527 kappaletta. Lisäksi mittauksille otettiin 534 perustapahtumaa, joita oli tapahtunut 197 kappaletta. Perustapahtumat on valittu sen mukaan, että ne ovat mukana Loviisan ydinvoimalaitoksen todennäköisyyspohjaisessa riskimallissa. (Jänkälä ym., 2010).

3.2. Tutkimusmenetelmät ja tilastollinen testaus

Ensin kartoitettiin Loviisan voimalaitoksen riskimallista halutut perustapahtumat mukaan tarkasteluun. Seuraavaksi vikahistoriasta suodatettiin kyseisiä perustapahtumia vastaavat vikaantumiset. Suodatetun vikahistorian avulla pystyttiin tekemään halutut tutkimukset vikaantumisten havaitsemistavoista. Suurin osa tutkimuksesta tehtiin Excel- taulukkolaskentaohjelmalla. Muutamia tilastollisia analyysejä suoritettiin Statistix-tilasto-ohjelmalla. Seuraavaksi esitetään menetelmien teoreettinen tausta.

3.2.1. Suhteellisten osuuksien vertailutesti

Olkoon tapahtuma $A = \text{”Perusjoukon alkiolla on ominaisuus } P\text{”}$, esimerkiksi työn tapauksessa havaitun vian ominaisuus on $A = \text{”vika on havaittu määräaikaistestauksessa”}$. Olkoon

$p = \Pr(A)$ todennäköisyys poimia perusjoukosta S satunnaisesti alkio, jolla on ominaisuus P . Jos perusjoukko S on äärellinen, todennäköisyys p kuvaa niiden perusjoukon S alkioiden suhteellista osuutta, joilla on ominaisuus P . Olkoon A perusjoukon S tapahtuma ja olkoot

$$\Pr(A) = p \quad (1)$$

$$\Pr(A^c) = 1 - p = q. \quad (2)$$

Määritellään satunnaismuuttuja X :

$$X = \begin{cases} 1, & \text{jos } A \text{ sattuu} & \Pr(X = 1) = p \\ 0, & \text{jos } A \text{ ei satu} & \Pr(X = 0) = 1 - p = q \end{cases} \quad (3)$$

Tällöin $X \sim \text{Bernoulli}(p)$, $E(X) = p$ ja $\text{Var}(X) = pq$. Kahdesta riippumattomasta otoksesta laskettuja suhteellisia osuuksia voidaan verrata suhteellisten osuuksien vertailutestillä.

Yleinen hypoteesi H on muotoa:

$$\text{Havainnot } X_{i1} \sim \text{Bernoulli}(p_1), i = 1, 2, \dots, n_1, \text{ jossa } p_1 = \Pr(A), A \subset S_1 \quad (4)$$

$$\text{Havainnot } X_{j2} \sim \text{Bernoulli}(p_2), j = 1, 2, \dots, n_2, \text{ jossa } p_2 = \Pr(A), A \subset S_2 \quad (5)$$

$$\text{Havainnot } X_{i1} \text{ ja } X_{j2} \text{ ovat riippumattomia kaikille } i \text{ ja } j. \quad (6)$$

Nollahypoteesi on

$$H_0: p_1 = p_2 = p \quad (7)$$

ja vaihtoehtoinen hypoteesi:

$$1 - \text{suuntainen vaihtoehtoinen hypoteesi} \quad \begin{cases} H_1: p_1 > p_2 \\ H_2: p_1 < p_2 \end{cases} \quad (8)$$

$$2 - \text{suuntainen vaihtoehtoinen hypoteesi} \quad H_1: p_1 \neq p_2. \quad (9)$$

Estimaattorit suhteellisille osuuksille lasketaan kaavasta

$$\hat{p}_k = \frac{f_k}{n_k}, k = 1, 2, \quad (10)$$

missä f_k on tapahtuman A frekvenssi otoksessa k ja n_k otoksen k koko. Jos nollahypoteesi H_0 pätee, voidaan otokset yhdistää ja parametrin p harhaton estimaattori laskea kaavasta

$$\hat{p} = \frac{f_1 + f_2}{n_1 + n_2}. \quad (11)$$

Määritellään testisuure:

$$z = \frac{\hat{p}_1 - \hat{p}_2}{\sqrt{\hat{p}(1 - \hat{p})\left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}\right)}} \quad (12)$$

Jos nollasshypoteesi pätee, niin testisuure noudattaa suurissa otoksissa approksimatiivisesti standardoitua normaalijakaumaa. Approksimaatio on riittävän hyvä, jos

$$n_1 \hat{p}_1 \geq 5, n_1(1 - \hat{p}_1) \geq 5 \quad (13)$$

$$n_2 \hat{p}_2 \geq 5, n_2(1 - \hat{p}_2) \geq 5. \quad (14)$$

(Mellin, 2008, 90).

3.2.2. Jakaumaoletuksien testaaminen χ^2 -homogeenisuustestillä

Käytettävissä on vähintään kaksi havaintoaineistoa ja halutaan tutkia, ovatko aineistot peräisin samasta jakaumasta. Yleisen hypoteesin H mukaan perusjoukko on jaettu r :n eri ryhmään, joista on poimittu toisistaan riippumattomat satunnaisotokset. Nollasshypoteesi H_0 ja vaihtoehtoinen hypoteesi H_1 ovat muotoa

- H_0 : Otokset $i = 1, 2, \dots, r$ on poimittu samasta todennäköisyysjakaumasta

- H_1 : Otokset $i = 1, 2, \dots, r$ on poimittu eri todennäköisyysjakaumista

Jaotellaan otokset, joiden otoskoot ovat n_i , luokkiin. Luokkia on yhteensä c kappaletta ja luokkien koot ovat C_j . Merkataan ryhmän i luokkaan j kuuluvien havaittua frekvenssiä O_{ij} . Jos nollasshypoteesi pätee, on jokaisen ryhmän i kohdalla luokan j todennäköisyys sama p_j .

