

## TIIVISTELMÄRAPORTTI

# SKENAARIOT TEKNOLOGIAMURROSTEN ENNAKOINNISSA JA HALLINNASSA

**Ahti Salo ja Juho Roponen**  
Aalto-yliopiston matematiikan ja systeemianalyysin laitos  
Systeemianalyysin laboratorio

### Tiivistelmä

Systemaattinen ennakointityö on tärkeä osa maanpuolustuksen suunnittelua. Monien strategisesti merkittävien päätösten onnistuminen riippuu ratkaisevasti siitä, miten hyvää ennakointitietoa niiden tueksi pystytään tuomaan ja kuinka olennaiset epävarmuudet on onnistuttu huomioimaan. Uusien teknologioiden kehittymiseen ja käyttöönottoon liittyy paljon epävarmuutta, sekä puolustusorganisaatioissa että yhteiskunnassa laajemmin. Usein ainoa soveltuva tapa näiden epävarmojen kehityskulkujen ennakointiin on kerätä tietoa alan johtavilta asiantuntijoilta. Systemaattinen ennakointityö kuitenkin vaatii myös tiedon jäsentelyä ja jalostamista helpommin käsiteltävään ja ymmärrettävään muotoon. Skenaarioanalyysi on yksi yleisimmistä käytetyistä metodologioista tulevaisuuden ennakoinnissa, ja tässä tutkimushankkeessa keskityttiin kehittämään uusia matemaattisia skenaariomenetelmiä tulevaisuuteen liittyvien epävarmuuksien todennäköisyyksien arvioimiseksi. Kehitettyjä menetelmiä sovellettiin arvioimaan 3D-tulostuksen kehityksen vaikutuksiin Suomen Puolustusvoimiin.

### 1 Johdanto

Maanpuolustuksen suunnittelua tukeva systemaattinen ennakointityö muodostaa merkittävän osan puolustustutkimuksesta. Monien strategisesti merkittävien päätösten (kuten esimerkiksi puolustustarvikehankintojen tekeminen ja järjestelmien kyvykkyyksien rakentaminen) onnistuminen riippuu ratkaisevasti siitä, miten hyvää ennakointitietoa niiden tueksi pystytään tuomaan ja kuinka olennaiset epävarmuudet on onnistuttu huomioimaan.

Erityisesti uusien teknologioiden kehittymiseen ja käyttöönottoon liittyy paljon epävarmuutta sekä puolustusjärjestelmän sisällä että yhteiskunnassa laajemminkin. Tällöin on tärkeää tarkastella myös siviilipuolen kehitystä, koska osa sen suorituskyvyistä voidaan valjastaa maanpuolustuskäyttöön poikkeusoloissa, joissa maanpuolustusta ympäröivän yhteiskunnan kriittiset toiminnot ja infrastruktuurit tulee turvata. Huomiota tulee kiinnittää etenkin nk. disruptiivisiin teknologioihin, jotka mullistavat vallitsevia toimintamalleja ja antavat edellytyksiä uusille kyvykkyyksille, mutta saattavat viedä pohjan aiemmin tärkeinä pidetyiltä kyvykkyyksiltä.

Laajasta ennakointimenetelmien kirjosta skenaarioanalyysi soveltuu hyvin tilanteisiin, joissa on merkittäviä epävarmuuksia ja joissa varauduttava siihen, että mikä tahansa useista erilaisista vaihtoehtoisista tulevaisuuksista kuvaavista skenaarioista voi toteutua (ks. esim. Bunn ja Salo, 1993; Cho ja Daim, 2013; Porter et al., 2004). Yksittäiset skenaariot voidaan tyypillisesti jäsentää yhdistelminä tunnistettujen epävarmuustekijöiden vaihtoehtoisista toteutumista, joita voivat olla esimerkiksi poliittiset päätökset, teknologiset läpimurrot tai jopa luonnonmullistukset. Skenaarioanalyysissä pyrkimyksenä ei ole tulevaisuuden ennustaminen vaan vaihtoehtoisten kehityskulkujen hahmottaminen, mikä luo pohjaa varautumis- ja suunnittelutoiminnalle.

