

Riskitärkeysmittojen laskeminen skenaarioanalyysissä

Sami Härkönen

Perustieteiden korkeakoulu

Kandidaatintyö
Espoo 19.02.2021

Vastuupettaja

Prof. Ahti Salo

Työn ohjaaja

DI Juho Roponen

Copyright © 2021 Sami Härkönen

The document can be stored and made available to the public on the open internet pages of Aalto University.
All other rights are reserved.

Tekijä Sami Härkönen

Työn nimi Riskitärkeysmittojen laskeminen skenaarioanalyysissä

Koulutusohjelma Teknillinen fysiikka ja matematiikka

Pääaine Matematiikka ja systeemitieteet **Pääaineen koodi** SCI3029

Vastuunopettaja Prof. Ahti Salo

Työn ohjaaja DI Juho Roponen

Päivämäärä 19.02.2021

Sivumäärä 23

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Riskitärkeysmitat antavat hyödyllistä informaatiota komponenteista ja niiden tiloista, joilla on suurin merkitys systeemin toimintaan ja turvallisuuteen. Tässä työssä esitellään laajennuksia konventionaalisiin riskitärkeysmittoihin tarkastelemalla systeemeitä, joissa (i) komponenteilla voi olla useita erilaisia tiloja, (ii) systeemi kuvataan Bayes-verkolla ja (iii) systeemin kokonaistoimintaa kuvataan haittafunktiolla. Tämä toteutetaan skenaarioilla ja niiden avulla määritellyillä riskitärkeysmitoilla, joilla voidaan tarkastella yksittäisiä komponentteja tai niiden yhdistelmiä.

Tutkimuskohteena toimii maanpinnan lähellä oleva ydinjätevarasto, johon esiteltyjä menetelmiä sovelletaan. Tarkoituksena on tutkia, mitkä yksittäistekijät vaikuttavat eniten systeemin toimintaan. Lisäksi näytetään, miten skenaarioilla voidaan laajentaa konventionaaliset riskitärkeysmitat tutkimalla useita komponentteja yhtäaikaisesti sekä tarkastelemalla niiden yhteisvaikutuksia systeemin turvallisuuteen.

Avainsanat Riskitärkeysmitat, skenaarioanalyysi, Bayes-verkot, haittafunktio

Author Sami Härkönen

Title Measures of Risk Importance for Scenario Analysis

Degree programme Engineering Physics and Mathematics

Major Mathematics and Systems Sciences

Code of major SCI3029

Teacher in charge Prof. Ahti Salo

Advisor M.Sc. Juho Roponen

Date 19.02.2021

Number of pages 23

Language Finnish

Abstract

Risk importance measures provide useful information about system's components and their states, which have the most impact in the safety and the performance of the system. In this paper, we demonstrate extensions to conventional risk importance measures by examining systems in which (i) the components can have multiple states, (ii) the system is represented by Bayesian network, and (iii) the overall performance of the system is estimated with disutility function. We do this by presenting scenarios and associated risk importance measures which can be used to assess the safety impacts of individual components as well as combinations of multiple components and their states.

We consider near-surface nuclear waste repository as a case study. The objective is to show that scenarios can be used to find individual components which have the most impact to the safety of the system. Moreover, we display how scenarios and associated risk importance measures extend conventional risk importance measures by inspecting safety impacts of combinations of states for several components.

Keywords Risk importance measures, scenario analysis, Bayesian networks, disutility function

Sisällys

Tiivistelmä	3
Tiivistelmä (englanniksi)	4
Sisällys	5
1 Johdanto	6
2 Aikaisempi tutkimus	6
3 Menetelmät	7
3.1 Bayes-verkot	7
3.2 Skenaariot	9
3.3 Riskitärkeysmitat	10
3.4 Riskitärkeysmittojen laskeminen	14
4 Tutkimusongelma ja tulokset	15
4.1 Ydinjätevarasto maanpinnan lähellä	15
4.2 Tulokset	17
5 Yhteenveto	21

1 Johdanto

Teollisuudessa on paljon kompleksisia systeemeitä, joihin liittyy useita erilaisia riskejä, jotka eroavat esiintymistodennäköisyyksiltään ja seurauksiltaan. Toisaalta tieto siitä, että systeemiin liittyy riskejä ja haittoja ei kerro, miten niitä voidaan pienentää. Tämän vuoksi tarvitaan riskienhallintasuunnitelmia, joita tehdään riskianalyysien pohjalta. Täten tässä työssä keskitytään *riskitärkeysmittoihin*, jotka auttavat tunnistamaan merkittävimmät haittatekijät, joilla on suurin vaikutus systeemin toimintaan ja turvallisuuteen.

Riskien tärkeysmittoja on käytetty laajasti koherenteissa systeemeissä, joissa loogiset portit kuvaavat komponenttien binäärisiä tiloja (toimii/ei toimi) (Van der Borst ja Schoonakker, 2001). Myöhemmin riskien tärkeysmittoja on laajennettu systeemeihin, joissa komponenteilla voi olla useita eri tiloja, joiden riippuvuussuhteita kuvataan Bayes-verkolla, mutta systeemin kokonaistoiminta on esitetty yhä binäärisesti (Noroozian et al., 2018). Riskitärkeysmittojen laskemisessa on myös hyödynnetty VoI (Value of Information) käsitettä, missä systeemin toimintaa ei enää tarkastella binäärisesti vaan *hyötyfunktioilla*, johon vaikuttaa komponenttien eri tilojen seuraukset (Borgonovo ja Cillo, 2017; Insua et al., 2019).

Salo et al. (Käsikirjoitus) käyttävät menetelmiä, jotka yleistävät aikaisemmat lähestymistavat riskitärkeysmittojen laskemiseen, käyttämällä *skenaarioita*, jotka määrittellään systeemin komponenttien tilojen kokoelmana. Skenaarioissa käytetyt riskitärkeysmitat rinnastuvat yleisesti käytettäviin mittoihin, joissa systeemin komponenttien tilat koostuvat binäärisistä muuttujista. Skenaarioiden avulla määritettyjä mittoja voidaan myös käyttää tapauksissa, joissa analysoidaan systeemeitä, joissa (i) komponentilla voi olla useita tiloja, (ii) komponenttien loogiset ja todennäköisyyspohjaiset riippuvuudet kuvataan Bayes-verkolla, sekä (iii) systeemin tilojen seuraukset arvioidaan haittafunktioilla siten, että systeemin toimintaa ei enää tarkastella binäärisesti.

Tässä työssä esitellään (Salo et al., Käsikirjoitus) artikkelissa käytettyjä menetelmiä ja sovellamme niitä belgialaiseen ydinjätevarastoon, joka on maanpinnan lähellä. Ensiksi tutkimme yksittäisten komponenttien vaikutuksia systeemin turvallisuuteen, kuten konventionaalisissa lähestymistavoissa. Tämän jälkeen näytämme skenaarioiden potentiaalin tutkia useita komponentteja yhtäaikaisesti, mikä laajentaa tavanomaisen tavan analysoida systeemin toimintaa ja sen komponentteja.

Tämä artikkeli rakentuu seuraavasti. Luku 2 kertoo aikaisemmista lähestymistavoista. Luvussa 3 esitellään menetelmät, joilla ongelmaa lähestytään. Luvussa 4 määrittellään tutkimusongelma ja esitellään tulokset. Lopuksi luvussa 5 on yhteenveto työstä.

2 Aikaisempi tutkimus

Riskitärkeysmitat kehitettiin alun perin systeemeille, joissa riippuvuussuhteita kuvattiin Boolean logiikalla ja näin ollen komponenteilla, joiden tilat olivat binäärisiä. Komponentin tärkeys laskettiin sen mukaan kuinka paljon koko systeemin vikaan-

tumistodennäköisyys kasvaa tietyn komponentin vikaantumisen suhteen (Fussel, 1975). Myöhemmin riskitärkeysmitat otettiin käyttöön systeemeihin, joissa komponenteilla saattoi olla useita tiloja, jotka kuvastivat kyseisen komponentin eri asteista toimintaa/epäonnistumista (Levitin et al., 2003). Komponenttien riippuvuussuhteita alettiin myös kuvata Bayes-verkoilla eli todennäköisyyspohjaisesti loogisten porttien sijaan (Käki et al., 2015; Noroozian et al., 2018).

Monimutkaisia systeemeitä, jotka ovat riippuvaisia esimerkiksi ympäristö- tai inhimillisistä tekijöistä, on mahdotonta esittää systeemeillä, joissa komponenttien tiloja kuvataan binäärisesti, kuten toimii/ei toimi (tai minimisuoritustason yläpuolella/alapuolella) (Weber et al., 2012). Tällaisissa kompleksisissa systeemeissä on hankala tunnistaa, mitkä tilat ovat riskialttiita. Tästä johtuen uudenlaisia mittoja on kehitetty ottamaan huomioon komponenttien useat mahdolliset tilat (ks. esim. Ramirez-Marquez ja Coit, 2005; Ramirez-Marquez et al., 2006; Ramirez-Marquez ja Coit, 2007), mikä sallii myös epäkoherenttien systeemien tarkastelun (ks. esim. Beeson ja Andrews, 2003; Borgonovo, 2010; Borgonovo et al., 2016). Lisäksi komponenttien tärkeyttä on arvioitu myös niiden ylläpitokustannusten perusteella (Wu ja Coolen, 2013).

