

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Monimutkaisten järjestelmien toimintavarmuuden parantaminen

Ahti Salo ja Jussi Kangaspunta
Matematiikan ja systeemanalyysin laitos
Aalto-yliopiston perustieteiden korkeakoulu
PL 11100
00076 AALTO
etunimi.sukunimi@aalto.fi

Tiivistelmä

Kriittisen infrastruktuurin ja tuotannon järjestelmät ovat tärkeitä yhteiskunnan elintärkeiden toimintojen jatkuvuuden ja huoltovarmuuden kannalta. Näiden monimutkaisten järjestelmien toimintavarmuuden parantamisella pyritään turvaamaan yhteiskunnan toiminta ja väestön elinmahdollisuudet sekä sotilaallista maanpuolustusta tukevan tuotannon toimintaedellytykset normaaliolojen vakavissa häiriö- ja poikkeustilanteissa. Järjestelmien toimintavarmuuden parantamiseksi tarvitaan asiantuntijaperusteista tietoa eri järjestelmäkokonaisuuksien välisistä keskinäisriippuvuuksista sekä siitä, mitä vaihtoehtoisia varautumistoimenpiteitä voidaan tehdä.

Tässä tutkimuksessa monimutkaisia järjestelmiä tarkastellaan verkostoina, joiden solmuissa tai niitä yhdistävissä kaarissa voi tapahtua häiriöitä. Verkostojen solmujen välillä voi esiintyä niiden toimintaan vaikuttavia riippuvuuksia, jolloin häiriötilanteet voivat pahimmassa tapauksessa laumattaa koko verkoston toiminnan sekä suuren osan myös muiden verkostojen järjestelmien toimintakyvystä. Tutkimuksessa kehitettyjen menetelmien avulla voidaan verkostojen muodostamista kokonaisuuksista tunnistaa sellaiset järjestelmät, joiden toiminta vaikuttaa verkostojen toimintakykyyn eniten eri uhkaskenaarioissa.

Kustannustehokkuusanalyysien avulla voidaan verkostojen toimintavarmuutta parantavia toimenpiteitä kohdistaa niihin verkostojen solmuihin, jotka ovat tärkeimpiä verkostojen eri toimijoiden kannalta. Analyysit tuottavat tietoa siitä, mitkä toimenpideyhdistelmät eli portfoliot parantavat verkostojen toimintavarmuutta parhaiten eri kustannustasoilla. Tutkimuksen tulokset tukevat myös eri toimijoiden kuten viranomaisten ja yritysten välistä yhteistoimintaa varautumistoimenpiteiden suunnittelussa sekä päätöksenteon tukena.

Menetelmät on kehitetty kemianteollisuusalueiden riskienhallintatoimenpiteiden suunnittelun tueksi. Kehitystyössä on hyödynnetty Huoltovarmuuskeskuksen kemian poolin verkostoharjoituksen materiaalia Kokkolan suurteollisuusalueesta, joka muodostaa useiden tuotantolaitosten verkoston. Tutkimustulokset ovat periaattellisella tasolla yleistettävissä myös muiden yhteiskunnan kriittisen tuotannon ja infrastruktuurin järjestelmien kuten esimerkiksi sähkönjakelu- ja tietoliikenneverkostojen tarkasteluun. Tulokset tukevat erityisesti Huoltovarmuuskeskuksen kaltaisten organisaatioiden toimintaa huoltovarmuuden ylläpitämiseksi ja kehittämiseksi tarkoitettujen toimenpiteiden suunnittelussa, koska yritysten ja muiden toimijoiden jatkuvuudenhallinnassa on tarpeen huomioida myös esimerkiksi alihankintaverkostojen kyky toimia normaaliolojen häiriötilanteissa. Tässä asetelmassa tutkimushankkeessa kehitetyt menetelmät auttavat ymmärtämään eri toimijoiden välisten keskinäisriippuvuuksien vaikutuksia verkostojen toimintakykyyn ja kohdistamaan käytettävissä olevia resursseja sellaisille kehittämistoimenpiteille, jotka parantavat verkostojen toimintavarmuutta useimpien toimijoiden näkökulmasta eri uhkaskenaarioissa.

