

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
Teknillinen tiedekunta  
Energiatekniikan koulutusohjelma  
BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

## **YHTEISVIKAPARAMETRIEN MÄÄRITYS**

Lappeenrannassa 4.2.2009

Ville Rintala

# SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO.....	1
LYHENTEET .....	2
1 JOHDANTO .....	3
2 EPÄKÄYTETTÄVYYS.....	3
2.1 Epäkäytettävyyteen varautuminen ydinvoimalaitoksella .....	4
2.2 Todennäköisyyspohjainen riskianalyysi .....	4
2.3 Epäkäytettävyyden syyt .....	7
2.4 Yhteisvikaantumisen ja riippuvuus .....	10
2.5 KytKentätekijä .....	11
2.6 Yhteisvikojen merkitys .....	12
2.7 Yhteisviat todennäköisyyspohjaisessa turvallisuusanalyysissä .....	12
3 YHTEISVIKAPARAMETRIEN MÄÄRITYS .....	13
3.1 Yleinen kuvaus menetelmästä ja laskentaoletukset.....	14
3.2 ICDE-yhteisvikatietopankki.....	14
3.2.1 ICDE-tietopankissa ilmoitettavat tiedot.....	15
3.3 Tietokantatiedon esikäsittely.....	16
3.4 Yhteisvika-aineiston rajaaminen .....	17
3.5 Yhteisvika-aineiston käsittely .....	18
3.5.1 Vaikutusvektorin muodostaminen .....	18
3.5.2 Vaikutusvektorit hankalissa tapauksissa.....	19
3.6 Koestus- ja tarvesykleiden määrän laskeminen .....	22
3.7 Käyntiajan laskeminen.....	23
3.8 Summavaikutusvektorin laskeminen .....	23
3.9 Mapping-up/down .....	24
3.10 Todennäköisyyksien ratkaiseminen.....	25
3.11 Primitiiviparametrit.....	26
4 SOVELTAMINEN KESKIPAKOPUMPUILE .....	27
4.1 Taustatiedot ja aikaisemmat tarkastelut.....	27
4.2 Yhteisvikatiedon rajaaminen.....	28
4.2.1 Laiteryhmät .....	28
4.2.2 Redundanssiaste.....	29
4.2.3 Vikatilat.....	29
4.3 Vaikutusvektorien muodostaminen .....	30
4.4 Koestus- ja käyttötarvesykleiden sekä käyttöajan laskeminen .....	32
4.5 Todennäköisyyksien ja primitiiviparametrien ratkaiseminen .....	33
5 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	35
LÄHTEET .....	40

## SYMBOLILUETTELO

$A...B$	tapahtuma	[-]
$d$	komponentin vaurioitumisarvo	[-]
$ND$	käyttötarpeiden lukumäärä	[-]
$P$	todennäköisyys	[-]
$peg$	peg-todennäköisyys	[-]
$pes$	pes-todennäköisyys	[-]
$psg$	psg-todennäköisyys	[-]
$t$	tarkastelu-aika	[d]
$v$	vaikutusvektori	[-]
$V$	summavaikutusvektori	[-]
$z$	primitiiviparametri	[-]
$\tau$	koestusväli	[d]

## Alaindeksit

0...3	järjestys tai kertaluku
CCF	yhteisvika
k	vian kertaluku
m	juokseva indeksi
Min	alaraja
Max	yläraja
n	redundanssiaste
TDC	käyttötarvesykli

**LYHENTEET**

BWR	Boiling Water Reactor
CCCG	Common Cause Component Group
CCF	Common Cause Failure
CS	Core Spray
FR	Failure to Run
FS	Failure to Start
ICDE	International Common cause failure Data Exchange
LPCI	Low Pressure Coolant Injection
ND	Number of Demands
NEA	Nuclear Energy Agency
NRC	Nuclear Regulatory Commission
NUREG	US Nuclear Regulatory Commission Regulation
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
P	Pump
PES	Probability of an Exclusive groups of components Summed over given multiplicity
PEG	Probability of an Exclusive and specific Group of components
PRA	Probabilistic Risk Assessment
PSG	Probability of a Specific Group of components
RHR	Residual Heat Removal
SKI	Statens Kärnkraftinspektion
TDC	Test and Demand Cycle
TVO	Teollisuuden Voima
US	United States
VBA	Visual Basic for Applications

## 1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä selvitetään yhteisvikaparametrien määrittämisprosessia todennäköisyysperustaista riskianalyysia (PRA, Probabilistic Risk Assessment) varten Teollisuuden Voiman Olkiluodossa käytössä olevien Olkiluoto-1 ja Olkiluoto-2 ydinvoimalaitosyksiköiden osalta.

Kandidaatintyön tavoitteena on selvittää yhteisvikaparametrien määrittämisen yleiset työvaiheet ja tutkia alkuperäisen selvityksen jälkeen käytettäväksi tulleen yhteisvika-aineiston soveltamismahdollisuudet Olkiluodon laitosyksiköihin. Yhteisvikaparametrit on alun perin määritetty todennäköisyyspohjaisen riskianalyysin tekemisen alkuaikoina ja niitä on päivitetty sopivan käyttökokemuksdatan kertymisen myötä eri laitteiden osalta.

Tässä työssä esimerkkinä tarkasteltavien keskipakopumppujen osalta parametrit ovat edelleen alkuperäiset, koska aikaisemmin on viisaammaksi todettu odottaa paremman käyttökokemuksdatan kertymistä. Sittemmin käyttöön ovat tulleet OECD:n alaisen ICDE-yhteisvikatietokannan tiedot, joihin perustuen yhteisvikaparametrien päivitysmahdollisuuksia ja -tarvetta tutkitaan.

## 2 EPÄKÄYTETTÄVYYS

Epäkäytettävyys tarkoittaa, että komponentin jokin toiminta on estynyt ja se ei ole käytettävissä. Vialla tai vikaantumisella tarkoitetaan eriasteisia vauriotiloja, josta palautumiseksi täytyy vaihtaa tai muuten korjata vaurioituneita osia. Toiminnallisella epäkäytettävyydellä tarkoitetaan välttämättömän aputoiminnan puuttumista, joka voi tarkoittaa esimerkiksi käyttövoimana toimivan sähkön menetystä.

Epäkäytettävyys tai sen osa vikaantuminen käsitteenä voidaan liittää melkein mihin tahansa asiaan erilaisilla tavoilla. Usein arkisissa asioissa vikaantumista ei välttämättä tutkita yksityiskohtaisesti, eikä siitä useimmissa yhteyksissä tehdä perusteellista tutkimusta. Kuitenkin sovelluksissa, joissa menetykset voivat olla suuria, kuten esimerkiksi ihmisten turvallisuus tai taloudelliset seikat, on perusteltua kiinnittää asiaan tarkempaa huomiota.

Ydinvoimalaitoksen kyseessä ollessa voivat menetykset muodostua suuriksi, jonka vuoksi laitteiden epäkäytettävyys pyritään määrätietoisesti minimoimaan. Turvallisuusjärjestelmät on mitoitettu suunnittelunperustaisen onnettomuuden vaatimusten mukaisesti ja niiden vikaantuminen voi aiheuttaa vajauksen toimintaan tarvetilanteessa. Ydinvoimalaitoksella täytyy kuitenkin vikaantua useita laitteita tai laitekokonaisuuksia ennen kuin pahoja seurauksia voi tapahtua. Seuraukset voivat olla taloudellisia menetyksiä esimerkiksi ylimääräisen seisokin tai polttoainevaurioiden muodossa tai pahimmillaan radioaktiivisten aineiden päästöjä ympäristöön.

## **2.1 Epäkäytettävyyteen varautuminen ydinvoimalaitoksella**

Ydinenergialaissa edellytetään, että ydinlaitoksen turvallisuus on varmistettava peräkkäisillä ja toisistaan riippumattomilla suojuuksilla (syvyysuuntainen turvallisuusperiaate).

Syvyysuuntainen turvallisuusperiaate edellyttää erilaisia turvallisuusjärjestelmiä varmistamaan toisiaan eli erilaisuusperiaatteen käyttöä (diversiteetti). Sama toiminto pyritään siis toteuttamaan eri toimintaperiaatteilla toimivilla järjestelmillä. Tämä vähentää laitteistojen riippuvuutta toisistaan, mihin palataan myöhemmin.

Toisaalta yksittäisen järjestelmän luotettavuutta parannetaan rinnakkaisperiaatteella eli lisäämällä samaa tehtävää tekemään useita toisiaan varmistavia samanlaisia laitteita (redundanssi). Rinnakkaiset osajärjestelmät suunnitellaan siten, että niiden samanaikainen vikaantuminen on epätodennäköistä. Tämä tehdään toteuttamalla osajärjestelmät rakenteellisesti mahdollisimman erillisinä ja sijoittamalla ne eri tiloihin eli taas vähennetään riippuvuutta.

## **2.2 Todennäköisyyspohjainen riskianalyysi**

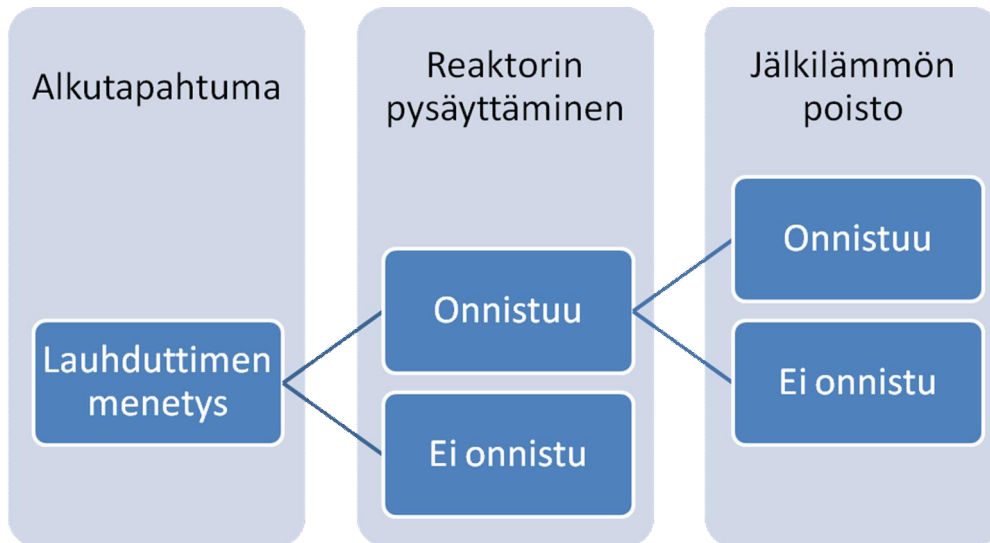
Todennäköisyyspohjaisella riskianalyysillä (PRA) pyritään kvantitatiivisesti arvioimaan ydinvoimalaitoksen riskejä. YVL-ohje 2.8 vaatii PRA:ta ydinvoimalaitokselta käyttöluvan myöntämisen edellytyksenä. Uusilta laitossyksiköiltä vaaditaan alustava riskianalyysi jo

suunnitteluvaiheessa. Tehtyjen analyysien perusteella arvioidaan turvallisuustoimintoja ja niiden toteuttamiseen tarvittavia järjestelmiä. PRA:n tuloksia edellytetään käytettävän ydinvoimalaitoksen turvallisuuden kehittämiseen ja laitosmuutosten tarpeiden osoittamiseen sekä niiden tärkeysjärjestyksen arviointiin. Todennäköisyyspohjainen riskianalyysi tukee siten ydinvoimalaitoksen suunnittelua ja turvallisuuden arviointia että ydinvoimalaitoksen turvallisuuden hallintaa ja valvontaa koko käyttöajan ajan. (YVL 2.8 2003)

PRA:ta varten muodostetaan tapahtuma- ja vikapuut. Tapahtumapuilla kuvataan alkutapahtumien jälkeen tarvittavia järjestelmätoimintoja, joilla ydinvoimalaitos pidetään turvallisessa tilassa. Sitä voi ajatella kaikkien turvallisuustoimintojen tapahtumaketjuna, joita kyseessä olevan alkutapahtuman hallinta turvalliseen tilaan vaatii.

