



Ajasta riippuva todennäköisyysperusteinen
riskianalyysi ja ennakkohuoltojen optimointi

Salla Kalliokoski

Pro gradu -tutkielma

Toukokuu 2018

MATEMATIIKAN JA TILASTOTIETEEN LAITOS
TURUN YLIOPISTO

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

TURUN YLIOPISTO

Matematiikan ja tilastotieteen laitos

KALLIOKOSKI, SALLA: Ajasta riippuva todennäköisyysperusteinen riskianalyysi ja ennakkohuoltojen optimointi

Pro gradu -tutkielma, 80 s.

Sovellettu matematiikka

Toukokuu 2018

Todennäköisyysperusteisen riskianalyysin avulla kartoitetaan ydinlaitoksen toimintaan liittyviä riskejä, tapahtumia ja niiden seurauksia. Laitoksen riskejä arvioidaan todennäköisyysperusteisesta riskianalyysimallin, eli PRA-mallin, ja siitä saatavan sydänvauriotaajuuden avulla. Sydänvauriotaajuus kuvaa laitoksella tapahtuvan vakavan onnettomuuden taajuutta, eli sitä kuinka usein tarkasteluvälillä reaktorisydän sulaa.

Sydänvauriotaajuus esitetään normaalisti sydänvaurioiden määränä vuoden aikana ja sen tulee olla alle 10^{-5} /vuosi kaikilla uusilla ydinvoimalaitoksilla Suomessa. Sydänvauriotaajuuteen vaikuttaa monenlaiset ajasta riippuvat tapahtumat, joiden esiintymistä kuvataan vuosikeskiarvolla. Koska sydänvauriotaajuus ja tapahtumien esiintymiset kuvataan vuositasolla, ei voida tarkasti havaita ja arvioida tiettyjen tapahtumien hetkellisiä vaikutuksia sydänvauriotaajuuteen. Tätä varten on kehitetty ajasta riippuvaa PRA-mallia.

Tässä työssä kehitetään Olkiluoto 1 PRA-mallin pohjalta ajasta riippuva PRA-malli Olkiluoto 1 ja 2 laitoksille. Ajasta riippuvan mallin on tarkoitus kuvata sydänvauriotaajuuden muutokset ajasta riippuvien tapahtumien perusteella. Tässä työssä huomioitua ajasta riippuvat tapahtumat ovat komponenttien vikaantumistodennäköisyys ja niiden yhteisvikatodennäköisyydet, sääilmiöt ja ennakkohuoltotapahtumat. Erityistä huomiota on kiinnitetty ennakkohuoltotapahtumiin ja niiden vaikutuksiin. Mallia tarkastellaan tehoajojaksolla ja tehoajonaikana. Vuosihuolloille on olemassa oma tarkempi ajasta riippuva malli ja siksi sitä ei ole huomioitu tässä työssä esiteltävässä mallissa.

Työn ajasta riippuva malli, eli laitosmalli, on pyritty rakentamaan niin että ennakkohuoltojen ajankohtien optimointi olisi mahdollista. Ennakkohuoltojen ajankohtien optimointitehtävä ja sen määrittely on kehitetty, mutta ei ratkaistu. Jatkon kannalta tehtävän ratkaiseminen olisi kuitenkin mielekästä, koska laitosmallissa osoitettiin, että ennakkohuoltojen ajankohdilla on vaikutus sydänvauriotaajuuden vuosikeskiarvoon.

Avainsanat: todennäköisyysperusteinen riskianalyysi, PRA, ajasta riippuva PRA, aikariippuvuus, optimointi, ennakkohuoltojen optimointi, MILP, ORP

Sisältö

1	Johdanto	3
2	Todennäköisyysperusteinen riskianalyysi	5
2.1	Tapahtumapuu	6
2.2	Vikapuu	9
2.3	Perustapahtumat	10
2.4	Minimikatkosjoukot	11
3	Perustapahtumien aikariippuvuuden mallinnus	13
3.1	Komponenttien vikaantuminen	13
3.1.1	Poisson-prosessi	14
3.1.2	Alkuperäinen komponenttikohtainen malli	15
3.1.3	Komponenttikohtainen ajasta riippuva malli	16
3.2	Yhteisviat	19
3.2.1	TVO:n käytössä oleva yhteisvikamalli	20
3.3	Sääilmiöt	22
3.3.1	Huurre	24
3.3.2	Kylmä ilma	26
3.3.3	Salamat	26
3.3.4	Lumimyrsky	26
3.3.5	Myrsky	26
3.3.6	Levä	27
3.3.7	Lämmin merivesi	29
3.3.8	Suppo	29
3.4	Ennakkohuollot	30
4	Ajasta riippuvat mallit	33
4.1	Ajasta riippuvan mallin määrittäminen	34
4.1.1	Komponenttivikatapahtumat	36
4.1.2	Säätapahtumat	38
4.1.3	Ennakkohuoltotapahtumat	38
4.1.4	Parametrit	40

4.2	Kuuden minimikatkosjoukon malli	41
4.3	Laitosmalli	43
4.3.1	Laitosmallin määrittely	44
4.3.2	Laitosmallin tulokset	49
5	Ennakkohuoltojen optimointi	66
5.1	Vuosittaisten ennakkohuoltopäivien määrän minimointi	66
5.2	Optimointimalli	69
5.2.1	Optimointitehtävän määrittely	69
5.2.2	Optimointitehtävä	71
6	Johtopäätökset	73
7	Jatkokehitysmahdollisuudet	75
7.1	Laitosmallin jatkokehitys	75
7.2	Ennakkohuoltojen optimoinnin jatkokehitys	76
	Kirjallisuutta	77

täysin eri, kuin tässä työssä. [39]

Tässä työssä esiteltävä ajasta riippuva malli on Teollisuuden Voiman (TVO) laitoksen Olkiluoto 1 PRA-mallin pohjalta luotu tarkempi malli. Mallia kutsutaan ajasta riippuvaksi malliksi, jossa aika on diskreetti. Tätä mallia tarkastellaan vuorokauden tarkkuudella ja siinä on huomioitu kattavasti erilaiset ajasta riippuvat tekijät.

Ajasta riippuvassa mallissa on kartoitettu tapahtumat ja tekijät, joiden todennäköisyys vaihtelee ajan funktiona. Mallissa huomioituja ajasta riippuvia tapahtumia ovat erilaiset sääilmiöistä johtuvat tapahtumat, komponenttien vikaantumiset ja erilaiset huoltotyöt. Nämä ovat sellaisia tapahtumia, joiden todennäköisyyden voidaan huomata muuttuvan, kun tapahtumaa tarkastellaan vuorokauden tarkkuudella yhden vuoden ajan.

Ajasta riippuvaa PRA-mallia voidaan hyödyntää monella tavalla esimerkiksi turvallisuuteen liittyviä päätöksiä tai valintoja tehtäessä. Ajasta riippuva malli antaa mahdollisuuden tehdä turvallisuuden kannalta parempia päätöksiä vallitsevissa olosuhteissa. Tämän lisäksi ajasta riippuvan mallin avulla voidaan arvioida huoltojen ja koestuksien tarvetta ja toteutusajankohtia.

Tässä työssä esitellään kaksi ajasta riippuvaa mallia; pienempi kuuden minimikatkosjoukon malli ja isompi Laitosmalli. Kuuden minimikatkosjoukon mallin tarkoitus on havainnollistaa ajasta riippuvien tapahtumien esiintymistä vuoden aikana. Laitosmalli kuvaa koko laitoksen toimintaa realistisemmin kuin kuuden minimikatkosjoukon malli. Laitosmallin kokoa on rajoitettu poistamalla siitä osa perustapahtumista, jotka kuuluvat alkuperäiseen malliin. Se kuitenkin kuvaa alkuperäistä mallia riittävän hyvin, jotta sen avulla voidaan tehdä päätelmiä ajasta riippuvan mallin käyttökelpoisuudesta.

Ajasta riippuvan mallin lisäksi työssä määritellään ajasta riippuvaan malliin perustuva tehoajojaksolla tehtävien ennakkohuoltojen ajankohdan optimointiongelma. Ajasta riippuvaa mallia tehtäessä todettiin, että ennakkohuoltojen sijoittumisella tehoajojaksolla on vaikutusta sydänvauriotaajuuteen. Optimointitehtävän tarkoitus on löytää ennakkohuolloille sellaiset ajankohdat, joilla vuosittainen sydänvauriotaajuuden odotusarvo minimoituisi.

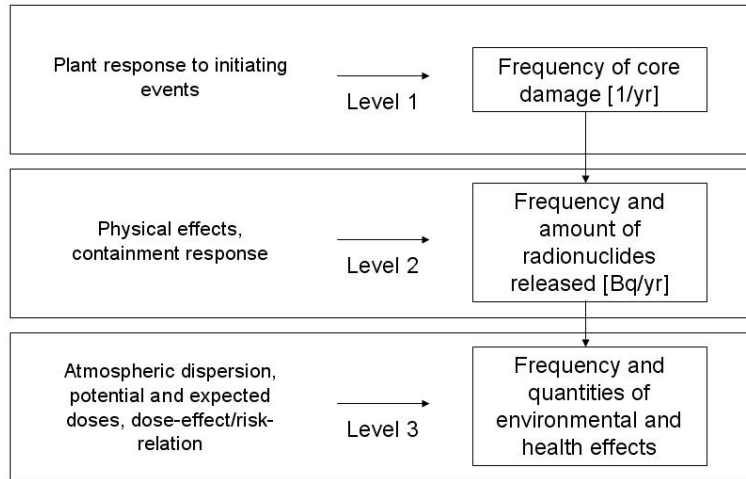
2 Todennäköisyysperusteinen riskianalyysi

Ydinlaitoksen toimintaan liittyy paljon erilaisia lakeja, asetuksia ja vaatimuksia, joiden toteutumista valvotaan sekä yhtiön että viranomaisen toimesta. Säteilyturvakeskus (STUK) edellyttää tiettyjä toimintoja ja toimintatapoja kaikilta Suomessa toimivilta ydinvoimalaitoksilta. Yksi näistä vaatimuksista on laitoksen kokonaisvaltainen todennäköisyysperusteinen riskianalyysi (PRA, Probabilistic risk analysis), jolla arvioidaan analyytisesti laitoksen turvallisuutta ja sen turvallisuusjärjestelmien teknisiä ratkaisuja. PRA muodostaa ydinlaitoksen ydinturvallisuuteen liittyvän riskienhallinnan perustan ja antaa kokonaiskuvan laitoksen turvallisuuden tilasta. PRA:n tulee kattaa laitoksen koko elinikä, suunnitteluvaiheesta laitoksen purkuun, ja sen tulee olla aina ajantasainen. [33]

PRA jakautuu tyypillisesti kolmeen osaan; taso 1, taso 2 ja taso 3. [26, 33]

- Tasossa 1 määritetään ydinpolttoaineen vaurioitumiseen johtavat onnettomuusketjut ja arvioidaan niiden todennäköisyydet. Sen tarkoituksena on kartoittaa laitoksen heikkoudet ja suunnitteluvirheet. Tason 1 PRA-mallissa määritetään sydänvauriotaajuus, joka kuvaa analysoidavan laitoksen sydämen sulamiseen johtavien onnettomuusketjujen taajuuksia.
- Tasossa 2 arvioidaan ydinvoimalaitoksesta vuotavien radioaktiivisten aineiden päästön määrää, todennäköisyyttä ja ajoittumista. Tason 2 onnettomuuden laatuun ja vakavuuteen (päästön suuruuteen) vaikuttaa tason 1 onnettomuuden laatu.
- Tasossa 3 arvioidaan radioaktiivisten aineiden päästön aiheuttamaa riskiä ihmisille ja ympäristölle. Tason 3 vaikutuksia voidaan arvioida tason 2 tulosten avulla.

Polttoaineen vaurioitumiseen johtava tasolla 1 analysoidava onnettomuus voi johtaa tasolla 2 analysoidavaan onnettomuuteen ja jopa tasolla 3 analysoidavien seurauksien realisoidumiseen. Tässä työssä käsittelemme ainoastaan tasoa 1. [33]



Kuva 1: PRA:n tasot ja niiden seurauksien arviointi [26]

Tason 1 onnettomuusketjuja ja niiden todennäköisyyksiä mallinnetaan TVO:lla FinPSA-ohjelmalla, joka on alunperin STUK:n kehittämä ja nykyään VTT:n hallinnoima riskianalyysityökalu. Ohjelmalla mallinnetaan analysoitavalle ydinvoimalaitosyksikölle vikapuut, tapahtumapuut ja erilaisten tapahtumien todennäköisyystietokannat. Näiden avulla voidaan määrittää minimikatkosjoukot. Minimikatkosjoukot esittävät analyysissa tunnistettuja polttoaineen vaurioitumiseen johtavia erilaisia onnettomuusketjuja. Minimikatkosjoukkojen taajuuksien summa kuvaa sydänvauriotaajuutta. [40]

2.1 Tapahtumapuu

Alkutapahtuma on niin sanotusti ensimmäinen tapahtuma (käyttöhäiriö tai onnettomuus), joka aiheuttaa sellaisen häiriön laitokselle, että laitoksen turvallisuuden varmistamiseksi suunniteltujen turvallisuustoimintojen tulee käynnistyä. Alkutapahtumalle määritetään taajuus, toisin sanoen kuinka monta kertaa se esiintyy tarkastelujakson aikana. Alkutapahtumia voivat olla muun muassa ulkoisen sähköverkon menetys, erilaiset poikkeuksellisen voimakkaat sääilmiöt, sisäiset häiriöt tai tulipalot.

Alkutapahtuma voi itsessään johtaa sydänvaurioon, mutta tämä on todella harvinaista. Yleensä alkutapahtumasta seuraa muita turvallisuustoimia

vaativia tapahtumia.

Yleisesti tapahtumalla on seuraus tai seurauksia, jotka vaikuttavat laitoksen toimintaan. Määritellään aluksi yleisesti *tapahtuman seuraus* ja *seurausavaruus*.

Määritelmä 2.1. [28] *Tapahtuman seuraus* (ω , *Outcome of an event*) on tapahtuman lopputulos tai lopputila. Se kuvaa sitä mihin tapahtuma voi johtaa esimerkiksi onnistuessaan tai epäonnistuessaan. Tapahtumilla voi olla useita seurauksia ja tätä joukkoa kutsutaan *seurausavaruudeksi*.

Määritelmä 2.2. [28] Olkoon n äärellinen määrä tapahtuman seurauksia. Tällöin *seurausavaruus*

$$W = \{\omega_j\} \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

jossa seuraukset ω_j ovat toisensa pois sulkevia. Näin ollen vain yksi seuraus on mahdollinen yhdelle tapahtumalle kerrallaan.

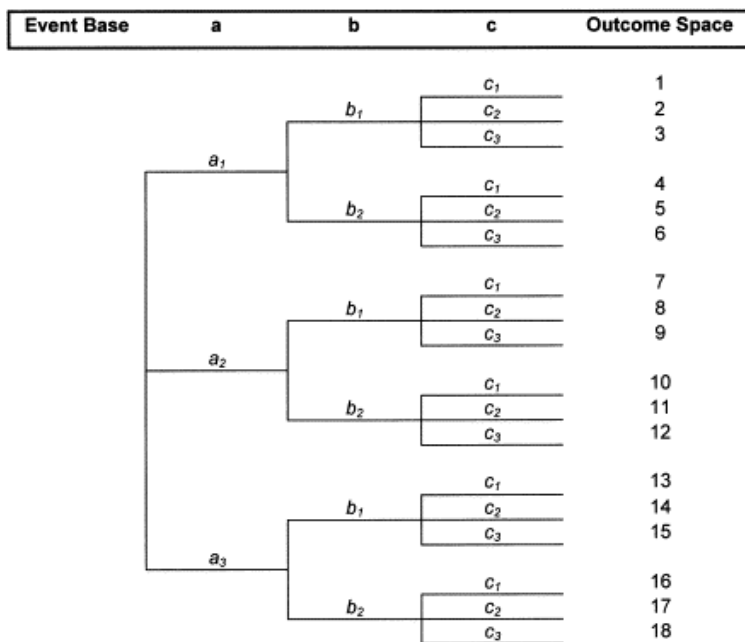
Tapahtumapuun muodostuu alkutapahtumasta ja sitä seuraavista turvallisuustoimista. Se kuvaa (onnettomuus)tilanteen etenemistä alkutapahtumasta lähtien lopulliseen seuraukseen (ydinvoimalaitoksella pahimmassa tapauksessa sydänvaurioon). Yksinkertaisimmillaan tapahtumapuun kuvaa alkutapahtuman ja sen seurausavaruuden. Kuva 2 kuvaa tällaista yksinkertaista tapahtumapuuta. [28, 38]

Useimmiten alkutapahtumaa seuraa joukko vaadittavia turvallisuustoimia, jolloin seurausavaruus voi suureta. Kuvassa 3 alkutapahtumaa seuraa kolme tapahtumaa a , b ja c . Seurausavaruus muodostuu tapahtumien yhdistetyistä seurauksista. Yhdistetyt seurausavaruudet saadaan karteesisen tulon avulla. Karteesisen tulon määritelmää ei kuitenkaan käsitellä tässä tarkemmin, koska sen ymmärtäminen ei ole työn tavoitteen kannalta oleellista. [28]

Kuvan 3 tapahtumapuussa tapahtumilla a ja c on useampia seurauksia. Kuitenkin yleensä ydinvoimalaitosten PRA-mallin tasolla 1 tapahtumapuissa yhdellä tapahtumalla on vain kaksi seurausta. Kysytään; onnistuuko turvallisuustoiminto vai ei?

Event e	Outcome Space
	1
	2
	3
:	:
:	i
:	:
:	l

Kuva 2: Tapahtuma e ja sen seurausavaruus [28]



Kuva 3: Tapahtumapuu, jossa alkutapahtuma ja sitä seuraavat tapahtumat a , b ja c [28]

TVO:n PRA-mallin tapahtumapuissa aika kulkee vasemmalta oikealle, alkaen alkutapahtumasta ajanhetkellä nolla. Alkutapahtuman aiheuttama

käyttöhäiriö vaatii tiettyjä turvallisuustoimia. Näiden toimien epäonnistumista tai onnistumista kuvaavat tapahtumapuun tapahtumat. Tapahtuman todennäköisyys vastaa kysymykseen; millä todennäköisyydellä kyseessä oleva turvallisuustoimi epäonnistuu? Tapahtuman todennäköisyys määräytyy vikapuusta saatavien perustapahtumien todennäköisyyksien avulla.

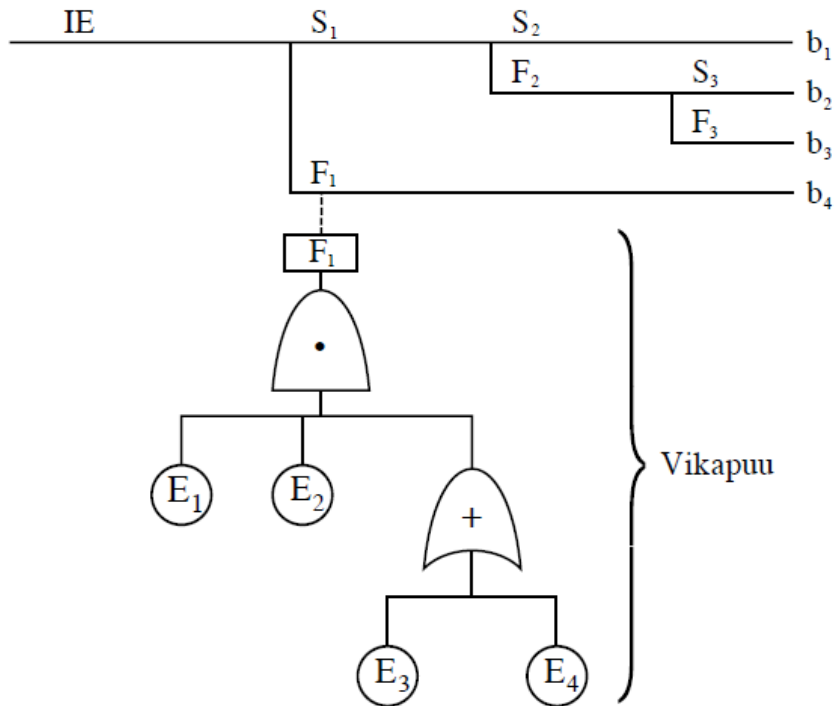
2.2 Vikapuu

Vikapuu on looginen kaavio, joka pyrkii esittämään tiettyyn vikaan liittyvät syy-seuraussuhteet. Vikapuu muodostuu pääsääntöisesti huipputapahtumasta, loogisista porteista ja perustapahtumista. Huipputapahtuma on kriittinen tapahtuma tai vika, johon perustapahtumien erilaiset tapahtumakombinaatiot johtavat. PRA-mallissa huipputapahtumat ovat usein turvallisuustoimintojen epäonnistumisia ja linkittyvät näin tapahtumapuihin. Vikapuu kuvaa siis kaikki mahdolliset tavat, joilla jokin tietty turvallisuustoimi voi epäonnistua. [8, 22]

Vikapuussa on erilaisia loogisia portteja, mutta näistä yleisimpiä ovat TAI- ja JA-portit. Portit määräävät millä tavalla perustapahtumat linkittyvät toisiinsa ja huipputapahtumaan. [8, 22]

Tiettyyn järjestelmään liittyvän turvallisuustoiminnon epäonnistuminen voi johtua yhdestä tai useammasta sen osajärjestelmän tai komponentin vikaantumisesta. Perustapahtumat ovat näitä järjestelmän eri osien erilaisia vikoja tai muita häiriötiloja. Perustapahtumia voivat esimerkiksi olla tapahtumat; venttiilin jumiutuminen kiinni, pumpun käynnistäminen ei onnistu tai mittalaitteen virheellinen kalibrointi. [8, 33, 40]

Turvallisuus- Turvallisuus- Turvallisuus-
 Alkutapahtuma toiminto 1 toiminto 2 toiminto 3 Haara :



Kuva 4: Tapahtumapuu ja sen turvallisuustoimintoon 1 liittyvä vikapuu [22]

2.3 Perustapahtumat

PRA-mallissa käytetään ilmaisua alku- tai perustapahtuman taajuus tai todennäköisyys. Näitä todennäköisyyksiä hyödynnetään laitoksen sydänavauriotaajuuden määrittämisessä. Alkutapahtuman taajuudella tarkoitetaan sitä kuinka monta kertaa vuodessa alkutapahtuma sattuu laitoksella. Perustapahtumien todennäköisyydet ovat kyseisen järjestelmän turvallisuustoiminnon epäonnistumiseen johtavia, järjestelmän osien epäkäytettävyyden todennäköisyyksiä tarvetilanteessa. Kyseessä voi olla komponenttien vikaantumisia tai operaattorin tekemän toimenpiteen epäonnistuminen. Turvallisuustoiminnon epäonnistuminen edellyttää kuitenkin yleensä useamman eri perustapahtuman toteutumisen. [8, 22, 26]

Alkutapahtuman ja perustapahtuman käsitteet eivät ole täysin yksise-

litteisiä. Tässä työssä yleisesti viitattaessa perustapahtumiin, tarkoitetaan yleensä alku- sekä perustapahtumia. Alkutapahtumat ovat perustapahtumia, joilla on joitakin ominaisuuksia mitkä hieman eroavat muista perustapahtumista. Alkutapahtumilla on todennäköisyyden sijasta taajuus ja ne esiintyvät tapahtumapuussa aina ensimmäisenä.