Yksi skenaarioanalyysin haasteista on erilaisten skenaarioiden lukumäärän eksponentiaalinen

kasvu, kun epävarmuustekijöiden ja niiden vaihtoehtoisten toteutumien lukumäärä kasvaa. Jos tarkastellaan 10 epävarmuustekijää, joista kukin voi joko toteutua tai olla toteutumatta, yhdistelmistä on rakennettavissa  $2^{10} = 1024$  skenaariota; ja jos vaihtoehtoisia tulemia on kahden sijasta neljä, niin erilaisia skenaarioita on jo  $4^{10}$  eli enemmän kuin miljoona. Tällaisen määrän systemaattisessa analysoinnissa tarvitaan vahvaa menetelmätukea, joka auttaa tunnistamaan ja valitsemaan relevantteimmat skenaariot esimerkiksi sillä perusteella, että skenaariot ovat sisällöltään johdonmukaisia ja kuvaavat tulevaisuutta tarpeeksi kattavasti.

Tässä tutkimushankkeessa kehitettiin uusi ristivaikutusanalyysiin pohjaava menetelmä suuren skenaariojoukon todennäköisyyksien arvioimiseksi. Ristivaikutusanalyysi perustuu epävarmuustekijöiden pareittaisten riippuvuuksien tunnistamiseen ja vertailuun. Tässä tutkimushankkeessa kehitettiin matemaattinen menetelmä, jolla näistä pareittaisista arvioista pystytään tuottamaan yhteistodennäköisyysjakauma koko skenaariojoukolle näin mahdollistaen mm. erilaisten riskianalysimenetelmien soveltamisen skenaarioanalyysin tueksi. Menetelmällä on myös mahdollista tuottaa skenaarioita kuvaava Bayes-verkko, jonka avulla on mahdollista suorittaa mitä-jos-tyyppisiä tarkasteluita erilaisten tulevaisuuden kehityskulkujen tutkimiseksi.

Kehitettyjä menetelmiä sovellettiin 3D-tulostamisen (sekä yleisemmin ottaen nk. materiaalia lisäävä valmistus) kehityksen ennakointiin, koska näillä näkymin se tulee olemaan puolustusvoimien kannalta yksi merkittävimmistä disruptiivisista teknologioista. Sillä on laajakantoista vaikutuksia, jotka yltyvät puolustusjärjestelmän komponenttien saatavuuden turvaamisesta ulkomaisen tuonnin korvaamiseen kotimaisella tuotannolla. Sen suorituskyvyn kehitykseen sekä uusiin sovellusmahdollisuuksiin liittyy kuitenkin isoja epävarmuuksia. Näitä epävarmuuksia pitää tarkastella systemaattisesti, jotta tämän teknologian mahdollisuudet voidaan hyödyntää puolustusjärjestelmän, huoltovarmuuden ja yhteiskunnan toimintakyvyn varmistamiseksi poikkeusolosuhteissa.

## 2 Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimussuunnitelmassa hankkeelle asetettiin tavoitteeksi (i) tuottaa perusteltu ja näkemyksellinen katsaus niihin eri menetelmiin, jotka tukevat 3D-tulostamisen kaltaisten teknologiamurrosten ja niiden vaikutusten ennakointia; (ii) kehittää murrosten ymmärtämisen ja hyödyntämisen tueksi todennäköisyyspohjaisia skenaariomenetelmiä, joilla keskeisimmät epävarmuustekijät, näiden väliset keskinäisriippuvuudet sekä murrosten vaikutukset voidaan arvioida, sekä (iii) tuottaa yhteistyössä puolustusvoimien asiantuntijoiden perusteltuja tarkasteluja. Vaikka esimerkkitarkastelun kohteeksi valitaan 3D-tulostus, menetelmäkehitystyö toteutetaan generisenä niin, että sen tulokset ovat eri teknologioihin sovellettavissa.

Uusina menetelmällisinä avauksina tutkimuksessa ovat:

1. Teknologia-disruptioon liittyvien syy-seuraus-suhteiden ja kehitysvaiheiden jäsentäminen Bayes-verkkona, jonka avulla voidaan kuvata sekä teknologisen suorituskyvyn kehittymisen dynamiikkaa että tämän kehityksen tuomia uusia sovellusmahdollisuuksia.
2. Niiden resurssipäätösten tukeminen, joita teknologiseen disruptioon varautuminen ja sen hyödyntäminen esimerkiksi kapasiteetin rakentamiseksi edellyttävät.
3. Skenaariotarkastelujen tukeminen siten, että suuresta joukosta potentiaalisia skenaarioita voidaan tunnistaa ne, joihin liittyy suurimpia mahdollisuuksia tai uhkia.

Konkreettisenä tuloksena hanke tuotti tietoa siitä, mitä 3D-tulostaminen merkitsee yhtäältä huoltovarmuuden ja toisaalta puolustusvoimien kyvykkyyksien vahvistamisen kannalta.