Turvallisuustoiminnoilla tarkoitetaan turvallisuuden kannalta tärkeitä toimintoja, joiden tarkoituksena on ehkäistä häiriö- ja onnettomuustilanteiden syntyminen tai eteneminen tai lieventää onnettomuustilanteiden seurauksia. Ydinvoimalaitoksessa on oltava järjestelmät reaktorin pysäyttämiseen ja alikriittisenä pitämiseen, reaktorissa syntyvän jälkilämmön poistamiseen sekä radioaktiivisten aineiden pidättämiseen laitoksen sisällä. (Valtioneuvoston asetus 733/2008)

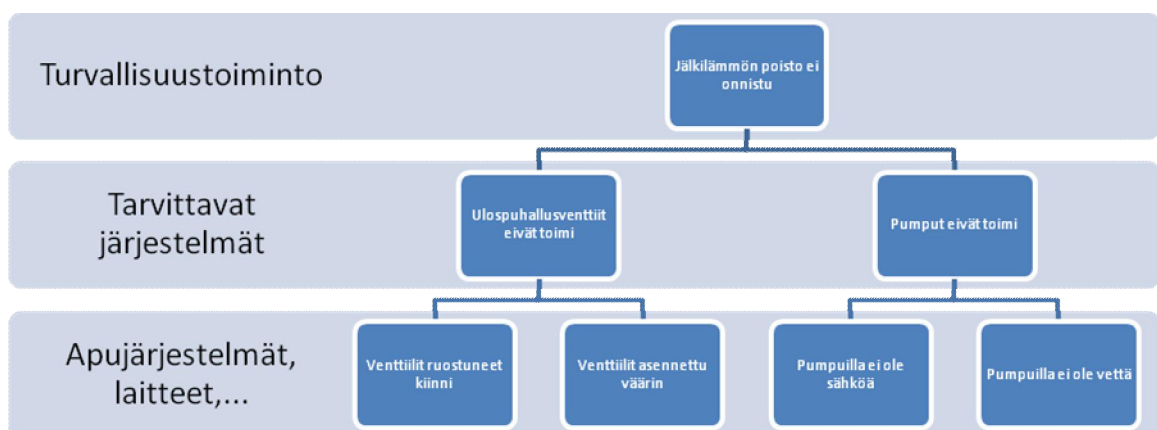
Alkutapahtumalla tarkoitetaan yksittäistä tapahtumaa, joka vaatii laitoksen turvallisuustoimintojen käynnistämistä. Alkutapahtuma voi olla laitoksen sisäinen tai ulkoinen tapahtuma, esimerkiksi laitevika, luonnonilmiö tai ihmisen toiminnasta johtuva poikkeama. (YVL 2.8 2003)



**Kuva 1.** Esimerkki tapahtumapuusta

Tapahtumapuussa käydään läpi alkutapahtumasta riippuen tarvittavat turvallisuustoiminnot ja pyritään kuvaamaan alkutapahtuman seuraukset yksinkertaisempien tapahtumien ketjuna. Tapahtumapuun haarautumien todennäköisyydet ratkaistaan turvallisuustoiminnoista tehtyjen vikapuiden avulla.

Vikapuulla kuvataan turvallisuustoiminnon tuottavan järjestelmän riippuvuutta sen osien vioittumisesta. Vikapuiden perustapahtumien eli käytännössä laitteiden epäkäytettävyyden todennäköisyydet pitää arvioida, jotta koko järjestelmän luotettavuus kyetään ratkaisemaan.



**Kuva 2.** Esimerkki vikapuusta



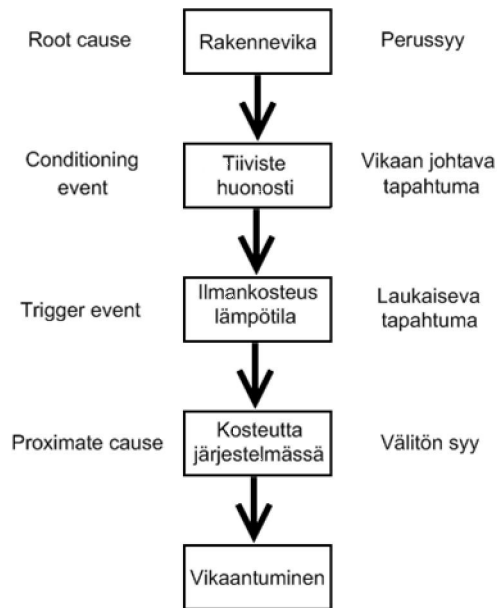
Tekemällä tapahtumapuut kaikille alkutapahtumatyypeille ja vikapuut kaikille järjestelmille voidaan ratkaista kunkin alkutapahtuman todennäköisyys aiheuttaa esimerkiksi suuri päästö ympäristöön. Edelleen tuntemalla alkutapahtumien taajuudet kyetään ratkaisemaan kokonaisriski esimerkiksi reaktorivuotta kohden.

Todennäköisyyksien laskemiseksi PRA-laskentaohjelmaan syötettävistä tiedoista oleellisia ovat esimerkiksi jatkuvasti käytössä olevalle laitteelle käytönaikainen vikataajuus, josta voidaan laskea vioittumistodennäköisyys reaktorivuotta kohti. Varalla olevalle laitteelle annetaan varallaolon vikataajuus, muu vikatodennäköisyys käyttökertaa kohti ja käytönaikainen vikataajuus, jotta voidaan laskea laitteen suoriutuminen häiriötilanteessa kokonaisuutena. Varalla oleva laitehan on voinut vikaantua jo varallaoloaikana, käynnistyksessä tai sitten se voi vikaantua tarvetilanteessa suoritettua käynnistyksen jälkeen, jotka on kaikki huomioitava laskennassa.

### **2.3 Epäkäytettävyyden syyt**

Epäkäytettävyyden voidessa johtaa menetyksiin on hyödyllistä tutkia jo tapahtuneista vikaantumisista niiden aiheuttajia, jotta voidaan ennaltaehkäistä tulevia tapahtumia poistamalla epäkäytettävyyteen johtavia perussyitä.

Epäkäytettävyydelle on löydettävissä välittömän syyn (proximate cause) lisäksi perussyyn (root cause), joka on ongelman varsinainen aiheuttaja. Perussyyn korjaaminen estää epäkäytettävyyden. Tapahtumaan liittyy usein epäkäytettävyyteen johtava tapahtuma (conditioning event) ja sen laukaiseva tapahtuma (trigger event). Epäkäytettävyyteen johtava tapahtuma altistaa laitteen vialle tai johtaa vikaherkkyiden kasvamiseen. Laukaiseva tapahtuma lopulta johtaa epäkäytettävyyden välittömän syyn muodostumiseen. (Wierman, Mosleh, Rasmuson. 2007, s. 9.)



**Kuva 3.** Vikaantuminen

Vikaantumiseen johtavaa ketjua on havainnollistettu kuvassa 3. Esimerkkinä voisi toimia auton sytytysjärjestelmä, jonka elektroniikka ei siedä kosteutta. Auto käytetään huollossa, jossa elektroniikkaa suojaava tiiviste irrotetaan ja vaihdetaan uuteen. Huoltomies asettaa tiivisteeseen paikalleen ylösalaisin, joka jää huonosti ja ei ole tiivis. Syksyllä säiden kylmetessä tapahtuu elektroniikan kanssa samaan tilaan pääsevistä ilmasta veden kondensaatiota, joka estää elektroniikan normaalin toiminnan. Tutkittaessa vikaa huomataan ensin käynnistymisen estänyt välitön vika, kosteus. Voidaan havaita myös tilanteeseen johtanut tapahtuma eli tiivisteeseen väärä asettelu. Varsinainen perussyy vikaantumiseen on kuitenkin rakenteessa, joka mahdollistaa tiivisteeseen väärän asettelun. Auton tapauksessa käyttäjä tuskin perussyylle alkaa tehdä mitään tai ei tule sitä edes ajatelleeksi, mutta autonvalmistajan tulisi korjata asia tuleviin autoihinsa vikojen välttämiseksi.

Ydinvoimaloidenkin vikatietokannoissa on paljon vikatapahtumia, joihin ei tapahtumasta ole ilmoitettu perussyitä, vaikka ne olisivat oleellisia tietää arvioitaessa järjestelmien turvallisuutta (Wierman et al. 2007, s. 9). Pelkän välittömän syyn perusteella voidaan siis tietää mikä tietyn vikaantumisen on lopulta aiheuttanut, mutta kyseisen vikatyypin toistumismahdollisuuden tutkiminen ei onnistu perussyyn ollessa hämärän peitossa.

Vikaantumisen aiheuttajat on jaettu useisiin luokkiin ja ne on lähteestä riippumatta jaoteltu suurin piirtein samalla tavalla. Esimerkiksi Yhdysvaltain ydinturvallisuusviranomaisen NRC:n ohjeessa on vikasytyt luokiteltu seuraavasti (Wierman et al. 2007, s. 10):

- suunnittelu-, rakennus- tai valmistusvirheet
  - suunnitteluvirheet
  - valmistusvirheet
  - asennus- ja rakennusvirheet
  - virheet muutosten yhteydessä
- käyttö- tai inhimilliset virheet
  - tahaton toiminta
  - puutteellinen tai virheellinen menettelytapa
  - suoritusvirhe toimenpiteessä
  - riittämätön osaaminen
  - riittämätön kunnossapito
- ympäristötekijöiden aiheuttamat
  - tulipalo tai savu
  - kosteus
  - lämpötila
  - sähkö- tai magneettikenttä
  - säteily
  - eliöt
  - lika tai pöly
  - sääilmiöt (tuuli, tulva, salamointi, lumi ja jää)
- komponentin sisäinen
  - normaali kuluminen
  - sisäiset olosuhteet ja tekijät
  - aikainen vikaantuminen
- toisen komponentin tila
  - apujärjestelmä (paineilma, voitelu)
  - yhteydet järjestelmiin
- tuntematon
- muu syy

Nämä vikojen aiheuttajat voivat yhtä hyvin olla perussyitä tai vian välittömiä syitä. Lisäksi huomattavaa on, että nämä vikojen syyt ovat aivan samoja niin yksittäis- kuin yhteisvioletkin.

## 2.4 Yhteisvikaantuminen ja riippuvuus

Yhteisvikaantumisella tarkoitetaan kahden tai useamman komponentin vioittumista samasta perussyystä eli vikaantumisten välillä on oltava riippuvuus (Vaurio 2007, s. 121). Yhteisvikoja eivät siis ole samaan aikaan tapahtuvat viat, jotka ovat toisistaan riippumattomia tapahtumia.

Riippuvuudella ymmärretään matemaattisesti seuraavaa: Tapahtumat A ja B ovat riippuvia, jos (Wierman et al. 2007, s.5)

$$P(A \cap B) = P(B | A)P(A) = P(A | B)P(B) \neq P(A)P(B) \quad (1)$$

$P$  = todennäköisyys

Sanallisesti esitettynä tapahtuman A tapahduttua tapahtuman B todennäköisyys kasvaa verrattuna tilanteeseen ennen A:n tapahtumista. Turvallisuuden kannalta haitallinen riippuvuus lisää samanaikaisen vian todennäköisyyttä. Yhteisviat ovat juuri tällaisia.

Yhteisvian syntyminen vaatii siis riippuvuuksia redundanttisten laitteiden välille. Harvat järjestelmät ovat täysin erillisiä vaan yhtymäkohtia on esimerkiksi yhteisissä säiliöissä, putkilinjoissa tai sähkönsyötössä. Valtakunnan sähköverkko on esimerkiksi yhteinen tekijä lähes kaikille sähkölaitteille ja sen menetys vaikuttaa siten kaikkiin siitä riippuviin sähkölaitteisiin. Tämän riippuvuuden seurauksia on vähennetty rakentamalla dieselgeneraattoreihin perustuva vaihtoehtoinen sähkönsyöttö. Dieselgeneraattoritkaan eivät ole toisistaan täysin riippumattomia, koska niillä ja siten niiden komponenteilla voi olla yhteisiä valmistajia ja komponentissa oleva vika voi siten esiintyä samanlaisena kaikissa dieselgeneraattoreissa.

Yhteisvikojen synty vaatii siis vikojen välille yhdistäviä tekijöitä, riippuvuuksia, joiden syyt ovat samoja kuin yksittäisvikojenkin syyt. Rinnakkaisilla laitteilla on samoja vikamekanismeja, joiden kautta niiden epäkäytettävyyksien kesken syntyy riippuvuutta. Tällainenkin riippuvuus muodostuu merkittäväksi vasta, jos on olemassa kytkentätekijä, joka liittyy vikamekanismit toisiinsa. (Mankamo et al. 1986)

## 2.5 KytKentätekijä

Yhteisvikojen tapauksessa on siis pyrittävä tunnistamaan perussyitä, jotka voivat vaikuttaa useisiin toisiaan varmentaviin laitteisiin. Yhteisvikatapahtumat eivät siis eroa yksittäisvi-oista juuri muuten kuin, että vikoja on tapahtunut useampia ja ne liittyvät toisiinsa kytkentätekijän (coupling factor) välityksellä. Yhteisvian syntymiseksi on vikaan johtavan tapahtuman tai laukaisevan tapahtuman kytkeydyttävä toisiinsa.