Estimaatti p_j lasketaan kaavasta

$$p_j = \frac{C_j}{n}. \quad (15)$$

Odotettu frekvenssi ryhmässä i ja luokassa j saadaan kaavasta

$$E_{ij} = n_i p_j = \frac{C_j n_i}{n}. \quad (16)$$

χ^2 -testisuure lasketaan kaavalla

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}}. \quad (17)$$

Jos nollasshypoteesi pätee, testisuure noudattaa suurissa otoksissa approksimatiivisesti χ^2 -jakaumaa vapausastein

$$f = (r - 1)(c - 1). \quad (18)$$

Approksimaatio on tavallisesti riittävän hyvä, jos

$$E_{ij} > 1, i = 1, 2, \dots, r, j = 1, 2, \dots, c \quad (19)$$

$$\frac{C_j}{r} > 5, r = 1, 2, \dots, c. \quad (20)$$

(Mellin, 2008, 97-99).

3.2.3. Suhteellisen osuuden luottamusväli

Suhteellisen osuuden harhaton estimaattori määriteltiin

$$\hat{p} = \frac{f}{n}, \quad (21)$$

Suhteellisen osuuden p approksimatiivinen luottamusväli luottamustasolla $(1 - \alpha)$ on

$$\left(\hat{p} - z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\hat{p}(1 - \hat{p})}{n}}, \hat{p} + z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\hat{p}(1 - \hat{p})}{n}} \right), \quad (22)$$

missä $z_{\frac{\alpha}{2}}$ on luottamustasoon $(1 - \alpha)$ liittyvä luottamuskerroin standardoidusta normaalijakaumasta $N(0,1)$. (Mellin, 2008, 55-56).

4. Tulokset

4.1. Tarkasteluhistorian valinta

Ennen varsinaista vikaantumisten havaitsemistapojen kartoitusta ja vertailua tutkitaan, hyödynnetäänkö koko käytössä olevaa laitoksen kerättyä vikahistoriaa vai rajataanko vikahistorian käyttöä ajallisesti. Loviisan voimalaitoksella otettiin käyttöön 1.3.1989 ATK-pohjainen työsuunnittelujärjestelmä, josta vikatiedot saadaan haettua suoraan koodattuna ”PSA-datana” (Jänkälä ym. 2010). Työsuunnittelujärjestelmän käyttöönoton myötä vikadata saattaa olla luotettavampaa, joten jaotellaan tarkasteluun otetut vikatapahtumat kyseisen päivämäärän mukaan. Taulukossa 1 on esitetty vikatapahtumat havaitsemistavan mukaan jaoteltuna koko laitoksen vikojen keräyshistorian ajalta. Lisäksi vikaantumiset on jaettu ennen 1.3.1989 tapahtuneisiin, ja kyseisestä päivämäärästä eteenpäin tapahtuneisiin.

Taulukko 1: Vikaantumisten havaitsemistapojen jakaantuminen

	Havaitsemistapa (A)									Yhteensä
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Koko historia	75	28	7	360	5	37	3	10	2	527
	14,2 %	5,3 %	1,3 %	68,3 %	0,9 %	7,0 %	0,6 %	1,9 %	0,4 %	
8.5.1977-	9	20	0	130	2	3	0	0	0	164
28.2.1989	5,5 %	12,2 %	0,0 %	79,3 %	1,2 %	1,8 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	
1.3.1989-	66	8	7	230	3	34	3	10	2	363
31.3.2011	18,2 %	2,2 %	1,9 %	63,4 %	0,8 %	9,4 %	0,8 %	2,8 %	0,6 %	

Taulukosta 1 voidaan tehdä muutamia huomioita. Ensinnäkin vioista suurin osa havaitaan tavalla 4 eli määräaikaosastuksissa. Ennen päivämäärää 1.3.1989 määräaikaosastusten osuus on hieman suurempi kuin kyseisestä päivämäärästä eteenpäin. Toisaalta vioista on selvästi suurempi osuus merkattu 1.3.1989 jälkeen tavalla 6 havaituksi (käyttötarpeen tullessa). Sama pätee havaitsemistavalle 1 eli oireista valvomossa havaituille vioille. Havaitsemistavalla 2 (muuten välittömästi vian synnyttä) havaittujen vikojen osuus on kuitenkin suurempi vanhoille vioille. On mahdollista, että osa A=2 vioista on todellisuudessa A=1 vikoja.

Näiden havaintojen myötä on jo syytä epäillä, etteivät vikaantumiset noudatan samaa jakaumaa ennen ja jälkeen päivämäärää 1.3.1989. Varmennetaan tulos kuitenkin tilastollisesti χ^2 -homogeenisuustestillä. Testataan nollahypoteesia ”vikaantumistavat noudattavat samaa jakaumaa”. Jotta testin luotettavuusehdot kaavoissa (19) ja (20) täyttyvät yhdistetään havaitsemistapojen 3,5,7 ja 9 mukaiset viat. χ^2 -testin tulokset ovat esillä liitteessä 2. P-arvoksi saadaan nolla neljän merkitsevän numeron tarkkuudella, joten nollahypoteesi voidaan hylätä kaikilla perinteisillä merkitsevyystasoilla eli vikojen havaitsemistavat eivät noudata samaa jakaumaa päivämäärän 1.3.1989 mukaan jaoteltuna.