2.4 Minimikatkosjoukot

Minimikatkosjoukko on epätoivottuun lopputulokseen johtava onnettomuusketju, joka alkaa alkutapahtumasta ja sitä voi seurata joukko muita perustapahtumia. Minimikatkosjoukko on siis joukko perustapahtumia, jotka johtavat sydänvaurioon, mutta sydänvauriota ei tapahdu, jos joukosta poistetaan yksikin tapahtuma. Toisin sanoen, minimikatkosjoukko on pienin mahdollinen perustapahtumien joukko, joka johtaa sydänvaurioon. [26, 33, 40]

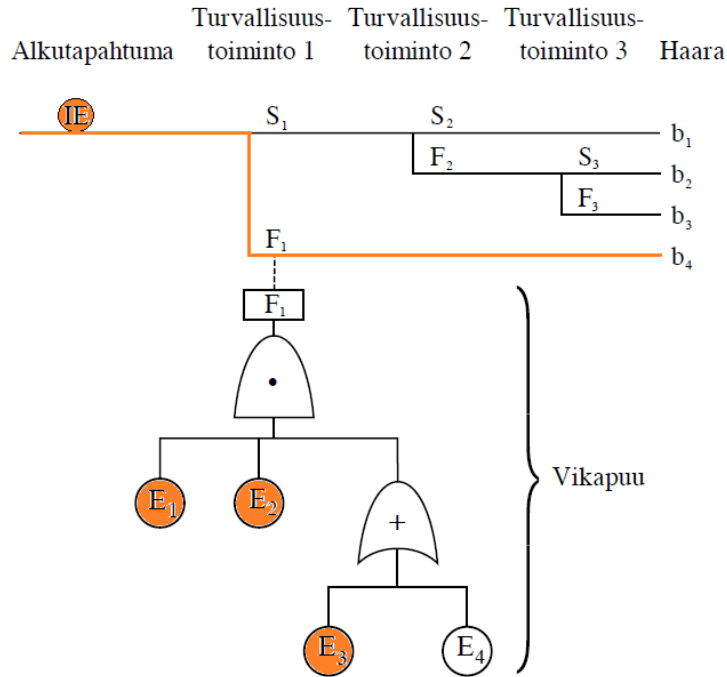
Minimikatkosjoukkojen todennäköisyyksien avulla voidaan laskea ydinvoimalaitosyksikön reaktorisydämen vaurioitumisen taajuuden odotusarvo, eli sydänvauriotaajuus. Tämän odotusarvon tulee olla uusilla Suomeen rakennettavilla ydinvoimalaitosyksiköillä pienempi kuin 10^{-5} /vuosi. [33, 40]

Määritelmä 2.3. [33] *Minimikatkosjoukko* (*mcs*, *Minimal cut set*) tarkoittaa tason 1 PRA:ssa pienintä alkutapahtuman ja vika- tai virhetoimintojen joukkoa, joka riittää johtamaan sydänvaurioon.

Minimikatkosjoukko voi koostua joko yhdestä tai useammasta perustapahtumasta. Minimikatkosjoukon taajuus saadaan kertomalla kaikkien perustapahtumien taajuudet keskenään, koska perustapahtumat ovat toisistaan ripumattomia. [40]

Kuvassa 5 on oranssilla merkitty tapahtumasarjan kulku. Jos perustapahtumien E_1 , E_2 ja E_3 toteutuvat, niin turvallisuustoimi 1 epäonnistuu ja päädytään lopputilaan b_4 . Tällöin minimikatkosjoukkoon $mcs\{IE, E_1, E_2, E_3\}$ kuuluvat tapahtumat ovat alkutapahtuma IE ja perustapahtumat E_1 , E_2 ja E_3 . Minimikatkosjoukon taajuus

$$P_{mcs} = P(IE)P(E_1)P(E_2)P(E_3). \quad (2)$$



Kuva 5: Yksinkertainen minimikatkosjoukko mcs ja siihen liittyvä vikapuu

Koska perustapahtuma E_3 toteutuu, perustapahtuman E_4 ei tarvitse toteutua, koska niiden välillä on TAI-portti. Jos kuitenkin perustapahtuma E_4 toteutuu ja se huomioidaan katkosjoukossa, on kyseessä minimikatkosjoukon sijaan katkosjoukko $cs\{IE, E_1, E_2, E_3, E_4\}$. Katkosjoukko cs johtaa samaan lopputilaan b_4 kuin minimikatkosjoukko mcs . Samaan lopputilaan päädyttäisiin myös, jos perustapahtuma E_4 toteutuisi ja E_3 jäisi toteutumatta. Tällöin minimikatkosjoukko olisi $mcs\{IE, E_1, E_2, E_4\}$.

3 Perustapahtumien aikariippuvuuden mallinnus

PRA-malliin liittyy useita ajasta riippuvia tekijöitä ja tapahtumia. Usein kuitenkin ydinvoimalaitosten PRA -malleissa nämä ajasta riippuvat tekijät on parametrisoitu, käyttämällä esimerkiksi niiden odotusarvoa tai keskiarvoa. Tämä ei kuvaa tapahtumien hetkellisiä tiloja kovin realistisesti, mutta saattaa helpottaa laskentaa. Parametrisointi pyritään tekemään aina mahdollisimman realistisesti. Mikäli realistinen mallinnustapa ei ole mahdollinen, tehdään se konservatiivisesti. Näin voidaan varmistua siitä, että laitoksen todellinen tila on aina turvallisuuden kannalta parempi tai sama kuin mallista saatava tulos osoittaa. [33]

3.1 Komponenttien vikaantuminen

Tässä työssä on tarkoitus laajentaa alkuperäistä PRA-mallia, niin että komponenttien ja laitteiden vikaantumistodennäköisyydet riippuvat ajasta. Alkuperäisessä mallissa komponenttien vikaantumisen on oletettu noudattavan Poisson-prosessia, jolloin tarkasteluväleillä satunnaismuuttuja on eksponenttijakautunut. Komponentin vikaantumista on tarkasteluvälillä kuvattu eksponenttijakautuneen satunnaismuuttujan odotusarvolla. Tätä todennäköisyyttä käytetään vuoden jokaiselle päivälle kuvaamaan kyseisen komponentin vikaantumistodennäköisyyttä.

Tässä työssä esiteltävä ajasta riippuva malli perustuu samoihin oletuksiin komponenttien vikaantumisen käyttäytymisestä. Tarkasteltavia komponentteja on kahdenlaisia; jatkuvasti operoivia ja välillä operoivia komponentteja. Jatkuvasti operoivat komponentit ovat toiminnassa aina laitoksen käydessä normaalisti. Tällaisia komponentteja ovat esimerkiksi erilaiset pumput. Välillä operoivat komponentit taas ovat niin sanotusti varalla. Tällaisia komponentteja ovat muun muassa venttiilit. Niiden tulee pysyä ennalta määrättyssä asennossa, kunnes tarve muuttuu, jolloin niiden tilan tulee myös muuttua.

Ajasta riippuvassa mallissa tarkastellaan kuitenkin vikaantumistodennäköisyyttä vuorokauden tarkkuudella. Tällöin komponentinvikaantumista ku-

vataan eksponenttijakauman odotusarvolla. Vikaantumistodennäköisyys kasvaa tarkasteluvälillä, koska tarkastelu ajankohta t kasvaa. Muuttuja t nollaantuu tarkastelujakson päätepisteessä, jolloin vikaantumistodennäköisyyden kasvu "alkaa alusta". Tällä periaatteella toimii sekä alkuperäinen malli kuin ajasta riippuva mallikin. Ajasta riippuvassa mallissa tämä vikaantumistodennäköisyyden vaihtelu näkyy, kun taas alkuperäisessä mallissa se on keskiarvoistettu.

3.1.1 Poisson-prosessi

Poisson-prosessin avulla mallinnetaan usein PRA-mallin laitoksella esiintyvien vikojen ilmaantumistodennäköisyyttä. Poisson-prosessin käyttö mallinnuksessa edellyttää kuitenkin perustapahtumilta tiettyjä ominaisuuksia:

- 1 Perustapahtumaan johtavan fyysisen prosessin ei oleteta muuttuvan ajan myötä
- 2 Perustapahtuman esiintyminen tarkasteluvälillä ei vaikuta sen tai muiden perustapahtumien esiintymistäajuuteen eri aikaväleillä

Toisin sanoen oletus 2 edellyttää perustapahtumien välistä riippumattomuutta. Tapahtumien riippumattomuus on myös yksi Poisson-prosessin oletuksista. Koska prosessin ei oleteta muuttuva ajan myötä, on intensiteetti λ vakio (oletus 1), eli kyseessä on homogeeninen Poisson-prosessi. [42, 27]

Poisson-prosessi on stokastinen prosessi, jossa tapahtumien esiintymislukumäärä $N(t)$ on Poisson-jakautunut aikavälillä t ja erillisillä aikaväleillä sattuvat tapahtumat ovat riippumattomia. Tällöin n tapahtuman esiintymistodennäköisyys aikavälillä t on

$$P(N(t) = n) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad (3)$$

[41, 42]

TVO:lla Poisson-prosessia käytetään yksittäisten komponenttien vikaantumistodennäköisyyden määrittämiseen. Oletetaan koestusaikojen ja niihin liittyvien korjausaikojen olevan pieniä (lähestyvät nolaa). Koestuksen jälkeen

komponentin oletetaan olevan täysin käyttökuntoinen, uutta vastaava. Mikäli koetuksessa havaitaan vika, se korjataan välittömästi. Tarkastellaan todennäköisyyttä, jolla komponentti vikaantuu koestusvälillä $t \in (0, T_{test})$ ainakin kerran.

$$\begin{aligned} &P(\text{komponentti hajoaa ainakin kerran ennen koestusta}) \\ &= P(N(T_{test}) \geq 1) = 1 - P(N(T_{test}) \leq 0) = 1 - P(N(T_{test}) = 0). \end{aligned}$$

Nyt koska $P(N(t) = 0) = e^{-\lambda T_{test}} \frac{(\lambda T_{test})^0}{0!} = e^{-\lambda T_{test}}$ [41], niin

$$P(N(T_{test}) \geq 1) = 1 - e^{-\lambda T_{test}}. \quad (4)$$

Poisson-prosessin tapahtumat ovat eksponentti-jakautuneita koestusväleillä, kun oletetaan että, tapahtumat ovat riippumattomia toisistaan. Koestusten välillä komponenttien vikaantumistodennäköisyyttä kuvataan eksponenttijakauman kertymäfunktion arvolla. Alkuperäisessä mallissa tämä komponenttien vikaantumistodennäköisyys on kertymäfunktion keskiarvo koestusvälillä, kun taas ajasta riippuvassa mallissa se on kertymäfunktion hetkellinen arvo koestusvälin ajan hetkellä t . [41]

3.1.2 Alkuperäinen komponenttikohtainen malli

Komponentteja on kahdenlaista eri tyyppiä: Jatkuvasti operoivia ja välillä operoivia komponentteja. Komponentin epäkäytettävyyden mallinnus riippuu siitä kumpaa komponenttityyppiä se on. Jatkuvasti operoivien komponenttien toiminta-ajan vaatimusaika on 24 tuntia, jolloin niiden vikaantumisen tarkasteluväli on vuorokausi.

Välillä operoivien komponenttien vikaantumista tarkastellaan koestusvälillä. Vikaantumistodennäköisyyden oletetaan nollaantuvan, kun komponentti on koestettu. Koestus tehdään tietyn väliajoin komponentin toimivuuden varmistamiseksi. Koetuksessa testataan toimiiko komponentti vai ei. Esimerkiksi avautuuko jokin venttiili tai käynnistyykö pumppu tarvittaessa. Jatkuvasti operoivien komponenttien vikaantuminen oletetaan havaittavan heti, jolloin näitä komponentteja ei koesteta.

Alkuperäisessä mallissa komponentin vikaantumistodennäköisyys varallaolon aikana on parametriarvo, joka on kertymäfunktion keskiarvo tarkastelujaksolla. Komponenttien vikaantumismallissa on huomioitu seisonta-aikana tapahtuva vikaantumistodennäköisyyden kasvu, korjauksen vaikutus epäkäytettävyyteen sekä mahdolliset ajasta riippumattomat tekijät.

Määritelmä 3.1. [5] *Epäkäytettävyys* on todennäköisyys sille, että kyseinen komponentti tai laite ei ole toimintakunnossa tarkasteluhetkellä t .

Alkuperäisessä mallissa jatkuvasti operoiville komponenteille on määritetty epäkäytettävyys

$$P = Q + (1 - Q) (\lambda_{oper} T_{rep} + 1 - e^{-\lambda_{oper} T_{miss}}), \quad (5)$$

missä Q on satunnainen ajasta riippumaton vikaantumistodennäköisyys (yleensä nolla), λ_{oper} on vikaantumisintensiteetti komponentin operoidessa, T_{rep} on korjauksen kesto aika tunneissa, T_{miss} on laitteen toiminta-ajan vaatimusaika (yleensä 24 tuntia).[3]

Välillä operoiville komponenteille on vastaavasti määritetty epäkäytettävyys

$$P = Q + (1 - Q) \left(1 - \frac{1}{\lambda_{stby} T_{test}} (1 - e^{-\lambda_{stby} T_{test}}) \right) + (1 - Q) (\lambda_{stby} T_{rep} + 1 - e^{-\lambda_{oper} T_{miss}}), \quad (6)$$

missä λ_{stby} on vikaantumisintensiteetti komponentin ollessa varalla, T_{test} on koestusväli. [3]

3.1.3 Komponenttikohtainen ajasta riippuva malli

Tässä työssä on tarkoitus määrittää välillä operoivien komponenttien epäkäytettävyydet uudelleen niin, että ne muuttuvat ajan kuluessa. Toisin sanoen komponenttien vikaantuminen esitetään ajan funktiona. Vikaantumistodennäköisyyden oletetaan nollaantuvan kun komponentti on koestettu, koska tällöin tiedetään laitteen toimivan normaalisti.

Tässä työssä ei ole mallinnettu uudelleen jatkuvasti operoivien komponenttien vikaantumistodennäköisyyksiä, koska niiden odotettu toiminta-aika on pääsääntöisesti 24 tuntia ja malli lasketaan vuorokauden tarkkuudella.

Välillä operoivien komponenttien ajasta riippuva muuttuja on koestusaika, eli edellisestä koestuksesta kulunut aika. Muut parametrit eivät muutu. Tällöin kaava (6) tulee muotoon

$$P = Q + (1 - Q) (1 - e^{-\lambda_{stby} t \times 24} + \lambda_{stby} T_{rep} + 1 - e^{-\lambda_{oper} T_{miss}}), \quad (7)$$

missä $t = 1, 2, \dots, T_{test}$.

Alkuperäisessä mallissa komponenttien vikaantumistodennäköisyys laskennassa käytetty ajan yksikkö on tunti, jonka vuoksi muuttujaa t tulee kertoa 24 tunnilla. Alkupärisessä mallissa käytetään kertymäfunktion keskiarvoa tarkastelujaksolla, joka lasketaan kertymäfunktion arvon avulla tarkastelujakson päätepisteessä. Ajasta riippuvassa mallissa tarkastellaan kertymäfunktion arvoa reaaliajassa vuorokauden tarkkuudella. Muuttuja t on kuvattu vuorokauden tarkkuudella, sillä tässä vaiheessa ei ole mielekää kehittää tarkempaa mallia.

Esimerkki 3.2. Oletetaan, että komponentin keskiarvoistettu epäkäytettävyys saadaan yhtälöstä (6) ja ajasta riippuva todennäköisyys yhtälöstä (7).

$$Q = 0$$

$$T_{test} = 168 \text{ h}$$

$$T_{rep} = 13.5 \text{ h}$$

$$\lambda_{oper} = 1.92 \times 10^{-5} \frac{1}{h}$$

$$\lambda_{stby} = 3.15 \times 10^{-6} \frac{1}{h}$$

$$T_{miss} = 24 \text{ h}$$

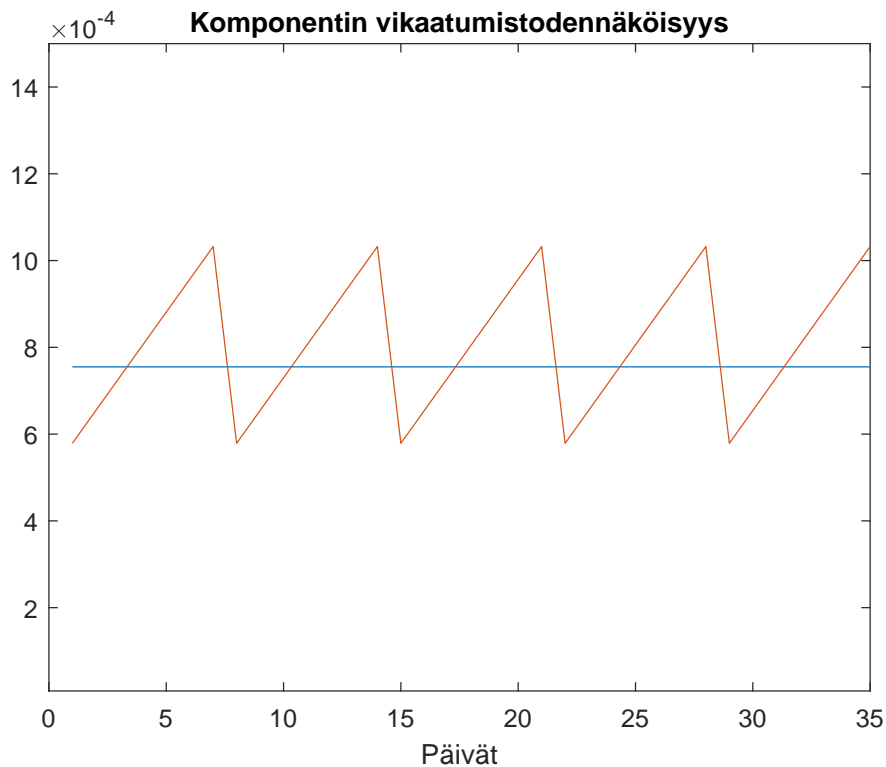
Merkitään komponentin keskiarvoistettua vikaantumistodennäköisyyttä P_m , jolloin se voidaan laskea kaavan (6) seuraavasti:

$$\begin{aligned}
P_m &= Q + (1 - Q) \left(1 - \frac{1}{\lambda_{stby} T_{test}} (1 - e^{-\lambda_{stby} T_{test}}) \right) \\
&\quad + (1 - Q) (\lambda_{stby} T_{rep} + 1 - e^{-\lambda_{oper} T_{miss}}) \\
&= 1 - \frac{1}{3.15 \times 10^{-6} \times 168} (1 - e^{-3.15 \times 10^{-6} \times 168}) \\
&\quad + 3.15 \times 10^{-6} \times 13.5 + 1 - e^{-1.92 \times 10^{-5} \times 24} \\
&= 7.55 \times 10^{-4}
\end{aligned}$$

Komponentin ajasta riippuva vikaantumistodennäköisyyttä merkitään P_t , kun $t = 1 \times 24, 2 \times 24, 3 \times 24, \dots, 7 \times 24$

$$\begin{aligned}
P_t &= Q + (1 - Q) (1 - e^{-\lambda_{stby} t} + \lambda_{stby} T_{rep} + 1 - e^{-\lambda_{oper} T_{miss}}) \\
&= \begin{cases} 2 - e^{-3.15 \times 10^{-6} \times 24} - e^{-1.92 \times 10^{-5} \times 24} + 3.15 \times 10^{-6} \times 13.5 \\ 2 - e^{-3.15 \times 10^{-6} \times 48} - e^{-1.92 \times 10^{-5} \times 24} + 3.15 \times 10^{-6} \times 13.5 \\ 2 - e^{-3.15 \times 10^{-6} \times 72} - e^{-1.92 \times 10^{-5} \times 24} + 3.15 \times 10^{-6} \times 13.5 \\ 2 - e^{-3.15 \times 10^{-6} \times 96} - e^{-1.92 \times 10^{-5} \times 24} + 3.15 \times 10^{-6} \times 13.5 \\ 2 - e^{-3.15 \times 10^{-6} \times 120} - e^{-1.92 \times 10^{-5} \times 24} + 3.15 \times 10^{-6} \times 13.5 \\ 2 - e^{-3.15 \times 10^{-6} \times 144} - e^{-1.92 \times 10^{-5} \times 24} + 3.15 \times 10^{-6} \times 13.5 \\ 2 - e^{-3.15 \times 10^{-6} \times 168} - e^{-1.92 \times 10^{-5} \times 24} + 3.15 \times 10^{-6} \times 13.5 \end{cases} \\
&= \begin{pmatrix} 5.79 \times 10^{-4} \\ 6.54 \times 10^{-4} \\ 7.30 \times 10^{-4} \\ 8.06 \times 10^{-4} \\ 8.81 \times 10^{-4} \\ 9.57 \times 10^{-4} \\ 1.03 \times 10^{-3} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

Kuvassa 6 sininen suora kuvaa epäkäytettävyyden $P_m(\tau)$ ajan funktiona ja oranssi ajasta riippuvan epäkäytettävyyden $P_t(\tau)$ ajan funktiona, kun $\tau \in (0, 35)$ vuorokautta.



Kuva 6: Esimerkin 3.2 kuva

3.2 Yhteisviat

Ydinvoimalan turvallisen käyttämisen takaamiseksi on yhdessä ydinvoimalaitosyksikössä useita osajärjestelmiä. Toisistaan toiminnallisesti riippumattomat osajärjestelmät suorittavat samaa tehtävää laitoksella ja varmistavat näin ollen turvallisuuden kannalta tärkeiden toimintojen luotettavan käytön. Tällöin yhden osajärjestelmän vikaantuminen ei estä laitoksen toimintaa, eikä aiheuta vaikeuksia laitoksen turvallisessa alasajossa. Yleensä laitos on suunniteltu niin, että se kestää useamman osajärjestelmän toimimattomuuden. Näin ollen osajärjestelmät mahdollistavat myös huoltotyöt tehoajon aikana. [30]

Yhteisvika aiheuttaa useamman komponentin vikaantumisen samasta perussyystä johtuen. Vikaantumisten ei tarvitse tapahtua samanaikaisesti, mutta niiden tulee riippua toisistaan. Yhteinen perussy vikaannuttaa useamman

osajärjestelmän todennäköisemmin, kuin ne vikaantuisivat toisistaan riippumatta. Tästä syystä osajärjestelmien lisääminen ei välttämättä paranna turvallisuutta. [29]

3.2.1 TVO:n käytössä oleva yhteisvikamalli

Olkiluoto 1 ja 2 PRA-malleissa yhteisvikatapahtumia esiintyy paljon, joten niillä on suuri merkitys riskien arvioinnissa. Yksittäisvikatapahtumat harvoin, jos koskaan, pystyvät aiheuttamaan laitokselle sellaista poikkeustilaa, joka vaarantaisi laitoksen toiminnan.