KytKentätekijät jakaantuvat NRC:n ohjeen mukaan viiteen pääryhmään (Wierman et al. 2007, s. 11):

- laitteen laatu
  - valmistus
  - asennus- ja rakennus
- suunnittelu
  - laitteen sisäinen toiminta
  - järjestelmän toiminta
- huolto
  - huoltojen ajoitus, koestusvälit
  - huolto- ja koestusohjeet
  - henkilökunta
- käyttö
  - sama ohjeistus
  - sama käyttöhenkilökunta
- ympäristö
  - ulkoiset olosuhteet
  - sisäiset olosuhteet

Kytkentätekijä on käytännössä yleensä epäkäytettävyyteen johtava tapahtuma ja laukaiseva tapahtuma yhdessä. Toisen puuttuessa ei kytkentää ja siten yhteisvikaakaan synny tietyn komponenttiryhmän kohdalla. Kaikille epäkäytettävyyksille ei välttämättä ole molempia edellä mainittuja tapahtumia ja silloin kytkentätekijä riippuu vain olemassa olevasta. Esimerkkejä kytkentätekijöistä on sama huoltohenkilökunta ja jaettu putkilinja prosessiolosuhteineen.

## **2.6 Yhteisvikojen merkitys**

Riippuvuuksien takia varalla olevia järjestelmiä ei kannata lisätä määrättömästi. Lisäämällä laitteen rinnalle toinen varalla oleva laite ei siis saada kaksinkertaista luotettavuutta. Osaltaan siksi, että varalla oleva järjestelmä voi vaatia laitteiden, esimerkiksi vaihtoautomatiikan, lisäämistä alkuperäiseen järjestelmään, jonka vioittumistodennäköisyys voi kasvaa. Toisaalta siksi, että laitteilla voi olla keskenään riippuvuuksia, jotka saattavat johtaa yhteisvikaan.

Mitä luotettavampi laite yksittäisvikojen perusteella on kyseessä, sen vähemmän saadaan hyötyä moninkertaisuudesta, koska esimerkiksi kolmen toisiaan varmentavan laitteen vioituessa on suurella todennäköisyydellä kyse yhteisviasta. Tällöin ei toisiaan varmistavien laitteiden lukumäärällä ole merkitystä, koska kaikki loputkin voisivat olla epäkäytettäviä samasta syystä.

## **2.7 Yhteisviat todennäköisyypohjaisessa turvallisuusanalyysissä**

Yhteisvikojen tarkastelu jaetaan eksplisiittiseen ja parametriseen mallinnukseen. Eksplisiittinen mallinnus otetaan suoraan huomioon laitoksen PRA-tarkastelussa tapahtuma- tai vikapuihin mallintamalla. Nämä tapaukset ovat luonnollisesti sellaisia, jotka kyetään luotettavasti arvioimaan ja tunnistamaan etukäteen. Parametrisella mallinnuksella pyritään kattamaan jäljelle jäävät, useimmiten monisyiset ja etukäteen vaikeasti tunnistettavat yhteisviat, joiden huomioonottaminen vikapuissa on vaikeaa tai mahdotonta.

Eksplisiittisen mallinnuksen etu ovat havainnollisuus, koska syy-seuraussuhteet tulevat selkeästi kuvattua. Haittana tulee käytetyn mallin monimutkaistuminen, joka pidentää laskentaan tarvittavaa aikaa ja alkaa asteittain vähentää havainnollisuutta. Haitoista johtuen vain tärkeät ja suhteellisen yksinkertaiset riippuvuudet kannattaa mallintaa eksplisiittisesti. (Mankamo et al. 1986 s. 26-32)

Parametrisessä mallinnuksessa pyritään ratkaisemaan matemaattisilla malleilla moninkertaisten vikojen todennäköisyyksiä ja riippuvuuksia kuvataan parametreilla. Suuri osa riippuvuusilmiöistä on monimutkaisia, joille ei voida tehdä PRA-mallia tai ainakaan todennäköisyysdataa ei ole tarjolla. Esimerkiksi vikapuihin ei voida mallintaa laitteiden osien samasta valmistajasta johtuvaa riippuvuutta järkevästi. (Mankamo et al. 1986 s. 32-33)

### **3 YHTEISVIKAPARAMETRIEN MÄÄRITYS**

Yhteisvikaparametrien määrittämistä varten on omattava pohjatietoa, jonka perusteella määrittäminen tapahtuu. Pelkkien omien laitosten käyttökokemusten perusteella arvioita ei pysty tekemään, koska omalla laitoksella ei välttämättä ole joissain laiteryhmissä tapahtunut ainutkään yhteisvikaa. Luonnollisesti aineiston määrän ollessa vähäinen muuttuu yksittäinenkin uusi tapahtuma yhteisvian todennäköisyyttä huomattavasti. Ongelma ratkaistaan muiden laitosten käyttökokemusten avulla, joista saadaan tarpeellinen määrä aineistoa riittävän tilastollisen pohjan aikaansaamiseksi.

Yhteisvika-aineistona voidaan nykyisin käyttää ICDE-tietokannasta saatavia tietoja, joiden käyttökelpoisuutta yhteisvikaparametrien määrittämiseen tutkitaan osana tätä työtä.

Yhteisvikaparametrien määrittäminen pyritään kuvaamaan jäljempänä esimerkinomaisesti keskipakopumpuille kaikkine tarvittavine yksityiskohtineen.

### 3.1 Yleinen kuvaus menetelmästä ja laskentaoletukset

Yleisellä tasolla määrittämisessä on ensimmäiseksi koostettava tarkasteltavaa laitetyyppiä vastaava yhteisvika-aineisto. Vertailujoukoksi valitaan tarkastelun kohdetta vastaavat yhteisvikaryhmät eli toisiaan varmistavien identtisten laitteiden muodostamat ryhmät. Seuraavaksi käsitellään raportoidut yhteisviat ja muodostetaan vaikutusvektorit kullekin tapahtumalle. Edelleen kerätään koko vertailujoukosta yhteisvikaryhmien käyttötiedot ja summataan yhteen. Summaamalla vaikutusvektorit ja vertaamalla saadun summavektorin komponentteja yhteisvikaryhmien käyttötietoihin saadaan todennäköisyydet kunkin kertaluvun vioille.

Yhteisvika-aineistoa rajaa soveltuvuus Olkiluodon tapaisiin neliredundanttisiin laitoksiin. Aineiston vähäisyydestä johtuen yhteisvikaparametrien määritys päädyttiin tekemään sekä varallaolevien, että osan aikaa käytössä olevien pumppujen tietojen perusteella. Riittävän aineiston saamiseksi otettiin myös vastaavat kolmiredundanttiset pumppuryhmät mukaan arvioon, mistä seuraa muutamia ongelmia, joihin palataan myöhemmin.

Tarkastelua pelkistettiin siten, että käynnistys-, sekä käynninaikaiset viat käsiteltiin samaan tapaan koestus- ja käyttösykliä kohti, koska käyntiaikatiedot eivät olleet luotettavasti ilmoitettuja vuorokäytössä oleville pumpuille. Suotavampi vaihtoehto olisi laskea käynnistysviat erillään käyttökertoja kohti ja käynninaikaiset viat vikataajuuksina käyttöaikojen perusteella.

### 3.2 ICDE-yhteisvikatietopankki

ICDE-yhteisvikatietopankissa on paljon vikatietoa useista eri laitetyypeistä useiden maiden laitoksilta. Tietopankki on taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestön OECD:n (Organisation for Economic Co-operation and Development) ydinenergiajärjestö NEA:n (Nuclear Energy Agency) yhteistyöhanke. ICDE (International Common-Cause Failure Data Exchange) projektin tarkoituksena on kerätä ja tutkia yhteisvikatapahtumia pitkältä aikaväliltä, jotta voidaan paremmin ymmärtää tapahtumia ja niiden syitä sekä ehkäisyä. Tietopankkiin on kerätty tietoa turvallisuusjärjestelmien pääkomponenteista, kuten keskipako-



pumpuista, dieselgeneraattoreista, moottoriventtiileistä jne. (ICDE general coding guidelines)

ICDE-tietopankin tiedoissa on kuitenkin muutamia soveltamista vaikeuttavia seikkoja. Tietopankki sisältää valtavan määrän dataa, mutta koska se jakautuu niin monien laitetyyppien kesken, tilastollinen aineisto voi olla riittämätön tietyille laitetypille. Tietokantaan kerätyt vikatiedot ovat joidenkin maiden osalta valitettavan lyhyeltä ajalta. Raportoinnin taso vaihtelee myös huomattavasti maittain sekä laitoksittain.

Tietoja voi soveltaa määritettäessä parametreja omalle laitokselle olettaessa järjestelmät riittävän samanlaisiksi. Esimerkiksi keskipakopumput ovat yleisesti varsin samanlaista tekniikkaa. Yksityiskohdissa on tietysti eroja, mutta toimintaperiaate on hyvin samankaltainen vastaavia tehtäviä hoitavien pumppujen kesken kaikkialla.

### **3.2.1 ICDE-tietopankissa ilmoitettavat tiedot**

Tietokannassa on kuvattu yhteisvikaryhmät (CCCG, Common Cause Component Group) ja annettu niiden oleelliset tiedot. Tällaisia tietoja ovat esimerkiksi laitousyksikön nimi ja laitostyyppi, järjestelmätyyppi, laitetyyppi ja -määrä, testausväli ja -tyyppi sekä tarkastelu-aika vikatietoineen. Järjestelmätyyppi kertoo järjestelmän tehtävän, esimerkiksi reaktorisydämen hätäjähdytys (emergency core cooling) ja laitetyyppi voi olla esimerkiksi suurivirtauksinen matalapaineinen varalla oleva keskipakopumppu. Testaustyyppi on joko hajautettu tai peräkkäinen. Vikatiedoissa kerrotaan vikaantumistyyppi ja sille ilmoitetaan yksittäisvikojen lukumäärä, käyttökertojen lukumäärä ja laitteen altistumisaika. Valitettavasti kaikkia tietoja ei aina ole annettu, mikä monimutkaistaa tietojen käyttämistä.

Yhteisvikatapahtumista kerrotut tiedot voidaan jakaa kolmeen ryhmään: tapahtuman kuvaus ja faktat, kvantitatiiviseen analyysiin liittyvät arviot ja kvalitatiiviset luokittelut. ICDE kentät eivät ole tässä järjestyksessä vaan Mankamon mukaan järjestysnumeroinnista tuli ajan mittaan epäjohdonmukainen monien lisäysten ja muutosten vuoksi. Kvantitatiiviseen analyysiin liittyvät arviot sisältävät kullekin tapaukselle mm. yhteisviaksi tulkinnan perustelut (CCF event interpretation), komponenttien vaurioitumisarvot (impairment vector),

samanaikaisten vikojen yhteisviasta johtuvuutta kuvaavan tekijän (shared cause factor) ja aikakertoimen (time factor). Yhteisviasta johtuvuutta kuvaavaa tekijää kutsutaan tässä muistiossa jatkossa yhteistekijäkertoimeksi. Kvalitatiivisiin luokitteluihin kuuluvat perussyy (root cause), kytkentätekijä (coupling factor) ja saman vian toistumisen ehkäisevät suoritettavat toimenpiteet (corrective actions).

Komponentin vaurioitumisarvot määritetään neljään luokkaan:

- C (Complete failure, painokerroin yksi) laite on vioittunut eikä kykene suorittamaan siltä vaadittua tehtävää
- D, (Degraded, 0,5) laite kykenee suorittamaan tehtävänsä vaillinaisesti, vikatodennäköisyys voi olla huomattavasti kasvanut, esimerkkinä laakereiden liian korkeat lämpötilat
- I, (Incipient, 0,1) laite pystyy suoriutumaan tehtävästään, mutta siinä on alkava vika, joka johtaa vaillinaiseen tilaan ilman korjausta. Tähän ryhmään sijoitetaan myös rinnakkaiset laitteet, jos niihin on päädytty vaihtamaan osia vioittuneiden rinnakkaisten laitteiden perusteella
- W, (Working, 0) laite toimii normaalisti

Yhteistekijä- ja aikakerroin ovat vastaavasti määriteltyjä ja ne voivat saada erilaisia painokertoimia riippuen yhteisvian selvydestä ja vikojen välisestä ajasta. High (painokerroin yksi) kuvaa varmaa yhteisvikaa, medium (0,5) kuvaa erilaisia vikaantumisia, joilla näyttäisi kuitenkin olevan sama perussyy. Low (0,1) vikatapahtumien näyttäessä yksittäisiltä, mutta on olemassa syitä, joiden perusteella voisi olla kyse yhteisviastakin ja No (painokerroin nolla), jolloin on kyse usean yksittäisvian sattumisesta ajallisesti päällekkäin tai lähekkäin. Aikakerroin voi saada High, Medium ja Low-arvot vastaavilla painotuksilla riippuen vikojen esiintymisvälistä. (ICDE 2004)

### 3.3 Tietokantatiedon esikäsittely

ICDE-tietopankin tiedot toimitetaan salasanasuojattuna Access-tietokantana ja tiedot ovat käytettävissä vain projektissa mukana oleville. Käyttöliittymänä toimii tietokantasovellus, josta tietoja voi selata ja syöttää, sekä esimerkiksi luoda raportteja. Sovellus on kuitenkin

toiminnaltaan melko rajoittunut ja tietojen paremman käsiteltävyyden vuoksi ohjelmassa on vientityökalu tietojen saattamiseksi suojaamattomaksi Access-tietokannaksi. Tämän jälkeen tietoja voidaan käsitellä tarpeen mukaan Accessissa, kuten mitä tahansa muutakin tietokantaa.