Koska vikojen havaitsemistavat eivät noudata samaa jakaumaa eri aikajaksoilla, käytetään ensisijaisesti tutkimuksessa tuoreempaa vikahistoriaa, eli ATK-pohjaisen työsuunnittelujärjestelmän jälkeen kerättyä vikahistoriaa. Hyödynnetään kuitenkin tarpeen vaatiessa myös vanhempaa vikahistoriaa. Vanhemman historian käytöstä on mainittu erikseen työssä.

4.2. Vertailu järjestelmittäin

Tarkastellaan vikatapahtumien jakaantumista havaitsemistavan mukaan eri järjestelmille. Huomioidaan koko käytössä oleva vikahistoria, jotta saataisiin riittävästi vikatapauksia eri järjestelmille. Taulukossa 2 on esitetty vikatapahtumien jakaantuminen järjestelmittäin. Lisäksi liitteeseen 1 on koottu vikojen havaitsemistapojen suhteelliset osuudet prosenteissa järjestelmittäin. Vaikka vikaantumisten kokonaislukumäärät vaihtelevat järjestelmien välillä, on tärkeää muistaa, että tässä tarkastelussa huomioidusta vikaantumisten määrästä ei voida vetää johtopäätöksiä järjestelmän vikaantumisherkkyydestä, koska eri järjestelmistä on huomioitu eri määrä laitteita ja perustapahtumia.

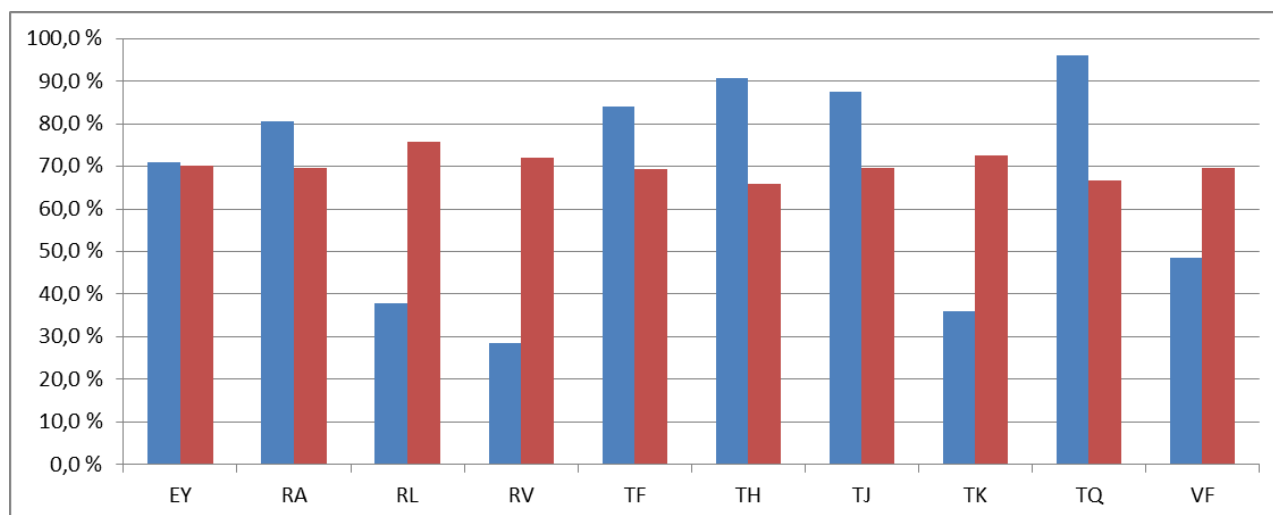
Taulukko 2: Vikaantumisten havaitsemistavat järjestelmittäin

	Havaitsemistapa (A)									Yhteensä
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Kaikki	75	28	7	360	5	37	3	10	2	527
EY	12	6	1	73	3	0	2	5	1	103
RA	2	2	2	33	0	0	0	1	1	41
RL	33	2	1	31	0	14	0	1	0	82
RR	1	1	0	2	0	1	0	0	0	5
RV	6	6	1	6	0	2	0	0	0	21
TC	0	0	0	4	0	0	0	0	0	4
TF	1	1	0	37	0	4	0	1	0	44
TH	2	0	0	48	2	1	0	0	0	53
TJ	2	0	0	21	0	0	1	0	0	24
TK	10	5	1	13	0	5	0	2	0	36
TQ	2	0	0	71	0	1	0	0	0	74
VF	3	5	1	17	0	9	0	0	0	35
YD	1	0	0	4	0	0	0	0	0	5

Taulukon 2 ja liitteen 1 perusteella nähdään, että määrääikaiskoestusten eli havaitsemistavan 4 rooli järjestelmien RA, TH, TF, TJ ja TQ vikojen kohdalla on huomattava. Toisaalta nähdään, että RL-, RV- ja TK-järjestelmissä on selvästi suurempi suhteellinen osuus vioista havaittu tavalla 1 eli oireista valvomossa koko laitoksen keskiarvoon verrattuna.