1. Johdanto

Huoltovarmuuden kannalta on tärkeää, että yhteiskunnan kriittiset infrastruktuurit ja

tuotantojärjestelmät toimivat myös normaaliolojen vakavissa häiriö- ja poikkeustilanteissa (Yhteiskunnan turvallisuusstrategia 2010). Nämä yhteiskunnan kannalta elintärkeät järjestelmät muodostavat monimutkaisen kokonaisuuden, joka koostuu useista erilaisista verkostoista kuten teollisuuden eri raaka-aineiden tuotantoverkostoista sekä sähkön- ja vedenjakeluverkostoista.

Tutkimushanke on jatkoa vuonna 2012 aloitetulle tutkimukselle, jossa on kehitetty menetelmiä kuljetusjärjestelmien riskien arviointiin (kts. Salo ja Kangaspunta 2012). Huoltovarmuuden parantamiseksi on tarpeen mallintaa myös useiden eri järjestelmien muodostamien verkostojen välisiä keskinäisriippuvuuksia ja niiden vaikutuksia, koska verkostoissa tapahtuvat häiriöt voivat aiheuttaa myös muiden verkostojen häiriöitä (kts. Nguyen ym. 2013, Buldyrev ym. 2010). Tällöin esimerkiksi sellainen järjestelmä, jonka häiriö ei olennaisesti heikennä yksittäisen verkoston toimintakykyä voi osoittautua kriittiseksi muiden verkostojen toimintakyvyn kannalta. Pahimmassa tapauksessa yksittäiset verkostohäiriöt voivat lamauttaa suuren osan muiden verkostojen toimintakyvystä (kts. Rosato ym. 2008).

Yhden toimijan näkökulmasta suunnitellut toimenpiteet verkoston toimintavarmuuden parantamiseksi eivät välttämättä riitä ylläpitämään järjestelmäkokonaisuuksia. Tällöin on tarpeen edistää eri toimijoiden välistä yhteistoimintaa esimerkiksi teollisuusalueilla tapahtuvien riskienhallintatoimenpiteiden suunnittelemiseksi. Päätöksenteon tueksi tarvitaan myös menetelmiä, joiden avulla toimenpiteistä voidaan tunnistaa kustannustehokkaat vaihtoehdot.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Yhteiskunnan kriittisen infrastruktuurin ja tuotannon järjestelmät muodostavat monimutkaisten järjestelmien kokonaisuuden, jonka toiminta on riippuvainen siitä, mitkä järjestelmistä toimivat ja mitkä eivät. Tutkimuksessa tarkastellaan teollisuusalueen tuotantojärjestelmiä eri toimijoiden muodostamina verkostoina, joissa voi esiintyä esimerkiksi elintarvike- ja teollisuuden raaka-ainetuotantolaitosten sekä yritysten välisiä riippuvuuksia. Näiden keskinäisriippuvuuksien huomioimiseksi verkostoja kuvataan solmuina ja niitä yhdistävinä kaarina. Solmut ovat esimerkiksi raaka-aineiden tuotantotehtaat ja kaaret näiden tehtaiden välisiä toimitussuhteita.

Verkoston solmuissa voi tapahtua häiriöitä, jolloin yhteys muihin solmuihin katkeaa. Esimerkiksi laajamittainen tehdaspalo voi aiheuttaa sen, että tehtaalla käsiteltäviä raaka-aineita ei voida toimittaa muiden teollisuusalueen toimijoiden käyttöön. Häiriöt voivat edelleen eskaloitua tuotantoketjussa siten, että yksittäisille toimijoille esimerkiksi luonnon ääri-ilmiöistä aiheutuneet häiriöt vaikuttavat myös muiden verkostojen toimintaan. Huoltovarmuuden parantamiseksi ja teollisuuden eri raaka-ainetuotannon ylläpitämiseksi on tärkeää tunnistaa sellaiset verkostojen solmut, joissa tapahtuvat häiriöt alentavat eri toimijoiden tai useimpien toimijoiden toimintakykyä eniten.