TVO:lla käytössä olevan yhteisvikamallin on kehittänyt Tuomas Mankamo, joka on tutkinut yhteisvikojen mallinnusta 70-luvulta saakka. Käytössä oleva malli perustuu pitkälti primitiiviparametrisointiin ja muistuttaa jossain määrin MULDEP-mallia. [35]

Ryhmävikatodennäköisyydet mallinnetaan yksittäiskomponenttivikojen P_1 avulla seuraavasti

$$P_k = \prod_{n=1}^{k-1} z_n P_1, \quad (8)$$

missä $P_k = P\{\text{Ainakin määrätty } k \text{ identtistä komponenttia vioittuvat}\}$. Suhdeparametrien z_k arvot mallinnetaan tapauskohtaisesti painovektoreiden avulla. Tässä työssä ei käsitellä suhdeparametrien z_k mallinnusta. [35]

Todellisuudessa yhteisvikojen kuvaamiseen PRA-mallissa käytetään syytekijäparametreja Q_k , koska ryhmävikatodennäköisyydet P_k ovat riippuvaisia toisistaan. Syytekijäparametrit muodostetaan arvioimalla yhteisviat niiden riippumattomien ja yhteisten vikasyiden kombinaatioiden avulla. Ryhmävikatodennäköisyydet on määritetty syytekijäparametrien avulla, kuten esimerkissä on havainnollistettu tapaukselle P_1 . Myöhemmin syytekijäparametrit Q_k on voitu ratkaista näistä yhtälöistä ryhmävikatodennäköisyyksien P_k avulla. [35]

Esimerkki 3.3. [35] Määritellään ryhmävikatodennäköisyys P_1 syytekijäparametrien Q_k , $k = 1, 2, 3, 4$ avulla, kun kyseessä on neljäreduntanttinen

järjestelmä.

$$\begin{aligned}
P_1 &= P\{\text{Määrätty komponentti (neljän ryhmästä) vioittuu}\} \\
&= P\{X_A\} = P\{X_B\} = P\{X_C\} = P\{X_D\} \\
&= P\{C_A + C_{AB} + C_{AC} + C_{AD} + C_{ABC} + C_{ABD} + C_{ACD} + C_{ABCD}\} \\
&\lesssim P\{C_A\} + P\{C_{AB}\} + \dots + P\{C_{ABC}\} + \dots + P\{C_{ABCD}\} \\
&= Q_1 + 3Q_2 + 3Q_3 + Q_4,
\end{aligned}$$

missä X_I on komponentin I vika, C_I on komponentin I riipumattomat vikasyyt ja C_{IJ} komponenttien I ja J yhteiset vikasyyt.

Ryhmävikatodennäköisyyksien avulla arvioidut syytekijäparametrit ovat

$$Q_2 = \frac{\sqrt{b^2 - 4ac} - b}{2a} \quad (9)$$

$$Q_3 = \frac{P_3 - P_4 - P_1^3(1 - P_1) - 3P_1(1 - 2P_1)Q_2 + 3Q_2^2}{1 - P_2} \quad (10)$$

$$Q_4 = P_4 - P_1^4 - 6Q_2P_1^2 - 3Q_2^2 - 4Q_3P_1 \quad (11)$$

$$Q_1 = P_1 - 3Q_2 - 3Q_3 - Q_4, \quad (12)$$

missä

$$\begin{aligned}
a &= 3(1 - 3P_1) \\
b &= (1 - 3P_1)(1 - 4P_1 + 6P_1^2) \\
c &= -(1 - P_1)(P_2 - P_3) + (1 - 3P_1)(P_3 - P_4) \\
&\quad + P_1^2(1 - P_1)(1 - 2P_1 + 3P_1^2). [35]
\end{aligned}$$

Ryhmävikatodennäköisyys P_1 voidaan määrittää syytekijäparametrien Q_k avulla, kuten esimerkissä 3.3 on määritetty. Tulee kuitenkin huomata, että ryhmävikatodennäköisyyksien määrittämisessä syytekijäparametrien avulla on tehty arvioita ja approksimoitu useammassa kohtaa, jolloin niiden suora määrittäminen syytekijäparametrien avulla on haastavaa. Tämä ei kuitenkaan vaikuta syytekijäparametrien luotettavuuteen.

Tämän työn kannalta oleellista on kuitenkin se, että yhteisvikojen laskenta on tässä työssä suoritettu syytekijäparametrien (9)-(12) avulla erikseen kaikille komponentinvikaantumistodennäköisyyden arvoille.

3.3 Säätömiöt

Ydinvoimalaitoksen ulkoisiin uhkiin luetaan muun muassa erilaiset säätömiöt. Eri ydinvoimalaitoksilla eri puolilla maailmaa säätömiöihin liittyvät ulkoiset uhat ovat hyvin erityyppisiä keskenään. Turvallisuuden kannalta merkittävät säätömiöt tulee kartoittaa ydinlaitoskohtaisesti ja huomioida myös PRA-mallissa. Useimmiten säätömiöt esiintyvät PRA-mallissa alkutapahtumina, mutta niihin voi myös liittyä erilaisia turvallisuusjärjestelmien käytettävyyteen vaikuttavia seurauksia. [33]

Säätömiöt vaihtelevat vuodenajasta riippuen ja tuovat näin ollen erilaisen näkökulman ajasta riippuvaan PRA-malliin. Alkuperäisessä mallissa sääalkutapahtumien taajuus on määritetty vuositasolla, jolloin vuodenaajan vaihtelua ei ole mallissa huomioitu. Tässä työssä esiteltävässä mallissa vuodenaajan vaihtelu on huomioitu sääalkutapahtumien mallinnuksessa.

Määritetään seuraavaksi säätömiöiden aikariippuvuus. Mallinnus on toteutettu kertomalla sääalkutapahtumien alkuperäisen mallin vuositajuuksia P_{wea} kuukausittain sopivilla kertoimilla. Kertoimet α_q , $q = 1, 2, \dots, 12$ on määritetty tapauskohtaisesti kuukausitasolla jokaiselle sääalkutapahtumalle perustuen tilastotietoihin säätömiöihin Suomessa. Näin ollen kuukausikohtaiset todennäköisyydet sääalkutapahtumille ovat muotoa

$$P_q = \alpha_q P_{wea}. \quad (13)$$

Sääalkutapahtumien kuukausittaiset kertoimet α on taulukoitu taulukkoon 1. Tässä työssä esiteltävässä ajasta riippuvassa mallissa lasketaan tapahtumien todennäköisyydet tai taajuudet vuorokauden tarkkuudella. Säätömiöiden esiintymiselle ei ole mielekäästä esittää vuorokauden tarkkuudella vaihtelevaa mallia. Siksi ajasta riippuvassa mallissa käytetään samaa taajuutta P_q kaikille kuukauden q päiville.

Seuraavissa kappaleissa on määritelty tarkemmin kunkin sääalkutapahtuman kertoimien laskenta.

Sääilmä	Huurre	Kylnä ilma	Salama	Lumimyrsky	Myrsky	Levä	Suppo	Lämmin merivesi
Kesä	0	0	0.11	0	0.0213	0.25	0	0.2
Heinä	0	0	0.32	0	0.0106	0.2	0	0.4
Elo	0	0	0.32	0	0.0159	0.1	0	0.4
Syys	0	0	0.12	0	0.0691	0.05	0	0
Loka	0.15	0	0.01	0	0.1232	0	0	0
Marras	0.15	0	0	0.02	0.1809	0	0	0
Joulu	0.15	0.1	0	0.18	0.1862	0	0.05	0
Tamm	0.24	0.4	0	0.31	0.1489	0	0.25	0
Helmi	0.20	0.4	0	0.31	0.1011	0	0.25	0
Maalis	0.11	0.1	0	0.16	0.0798	0	0.25	0
Huhti	0	0	0.06	0.02	0.0426	0.15	0.2	0
Touko	0	0	0.06	0	0.0204	0.25	0	0

Taulukko 1: Kuukausittaiset kertoimet tärkeimmille sääilmiöille Olkiluodossa

3.3.1 Huurre

Huurretta syntyy kylmällä ja kostealla ilmalla. Alijäähtyneet vesipisararat tarttuvat kylmille pinoille ja jäätyvät nopeasti. Kylmällä ilmalla huurretta voi kertyä todella nopeasti. Huurtumista voi tapahtua myös ydinvoimalaitosten ilmastointikanavissa, mikä voi johtaa lämmönpoistojärjestelmän toiminnan heikkenemiseen. [15, 20, 37]

Huurreakutapahtuman kertoimet α_q ovat positiivisia, kun kuukauden keskilämpötila $T_q \leq 6.2^\circ\text{C}$ ja kuukauden keskimääräinen ilmankosteus $RH > 80\%$. Nämä kuukaudet näkyvät taulukossa 2. Taulukossa on myös kirjattu kyseessä olevien kuukausien keskilämpötilat ja keskimääräiset ilmankosteudet. Kuukaudet on pisteytetty lämpötilan ja ilmankosteuden mukaan, huurteen syntymisen kannalta huonoimmasta parhaaseen. Huurteen syntymiselle parhaat olosuhteet on, jos ilman lämpötila on matala ja ilmankosteus on korkea. [14, 37]

Jokaisen kuukauden yhteenlasketuista pisteistä p_q saadaan alkutapahtumakerroin

$$\alpha_q = \frac{p_q}{40}, \quad (14)$$

koska $\sum_{q \in (\text{Loka}, \dots, \text{Maalis})} p_q$.

Kuukausi	Lämpötila $T^{\circ}\text{C}$	Pisteet T	Ilmankosteus $RH\%$	Pisteet RH	Yhteensä
Loka	6.2	1	91	5	6
Marras	0.5	2	89	4	6
Joulu	-2.2	3	87	3	6
Tammi	-4	5	89	4	9
Helmi	-4.5	6	83	2	8
Maalis	-2.6	4	82	1	5

Taulukko 2: Huurrekertomien määrittäminen

3.3.2 Kylmä ilma

Kylmä ilman aiheuttama alkutapahtuma vaatii todella kovia pakkasia. Käytännössä Tällaisia esiintyy ainoastaan sydäntalvella. Kylmä ilman aiheuttaman alkutapahtuman kerroin α_q on positiivinen kun kuukauden ilman keskilämpötila $T < 0^\circ\text{C}$. [14, 37]

3.3.3 Salammat

Salammat voivat aiheuttaa erilaisia tuhoja iskiessään ydinvoimalaitoksiin, mikä takia salamaniskut on sisällyttävä myös PRA-malliin. Salammat voivat aiheuttaa joko mekaanisia tuhoja tai elektronisia vikoja laitteisiin. [6, 37]

Suomessa salamointi on yleisintä kesäisin (touko-syyskuu). Huomattavasti vähäisempää salamointi on loka- ja huhtikuussa. Talvikuukausille salamointia ei ole tilastoitu lainkaan ilmatieteenlaitoksen salamahavainnot-raportissa, joten kertoimet $\alpha_q = 0$ kun $q = \text{Marras}, \dots, \text{Maalis}$. Salama-alkutapahtumien kertoimet α_q on arvioitu vuoden 2015 Suomessa tilastoitujen maasalամoiden määrien perusteella. Mitä suurempi tilastoitujen maasalամoiden määrä, on sitä suurempi on myös kerroin α_q . [23]

3.3.4 Lumimyrsky

Lumimyrsky on lumisateen ja kovan tuulen yhteisvaikutus. Lumisade kovalalla tuulella saattaa tukkia ilmanvaihtokanavia, jolloin laitoksen lämmönpoistojärjestelmien toiminta voi vaarantua. Lumisaderiski on arvioitu Satakunnan alueen ensilumen tuloajankohdan ja pysyvän lumipeitteen lähtemisen ajankohdan perusteella sekä tilastoitujen myrskypäivien määrän perusteella. [16, 17, 20, 37]

3.3.5 Myrsky

Syysmyrskyjen yhteydessä meriveden mukana voi kulkeutua meriroskaa ja muita epäpuhtauksia laitoksen jäähdytysjärjestelmiin ja tukkia ne. Kova tuuli ja aallokko irrottavat meren pohjasta erilaista kasvustoa tai muuta orgaanista ainetta ja kuljettavat sitä laitokselle. Epäpuhtauksia suodatetaan muun

muassa karkea- ja hienovälppien avulla. Pienemmät ja hienojakoisemmat epäpuhtaudet voidaan suodattaa ketjukorisuodattimien avulla. [32, 37]

Meriroskan aiheuttama tukkeuma huomioidaan myös PRA-mallissa. Meriroskan lisäksi mallissa on huomioitu sinisimpukoiden irtoaminen. Olkiluodossa on havaittu sinisimpukoiden kerääntymistä jäähdytysvedenottojärjestelmiin. Sinisimpukat lisääntyvät ja levittäytyvät tehokkaasti. Täysikasvuiset sinisimpukat eivät pääse kulkeutumaan hienovälppien ohi laitoksen merivesijärjestelmiin, mutta simpukoiden toukat ovat pieniä ja kulkeutuvat virtauksen mukana välppien läpi. Toukat kiinnittyvät tunneleiden seiniin ja kehittyvät täysikasvuiseksi sinisimpukoiksi. Simpukoiden irtoaminen voi aiheuttaa jäähdytysvesijärjestelmien tukkeutumisen. [25, 37]

Simpukoiden ja meriroskan irtoamisen ajatellaan aina johtuvan myrskystä. Myrskyyn ja merivesijäähdytyksen menetykseen liittyvän alkutapahtuman taajuus koostuu kahdesta osasta:

- Simpukoiden aiheuttaman tukoksen taajuudesta $P_S = 8,7 \times 10^{-7} \frac{1}{vuosi}$
- Meriroskan aiheuttaman tukoksen taajuudesta $P_M = 1,7 \times 10^{-7} \frac{1}{vuosi}$

[37]

Myrskypäivien määrä on arvioitu Ilmatieteenlaitoksen tilastoitujen vuosien 1994-2017 myrskypäivien avulla, katso viite [17]. Merkitään, että keskiarvo kuukausittaisista myrskypäivien määrästä on K_q , missä $q = 1, 2, \dots, 12$ ja myrskypäivien määrän odotusarvo vuoden aikana on $K_{vuosi=18.8}$. Tällöin kerroin

$$\alpha_q = \frac{K_q}{K_{vuosi}}. \quad (15)$$

3.3.6 Levä

Leväalkutapahtumiin vaikuttavat keväiset levälautat sekä myrskyt, jotka irrottavat meriroskaa ja simpukoita. Ajasta riippuvaan malliin mallinnus on tehty erikseen levän osuudelle ja erikseen meriroskan ja simpukoiden osuudelle. Meriroskalle ja simpukoille käytetään samoja kuukausittaisia kertoimia

Kuukausi	K_q	α_q
Kesä	0.4	0.0213
Heinä	0.2	0.0106
Elo	0.3	0.0159
Syys	1.3	0.0691
Loka	2.3	0.1232
Marras	3.4	0.1809
Joulu	3.5	0.1862
Tammi	2.8	0.1489
Helmi	1.9	0.1011
Maalis	1.5	0.0798
Huhti	0.8	0.0426

Taulukko 3: Kuukausittaiset keskiarvot myrskypäivien määrälle ja niistä lasketut kertoimet [17]

α_q , jotka on määritelty edellisessä kappaleessa 3.3.5. Simpukoiden ja meriroskan osuudet on määritetty uudelleen leväalkutapahtumalle

- Meriroskan osuus alkutapahtumataajuudesta on $P_M = 4,8 \times 10^{-8} \frac{1}{vuosi}$
- Simpukoiden osuus $P_S = 1,9 \times 10^{-7} \frac{1}{vuosi}$.
- Levän osuudelle $P_L = 5,4 \times 10^{-7} \frac{1}{vuosi}$

Levän osuudelle on määritetty kertoimet α_q^{leva} meriveden lämpötilan ja klorofylli-a pitoisuuden yhteisvaikutuksena. Klorofylli-a pitoisuus merivedessä on korkeimmillaan keväällä ja alkukesästä maalis-kesäkuussa. Meriveden lämpötila taas on korkeimmillaan keskikesällä. Taulukossa 1 leväalkutapahtuman kohdalla on ainostaan kerroin α_q^{leva} . [10]

Leväalkutapahtuman kuukausittaiset taajuudet saadaan kaavasta

$$P_q = \alpha_q^{leva} P_L + \alpha_q^{myrsky} (P_S + P_M). \quad (16)$$

3.3.7 Lämmin merivesi

Olkiluodon ydinvoimaloissa käytetään merivettä sähköntuotantoprosessin jäähdyttämiseen. Jatkuva jäähdytysveden saanti on tärkeää laitoksen turvallisen käytön ja alasajon kannalta. Meriveden lämpötilan noustessa liian korkeaksi laitoksien käyttöä ei voida jatkaa normaalisti. Meriveden lämpötilan ollessa riittävän suuri, tulee laitoksen tuotantotehoa alentaa. Ilmastonmuutoksen ja merivesien lämpenemisen myötä tämän alkutapahtuman merkitys tulee korostumaan tulevaisuudessa. [4]

Alkutapahtuman taajuutta on arvioitu keskimääräisten meriveden lämpötilojen avulla. Meren viikottaisen keskilämpötilan ollessa yli $+15\text{ °C}$ on arvioitu liian lämpimän meriveden riskin olevan olemassa, eli kesä-, heinä- ja elokuussa. Tällöin alkutapahtumataajuuden kerroin α_q on asetettu suuremmaksi kuin nolla (taulukko 1). Koska kertoimet on arvioitu kuukausitasolla, on kertoimet sitä suurempia, mitä useamman viikon keskilämpötila ylittää $+15\text{ °C}$ kyseisen kuukauden aikana. [10]

3.3.8 Suppo

Suppo tarkoittaa veden alijäähtymistä nopeassa virtauksessa. Tällöin veden lämpötila laskee alle jäätympisteen, mutta se pysyy yhä nestemäisenä. Kun virtaus hidastuu se jähmettyy kiinteille pinnoille. Merialueilla suppojäättä voi aiheuttaa pakkassää ja kova tuuli. Vesijäähdytteisillä ydinvoimalaitoksilla suppo voi aiheuttaa jäähdytysveden menetyksen, mikäli suppojää tukkii laitoksen jäähdytysvedenottorakenteet. [9, 32]

Suppoalkutapahtuman esiintyminen on arvioitu mahdolliseksi meriveden keskilämpötilan alittaessa $+3\text{ °C}$. Tällöin kertoimet α_q ovat positiivisia, kun $q = \text{Joulu, ..., Huhti}$, jolloin suppoa voi esiintyä. Kertoimien painotus on toteutettu samalla tavalla kuin lämpimän meriveden tapauksessa, eli mitä useamman viikon kuukauden q aikana keskilämpötila on alle $+3\text{ °C}$ sitä suurempi kerroin α_q on. [10]

Alkuperäisessä mallissa on oletettu, ettei suppoa tapahdu meren ollessa jo jäässä. Kuitenkin merijään tuloajankohta vaihtelee voimakkaasti Etelä-Suomessa tammi- ja maaliskuun välillä. Tästä syystä meren jäätymistä ei

ole huomioitu kertoimien α_q määrittämisessä. [13, 37]

3.4 Ennakkohuollot

Ydinlaitosten elinikää hallitaan erilaisin menetelmin. Tätä valvotaan viranomaisen toimesta, mutta se on myös yhtiön kannalta kannattavaa. Yksi eliniänhallinnan tavoista on järjestelmien ennakkohuoltaminen. Ydinlaitoksilla suoritetaan vuosittain vuosihuolto ja muita ennakkohuoltoja. Vuosihuollon aikana laitos ajetaan alas, jolloin se ei tuota lainkaan sähköä. Ennakkohuollot voidaan suorittaa joko vuosihuollossa tai tehoajon aikana. Yleisesti ottaen on taloudellisesti kannattavampaa siirtää huoltoja tehoajojaksolle, mikäli näin voidaan lyhentää laitoksen seisonta-aikaa (aikaa, jolloin laitos ei tuota sähköä). Huollot ovat kalliita ja tehoajojaksolla nostavat sydänvauriotaajuutta hetkellisesti. Tämä johtuu huolettavien laitteiden ja järjestelmien hetkellisistä epäkäytävyyksistä. Toisaalta taas huoltojen avulla voidaan laskea sydänvauriotaajuutta pitkällä aika välillä. [24, 33, 34]

Ennakkohuollot suoritetaan molemmille laitoksille Olkiluoto 1 ja 2 kolmessa erillisessä ennakkohuoltopaketissa PU1, PU2 ja DIP. Jokaiseen pakettiin kuuluvat tietyt järjestelmät, jolle kuuluu suorittaa ennaltamäärätyt huoltotoimenpiteet. Eri vuosina suoritetaan eri määrä huoltotoimenpiteitä, jolloin huoltojaksojen pituus vaihtelee. Eri mittaisia huoltoja kutsutaan eri laajuisiksi ennakkohuoltopaketeiksi. Kaikki paketit sisältävät erilajuisia huoltokokonaisuuksia. Yhtenä vuonna suoritetaan jokaisen paketin yksi jokin laajuinen kokonaisuus jokaiselle osajärjestelmälle. Laajuudet on ennalta määrättyjä ja noudattavat tiettyä sykliä.

Jokainen huoltopaketti toteutetaan identtisesti jokaiselle osajärjestelmälle ja paketteja ei voida toteuttaa samanaikaisesti. Pakettien vuotuiset maksimikestot kuvaavat tiettyyn pakettiin liittyvien osajärjestelmien huoltopäivien määrää yhteensä. Pakettien vuotuiset maksimikestot V saadaan yhtälöstä

$$V = a_{sub}T_{div}, \quad (17)$$

missä a_{sub} on osajärjestelmien määrä laitoksella ja T_{div} on erotusaika. [36]

Kuten sanottu eri ennakkohuoltopaketit kulkevat erilaisessa syklissä. Tämä tarkoittaa sitä, että tietyn ennakkohuoltopaketin huoltopäivien määrä vaihtelee vuosittain ennaltamäärätyssä rytmissä. Syklin kierroksen päätyttyä alkaa kierros alusta. DIP-paketin sykli on 10 vuotta, PU1-paketin 4 vuotta ja PU2-paketin 8 vuotta. [36]

DIP -pakettien DIP1, DIP5 ja DIP7 vuotuiset maksimikestot:

- DIP1 $V_{DIP1} = 4\text{vrk}$ ja suoritetaan joka vuosi
- DIP5 $V_{DIP5} = 20\text{vrk}$ ja suoritetaan joka toinen vuosi
- DIP7 $V_{DIP7} = 28\text{vrk}$ ja suoritetaan joka 10. vuosi

Paketti DIP1 sisältyy pakettiin DIP5 ja paketti DIP5 sisältyy pakettiin DIP7. [36]

PU1 -pakettien PU11 ja PU13 vuotuiset maksimikestot:

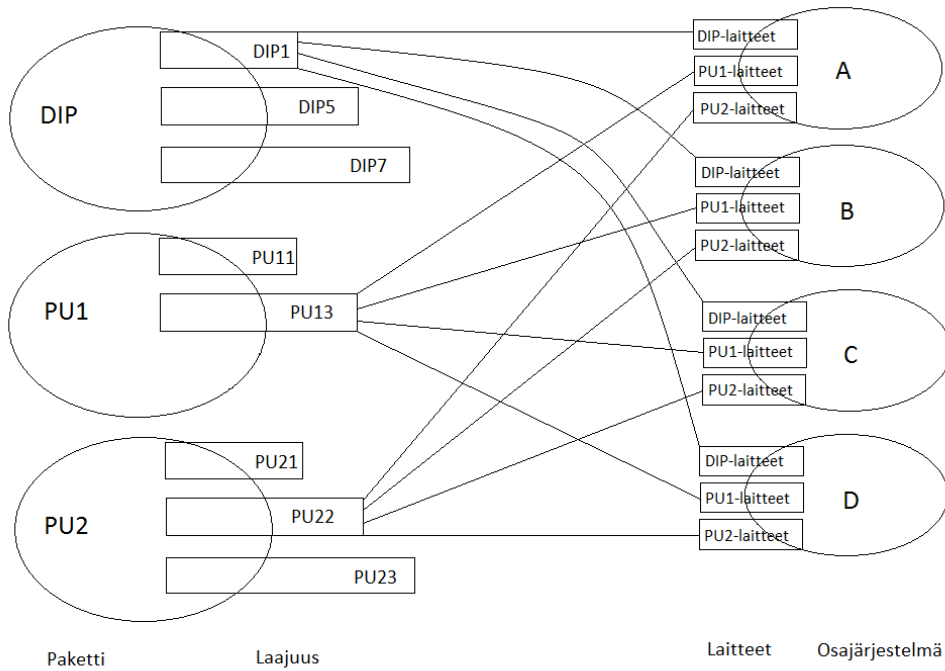
- PU11 $V_{PU11} = 4\text{vrk}$ ja suoritetaan joka toinen vuosi
- PU13 $V_{PU13} = 12\text{vrk}$ ja suoritetaan joka neljäs vuosi

Paketti PU11 sisältyy pakettiin PU13. [36]

PU2 -pakettien PU21, PU22 ja PU23 vuotuiset maksimikestot:

- PU21 $V_{PU21} = 4\text{vrk}$ ja suoritetaan joka vuosi
- PU22 $V_{PU22} = 8\text{vrk}$ ja suoritetaan joka neljäs vuosi
- PU23 $V_{PU23} = 12\text{vrk}$ ja suoritetaan joka 8. vuosi

Paketti PU21 sisältyy pakettiin PU22 ja paketti PU22 sisältyy pakettiin PU23. [36]



Kuva 7: Esimerkki vuoden aikana suoritettavista ennakkohuolloista neljä redundantiselle laitokselle, jonka osajärjestelmät ovat *A*, *B*, *C* ja *D*

Ennakkohuollot on huomioitu TVO:n alkuperäisessä PRA-mallissa erillisinä perustapahtumina. Perustapahtuma liittyy aina johonkin suoritteilla olevaan pakettiin, joka aiheuttaa yhden osajärjestelmän käyttökunnottomuuden laitokselle. Ennakkohuoltotapahtumille on laskettu epäkäytettävyys, joka perustuu niiden keskimääräiseen kestoan tehoajon aikana.