Tarkastellaan seuraavaksi määrääikaiskoestusten merkitystä vikojen havaitsemisessa tilastollisesti. Jätetään järjestelmät RR, TC ja YD pois tarkastelusta vikojen lukumäärän vähäisyyden vuoksi. Kuvassa 2 on havainnollistettu määrääikaiskoestusten osuutta vikojen havaitsemisessa. Jokaiselle järjestelmälle on laskettu kaksi arvoa, jotka ovat myös esillä

taulukossa 3. Ensimmäinen arvo (P_4) eli sininen palkki on kussakin järjestelmässä määräaikaikoestuksissa havaittujen vikojen osuus. Toinen arvo ($P_{4, \text{muut}}$) eli punainen palkki on kaikista muista järjestelmistä laskettu määräaikaikoestuksilla havaittujen vikojen osuus.



Kuva 2: Määräaikaikoestuksissa havaittujen vikojen osuus

EY-järjestelmän määräaikaikoestuksissa havaittujen vikojen osuus näyttäisi vastaavan muiden järjestelmien keskiarvotasoa. Järjestelmien RA, TF, TH, TJ ja TQ osuus vaikuttaisi olevan suurempi ja järjestelmien RL, RV, TK ja VF vastaavasti pienempi. Vertaillaan määräaikaikoestusten osuutta järjestelmien välillä aikaisemmin käsitellyn suhteellisten osuuksien vertailutestin avulla. Käytetään merkitsevyytasolle α arvoa 0,05. Taulukossa on esitetty suhteellisen osuuden vertailutestin tulokset kullekin järjestelmälle.

Taulukko 3: Suhteellisen osuuden vertailutestit ja 95 %:n luottamusvälit

Järjestelmä	P_4	95 %:n Lv.	$P_{4, \text{muut}}$	H_1	Testisuure	P-arvo	Hylkäys?
EY	70,9 %	± 8,7 %	70,2 %	$p_1 > p_2$	0,126	0,448	Ei
RA	80,5 %	± 12,1 %	69,6 %	$p_1 > p_2$	1,443	0,075	Ei
RL	37,8 %	± 10,4 %	75,7 %	$p_1 < p_2$	-6,778	0,000	Kyllä
RV	28,6 %	± 19,2 %	71,9 %	$p_1 < p_2$	-4,183	0,000	Kyllä
TF	84,1 %	± 10,8 %	69,2 %	$p_1 > p_2$	2,030	0,021	Kyllä
TH	90,6 %	± 7,8 %	65,8 %	$p_1 > p_2$	3,672	0,000	Kyllä
TJ	87,5 %	± 13,2 %	69,6 %	$p_1 > p_2$	1,841	0,033	Kyllä
TK	36,1 %	± 15,6 %	72,6 %	$p_1 < p_2$	-4,543	0,000	Kyllä
TQ	95,9 %	± 4,5 %	66,6 %	$p_1 > p_2$	5,030	0,000	Kyllä
VF	48,6 %	± 16,5 %	69,7 %	$p_1 < p_2$	-2,598	0,005	Kyllä

Aiemmin tehdyt johtopäätökset pystytään pitkälti vahvistamaan. TF-, TH-, TJ- ja TQ-järjestelmien määräaikaikoestuksissa havaittujen vikojen suurempi osuus ja RL-, RV-, TK- ja VF-järjestelmien pienempi osuus muiden järjestelmien keskiarvotasoon verrattuna on tilastollisesti merkitsevä. Kuitenkin RA-järjestelmälle nollahypoteesi jää voimaan, vaikka

havaitsemistavan 4 osuus on yli kymmenen prosenttiyksikköä suurempi verrattuna muiden järjestelmien keskiarvoon. Myös EY-järjestelmälle nollahypoteesi jäi voimaan, mikä oli odotettavissa.

4.3. Vertailu laitetyypeittäin

Tutkitaan miten vikojen havaitsemistavat jakautuvat eri laitteille. Laitteiden vikatapaukset eri laitteille jaoteltuna havaitsemistavan mukaan on esitetty taulukossa 4. Taulukossa on havaitsemistapojen lukumäärän lisäksi esillä kunkin havaitsemistavan suhteellinen osuus.

Taulukko 4: Vikaantumisten havaitsemistavat laitetyypeittäin

	Havaitsemistapa (A)									Yhteensä
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Venttiilit	50	2	5	132	0	29	1	3	1	223
	22,4 %	0,9 %	2,2 %	59,2 %	0,0 %	13,0 %	0,4 %	1,3 %	0,4 %	
Pumput	4	2	1	42	1	5	1	2	1	59
	6,8 %	3,4 %	1,7 %	71,2 %	1,7 %	8,5 %	1,7 %	3,4 %	1,7 %	
Diesel-generaattorit	12	4	1	56	2	0	1	5	0	81
	14,8 %	4,9 %	1,2 %	69,1 %	2,5 %	0,0 %	1,2 %	6,2 %	0,0 %	

Pumppujen ja dieselgeneraattoreiden määräaikaikoeostusten osuus vikojen havaitsemisissa on samaa suurusluokkaa eli noin 70 prosenttia. Venttiileille osuus on noin kymmenen prosenttiyksikköä vähemmän. Huomionarvoista on havaitsemistavan 1 pieni osuus pumpuille. Tutkitaan määräaikaikoeostuksissa havaittujen vikojen osuutta tarkemmin. Testaan nollahypoteesia ”määräaikaikoeostuksissa havaittujen vikojen osuus on sama” suhteellisten osuuksien vertailutestillä laitepareille ”venttiilit ja pumput”, ”venttiilit ja dieselgeneraattorit” sekä ”pumput ja dieselgeneraattorit”. Vaihtoehtoiset hypoteesit ja testien tulokset ovat esillä taulukossa 5. Käytetään merkitsevyystasolle α arvoa 0,05.