Accessissa voidaan luoda kyselyt, joilla haluttu osa tiedosta saadaan vietyä raportteihin tai taulukkolaskentaohjelmaan. Vaihtoehtoisesti voidaan käsitellä tietoa suoraan Accessissa ja raportoida vain haluttu data tai suorittaa laskentatoimenpiteitä ohjelmoimalla VBA-kielellä (Visual Basic for Applications).

### **3.4 Yhteisvika-aineiston rajaaminen**

Accessissa voidaan käsitellä tietoa tehokkaasti ja raportoida vain haluttu data tai suorittaa laskentatoimenpiteitäkin ohjelmoimalla VBA-kielellä (Visual Basic for Applications). Edelleen Accessista tiedot voidaan helposti viedä käsiteltäväksi Excelliin niin haluttaessa.

Aineiston rajaamisesta laadittiin toimiva malliesimerkki Accessilla, jota käytettiin rajaamaan aineistosta halutut yhteisvikaryhmät ja yhteisvikatapahtumat. Rajauksen sisältävä tietokantatiedosto laadittiin erilliseen tietokantatiedostoon, joka sisältää linkitettyinä taulukoina salanasuojaamattoman ICDE-tietokannan. Pohjatieto on siis erillisenä tiedostona eikä siihen tehdä mitään muutoksia, mikä mahdollistaa samojen rajausten käyttämisen uuden version ilmestyessä ICDE-tietokannasta. Uuden version saapuessa tulee suojaamaton tiedosto tuoda ICDE-tietopankin käyttöliittymästä uudelleen ja päivittää linkitettyjen taulukoiden sijainti Accessissa kyselyt sisältävään tietokantaan.

Varsinaisissa tietokyselyissä rajaavina tekijöinä on laitetyyppi ja redundanssien lukumäärä, jotka valitaan tarkastelukohteen mukaan. Tiedot haetaan luonnollisesti sekä yhteisvikatapahtumille, että ryhmätiedoille. Tietyn kyselyn tiedot näytetään samannimisessä raportissa, jonka voi tarkastelun helpottamiseksi tulostaa. Kyselyt ovat yksinkertaisia, niissä on haettu sarakkeisiin vain oleellisia tietoja ja asetettu kyselyihin halutut ehdot. Lisäksi tietokannassa on apukyselyitä, joilla on tarkoitus vaihtaa tietokannan sisältämät koodit ihmiselle luettavaan muotoon.

Käytännössä tietokannasta haluttu aineisto on sama laitetyyppi ja redundanssiaste kuin kohteella, jolle yhteisvikaparametrit on tarkoitus määrittää. Haluttu aineisto rajataan kyselyillä ja lajitellaan raportissa sopivalla tavalla. Tämän jälkeen voidaan arvioida tilastoaineiston määrää ja mahdollisesti laajentaa otosta laiteryhmiin, jotka ovat samankaltaisia. Yhteisvika-aineiston rajauksen jälkeen voidaan yhteisvikatietoja alkaa kehittää parametrien saamiseksi.

### 3.5 Yhteisvika-aineiston käsittely

Suurin työ yhteisvikaparametrien määrittämisessä on vaikutusvektorien määrittäminen (impact vector) kaikille yhteisvikatapauksille. Tapahtumasta riippuen vektorin määrittäminen voi olla suoraviivaista tai toisaalta mennä erittäin hankalaksi.

Huomattakoon, että tilastodatan arviointitavalla on suuri merkitys saatavien yhteisvikaparametrien kannalta, sillä samasta tilastoaineistosta tehdyt analyysit ovat voineet päätyä melko erilaisiin lopputuloksiin. (Mankamo & Pulkkinen 1987, luku 3)

#### 3.5.1 Vaikutusvektorin muodostaminen

Yksittäinen vaikutusvektori kuvaa tapahtuman todennäköisyyttä aiheuttaa kunkin kertaluvun vika, joten sen alkioiden summa on yksi yhden koestus- ja käyttötarvesyklin (TDC, test and demand cycle) ylitse. Vektorissa on  $n+1$  alkioita  $n$ -redundantisessa järjestelmässä. Ensimmäinen alkio kuvaa siis nollannen kertaluvun vikoja eli kaikki laitteet toimivat. Vaikutusvektoria merkitään ja sille pätee:

$$\bar{v} = \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad \sum_{m=0}^n v_m = 1 \quad (2)$$

$v$  = vaikutusvektori tai sen alkio

Vaikutusvektorin määrittelyyn on kaksi tapaa, joko hyvin suoraviivainen ottamalla suoraan painotetut komponentin vaurioitumisarvot alkioiksi tai tapauksen tarkempi tulkitseminen. Suoraviivaisessa menettelyssä luotetaan tilastodatan määrään ja siihen, että se on keskimäärin oikein laadittu. Tässä tapauksessa on syytä käyttää yhteistekijä- ja aikakerrointa painottamaan vaikutusvektoria, joka on siis saatu suoraan vaurioitumisarvoista olettamalla vian vakavuustaso yksittäisen laitteen vioittumistodennäköisyydeksi. Tämä menetelmä on kuvattu esimerkiksi NRC:n ohjeessa NUREG-5485 (Mosleh, Rasmuson, Marshall. 1998).

Tilastoaineiston ollessa rajallinen on kuitenkin hyödyllistä tarkastella aineistoa tarkemmin ja pyrkiä luomaan vaikutusvektori mahdollisimman hyvin kutakin tilannetta edustavaksi. Näin voidaan estää virheellisesti tulkittujen tai raportoitujen tapahtumien vaikutus summa-vaikutusvektoriin. Tällöin yhdistetään vikakuvauksesta ja kertoimista saadut tiedot, joista suoraan analysoimalla muodostetaan vaikutusvektori.

Vaikutusvektorin määrittäminen on helppoa tapauksissa, joissa on vain toimivia tai täysin vikaantuneita laitteita. Tällöin vaikutusvektoriin tulee vain vian kertaluvun mukaiseen alkioon arvo yksi, muiden alkioden ollessa nollia. Esimerkkejä vaikutusvektoreista löytyy Ruotsin säteilyturvallisuusviranomaisen julkaisemasta raportista (SKI Report 2004:04) pumppuja (NAFCS-PR18) ja dieselgeneraattoreita (NAFCS-PR10) käsittelevistä mallianalyseista.

### **3.5.2 Vaikutusvektorit hankalissa tapauksissa**

Hankalampia ovat tapaukset, joihin liittyy vaillinaisesti toimivia laitteita tai alkavia vikoja. Näissä tapauksissa on huomioitava vikakuvaus ja pääteltävä todennäköisyydet kunkin kertaluvun vioille. Analyysityökaluna on syytä käyttää skenaariomenetelmää, jossa luodaan eri kertaluvun viat sisältävät skenaariot ja painotetaan kutakin tilanteen mukaisesti. Painokerroin määritetään vikakuvaukseen ja komponenttien vaurioitumisarvoihin sovellettavalla analysoijan valistuneella päättelykyvyllä.

**Taulukko 1.** Esimerkki skenaariomenetelmästä komponenttien vaurioitumisarvojen ollessa CIW kolmen pumpun ryhmässä

Skenaario	Painokerroin	$v_0$	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$\Sigma$
Yksi pumppu vioittuu	0,9	0	1	0	0	1
Kaksi pumppua vioittuu	0,1	0	0	1	0	1
<b>Painotettu vaikutusvektori</b>		<b>0</b>	<b>0,9</b>	<b>0,1</b>	<b>0</b>	1

Päätöksenteon tueksi kannattaa usein määrittää todennäköisyyslaskennan perusteella vaikutusvektorille saatavat ylä- ja alaraja (high bound, low bound), joiden väliltä valitaan tilanteeseen perusteltu arvo. Pelkkiä alkavia vikoja sisältävät tapahtumat ovat kuitenkin merkitykseltään pieniä verrattuna muihin tapahtumiin, joten niiden tulkintaan ei kannata keskittyä liikaa. Melko usein alkavien vikojen tapauksessa vikaantumiset ovat sellaista tyyppiä, että laitteet kestävät odotettavissa olevassa tarvetilanteessa mainiosti, joka on otettava huomioon vaikutusvektoria laadittaessa.

Alaraja muodostetaan olettamalla komponentin vaurioitumisarvot itsenäisiksi ehdollisiksi vioittumistodennäköisyyksiksi. Alarajan alkiot voidaan laskea yksinkertaisella todennäköisyyslaskennalla ja kaavat ovat taulukoituna esimerkiksi NUREG-raporteissa 5485 (Mosleh et al. 1998 s.62) ja 6268 (Wierman et al. S.60).

Ylärajan määrittämisessä oletetaan osajoukon vikaantumistodennäköisyys samaksi kuin sen vähiten vaurioituneen laitteen vikaantumistodennäköisyys. Tämän voi tulkita oletukseksi, että laitteiden väliset riippuvuudet ovat suurimmat mahdolliset. Ylärajan laskemiseksi komponenttien vaurioitumisarvot järjestetään laskevaan järjestykseen ja otetaan ylärajan viimeiseksi alkioksi pienin lukuarvo. Tämän jälkeen vähennetään kustakin vaurioitumisarvosta seuraava vaurioitumisarvo ja muodostetaan näistä ylärajan alkioita, kunnes päästään ensimmäiseen arvoon saakka. Ensimmäinen komponentti on yksi vähennettynä ylärajan muilla alkiolla, koska vaikutusvektorin summan tulee olla yhden TDC:n tapauksessa yksi. Matemaattisesti ilmaistuna ylärajalle pätee n-redundanttisessa systeemissä,

$$\begin{aligned}
d_1 &\geq d_2 \geq \dots \geq d_n \\
v_{\text{Max},n} &= d_n \\
v_{\text{Max},m} &= d_m - d_{m+1}, \quad 1 \leq m \leq n-1 \\
v_{\text{Max},0} &= 1 - \sum_{m=1}^n v_{\text{Max},m}
\end{aligned} \tag{3}$$

$d$  = vaurioitumisarvo

missä  $d$ :llä merkitään komponentin vaurioitumisarvoja.

Esimerkkitapauksena lasketaan ala- ja yläraja vaurioitumisarvoille III:

$$\begin{aligned}
\bar{v}_{\text{Min}} &= \begin{bmatrix} (1-d_1)(1-d_2)(1-d_3) \\ d_1(1-d_2)(1-d_3) + \\ d_2(1-d_1)(1-d_3) + \\ d_3(1-d_1)(1-d_2) \\ \\ d_1d_2(1-d_3) + \\ d_1d_3(1-d_2) + \\ d_2d_3(1-d_1) \\ \\ d_1d_2d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-0,1)(1-0,1)(1-0,1) \\ 0,1(1-0,1)(1-0,1) + \\ 0,1(1-0,1)(1-0,1) + \\ 0,1(1-0,1)(1-0,1) \\ \\ 0,1 \cdot 0,1(1-0,1) + \\ 0,1 \cdot 0,1(1-0,1) + \\ 0,1 \cdot 0,1(1-0,1) \\ \\ 0,1 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,729 \\ 0,243 \\ 0,027 \\ 0,001 \end{bmatrix} \\
\bar{v}_{\text{Max}} &= \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 - d_2 \\ d_2 - d_3 \\ d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-0,1 \\ 0,1-0,1 \\ 0,1-0,1 \\ 0,1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9 \\ 0 \\ 0 \\ 0,1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4}$$

Tilanteessa, jossa ryhmän laitteiden vikatapahtumat ovat eri koestus- ja käyttötarvesyklillä on huomioitava, että kyseessä on summavaikutusvektori kahden TDC:n ylitse ja sen komponenttien summa on tällöin kaksi. Vikatapahtumien aikaero on kyseisessä tilanteessa siis suurempi kuin laiteryhmän tiedoissa ilmoitettava koestusväli. (NAFCS-PR17 s.15-17)

### 3.6 Koestus- ja tarvesyklar määrän laskeminen

Koestus- ja käyttötarvesyklar kokonaismäärä  $ND$  lasketaan ICDE-datasta huomioimalla tarkastelu-aika  $t$  ja koestusväli  $\tau$ . Tarkastelu-aika saadaan tietokantakenttien S4 (End of observation time) ja S3 (Start of observation time) erotuksena ja koestusväli saadaan kentästä G5-1 (Test interval). Koestusvälin pituus ilmoittaa suoraan yhden TDC:n pituuden, koska se on yhden tietyn laitteen koestusten välinen aika. Tämän ajan kuluessa kaikki muutkin laitteet koestetaan ja koko ryhmää on siten tarvittu. Kokonaismäärä saadaan siis seuraavasti

$$ND = \frac{t}{\tau}$$

$$ND = \text{koestus} - \text{ja käyttötarvesyklar määrä} \quad (5)$$

$$t = \text{tarkastelu-aika}$$

$$\tau = \text{koestusväli}$$

Tiedon käsittelyyn sisältyy ongelmia, koska G5-1 kenttä sisältää yksiköitä, kuten days, months, cycle tai muuta tekstiä. Lisäksi ICDE-tietokannan tiedoista havaittiin, että koestusvälin perusteella lasketut ja joidenkin laitosten vapaaehtoisesti ilmoittamat todelliset käynnistyskerrat erosivat toisistaan huomattavasti. Syynä eroihin voi osaltaan olla epäselvyys kentän S7 (Demand cycles) määrittelyssä, joten tiedot saattavat olla joko koko ryhmän keskimääräisiä arvoja tai summa yksittäisten laitteiden käyttökerroista.