Yleisesti riskitärkeysmitoissa on oletettu, että parametrien arvot tunnetaan, kuten komponenttien vikaantumistodennäköisyydet. Lisäkehitystä on tapahtunut tällä tutkimuskentällä mallintamalla komponenttien mittoja epätarkalla informaatiolla, jolloin komponenttien vikaantumistodennäköisyyksiä ei tunneta etukäteen. (Aven ja Nokland, 2010; Borgonovo ja Smith, 2012) Systeemin turvallisuutta on sittemmin tarkasteltu määrittelemällä hyötyfunktio systeemin eri tilojen seurauksille vikaantumistodennäköisyyksien sijaan (Borgonovo ja Cillo, 2017).

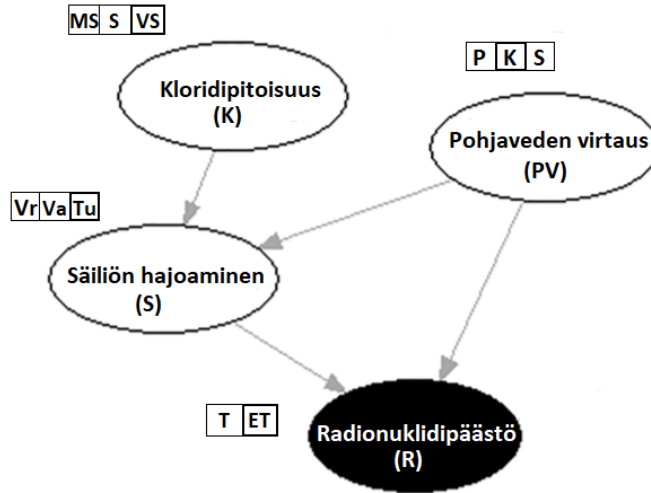
3 Menetelmät

3.1 Bayes-verkot

Bayes-verkko (Pearl ja Russell, 2003) $G = (V, E)$ on verkkotodennäköisyysmalli, jossa on joukko solmuja $V = \{i | i = 1, \dots, n\}$, joiden riippuvuussuhteita kuvataan suunnattujen kaarien joukolla $E = \{(j, i) | i, j \in V, i \neq j\}$. Verkon solmut $i \in V$ ovat satunnaismuuttujia X_i , joilla on vähintään kaksi erilaista tilaa. Solmun i mahdolliset tilat kuuluvat äärelliseen joukkoon ja tätä merkitään seuraavasti $s_i \in S_i$. Kuvasta 1 ja taulukosta 1 nähdään, esimerkiksi, että komponentilla *Säiliön hajoaminen* voi olla tilat "Vaurio", "Vakava" tai "Tuhoutunut".

Taulukko 1: Bayes-verkon tilat syvägeologiselle ydinjätevarastolle.

Solmu	Tilat
1. Kloridipitoisuus (K)	Mieto suolaliuos (MS), Suolaliuos (S), Väkevä suolaliuos (VS)
2. Pohjaveden virtaus (PV)	Pieni (P), Keskiverto (K), Suuri (S)
3. Säiliön hajoaminen (S)	Vaurio (Vr), Vakava (Va), Tuhoutunut (Tu)
4. Radionuklidipäästö (R)	Turvallinen (T), Ei turvallinen (ET)



Kuva 1: Havainnollistava Bayes-verkko syvägeologiselle ydinjätevarastolle (Tosoni et al., 2019). Tilojen lyhenteet on merkittynä taulukkoon 1.

Bayes-verkon suunnatut kaaret $(j, i) \in E$ kuvaavat siis riippuvuussuhteita satunnaismuuttujien X_j ja X_i välillä. Kaikkia solmuja $j \in V$ sanotaan solmun $i \in V$ vanhemmiksi, jos niistä tulee kaari siihen ja vastaavasti i on kaikkien vanhempiensa lapsi. Esimerkiksi, kuvassa 1 solmut *Kloridipitoisuus* ja *Pohjaveden virtaus* ovat solmun *Säiliön hajoaminen* vanhempia. Tällöin satunnaismuuttujan X_i tilat ovat ehdollisesti riippuvaisia kaikista sen vanhemmista ja niiden tiloista, ja näitä vanhempia merkitään seuraavasti $I(i) = \{j \in V | (j, i) \in E\}$. Verkossa on kahdenlaisia solmuja, joko ne ovat *lehtisolmuja* $V^L = \{i \in V | I(i) = \emptyset\}$ (kuvassa 1, *Kloridipitoisuus* ja *Pohjaveden virtaus*) tai *riippuvaisia solmuja* $V^P = \{i \in V | I(i) \neq \emptyset\}$ (kuvassa 1, *Säiliön hajoaminen* ja *Radionuklidipäästö*), jonka tilat $s_i \in S_i$ siis riippuvat sen vanhempiensa tiloista $s_j \in S_j$.

Käsitlemme tässä työssä ainoastaan yhtenäisiä Bayes-verkkoja, eli verkkoja, joissa jokaiselle solmu parille $i = v_1, j = v_m \in V$ löytyy sarja solmuja $(v_1, v_2, \dots, v_k, \dots, v_m)$, joita yhdistävät suunnatut kaaret seuraavasti $(v_k, v_{k+1}) \in E \vee (v_{k+1}, v_k) \in E, 1 \leq k \leq m - 1$. Oletamme, että verkoissa on vähintään $n \geq 2$ solmua sekä n suunnattua kaarta E siten, että jokaisesta solmusta $i \in V$ on polku tarkasteltavaan solmuun $u \in V$, jossa verkon seuraukset arvioidaan (kuvassa 1 *Radionuklidipäästö*). Lisäksi verkot ovat syklittömiä, mikä tarkoittaa sitä, että mistään solmusta ei ole polkua $(v_1, v_2, \dots, v_k, \dots, v_m)$, jossa $v_1 = v_m$ ja $(v_k, v_{k+1}) \in E, 1 \leq k \leq m - 1$. Tällöin solmut voidaan numeroida siten, että $j < i$ pätee kaikille $j \in I(i)$.

Verkossa polkua merkitään vektorilla $s = (s_1, \dots, s_n)$, jossa jokaiseen komponenttiin $i \in V$ liitetään tila $s_i \in S_i$. Selkeyden vuoksi käytämme tunnisteita esittämään komponentteja ja niiden tiloja, kuten kuvassa 1 tummennetut kehykset merkitsevät esimerkki polun $(K_{VS}, PV_K, S_{Tu}, R_{ET})$ Bayes-verkosta, missä isot kirjaimet ilmaise-

vat, mistä solmusta on kyse ja alaindeksi vastaavasti kertoo solmun tilan. Taulukosta 1 vastaavasti nähdään kaikkien solmujen ja niiden tilojen tunnisteiden merkitykset. Kaikkien polkujen joukko saadaan karteesisena tulona $S = \prod_{i \in V} S_i$, esimerkiksi kuvan 1 Bayes-verkossa kaikkia polkuja on yhteensä $|S| = 3^3 \times 2 = 54$. Täten jos meillä on jokin polku $s \in S$ ja joukko $I \subset V$ komponentteja kyseiseltä polulta, tällöin s_I on vektori, joka sisältää komponenttien tilat joukosta I . Jos I sisältää esimerkiksi polusta komponentin *Radionuklidipäästö* vanhemmat *Säiliön hajoaminen* ja *Pohjaveden virtaus*, niin tällöin merkitään $s_I = (S_{Tu}, PV_K)$, mikä ilmaisee, että *Säiliön hajoaminen* on tilassa "Tuhoutunut" ja *Pohjaveden virtaus* on tilassa "Keskiverto".

Lehtisolmujen V^L tilojen todennäköisyydet saadaan $p(s_i) = \mathbb{P}(X_i = s_i)$, kun taas muista *riippuvien solmujen* V^P tilojen todennäköisyydet saadaan ehdollisten todennäköisyyksien avulla $p(s_i|s_{I(i)}) = \mathbb{P}(X_i = s_i|X_j = s_j, j \in I(i))$. Täten polun s todennäköisyys saadaan seuraavasti (Pearl ja Russell, 2003)

$$p(s) = \prod_{i=1}^n p(s_i|s_{I(i)}), \quad (1)$$

missä $p(s_i|s_{I(i)}) = p(s_i)$ kaikille niille komponenteille i , joilla ei ole vanhempia, eli $I(i) = \emptyset$.

3.2 Skenaariot

Skenaario (Salo et al., Käsikirjoitus) \mathbb{S} määritellään potenssijoukon $\mathcal{P}(S)$ aitona osajoukkona, joka ei voi olla tyhjä joukko tai kaikkien polkujen joukko. Täten kaikkien skenaarioiden joukkoa merkitään seuraavasti $\mathbf{S} = \{\mathbb{S} \in \mathcal{P}(S) | \mathbb{S} \neq \emptyset, \mathbb{S} \neq S\}$. Riskiarvioinneissa voidaan keskittyä ainoastaan skenaarioihin, joiden todennäköisyys on positiivinen, toisin sanoen

$$\mathbf{S}^+ = \{\mathbb{S} \in \mathbf{S} | s \in \mathbb{S} \implies p(s_i) > 0, \text{ jos } I(i) = \emptyset \text{ ja } p(s_i|s_{I(i)}) > 0, \text{ jos } I(i) \neq \emptyset\}.$$

Yllä olevan skenaarioiden määritelmän ansiosta voimme tarkastella sekä yksittäisiä komponentteja, että loogisia ja todennäköisyyspohjaisia riippuvuussuhteita niiden välillä. Mikäli tarkastellaan yksittäisiä komponentteja ja niiden eri tilojen $S'_i \subsetneq S_i$ (missä \subsetneq tarkoittaa aitoa osajoukkoa) vaikutuksia, kutsutaan näitä *projisoiduksi* skenaarioksi $\mathbb{S}_{S'_i} = \{s \in S | s_i \in S'_i\}$ ja ne sisältävät kaikki polut, joissa i :nnen komponentin tila kuuluu joukkoon S'_i . Selkeyden vuoksi merkitsemme skenaariota komponentin tunnistekirjaimilla ja vastaavasti alaindeksillä merkitään mahdollisia tiloja skenaarioissa. Esimerkiksi jos palaamme taas kuvaan 1, missä skenaario $(K_S, PV_{K,S})$ muodostuisi kaikista niistä poluista, joissa *Kloridipitoisuus* olisi tilassa "Suolaliuos" ja *Pohjaveden virtaus* olisi joko "Keskiverto" tai "Suuri".