Taulukko 5: Suhteellisten osuuksien vertailutestit

H_1	Testisuure	P-arvo
$p_{\text{venttiilit}} < p_{\text{pumput}}$	-1,685	0,046
$p_{\text{venttiilit}} < p_{\text{dieselgeneraattorit}}$	-1,578	0,057
$p_{\text{pumput}} > p_{\text{dieselgeneraattorit}}$	0,261	0,397

Taulukko 6: 95 %:n luottamusvälit

Laite	P_4	95 %:n Lv.
Venttiilit	59,2 %	$\pm 6,4 \%$
Pumput	71,2 %	$\pm 11,5 \%$
Dieselgeneraattorit	69,1 %	$\pm 10,0 \%$

Venttiilien pienempi osuus verrattuna pumppuihin on tilastollisesti merkitsevä, kun taas venttiilien pienempi osuus dieselgeneraattoreihin verrattuna ei ole. Pumppujen ja dieselgeneraattoreiden suhteellisen osuuden erot eivät ole tilastollisesti merkitseviä. Vanhemman historian käyttäminen ei muuta tuloksia. Taulukossa 6 on esitetty lopuksi luottamusvälit suhteellisille osuuksille. Tutkitaan seuraavaksi tarkemmin vikojen

havaitsemistapojen jakautumista eri laitteiden alatyypeille ja hyödynnetään koko historiaa riittävien vikatapausten saamiseksi.

4.3.1. Venttiilien viat

Venttiilit on jaoteltu taulukon 7 mukaisiin alatyyppeihin. Taulukossa on esillä vikojen havaitsemistapojen jakaumat eri alatyypeille ja vastaavat suhteelliset osuudet.

Taulukko 7: Venttiilien vikaantumisten havaitsemistavat

	Havaitsemistapa (A)									Yhteensä
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Venttiilit	59	21	5	231	2	31	1	3	1	354
	16,7 %	5,9 %	1,4 %	65,3 %	0,6 %	8,8 %	0,3 %	0,8 %	0,3 %	
Takaisku	0	0	0	4	0	0	0	0	0	4
	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	
Eristys	0	1	0	13	0	0	0	0	0	14
	0,0 %	7,1 %	0,0 %	92,9 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	
Paineen- alennus	1	1	1	4	0	0	0	0	0	7
	14,3 %	14,3 %	14,3 %	57,1 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	
Magneetti	1	0	1	5	0	0	0	1	0	8
	12,5 %	0,0 %	12,5 %	62,5 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	12,5 %	0,0 %	
Moottori	46	16	2	193	2	29	1	1	1	291
	15,8 %	5,5 %	0,7 %	66,3 %	0,7 %	10,0 %	0,3 %	0,3 %	0,3 %	
Säätö	11	3	1	12	0	2	0	1	0	30
	36,7 %	10,0 %	3,3 %	40,0 %	0,0 %	6,7 %	0,0 %	3,3 %	0,0 %	

Venttiilien alatyyppeiden vikojen havaitsemistapojen suhteellisille osuuksille on hankalaa tehdä luotettavia tilastollisia testejä, koska suurin osa vioista on tapahtunut moottoriventtiileille. Takaisku-, eristys-, paineenalennus- ja magneettiventtiilejä on tarkastelussa vähän verrattuna moottoriventtiileihin. Kyseisiä venttiilityyppejä pidetään luotettavina, mikä selittää osaltaan vikojen pientä määrää. Säätöventtiileistä voidaan huomioida määräaikaistestusten pienempi osuus. Testataan täten nollahypoteesia, että moottori- ja säätöventtiilien määräaikaistestuksissa havaittujen vikojen osuus on sama. Vaihtoehdoisen hypoteesin mukaan moottoriventtiilien kohdalla osuus on suurempi. Testisuureen arvo on 2,858 ja vastaava p-arvo 0,002. Käytettävällä 95 %:n merkitsevyydestasolla nollahypoteesi voidaan hylätä. Näin moottoriventtiilien kohdalla vioista havaitaan suurempi osa määräaikaistestuksissa kuin säätöventtiilien kohdalla.

4.3.2. Pumppujen viat

Pumput voidaan jakaa kahteen ryhmään; vuoroittaiskäytössä oleviin TF- ja VF-järjestelmistä löytyviin pumppuihin ja muihin varalla oleviin. Taulukosta 8 huomataan, että vuoroittaiskäytössä olevien pumppujen vioista on huomattu pienempi osa määräaikaistestuksissa. Vuoroittaiskäytössä olevien pumppujen vioista huomattavan suuri

osa on havaitsemistavan 6 (käyttötarpeen tullessa) mukaisia, mikä on loogista, koska kyseisiä pumppuja käynnistetään ja sammutetaan toistuvasti likimain yhtä usein kuin koestetaan. Verrataan määräaikaikoestusten osuutta suhteellisten osuuksien vertailutestillä. Nollahypoteesin mukaan vuoroittaiskäytössä olevien ja muiden pumppujen välillä ei ole eroa määräaikaikoestuksissa havaittujen vikojen osuudessa. Vaihtoehdoisen hypoteesin mukaan vuoroittaiskäyttöisten kohdalla osuus on pienempi.