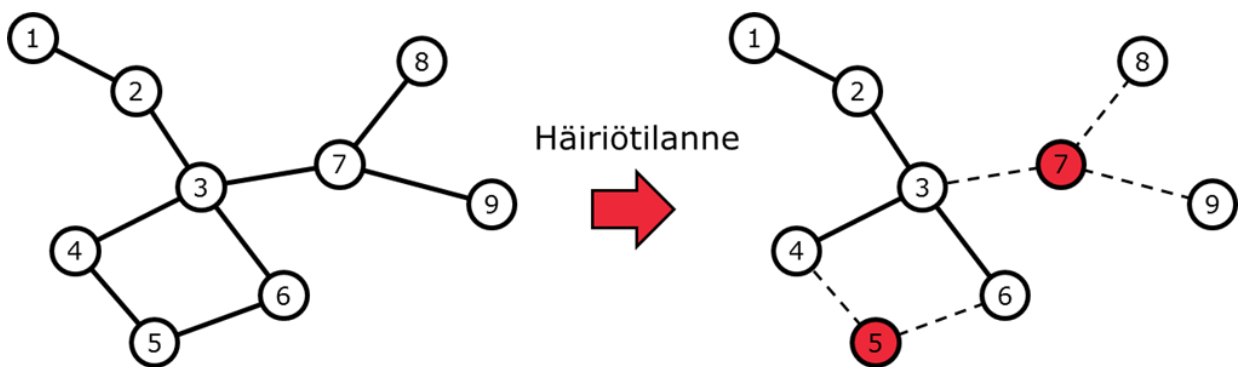
Verkoston toimijoiden kannattaa kohdistaa verkoston toimintavarmuutta parantavat toimenpiteet sellaisiin verkoston solmuihin, jotka auttavat parhaiten ylläpitämään verkostojen toimintakykyä normaaliolojen poikkeus- ja häiriötilanteissa. Kustannustehokkuusanalyysien avulla voidaan tuottaa perusteltuja arvioita toimenpiteiden välisestä paremmuudesta eri toimijoiden näkökulmasta, jolloin vaihtoehtoisista toimenpiteistä voidaan pyrkiä toteuttamaan ne, jotka ovat useimpien toimijoiden kannalta tärkeitä. Analyysien tulokset edesauttavat myös eri toimijoiden välistä yhteistoimintaa ja jatkuvuuden suunnittelua.

Tutkimushankkeen tavoitteena on tunnistaa sellaiset verkostojen solmut ja niiden yhdistelmät, joiden häiriöt alentavat verkostojen toimintakykyä eniten huoltovarmuuden näkökulmasta.

Lisäksi tutkimuksessa arvioidaan verkoston toimintavarmuuden parantamiseksi suunniteltujen toimenpideyhdistelmien kustannustehokkuutta.

3. Aineisto ja menetelmät

Tutkimushankkeessa on tarkasteltu teollisuusalueen toimijoiden muodostamia verkostoja, joiden toiminnallisia riippuvuuksia voidaan arvioida esimerkiksi teollisuusalueella toimivien yritysten ja muiden toimijoiden kesken järjestettävien verkostoharjoitusten avulla. Näiden verkostoharjoitusten tavoitteena on arvioida esimerkiksi teollisuusalueen yritysten toimintaa sekä raaka-aineiden saatavuutta normaaliolojen häiriötilanteissa. Teollisuusalueen tuotantolaitoksia mallinnetaan verkostoina, jotka esitetään solmuina ja niitä yhdistävinä kaarina. Solmuja ovat esimerkiksi teollisuusalueella sijaitsevat tehtaat ja yritykset, joiden toimitussuhteita kuvataan kaarina. Verkoston solmuissa voi tapahtua häiriöitä, jotka alentavat verkoston toimintakykyä. Kuvassa 1 on esitetty esimerkiverkosto A, jonka kahdessa solmussa tapahtuu häiriö. Esimerkiksi solmun 7 häiriö aiheuttaa myös sen, että solmujen 8 ja 9 yhteydet muihin solmuihin katkeavat.



Kuva 1 Verkosto A, jonka solmukohdissa 5 ja 7 tapahtuu häiriö.

Verkostoissa tapahtuvat häiriöt saattavat heikentää verkoston toimintakykyä, jota voidaan arvioida eri tavoin. Esimerkiksi verkosto A voisi kuvastaa vedenjakeluverkostoa, jonka tavoitteena on maksimoida solmujen välisten yhteyksien lukumäärä. Tällöin solmujen ja niiden yhdistelmien tärkeyttä voidaan arvioida suhteessa siihen, kuinka paljon yhteyksiä on eri häiriöyhdistelmien toteutuessa jäljellä? Taulukossa 1 on listattuna yksittäisissä verkoston A solmuissa tapahtuvien häiriöiden vaikutukset verkoston toimintakykyyn eli verkoston yhteyksien lukumäärään. Solmu 3 on verkoston solmuista tärkein, koska siinä tapahtuva häiriö alentaa verkoston toimintakykyä eniten.