Bayes-verkossa seuraukset arvioidaan solmussa $u \in V$, jonka vanhemmat ovat $I(u) \subset V$. Seuraukset $c \in C$ mille tahansa polulle $s \in S$ saadaan funktiosta $X_u : S_{I(u)} \rightarrow C$ ja se on määritelty kaikille u :n vanhempien tilojen yhdistelmille. Käytämme reaaliarvoista haittafunktiota seurausten joukolle $\mathcal{U} : C \mapsto \mathbb{R}$, joka on normalisoitu välille $\mathcal{U}(c) \in [0, 1]$ positiivisten affiinikuvausten mukaisesti $\mathcal{U}'(c) =$

$\alpha\mathcal{U}(c) + \beta$, missä $\alpha > 0, \beta \in \mathbb{R}$. Normalisointi voidaan tehdä, sillä skaalaus ei muuta haittafunktion preferenssien järjestystä. Täten suotuisin seuraus saadaan, kun $\mathcal{U}(c_{min}) = 0$ ja vähiten suotuisa seuraus saadaan vastaavasti, kun $\mathcal{U}(c_{max}) = 1$. (Salo et al., Käsikirjoitus)

Täten saadaan haittafunktion odotusarvo skenaariolle S , mitä kutsutaan turvallisuusarvioinnissa *perustason riskiksi* (SRA, 2018).

$$E[\mathcal{U}] = \sum_{s \in S^+} p(s)\mathcal{U}[X_u(S_{I(u)})], \quad (2)$$

missä summa on kaikille poluille, joille pätee $S^+ = \{s \in S | p(s) > 0\}$. Oletamme, että $E[\mathcal{U}] > 0$ eli tällöin edes jollakin polulla haittafunktion arvo on suurempi kuin nolla. Muuten riskienhallintasuunnitelmia ei tarvittaisi lainkaan, koska systeemi saavuttaisi automaattisesti suotuisimman tilan (Salo et al., Käsikirjoitus).

Mikäli haluamme tarkastella, millä todennäköisyydellä systeemi toimii tai ei toimi, yhtälön 2 haittafunktio täytyy saattaa muotoon

$$\mathcal{U}[X_u(S_{I(u)})] = \begin{cases} 1, & X_u(S_{I(u)}) \in C^F \\ 0, & \text{muuten.} \end{cases} \quad (3)$$

missä joukko $C^F \subset C$ sisältää kaikki seuraukset, jotka rikkovat ennalta määrättyjä turvallisuusrajoja. Tällöin kaavan 3 haittafunktio poimii todennäköisyyden, jolla systeemissä esiintyy virhe.

3.3 Riskitärkeysmitat

Yhtälön 2 odotusarvoinen haitta voidaan ehdollistaa, joko esiintyvän skenaarion $\mathbb{S} \in \mathbf{S}^+$ tai sen komplementin suhteen $\bar{\mathbb{S}} = \{s \in \mathcal{P}(S) | s \notin \mathbb{S}\}$, missä skenaario \mathbb{S} ei esiinny. Täten vastaava riskitaso esiintyvän skenaarion \mathbb{S} suhteen on seuraava,

$$E[\mathcal{U}|\mathbb{S}] = \frac{\sum_{s \in \mathbb{S}} p(s)\mathcal{U}[X_u(S_{I(u)})]}{p(\mathbb{S})} \quad (4)$$

missä skenaarion \mathbb{S} todennäköisyys on $p(\mathbb{S}) = \sum_{s \in \mathbb{S}} p(s)$. Jos kaavan 4 odotusarvoisen haitan $E[\mathcal{U}|\mathbb{S}]$ arvo on suurempi kuin kaavan 2 perustason riski $E[\mathcal{U}]$, skenaarion \mathbb{S} sanotaan olevan riskialtis.

Kaavan 4 epähyöty voidaan siis myös ehdollistaa skenaarion \mathbb{S} komplementin suhteen, tällöin skenaarion ja sen komplementin yhdiste täyttävät koko perusjoukon ($\mathbb{S} \cup \bar{\mathbb{S}} = S$) ja ne ovat myös toistensa pois sulkevia tapahtumia ($\mathbb{S} \cap \bar{\mathbb{S}} = \emptyset$). Lisäksi, koska skenaariot ovat joukon $\mathcal{P}(S)$ aitoja epätyhjiä osajoukkoja, komplementti joukko $\bar{\mathbb{S}}$ on myös varmasti skenaario ja mikäli skenaariolle pätee $p(\mathbb{S}) < 1$, tällöin $\bar{\mathbb{S}} \in \mathbf{S}^+$, koska $p(\mathbb{S}) + p(\bar{\mathbb{S}}) = 1$.

Voimme määritellä ensimmäisen riskitärkeysmitan, *heikennyspotentiaali* (RAW, *risk achievement worth*),

$$\text{RAW}(\mathbb{S}) = \frac{E[\mathcal{U}|\mathbb{S}]}{E[\mathcal{U}]} \quad (5)$$

joka ilmaisee miten paljon suuremmaksi kokonaisriski kasvaa skenaarion \mathbb{S} toteutuessa. Yhtälö on hyvin määritelty, sillä nimittäjä, eli perustason riski on aina positiivinen.

Yhtälöstä voidaan päätellä, että jos RAW on suurempi kuin yksi, on skenaario \mathbb{S} riskialtis, koska tällöin odotusarvoinen haitta kasvaa skenaarion tapahtuessa.

Parannuspotentiaali (RRW, *risk reduction worth*)

$$\text{RRW}(\mathbb{S}) = \frac{\mathbb{E}[\mathcal{U}]}{\mathbb{E}[\mathcal{U}|\overline{\mathbb{S}}]} \quad (6)$$

kuvastaa miten paljon pienemmäksi kokonaisriski jää, jos skenaario \mathbb{S} eliminoidaan kokonaan pois. Täten, jos RRW on suurempi kuin yksi skenaariolle \mathbb{S} , niin tällöin odotusarvoinen epähyöty laskee ja kokonaisriski pienenee. Mikäli yllä olevan kaavan 6 nimittäjän $\mathbb{E}[\mathcal{U}|\overline{\mathbb{S}}]$ ehdollinen epähyöty on nolla, tällöin yhtälön suhde menee ääretömyyteen, mikä kertoo, että systeemi saavuttaisi suotuisimman tilansa sulkemalla skenaarion \mathbb{S} pois.

Birnbaum-tärkeysmita (BI, *Birnbaum importance measure*)

$$\text{BI}(\mathbb{S}) = \mathbb{E}[\mathcal{U}|\mathbb{S}] - \mathbb{E}[\mathcal{U}|\overline{\mathbb{S}}] \quad (7)$$

kertoo kuinka paljon kokonaisriski kasvaa silloin, jos skenaario \mathbb{S} toteutuu verrattuna siihen, kun se ei toteudu. Birnbaumin määritelmästä (Birnbaum, 1969), voidaan yhtälö 7 saada derivoimalla perustason riskiä skenaarion todennäköisyydellä, mikäli seuraavat ehdot pätevät $\mathbb{S} \in \mathbf{S}^+$ ja $p(\mathbb{S}) < 1$ (Salo et al., Käsikirjoitus).

Kriittinen tärkeys mitta (CI, *critical importance*)

$$\text{CI}(\mathbb{S}) = \frac{\mathbb{E}[\mathcal{U}|\mathbb{S}] - \mathbb{E}[\mathcal{U}|\overline{\mathbb{S}}]}{\mathbb{E}[\mathcal{U}]} p(\mathbb{S}) = \text{BI}(\mathbb{S}) \frac{p(\mathbb{S})}{\mathbb{E}[\mathcal{U}]} \quad (8)$$

ottaa huomioon myös perustason riskin sekä skenaario todennäköisyyden, toisin kuin Birnbaumin-tärkeysmita. Täten CI saadaan muokkaamalla kaavaa 7.

Viineiseksi *riskin osuus* (RS, *risk share*)

$$\text{RS}(\mathbb{S}) = \frac{\mathbb{E}[\mathcal{U}|\mathbb{S}]p(\mathbb{S})}{\mathbb{E}[\mathcal{U}]}, \quad (9)$$

mikä kuvastaa skenaarion \mathbb{S} osuutta perustason riskistä, joten $\text{RS}(\mathbb{S}) \in [0, 1]$. Lisäksi, jos $\mathbb{S}^i \in \mathbf{S}$, $i = 1, \dots, I$ ovat toistensa poissulkevia ja näiden skenaarioiden yhdisteet muodostavat koko perustason joukon, tällöin ne tuottavat osuuden kaikkien polkujen joukosta S siten, että $\mathbb{S}^i \cap \mathbb{S}^j = \emptyset$, $i \neq j$ ja $\cup_{i=1}^I \mathbb{S}^i = S$

$$\sum_{i=1}^I \text{RS}(\mathbb{S}^i) = 1. \quad (10)$$

Mikäli perustason riski määritellään kaavan 3 mukaan, haittafunktio saa arvon 1 ainoastaan poluilla, joille pätee $\mathbb{S}^F = \{s \in S | X_u(S_{I(u)}) \in C^F\}$. Tällöin riskin osuus $\text{RS}(\mathbb{S})$ voidaan saattaa muotoon

$$\text{RS}(\mathbb{S}) = \frac{p(\mathbb{S} \cap \mathbb{S}^F)}{p(\mathbb{S}^F)} = p(\mathbb{S}|\mathbb{S}^F), \quad (11)$$

mikä on skenaarion \mathbb{S} ehdollinen todennäköisyys systeemin voittumisen suhteen.