Arvioitaessa syklien määrää voidaan siis käyttää joko tarkasteluajasta ja koestusvälistä laskettuja arvoja tai ottaa kentästä S7 arvot mikäli ne on ilmoitettu. Jos käytetään arvoja vain ilmoitettujen todellisten käynnistyskertojen (kenttä S7) perusteella voivat arvot muuttua optimistisiksi, koska ylimääräiset käynnistykset ilmenevät usein huoltoon ja seisokkiaikaan liittyvinä tihentyminä. Yhteisvikojen riskin kannalta eniten merkitseviä ovat käytönaikaiset käynnistyskerrat.



### 3.7 Käyntiajan laskeminen

Käynnin aikaisten vikojen tarkka huomioiminen johtaa vikataajuuksien laskemiseen käyntiajan funktiona. ICDE-tietopankin tiedot ovat valitettavan hajanaisia myös kentän S6 (Exposure time) eli käyntiajan osalta. Ongelma on suurempi myös siksi, että ei ole konservatiivinen oletus laskea käyntiaikaa tarkasteluajan perusteella. Laitteet ovat aina välillä huollossa ja voivat olla ajettuina alas käyttötarpeen puuttuessa, esimerkiksi vuosihuollon takia. Käynnin aikainen vikataajuushan on vikojen lukumäärä tarkasteluaikana jaettuna vastaavalla käyntiajalla. Vikataajuus muodostuu todellista pienemmäksi jos laskennassa käytetään tarkasteluaikaa, joka on suurempi kuin laitteiden käyntiaika.

Käyntiaikaa laskettaessa on siis aina tehtävä oletuksia laitteiden todellisesta käyntiajasta optimistisen arvion välttämiseksi, jos ICDE-tietokannan laitetta koskevaa käyntiaikaa ei ole ilmoitettu tai se ei ole uskottava.

### 3.8 Summavaikutusvektorin laskeminen

Summavaikutusvektorin alkiot lasketaan vaikutusvektoreiden alkioiden summana. Vaikutusvektorin ajatellaan kertovan lukumääräosuudet eri kertaluvun vioille yhden TDC:n ajalta ja laskemalla ne yhteen saadaan tietää kunkin kertaluvun vikojen lukumäärät koko tarkasteluajalta. Laskentamenetelmät on esitetty SKI:n julkaisemassa raportissa (NAFCS-PR03 & PR04). Summavaikutusvektori on siten

$$\bar{V} = \sum_{i=1}^{ND} \bar{v}_{TDC(i)} \quad (6)$$

$V$  = summavaikutusvektori

Tarkkaan ottaen vielä ei kyetä ratkaisemaan summavaikutusvektoria täydellisesti vaan ensin on selvitettävä yksittäisvikojen lukumäärä  $V_1$  koko populaatiossa arvojen S5 (Independent failure count) summasta. Toinen tarvittava arvo on koestus- ja tarvesyklit ( $V_0$ ), joissa

ei ole tapahtunut ainuttakaan vikaa. Merkitään yhteisvikojen vaikutusvektoreiden summana saatua vektoria n-redundanttiselle tapaukselle

$$\bar{V}_{\text{CCF}} = [V_{0/n} \quad V_{1/n} \quad \llcorner \quad V_{n/n}]^T \quad (7)$$

ja seuraavaksi  $V_0$  voidaan ratkaista:

$$V_0 = ND - V_1 - \sum_{i=0}^n V_{i/n} \quad (8)$$

Tällöin summavaikutusvektorille pätee

$$\bar{V} = [V_0 + V_{0/n} \quad V_1 + V_{1/n} \quad V_{2/n} \quad \llcorner \quad V_{n/n}]^T \quad (9)$$

ja summavektorin alkioiden tulee luonnollisesti täyttää ehto:

$$\sum_{i=0}^n V_i = ND \quad (10)$$

### 3.9 Mapping-up/down

Tilastoaineiston ollessa rajallinen on kehitetty menetelmiä, joilla eri redundanttisten järjestelmien tiedot voidaan muuntaa yhteismitallisiksi. Mapping down eli esimerkiksi neliredundanttisen tapauksen vaikutusvektorin muuntaminen kolmiredundanttiseksi voidaan tehdä muunnoskaavoilla, joille on olemassa matemaattinen perustelu. Neliredundanttinen tapaus jaetaan osajoukkoihin, joita tarkastelemalla voidaan johtaa muunnoskaavat. Mapping-down muunnoskaavat löytyvät esimerkiksi NUREG-ohjeesta 6268 (Wierman et al. s.67).

Vastaavaa menetelmää ei voida esittää mapping-up tapauksessa vaan on aina tehtävä lisäoletuksia, jotka lähes väistämättä huonontavat muunnoksen tarkkuutta. Esimerkiksi kahden järjestelmän yhteisviat tulkitaan helposti totaalisiksi yhteisvioiksi suuremmankin redun-

danssiasteen järjestelmässä. Aiheeseen liittyy monia seikkoja, kuten redundanssien erillistämisen taso. (Mankamo & Pulkkinen 1987, luku 5)

Mapping-up menetelmässä on siis pääteltävä jokaisesta viasta mitä tapahtuisi, jos rinnakkaisia laitteita olisikin enemmän. Osa tapauksista voi olla selkeitä ja osa taas ei, joten täytyy tehdä lisäoletuksia esimerkiksi redundanssien erillistämisen tasosta. Tehdyt oletukset vaikuttavat saatuun tulokseen.

### 3.10 Todennäköisyyksien ratkaiseminen

Todennäköisyydet eri kertaluvun vioille voidaan ratkaista vertaamalla tarvetilanteissa esiintyneiden kunkin kertaluvun vikojen lukumäärää kaikkien tarvetilanteiden lukumäärään. Suurimman uskottavuuden estimaattori todennäköisyydelle, että k-laitetta vikaantuu n-redundanttisessa järjestelmässä, saadaan jakamalla vaikutusvektorin kukin alkio koestus- ja käyttötarvesyklien lukumäärällä (NAFCS-PR04, s. 10)

$$\langle pes(k | n) \rangle = \frac{V_k}{ND} \quad (11)$$

$pes$  = pes – todennäköisyys

Tästä saadaan siis todennäköisyys, että jotkin k laitetta n:stä vioittuu muiden jäädessä käyttökuntoisiksi. Laskennassa tarvitaan kahta muutakin todennäköisyysarvoa, jotka ovat peg ja psg. Näistä peg(k|n) tarkoittaa todennäköisyyttä, että tietyt k laitetta vikaantuvat loppujen jäädessä käyttökuntoisiksi. Peg saadaan muunnoskaavalla pes:stä seuraavasti

$$peg(k | n) = \frac{1}{\binom{n}{k}} pes(k | n) \quad (12)$$

$peg$  = peg – todennäköisyys

$P_{sg}(k|n)$  taas tarkoittaa todennäköisyyttä, että tietyt  $k$  laitetta vikaantuvat. Loppujen laitteiden tila ei vaikuta todennäköisyyteen, joka saadaan muunnoskaavan avulla  $peg$ :stä

$$psg(k|n) = \sum_{m=k}^n \binom{n-k}{m-k} peg(m|n) \quad (13)$$

$$psg = psg - \text{todennäköisyys}$$

### 3.11 Primitiiviparametrit

Todennäköisyysarvojen selvittyä voidaan ratkaista varsinaiset halutut primitiivi- tai toiselta nimeltään  $z$ -parametrit seuraavasti

$$z_k = \frac{psg(k|n)}{psg(k-1|n)} \quad (14)$$

$$z = \text{primitiivi parametri}$$

Tämä tarkoittaa ehdollista todennäköisyyttä ja sitä voidaan kuvata todennäköisyytenä tietyn laitteen vioittumiselle jos  $k-1$  laitetta on jo vioittunut. Koska tietyn kertaluvun vian  $psg$ -todennäköisyys on sama kaikille eri osajoukoille tarkasteltavassa yhteisvikaryhmässä, niin sama pätee myös primitiiviparametreille. (NAFCS-PR04, s.20)

Matemaattisesti ilmaistuna pätee nk. osaryhmäinvarianssi

$$psg(k|n_1) = psg(k|n_2), \quad \text{kun } n_1 \leq n, \quad n_2 \leq n \quad (15)$$

Tästä seuraa, että kahden erikokoisen mutta keskenään homogeenisen yhteisvikaryhmän  $psg$ -todennäköisyydet ovat yhteneviä ja siis yleisesti vertailukelpoisia erikokoisten yhteisvikaryhmien kesken. Osaryhmäinvarianssi ei päde  $pes$ - ja  $peg$ -todennäköisyyksille, jotka ovat voimakkaasti yhteisvikaryhmän koosta riippuvia. Näistä syistä johtuen tulisi ensisijaisesti käyttää  $psg$ -todennäköisyyttä esimerkiksi vertailukuvissa.

Primitiiviparametrien käyttö selviää määritelmää soveltamalla neljän redundanssin tapaukselle

$$\begin{aligned}
 psg(2|4) &= z_2 \cdot psg(1|4) \\
 psg(3|4) &= z_2 z_3 \cdot psg(1|4) \\
 psg(4|4) &= z_2 z_3 z_4 \cdot psg(1|4)
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Sovellettaessa tarvitaan siten nämä primitiiviparametrit ja tietyn yksittäisen laitteen vikaantumistodennäköisyys.

## 4 SOVELTAMINEN KESKIPAKOPUMPUILLE

### 4.1 Taustatiedot ja aikaisemmat tarkastelut

Keskipakopumput otettiin tarkastelukohteeksi, koska niiden yhteisvikaparametreja ei ole päivitetty alkuperäisten tarkastelujen jälkeen Olkiluoto 1 ja 2 PRA:ssa. Yhteisvikatapah- tumien määrä on kuitenkin yleisesti laskenut edellisten tarkastelujen jälkeen, joten näissä arvioidut yhteisvikaparametrit ovat käyneet yhä konservatiivisemmiksi – tosin turvalliseen suuntaan.

Yhteisvika-analyysin vaiheiden selvittämiseksi tutkittiin ensimmäiseksi alkuperäisten yhteisvika-analyysien menetelmät ja tulokset. Kyseisiä analyyseja tehtäessä suuri osa maailman ydinvoimalaitoksista oli toiminut vain vähän aikaa ja yhteisvikadataa oli kertynyt vasta lyhyeltä ajalta. Erityinen ongelma oli Olkiluodon laitossyksiköitä vastaavien neliredundanttisten laitosten lähes olematon tilastoaineisto. Vikaparametrien määrittämiseen käytettiin tuloksia, jotka oli suurelta osin saatu matalaredundanttisempia laitteita käsittelevistä tutkimuksista. Tilastoaineisto ei tuolloin riittänyt yksittäisten laiteryhmien arviointiin vaan tuloksista pääteltiin yleinen, ”geneerinen”, malli yhteisvikojen käyttäytymiselle, joka jaettiin kolmeen eri pääryhmään laitteiden yksittäisvikatodennäköisyyksien perusteella (Mankamo & Pulkkinen 1987, luvut 5 ja 6).