### 3 Aineisto ja menetelmät

Ristivaikutusanalyysi on skenaariomenetelmien kenttä, jonka historia juontaa aina 1950-luvulle asti. Menetelmille kuitenkin on yhteistä lähinnä ainoastaan keskittyminen epävarmuustekijöiden pareittaisiin riippuvuuksiin ja muilta osin ne eroavat toisistaan huomattavasti. Näin ollen keskitymme tässä raportissa ainoastaan hankkeessa kehitettyihin menetelmiin.

Seuraamme skenaarioiden matemaattisessa määrittelyssä Salo et al. (2022) esittelemää notaatiota, jossa skenaario määritellään epävarmuustekijöiden tilojen muodostamana vektorina  $\mathbf{s}=(s_1, s_2, \dots, s_N)$ , jossa on  $s_i$  on  $i$ :nnten epävarmuustekijän tila skenaariossa. Epävarmuustekijöitä käsitellään diskreetteinä satunnaismuuttujina  $X^i$ , joiden yhteistodennäköisyysjakauma ratkaisemalla saadaan tietää niiden yhdistelminä muodostettujen skenaarioiden todennäköisyydet.

Yhteistodennäköisyysjakaumaa arvioidaan epävarmuustekijöiden marginaalitodennäköisyyksien (tilojen todennäköisyydet, kun muiden epävarmuustekijöiden tiloja tai toteutunutta skenaariota ei tunneta) ja tekijöiden välisten ristivaikutusten avulla. Ristivaikutuksia mitataan nk. ristivaikutuskertoimen avulla, joka on määritelty

$$C_{ij}^{kl} = P(X^i = k \text{ ja } X^j = l) / (P(X^i = k)P(X^j = l)),$$

eli ne kuvaavat kuinka moninkertaiseksi tapahtuman "epävarmuustekijä  $X^i$  on tilassa  $k$ " todennäköisyys kasvaa, kun tiedetään, että "epävarmuustekijä  $X^j$  on tilassa  $l$ ". Ristivaikutuskertoimet ovat näin määriteltyinä symmetrisiä, eli tapahtuman A ristivaikutuskerron tapahtuman B kanssa on sama kuin B:n kerroin A:n kanssa.

		A. Tuotannon laajuus maailmalla	C2. Tekniikan kehittyminen nopeus	C1. Tekniikan kehittyminen kustannukset	
-3	Alenee kolmasosaan				
-2	Alenee puoleen				
-1	Alenee kahteen kolmasosaan				
0	Pysyy samana				
1	Kasvaa puolitoistakertaiseksi	Kasvu hidastuu	korkeintaan 2x	korkeintaan 2x	
2	Kasvaa kaksinkertaiseksi	Jatkuu nykyisenä	korkeintaan 10x	korkeintaan kymmenesosaan	
3	Kasvaa kolminkertaiseksi	Kasvu kiihtyy	yli 10x	alle kymmenesosaan	
A. Tuotannon laajuus maailmalla	0,3	Kasvu hidastuu	<b>2</b>	<b>-2</b>	<b>2</b> <b>-2</b>
	0,5	Jatkuu nykyisenä	<b>2</b>		<b>2</b>
	0,2	Kasvu kiihtyy	<b>-2</b>	<b>3</b>	<b>-2</b> <b>3</b>
C2. Tekniikan kehittyminen nopeus	0,4	korkeintaan 2x			<b>1</b> <b>-1</b> <b>-1</b>
	0,5	korkeintaan 10x			<b>-1</b> <b>1</b>
	0,1	yli 10x			<b>-1</b> <b>1</b>

#### Kuva 1: Ristivaikutusmatriisi

Ristivaikutuskertoimet määritetään asiantuntijoilta ristivaikutusmatriisiin kerättävien ristivaikutusarvioiden perusteella. Kuvassa 1 näkyy pieni osa 3D-tulostukseen keskittyvän esimerkkitarjunnan ristivaikutuksista. Matriisissa näkyvät numerot kertovat, kuinka paljon asiantuntijat odottavat eri tilojen todennäköisyyksien muuttuvan, kun tiedetään, että toinen epävarmuustekijä saavuttaa tietyn tilan. Esimerkiksi sinisellä väritetty solu kuvaa sitä, että 3D-tulostustuotannon kasvun maailmalla jatkuessa nykyisenkaltaisena voidaan odottaa tulostusnopeuden kehittyvän 2-10 kertaa nykyistä nopeammaksi. Koska ristivaikutukset ovat symmetrisiä, sama pätee myös kääntäen, eli 2-10ertainen tulostusnopeus lisää nykyisenlaisen kasvun todennäköisyyden n. kaksinkertaiseksi. Tämä kuitenkin on arviona ongelmallinen, koska kummallekin näistä epävarmuustekijöiden tiloista on arvioitu marginaalitodennäköisyydeksi 0,5, kuten kuvassa punaisella väritetystä sarakkeesta nähdään. Tuon todennäköisyyden kak-

sinkertaistaminen kuvaisi varmaa tapahtumaa, mutta tämä ei luonnollisestikaan voi olla oikein.