Tässä työssä esiteltävässä ajasta riippuvassa mallissa ennakkohuoltotapahtumien todennäköisyydet on muutettu binäärisiksi. Ennakkohuoltotapahtuman todennäköisyys

$$P_{eh}(t) = \begin{cases} 0, & \text{jos päivänä } t \text{ ei suoriteta ennakkohuoltoa} \\ 1, & \text{jos päivänä } t \text{ on ennakkohuolto käynnissä} \end{cases} \quad (18)$$

kun $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ ja tehoajojakso kestää T päivää.

4 Ajasta riippuvat mallit

Monet ydinvoimalaitoksella käyttöhäiriöitä aiheuttavista tapahtumista ovat usein voimakkaasti ajasta riippuvia. Ajasta riippuvat tapahtumat voidaan jakaa kahteen luokkaan, pitkä- ja lyhytaikaisiin tapahtumiin. Pitkäaikaisia tapahtumia ovat ympäristömuutokset (sääilmiöt ja vuodenaajat), komponenttien ikääntyminen, laitoksen modernisointi- ja muutostyöt sekä henkilöstön tai taloustilanteen muutokset. Lyhytaikaisia muutoksia taas ovat muun muassa ajasta riippuvat fyysiset tai stokastiset prosessit sekä operaattoreiden reagointiajat. [11, 12]

Ajasta riippuvaa PRA-mallinnusta on tutkittu jo pitkään, mutta se ei siltikään ole kovin laajasti käytössä. Tämä saattaa johtua sen kompleksisuudesta ja valtavasta laskennan määrästä. Tässä työssä esitellään TVO:n käytössä olevan PRA-mallin laajennus, jossa on huomioitu pitkäaikaisia ajasta riippuvia tekijöitä. [11, 12]

Tässä työssä esiteltävä ajasta riippuva malli on Olkiluoto 1 PRA-mallin pohjalle luotu diskreetti päiväkohtainen malli. Mallia tarkastellaan vuositasolla ja ainoastaan määritetyllä tehoajojaksolla (1.6. - 30.4.). Työssä mallinnetut ajasta riippuvat tapahtumat ovat pitkäaikaisia tapahtumia. Lyhytaikaisia tapahtumia ei ole otettu huomioon, koska mallia tarkastellaan vuorokauden tarkkuudella ja lyhytaikaisten tapahtumien kestot ovat yleensä alle vuorokauden mittaisia. Mallissa huomioitujen pitkäaikaisien tapahtumien tapaan sääilmiöitä, komponenttien vikaantumistodennäköisyyksien muutoksia koetusvälien aikana ja ennakkohuoltojen ajoittumisia. [11, 12]

Alkuperäisessä, eli ei ajasta riippuvassa mallissa, alku- ja perustapahtumien taajuus tai todennäköisyys on sama vakio todennäköisyys läpi vuoden. Tästä seuraa, että myös minimikatkosjoukkojen taajuudet ovat vakioita. Minimikatkosjoukon taajuus saadaan siihen kuuluvien perustapahtumien taajuuksien ja todennäköisyyksien tulona

$$P_{mcs} = P(BE_1)P(BE_2)\dots P(BE_n), \quad (19)$$

missä n on minimikatkosjoukkoon mcs sisältyvien perustapahtumien määrä.

Koko laitoksen sydänvauriotaajuus (*CDF*, core damage frequency) voidaan laskea kaikkien minimikatkosjoukkojen summana

$$CDF = \sum_{mcs \in MCS} P_{mcs}, \quad (20)$$

missä *MCS* on kaikkien minimikatkosjoukkojen joukko. Näin ollen alkupe-
räisessä mallissa vuoden sydänvaurioriskiä kuvaa yksi vakioarvo, joka kuvaa
todennäköisyyttä sille, että vuoden aikana aiheutuu sydänvaurioon johtava
onnettomuus. Ajasta riippuvassa mallissa saadaan tarkastelujakson jokaisel-
le päivälle oma sydänavuriotaajuus. Vuoden aikana ajasta riippuvan mallin
sydänvauriotaajuus saa 365 eri päiväkohtaista arvoa.

4.1 Ajasta riippuvan mallin määrittäminen

Tässä työssä esiteltävässä mallissa sydänvauriotaajuus vaihtelee tehoajajak-
son päivästä riippuen. Vaihtelu johtuu ajasta riippuvien alku- ja perustapahtu-
mien taajuuksien tai todennäköisyyksien muutoksista. Alku- ja perusta-
pahtumien taajuuksien ja todennäköisyyksien muuttuminen vaikuttaa suo-
raan minimikatkosjoukkojen taajuuksiin, jotka taas vaikuttavat sydänvaurio-
taajuuteen, kuten kappaleen 4 alkuosassa määritettiin.

Tämän työn ajasta riippuva malli on diskreetti malli ja sitä tarkastellaan
vuorokauden tarkkuudella. Mallissa alku- ja perustapahtumien taajuudet ja
todennäköisyydet esitetään, parametrien sijaan, vuosivektoreina. Määrite-
tään seuraavaksi ajasta riippuvien alku- ja perustapahtumien taajuudet tai
todennäköisyydet yleisesti.

Määritelmä 4.1. Olkoon *BE* kaikkien mallissa esiintyvien alku- ja perusta-
pahtumien joukko ja $T = (1, 2, \dots, \tau)$ tarkastelujakson päivien joukko. Tällöin
perustapahtuman $be \in BE$ ajasta riippuva tapahtumistodennäköisyys on

$$\mathbf{P}_{be}(t) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_\tau \end{pmatrix}, \quad (21)$$

missä x_t kuvaa perustapahtuman tapahtumatodennäköisyyttä päivänä $t \in T$.

Seurauksena perustapahtumien todennäköisyyksien esitysmuodosta myös minimikatkosjoukkojen taajuudet ovat vektorimuotoisia. Määritellään seuraavaksi minimikatkosjoukkojen ajasta riippuvat taajuudet.

Määritelmä 4.2. Olkoon MCS kaikkien mallissa esiintyvien minimikatkosjoukkojen joukko ja $be_t^{mcs_n} \in BE$ minimikatkosjoukon mcs n :s alku- tai perustapahtuma ajanhetkellä t . Minimikatkosjoukon mcs n :nnen perustapahtuman tapahtumistodennäköisyys on

$$\mathbf{P}_{be^{mcs_n}}(t) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_\tau \end{pmatrix}.$$

Tällöin minimikatkosjoukon taajuus

$$\mathbf{P}_{mcs} = \prod_{n=1}^N x_t^n = \begin{pmatrix} x_1^1 \times x_1^2 \times \dots \times x_1^N \\ x_2^1 \times x_2^2 \times \dots \times x_2^N \\ \vdots \\ x_\tau^1 \times x_\tau^2 \times \dots \times x_\tau^N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \\ \vdots \\ \chi_\tau \end{pmatrix}, \quad (22)$$

missä $mcs \in MCS$, $t \in T$ ja N on minimikatkosjoukon perustapahtumien määrä, eli minimikatkosjoukon pituus.

Määritellään vielä ajasta riippuva sydänvauriotaajuus ajasta riippuvien minimikatkosjoukkojen taajuuksien avulla.

Määritelmä 4.3. Olkoon m mallin minimikatkosjoukkojen määrä. Laitoksen päiväkohtainen sydänvauriotaajuus

$$\mathbf{CDF} = \sum_{mcs=1}^m \mathbf{P}_{mcs} = \begin{pmatrix} \chi_1^1 \\ \chi_2^1 \\ \vdots \\ \chi_\tau^1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \chi_1^2 \\ \chi_2^2 \\ \vdots \\ \chi_\tau^2 \end{pmatrix} + \dots + \begin{pmatrix} \chi_1^m \\ \chi_2^m \\ \vdots \\ \chi_\tau^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cdf_1 \\ cdf_2 \\ \vdots \\ cdf_\tau \end{pmatrix}, \quad (23)$$

missä cdf_t on laitoksen sydänvauriotaajuus ajanhetkellä t .

Laitosmallissa ja kuuden minimikatkosjoukon mallissa on erilaisia perustapahtumatyyppejä (myös alkutapahtumat ovat perustapahtumia ja kuuluvat johonkin perustapahtumatyyppiin), jotka kuvaavat mallinnuksen kannalta oleellisia perustapahtuman ominaisuuksia. Perustapahtumatyypin perusteella määräytyy tapahtuman ajasta riippuvan taajuuden eli vuosivektorin mallinnustapa. Perustapahtumatyypit, joita malleissa esiintyy, ovat komponenttivateikatapahtumat, sääilmiöt, ennakkohuoltotapahtumat ja parametrit. Suurin osa mallin perustapahtumista ovat joko komponenttivateikatapahtumia tai parametreja.

4.1.1 Komponenttivateikatapahtumat

Komponenttivateikatapahtumat jakautuvat kolmeen erilaiseen perustapahtumaryhmään sen mukaan onko kyseessä jatkuvasti operoiva komponentti, välillä operoiva komponentti vai komponenttien yhteisvika.

Mallissa jatkuvasti operoivat komponentit on käsitelty parametreina, koska niiden toiminta-ajan vaatimus $T_{miss} = 24$ tuntia ja mallin laskenta tapahtuu vuorokauden tarkkuudella. Näin ollen jatkuvasti operoivat komponentit kuuluvat parametreihin. Myös jatkuvasti operoivien komponenttien yhteisvikat ovat parametrityyppisiä tapahtumia. Parametrien mallinnus on kuvattu kappaleessa 4.1.4.

Välillä operoivien komponenttien laskenta on kuvattu kappaleessa 3.1.3. Välillä operoivan komponentin vikaantumistodennäköisyys ajasta riippuvassa mallissa on koestusvälin T_{test} mittainen vektori on

$$\mathbf{P}_k(t) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{T_{test}} \end{pmatrix}, \quad (24)$$

missä $t = (1, 2, \dots, T_{test})$. Määritelmän 4.1 nojalla mallia tarkastellaan tehoajojaksolla $T = (1, 2, \dots, \tau)$. Useimmiten $T_{test} \neq \tau$, jolloin koestusvälin pituus ei ole yhtä monta päivää kuin mallin tarkastelu-aika on. Esimerkiksi tässä työssä monielementtien koestukset suoritetaan kuukauden välein ja mallin

tarkastelu-aika on yksi tehoajajakso, eli vajaa vuosi. Kun $T_{test} \neq \tau$ komponenttitapahtumien vuosivektori määritetään lauseen 4.4 avulla. Vuosivektori \mathbf{P}_{be} muodostetaan komponenttivikatapahtumille lauseen 4.4 mukaan, mikäli $T_{test} \neq \tau$. Jos $T_{test} = \tau$, niin

$$\mathbf{P}_{be} = \mathbf{P}_k. \quad (25)$$

Määritellään seuraavaksi miten komponenttivikatodennäköisyyksien vuosivektorit määritetään komponentin vikatodennäköisyysvektorin avulla.

Määritelmä 4.4. Jos $T_{test} < \tau$, niin komponenttivika-perustapahtuman be_k todennäköisyys on

$$\mathbf{P}_{be_k}(t) = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{T_{test}} \\ x_1 \\ \vdots \\ x_\tau \end{pmatrix}, \quad (26)$$

missä $t = (1, 2, \dots, T_{test}, 1, \dots, \tau)$. Toisin sanoen koestusjaksoja on niin monta peräkkäin, että tarkastelujakso täyttyy kokonaan. Mikäli taas $T_{test} > \tau$

$$\mathbf{P}_{be_k}(t) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_\tau \end{pmatrix}, \quad (27)$$

missä $t = (1, 2, \dots, \tau)$.

Välillä operoivien komponenttien yhteisvikojen laskenta on kuvattu kappa-leessa 3.2. Ajasta riippuvassa mallissa yhteisviat voidaan laskea kaavan (24) vektorin \mathbf{P}_k alkionle yhtälöiden (9)-(12) avulla riippuen monenko kertaisesta yhteisviasta on kyse. Tällöin yhteisvika-perustapahtumien todennäköisyydet $\mathbf{P}_{be_{Q1}}$, $\mathbf{P}_{be_{Q2}}$, $\mathbf{P}_{be_{Q3}}$ ja $\mathbf{P}_{be_{Q4}}$ voidaan määrittää määritelmän 4.4 nojalla.

4.1.2 Säätapauhtumat

Säätapauhtumien taajuudet on määritetty kuukauden tarkkuudella, jolloin jokaisena tietyn kuukauden q päivänä tapauhtuman taajuus on sama. Säätapauhtumien taajuudet on laskettu kertomalla alkuperäisen mallin tapauhtumataajuuksia sopivilla kertoimilla.

Määritelmä 4.5. Olkoon p säätapauhtuman be taajuus. Tällöin ajasta riippuva sää-perustapauhtuman taajuus kuukautena q

$$\mathbf{P}_{wea}(q) = \alpha_q \begin{pmatrix} p \\ p \\ \vdots \\ p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_q p \\ \alpha_q p \\ \vdots \\ \alpha_q p \end{pmatrix}, \quad (28)$$

missä $|\mathbf{P}_{wea}| = |q|$ ja $|q|$ on kuukauden q päivien määrä. Sääilmiöiden vuosivektori saadaan asettamalla peräkkäin yhdeksi vektoriksi kaikkien kuukausien $q = (1, 2, \dots, \Phi)$ sää-tapauhtumavektorit

$$\mathbf{P}_{be_{wea}}(t) = \begin{pmatrix} x_{q1} = \frac{\alpha_{q1}p}{|q|} \\ \vdots \\ x_{|q1|} = \frac{\alpha_{q1}p}{|q|} \\ x_{|q1|+1} = \frac{\alpha_{q2}p}{|q|} \\ \vdots \\ x_{\tau} = \frac{\alpha_{\Phi}p}{|q|} \end{pmatrix}. \quad (29)$$

Sääilmiöt ovat alkutapauhtumia, joiden esiintymistä kuvataan todennäköisyyden sijaan taajuudella. Alkuperäisen mallin säätapauhtumien yksikkö on $\frac{1}{vuosi}$, kun taas ajasta riippuvassa mallissa se on $\frac{1}{vrk}$. Kappaleessa 3.3 on määritelty kertoimet sääilmiöille kuukausitasolla.

4.1.3 Ennakkohuoltotapauhtumat

Ennakkohuoltotapauhtumien vuosivektorit ovat binäärisiä, koska niiden arvot on binäärisiä kuten yhtälössä (18) on määritetty. Ykkösten ja nollien määrä

riippuu, siitä mihin ennakkohuoltopakettiin perustapahtuma be kuuluu ja mikä ennakkohuoltovuosi on käynnissä. Ennakkohuoltotapahtumien määrittely on esitelty kappaleessa 3.4.

Esimerkki 4.6. Oletetaan että perustapahtuma be kuuluu DIP-pakettiin ja kyseisenä vuonna sen kesto on enintään 4 huoltopäivää. DIP-paketin valmistuspäivä on 90. päivä. Tällöin ennakkohuoltotapahtuman be ajasta riippuva todennäköisyys

$$\mathbf{P}_{be_{eh}} = \begin{pmatrix} x_1 = 0 \\ \vdots \\ x_{86} = 0 \\ x_{87} = 1 \\ x_{88} = 1 \\ x_{89} = 1 \\ x_{90} = 1 \\ x_{91} = 0 \\ \vdots \\ x_\tau = 0 \end{pmatrix}.$$

Ajasta riippuvassa mallissa ennakkohuoltotapahtumien todennäköisyydet ovat huomattavasti suurempia kuin alkuperäisessä mallissa. Vuositasolla ajasta riippuvan mallin ennakkohuoltotapahtumien todennäköisyydet ovat vähintään $p \geq \frac{4}{334} \approx 1.19 \times 10^{-2}$ ja enintään $p \leq \frac{32}{334} \approx 9.758 \times 10^{-2}$. Alkuperäisessä mallissa ennakkohuoltotapahtumien todennäköisyys kuuluu välille $1.15 \times 10^{-4} \leq p \leq 8.00 \times 10^{-3}$. Alkuperäisessä mallissa ennakkohuoltojen kestot on mallinnettu niiden todellisten kestojen keskiarvon perusteella, toisin kuin ajasta riippuvassa mallissa. Ajasta riippuvassa mallissa ennakkohuoltojen pituudet on mallinnettu niiden suurimpien sallittujen kestojen perusteella. Suurimpien sallittujen kestojen käyttö ajasta riippuvassa mallissa on perusteltua, koska todellisten kestojen keskiarvoja käyttämällä ei saada tarpeeksi kattavaa kuvaa ennakkohuoltojen kestoista.

4.1.4 Parametrit

Parametrit ovat nimensä mukaan parametriarvoja. Tämä tarkoittaa, että niiden todennäköisyydet eivät muutu ajan kuluessa. Perustapahtumat, jotka ovat parametrityyppiä, saavat saman arvon tehoajojakson jokaisena päivänä. Parametreihin lukeutuvat muun muassa jatkuvasti operoivat komponentit ja niiden yhteisviat, sisäiset uhat (tulvat ja tulipalot), vuodenajasta riippumattomat ulkoiset uhat (maanjäristykset ja öljyonnettomuudet) ja operaattoritoimenpiteet.

Määritelmä 4.7. Olkoon p parametritapahtuman be_{pa} todennäköisyys alkuperäisessä mallissa. Tällöin parametritapahtuman vuosivektori on

$$\mathbf{P}_{be_{pa}}(t) = \begin{pmatrix} x_1 = p \\ x_2 = p \\ \vdots \\ x_\tau = p \end{pmatrix}, \quad (30)$$

missä $t = (1, 2, \dots, \tau)$ ja $pa \in PA$ on kaikkien mallissa esiintyvien parametrien joukko.

Mikäli parametrityyppinen tapahtuma on alkutapahtuma, kuvataan sen esiintymistä taajuudella, kuten säätapahtumien kohdalla. Tällöin alkutapahtumien taajuudet tulee muuttaa vuorokausi kohtaisiksi.

Määritelmä 4.8. Olkoon p parametrialkutapahtuman be_{pa0} taajuus alkuperäisessä mallissa. Tällöin parametritapahtuman vuosivektori on

$$\mathbf{P}_{be_{pa0}}(t) = \begin{pmatrix} x_1 = \frac{p}{\tau} \\ x_2 = \frac{p}{\tau} \\ \vdots \\ x_\tau = \frac{p}{\tau} \end{pmatrix}, \quad (31)$$

missä $t = (1, 2, \dots, \tau)$ ja $pa_0 \in PA$ on kaikkien mallissa esiintyvien parametrien joukko.

4.2 Kuuden minimikatkosjoukon malli

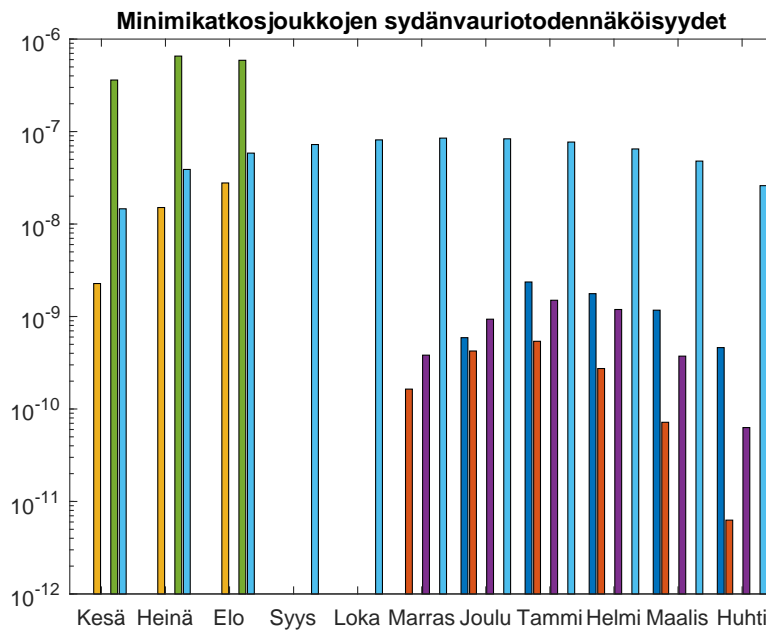
Kuuden minimikatkosjoukon mallissa tarkastellaan, esimerkinomaisesti, pienemmässä ja helpommin ymmärrettävässä muodossa ajasta riippuvan mallin vaikutuksia PRA-malliin ja yksittäisiin minimikatkosjoukkoihin. Kuuden minimikatkosjoukon malliin on valikoitu kuusi minimikatkosjoukkoa alkuperäisen mallin minimikatkosjoukkojen joukosta. Niiden tarkoitus on edustaa riittävän kattavasti minimikatkosjoukkoja aikariippuvan mallin kannalta. Valikoinnissa erityistä huomiota on kiinnitetty erilaisiin sääalkutapahtumiin. Sääalkutapahtumana mallissa esiintyy kolme eri sääilmiötä: Suppo, liian lämmin merivesi ja syysmyrsky. Näiden lisäksi minimikatkosjoukoissa esiintyy sääperustapahtuma lumimyrsky sekä muita perustapahtumia, kuten ulkoisen verkon menetys ja erilaisia komponenttien yhteisvikoja.