ICDE-tietokantatiedon hyödyntämiseksi yhteisvikaparametrien määrittämisessä ja yhteisvika-analyysin kulun dokumentoimiseksi käydään keskipakopumput esimerkkitapauksena läpi tehtyine oletuksineen.

## 4.2 Yhteisvikatiedon rajaaminen

Tarkoituksena oli etsiä ICDE-tietokannasta Olkiluodon 322- ja 323-järjestelmiä vastaavia pumppuja neliredundantisilta laitoksilta, joista kasattaisiin tarvittava tilastoaineisto. Suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmän (322) ja reaktorisydämen ruiskutusjärjestelmän (323) pumput ovat suurimman osan ajasta varalla olevia laitteita. 322-järjestelmällä voidaan ruiskuttaa vettä suojarakennuksen ylempään kuivatilaan onnettomuustilanteessa ja 323-järjestelmää voidaan nimittää matalapaineiseksi hätäjähdytysjärjestelmäksi, jota tarvitaan esimerkiksi jäähdytteenmenetysonnettomuudessa. 322-pumppuja käytetään lisäksi suojarakennuksessa olevan lauhdutusaltaan jäähdytykseen sen lämpötilan noustua niin seisokeissa kuin myös normaalin käytön aikana.

### 4.2.1 Laiteryhmät

ICDE-tietokannassa 322-pumput on sijoitettu ryhmään CP-LL-Int, joka tarkoittaa suurivirtauksisia matalapaineisia keskipakopumppuja, jotka ovat vuorokäytössä (Intermittent). 323-pumput ovat taas ryhmässä CP-LL-SB, joka on muuten sama kuin edellinen ryhmä, mutta pumput ovat varalla (Standby). 322-pumput on sijoitettu vuorokäyttöryhmään, koska ne eivät ole lauhdutusaltaan jäähdytystarpeen vuoksi aitoja varalla olevia laitteita. Matalapaineisella tarkoitetaan ICDE-tietokannassa paineväliä 0,2-2 MPa ja suurella virtauksella yli 75 kg/s. Tietokannassa ei pumppuryhmiä ole eritelty pumpattavan nesteen perusteella, vaan ryhmissä on sekä täyssuolanpoistettua, että merivettä pumppaavia järjestelmiä. Pumpattava neste vaikuttaa pumppujen luotettavuuteen, sillä merivesi aiheuttaa korroosiota, sisältää roskia ja muutenkin järjestelmä on enemmän ”luonnon armoilla”.

Pumppuryhmien jaon ollessa edellä mainitun kaltainen voitiin todeta, että tarkasteluun on syytä ottaa mukaan pelkkien varalla olevien pumppujen lisäksi vuorokäytössä olevien pumppujen ryhmä. Tätä seikkaa tuki myös tapahtuneiden yhteisvikatapahtumien määrä,

joka oli varsin vähäinen kummassakin ryhmässä yksinään. Edelleen yhteisvikaparametrit muodostuvat samoiksi kaikille keskipakopumpuille, jotka kuuluvat näihin aikaisemmin mainittuihin ryhmiin. Toisaalta näin ollen esimerkiksi sammutetun reaktorin merivesijärjestelmän (712) ja sammutetun reaktorin välijäähdytysjärjestelmän (721) pumpuille pätevät samat tulokset.

#### **4.2.2 Redundanssiaste**

Arvioon päädyttiin riittävän tarkastelujoukon saamiseksi ottamaan mukaan sekä varalla olevat, että osan aikaa käytössä olevat pumput. Toinen tarkastelujoukkoa lisäävä seikka oli kolmiredundanttisten pumppuryhmien käyttäminen arvioissa, josta seuraa pari ongelmaa.

Ensinnäkin ongelmaksi muodostuu, että vaikutusvektorien muodostamisen jälkeen joudutaan muuntamaan mapping-downin avulla kaikki neliredundanttiset tapaukset kolmiredundanttisiksi. Tässä ongelma muodostuu siitä, että lopuksi joudutaan saadut kolmiredundanttiset tulokset skaalaamaan neliredundanttiseksi, joka on käytännössä asiantuntija-arvio. Toisaalta taas kolmen redundanssin järjestelmän luotettavuus voi erota Olkiluodon neljän pumpun ryhmien luotettavuudesta.

#### **4.2.3 Vikatilat**

Keskipakopumpuilla on kaksi tyypillistä vikatilaa, joihin vikatapaukset on jaettu. Joko pumppu ei käynnisty (FS, Failure to start) tai sitten pumpun toiminta pysähtyy kesken toiminnan (FR, Failure to run). FS tapauksiin sisältyvät myös viat, jotka esiintyvät varsin nopeasti käynnistyksen jälkeen.

Molemmat vikatyypit, sekä käynnistys-, että käynninaikaiset viat käsiteltiin samaan tapaan koestus- ja käyttösykliä kohti, koska käyntiaikatiedot eivät olleet luotettavasti ilmoitettuja vuorokäytössä oleville pumpuille. Oikeampi vaihtoehto olisi ollut laskea käynnistysviat erillään käyttökertoja kohti ja käynninaikaiset viat vikataajuuksina käyttöaikojen perusteella. Tällöin olisi saatu erilliset parametrit molemmille vikatyypeille.

Aineiston valinnan jälkeen halutut pumppujen yhteisvikatapahtumat ja yleiset käyttötiedot rajattiin koko ICDE-aineistosta eron Access-tietokantaohjelmassa sopivien kyselyiden avulla.

### 4.3 Vaikutusvektorien muodostaminen

Yhteisvikatapahtumat kuvauksineen käytiin lävitse tapaus kerrallaan ja vaikutusvektorit muodostettiin vaurioitumisarvojen ja vikakuvausten perusteella. Tapahtumat sisälsivät NAFCS-raportissa aiemmin tulkittuja yhteisvikatapahtumia, joille otettiin vaikutusvektorit tuossa raportissa olevien analyysien perusteella. Lopuissa tapahtumissa ei ollut suuria ongelmia vaan useimmat tapaukset olivat yksinkertaisia sisältäen vain vioittuneita tai toimivia laitteita, jolloin vaikutusvektorien muodostaminen oli yksinkertaista.

Parille alkavan vian tapahtumalle muodostettiin high ja low bound-vektorit, joiden perusteella määritettiin vaikutusvektori. Näiden väliltä valitsemiseen käytettiin sopivaa vikakuvaukseen käyvää arviota. Alkavien vikojen tapauksessa vaikutusvektorin painoarvo jää kuitenkin pieneksi ja niiden tulkitsemiseen ei kannata uhrata liikaa aikaa. Muita tapoja olisi käyttää esimerkiksi keskiarvoa ja siten puhtaasti matemaattista menetelmää valitsemaan sopiva arvo näiden kahden rajatapauksen välimaastosta.

$$\bar{v}_{Min} = \begin{bmatrix} 0,729 \\ 0,243 \\ 0,027 \\ 0,001 \end{bmatrix} \quad \bar{v}_{Max} = \begin{bmatrix} 0,9 \\ 0 \\ 0 \\ 0,1 \end{bmatrix} \Rightarrow \bar{v} = \begin{bmatrix} 0,8 \\ 0,13 \\ 0,05 \\ 0,02 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Esimerkkinä teoriaosassa oli laskettu high ja low bound vaurioitumisarvoille III, joka oli toinen edellä mainituista tapahtumista. Kaavasta 17 voi huomata kuinka tässä tapauksessa valittiin vaikutusvektorin alkioiksi sopivat arvot näiden rajaavien vektoreiden välistä.

Yhdessäkään nyt käsitellyssä tapauksessa ei varsinaisesti alettu syvällisemmin tulkitsemaan tapahtuman todennäköisyyttä aiheuttaa kunkin kertaluvun vika vaan oletettiin tyypillisesti tapahtunut tilanne. Ongelmia tulee siitä, että vaikka joskus tietty vikatapahtuma ai-



heuttaakin täydellisen yhteisvian niin pumppujen palauttaminen toimintakuntoon voi myös olla hyvin yksinkertaista. Jos tätä ei oteta huomioon päädytään riskin yliarviointiin tosiasialliseen verrattuna.

Tässä vaiheessa pitää myös tutkia vikakuvaukset ja päättää niiden perusteella mitkä ovat relevantteja haluttujen parametrien kannalta. Ideaalitapauksessa olisi reilusti vikadataa, josta poimittaisiin erilleen kuhunkin laitoksen käyttötilaan liittyvät yhteisvikatapahtumat ja käyttötiedot. Edelleen ratkaistaisiin parametrit kuhunkin käyttötilaan eli esimerkiksi tehoajolle ja seisokkiin erikseen. Tässä analyysissä vikatapahtumia oli niin vähän, ettei mitään tapahtumia pudotettu kokonaan pois tarkastelusta ja tulos on siten muodostettu riippumatta käyttötilasta.

**Taulukko 2.** Neliredundanttisten tapausten vaikutusvektorit yhteisvikatapahtumien tulkinnan jälkeen

Yhteisvikatapahtumat	Tyyppi	Vaikutusvektori				
		v0	v1	v2	v3	v4
1	FR	0	0	0	0	1
OL2-5009449	FR	1,16	0,76	0,067	0,0077	0,0008
3	FR	0	0	1	0	0
4	FR	0	0	1	0	0
5	FR	0	0	1	0	0
6	FR	0	0	1	0	0
7	FR	0	0	0	0	1
8	FR	0	0	1	0	0
9	FS	0	0	1	0	0

**Taulukko 3.** Kolmiredundanttisten tapausten vaikutusvektorit yhteisvikatapahtumien tulkinnan jälkeen

Yhteisvikatapahtumat	Tyyppi	Vaikutusvektori			
		v0	v1	v2	v3
10	FS	0,8	0,13	0,05	0,02
11	FS	0	0	1	0
12	FR	2	0	0	0
13	FS	0	0	0	1
14	FR	0	1	0	0
15	FR	0,9	0,09	0,01	0
16	FS	0,8	0,15	0,05	0

Taulukossa saadut vaikutusvektorit ovat suoraan vikakuvausten perusteella tehdyssä muodossa, josta voi havaita osan arvojen olevan selkeästi tietyn kertaluvun vikoja. Toisaalta taas esimerkiksi Mankamon aiemmin käsittelemän OL2-5009449-tapahtuman arvot kertovat vaativammasta käsittelystä parin muun ohella.

**Taulukko 4.** Vaikutusvektorit mapping-downin jälkeen

Yhteisvikatapahtumat	Tyyppi	Mapping down			
		v0	v1	v2	v3
1	FR	0	0	0	1
OL2-5009449	FR	1,16	0,604	0,0393	0,0027
3	FR	0	0,5	0,5	0
4	FR	0	0,5	0,5	0
5	FR	0	0,5	0,5	0
6	FR	0	0,5	0,5	0
7	FR	0	0	0	1
8	FR	0	0,5	0,5	0
9	FS	0	0,5	0,5	0
10	FS	0,8	0,13	0,05	0,02
11	FS	0	0	1	0
12	FR	2	0	0	0
13	FS	0	0	0	1
14	FR	0	1	0	0
15	FR	0,9	0,09	0,01	0
16	FS	0,8	0,15	0,05	0
Summa		<b>5,66</b>	<b>4,974</b>	<b>4,1493</b>	<b>3,0227</b>

Taulukossa 4 näkyvät muodostetuista vaikutusvektoreista mapping down menetelmällä saadut kolmiredundanttiset vastineet ja yhteenlaskettu summavaikutusvektori. Summavaikutusvektorihan kuvaa nyt kunkin kertaluvun vikojen lukumääriä, mitä yhteisvikatapahtumista aiheutuu.

#### 4.4 Koestus- ja käyttötarvesyklien sekä käyttöajan laskeminen

FS ja FR vikatyypit oli ensin tarkoitus käsitellä erikseen ja laskenta aloitettiin koestus- ja käyttötarvesyklien lukumäärän (ND) ratkaisemisella. Tämä ratkaistiinkin normaalisti jakamalla tarkastelu-aika koestusvälin pituudella. Huomiota herätti jo teoriaosuudessa mainittu todellisten syklien useimmissa tapauksissa huomattavasti suurempi määrä laskettuihin

verrattuna. Teoriaosassa mainituista seisokkitihentymistä aiheutuvasta konservatiivisuudesta pitäytyttiin kuitenkin lasketuissa arvoissa.

Seuraavaksi ratkaistavaksi aiottua käyttöaikaa ei tietenkään voida laskea vaan on luotettava ilmoitettuihin tietoihin, jotka osoittautuivat ainakin pumppujen osalta hyvin epämääräisiksi. Tämä varmisti pumppujen eri vikatyypin yhteisen käsittelyn yhdessä vähäisen tapahtumien lukumäärän kanssa. Käyttöaikatietojen ollessa luotettavia ne otettaisiin tietokannan FR vikatapausten kenttien S6 summana.