Ongelma ei tässä yhteydessä pelkästään edes ole, että asiantuntijat ovat antaneet "väärän" ristivaikutus- tai todennäköisyysarvion. Itse asiassa ristivaikutusarvioiden antaminen suurelle määrälle epävarmuustekijöitä on äärimmäisen vaikeaa, jos vaaditaan, että arvioiden tulee täyttää kaikki todennäköisyyslaskennan lainalaisuudet, ja se ei käytännössä onnistu ilman tietokoneavustusta. Tästä syystä emme edes pyydä arvioita ristivaikutuskertoimista suoraan vaan välillisesti kategoristen numeroarvioiden perusteella, jotta asiantuntijoiden huomio ei kiinnittyisi liialti laskennallisiin yksityiskohtiin.

Arvioihin syntyvät ristiriidat korjataan jälkikäteen etsimällä todennäköisyysjakauma, joka parhaiten vastaa annettuja arvioita, mutta myös noudattaa todennäköisyyslaskennan sääntöjä. Tämä tapahtuu ratkaisemalla iteratiivisesti useita optimointitehtäviä muotoa

$$\begin{aligned} \min_{q(k|\mathbf{s}_{1:i-1})} & \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{(k,l) \in R_{ij}} \left[ \left( \sum_{\{\mathbf{s} \in S_{1:i-1} | s_j=l\}} q(k|\mathbf{s})q(\mathbf{s}) \right) - \hat{C}_{kl}^{ij} \hat{p}_k^i \hat{p}_l^j \right]^2 \\ & \sum_{\mathbf{s} \in S_{1:i-1}} q(k|\mathbf{s})q(\mathbf{s}) = \hat{p}_k^i, & \forall k \in \{1, 2, \dots, n_i\} \\ & \sum_{k=1}^{n_i} q(k|\mathbf{s}_{1:i-1}) = 1, & \forall \mathbf{s}_{1:i-1} \in S_{1:i-1} \\ & q(k|\mathbf{s}_{1:i-1}) \geq 0. & \forall k \in \{1, 2, \dots, n_i\}, \mathbf{s}_{1:i-1} \in S_{1:i-1} \end{aligned}$$

Optimointi toimii käytännössä siten, että epävarmuustekijöitä käydään läpi yksi kerrallaan ja jokaiselle lasketaan sellainen todennäköisyysjakauma, joka on Euklidisella etäisyydellä mitattuna mahdollisimman lähellä ristivaikutusmatriisiin syötettyjä arvoja. Näiden osatehtävien tulokset yhdistämällä saadaan kaikki mahdolliset skenaariot kattava yhteistodennäköisyysjakauma sekä skenaarioita kuvaava Bayes-verkko. Yhteistodennäköisyysjakamaa voidaan sitten käyttää hyväksi tunnistettaessa esimerkiksi suuren riskin skenaarioita tai ratkaistaessa päätösanalyysiin liittyviä optimointitehtäviä. Bayes-verkko taas soveltuu mitä-jos tyyppiin tarkasteluihin, joilla voidaan tutkia, miten yksittäisten epävarmuustekijöiden tilat vaikuttavat muiden todennäköisyyksiin.

Huomattavaa on, että käytetyt menetelmät on tässä esitetty äärimmäisen yksinkertaisten, ja yksityiskohdista kiinnostuneiden suositellaan perehtyvän aiheesta kirjoitettuun artikkeliin (Roponen ja Salo, 2022).

#### 4 Tulokset ja pohdinta

Kehitettyjä menetelmiä sovellettiin case-esimerkkiin, jossa tutkittiin 3D-tulostustuotannon tulevaisuuden kehityksen vaikutuksia Suomen Puolustusvoimiin. Tutkimuksen keskiöön valikoitui asiantuntijoiden haastattelujen jälkeen erityisesti 3D-tulostuksen merkitys varaosien näkökulmasta, koska se vaikutti mahdollisista sovelluskohteista kaikkein lupaavimmalta ja laajimmin merkityksellisesti.