Taulukko 8: Pumppujen vikaantumisten havaitsemistavat

	Havaitsemistapa (A)									Yhteensä
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Pumput	4	2	1	60	1	6	1	2	1	78
	5,1 %	2,6 %	1,3 %	76,9 %	1,3 %	7,7 %	1,3 %	2,6 %	1,3 %	
Vuoro	1	1	0	15	0	5	0	0	0	22
	4,5 %	4,5 %	0,0 %	68,2 %	0,0 %	22,7 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	
Muut	3	1	1	45	1	1	1	2	1	56
	5,4 %	1,8 %	1,8 %	80,4 %	1,8 %	1,8 %	1,8 %	3,6 %	1,8 %	

Testisuureen arvoksi saadaan -1,148 ja vastaavaksi p-arvoksi 0,125. Näin ollen nollahypoteesi jää voimaan. Vuorokäyttöisten ja muiden pumppujen välillä ei ole tilastollista eroa määräaikaikoestuksissa havaittujen vikojen osuuksissa.

4.3.3. Dieselgeneraattoreiden viat

Dieselgeneraattoreiden vioista voidaan käsitellä erikseen automaatioviat. Taulukossa 9 on jaoteltu dieselgeneraattoreiden viat automaatiovikoihin ja muihin vikoihin.

Taulukko 9: Dieselgeneraattoreiden vikaantumisten havaitsemistavat

	Havaitsemistapa (A)									Yhteensä
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Diesel- generaattorit	12	5	1	69	2	0	1	5	0	95
	12,6 %	5,3 %	1,1 %	72,6 %	2,1 %	0,0 %	1,1 %	5,3 %	0,0 %	
Automaatio	6	0	1	29	1	0	0	2	0	39
	15,4 %	0,0 %	2,6 %	74,4 %	2,6 %	0,0 %	0,0 %	5,1 %	0,0 %	
Muut	6	5	0	40	1	0	1	3	0	56
	10,7 %	8,9 %	0,0 %	71,4 %	1,8 %	0,0 %	1,8 %	5,4 %	0,0 %	

Automaatiovioissa havaitsemistapojen 1 ja 4 mukaisten vikojen osuus on hieman suurempi kuin muilla vioilla. Muiden vikojen kohdalla havaitsemistavan 2 mukaisten vikojen ero on suurin. On kuitenkin mahdollista, että osa kyseisistä vioista on todellisuudessa havaitsemistavan 1 vikoja. Dramaattisia eroja vikojen havaitsemistapojen osuuksissa ei kuitenkaan ole havaittavissa. Testataan vielä määräaikaikoestuksissa havaittujen vikojen osuuden eroa automaatiovioille ja muille vioille. Nollahypoteesin mukaan osuudella ei ole merkitsevää eroa ja vaihtoehdoisen hypoteesin mukaan automaatiovikojen kohdalla osuus on

suurempi. Testisuuren arvo on 0,315 ja vastaava p-arvo 0,375. Näin ollen määräaikaistestauksissa havaittujen vikojen osuuksissa ei ole tilastollisesti merkitsevää eroa automaatiovikojen ja muiden vikojen välillä.

4.4. Mittaukset

Tässä kappaleessa käsitellään mittausten vikaantumisten havaitsemistapojen jakaantuminen. Mittaukset käsitellään erillisenä kokonaisuutena, koska mittaukset eroavat ns. perinteisistä laitteista kuten pumpuista ja venttiileistä erityisesti vikojen havaittavuuden osalta.

Loviisan ydinvoimalaitoksella on lukuisia erilaisia mittauksia, joilla saadaan tärkeää tietoa laitoksen prosessiparametreista, kuten paineista, pinnankorkeuksista ja lämpötiloista. Useat laitoksen turvallisuustoiminnot käynnistyvät erilaisten mittauksien perusteella. Loviisan todennäköisyyspohjaisessa mallissa on mallinnettu useita onnettomuuksien hallinnan ja ehkäisyn kannalta tärkeitä mittauksia. Mittauksien vikaantumisten havaitsemistapojen tutkimus on tehty Juho Helanderin tekemän raportin ”Loviisa 1, mittausten epäkäytettävyyksien päivitys” pohjalta (Helander, 2011).

Erilaisia mittauksille kohdistettuja perustapahtumia otettiin tutkimukseen mukaan yhteensä 534 kappaletta, joita oli laitoksen käyttöhistoriassa tapahtunut yhteensä 197 kappaletta. Mittauksia kerättiin kappaleessa 2.1 mainituista järjestelmistä RA, RR, TC, YA, TH ja lisäksi järjestelmistä:

- TE Primääriveden poistovesien puhdistus
- TG Polttoainealtaiden jäähdytys
- TL Valvottujen alueiden ilmastointi
- YA Primääriputkisto
- YB Höyrystimet
- YC Reaktoripaineastia
- YP Paineentausjärjestelmä
- VA Meriveden puhdistus
- UV Ilmastointi ja lämmitys
- UW Ilmastointi ja lämmitys

Mittaukset jaettiin neljään eri alatyyppeihin, joita ovat paine-, pinta- ja lämpötilamittaukset sekä termostaatit. Mittauksien kohdalla vikaantumisten havaitsemistavat jaotellaan kuten muillakin laitteilla eli yhdeksään eri kategoriaan. Taulukossa 10 on esitetty vikaantumisten

havaitsemistapojen jakaantuminen mittauksille ja alatyypeille. Vikaantumiset on kerätty vika historiasta ajalta 12.2.1991–31.12.2010.

Taulukosta 10 nähdään mittauksen vikaantumistapojen hyvin erilainen jakaantuminen verrattuna muihin edellisissä kappaleissa käsiteltyihin laitteisiin. Kaikista mittauksien vioista havaitaan melkein 80 prosenttia havaitsemistavan 1 mukaan. Määräaikaiskoestuksissa vioista on havaittu 6,1 prosenttia, joten määräaikaiskoestusten rooli on puolestaan hyvin pieni, Verrattuna kaikkiin mittauksiin suuria eroja ei ole havaittavissa mittausten alatyypin kohdalla paitsi termostaateissa. Termostaattien vikojen otoskoko on kuitenkin pieni, joten johtopäätösten teko on vaikeaa.