Minimikatkosjoukkojen mcs_1 ja mcs_2 (keltainen ja vihreä kuvassa 8) alkutapahtumina on liian lämmin merivesi, jolloin nämä kaksi minimikatkosjoukkoa esiintyvät vain kesäkuukausina. Muina kuukausina alkutapahtuman taajuus on nolla, jolloin koko minimikatkosjoukon taajuus on nolla. Minimikatkosjoukkoon mcs_3 (vaaleansininen kuvassa 8) ei liity mitään sääilmiötä, jolloin se saa nollaa suuremman arvon tehoajojakson jokaisena päivänä. Suppo on minimikatkosjoukon mcs_4 (tummasininen kuvassa 8) alkutapahtuma. Minimikatkosjoukoissa mcs_5 ja mcs_6 (punainen ja violetti kuvassa 8) esiintyy perustapahtumana lumisateen tukkimat suodattimet, siksi ne esiintyvät vain talvella.

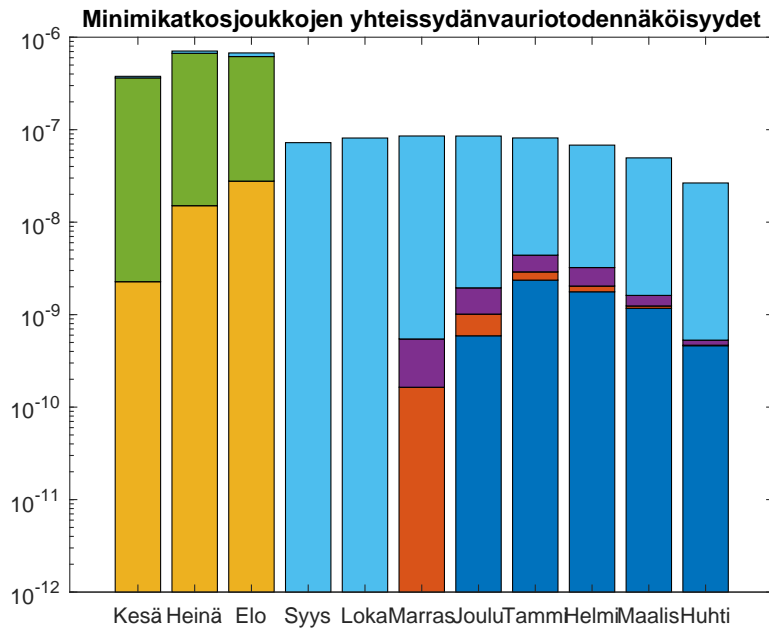
Esimerkki 4.9. Tarkastellaan minimikatkosjoukkoa mcs_2 (vihreä kuvassa 8). Minimikatkosjoukon alkutapahtuma be_0 on lämmin merivesi, joka vaikuttaa jäähdytysjärjestelmien tehokkuuteen. Minimikatkosjoukossa esiintyy myös eräiden pumppujen yhteisvika perustapahtumana be_1 . Lisäksi minimikatkosjoukkoon kuuluu ulkoisen verkon menetystä tarkoittava perustapahtuma be_2 .

Olkoon perustapahtumien be_0 , be_1 ja be_2 todennäköisyydet p_0 , p_1 ja p_2 . Tällöin minimikatkosjoukon mcs_6 taajuus on

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}_{mcs_6} &= be_0 \times be_1 \times be_2 \\
&= \begin{pmatrix} \alpha_0^q p_0 \times p_1 \times p_2 \\ \alpha_0^q p_0 \times p_1 \times p_2 \\ \vdots \\ \alpha_0^q p_0 \times p_1 \times p_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2 \times p_0 \times 0 \times p_1 \times 1 \\ 0.04 \times p_0 \times 0 \times p_1 \times 1 \\ \vdots \\ 0 \times p_0 \times 0.02 \times p_1 \times 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} 0.2 \times p_0 p_1 p_2 \\ 0.4 \times p_0 p_1 p_2 \\ 0.4 \times p_0 p_1 p_2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}.
\end{aligned}$$



Kuva 8: Minimikatkosjoukkojen kuukausittaiset sydänvauriotodennäköisyyksien keskiarvot



Kuva 9: Laitoksen kuukausittaiset sydänvauriotodennäköisyydet kuuden minimikatkosjoukon mallissa

Kuuden minimikatkosjoukon malli ei kuvaa laitoksen sydänvauriotaajuuden muutosta realistisesti, koska todellisuudessa minimikatkosjoukkoja on miljoonia. Myöskään kaikki minimikatkosjoukot, jotka esiintyvät kuuden minimikatkosjoukon mallissa eivät esiinny laitosmallissa, joka johtuu laitosmallissa tehdyistä rajauksista. Tällöin nämä kaksi mallia eivät ole vertailukelpoiset.

4.3 Laitosmalli

Tässä työssä esiteltävä laitosmalli on luotu Olkiluoto 1 PRA-mallin pohjalle. Laitosmallin on tarkoitus kuvata koko Olkiluoto 1 toimintaa tehoajojaksolla. Laitosmallissa on käsitelty 10 000 minimikatkosjoukkoa. Minimikatkosjoukkojen määrää on rajattu muun muassa käsittelemällä ainoastaan tärkeimpiä järjestelmiä, poistamalla mallinnusteknisesti vaikeita perustapahtumia ja rajaamalla minimikatkosjoukkoja pois, joiden taajuudet ovat hyvin pieniä. Mallissa esiintyvät minimikatkosjoukot ja perustapahtumat sekä nii-

den taajuudet ja todennäköisyydet että mahdolliset parametrit on räätälöity taulukkomuotoon FinPSA -ohjelmistosta Olkiluoto 1:n PRA-mallista saatavien tietojen perusteella. Mallin tarkoitus on toimia esimerkinomaisesti eikä se tällöin vastaa täydellisesti Olkiluoto 1:n PRA-mallia. Laitosmallin ajasta riippuvat todennäköisyydet ovat mallinnettu ja ratkaistu erillään alkuperäisestä mallista Matlab-ohjelmistolla.

Minimikatkosjoukkojen joukko on valikoitu kuvaamaan laitoksen sydänvauriotaajuutta mahdollisimman realistisesti. Joitakin perustapahtumia on kuitenkin poistettu mallin yksinkertaistamiseksi. Esimerkiksi siirrettäviä korjauksia ei ole huomioitu, sillä laskenta olisi monimutkaistunut huomattavasti. Laitosmallin rajaukset ja määrittely esitellään kappaleessa 4.3.1 ja tulokset sekä niistä tehdyt havainnot kappaleessa 4.3.2.

4.3.1 Laitosmallin määrittely

Tässä kappaleessa esitellään laitosmalliin tehdyt oletukset ja rajaukset. Laitosmalli noudattaa kappaleen 4 alussa määriteltyä ajasta riippuvan mallin kaavaa, jossa ajan kulkua kuvataan vuosivektoreilla. Ajasta riippuvia perustapahtumatyyppäjä on neljä ja niiden mallinnukset on esitelty kappaleissa 4.1.1, 4.1.2 ja 4.1.3. Ajasta riippumattomat tapahtumat, eli parametrit on esitelty kappaleessa 4.1.4.

Laitosmallissa käsitellään FinPSA-ohjelmistosta saatua Olkiluoto 1 laitosyksikön dataa. Data sisältää 10000 ajasta riippuvan mallin kannalta merkittävintä minimikatkosjoukkoa ja niissä esiintyvien perustapahtumien tietoja, esimerkinomaisesti. Minimikatkosjoukot on valikoitu kuvaamaan laitoksen PRA-mallia mahdollisimman hyvin. Kuitenkin malliin liittyy paljon laskennallisesti poikkeuksellisia perustapahtumia ja siksi laskenta on rajoitettu jättämällä joitakin tapahtumatyyppäjä ja järjestelmiä sen ulkopuolelle.

Mallia tarkastellaan vuosi kerrallaan vuorokauden tarkkuudella. Vuosien oletetaan olevan identtisiä. Ainoa ero on ennakkohuoltovuodesta EHV_{xx} riippuva ennakkohuoltopäivien määrän vaihtelu.

Vuosihuoltoa ei huomioida tässä mallissa, koska sille on olemassa oma tarkempi mallinnus. Tässä mallissa vuosihuollon oletetaan kestävän toukokuun

ajan, jolloin kesäkuun alussa alkaa tehoajojakso. Tehoajojaksolla on tarkasteltu ainoastaan tehoajotilaa (*power state*), eli niitä mahdollisia tapahtumia, jotka esiintyvät laitoksen tuottaessa sähköä. Koska mallin tarkastelujakso on tehoajojakso, on mallin ensimmäinen päivä $t = 1$ aina 1. kesäkuuta.

Vuosihuollossa oletetaan huollettavan ja testattavan kaikkien järjestelmien kaikki komponentit. Tällöin 1. kesäkuuta kaikki komponentit aloittavat testausvälin ensimmäisestä päivästä. Toisin sanoen, hetkellä $t = 1$ kaikille välillä operoiville komponenteille vikaantumistodennäköisyys

$$P = Q + (1 - Q) (1 - e^{-\lambda_{stby} \times 24} + \lambda_{stby} T_{rep} + 1 - e^{-\lambda_{oper} T_{miss}}). \quad (32)$$

Ennakkohuoltopäivien määrä vaihtelee vuosittain riippuen ennakkohuoltovuodesta. Tulokset on laskettu viidelle erilaiselle ennakkohuoltovuodelle, jotka on määritetty kappaleessa 5.1 tehdyn optimoinnin perusteella. Ennakkohuoltovuosien optimointi tehtiin, jotta huoltopäivien määrä olisi mahdollisimman pieni jokaisena eri ennakkohuoltovuonna. Tällöin minään ennakkohuoltovuonna huoltopäivien määrä ei kasva liian suureksi. Optimointitulokset eivät kuitenkaan välttämättä vastaa laitoksella toteutuvien huoltopäivien määrää, koska aikaisemmin vastaavanlaista optimointia ei ole ennakkohuoltopäivien määrän tasaamiseksi tehty.

Määritellään seuraavaksi muutamia termejä liittyen ennakkohuoltojen toteuttamiseen.

Määritelmä 4.10. *Ennakkohuoltovuosi* EHV_{xx} kertoo kaikkien suoritettavien ennakkohuoltopakettien ennakkohuoltopäivien määrän yhden vuoden aikana. Alaindeksi xx kertoo kyseisen ennakkohuoltopäivien yhteenlasketun määrän. Tässä työssä erilaisia ennakkohuoltovuosia on viisi ja ne määritellään kappaleessa 5.1.

Määritelmä 4.11. *Ennakkohuoltopaketin laajuus* tarkoittaa tietyn ennakkohuoltopaketin keston pituutta tietyssä ennakkohuoltovuonna. Ennakkohuoltopakettien laajuudet merkitään:

- DIP-paketti $DIP = \{DIP1, DIP5, DIP7\}$

- PU1-paketti $PU1 = \{PU11, PU13\}$
- PU2-paketti $PU2 = \{PU21, PU22, PU23\}$

Ennakkohuoltopakettien laajuuksilla on kaikilla oma kesto-aika $V_{laajuus}$, missä $laajuus \in \{DIP1, DIP2, DIP10, PU12, PU14, PU21, PU24, PU28\}$. Kesto-aika yhdelle osajärjestelmälle nähdään suoraan sen laajuuden viimeisestä numerosta. Pakettien laajuudet ja kestot on esitelty tarkemmin kappaleessa 5.1 ja taulukossa 4.

Vuosi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PU1	PU11		PU13		PU11		PU13		PU11	
V_{PU1x}	4	0	12	0	4	0	12	0	4	0
PU2	PU22	PU21	PU21	PU21	PU23	PU21	PU21	PU21	PU22	PU21
V_{PU2x}	8	4	4	4	12	4	4	4	8	4
DIP	DIP1	DIP5	DIP1	DIP5	DIP1	DIP5	DIP1	DIP5	DIP1	DIP7
V_{DIPx}	4	20	4	20	4	20	4	20	4	28
Yhteensä	16	24	20	24	20	24	20	24	16	32

Taulukko 4: Kymmenen ensimmäisen ennakkohuoltovuoden laajuudet ja niiden kestot [36]

Taulukosta 4 voidaan huomata, että ennakkohuoltovuosia on viisi erilaista. Yhteensä 20 huoltopäivää vuodessa voi muodostua kahdella eri tavalla. DIP-huoltopäivien ollessa 4 vrk/vuosi, PU1- ja PU2 -pakettien huoltopäivät ovat joko 12 vrk/vuosi tai 4 vrk/vuosi. Kun PU1-paketin huoltopäivien määrä on 4, niin PU2-paketin huoltopäivien määrä on 12 ja toisin päin. Näitä kahta eri tapausta merkitään jatkossa EHV_{20a} ja EHV_{20b} . Ennakkohuoltovuodet on määriteltä tarkemmin kappaleessa 5.1.

Kaikille ennakkohuoltovuosille on laskettu tulokset kahdella eri ennakkohuoltopakettien suoritusajankohdan kombinaatiolla. Suoritusajankohta määrää kyseessä olevan ennakkohuoltopakettien päättymispäivän. Koska huoltajakson pituus riippuu ennakkohuoltovuodesta, määräytyy tällöin töiden aloituspäivä suoritusajankohdan ja ennakkohuoltovuoden mukaan. Määritellään vielä *suoritusajankohta* ja *suoritusajankohdan kombinaatio*. Esimerkin 4.14 on tarkoitus selkeyttää tässä kappaleessa määriteltyjä termejä.

Määritelmä 4.12. *Suoritusajankohta* tarkoittaa ennakkohuoltopakettien valmistumispäivää tarkasteluvuonna. Suoritusajankohtaa kuvataan ajanhetken t tarkastelujakson $t = (1, 2, \dots, \tau)$ ensimmäisestä päivästä lähtien, eli sitä ei kuvata päivämäärällä.

Määritelmä 4.13. *Suoritusajankohdan kombinaatio* tarkoittaa kaikkien tarkasteluvuonna suoritettavien ennakkohuoltopakettien suoritusajankohtia. Suoritusajankohdan kombinaatio $\Theta = \{t_{PU1}, t_{PU2}, t_{DIP}\}$ on kaikkien suoritettavien pakettien suoritusajankohtien joukko.

Esimerkki 4.14. Ennakkohuoltovuonna EHV_{16} on yhteensä 16 ennakkohuoltopäivää. Ennakkohuoltopakettien DIP laajuus on $DIP1$ ja sen kesto $V_{DIP1} = 4$. Vastaavasti pakettien $PU1$ ja $PU2$ laajuudet ovat $PU11$ ja $PU22$ ja niiden kestot ovat $V_{PU11} = 4$ ja $V_{PU22} = 8$. Tällöin

$$EHV_{16} = V_{DIP1} + V_{PU11} + V_{PU22} = 4 + 8 + 4 = 16.$$

Jos paketin $DIP1$ suoritusajankohta on 90. päivä, niin sen aloituspäivä on $90 - V_{DIP1} + 1 = 87$.

Ennakkohuolloista aiheutuva komponenttien vikaantumistodennäköisyyksien muutos on myös huomioitu ajasta riippuvassa mallissa. Alkuperäisessä mallissa ei tällainen ole ollut mahdollista. Mallissa tietyn ennakkohuoltopaketin päätyttyä, eli heti suoritusajankohdan jälkeen, kyseiseen pakettiin kuuluvien laitteiden ja komponenttien vuosivektorit "aloitetaan alusta". Toisin sanoen, kaikille komponenttivika-tapahtumille, jotka huolletaan kyseisessä paketissa, ennakkohuollon jälkeen $t = 1$. Tämä kuvaa ennakkohuollon vaikutusta pakettiin kuuluvien laitteiden osalta. Tarkoitus on kuvata laitteiden korjaantumista tai parantumista ennakkohuollon ansiosta.

4.3.2 Laitosmallin tulokset

Laitosmallin tulokset on laskettu erikseen kaikille ennakkohuoltovuosille *EHV* ja kahdelle eri suoritusajankohdan kombinaatiolle. Ensimmäisessä suoritusajankohdan kombinaatioissa Θ_1 ennakkohuollot suoritetaan noin kolmen kuukauden välein toisistaan. Toisessa suoritusajankohdan kombinaatioissa Θ_2 on pyritty ottamaan huomioon sääilmiöiden vaikutukset. Ennakkohuoltojen suoritusajankohdat sellaisille kuukausille, jolloin sydänvauriotaajuus on pieni. Kuitenkin niin että niitä kaikkia ei suoritettaisi peräkkäisinä kuukausina esimerkiksi kesällä.

Mallissa käytetyt suoritusajankohdan kombinaatiot:

- Ensimmäisessä kombinaatiossa ennakkohuollot suoritetaan niin että PU1-paketti valmistuu 90. päivänä (29.8.), PU2-paketti valmistuu 180. päivänä (27.11.) ja DIP-paketti valmistuu 270. päivänä (25.2.). Suoritusajankohdan kombinaatio $\Theta_1 = \{90, 180, 270\}$.
- Toisessa kombinaatiossa taas PU1-paketti valmistuu 300. päivänä (27.3.), PU2-paketti valmistuu 150. päivänä (28.10.) ja DIP-paketti valmistuu 60. päivänä (30.7.). Suoritusajankohdan kombinaatio $\Theta_2 = \{300, 150, 60\}$.

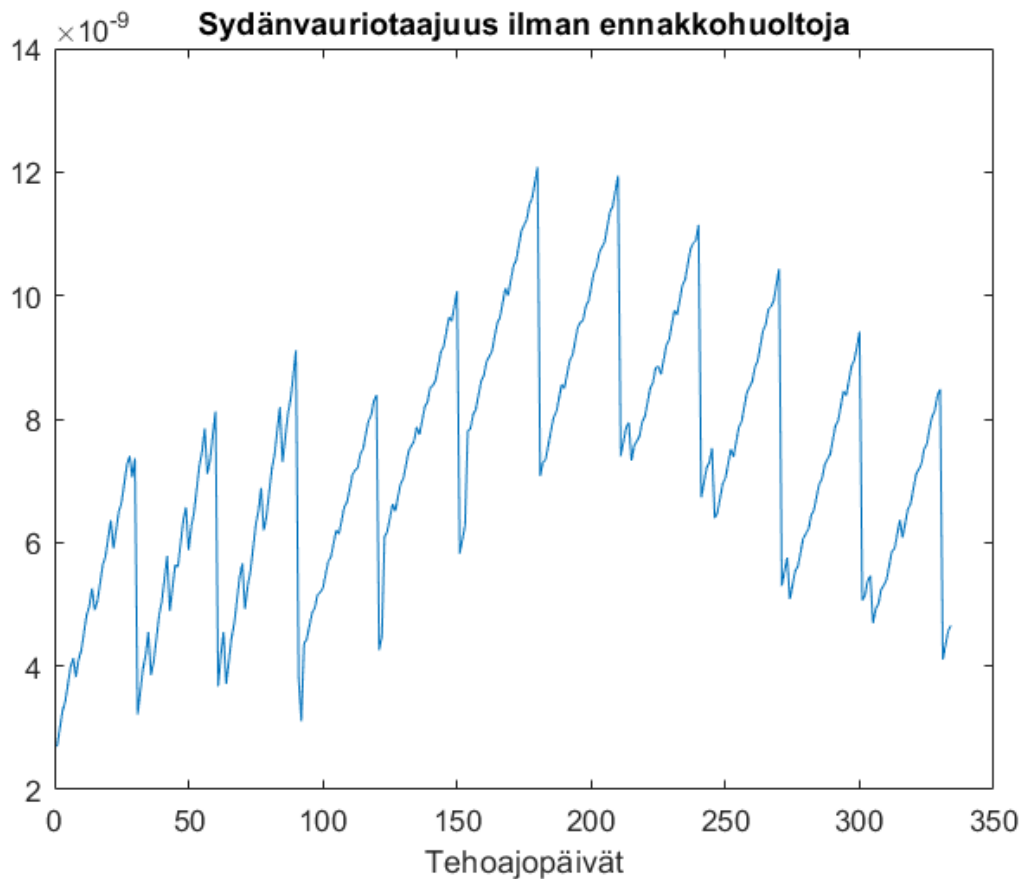
Ennakkohuoltojen aikana sydänvauriotaajuus kasvaa, koska minimikatkosjoukkojen määrä lisääntyy. Tämä johtuu ennakkohuoltoperustapahtumien

binäärisistä arvoista (kappale 3.4). Ennakkohuollon aikainen sydänvauriotaajuuden nousu näkyy selkeästi kuvissa 13-22 etenkin DIP-paketin kohdalla. Ennakkohuoltotapahtumia sisältävien minimikatkosjoukkojen määrä on pieni verrattuna kaikkien minimikatkosjoukkojen määrään, mutta niiden taajuudet ovat merkittäviä. Suuret todennäköisyydet kyseisille minimikatkosjoukoille johtuu siitä, että ennakkohuoltotapahtumien todennäköisyydet ovat yksi ennakkohuollon ollessa käynnissä. Näin ollen näiden minimikatkosjoukkojen taajuudet ovat useaa kertaluokkaa suurempia kuin alkuperäisessä mallissa olevien vastaavien minimikatkosjoukkojen taajuudet.

Sääilmiöiden vaikutus näkyy mallissa selkeästi. Komponenttivikatapahtumien todennäköisyyksien muutokset vaikuttavat sydänvauriotaajuuteen muodostaen siitä sahaavan käyrän, jonka trendi on tasaisesti kasvava. Säätapaukset vaikuttavat sydänvauriotaajuuteen ennalta-arvaamattomammin rikkoen tasaisen kasvun trendiä.

Iso osa komponenttien koestuksista suoritetaan neljän viikon välein, mikä näkyy kuvassa 10 voimakkaana sydänvauriotaajuuden pienenemisenä neljän viikon välein.

Kesä-, heinä- ja elokuussa (kolme ensimmäistä kuukautta) havaitaan myös sydänvauriotaajuuden sahaavaa vaihtelua kuukauden sisällä. Tämä johtuu säätapauksesta lämmin merivesi, jonka aiheuttamat muutamat merkittävät minimikatkosjoukot esiintyvät vain näinä kesäkuukausina. Näihin merkittäviin minimikatkosjoukkoihin liittyy tietyn järjestelmän komponenttien yhteisvikoja. Sydänvauriotaajuuden muutoksen kesäkuukausina aiheuttaa näiden komponenttien koestaminen, joka suoritetaan viikon välein. Myöhempien kuukausien aikana sydänvauriotaajuuden sahaamista ei ole, koska nämä merkittävät minimikatkosjoukot poistuvat kun säätapauksen taajuus on nolla.