Seuraavaksi esitellään riippuvuussuhteita eri riskitärkeysmittojen välillä. Voidaan osoittaa, että CI, RAW ja RRW riskitärkeysmitat pystytään ilmaisemaan RS:n ja skenaariotodennäköisyyden $p(\mathbb{S})$ funktioina. Täten Birnbaumin-tärkeysmitta on ainoa, jota ei voida ilmaista näiden avulla. Näin ollen saadaan taulukon 2 mukaiset riippuvuussuhteet näiden neljän riskitärkeysmitan välille. Taulukossa neljä viimeistä saraketta on skenaariotodennäköisyyden $p := p(\mathbb{S})$ ja x :n funktioita, missä x ilmaisee minkä mitan suhteen arvo ratkaistaan (ensimmäinen sarake). Taulukosta 2 nähdään myös, että millä tahansa p :n arvolla kyseiset riskitärkeysmitat ovat toistensa käänteisfunktioita, esimerkiksi $\text{RAW}(\mathbb{S})^{-1} = x = p\text{RAW}(\mathbb{S}) = \text{RS}(\mathbb{S})$. Täten siis mille tahansa taulukon funktio parille $f_{(i,j)}(x)$ ja $f_{(j,i)}(x)$ pätee $f_{(i,j)}(f_{(j,i)}^{-1}(x)) = x$. (Salo et al., Käsikirjoitus)

Taulukon 2 riippuvuuksista voidaan havaita, että minkä tahansa riskitärkeysmitan nousu johtaa myös muiden mittojen kasvuun, sillä osittaisderivaatta x :n suhteen on positiivinen jokaiselle taulun elementille. Lisäksi, RRW(\mathbb{S}) ja CI(\mathbb{S}) ovat ainoat mitat, joiden välisissä riippuvuuksissa ei esiinny skenaarion todennäköisyyttä $p := p(\mathbb{S})$. (Salo et al., Käsikirjoitus)

Taulukko 2: Riskitärkeysmittojen ja skenaariotodennäköisyyden $p := p(\mathbb{S})$ väliset riippuvuudet (Salo et al., Käsikirjoitus)

x	RS(\mathbb{S})	RAW(\mathbb{S})	RRW(\mathbb{S})	CI(\mathbb{S})
RS(\mathbb{S})	x	$\frac{x}{p}$	$\frac{1-p}{1-x}$	$\frac{x-p}{1-p}$
RAW(\mathbb{S})	px	x	$\frac{1-p}{1-px}$	$\frac{p(x-1)}{1-p}$
RRW(\mathbb{S})	$\frac{x-(1-p)}{x}$	$\frac{x-(1-p)}{px}$	x	$\frac{x-1}{x}$
CI(\mathbb{S})	$p + x(1-p)$	$\frac{p+(1-p)x}{p}$	$\frac{1}{1-x}$	x

BI-mitta täytyy ilmaista hieman eri tavalla, sillä se on myös perustason riskin funktio, kuten alla olevasta kaavasta nähdään (Salo et al., Käsikirjoitus).

$$\text{BI}(\mathbb{S}) = E[\mathcal{U}] \frac{\text{RS}(\mathbb{S}) - p(\mathbb{S})}{p(\mathbb{S})(1 - p(\mathbb{S}))} \quad (12)$$

Alla olevista epäyhtälöistä 13-18 nähdään, miten riskimitoista voidaan tunnistaa riskialttiit skenaariot, joiden esiintyminen johtaa haitan odotusarvon suurentumiseen, mikäli $\mathbb{S} \in \mathbf{S}^+$ (Salo et al., Käsikirjoitus).

$$E[\mathcal{U}|\mathbb{S}] > E[\mathcal{U}] \Leftrightarrow \quad (13)$$

$$\text{RS}(\mathbb{S}) > p(\mathbb{S}) \Leftrightarrow \quad (14)$$

$$\text{RAW}(\mathbb{S}) > 1 \Leftrightarrow \quad (15)$$

$$\text{RRW}(\mathbb{S}) > 1 \Leftrightarrow \quad (16)$$

$$\text{BI}(\mathbb{S}) > 0 \Leftrightarrow \quad (17)$$

$$\text{CI}(\mathbb{S}) > 0 \quad (18)$$

Riskitärkeysmitat ottavat eri tavalla huomioon skenaarioiden todennäköisyyden ja haitan, minkä takia nämä riskimitat antavat usein eri painoarvon skenaariolle. Kuiten-

kin kaikilla mitoilla voidaan identifioida riskialttiita skenaarioita, kuten epäyhtälöistä 13-18 nähdään, mutta esimerkiksi suurella todennäköisyydellä esiintyvä skenaario ei välttämättä anna suurta arvoa RAW:lle (ellei niiden seurauksilla ole suurta haittaa), koska niiden esiintyminen ei vaikuta suuresti vallitsevaan tilaan. Toisaalta RRW voi olla suuri riskialttiille skenaariolle, jolla on suuri esiintymistodennäköisyys, koska tämän skenaarion pois sulkeminen vaikuttaisi suuresti perustason riskiin. Esimerkkinä voidaan tarkastella kuvan 1 Bayes-verkkoa ja tutkia projisoituja skenaarioita, jolloin huomataan, että skenaariot $\mathbb{S}^1 = (K_{Kv}, P_S)$ ja $\mathbb{S}^2 = (K_{Kv}, P_K)$ luokittelevat eri tavalla RAW:n ja RRW:n perusteella ($p(\mathbb{S}^1) \approx 0.02$, $RAW \approx 8$, $RRW \approx 1.10$ ja $p(\mathbb{S}^2) \approx 0.05$, $RAW \approx 2$, $RRW \approx 1.02$). (Salo et al., Käsikirjoitus)

Taulukko 2 havainnollistaa skenaariotodennäköisyyksien eri rooleja RS:n ja RAW:n mitoissa. RS:n arvo voi olla suuri skenaariolle, jotka eivät ole niin häiritseviä, mutta niiden korkea esiintymistodennäköisyys mahdollistaa silti niiden ilmaantumisen systeemin vikaantumisen yhteydessä. Tällaisilla skenaariolla ei taas ole suurta RAW:n arvoa. Toisaalta epätodennäköiset skenaariot, joilla voi olla kohtalokkaat seuraukset omaavat suuren RAW arvon, mutta tällöin pienen esiintymistodennäköisyyden seurauksena RS:n arvo on taas pieni. Tarkastelemalla yhtälön 12 nimittäjää voidaan havaita, että BI:n tärkeys korostuu skenaarioihin, joiden todennäköisyys joko lähenee 0:llaa tai 1:stä. (Salo et al., Käsikirjoitus)

Lopuksi tarkastellaan vielä muutamia mielenkiintoisia riskitärkeysmittojen ominaisuuksia. Esimerkiksi Salo et al. (Käsikirjoitus) näyttävät artikkelissaan, että jos skenaarioiden $\mathbb{S}^i \in \mathbf{S}^+$, $i = 1, \dots, I$ leikkaukset ovat tyhjiä $\mathbb{S}^i \cap \mathbb{S}^j = \emptyset$, $i \neq j$, niin tällöin näiden skenaarioiden yhdisteiden RAW:lle pätee.

$$RAW(\bigcup_i \mathbb{S}^i) = \frac{\sum_i p(\mathbb{S}^i) RAW(\mathbb{S}^i)}{\sum_i p(\mathbb{S}^i)} \quad (19)$$

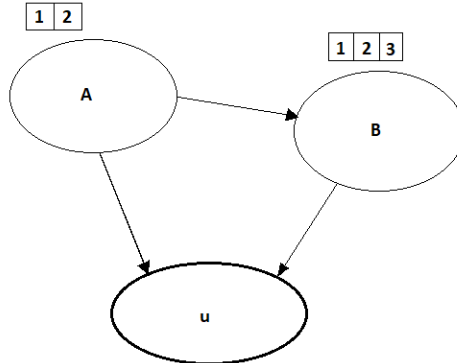
Mikäli skenaariot \mathbb{S}^i , $i = 1, \dots, I$ eivät ole ainoastaan toistensa poissulkevia, vaan myös niiden yhdisteille pätee $\bigcup_i \mathbb{S}^i = S$, tällöin kaava 19 tulee muotoon $RAW(\bigcup_i \mathbb{S}^i) = \sum_i p(\mathbb{S}^i) RAW(\mathbb{S}^i)$, koska $p(\bigcup_i \mathbb{S}^i) = 1$. Lisäksi Salo et al. (Käsikirjoitus) osoittavat, että RAW ja RS mitat ovat subadditiivisia, kuten kaavoista 20 ja 21 nähdään.

$$RAW(\mathbb{S}^1 \cup \mathbb{S}^2) \leq RAW(\mathbb{S}^1) + RAW(\mathbb{S}^2) \quad (20)$$

$$RS(\mathbb{S}^1 \cup \mathbb{S}^2) \leq RS(\mathbb{S}^1) + RS(\mathbb{S}^2). \quad (21)$$

Epäyhtälö 20 pätee, jos ja vain jos (i) toisen skenaarion RAW on nolla sekä, (ii) jos RAW on positiivinen skenaariolle, niin tällöin tämän skenaarion todennäköisyys on sama kuin skenaarioiden yhdisteiden todennäköisyys. Epäyhtälö 21 pätee ainoastaan, jos $E[\mathcal{U} | \mathbb{S}^1 \cap \mathbb{S}^2] = 0$.