Taulukko 10: Vikaantumisten havaitsemistavat mittauksille

	Havaitsemistapa (A)									Yhteensä
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Mittaukset	154 78,2 %	3 1,5 %	12 6,1 %	12 6,1 %	5 2,5 %	3 1,5 %	3 1,5 %	2 1,0 %	3 1,5 %	197
Paine	42 75,0 %	2 3,6 %	2 3,6 %	4 7,1 %	3 5,4 %	0 0,0 %	1 1,8 %	1 1,8 %	1 1,8 %	56
Pinta	80 80,8 %	1 1,0 %	6 6,1 %	5 5,1 %	2 2,0 %	2 2,0 %	1 1,0 %	0 0,0 %	2 2,0 %	99
Lämpötila	32 88,9 %	0 0,0 %	2 5,6 %	0 0,0 %	0 0,0 %	1 2,8 %	1 2,8 %	0 0,0 %	0 0,0 %	36
Termostaatit	0 0,0 %	0 0,0 %	2 33,3 %	3 50,0 %	0 0,0 %	0 0,0 %	0 0,0 %	1 16,7 %	0 0,0 %	6

Tutkitaan vikojen havaitsemistapojen suhteellisia osuuksia vielä tilastollisesti. Koska havaitsemistavan 1 osuus on suurin ja havaitsemistavan 4 osuus pieni tilastollisesti luotettavien tulosten saamiseksi, testataan havaitsemistavan 1 osuuksien eroja. Jätetään termostaatit pois tutkimuksesta otoskoon pienuuden takia. Testataan suhteellisten osuuksien vertailutestillä nollahypoteesia ”oireista valvomossa havaittujen vikojen osuus on sama”. Testataan nollahypoteesia mittauspäille ”paine ja pinta”, ”paine ja lämpötila” sekä ”pinta ja lämpötila”. Käytetään merkitsevyytensä 0,05. Testien tulokset ja vaihtoehtoiset hypoteesit ovat esillä taulukossa 11.

Taulukko 11: Suhteellisten osuuksien vertailutesti

H ₁	Testisuure	P-arvo
$p_{\text{paine}} < p_{\text{pinta}}$	-0,849	0,198
$p_{\text{paine}} < p_{\text{lämpötila}}$	-1,639	0,051
$p_{\text{pinta}} < p_{\text{lämpötila}}$	-1,104	0,134

Taulukko 12: Luottamusvälit

Laite	P ₁	95 %:n Lv.
Paine	75,0 %	± 11,3 %
Pinta	80,8 %	± 7,7 %
Lämpötila	88,9 %	± 10,2 %

Jokaista testisuureta vastaava p-arvo on yli 0,05, joten jokaisen testin kohdalla nollahypoteesi jää voimaan. Näin ollen havaitsemistavan 1 mukaan havaittujen vikojen

suhteellisissa osuuksissa ei ole tilastollisesti merkitseviä eroja mittausten välillä. Taulukossa 12 on lopuksi esitetty suhteellisen osuuden luottamusvälit havaitsemistavalle 1.

5. Johtopäätökset

Työn tavoitteena oli tutkia eri havaitsemistapojen osuutta vikojen havaitsemisessa Loviisan ydinvoimalaitoksella. Erityisesti tarkoituksena oli selvittää määräaikaiskoestusten merkitys vikojen havaitsemisessa. Tutkimus tehtiin erilaisille laitteille ja järjestelmille. Vikojen osalta keskityttiin kriittisiin eli välittömästi epäkäytettävyyden aiheuttaviin vikoihin. Näin ollen vikojen havaitsemistapojen jakaantumista ei voida vetää johtopäätöksiä vioille, jotka aiheuttavat laitteen epäkäytettävyyden vasta korjauksessa.

Määräaikaiskoestukset havaittiin Loviisan ydinvoimalaitoksella selvästi merkittävimmäksi vikojen havaitsemistavaksi laitteille mittauksia lukuun ottamatta. Koko käytettävissä olleen vikahistorian osalta määräaikaiskoestuksissa havaittiin 68,3 prosenttia vioista. Tämän jälkeen tärkeimmät vikojen havaitsemistavat olivat oireista valvomossa 14,2 prosentin, käyttötarpeen tullessa 7,0 prosentin ja muuten välittömästi vian synnyttä 5,3 prosentin osuudella.

Eri järjestelmiä vertailtiin muun laitoksen keskiarvotasoon. Järjestelmistä dieselgeneraattorit ja tuorehöyryputkisto eivät poikenneet tilastollisesti merkitsevästi muun laitoksen keskiarvosta. Järjestelmien reaktorin välijäähdytyspiiri, hätäjäähdytysjärjestelmä, hätälisävesijärjestelmä ja sprinklerijärjestelmä kohdalla määräaikaiskoestuksissa havaittujen vikojen osuus oli suurempi ja järjestelmien syöttövesipiiri, laitoslisäveden syöttö, normaali lisävesi- ja vuotojenkeruujärjestelmä ja sivumerivesipiiri kohdalla määräaikaiskoestuksissa havaittujen vikojen osuus oli pienempi verrattuna muun laitoksen keskiarvoon. Järjestelmät, joissa määräaikaiskoestuksissa havaittujen vikojen osuus oli pienempi, sisältävät käyviä laitteita, joten tulokset ovat johdonmukaisia.