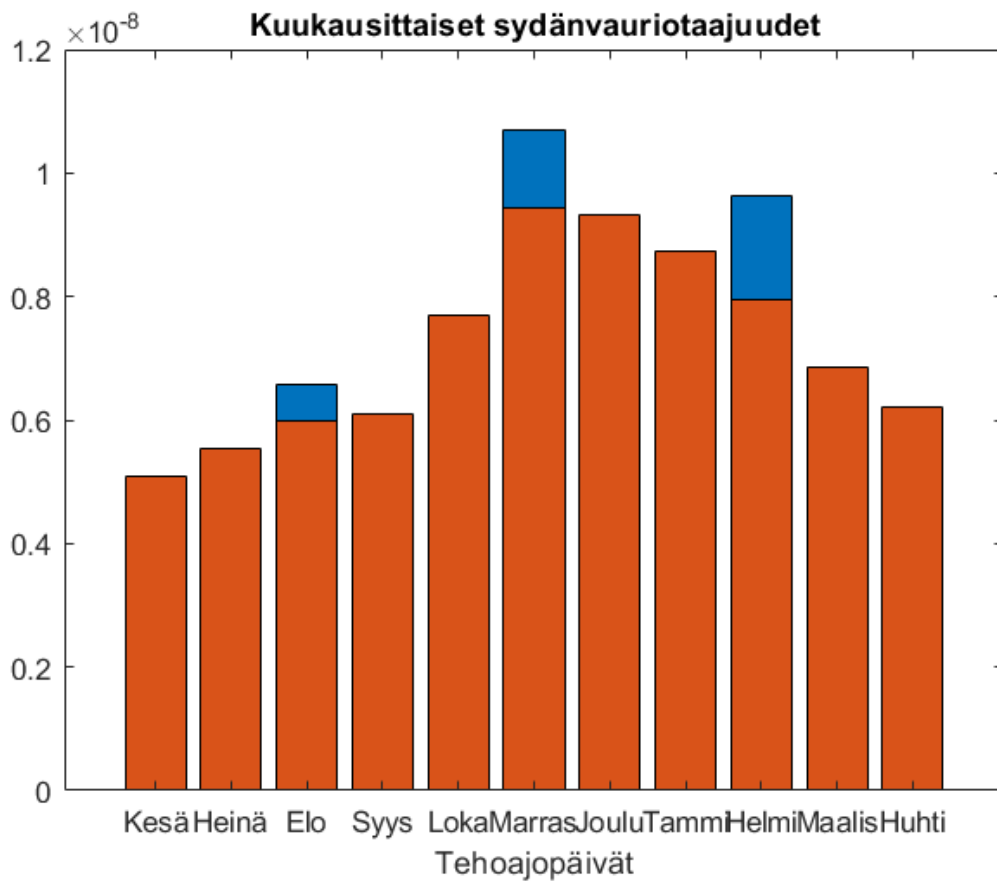


Kuva 10: Sydänvauriotaajuus (/päivä) ilman ennakkohuoltoja

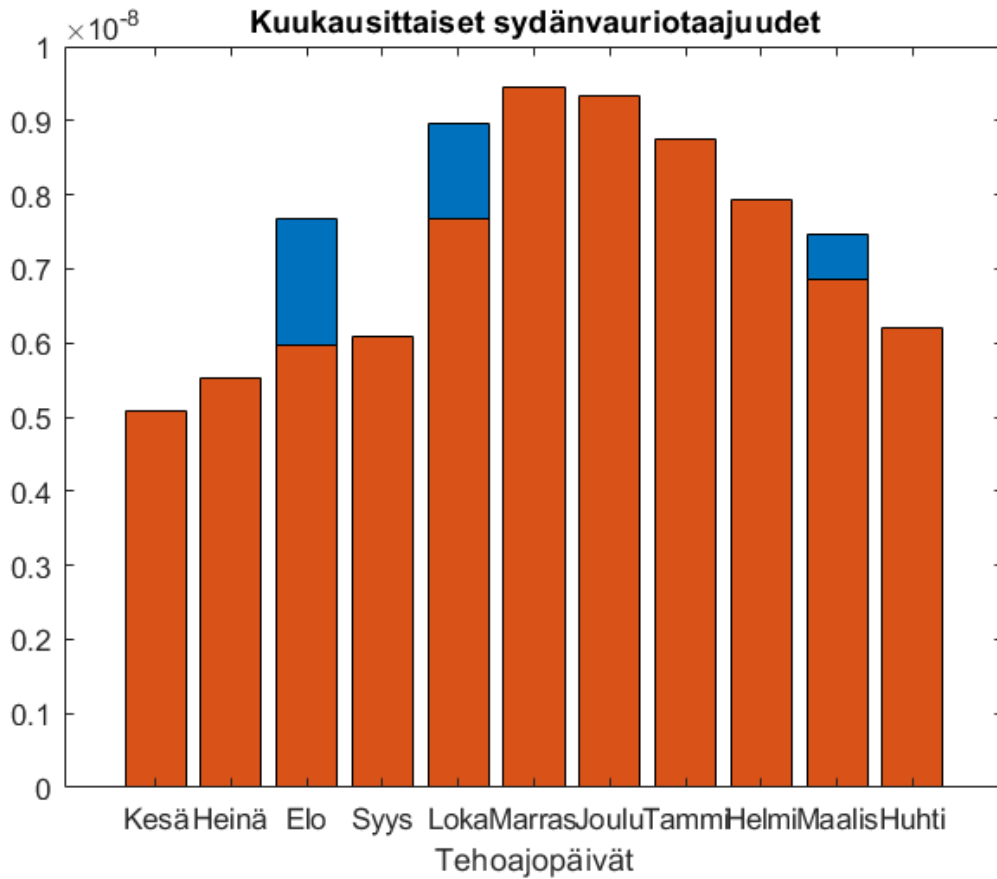
Kuvasta 10 havaitaan elo-syyskuun, syys-lokakuun ja loka-marraskuun vaihteissa sydänvauriotaajuuden jyrkkä nousu. Tämä selittyy mallin merkittävimmän säätapahuman myrskyn taajuuden suurella kasvulla. Sydänvaurion kulmakerroin näkyy, koska koestusajankohdat eivät osu tarkalleen kuun vaihteeseen. Neljän viikon välein koestettavien komponenttien koestamisen seurauksena sydänvauriotaajuus pienenee selkeästi. Kuitenkin muutamaa päivää myöhemmin kuukauden vaihtumisesta johtuva myrskytapahtumien taajuuden kasvu, nostaa myös sydänvauriotaajuutta merkittävästi

Kuvissa 11 ja 12 on esitetty ajasta riippuvan mallin kuukausittaiset sydänvauriotaajuuden (/päivä) arvot. Palkin punainen osuus kuvaa sydänvauriotaajuuden arvoa ilman ennakkohuoltoja. Sininen osuus taas kuvaa ennakkohuoltojen vaikutusta.

kohuollon osuutta sydänvauriotaajuudesta tietyssä kuukautena. Kuivissa ennakko-
 huoltojen osuudet on laskettu ennakkohuoltovuodelle EVH_{16} molem-
 millä suoritusajankohdan kombinaatioilla Θ_1 ja Θ_2 .



Kuva 11: Kuukausittaiset sydänvauriotaajuuden odotusarvot suoritusajan-
 kohdankombinaatiolle $\Theta_1 = \{90, 180, 270\}$



Kuva 12: Kuukausittaiset sydänvauriotaajuuden odotusarvot suoritusajankohdankombinaatiolle $\Theta_2 = \{300, 150, 60\}$

Kuvat 13-22 havainnollistavat ajasta riippuvan mallin sydänvauriotaajuuden vaihtelua kaikkina eri ennakkohuoltovuosina $EHV = \{EHV_{16}, EHV_{20a}, EHV_{20b}, EHV_{24}, EHV_{32}\}$ ja kahtena eri suoritusajankohdan kombinaatiolla Θ_1 ja Θ_2 .

Kuvissa 13-22 sininen käyrä kuvaa ajasta riippuvan mallin sydänvauriotaajuuden muutosta päivittäin. Keltainen suora kuvaa ajasta riippuvan mallin sydänvauriotaajuuden vuoden päivien taajuuksien keskiarvoa. Punainen suora taas kuvaa alkuperäisen mallin sydänvauriotaajuuden päivittäistä odotusarvoa.

Ajasta riippuvassa mallissa ja alkuperäisessä mallissa on käytetty en-

nakkohuoltopakettien kestojen mallinnuksessa hieman erilaisia kriteerejä. Ajasta riippuvassa mallissa ennakkohuoltopakettien kestot on mallinnettu niiden suurimman sallitun keston mukaan, eli suurimman sallitun huoltopäivien määrän mukaan. Alkuperäisessä mallissa taas ennakkohuoltopakettien kestot on määritetty niiden todellisten kestojen keskiarvojen mukaan, joka on noin viisi päivää vuodessa. Muun muassa nämä toisistaan poikkeavat oletukset vaikuttavat ajasta riippuvan mallin sydänvauriotaajuuden keskiarvon ja alkuperäisen mallin odotusarvon eroihin eri ennakkohuoltovuosina. Mitä enemmän mallissa on huoltopäiviä, sitä suurempi on sydänvauriotaajuus.

Ennakkohuoltovuosina EVH_{16} , EHV_{20a} ja EHV_{20b} ajasta riippuvan mallin sydänvauriotaajuuden keskiarvo on hieman pienempää kuin alkuperäisen mallin odotusarvo, (vrt. kuvat 13-18). Kaikkien näiden ennakkohuoltovuosien ennakkohuoltopäivien määrä on suurempi kuin alkuperäisessä mallissa. Vaikka ajasta riippuvassa mallissa ennakkohuoltopäiviä on enemmän, voidaan sen pienempää sydänvauriotaajuuden keskiarvoa selittää, joidenkin alkuperäisen mallin konservatiivisten oletusten realistisoimisella.

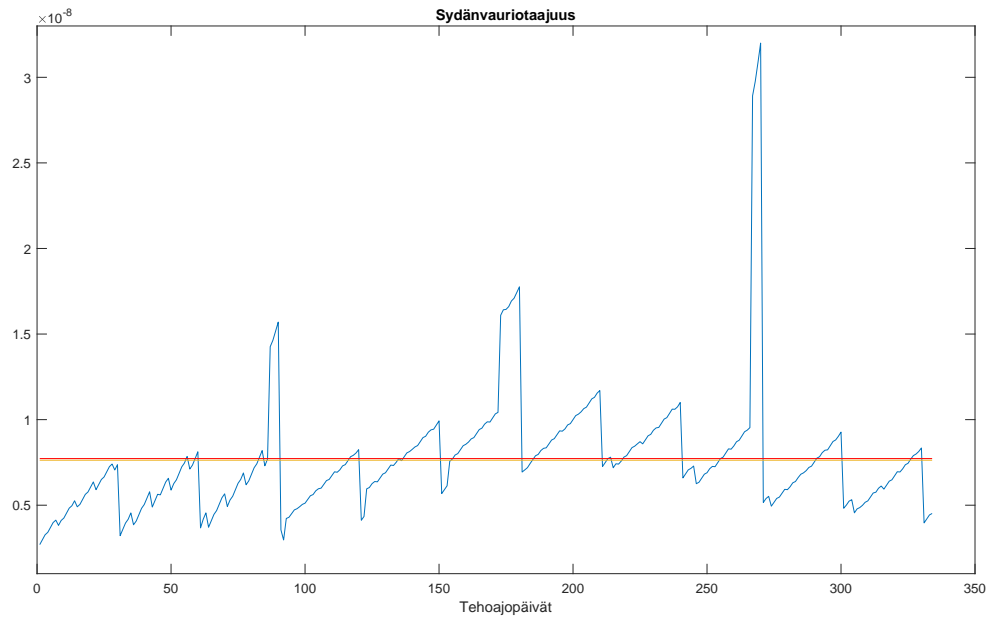
Ennakkohuoltovuosina EVH_{24} ja EHV_{32} ajasta riippuvan mallin sydänvauriotaajuuden keskiarvo on hieman suurempaa kuin alkuperäisen mallin odotusarvo. Tämä johtuu ennakkohuoltotapahtumien mallinnusta varten tehdyistä erilaisista oletuksista ja suurista ennakkohuoltopäivien määrän eroista.

Ennakkohuoltovuodessa EHV_{16} on vähiten ennakkohuoltopäivä. Koska huoltopäivien määrä vaikuttaa merkittävästi sydänvauriotaajuuteen, on ennakkohuoltovuoden EHV_{16} sydänvauriotaajuus alhaisin verrattuna muihin ennakkohuoltovuosiin.

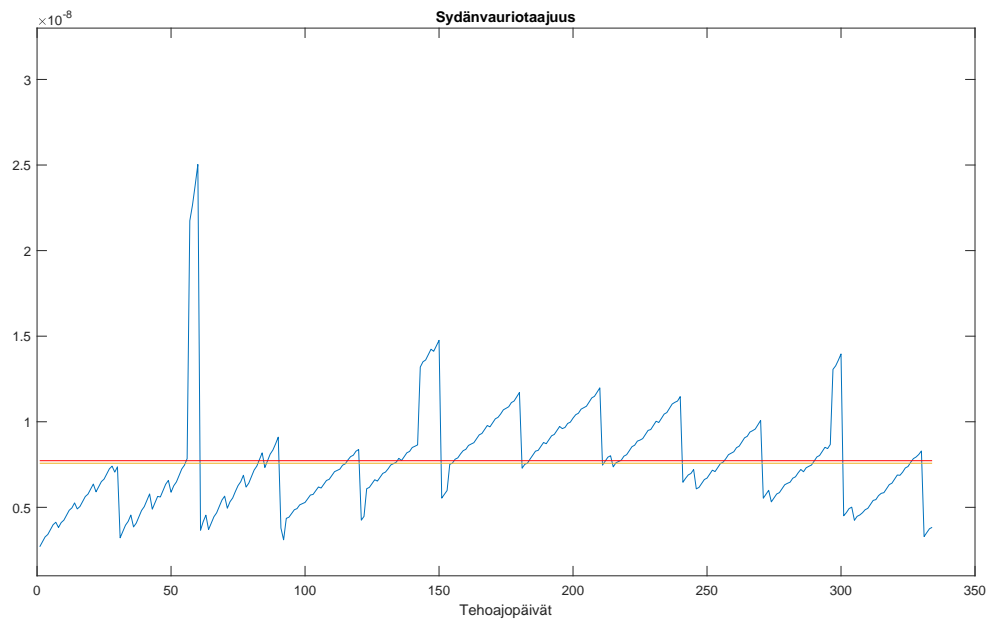
Molemmilla suoritusajankohdan kombinaatioilla sydänvauriotaajuuden vuosikeskiarvo on pienempi kuin alkuperäisessä mallissa. Kombinaatiolla Θ_1 sydänvauriotaajuuden keskiarvo $CDF = 7.6288 \times 10^{-9}$ /päivä on hieman suurempi kuin kombinaatiolla Θ_2 , jolla sydänvauriotaajuuden keskiarvo $CDF = 7.5770 \times 10^{-9}$ /päivä.

Kombinaation Θ_2 paremmuus johtuu luultavasti PU2- ja DIP-paketin paremmasta suoritusajankohasta. Sydänvauriotaajuus on valmiiksi pienempi elo- ja lokakuussa kuin marras- ja helmikuussa. Tällöin ennakkohuolloista ai-

heutuva sydänvauriotaajuuden nousu kasvattaa vähemmän sydänvauriotaajuuden keskiarvoa suoritusajankohdan kombinaatiolla Θ_2 kuin kombinaatiolla Θ_1 .



Kuva 13: Ennakkohuoltovuosi EHV_{16} suoritusajankohdan kombinaatiolla Θ_1



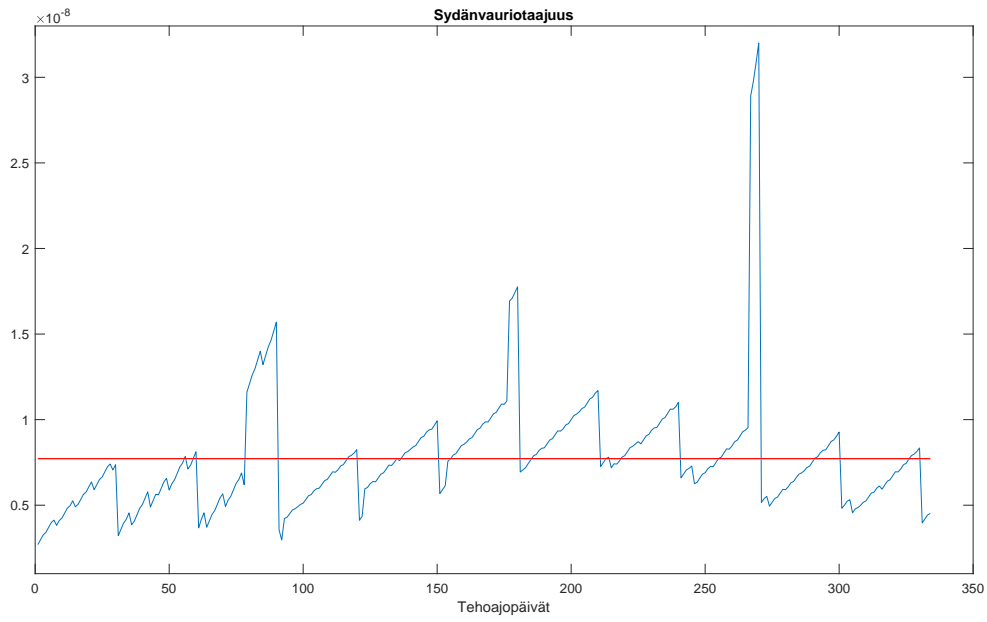
Kuva 14: Ennakkohuoltovuosi EHV_{16} suoritusajankohdan kombinaatiolla Θ_2

Ennakkohuoltovuosissa EHV_{20a} ja EHV_{20b} on yhtä monta ennakkohuoltopäivää. Ennakkohuoltovuodessa EHV_{20a} on 12 PU1-pakettiin kuuluvaa huoltopäivää, kun taas ennakkohuoltovuonna EHV_{20b} PU2-paketissa on 12 huoltopäivää. Vaikka niissä on sama määrä huoltopäiviä, on niiden sydänvauriotaajuuden keskiarvoissa eroja.

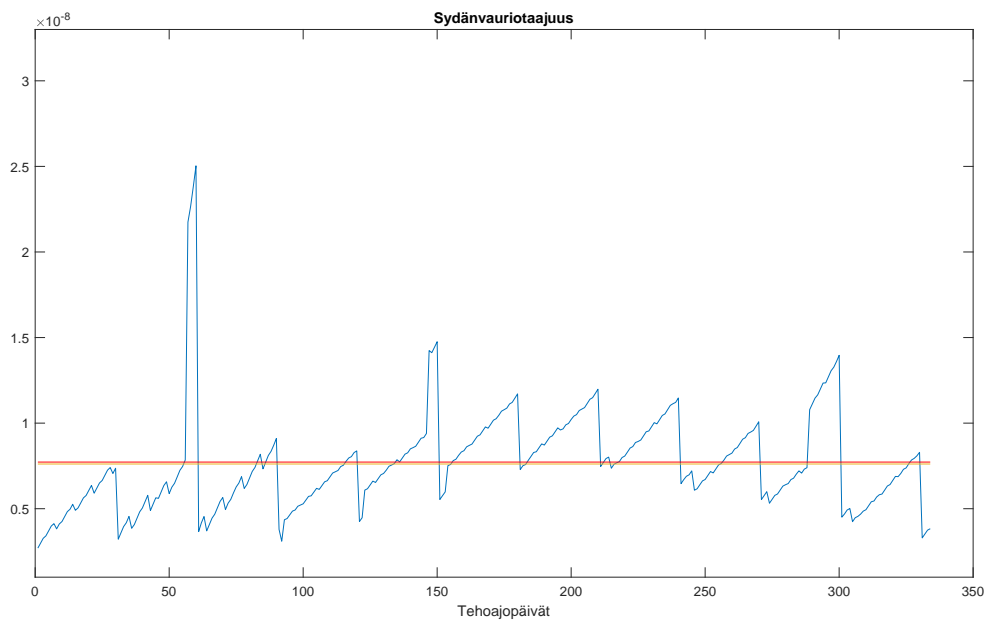
Molempien ennakkohuoltovuosien molemmilla suoritusajankohdan kombinaatioilla sydänvauriotaajuuden vuosikeskiarvo vuodessa on pienempi kuin alkuperäisessä mallissa. Ennakkohuoltovuodella EHV_{20a} on hieman suurempi sydänvauriotaajuuden keskiarvo kombinaatiolla Θ_1 ja kombinaatiolla Θ_2 ennakkohuoltovuoden EHV_{20b} sydänvauriotaajuuden keskiarvo on suurempi.

Suoritusajankohdan kombinaatiolla Θ_1 sydänvauriotaajuuden keskiarvo $CDF_{20a} = 7.6973 \times 10^{-9}/\text{päivä}$ ja $CDF_{20b} = 7.6917 \times 10^{-9}/\text{päivä}$. Suoritusajankohdan kombinaatiolla Θ_2 molempien ennakkohuoltovuosien sydänvauriotaajuuden keskiarvot ovat pienempiä kuin kombinaatiolla Θ_1 . Ennakkohuoltovuoden EHV_{20a} sydänvauriotaajuuden keskiarvo $CDF_{20a} = 7.6120 \times 10^{-9}/\text{päivä}$ ja ennakkohuoltovuoden EHV_{20b} sydänvauriotaajuuden keskiarvo $CDF_{20b} = 7.6273 \times 10^{-9}/\text{päivä}$.

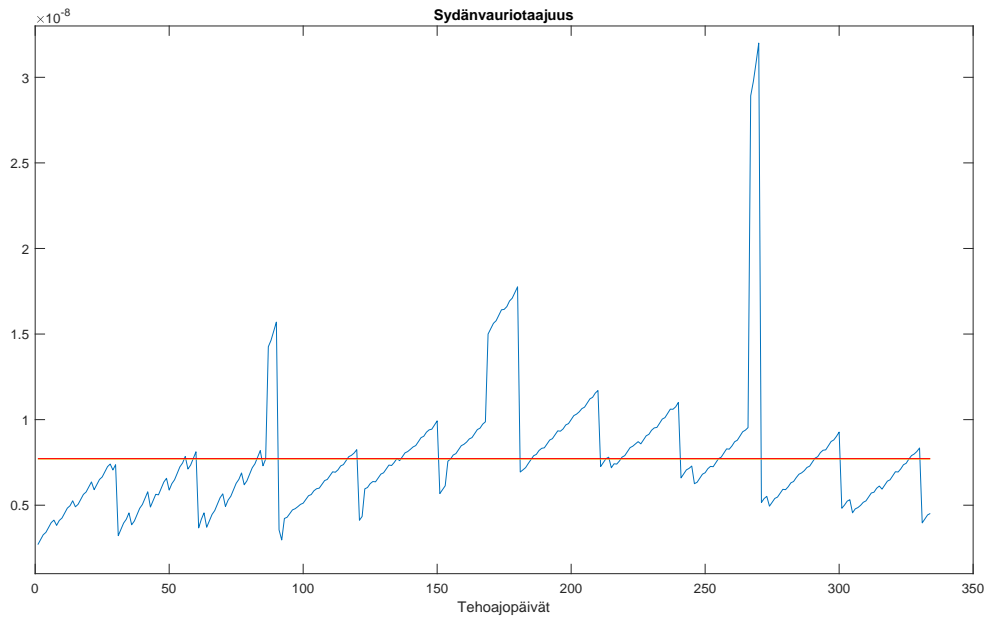
Ennakkohuoltovuosi EHV_{20a} esiintyy kaksi kertaa useammin kuin ennakkohuoltovuosi EHV_{20b} . Esimerkiksi 40 peräkkäisenä vuonna EHV_{20a} esiintyy 10 kertaa ja EHV_{20b} viisi kertaa.