Muille kappaleen 3.3 riskitärkeysmitoille ei päde subadditiivisuus. Oletetaan, että kuvan 2 Bayes-verkon poluilla (A_1, B_1) , (A_1, B_2) , (A_1, B_3) , (A_2, B_1) , (A_2, B_2) ja (A_2, B_3) on todennäköisyydet 0.075, 0.350, 0.075, 0.0545, 0.407 ja 0.0385 sekä vastaavasti seuraavat haitat 0, 0.8, 0.015, 0.1, 0.7 ja 1. Sitten tarkastellaan skenaarioita (A_1, B_2) , (A_2, B_2) ja niiden yhdistettä, josta muodostuu skenaario $(A_{1,2}, B_2)$. Taulukosta 3 nähdään, että subadditiivisuus ei päde mitoille RRW, BI ja CI, sillä edellä mainittujen skenaarioiden yhdiste $(A_{1,2}, B_2)$ on suurempi, kuin niiden yksittäisten skenaarioiden summa.



Kuva 2: Yksinkertainen Bayes-verkko, joka muodostuu kahdesta solmusta.

Taulukko 3: RRW, BI ja CI yksittäisille skenaarioille (A_1, B_2) , (A_2, B_2) ja niiden yhdisteelle $(A_{1,2}, B_2)$.

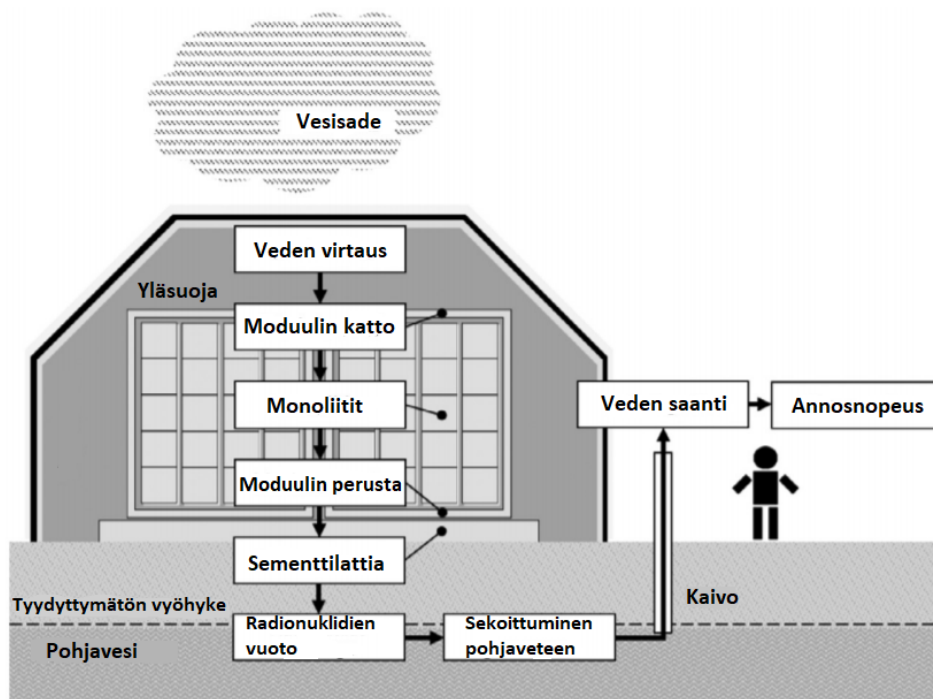
Mitta	(A_1, B_2)	(A_2, B_2)	$(A_{1,2}, B_2)$
RRW	1.202	1.113	3.288
BI	0.292	0.152	0.561
CI	0.168	0.101	0.696

3.4 Riskitärkeysmittojen laskeminen

Riskitärkeysmittojen laskeminen skenaarioiden avulla on haastavaa jo hyvin pienilläkin Bayes-verkoilla, sillä skenaarioiden määrä kasvaa erittäin nopeasti komponenttien ja niiden tilojen suhteen. Esimerkiksi jos systeemissä on viisi komponenttia, joista neljällä komponentilla on kolme tilaa ja yhdellä on kaksi tilaa, tällöin polkuja on $2 \times 3^4 = 162$, joista saadaan yhteensä $2^{162} - 2 \approx 5,8 \times 10^{48}$ eri skenaariota. Täten Bayes-verkkojen kasvaessa suuremmiksi on mahdotonta käydä kaikkia skenaarioita läpi. Siksi tarvitaan optimointimenetelmiä, joiden avulla voidaan tunnistaa riskitärkeysmitoiltaan suurimmat skenaariot. Kun riskiltään suurin skenaario on löydetty jollekin mitalle, voidaan käyttää taulun 2 relaatiota muiden mittojen selvittämiseksi. Usein kuitenkin tämä skenaario ei ole kaikille mitoille riskiltään suurin, sillä eri riskitärkeysmitat ottavat eri tavalla huomioon skenaariotodennäköisyyden ja riskin päivityksen riskin perustason riskiin nähden. Täten jokaiselle eri riskitärkeysmitalle voidaan formuloida erilaiset optimointimenetelmät hyödyntäen MILP-menetelmiä (mixed integer linear programming), kuten artikkelissa (Salo et al., Käsikirjoitus) on tehty.

4 Tutkimusongelma ja tulokset

4.1 Ydinjätevarasto maanpinnan lähellä



Kuva 3: Havainnollistava suunnitelma ydinjätevarastolle lähellä maanpintaa sekä ihmisen annostumismalli, kuva artikkelista ([Tosoni et al., 2020](#)).

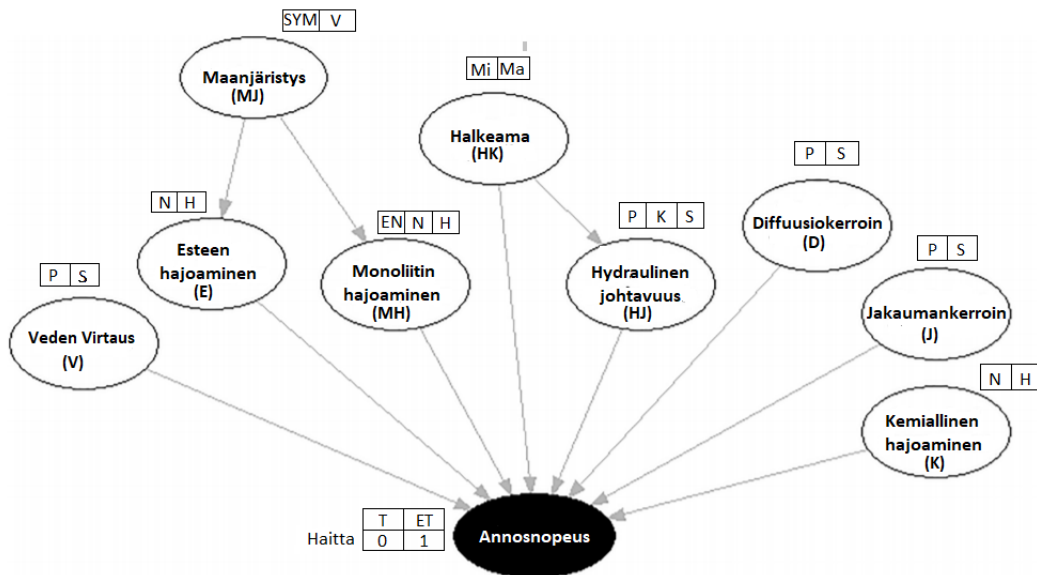
Tässä työssä tarkastellaan esimerkinomaisesti maanpinnan lähelle kehitteillä olevaa ydinjätevarastoa, jonka havainnollistus nähdään kuvasta 3. Ydinjäte varastoidaan betoniin *monoliitteihin* erilaisissa muodoissa. Monoliitit varastoidaan betoniin *moduuleihin*, jotka makaavat *hiekkasementtipenkin* päällä, mikä puolestaan on maan päällä. Nämä suojat lopulta peitetään betonisilla komponenteilla ja maaperällä. ([Tosoni et al., 2019](#))

Vaikka kuvan 3 ydinjätevarasto on suunniteltu estämään radioaktiivisen säteilyn pääsyn suojan ulkopuolelle, silti osa saattaa päästä ulos ajan kuluessa. Monet tekijät vaikuttavat radioaktiivisuuspäästöihin, mutta vesi on tämän prosessin suurin aiheuttaja, koska se voi tunkeutua päälikerroksen ja suojien läpi, mikä lopulta aiheuttaa ytimien vuodon. Lopulta saastunut vesi voi kulkeutua pohjaveteen, joka puolestaan voi päätyä ihmisille muun muassa kaivon kautta. Tuloksena on ajasta riippuvainen annosnopeus ihmisille [Sv y^{-1}]. ([Tosoni et al., 2019](#))

Tässä työssä hyödynnetään artikkeleita ([Tosoni et al., 2019, 2020](#)), joissa on määriteltynä Bayes-verkko kuvan 3 ydinjätevarastolle, todennäköisyydet kaikille systeemin komponenttien eri tiloille sekä ennalta määrätty turvallisuusraja *Annosnopeudel-*

le, jossa systeemin seuraukset arvioidaan. Kuvasta 4 voidaan nähdä Bayes-verkko kyseiselle ydinjätevarastolle ja taulukosta 4 vastaavasti nähdään kaikkien solmujen tilojen lyhenteiden merkitykset sekä tilojen todennäköisyydet p . Taulukon 4 toinen sarake kertoo onko komponentilla $i \in V$ vanhempia tai ei. Mikäli komponentilla on vanhempia, tällöin viimeiseen sarakkeeseen merkityt todennäköisyydet ovat ehdollisia todennäköisyyksiä $p = p(s_i | s_{I(i)})$. Esimerkiksi komponentin *Hydraulinen johtavuus* ylin rivi ilmaisee ehdollisen todennäköisyyden $p = p(HJ_P | HK_{Mi}) = 0.667$, kun taas komponentin *Halkeama* ylin rivi ilmaisee todennäköisyyden $p = p(HK_{Mi}) = 0.807$.