Tutkimuksen aineisto kerättiin kolmessa vaiheessa. Ensin haimme tietoa kaupallisista ja vasta kehitteillä olevista tuotteista sekä perehdyimme tieteellisiin tutkimuksiin 3D-



tulostustekniikoista ja alan kehityksestä. Seuraavaksi haastattelimme suomalaisia 3D-tulostusalan asiantuntijoita yliopistomaailmasta sekä Puolustusvoimista. Lopuksi järjestimme etätööpajan, johon osallistui haastatelluista asiantuntijoista valtaosa. Työpajassa käytiin läpi ennakkoselvityksien perusteella määritetyt epävarmuustekijät tiloineen sekä päivitettiin niitä asiantuntijoiden näkemyksien mukaan. Asiantuntijat myös arvioivat epävarmuustekijöiden tilojen marginaalitodennäköisyydet sekä tilojen väliset ristivaikutukset.

Lopulliseksi epävarmuustekijöiden listaksi valikoitui:

1. Tuotannon laajuus maailmalla
2. Tekniikan kehittyminen – Tulostuksen hinta
3. Tekniikan kehittyminen – Tulostusnopeus
4. Tuotannon laajuus Suomessa
5. Koulutus yliopistoissa ja ammattikorkeakouluissa
6. 3D-tulostukseen liittyvä lainsäädäntö
7. Tulostusprosessien ja mallien standardointi
8. 3D-tulostettujen tuotteiden käytön yleisyys Puolustusvoimissa
9. Puolustusvoimien käytettävissä olevat 3D-mallit ja digitaaliset tuotantosuunnitelmat
10. 3D-tulostuskapasiteetin käyttö Puolustusvoimissa rauhan aikana
11. 3D-tulostuskapasiteetin käyttö Puolustusvoimissa kriisiaikana

Jokaiselle näistä 11 epävarmuustekijästä nimettiin 3 mahdollista tilaa, joten niiden yhdistelmänä on mahdollista muodostaa  $3^{11} = 177\,147$  skenaariota, joita selvästikään ei olisi mahdollista käydä läpi yksitellen. Ristivaikutusarvioita todennäköisyyksien arviointiin tarvittiin kuitenkin vain 176 kappaletta ja epävarmuustekijöiden tilojen todennäköisyyksiä 33. Kokonaiskestoltaan arvioiden keräykseen käytetty työpaja oli 4 tuntia sisältäen perehdyttämisen tutkimuksen menetelmiin ja tavoitteisiin epävarmuustekijöiden todennäköisyyksien ja ristivaikutusten arvioinnin lisäksi.