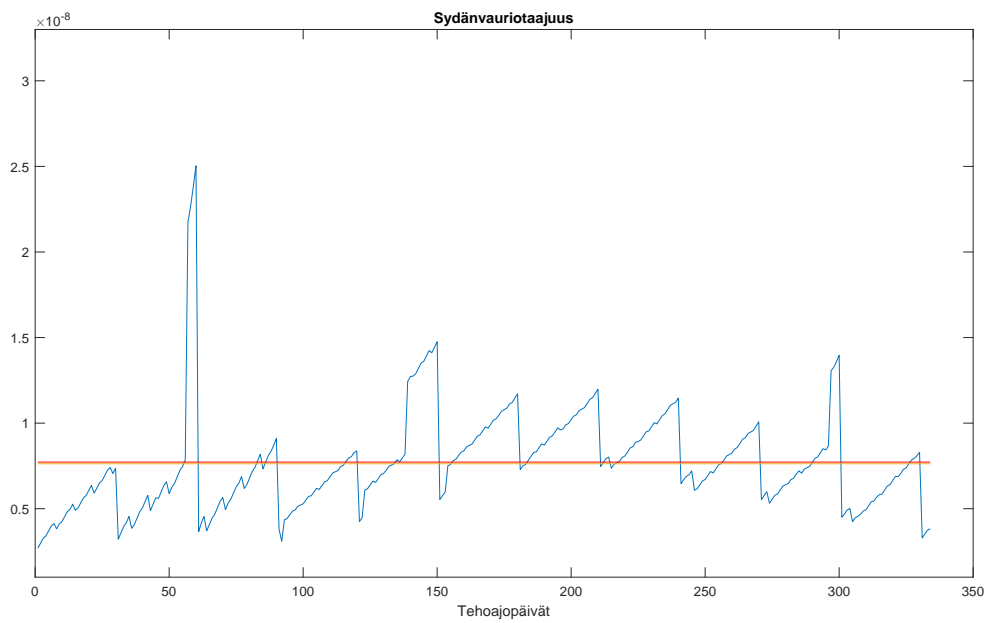
Kuva 15: Ennakkohuoltovuosi EHV_{20a} suoritusajankohdan kombinaatiolla Θ_1



Kuva 16: Ennakkohuoltovuosi EHV_{20a} suoritusajankohdan kombinaatiolla Θ_2



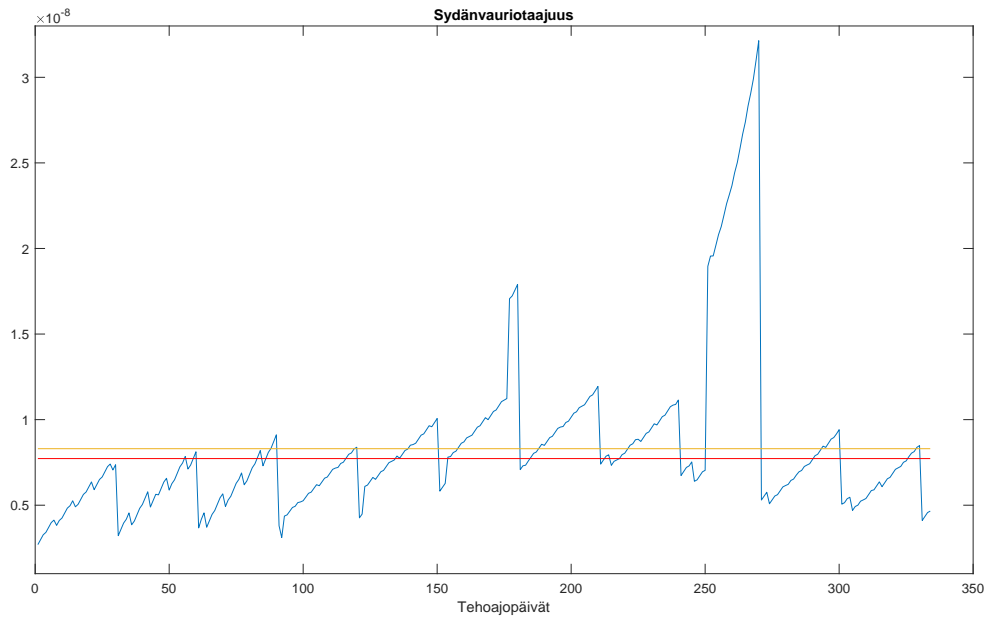
Kuva 17: Ennakkohuoltovuosi EHV_{20b} suoritusajankohdan kombinaatiolla Θ_1



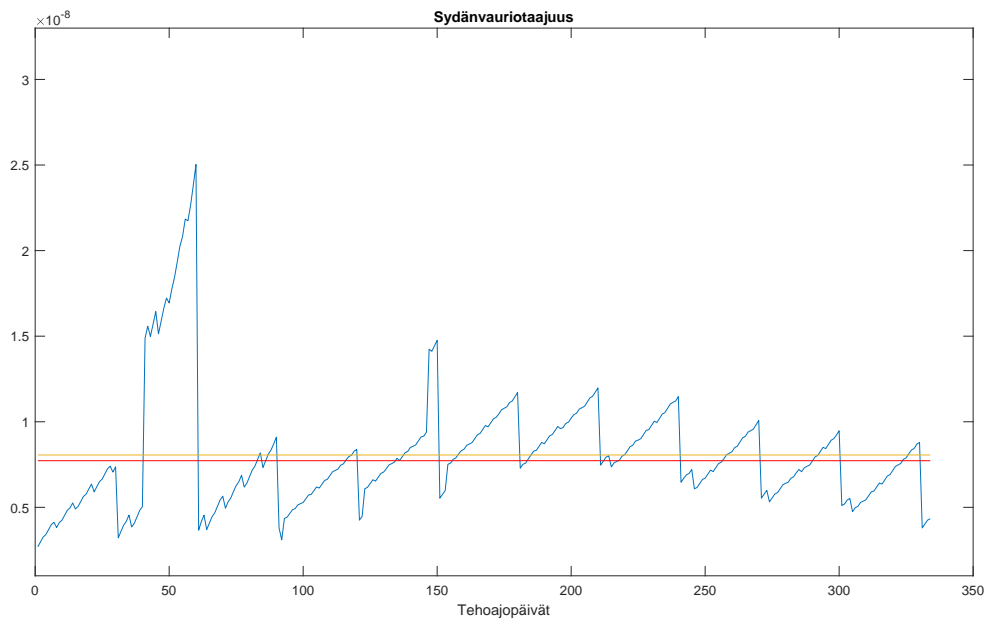
Kuva 18: Ennakkohuoltovuosi EHV_{20b} suoritusajankohdan kombinaatiolla Θ_2

Ennakkohuoltovuodessa \mathbf{EHV}_{24} on toiseksi eniten ennakkohuoltopäiviä ja se esiintyy suhteellisen tiheästi ennakkohuoltovuosien vaihtelusyklissä. Ennakkohuoltovuonna \mathbf{EHV}_{24} ei huolleta lainkaan PU1-laitteita. PU1-paketin vaikutus sydänvauriotaajuuteen on pienempi kuin kahden muun ennakkohuoltopaketin. Tällöin huoltopäivien määrän merkitys korostuu. Ennakkohuoltovuoden \mathbf{EHV}_{24} sydänvauriotaajuuden keskiarvo on suurempi kuin alkuperäisenmallin sydänvauriotaajuus, mutta toisaalta sen ennakkohuoltopäivien määrä jo huomattavasti suurempi kuin alkuperäisen mallin.

Ennakkohuoltovuoden \mathbf{EHV}_{24} huoltojen suoritusajankohdan kombinaatiolla on selkeä vaikutus vuoden sydänvauriotaajuuden keskiarvoon. Kombinaatiolla Θ_1 sydänvauriotaajuuden keskiarvo $CDF = 8.3016 \times 10^{-9}$ /päivä ja kombinaatiolla Θ_2 $CDF = 8.0590 \times 10^{-9}$ /päivä.



Kuva 19: Ennakkohuoltovuosi EHV_{24} suoritusajankohdan kombinaatiolla Θ_1

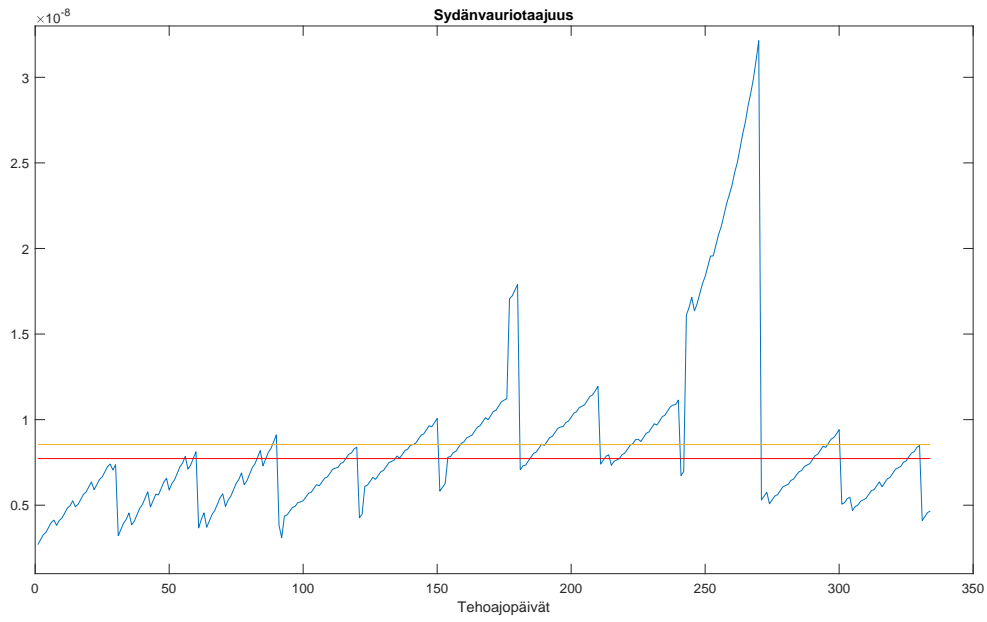


Kuva 20: Ennakkohuoltovuosi EHV_{24} suoritusajankohdan kombinaatiolla Θ_2

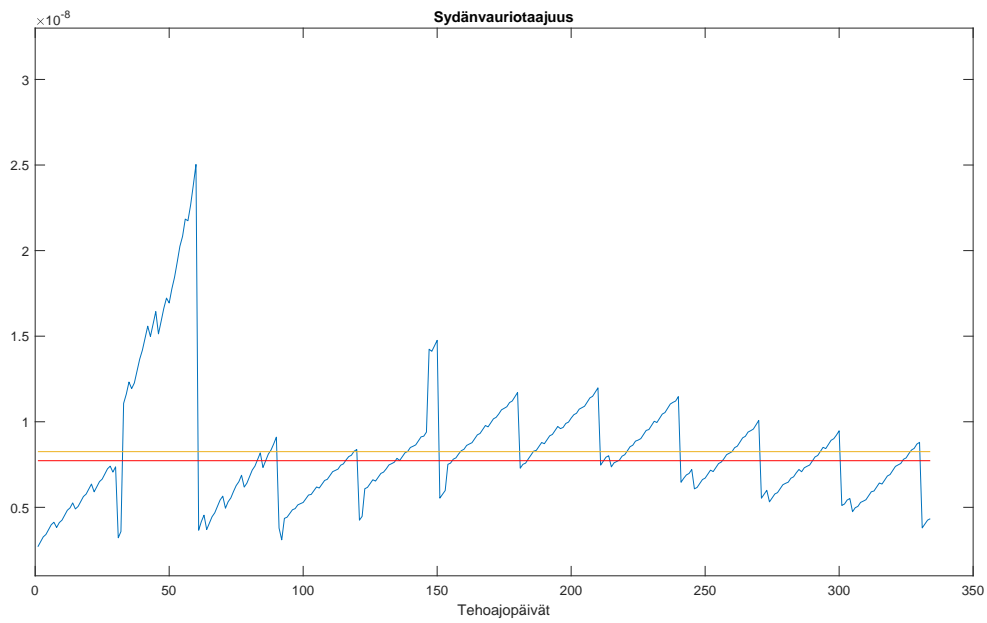
Ennakkohuoltovuodessa \mathbf{EHV}_{32} on eniten ennakkohuoltopäivä. Kuten ennakkohuoltovuonna \mathbf{EHV}_{24} , myöskään vuonna \mathbf{EHV}_{32} ei suoriteta lainkaan PU1-pakettiin kuuluvia huoltoja. Ennakkohuoltovuoden \mathbf{EHV}_{32} sydänvauriotaajuuden keskiarvo on kaikista suurin verrattuna muihin ennakkohuoltovuosiin, jolloin se on myös suurempi kuin alkuperäisen mallin sydänvauriotaajuus.

Ennakkohuoltovuosi \mathbf{EHV}_{32} ei juuri eroa vuodesta \mathbf{EHV}_{24} , muuten kuin, että DIP-paketin ennakkohuoltopäivien määrä kasvaa 20 päivästä 28 päivään. Päivien määrän kasvu vaikuttaa suoraan myös sydänvauriotaajuuden keskiarvoon.

Suoritusajankohdan kombinaatiolla Θ_1 sydänvauriotaajuuden keskiarvo $CDF = 8.5441 \times 10^{-9}$ /päivä ja kombinaatiolla Θ_2 sen keskiarvo $CDF = 8.2539 \times 10^{-9}$ /päivä. Kombinaatiossa Θ_1 DIP-paketti suoritetaan helmikuussa, jolloin sydänvauriotaajuuden keskiarvo on valmiiksi suurempi kuin heinäkuussa. Tällöin sydänvauriotaajuuden suurempi arvo ja pitkän huollon yhteisvaikutus nostavat sydänvauriotaajuuden vuosikeskiarvoa.



Kuva 21: Ennakkohuoltovuosi EHV_{32} suoritusajankohdan kombinaatiolla Θ_1



Kuva 22: Ennakkohuoltovuosi EHV_{32} suoritusajankohdan kombinaatiolla Θ_2

Taulukossa 5 on vertailtu ajasta riippuvan mallin sydänvauriotaajuuden keskiarvoa ja alkuperäisen mallin sydänvauriotaajuutta eri ennakkohuoltovuosina. Erotus kuvaa ajasta riippuvan mallin sydänvauriotaajuuden vuosikeskiarvon ja alkuperäisen mallin sydänvauriotaajuuden erotusta $Erotus = CDF_{timedep.} - CDF_{original}$. Taulukossa $CDF1$ ja $Erotus1$ kuvaavat vuosikombinaation Θ_1 vuosikeskiarvoa ja sen avulla laskettua erotusta.

Kuten taulukosta nähdään pisimpinä ennakkohuoltovuosina EHV_{24} ja EHV_{32} ajasta riippuvan mallin vuosikeskiarvo on suurempaa kuin alkuperäisen mallin sydänvauriotaajuus. Tämä johtuu ennakkohuoltopäivien suuresta määrästä ja siitä että näinä vuosina ei suoriteta lainkaan ennakkohuoltopakettia $PU1$.

Ennakkohuoltovuosi	$CDF_{E_1} \times 10^{-9}$	$CDF_{E_2} \times 10^{-9}$	Erotus 1 $\times 10^{-9}$	Erotus 2 $\times 10^{-9}$
EHV_{16}	7.6288	7.5770	-0.0958	-0.1476
EHV_{20a}	7.6973	7.6120	-0.0273	-0.1126
EHV_{20b}	7.6917	7.6273	-0.0329	-0.0973
EHV_{24}	8.3061	8.0590	0.5815	0.3344
EHV_{32}	8.5441	8.2539	0.8195	0.5293
$CDF_{original}$	7.7246	7.7246	0	0

Taulukko 5: Ajasta riippuvan mallin sydänvaurion vuosikeskiarvot ja verrattuna alkuperäisen mallin sydänvauriotaajuuteen

5 Ennakkohuoltojen optimointi

Ydinlaitoksen käyttöikä on pitkä ja sen toimintakunnosta on huolehdittava jatkuvasti. Käytännössä tämä tarkoittaa useita säännöllisiä huoltoja ja testauksia vuodessa. Esimerkiksi turvallisuuden parantamiseksi laitoksille voidaan tehdä modernisointia ja muita suurempia korjauksia. PRA-mallilla arvioidaan huoltojen, testauksen ja muutostöiden vaikutusta ja merkitystä laitoksen turvallisuuteen. Mallia on käytettävä myös huolto- ja koestusohjelmien laadinnassa. [32]

Yksi motiivi ajasta riippuvan mallin kehittämiseksi on myös se, että sen avulla voidaan ajoittaa ja suunnitella tarkemmin tehoajojaksolla tehtäviä huoltoja. Kappaleessa 4.3 esitelty malli osoittaa, että ennakkohuoltojen ajoittumisella vuoden aikana on vaikutusta laitoksen sydänvauriotaajuuteen.

5.1 Vuosittaisten ennakkohuoltopäivien määrän minimointi

Vuosittain suoritetaan erilaisia laitoksen eri osiin kohdistuvia ennakkohuoltoja. Huoltopaketteja on kolme erilaista PU1, PU2 ja DIP, joihin kuuluu ennalta määrätyt laitoksen eri järjestelmät. Kullakin ennakkohuoltopaketillä on useita aikarajoitteita ja erilaajuisia paketteja suoritetaan eri vuosina. Yleisesti erilaajuisille paketeille on määritetty korjaukseen kuuluva aika, eli erotusaika. Erotusaika on aika, jonka järjestelmä on käyttökunnoton.

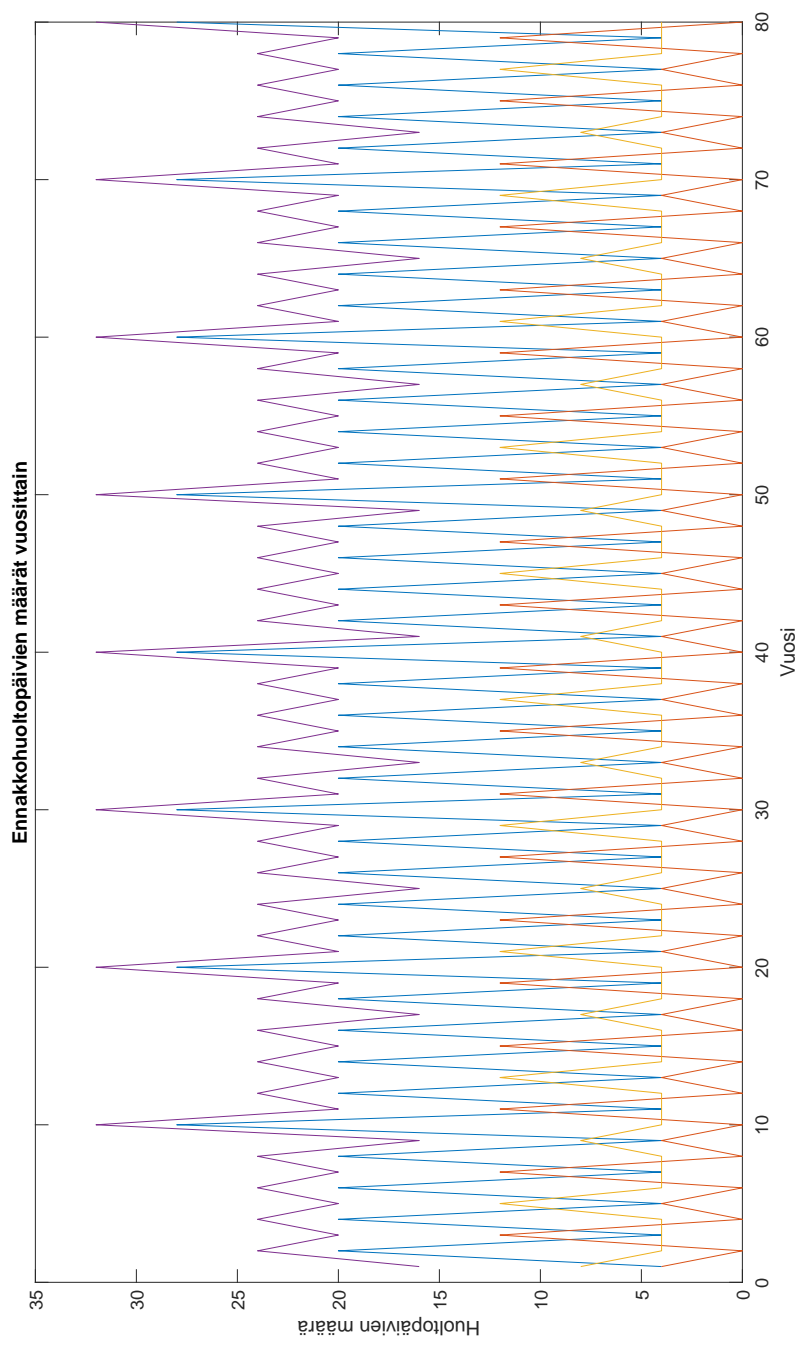
Aloitusvuonna suoritettavien pakettien laajuuden kombinaatioita vaihtamalla saadaan erilaisia vuosikombinaatioita. Vuosikombinaatiosta on valittu se, jonka summavektorin

$$S = V_{DIP} + V_{PU1} + V_{PU2} \quad (33)$$

vaihteluväli $MAX_S - MIN_S$ on mahdollisimman pieni. Tällöin vuosittain suoritettavien huoltojen pituudet pysyvät mahdollisimman saman mittaisina, eikä minkään vuoden aikana huoltojenjaksojen pituus kasva liian suureksi. Kuvassa 23 on valitun vuosikombinaation summavektori sekä kutakin ennakkohuoltopakettia kuvaavat vektorit. Summavektorin S vaihteluväli $MAX_S -$

$MIN_S = 16$ ja mediaani $M_S = 22$.

Summavektorista nähdään, että ennakkohuoltopäivien määrät ovat 16, 20, 24 tai 32 vrk/vuosi riippuen vuodesta. Tätä tietoa on käytetty ajasta riippuvan laitospallin laskennassa, joka on suoritettu viidelle ennakkohuoltovuodelle. Tarkoituksena on myös hyödyntää tätä tietoa optimointitehtävän määrittämisessä. Optimointitehtävälle muodostetaan viisi eri vuosiskenaariota summavektorista S saatujen ennakkohuoltopäivien määrien perusteella.



Kuva 23: Summavektoria S kuvaa violetti, DIP -paketteja sininen, PU1 -paketteja oranssi ja PU2 -paketteja keltainen käyrä

5.2 Optimointimalli

Ydinlaitosten ennakkohuoltojen optimointia on tutkittu jo yli kahdenkymmenen vuoden ajan. Haasteena on ydinlaitosten kompleksisuus, joka johtuu osaksi moninkertaisista ja toisiaan varmentavista turvallisuusjärjestelmistä ja -järjestelyistä. Laitoksen huoltaminen aiheuttaa kuitenkin paljon kustannuksia ja kuormittaa maapalloa. Ylimääräisiä kustannuksia ja ekologista jalanjälkeä voidaan pienentää muun muassa optimoimalla erilaisten huoltojen määrää. [24]

Tässä työssä esiteltävässä optimointitehtävässä ei kuitenkaan minimoida huoltojen määrää tai kustannuksia. Optimointitehtävässä on tarkoitus minimoida sydänvauriotaajuutta, suorittamalla ennakkohuollot optimaalisina ajankohtina.

Ennakkohuoltojen ajankohdan matemaattista optimointia on tehty aiemminkin ainakin ilmailun ja rautatieliikennöinnin aloilla. Luonnollisesti näillä aloilla komponenttien huoltaminen on tärkeää, koska on kyse matkustajien turvallisuudesta. Myös ydinlaitoksen huoltaminen on erityisen tärkeää sen turvallisen käytön mahdollistamiseksi. [7, 1]

Ennakkohuoltojen ajankohdan optimoinnilla voidaan saavuttaa jopa merkittäviä parannuksia sydänvauriotaajuuteen. Tämän osoittaa laitosmallissa tehty vertailu kahdella eri suoritusajankohdan kombinaatioilla Θ_1 ja Θ_2 .

Taulukossa 6 on laskettu eri ennakkohuoltovuosille sydänvauriotaajuuden keskiarvot ja niiden erotukset $CDF_{\Theta_1} - CDF_{\Theta_2}$, kun suoritusajankohdan kombinaatiot ovat Θ_1 ja Θ_2 . Näistä kahdesta suoritusajankohdan kombinaatiosta tuskin kumpikaan on optimaalinen, mutta niiden sydänvauriotaajuuksissa on merkittäviä eroja. Luultavasti optimoimalla suoritusajankohdat voitaisiin saavuttaa vielä suurempia parannuksia sydänvauriotaajuuteen.