Artikkelin (Tosoni et al., 2020) taulukoissa 1,3 ja 14 esitellään tilojen yksiköt, tilojen diskretoinnit sekä oletukset, joita on käytetty taulukon 4 todennäköisyyksien laskemisessa. Esimerkiksi komponentin *Halkeama* tilojen yksikkönä käytetään μm , niiden tilat on diskretoitu siten, että "Mikro" kuuluu välille $[1,100]$ ja "Makro" välille $[100,300]$, täten koko väli on $[1,300]$. Tilojen todennäköisyydet saadaan vastaavasti, kun käytetään log-tasajakaumaa. Täten esimerkiksi tilan "Mikro" todennäköisyys on $p = \frac{\ln 100}{\ln 300} = 0.807$, kuten taulukosta 4 voidaan havaita.



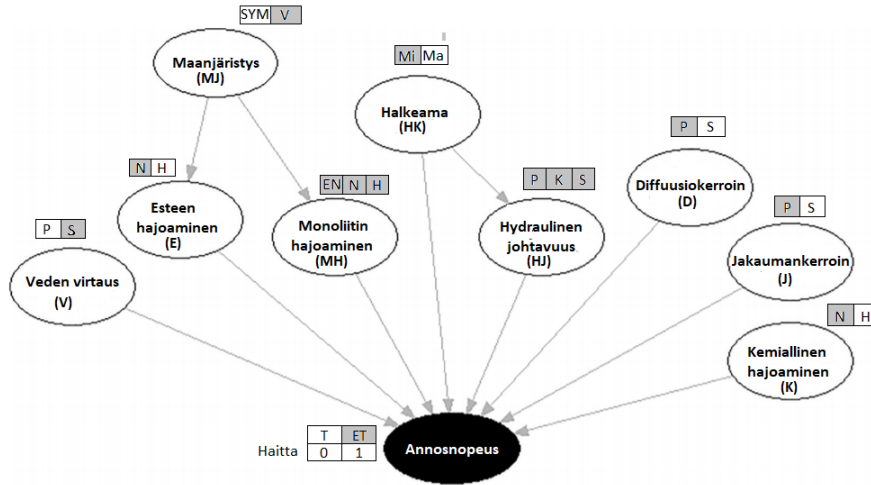
Kuva 4: Bayes-verkko maanpinnan lähellä olevalle ydinjätevarastolle (Tosoni et al., 2019). Tilamerkinnot ovat taulukossa 4

Taulukko 4: Kuvan 4 Bayes-verkon tilamerkinnot ja tilojen todennäköisyydet p (Tosoni et al., 2020).

Solmu	Vanhempi/Tilat	Tilat	p
1. Maanjäristys (MJ)		Suunnittelun ylittävä maanjäristys (SYM)	9.954E-01
		Valtava (V)	4.600E-03
2. Veden virtaus (V)		Pieni (P)	0.864
		Suuri (S)	0.136
3. Halkeama (HK)		Mikro (Mi)	0.807
		Makro (Ma)	0.193
4. Diffuusiokerroin (D)		Pieni (P)	0.5
		Suuri (S)	0.5
5. Jakaumankerroin (J)		Pieni (P)	0.5
		Suuri (S)	0.5
6. Kemiallinen hajoaminen (K)		Nopea (N)	0.5
		Hidas (H)	0.5
7. Esteen hajoaminen (E)	MJ/SYM	Nopea (N)	0.580
	MJ/SYM	Hidas (H)	0.942
	MJ/V	Nopea (N)	0.360
	MJ/V	Hidas (H)	0.640
8. Monoliitin hajoaminen (MH)	MJ/SYM	Erittäin nopea (EN)	0.295
	MJ/SYM	Nopea (N)	0.292
	MJ/SYM	Hidas (H)	0.413
	MJ/V	Erittäin nopea (EN)	0.295
	MJ/V	Nopea (N)	0.425
	MJ/V	Hidas (H)	0.280
9. Hydraulinen johtavuus (HJ)	HK/Mi	Pieni (P)	0.667
	HK/Mi	Keskiverto (K)	0.189
	HK/Mi	Suuri (S)	0.144
	HK/Ma	Pieni (P)	0.189
	HK/Ma	Keskiverto (K)	0.667
	HK/Ma	Suuri (S)	0.144

4.2 Tulokset

Aloitamme laskemalla perustason riskin ydinjätevarastolle. Systemin turvallisuutta tarkastellaan kuvan 4 Bayes-verkon alimmassa solmussa nimeltä *Annosnopeus*, joka voi olla joko tilassa "Turvallinen" tai "Ei turvallinen". *Annosnopeuden* tiloille määritellään haitat, missä turvallisen tilan haitan arvo on 0 ja vastaavasti ei turvallisen tilan haitan arvo 1. Tällöin ytimien vuoto ihmisille joko ylittää ennalta määritetyn turvallisen rajan tai ei. Täten käytämme kaavan 3 määritelmää laskemaan perustason riski, josta saadaan tulokseksi 0.1703 ja tämä kuvastaa "Ei Turvallisen" tilan kokonaistodennäköisyyttä. Seuraavaksi voidaan tarkastella systeemin yksittäisiä komponentteja $i \in V$ ja tunnistaa riskiltään suurimmat skenaariot (tai tilat) jokaiselta komponentilta erikseen. Esimerkiksi, *Hydraulisen johtavuuden* RAW maksimoidaan, kun komponentti on tilassa "Pieni" (tämä on projisoitu skenaario HJ_P , sillä solmun tila on spesifioitu riippumatta sen vanhemmista). Toisaalta "*Hydraulisen johtavuuden*" RRW maksimoidaan, kun sen tilat ovat joko "Pieni" tai "Suuri", mitä merkitään projisoituna skenaariona $HJ_{P,S}$. Tästä voidaan muun muassa havaita miten riskitärkeysmitat luokittelevat skenaarioita eri tavalla.



Kuva 5: Bayes-verkon (Tosoni et al., 2019) harmaalla merkityt tilat kuvastavat projisoituja skenaarioita, jotka aiheuttavat häiriön *Annosnopeudessa*. Tilamerkinnot ovat taulukossa 4.

Taulukkoon 5 on merkitty kaikkien solmujen projisoidut skenaariot (kuvassa 5 harmaalla merkityt tilat), jotka aiheuttavat häiriön *Annosnopeudessa* siten, että ytimien vuoto ylittää ennalta määrätyn turvallisen rajan, ja tällöin epäyhtälöiden 13-18 ehdot toteutuvat. Jokaiselle solmulle on laskettu kaikki kappaleessa 3.3 esitetyt riskitärkeysmitat siten, että ensiksi on selvitetty optimointimentelmillä kaikki RAW arvot, jotka nostavat haitan odotusarvoa ($RAW > 1$) ja tämän jälkeen kyseiselle skenaariolle \mathbb{S} on selvitetty taulukon 2 riippuvuuksien mukaisesti muut riskien tärkeysmitat, paitsi BI on laskettu kaavalla 12. Lisäksi, taulukkoon 5 on merkitty kaikkien skenaarioiden todennäköisyydet $p(\mathbb{S})$. Kaikkia taulukon 5 skenaarioita tulisi välttää, mutta tarkastellaan kolmea projisoitua skenaariota *Veden virtaus* "Suuri", *Halkeama* "Mikro" ja *Jakaumankerroin* "Pieni" (V_S , HK_{Mi} ja J_P), joihin tulisi erityisesti kiinnittää huomiota riskitärkeysmittojen perusteella, sillä jokainen näistä skenaaroista luokituu jonkun riskitärkeysmitan mukaan tärkeimmäksi.