**Taulukko 5.** Yksittäisviat sekä koestus- ja käyttötarvesyklarien eri vaihtoehdot

$V_0$	ND	$ND_x$	$ND_y$
195,4761	<b>21179</b>	34396	85886

Kolme eri summaa aiheutuu erilaisista oletuksista tietokantatiedon muodosta pienimmän ollessa suoraan laskennallisesti koestusvälistä ja tarkasteluajasta saatu. Toiset kaksi on laskettu olettamalla raportoidut käyttökerrat joko koko ryhmän koestus- ja käyttötarvesykliksi tai ryhmän yksittäisten laitteiden käyttökertojen summaksi. Tosiasiallinen käyttötarpeiden määrä on siis todellisuudessa selkeästi suurempi kuin laskennassa käytetty. Oikea sopivampi arvo lienee jotain ND:n ja  $ND_x$ :n välimaastosta. Samasta datasta selviävä yksittäisvikojen lukumäärä laskettiin kenttien S5 summana molempien vikatyypin ylitse. Summa ei ole tasaluku, koska osa aineistosta on ilmoitettu vikataajuutena, josta ICDE-tietokanta taas laskee tarkasteluajan perusteella yksittäisvikojen lukumäärän. Esimerkkitapauksina toimivissa keskipakopumpuissa laskenta suoritettiin siis Excelillä, jonne pumppuryhmäkuvaukset vietiin ne sisältävän kyselyn avulla Accessista.

## 4.5 Todennäköisyyksien ja primitiiviparametrien ratkaiseminen

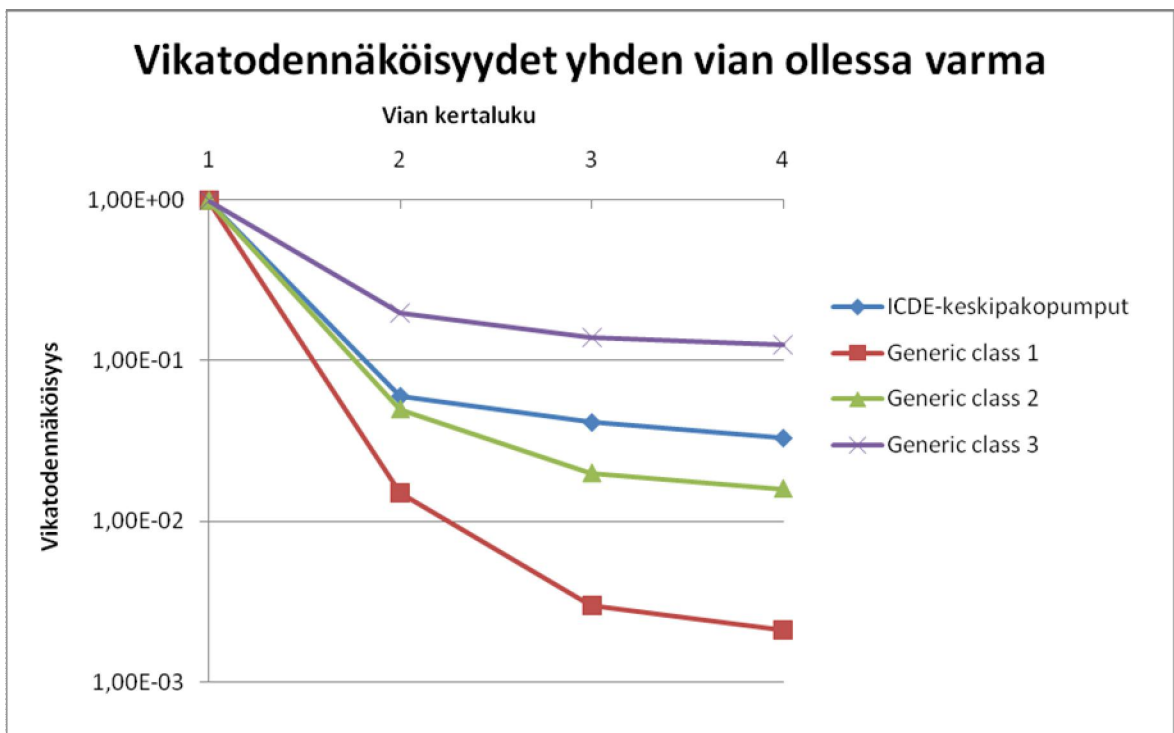
Summavaikutusvektorin ja käyttötarvesyklarien ollessa tiedossa voidaan ratkaista pestodennäköisyys kaavan 11 mukaisesti ja muuntaa se  $peg:n$  kautta  $psg$ -todennäköisyydeksi kaavojen 12 ja 13 avulla. Tarvitaan kuitenkin myös yksittäisvikojen lukumäärä, joka lisätään yhteisvikatapahtumista saatuun yksittäisen vian esiintymistodennäköisyyteen. Esimerkkilaskussa kaavat kirjoitettiin Exceliin ja ratkaistiin sen avulla.

**Taulukko 6.** Todennäköisyyksien ja primitiiviparametrien laskenta

ND (ICDE FS datasta)	<b>21179</b>				
	0	1	2	3	Summa
ND0	20965,19				20965,19
Yksittäisviat		196			196
Summavaikutusvektori	5,66	4,9735	4,149275	3,022725	17,8055
Summa	20970,85	200,9735	4,149275	3,022725	21179
Todennäköisyydet (pes)	0,990172	0,009489	0,000196	0,000142723	1
Todennäköisyydet (peg)	0,990172	0,003163	6,53E-05	0,000142723	
Todennäköisyydet (psg)	1	0,003436	0,000208	0,000142723	
Primitiiviparametrit			0,060536	0,686075983	

## 5 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

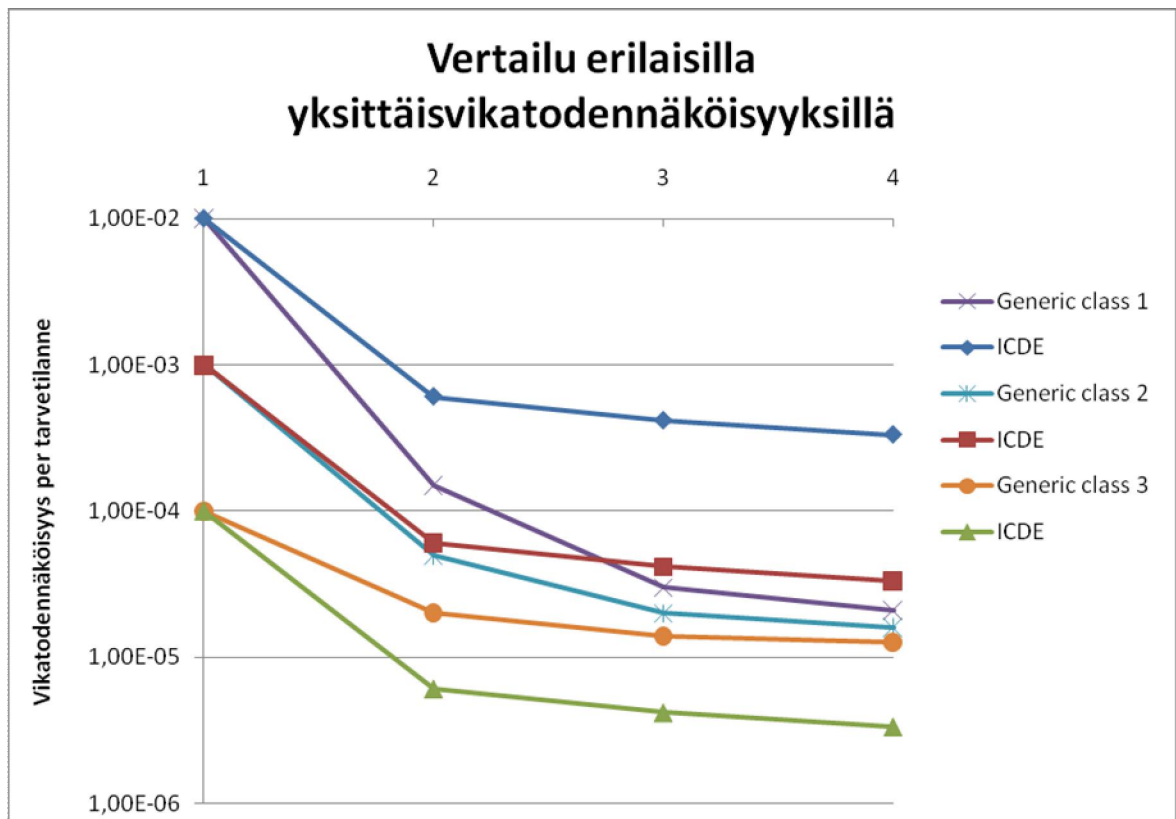
Primitiiviparametrien arvoiksi laskennassa saatiin siis  $z_2=0,061$  ja  $z_3=0,686$ . Laskemalla ei voitu saada  $z_4$ :lle arvoa, koska kaikki aineisto muutettiin kolmiredundanttiseen muotoon. Viimeisen parametrin arvo joudutaankin arvioimaan ja sen arvoksi on syytä valita aikaisempien arvioiden perusteella käytetty arvo  $z_4=0,8$ , joka on tyyppillisesti käytössä TVO:n nykyisissä PRA-malleissakin.



**Kuva 4.** Vikatodennäköisyys yhden komponentin voituttua

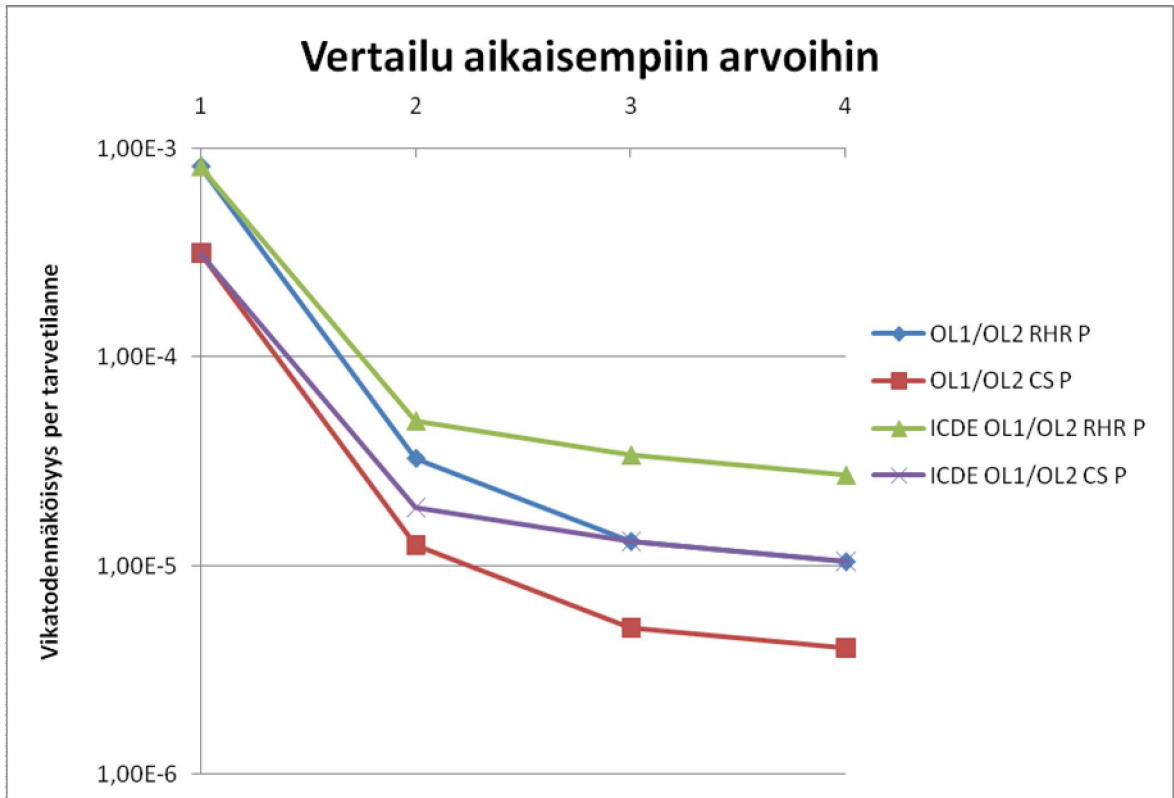
Aikaisempien analyysien tuloksena saadut yleiset mallit näkyvät kuvassa 4 vertailukohtina pumppuanalyysissa saavutettuun nähden. Generic class 2 on niin sanottu best estimate-tyyppinen arvio ja muut ovat siitä johdettuja arvioita. Näille erilaisille luokille on yleisten yhteisvikojen käyttäytymisen perusteella määritetty yleiset soveltamisalueet. Esimerkiksi Generic class 1:stä sovelletaan yksittäisvikatodennäköisyyden perusteella vähemmän luotettaville laitteille ja vastaavasti Generic class 3:sta luotettavammille laitteille. Tämä ei vaikuta kuvan 4 perusteella ilmeiseltä, mutta kysymys on ensisijaisesti siitä, kuinka nopeasti kuvaaja muuttuu vaakasuuntaiseksi. Mitä luotettavampi laite on kyseessä, sen todennäköisemmin kyseessä on yhteisvika yksittäisvikoihin verrattuna riippuvuuksista johtuen.