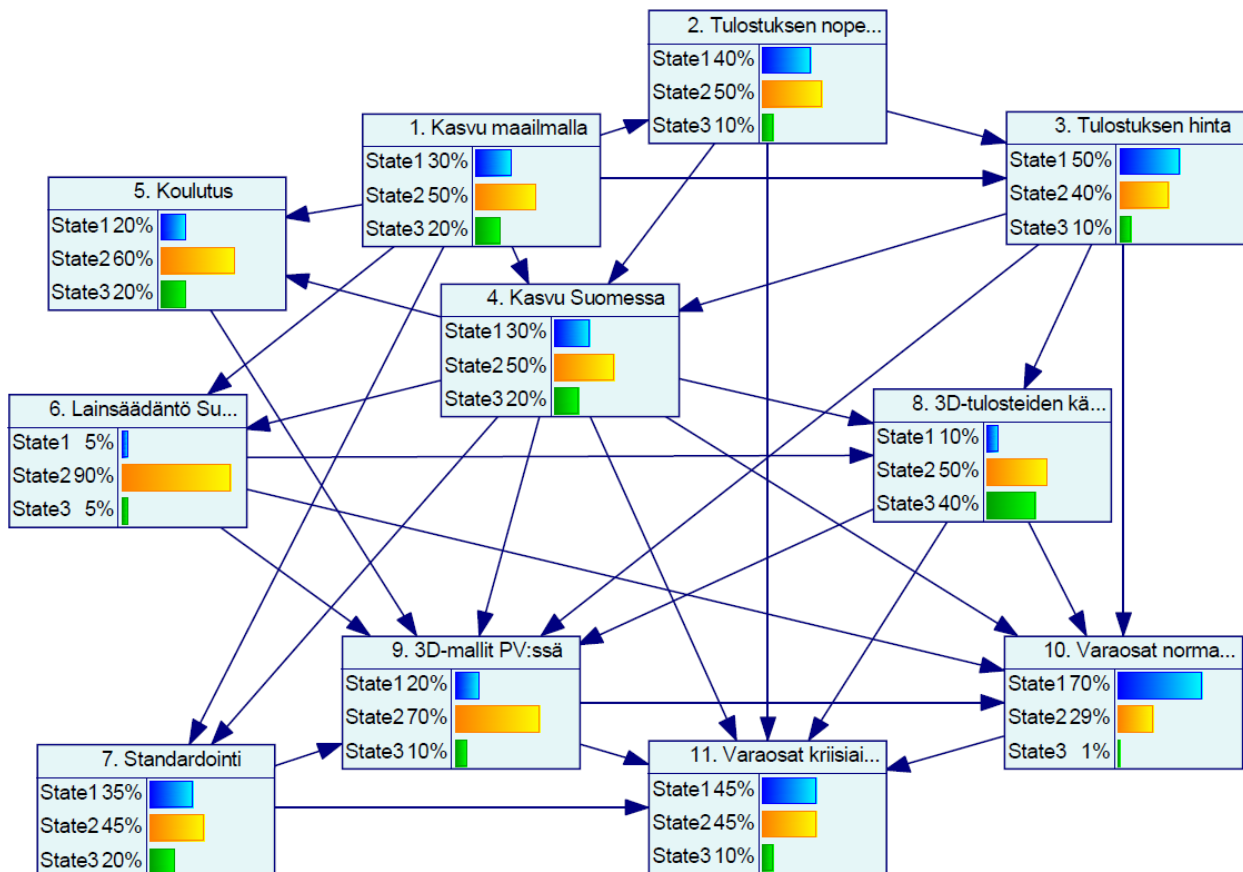
Hankkeessa kehitetyllä optimointimenetelmällä laskettiin asiantuntija-arvioiden pohjalta yhteistodennäköisyysjakauma kaikille mahdollisille skenaarioille. Laskenta-aika on alle 10 sekuntia tehoiltaan vaatimattomalla kannettavalla tietokoneella, joten tulevaisuudessa asiantuntijoille voidaan esitellä heidän arvioidensa implikaatioita käytännössä reaaliajassa, mikä parantaa prosessin läpinäkyvyyttä ja siten vähentää väärinymmärrysten riskiä.

Koko 177 147 todennäköisyysarvoa sisältävän skenaariotodennäköisyysjakauman tarkastelu suoraan ei ole käytännöllistä tai edes mahdollista, joten optimointimallin tulosten pohjalta tuotettiin myös Bayes-verkko, joka on nähtävissä Kuvassa 2. Jokainen kuvan laatikoista vastaa yhtä epävarmuustekijää, ja nuolet niiden välillä vastaavat asiantuntijoiden antamia ristivaikutusarvioita. Bayes-verkko ei myöskään ole pelkästään staattinen kuvaus systeemistä, vaan sen avulla on mahdollista tehdä eri tyyppisiä mitä-jos tarkasteluja, jossa valikoidut epävarmuustekijät asetetaan valittuun tilaan, jolloin voidaan nähdä, miten muiden epävarmuustekijöiden todennäköisyydet muuttuvat. Rakensimme optimointimallin oheen työkalun, jolla Bayes-verkko saadaan luotua automatisoidusti tiedostona, jonka pystyy avaamaan kaupallisella GeNIe oh-

jelmistolla (Bayesfusion, 2021), johon on valmiiksi toteutettu lukuisia analyysityökaluja verkon tarkastelun helpottamiseksi.