Ydinjätevaraston merkittävin tekijä radioaktiivisten ydinten vuotamisessa on veden virtaus. Tämä voidaan havaita skenaariosta V_S , jolla on suurin *heikkennyspotentiaalin* arvo $RAW(V_S) = 2.1983$. Toisaalta V_S :n todennäköisyys on melko pieni $p(V_S) = 0.1359$, minkä takia sen muut riskitärkeysmitat eivät ole niin suuria BI:tä lukuunottamatta. Täten V_S luokituu RS:n mukaan vasta 11:sta tärkeimmäksi sekä kuudenneksi tärkeimmäksi RRW:n ja CI:n mukaan, mutta BI:n mukaan se on toiseksi tärkein skenaario. Skenaariot J_P ja HK_{Mi} ovat taas todennäköisyyksiltään paljon suurempia ($p(J_P) = 0.5$ ja $p(HK_{Mi}) = 0.8074$) kuin V_S . Täten niiden RS, RRW, ja CI mitat ovat huomattavasti suurempia. Skenaariolla J_P on kaikista suurin *parannuspotentiaali* $RRW(J_P) = 5.5819$, *kriittinen tärkeys* $CI(J_P) = 0.8209$ ja *Birnbaum-tärkeysmita* $BI(J_P) = 0.2796$ sekä toiseksi suurin RAW:n arvo 1.8209. Skenaariolla HK_{Mi} on taas kaikista suurin *riskin osuus* $RS(HK_{Mi}) = 0.9426$. Tämä on hyödyllinen mitta, sillä perustason riski on laskettu kaavan 3 mukaan, jolloin RS tulee kaavan 11 muotoon ($RS(HK_{Mi}) = P(HK_{Mi}|\mathbb{S}^F)$). Tämä kertoo skenaarion

ehdollisen todennäköisyyden systeemin vioittumisen suhteen. Täten, jos systeemissä on tapahtunut häiriö, on skenaario HK_{Mi} tapahtunut todennäköisimmin. Skenaario HK_{Mi} luokittuu RAW:n mukaan vasta kuudenneksi, mutta toiseksi tärkeimmäksi RRW:n ja CI:n mukaan sekä kolmanneksi tärkeimmäksi BI:n mukaan. Näiden tulosten perusteella riskienhallintasuunnitelmien tulisi keskittyä kaikkiin taulukon 5 skenaarioihin sekä erityisesti kolmeen edellä tutkittuun skenaarioon.

Taulukko 5: Systeemin kaikkien solmujen $i \in V$ projisoidut skenaariot $\mathbb{S}_{S'_i}$, jotka aiheuttavat "Ei Turvallisen" tilan *Annosnopeudessa*. Tilamerkinnot ovat taulukossa 4.

Solmu	S	$p(\mathbb{S})$	RAW(S)	RRW(S)	RS(S)	CI(S)	BI(S)
Maanjäristys	MJ_V	0.0046	1.1577	1.0007	0.0054	0.0007336	0.027
Veden virtaus	V_S	0.1359	2.1983	1.2323	0.2987	0.1885	0.2362
Halkeama	HK_{Mi}	0.8074	1.1675	3.3556	0.9426	0.702	0.1481
Diffuusiokerroin	D_P	0.5	1.0696	1.0748	0.5348	0.0696	0.0237
Jakaumankerroin	J_P	0.5	1.8209	5.5819	0.9104	0.8209	0.2796
Kemiallinen hajoaminen	K_N	0.5	1.019	1.0193	0.5095	0.019	0.0065
Esteen hajoaminen	E_N	0.0594	1.6724	1.0443	0.0993	0.0425	0.1217
Monoliitin hajoaminen	MH_H	0.4124	1.3804	1.3642	0.5693	0.267	0.1103
	$MH_{N,H}$	0.705	1.1743	1.7136	0.8278	0.4164	0.1006
	MH_{EN}	0.7074	1.0481	1.1316	0.7414	0.1163	0.028
Hydraulinen johtavuus	HJ_P	0.5749	1.0949	1.1472	0.6294	0.1283	0.038
	$HJ_{P,S}$	0.7191	1.0746	1.236	0.7727	0.191	0.0452
	$HJ_{P,K}$	0.8558	1.0011	1.0063	0.8567	0.0063	0.0013

Kaikki taulukon 5 projisoidut skenaariot edustavat konventionaalista lähestymistapaa, missä tutkitaan yhden komponentin vaikutusta systeemin toimintaan. Skenaarioiden riskitärkeysmitat tukevat kuitenkin myös laajempia analyysejä, joissa tarkastellaan useita komponentteja yhtäaikaaisesti. Usean komponentin yhdistelmiä on tässä systeemissä yhteensä 502 kappaletta (esimerkiksi kahden komponentin yhdistelmiä on 36, kolmen komponentin yhdistelmiä on 84 jne.). Tutkimme seuraavaksi yhtäaikaaisesti samaa kolmea komponenttia (V, HK ja J), joita tutkimme aikaisemmin yksi kerrallaan. Taulukosta 6 nähdään näiden kolmen komponentin kaikki skenaariot, jotka aiheuttavat häiriön systeemissä. Jokaiselle skenaariolle on jälleen laskettu kaikki riskitärkeysmitat, jotka toteuttavat epäyhtälöiden 13-18 ehdot. Skenaarioita on yhteensä kymmenen ja tutkimme niistä tarkemmin kolmea skenaariota, jotka on merkitty sinisellä ensimmäisessä sarakkeessa. Kaikki kymmenen skenaariota on järjestetty taulukkoon RAW:n arvojen mukaan, joten ensimmäisellä rivillä skenaariolla (V_S, HK_{Mi}, J_P) on suurin RAW:n arvo on 4.07356. Lisäksi sillä on myös suurin BI:n arvo 0.5583. Tällä skenaariolla on kuitenkin pieni esiintymistodennäköisyys 0.05487, jonka seurauksena esimerkiksi sen RRW:n arvo on melko pieni 1.2172. Suurin RRW:n arvo 5.58192 on skenaariolla ($V_{P,S}, HK_{Mi, Ma}, J_P$), joka luokittuu RAW:n mukaan vasta seitsemänneksi tärkeimmäksi. Tällä skenaariolla on myös suurin CI:n arvo 0.82085 ja toiseksi suurin RS:n arvo 0.91043 sekä esiintymistodennäköisyys 0.5. Skenaariolla ($V_{P,S}, HK_{Mi}, J_{P,S}$) on suurin esiintymistodennäköisyys 0.80739 ja RS:n arvo 0.9426, mutta luokittuu viimeiseksi RAW:n mukaan.

Taulukoista 5 ja 6 nähdään, kuinka skenaariot luokittelevat eri tavalla riskitärkeys-

mittojen perusteella. Lisäksi voidaan huomata, että mitä useampaa komponenttia tutkitaan yhtäaikaaisesti sitä enemmän riskialttiita skenaariota on. Koitimme myös tutkia yhtä neljän komponentin yhdistelmää, jolloin löytyi 100 riskialtista skenaariota. Kuitenkin riskitärkeysmitat antavat osviittaa siitä, mihin systeemin komponentteihin ja niiden tiloihin tulisi keskittyä enemmän, mikä helpottaa riskienhallintasuunnittelussa. Riskitärkeysmitat antavat siis informaatiota, kuinka paljon riski muuttuu, jos skenaario esiintyy tai se suljetaan kokonaan pois. Näiden perusteella voidaan tehdä korjaavia toimenpiteitä systeemissä muokkaamalla skenaarioiden esiintymistodennäköisyyksiä siten, että esimerkiksi skenaario, jolla on suuri todennäköisyys esiintyä eliminoidaan kokonaan pois tai vastaavasti voidaan pakottaa erittäin pienellä esiintymistodennäköisyydellä oleva skenaario tapahtumaan (Salo et al., Käsikirjoitus). Korjaavilla toimenpiteillä voidaan keskittyä *riskin välttämiseen* tai *riskin lieventämiseen* (SRA, 2018).

Riskin välttämällä tarkoitetaan, että pyritään estämään altistumista tuleville skenaarioille, joilla on suuri $E[\mathcal{U}|\mathcal{S}]$ arvo. Tällaisilla skenaariolla on yleensä pieni esiintymistodennäköisyys, mutta niiden tapahtuessa seuraukset saattavat olla kohtalokkaat. Täten pitäisi keskittyä skenaarioihin, joilla on suuri RAW:n arvo. Esimerkiksi, jos sulkisimme taulukon 5 skenaarion V_S , jolla on suurin RAW:n arvo 2.1983 laskisi perustason riski noin 19%.

Riskin lieventämisessä keskitytään skenaarioihin, jotka vaikuttavat enemmän perustason riskiin. Täten niiden seuraukset eivät välttämättä ole niin kohtalokkaita, mutta niillä on erittäin suuri todennäköisyys tapahtua. Tällöin on syytä poistaa skenaariot, joilla on suuri RRW:n arvo. Esimerkiksi jos estäisimme taulukon 5 skenaarion J_P , jolla on suurin RRW:n arvo 5.5819 laskisi perustason riski noin 82%. Lisäksi voidaan keskittyä skenaarioihin, joilla on suuri RS:n arvo, kuten taulukon 5 skenaariolla HK_{Mi} ($RS(HK_{Mi}) = 0.9426$). Jos sulkisimme tämän skenaarion pois, alenisi perustason riski noin 70%.

Taulukko 6: Kolmen komponentin yhdistelmän *Veden virtaus*, *Halkeama* ja *Jakamankerroin* projisoidut skenaariot, jotka aiheuttavat häiriön *Annosnopeudessa*. Punaisella on merkitty jokaisen sarakkeen suurimmat arvot ja sinisellä on merkitty niitä vastaavat skenaariot. Tilamerkinnot nähdään taulukosta 4.