Pumppukäyrä vaikuttaa olevan järkevää suuruusluokkaa ja se on melko lähellä aikaisempaa yleistä analyysia. Yhteisvialt vaikuttavat kuitenkin todennäköisemmiltä yksittäisvikoihin verrattuna kuin aiemmassa tarkastelussa, johon voi vaikuttaa ainakin tarkastellut laitetypit ja tehdyt oletukset, joista useat vaikuttavat pessimistiseen suuntaan, kuten on todettu aikaisemmissa kohdissa.



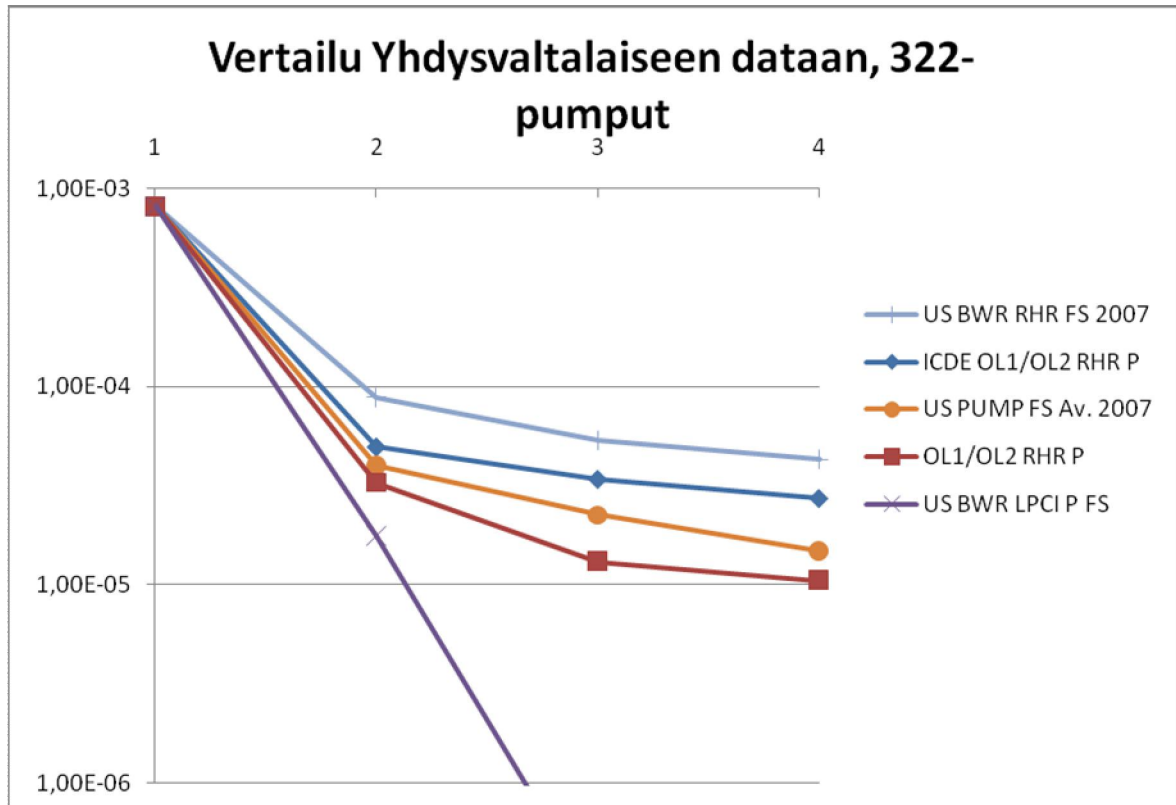
**Kuva 5.** Tulokset eri yksittäisvikatodennäköisyyksillä

Vertailtaessa tuloksia soveltamisalueen osalta näyttää siltä, että saadut parametrit sopivat parhaiten yhteen vanhojen kanssa yksittäisvikatodennäköisyyden ollessa luokkaa  $1,00E-3$ . Tulosten jatkokäsittely on tämän työn ulottumattomissa, mutta soveltamalla yleisiä laitteiden luotettavuudelle ja yhteisvioille todettuja ominaisuuksia voisi saatuja parametreja testata ja verrata soveltamisalueen varmistamiseksi. Toisaalta tulokset on saavutettu pumppuille, joten niille tyypillisille vikataajuuksille tulos pitäisi olla sovellettavissa. Taas tehdyt oletukset ja vikadata johtivat kuitenkin monien sellaisten pumppuryhmien mukaanottoon tarkasteluun, joiden luotettavuus on heikompi kuin 322- ja 323-pumppujen.



**Kuva 6.** Tulosten suhtautuminen alkuperäisiin arvoihin

Kuvassa 6 on esitetty RHR (Residual Heat Removal) eli 322-pumpuille ja CS (Core Spray) eli 323-pumpuille vertailu aikaisempiin arvoihin. Nähdään, että uutta dataa soveltamalla erityisesti kolmen- ja nelinkertaisten vikojen todennäköisyydet kasvaisivat selvästi. Käytetty yhteisvikadata ja sen käsittely sisältävät kuitenkin reilusti konservatiivisia oletuksia ja tämä arvio voi olla konservatiivisempi kuin edellinen.



**Kuva 7.** 322-pumpuille saatujen tulosten vertailua Yhdysvaltalaiseen dataan

Lopuksi on vielä verrattu kuvassa 7 ICDE-datan avulla saatuja tuloksia Yhdysvaltalaisten laitosten pohjalta tehtyyn malliin. Yksittäisvian todennäköisyydet vaihdettu 322-pumppujen mukaisiin arvoihin. Kertoimet on otettu NRC:n julkaisemasta CCF Parameter Estimations 2007-julkaisusta (CCF 2008), johon on laskettu alfa-parametrit monille eri laiteryhmillä. Alfa-parametrit ovat yksi monista vaihtoehdoista primitiiviparametreille ja muuntamiseen näiden välillä käytin Avaplan Oy:n Tuomas Mankamon tekemää HiDep-sovellusta. Ensinnäkin huomataan, että alkuperäisen NRC:n ohjeen NUREG-5497:n (Marshall, Rasmuson, Mosleh. 1998) mukainen käyrä (US BWR LPCI P FS) antaa aivan uskottomia luotettavuuksia. Yleisten kaikkien pumppujen keskiarvon (US PUMP FS Av. 2007) ja myös vastaavan sikäläisten kiehutuslaitosten RHR-käyrän (US BWR RHR FS 2007) osalta tulokset ovat kuitenkin samaa suuruusluokkaa.

Yksittäinen suurin lopputuloksiin vaikuttava tekijä voi olla koestus- ja käyttötarvesyökielten todellinen lukumäärä. Niiltä osin kuin tiedot oli raportoitu todellisina, vaikutti, että useimmissa tapauksissa todellisten käynnistysten määrät olivat huomattavasti laskettuja suu-



remmat. Kuitenkaan ilman parempaa tietoa käynnistymisten jakautumisesta käyttöjaksolle ei asialle voi tehdä mitään, koska konservatiivisuus vähenee.

Yleisesti ICDE-tietokanta antaa mahdollisuuden arvioida yhteisvikaparametreja, mutta datan sekavuus yhdistettynä ainakin pumppujen kohdalla vähäiseen yhteisvikatapahtumien määrään rajoittaa sen käyttöä. Useat näistä syistä tässäkin käsittelyssä tehdyt oletukset johtavat helposti huomattavaan konservatiivisuuteen lopputuloksissa. Tilastotiedon määrän kasvaessa voi tietokannasta olla paljon hyötyä varsinkin, jos selkeät tulkintavirheet datan syöttövaiheessa saataisiin kitkettyä pois kaikilta osallistujilta. Myös syötettävän datan laatua voitaisiin parantaa, sillä käynninaikaisille vioille ei ainakaan analyysissä mukana olevissa pumppuryhmissä ollut useimmiten ilmoitettu todellisia käyntiaikoja. Toinen vaihtoehto voisi olla käyttää bayeslaisia menetelmiä, joilla pienempi määrä tilastoaineistoa voi riittää luotettavien tulosten saamiseksi. ICDE-datan helpommaksi hyödyntämiseksi olisi myös mahdollisuus kehittää Access-sovellus, jota voitaisiin käyttää helpottamaan laskentaa monessa eri vaiheessa tulosten raportointia myöten.

## LÄHTEET

CCF 2008. CCF Parameters Estimations 2007. Washington DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. 221 s. Saatavissa:

<http://nrcoe.inl.gov/results/index.cfm?fuseaction=CCF.downloadPDF&doc=ccfparamest2007%2Epdf>

ICDE 2004. ICDE General Coding Guidelines NEA/CSNI/R(2004)4. Saatavissa:

<http://www.nea.fr/html/nsd/docs/2004/csni-r2004-4.pdf> 68 s.

Mankamo Tuomas, et al. 1986. TVO I/II - riskianalyysi, taustaselvitys riippuvuuksien käsittelystä. PRA-SR-M-9-86. Olkiluoto: Teollisuuden Voima Oy. 97 s.

Mankamo Tuomas, Pulkkinen Urho. 1987. TVO I-II/PRA Riippuvuuksien käsittely, Parametristen mallien data. Olkiluoto: Teollisuuden Voima Oy. 74 s.

Marshall F.M., Rasmuson D.M., Mosleh A. 1998. NUREG/CR-5497 Common-Cause Failure Parameter Estimations. Washington DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. 369 s.

Mosleh A., Rasmuson D.M., Marshall F.M. 1998. NUREG/CR-5485 Guidelines on Modeling Common-Cause Failures in Probabilistic Risk Assessment. Washington DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. 194 s.

NAFCS-PR03. Impact Vector Method. Topical Report NAFCS-PR03, Tuomas Mankamo, Issue 2, 31 August 2003. (Appendix 4.2 of SKI Report 2004:04)

NAFCS-PR04. Model Survey and Review. Topical Report NAFCS-PR04, Tuomas Mankamo, Issue 1, 10 October 2003. (Appendix 4.1 of SKI Report 2004:04)

NAFCS-PR10. Impact Vector Application to the Diesel Generators. Topical Report NAFCS-PR10, Tuomas Mankamo, Issue 1, 31 October 2002. (Appendix 5.5 of SKI Report 2004:04)

NAFCS-PR17. Impact Vector Construction. Topical Report NAFCS-PR17, Tuomas Mankamo, Issue 1, 10 October 2003. (Appendix 4.3 of SKI Report 2004:04)

NAFCS-PR18. Impact Vector Construction to the Pumps. Topical Report NAFCS-PR18, Tuomas Mankamo, Issue 1, 29 August 2003. (Appendix 5.6 of SKI Report 2004:04)

SKI Report 2004:04, October 2003. Dependency Defence and Dependency Analysis Guidance. How to analyse and protect against dependent failures. Summary report of the Nordic Working group on Common Cause Failure Analysis. Gunnar Johanson, Per Hellström, Tuomas Mankamo, Jean Pierre Bento, Michael Knochenhauer, Kurt Pörn. ISSN 1104-1374. Sweden: Statens Kärnkraftinspektion 690 s.

Valtioneuvoston asetus 733/2008. Valtioneuvoston asetus ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta 27.11.2008/733.

Saatavissa: <http://www.edilex.fi/stuklex/fi/lainsaadanto/20080733>

Vaurio Jussi. 2007. Luotettavuustekniikka, luentomoniste. Lappeenranta: Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. 164 s.

Wierman T.E., Rasmuson D.M., Mosleh A. 2007. NUREG/CR-6268, Rev. 1, Common-cause failure database and analysis system: event data collection, classification and coding. Washington DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. 101 s. Saatavissa: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6268/cr6268.pdf>

YVL 2.8, Säteilyturvakeskus. 2003. Todennäköisyyspohjaiset turvallisuusanalyysit (PSA) ydinvoimalaitosten turvallisuuden hallinnassa. ISBN 951-712-705-7.

Saatavissa: <http://www.edilex.fi/stuklex/fi/lainsaadanto/saannosto/YVL2-8>