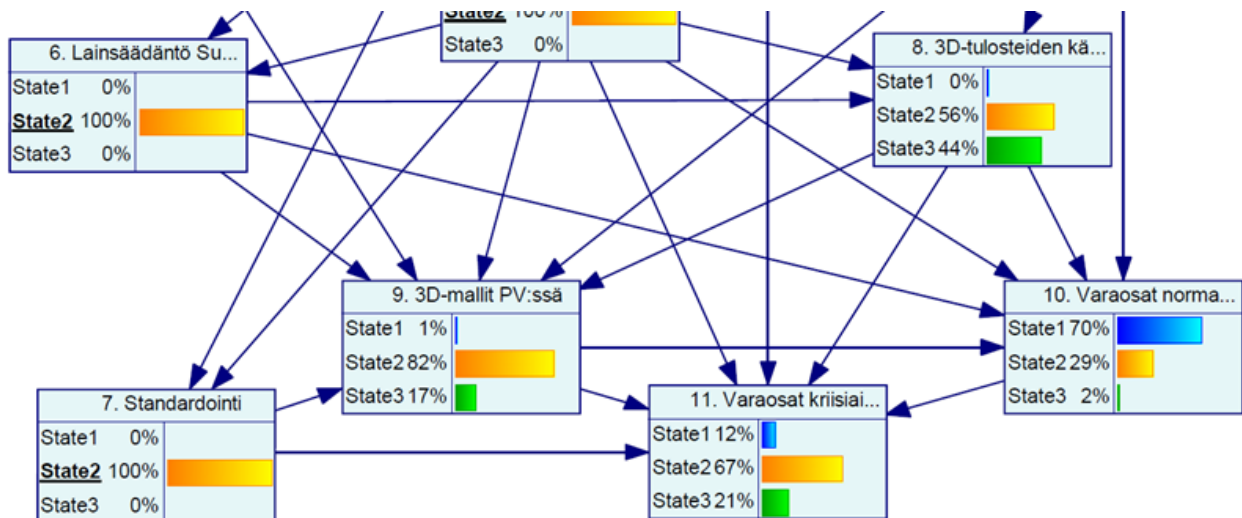
Kuvassa 3 on esitetty esimerkiksi nk. todennäköisin ulkoinen skenaario eli tilanne, ja epävarmuustekijät 1-7 kaikki ovat tilassa, jotka todennäköisimmin esiintyvät yhdessä. Tässä tapauksessa se sattuu olemaan keskimäinen tila jokaiselle. Kuvasta 3 nähdään, että 3D-tulostettujen varaosien merkitys kriisiaikana on tässä tilanteessa hyvin suurella todennäköisyydellä ainakin kohtuullisen merkittävä. Samalla niiden merkitys normaalioloissa jää edelleen todennäköisimmin melko vähäiseksi. Tästä voitaisiin esittää arvio, että tämä kriisiajan suorituskyvyn kehittäminen vaatii erityistä huomioita, koska sitä ei voida nopealla aikataululla luoda täysin tyhjästä, vaan prosessien ja menetelmien on oltava PV:n sisällä tuttuja jo ennestään.

Bayes-verkon rakentamisen lisäksi laskentamenetelmää voidaan myös soveltaa esimerkiksi riskianalyseissa ja muissa todennäköisyypohjaisissa analyyseissä. Kehitetyt työkalut eivät myöskään ole sidoksissa käytettyyn 3D-tulostus-esimerkkitarasteluun vaan ovat suoraviivaisesti sovellettavissa lähes mihin tahansa tutkimuskysymykseen, jossa todennäköisyyksiä on tarpeen arvioida asiantuntija-arvioiden perusteella. Mahdollisia sovelluskohteita ovat siten myös esimerkiksi vihollistoiminnan arviointi puolustuksen suunnittelussa tai poliittisten päätösten ennakointi.



Kuva 2: 3D-tulostuksen tulevaisuus Bayes-verkkona





**Kuva 3: 3D-tulostuksen käyttöä Puolustusvoimissa kuvaavien epävarmuustekijöiden todennäköisyydet muuttuvat, kun ulkoisten tekijöiden tilat muuttuvat.**

## 5 Loppupäätelmät

Skenaarioanalyysi tarjoaa joukon työkaluja tulevaisuuden systemaattiseen ennakkointiin tunnistamalla ja analysoimalla avainasemassa olevia epävarmuustekijöitä. Tässä tutkimushankkeessa tavoitteena oli tuottaa erityisesti disruptiivisten teknologioiden ennakkointiin soveltuva skenaariomenetelmä. Kehitetty ristivaikutuksiin perustuva menetelmä on ristivaikutusanalyysin kentällä ainutlaatuinen siinä mielessä, että se tuottaa kaikki skenaariot kattavan yhteisjakautuksen. Monet erityisesti vanhemmista ristivaikutusmenetelmistä perustuvat Monte Carlo -simulointiin, jolla pystytään riittävällä määrällä toistoja tuottamaan yhdenlainen approksimaatio skenaariotodennäköisyyksistä, mutta tarkkojen arvioiden tuottaminen harvinaisten skenaarioiden todennäköisyyksistä vaatii valtavasti laskenta-aikaa ja tulokset ovat epätarkkoja.

Kyky laskea skenaarioiden todennäköisyydet on olennainen, mikäli tulevaisuuden tarkastelussa halutaan soveltaa todennäköisyyspohjaista päätösanalyysiä tai riskianalyysiä. Todennäköisyyksiä voidaan myös käyttää hyväksi, mahdollisesti myös skenaarioiden seuraamusten kanssa, valittaessa korkean riskin tai muutoin kiinnostavia skenaarioita tarkempaan narratiiviseen tarkasteluun. Kun skenaarioiden todennäköisyydet ovat tiedossa, saadaan hyvä kuva siitä, kuinka suuren osan mahdollisista tulevaisuuksista syvempään tarkasteluun valitut skenaariot kattavat.