Skenaario (S)	$p(S)$	RAW(S)	RRW(S)	RS(S)	CI(S)	BI(S)
(V_S, HK_{Mi}, J_P)	0.05487	4.07365	1.2172	0.22352	0.17844	0.5583
$(V_S, HK_{Mi, Ma}, J_P)$	0.06796	3.54423	1.22777	0.24087	0.18551	0.46487
$(V_S, HK_{Mi}, J_{P,S})$	0.10974	2.53253	1.23291	0.27792	0.18891	0.10974
$(V_S, HK_{Mi, Ma}, J_{P,S})$	0.13592	2.19826	1.23227	0.29879	0.18849	0.23616
$(V_{P,S}, HK_{Mi}, J_P)$	0.40369	2.14078	4.39172	0.86422	0.7723	0.32579
(V_P, HK_{Mi}, J_P)	0.34882	1.83673	1.81233	0.6407	0.44822	0.21883
$(V_{P,S}, HK_{Mi, Ma}, J_P)$	0.5	1.82085	5.58192	0.91043	0.82085	0.27958
$(V_P, HK_{Mi, Ma}, J_P)$	0.43204	1.54976	1.71879	0.66956	0.41819	0.16484
(V_S, HK_{Ma}, J_P)	0.01309	1.32499	1.00433	0.01734	0.00431	0.05608
$(V_{P,S}, HK_{Mi}, J_{P,S})$	0.80739	1.16747	3.35561	0.9426	0.70199	0.14807

5 Yhteenveto

Tässä työssä on tarkasteltu ydinjätevarastoa tutkimalla sen komponentteja ja niiden tiloja, jotka vaikuttavat eniten systeemin toimintaan ja turvallisuuteen. Aluksi esitelimme aikaisempia lähestymistapoja ja niiden rajoitteita vastaavaan ongelmaan. Näissä konventionaalisissa riskitärkeysmitoissa (i) komponenttien tilat yleensä luokitellaan onnistuneiksi ja epäonnistuneiksi (tai yli/ali jonkun suoritustason), (ii) keskitytään enimmäkseen yksittäisiin komponentteihin, eikä juurikaan niiden yhteisvaikutuksiin ja (iii) systeemin kokonaistoimintaa tarkastellaan binäärisesti, eli joko toiminta on onnistunut tai epäonnistunut.

Tämän työn motivaationa on ollut esitellä vaihtoehtoinen tapa laskea riskitärkeysmittoja, joilla päästään yli näistä rajoitteista. Olemme esittäneet skenaarioiden avulla useita laajennuksia konventionaalisiiin riskitärkeysmittoihin. Skenaariot määrittämään tilojen kombinaatioina Bayes-verkossa. Systeemin kokonaistoimintaa (turvallisuutta) tarkastellaan todennäköisyyspohjaisesti haittafunktion avulla, joka laajentaa tavanomaisen konventionaalisen tavan tulkita riskiä. Bayes-verkossa informaation muutos vaikuttaa lopputulokseen ja tässä skenaarion esiintyminen tai sen poissulkeminen muuttaa perustason riskiä. Olemme täten myös esittelleet riskitärkeysmittojen välisiä riippuvuussuhteita ja millaiseen järjestykseen ne asettavat riskiltään suurimmat skenaariot, koska esitetyt mitat ottavat eri tavalla huomioon nämä päivitettyt riskit ja skenaarioiden todennäköisyydet.

Käytimme esimerkkitapauksena maanpinnan lähellä olevaa ydinjätevarastoa, johon voi liittyä useita riskitekijöitä. Systeemiä kuvattiin Bayes-verkkona, jonka avulla laskimme skenaarioiden kautta määriteltäviä riskitärkeysmittoja. Aluksi näytimme konventionaalisen tavan lähestyä ongelmaa eli tutkimme kunkin komponentin yksittäisiä vaikutuksia systeemin turvallisuuteen. Tämän jälkeen näytimme, että skenaarioiden avulla on mahdollista tutkia useita komponentteja yhtäaikaaisesti ja selvittää näiden kombinaatioiden vaikutuksia systeemin toimintaan. Lisäksi skenaarioilla voitaisiin tutkia monimutkaisia systeemeitä, joissa toiminta riippuu esimerkiksi inhimillisistä tekijöistä. Tällöin binääriset komponentit ja niihin liittyvät riskitärkeysmitat eivät enää sovellu systeemin toiminnan kuvaamiseen.

Skenaarioiden määrä kasvaa suureksi jo hyvinkin pienillä Bayes-verkoilla ja riskiltään suurimpia skenaarioita on lähes mahdotonta löytää kullekin mitalle ilman optimointimenetelmiä. Täten jokaiselle mitalle voidaan formuloida omat MILP-ongelmat (mixed integer linear programming), joiden avulla voidaan tunnistaa riskiltään suurimmat skenaariot kaikille eri mitoille. Kuitenkin haasteena on edelleen, mitä komponenttiyhdistelmiä tutkia. Esimerkiksi tutkimassamme systeemissä on yhteensä 502 komponentti yhdistelmää (esimerkiksi neljän komponentin yhdistelmiä on 126). Lisäksi, mitä monimutkaisempia komponenttiyhdistelmiä tutkitaan, niin sitä enemmän riskialttiita skenaarioita löydetään sekä tietokoneen ajoajat kasvavat huomattavasti suuremmiksi. Esimerkiksi kun käytössämme oli neliytiminen prosessori, jonka kellotaajuus oli 1.8 GHz, niin kolmen komponentin yhdistelmälle löytyi 10 riskialtista skenaariota 15 sekunnissa ja neljän komponentin yhdistelmälle löytyi 100 riskialtista skenaariota 37 minuutissa. Sen sijaan viiden komponentin yhdistelmän ajoaika oli yli 12 tuntia, jonka jälkeen ohjelma kaatui. Täten suurien skenaarioiden

tutkiminen edellyttäisi suurempaa laskennallista tehoa.

Yhteenvedona voidaan todeta, että skenaarioiden riskitärkeysmitat laajentavat konventionaaliset mitat, jotka eivät mahdollista monimutkaisten systeemien tutkimista sekä useiden komponenttien yhteisvaikutusten ja riippuvuuksien analysoimista yhtäaikaaisesti. Täten joitakin riskejä voi jäädä huomioimatta, jos emme hyödyntäisi skenaarioita. Riskienhallinta- ja turvallisuuskriittisten järjestelmien suunnitteluun voidaan siis tuoda hyödyllisiä näkemyksiä laskemalla riskitärkeysmittoja erilaisille skenaarioille.

Viitteet

- T. Aven ja T. Nokland. On the use of uncertainty importance measures in reliability and risk analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, (95(2)):127–133, 2010.
- S. Beeson ja J.D. Andrews. Importance measures for noncoherent-system analysis. *IEEE Transactions on Reliability*, 52(3):301–310, 2003.
- L. Birnbaum. On the importance of different elements in a multi-element system. *Multivariate analysis*, (2):1–15, 1969.
- E. Borgonovo. The reliability importance of components and prime implicants in coherent and non-coherent systems including total-order interactions. *European Journal of Operational Research*, 204(3):485–495, 2010.
- E. Borgonovo ja A. Cillo. Deciding with thresholds: Importance measures and value of information. *Risk Analysis*, 37:1828–1848, 2017.
- E. Borgonovo ja C.L. Smith. Composite multilinearity, epistemic uncertainty and risk achievement worth. *European Journal of Operational Research*, 222:301–311, 2012.
- E. Borgonovo, H. Aliee, M. Glaß, ja J. Teich. A new time-independent reliability importance measure. *European Journal of Operational Research*, 254(2):427–442, 2016.
- J. Fussel. How to hand-calculate system reliability and safety characteristics. *IEEE Transactions on Reliability*, 24(3):169–174, 1975.
- D.R. Insua, F. Ruggeri, R. Soyer, ja S. Wilson. Advances in Bayesian decision making in reliability. *European Journal of Operational Research*, 282(1):1–18, 2019.
- A. Käksi, A. Salo, ja S. Talluri. Disruptions in supply networks: A probabilistic risk assessment approach. *Journal of Business Logistics*, 36(3):273–287, 2015.
- G. Levitin, L. Podofillini, ja E. Zio. Generalised importance measures for multi-state elements based on performance level restrictions. *Reliability Engineering & System Safety*, 82(3):287–298, 2003.

- A. Noroozian, R. Kazemzadeh, S. Niaki, ja E. Zio. System risk importance analysis using Bayesian networks. *International Journal of Reliability Quality and Safety Engineering*, 25:1850004 (26 s.), 2018.
- J. Pearl ja S. Russell. Bayesian networks. Teoksessa *Handbook of brain theory and neural networks*, ss. 157–160. MIT Press, 2. painos, 2003.
- J.E. Ramirez-Marquez ja D.W. Coit. Composite importance measures for multi-state systems with multi-state components. *IEEE Transactions on Reliability*, 54(3): 517–529, 2005.
- J.E. Ramirez-Marquez ja D.W. Coit. Multi-state component criticality analysis for reliability improvement in multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(12):1608–1619, 2007.
- J.E. Ramirez-Marquez, C.M. Rocco, B.A. Gebre, D.W. Coit, ja M. Tortorella. New insights on multi-state component criticality and importance. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(8):894–904, 2006.
- A. Salo, E. Tosoni, ja E. Zio. Measures of risk importance for probabilistic scenario analysis. Käsikirjoitus.
- SRA. *Society for Risk Analysis Glossary*. (Tech. Rep.). Society for Risk Analysis, 2018.
- E. Tosoni, A. Salo, J. Govaerts, ja E. Zio. Comprehensiveness of scenarios in the safety assessment of nuclear waste repositories. *Reliability Engineering & System Safety*, 188:561–573, 2019.
- E. Tosoni, A. Salo, J. Govaerts, ja E. Zio. Definition of the data for comprehensiveness in scenario analysis of near-surface nuclear waste repositories. *Data in Brief*, 31: 105780, 2020.
- M. Van der Borst ja H. Schoonakker. An overview of PSA importance measures. *Reliability Engineering & System Safety*, 72(3):241–245, 2001.
- P. Weber, G. Medina-Oliva, C. Simon, ja B. Iung. Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(4):671–682, 2012.
- S. Wu ja F.P.A. Coolen. A cost-based importance measure for system components: An extension of the Birnbaum importance. *European Journal of Operational Research*, 225(1):189–195, 2013.