5.2.1 Optimointitehtävän määrittely

Tässä työssä esiteltävä optimointitehtävän on tarkoitus minimoida Olkiluoto 1 ja 2 sydänvauriotaajuus vuoden aikana, etsimällä optimaaliset suoritusajankohdat kyseisen vuoden aikana tehtäville ennakkohuolloille. Menetelmä on räätälöity tässä työssä kehitetylle ajasta riippuvalle laitosmallille. Optimointi

Ennakkohuoltovuosi	$CDF_{E_1} \times 10^{-7}$	$CDF_{E_2} \times 10^{-7}$	Erotus $\times 10^{-7}$
EHV_{16}	6.4379	6.5301	-0.0922
EHV_{20a}	6.4379	6.5549	-0.1170
EHV_{20b}	6.4868	6.5790	-0.0922
EHV_{24}	6.7756	6.7759	-0.0003
EHV_{32}	6.7959	6.7957	0.0002

Taulukko 6: Ajasta riippuvan mallin sydänvaurion vuosikeskiarvot ja verrattuna alkuperäisen mallin sydänvauriotaajuuteen

suorittaa tehoajon aikana tehtäville ennakkohuolloille, jolloin tarkastelu-aika rajoittuu yhden vuoden tehoajojaksolle.

Optimointitehtävä perustuu OR-malliin (*opportunistic replacement model*), jonka tarkoituksena on minimoida huoltojen kustannukset. Tässä työssä on kuitenkin tarkoitus minimoida ydinlaitoksen sydänvauriotaajuutta yhden tehoajojakson aikana. Optimointitehtävä on lineaarinen sekalukutehtävä (*Mixed integer linear problem, MILP*), jolloin se voidaan ratkaista MILP-tehtäville tarkoitetuilla menetelmillä tai mahdollisesti myös heuristisilla menetelmillä. Ydinlaitosten ennakkohuoltojen ajoittumiseen liittyvää optimointiongelmaa on aiemmin tutkittu ja pyritty ratkaisemaan muun muassa geneettisten algoritmien avulla. [24]

Määritellään seuraavaksi OR-ongelma, eli ORP (*opportunistic replacement problem*). [7, 1, 2]

Määritelmä 5.1. [1, 2] Olkoon N korjattavien komponenttien joukko ja T tarkastelujakson pituus. Olkoon $c_{it} \geq 0$ komponentin $i \in N$ korjaus- tai korvauskustannus ajanhetkellä $t \in \{0, \dots, T\}$ ja $d_t \geq 0$ huoltotapahtuman kustannus ajanhetkellä t . Olkoon

$$z_t = \begin{cases} 1, & \text{jos huollon tapahtuu hetkellä } t \in \{0, \dots, T\} \\ 0, & \text{muulloin} \end{cases}$$

$$x_{it} = \begin{cases} 1, & \text{jos komponentti } i \text{ vaihdetaan hetkellä } t \in \{0, \dots, T\} \\ 0, & \text{muulloin.} \end{cases}$$

Tällöin ORP on muotoa

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in N} c_{it} x_{it} + d_t z_t \right) & (34) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{t=l+1}^{l+T_i} x_{it} \geq 1, & l = 0, \dots, T - T_i, i \in N \\ & x_{it} \leq z_t, & t \in \{0, \dots, T\}, i \in N \\ & x_{it}, z_t \in \{0, 1\} & t \in \{0, \dots, T\}, i \in N, \end{aligned}$$

kun T_i on komponentin i suurin sallittu korjausintervalli.

5.2.2 Optimointitehtävä

Määritellään seuraavaksi Olkiluoto 1 ja 2 ennakkohuoltojen ajankohdan optimointitehtävän joukot, parametrit ja muuttujat sekä optimointitehtävä.

Joukot

$\mathcal{T} = \{1, 2, \dots, T\}$ tehoajojakson pituus vuodessa

$\mathcal{MP} = \{DIP, PU1, PU2\}$ suoritettavien ennakkohuoltopakettien joukko

$\mathcal{M}_0 = \{1, 2, \dots, M_0\}$ niiden minimikatkosjoukkojen joukko, joihin ei liity ennakkohuoltotapahtumaa

$\mathcal{M}_p = \{1, 2, \dots, M_p\}$ ennakkohuoltopakettiin p kuuluvien minimikatkosjoukkojen joukko

$\mathcal{V}_p = \{1, 2, \dots, V\}$ huoltopäivien joukko ennakkohuoltopaketissa p

Parametrit

md_p on ennakkohuoltopaketin p suurin sallittu kesto aika

mcs_{mp}^t on minimikatkosjoukon m sydänvauriotaajuus ajanhetkellä t , kun suoritetaan ennakkohuoltopakettia p .

mcs_m^t on minimikatkosjoukon m sydänvauriotaajuus ajanhetkellä t , kun minimikatkosjoukkoon m ei kuulu ennakkohuoltotapahtumia.

Muuttujat

$$c_p^t = \begin{cases} 1, & \text{kun huoltopaketti } p \text{ suoritetaan ajanhetkellä } t \\ 0, & \text{muuten.} \end{cases} \quad (35)$$

Optimointitehtävä

$$\min \frac{1}{T} \sum_{t \in \mathcal{T}} \left(\sum_{p \in \mathcal{MP}} \sum_{m \in \mathcal{M}_p} c_p^t mcs_{mp}^t + \sum_{m \in \mathcal{M}_0} mcs_m^t \right) \quad (36)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_t^{t+md_p} c_p^t = md_p \quad (37)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{MP}} c_p^t \leq 1 \quad (38)$$

$$c_p^t \in \{0, 1\}, p \in \mathcal{MP}, t \in \mathcal{T}$$

Kohdefunktio (36) minimoi sydänvauriotaajuuden keskiarvon tarkastelujaksolla. Summa $\sum_{m \in \mathcal{M}_0} mcs_m^t$ on optimoinnin suhteen vakio, mutta se lisätty kohdefunktioon, jotta kohdefunktion optimiarvosta nähdään suoraan sydänvauriotaajuuden päivittäinen keskiarvo tarkastelujakson aikana. Rajoite (37) varmistaa, että huolto suoritetaan loppuun peräkkäisinä päivinä. Rajoite (38) taas estää eri huoltopakettien samanaikaisen suorittamisen.

Optimointitehtävän ratkaiseminen edellyttää laitosmallin kaltaista ajasta riippuvaa maalia. Minimikatkosjoukkojen taajuudet mcs muuttuvat ajan kuluessa ennalta määrättyllä tavalla, jolloin ne eivät muutu optimoitaessa. Optimoitavat muuttujia ovat ennakkohuoltotapahtumia kuvaavat muuttujat c_p^t .

Optimointitehtävässä ei käsitellä minimikatkosjoukkojen vuosivektoreita kuten laitosmallissa käsiteltiin. Optimointitehtävässä käsitellään minimikat-

kosjoukkojen taajuuksia päivä kerrallaan. Muuttuja c_p^t korvaa ennakkohuoltotapahtumien todennäköisyydet, jolloin nämä tapahtumat tulee poistaa laitostmallista. Optimointitehtävää ei ole ratkaistu tämän työ yhteydessä, koska pelkästään laitostmallin luominen täytti tämän pro gradu-tutkielman työmäärän.

6 Johtopäätökset

Ajasta riippuvan mallin avulla voidaan arvioida tarkemmin ydinvoimalaitosten hetkellistä tilaa ja kartoitetaan mahdolliset riskit kokonaisvaltaisesti. Ajasta riippuva malli osoittaa selvästi laitteiden koestuksen merkityksen laitoksen kunnossapidossa. Toisaalta koestusvälin korostunut merkitys voi johtua tehdyistä oletuksista, jotka eivät välttämättä vastaa komponentin vikaantumistodennäköisyyden suuruuden muutosta realistisesti. Malli osoittaa ensimmäistä kertaa ennakkohuoltojen hetkellisen vaikutuksen sydänvauriotaajuuteen TVO:n ydinvoimalaitoksilla Olkiluoto 1 ja 2.

Kuitenkin kokonaisuudessa voidaan sanoa, että ajasta riippuvan mallin avulla voidaan pienentää vuotuista sydänvauriotaajuutta sekä laskennallisesti että mahdollisesti myöhemmin myös todellisuudessa, kun ajasta riippuvan mallin avulla voidaan tehdä entistä parempia turvallisuuteen vaikuttavia ratkaisuja.

Ennakkohuoltotapahtumien todennäköisyydet kasvoivat vuositasolla ja niiden vaikutus korostui mallissa huomattavasti, nostaan myös minimikatkosjoukkojen taajuuksia. Kuten aikaisemmin todettiin, tämä johtuu toisistaan poikkeavista oletuksista ennakkohuoltojen vuosittaisten huoltopäivien määrästä. Kummassakaan mallissa tehdyt oletukset eivät ole vääriä. Alkuperäisen mallin käyttämä toteutuneiden ennakkohuoltopäivien määrän keskiarvo on realistisempi arvio niiden todellisista määristä. Toisaalta tässä työssä määrittelyn optimoinnin kannalta on järkevämpää käsitellä ennakkohuoltojen suurimpia sallittuja kestoja, koska näin ollen ei aliarvioida ennakkohuoltojen vaikutusta sydänvauriotaajuuteen.

Ennakkohuoltoja tehdään tehoajojaksolla, jotta vuosihuoltoja ja laitoksen seisonta-aikaa voitaisiin lyhentää. Tämä taloudellinen säästö näkyy kui-

tenkin tehoajojaksolla sydänvauriotaajuuden kasvuna. Ennakkohuoltojen toteuttaminen on tästä huolimatta järkevää, koska se parantaa turvallisuutta pitkällä aikavälillä. Sydänvauriotaajuuden muutos ei ole merkittävän suuri, mutta sen pienentämiseksi on kuitenkin hyvä kartoittaa keinoja.

Säätapauhtumat vaikuttavat ajasta riippuvaan malliin kaikista ennalta-arvaamattomimmin, mutta niiden vaikutukset on kuitenkin helposti selitettävissä valikoituneiden minimikatkosjoukkojen perusteella. Säätapauhtumat vaikuttavat myös selkeästi ennakkohuoltojen suoritusajankohdan optimointiin. Suoritusajan kohdalla Θ_2 sydänvauriotaajuuden keskiarvo on pienempää kaikilla ennakkohuoltovuosilla. Tämä johtuu siitä, että ennakkohuoltoja ei tehdä syksyllä ja alkutalvesta, kun merkittävimmän säätapauhtuman myrskyn taajuus on suurimmillaan.

Työssä saadut tulokset liittyen suoritusajankohtien kombinaatioiden vertailuun osoittavat, että ennakkohuoltojen ajankohdan optimoinnilla on vaikutusta sydänvauriotaajuuteen. Ennakkohuoltojen optimoinnin avulla voitaisiin parantaa laitoksen turvallista käyttöä ja pienentää sydänvauriotaajuutta tehoajojaksolla. Ennakkohuoltojen ajankohdan optimointia on tutkittu muun muassa liikennöinnin alalla ja tällainen optimointiongelman voidaan muuntaa ydinvoimalaitokselle soveltuvaksi. Vastaavanlaista optimointia ei ole ilmeisesti tehty aiemmin ydinvoima-alalla.

7 Jatkokehitysmahdollisuudet

Tässä kappaleessa esitellään tähän työhön liittyvät mahdolliset jatkokehitysmahdollisuudet. Kappaleessa 7.1 esitellään laitospallin kehittämiseen ja parantamiseen liittyviä jatkokehitysmahdollisuuksia. Optimointitehtävän ratkaiseminen ja mahdollinen laajentaminen on esitetty kappaleessa 7.2.

7.1 Laitospallin jatkokehitys

Tässä työssä kehitetty laitosmalli on toimiva kokonaisuus ja jo huomattavasti tarkempi ja informatiivisempi kuin sitä vastaava alkuperäinen malli. Sen tarkkuutta ja realistisuutta voitaisiin silti kehittää edelleen. Tässä kappaleessa esitetään kaksi mahdollista laitosmallin kehitysaluetta.

Alkuperäisessä, ei ajasta riippuvassa mallissa, on oletettu että komponentit ovat uuden veraisia koestuksen jälkeen. Komponenttien voidaan olettaa vikaantuvan suuremmalla todennäköisyydellä mitä kauemmin viimeisestä koestuksesta on. Tämä oletus pätee myös huoltoihin. Todellisuudessa huollon jälkeen, komponentin voidaan kuitenkin olettaa olevan paremmassa kunnossa kuin koestuksen jälkeen. Tämä ei kuitenkaan näy mallissa, koska mallissa koestus ja huolto ns. korjaavat komponenttia yhtä paljon.

Tässä työssä kehitetyssä laitosmallissa ennakkohuolloista saatava hyöty ei näy juurikaan. Nykyisessä laitosmallissa on käytetty samaa oletusta, kuin alkuperäisessä mallissa, ja komponenttien vikaantumistajuudet nollaantuvat aina koestuksen jälkeen.

Mallia tulisi kehittää niin, että ennakkohuolloista saatava hyöty olisi suurempi kuin koestuksista saatava hyöty. Realistisin lähestymistapa olisi luultavasti muuttaa koestusten vaikutusta komponenttien vikaantumistajuuteen. Esimerkiksi komponentin vikaantumistajuuden lausekkeeseen (7) voitaisiin lisätä muuttuja, johon ei vaikuta koestuksesta kulunut aika, vaan esimerkiksi edellisestä huollosta kulunut aika.

Toinen laitosmallin kehitysalue voisi olla osajärjestelmien eriaikaisen koestuksen huomioiminen. Nykyisessä mallissa laitteiden koestukset suoritetaan kaikille osajärjestelmille samaan aikaan. Todellisuudessa tämä on kuitenkin mahdotonta ja osajärjestelmät koestetaan tasaisin väliajoin koestusvälin si-

sällä. Esimerkiksi, jos koestusväli on kuukausi, koestetaan osajärjestelmä A sen ensimmäisellä viikolla, B toisella, C kolmannella ja D neljännellä.

Osajärjestelmien eriaikainen koestus olisi hyvä huomioida ajasta riippuvassa mallissa sen tarkkuuden lisäämiseksi ja sydänvauriotaajuuden vaihtelun vähentämiseksi. Kuitenkin osajärjestelmien eriaikaisen koestamisen huomioiminen mallissa aiheuttaa paljon työtä ja jonkin verran ongelmia muun muassa yhteisvikojen määrittelyssä.

7.2 Ennakkohuoltojen optimoinnin jatkokehitys

Työssä kehitetyn laitospalliin perusteella voidaan päätellä, että ennakkohuoltojen sijoittumisella tehoajajaksolla on vaikutus sydänvauriotaajuuteen. Tällöin ennakkohuoltojen ajankohdan optimoinnilla voitaisiin löytää turvallisuuden kannalta parempia huoltoajankotia. Tässä työssä on kehitetty laitospalliin sopiva optimointitehtävä. Optimointitehtävälle ei kuitenkaan ole kehitetty ratkaisualgoritmia tai -menetelmää, sillä pelkästään laitospalliin luominen täytti tämän pro gradu-tutkielman työmäärän. Kyseessä on kuitenkin helposti ratkaistavissa oleva lineaarinen sekalukutehtävä.

Ennakkohuoltojen ajankohdan optimointia on tutkittu sekä ydinvoimalalla, että muilla teollisuuden aloilla. Suurimmassa osassa tutkimuksia optimointitehtävän kohdefunktiossa on pyritty minimoimaan huoltojen kustannuksia. Tässä työssä muodostetussa optimointitehtävän kohdefunktiossa on huomioitu ainoastaan sydänvauriotaajuuden minimointi. Tämä tehtävä tulisi ratkaista ensi sijaisesti. Kustannusten minimointi olisi kuitenkin merkittävä tekijä, turvallisuuden lisäksi, ja olisi myös hyvä huomioida ennakkohuoltojen optimoinnissa. Ennakkohuoltojen ajankohdan optimoinnin lisäksi voitaisiin hyötyä ennakkohuoltopakettien sisältöjen ja niiden kestojen optimoinnista.

Kirjallisuutta

- [1] T. Almgren and N. Andréasson. Optimization models for improving periodic maintenance schedules by utilizing opportunities. *4th Production and Operations Management World Conference*, pages 1–10, 2012.
- [2] T. Almgren, M. Patriksson, and A. Wojciechowski. *The opportunistic replacement problem : analysis and case studies*. Preprint, Chalmers University of technology, University of Gothenburg, 2011.
- [3] R. Bari, A. Buslik, A. El-Bassioni, J. Fragoia, R. Hall, D. Ilberg, E. Lofgren, P. Samanta, T. Teichmann, W. Vesely, R. Youngblood, and I. Papazoglou. Probabilistic Safety Analysis Procedures Guide. page 217, 1984.
- [4] A. Y. Dvornikov, S. D. Martyanov, V. A. Ryabchenko, T. R. Eremina, A. V. Isaev, and D. V. Sein. Assessment of extreme hydrological conditions in the Bothnian Bay, Baltic Sea, and the impact of the nuclear power plant “ Hanhikivi-1 ” on the local thermal regime. Technical Report 2, Earth system dynamics, 2017.
- [5] J. Ervamaa, T. Mankamo, and J. Suokas. *Luotettavuustekniikka*. Insinööritieto Oy, Helsinki, 1979.
- [6] P. D. Ewing, R. A. Kisner, K. Korsah, M. R. Moore, J. B. Wilgen, and R. T. Wood. Technical Basis for Regulatory Guidance on Lightning Protection in Nuclear Power Plants. Technical report, 2005.
- [7] E. Gustavsson. Scheduling tamping operations on railway tracks using mixed integer linear programming. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 4:97–112, 2015.
- [8] R. Hämäläinen, U. Pulkkinen, and R. Karjalainen. *Riskianalyysi*. 1989.
- [9] M. Heinonen. *Vuosihuollon aikainen käyttöturvallisuus*. Master’s thesis, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2013.

- [10] Helsingin kaupunki. Meriveden lämpötila ja levämäärä, 2017. <https://www.hel.fi/helsinki/fi/asuminen-ja-ymparisto/luonto-ja-viheralueet/vedet/itameri/levatilanne> , 23.2.2018.
- [11] K.-s. Hsueh and A. Mosleh. The development and application of the accident dynamic simulator for dynamic probabilistic risk assessment of nuclear power plants. *Elsevier Science Limited*, 52:297–314, 1996.
- [12] Y. Hu. *A guided simulation methodology for dynamic probabilistic risk assessment of complex systems*. PhD thesis, University of Maryland, 2005.
- [13] Ilmatieteenlaitos. Itämeren jäätalvet. <http://ilmatieteenlaitos.fi/jaatalvet> , 09.04.2018.
- [14] Ilmatieteenlaitos. Sääsuureiden keskimääräiset arvot kuukausittain vyöhykkeillä I+II (Vantaa). Technical report.
- [15] Ilmatieteenlaitos. Ilmakehä-ABC: Huurre, 2017. http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc?p{_}p{_}id=abc{_}WAR{_}fmiwwportlets{\&}p{_}p{_}lifecycle=0{\&}p{_}p{_}state=normal{\&}p{_}p{_}mode=view{\&}p{_}p{_}col{_}id=column-2{\&}p{_}p{_}col{_}count=1{\&}{_}abc{_}WAR{_}fmiwwportlets{_}selectedInitial=H , 03.01.2018.
- [16] Ilmatieteenlaitos. Lumitilastot, 2017. <http://ilmatieteenlaitos.fi/lumitilastot> , 28.02.2018.
- [17] Ilmatieteenlaitos. Tuulitilastot, 2018. <http://ilmatieteenlaitos.fi/tuulitilastot> , 28.02.2018.
- [18] Inited States Nuclear Regulatory Commission U.S.NRC. Probabilistic Risk Assessment. Technical report, Inited States Nuclear Regulatory Commission U.S.NRC, 2016. <https://www.nrc.gov/> , 25.04.2018.

- [19] International Atomic Energy Agency IAEA. Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. Technical report, 2006.
- [20] K. Kamae. *Earthquakes, Tsunamis and Nuclear Risks*. Springer, 2016.
- [21] R. Kleinberg. *Ajasta riippuvien tekijöiden vaikutuksen arviointi todennäköisyypohjaisessa riskianalyysissä*. Master's thesis, Aalto-yliopisto, 2014.
- [22] J. Laitonen. *Todennäköisyypohjainen riskien seuranta ydinvoimalaitosten valvonnassa*. Master's thesis, Aalto-yliopisto, 2010.
- [23] A. Mäkelä, T. K. Laurila, and J. Haapalainen. Salamahavainnot 2015. Technical report, Ilmatieteenlaitos, Helsinki, 2015.
- [24] C. Marcelo and F. Lapa. A model for preventive maintenance planning by genetic algorithms based in cost and reliability. *Elsevier Science Limited*, 91:233–240, 2006.
- [25] J. Niinimäki. *Vesiviljely: kalat, äyriäiset, nilviäiset, levät*. 2015.
- [26] O. Nusbaumer. Introduction to Probabilistic Safety Assessments (PSA). Technical report, Leibstad NPP.
- [27] H. Nyrhinen. *Riskiteoria*. Luentomateriaali, Helsinki, 2009.
- [28] I. A. Papazoglou. Mathematical foundations of event trees. *Elsevier Science Limited*, 61:169–183, 1998.
- [29] V. Rintala. *Yhteisvikaparametrien määrittäminen*. Bachelor thesis, Lappeenranta teknillinen yliopisto, 2009.
- [30] Säteilyturvakeskus STUK. Ydinvoimalaitoksen järjestelmien suunnittelu. Technical Report 09, 2002.
- [31] Säteilyturvakeskus STUK. Todennäköisyypohjaiset turvallisuusanalyysit (PSA) ydinvoimalaitosturvallisuuden hallinnassa. Technical Report YVL 2.8, 2003.

- [32] Säteilyturvakeskus STUK. Turvallisuusperiaatteet ja ulkoiset uhat. Technical report, Säteilyturvakeskus STUK, 2011.
- [33] Säteilyturvakeskus STUK. Ydinvoimalaitoksen todennäköisyysperusteinen riskianalyysi ja riskien hallinta. Technical Report YVL A.7, 2013.
- [34] Säteilyturvakeskus STUK. National assessment report of Finland. Technical report, 2014.
- [35] Sisäinen TVO. Taustaselvitys riippuvuuksien käsittelystä. Technical report, 1987.
- [36] Sisäinen TVO. Ennakkohuoltopaketit tehoajon aikana. Technical report, 2010.
- [37] Sisäinen TVO. PRA osa 16 - Ulkoiset uhat. Technical report, 2016.
- [38] S. Sklet and V. Kirkkola. Onnettomuustutkinnan menetelmiä. Technical report, Turvatekniikan keskus, Helsinki, 2004.
- [39] T. Szikszai. Core damage risk indicators. Technical Report June, 1992.
- [40] I. N. T. Mätäsniemi, T. Tyrväinen, K. Björkman. *SAFIR2014 The Finnish Research Programme on Nuclear Power Plant Safety 2011 – 2014*. 2014.
- [41] H. Taattola. *Poisson-prosessit*. Master's thesis, University of Jyväskylä, 2015.
- [42] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Probabilistic Risk Assessment and Regulatory Decisionmaking: Some Frequently Asked Questions. Technical Report March, 2016. <https://www.nrc.gov/> , 23.2.2018.