Laitetyypeistä pumppujen osalta määräaikaiskoestuksissa havaittiin suurempi osuus vioista kuin venttiilien kohdalla. Sen sijaan venttiilien ja dieselgeneraattoreiden sekä pumppujen ja dieselgeneraattoreiden välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa määräaikaiskoestuksissa havaituissa vioissa. Venttiilien alatyypeistä voidaan sanoa, että moottoriventtiilien vioista havaitaan suurempi osuus määräaikaiskoestuksissa kuin säätöventtiilien vioista. Muista venttiilien alatyypeistä, eli takaisku-, eristys-, paineenalennus- ja magneettiventtiileistä, ei saatu tilastollisesti merkitseviä tuloksia pienen vikamäärän takia. Pumppujen kohdalla ei ole eroa vuoroittaiskäytössä olevien ja muiden pumppujen välillä eikä dieselgeneraattoreiden kohdalla automaatiovikojen ja muiden vikojen välillä määräaikaiskoestuksissa havaittujen vikojen osuudessa.

Mittauksia käsiteltiin erillisenä kokonaisuutena ja niiden kohdalla saatiin hyvin erilaisia tuloksia verrattuna muihin laitteisiin. Mittauksien vioista 78,2 prosenttia on havaittu oireista valvomossa. Määräaikaiskoestusten rooli on hyvin pieni, vain 6,1 prosenttia. Oireista valvomossa havaittujen vikojen osuudessa eri mittausten alatyyppeiden, eli paine-, pinta- ja lämpötilamittausten, välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa.

Kaiken kaikkiaan tutkimuksessa onnistuttiin ja työn tavoitteissa olleisiin kysymyksiin saatiin vastauksia. Mittauksia lukuun ottamatta määräaikaiskoestuksilla on selvästi suurin rooli vikojen havaitsemisessa Loviisan ydinvoimalaitoksella.

Viitteet

Fortum Power and Heat Oy. (2012). *Loviisan esittelymateriaalia*. Intranet:
<https://portal.fortum.com/sites/FNSLoviisaYleis/default.aspx>

Helander, J. (2011). *Loviisa 1, Mittausten epäkäytettävyyksien päivitys*. Raportti, Fortum Power and Heat Oy

Jänkälä, K.;Paavola, I.;Sirén, S.;Helander, J.;Helisevä, M.;& Kallas, M. (2010). *Loviisa 1 Riskitutkimus Taso 1 Pääraportti, Luku 7: Laitteiden luotettavuus*. Fortum Power and Heat Oy

Jänkälä, K. (2011). *Koestettävien laitteiden vikojen havaitseminen*. Muistio, Fortum Power and Heat Oy

Kelavirta, T. (2010). *Kz-merkintäjärjestelmä Loviisan voimalaitoksella*. Tekniikkaohje, Fortum Power and Heat Oy

Mellin, I. (2008). *Tilastolliset menetelmät: Kaavat*.

Modarres, M. (2006). *Risk analysis in Engineering - Techniques, Tools and Trends*. CRC Press

Liitteet

Liite 1: Vikaantumisten havaitsemistapojen suhteelliset osuudet järjestelmille

	Havaitsemistapa (A)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kaikki	14,2 %	5,3 %	1,3 %	68,3 %	0,9 %	7,0 %	0,6 %	1,9 %	0,4 %
EY	11,7 %	5,8 %	1,0 %	70,9 %	2,9 %	0,0 %	1,9 %	4,9 %	1,0 %
RA	4,9 %	4,9 %	4,9 %	80,5 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	2,4 %	2,4 %
RL	40,2 %	2,4 %	1,2 %	37,8 %	0,0 %	17,1 %	0,0 %	1,2 %	0,0 %
RR	20,0 %	20,0 %	0,0 %	40,0 %	0,0 %	20,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
RV	28,6 %	28,6 %	4,8 %	28,6 %	0,0 %	9,5 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
TC	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
TF	2,3 %	2,3 %	0,0 %	84,1 %	0,0 %	9,1 %	0,0 %	2,3 %	0,0 %
TH	3,8 %	0,0 %	0,0 %	90,6 %	3,8 %	1,9 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
TJ	8,3 %	0,0 %	0,0 %	87,5 %	0,0 %	0,0 %	4,2 %	0,0 %	0,0 %
TK	27,8 %	13,9 %	2,8 %	36,1 %	0,0 %	13,9 %	0,0 %	5,6 %	0,0 %
TQ	2,7 %	0,0 %	0,0 %	95,9 %	0,0 %	1,4 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
VF	8,6 %	14,3 %	2,9 %	48,6 %	0,0 %	25,7 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
YD	20,0 %	0,0 %	0,0 %	80,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %

Liite 2: Jakaumaoletuksen testaaminen

Statistix - 30 Day Trial Version 9.0

22.1.2012, 16:51:05

Chi-Square Test for Heterogeneity or Independence

Case		Variable						
		A1	A2	A4	A6	A8	A3579	
1	Observed	9	20	130	3	0	2	164
	Expected	23,34	8,71	112,03	11,51	3,11	5,29	
	Cell Chi-Sq	8,81	14,62	2,88	6,30	3,11	2,05	
2	Observed	66	8	230	34	10	15	363
	Expected	51,66	19,29	247,97	25,49	6,89	11,71	
	Cell Chi-Sq	3,98	6,60	1,30	2,84	1,41	0,92	
		75	28	360	37	10	17	527
Overall Chi-Square		54,83						
P-value		0,0000						
Degrees of Freedom		5						