Lähestymistapana myös Bayes-verkon rakentaminen on uusi ristivaikutusanalyysin kentällä. Verkkomalli tarjoaa paitsi mahdollisuuden keskinäisriippuvuuksien visuaaliseen esitykseen myös mahdollisuuden tutkailla erilaisia mitä-jos-tilanteita todennäköisyyslaskennan lainalaisuuksiin nojaten. Tämä mahdollistaa esimerkiksi eri epävarmuustekijöiden tilojen todennäköisyyksien reaaliaikaisen päivittämisen uuden tiedon valossa, jos menetelmää sovelletaan lähitulevaisuuden epävarmuuksien tarkasteluun.

Tutkimuksessa kehitettyjen menetelmien soveltamisesta muihin puolustustutkimustarkasteluihin on käyty alustavia keskusteluja PV:n tutkijoiden ja muiden tahojen kanssa, mutta tällä hetkellä tiedossa ei ole vielä konkreettista jatkoa. Kehitetyt menetelmät eivät ole sidottuja pelkästään teknologiaennakkointiin, vaan ovat sovellettavissa lähes mihin tahansa asiantuntija-arvioihin pohjaavaan skenaarioennakkointiin.

## 6 Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tutkimushankkeessa kehitetyistä menetelmistä ja tuloksista on kirjoitettu tieteellinen tutkimusartikkeli, joka on lähetetty arvioitavaksi *Futures & Foresight Science* -lehteen. Artikkelin on lähetetty nimellä "A Probabilistic Cross-Impact Methodology for Explorative Scenario Analysis", kirjoittajina Juho Roponen ja Ahti Salo, mutta arviointiprosessi ei ole vielä valmis, joten tarkempia tunnistetietoja ei ole saatavilla.

Tutkimuksen tuloksia on myös esitelty vuonna 2022 kahdessa konferenssissa. Ensimmäinen The 7th Nordic Military Operational Analysis Conference (NMOAC) "OA in Military Strategic Foresight" -konferenssissa tammikuussa ja sitten EURO 2022 -konferenssissa kesäkuussa.

Vikke Elfving on myös tehnyt Aalto-yliopiston Matematiikan ja systeemianalyysin laitoksen omalla rahoituksella diplomityötään tämän hankkeen tutkijoiden ohjauksessa aiheenaan "Scenario selection in probabilistic cross-impact analysis". Työ käsittelee mahdollisimman hyvin kattavan pienen skenaario-otoksen valintaa tarkempaan tarkasteluun koko skenaariojoukosta ja sen odotetaan valmistuvan ennen vuoden 2022 loppua.

Tomas Toro teki tutkimusryhmän ohjauksessa myös tutkimukseen liittyvän kandidaatintyönsä aiheenaan Asiantuntija-arvioiden ristiriitojen käsittely ristivaikutusanalyysissä.

## 7 Lähteet

BayesFusion, LLC (2021). *GeNie Modeler*. Saatavilla osoitteesta: <https://www.bayesfusion.com/> (viittauspäivä 9.12.2022)

D. Bunn ja A. Salo. Forecasting with scenarios. *European Journal of Operational Research*, 68(3):291–303, 1993.

Y. Cho ja T. Daim. Technology forecasting methods. Teoksessa Kim J. Phan K. Daim, T. (toim.), *Research and Technology Management in the Electricity Industry*, pages 67–112. Springer, 2013.

A. Salo, E. Tosoni, J. Roponen, ja D.W. Bunn (2022). Using cross-impact analysis for probabilistic risk assessment. *Futures & Foresight Science*, 4(2), e2103.

A.L. Porter, B. Ashton, G. Clar, J.F. Coates, K. Cuhls, S.W. Cunningham, K. Ducatel, P. van der Duin, L. Georghiou, T. Gordon, H. Linstone, V. Marchau, G. Massari, I. Miles, M. Moguee, A. Salo, F. Scapolo, R. Smits, ja W. Thissen. Technology futures analysis: Toward integration of the field and new methods. *Technological Forecasting and Social Change*, 71(3):287–303, 2004.

J. Roponen ja A. Salo. (2022) A Probabilistic Cross-Impact Methodology for Explorative Scenario Analysis, Artikkelikäsikirjoitus