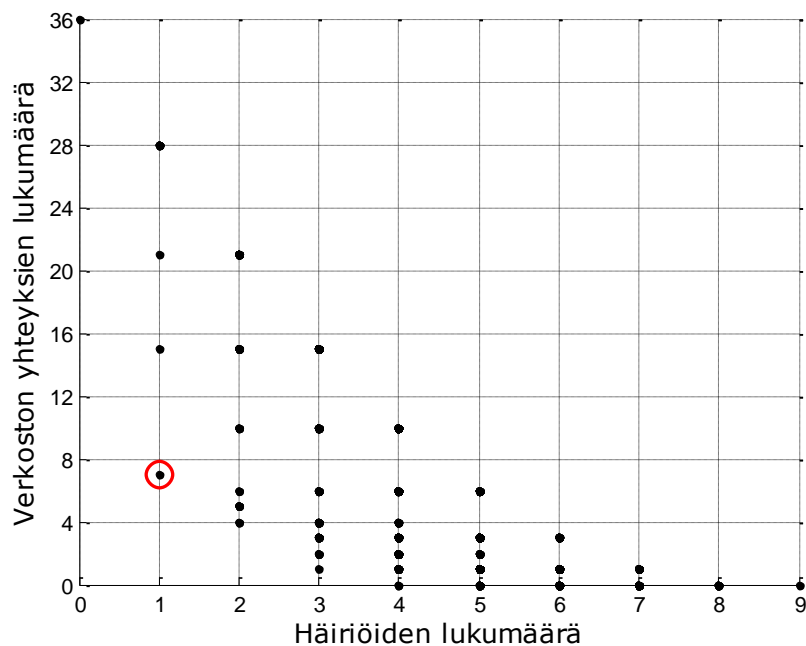
Taulukko 1 Yksittäisten häiriöiden vaikutukset verkoston toimintakykyyn.

Solmu	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Yhteyksien lukumäärä	28	21	7	28	28	28	15	28	28

Häiriöitä voi tapahtua useissa solmuissa myös yhtäaikaaisesti ja Kuvassa 2 on havainnollistettu jäljellä olevien yhteyksien lukumäärä suhteessa verkostossa A tapahtuneiden häiriöiden lukumäärään. Yksi piste vastaa vähintään yhtä häiriöyhdistelmää eli eri häiriöyhdistelmillä voi olla myös samansuuruiset vaikutukset toimintakykyyn. Lisäksi punaisella ympyrällä on korostettu häiriötä solmussa 3. Pelkästään häiriöiden lukumäärään perustuvat tarkastelut eivät kuitenkaan ota kantaa siihen, kuinka todennäköisiä eri häiriöyhdistelmät ovat suhteessa toisiinsa. Se auttaa kuitenkin hahmottamaan verkoston toimintakyvyn muutoksia

kokonaisuutena suhteessa kaikkiin mahdollisiin häiriöyhdistelmiin.

Häiriöiden vaikutuksia arvioidaan eri uhkaskenaarioissa, joiden toteutuessa on mahdollista, että yhdessä tai useammassa verkoston solmussa tapahtuu häiriö. Solmuissa tapahtuvien häiriöiden todennäköisyydet ovat skenaariokohtaisia ja ne ovat myös ehdollisia sille, että skenaario toteutuu. Todennäköisyydet arvioidaan asiantuntijoiden toimesta pyytämällä heiltä arvioita siitä, kuinka suurella todennäköisyydellä verkoston eri solmuissa tapahtuu häiriö uhkaskenaarion toteutuessa. Taulukossa 2 on esitetty kolme esimerkkiä uhkaskenaarioista ja häiriöiden todennäköisyydet neljässä verkoston solmussa. Esimerkiksi öljyonnettomuuden sattuessa jokin solmuista voi häiriöityä suuremmalla todennäköisyydellä kuin toinen riippuen mm. siitä, missä öljyonnettomuus tapahtuu.



Kuva 2 Verkostossa jäljellä olevien yhteyksien lukumäärä suhteessa häiriöiden lukumäärään.

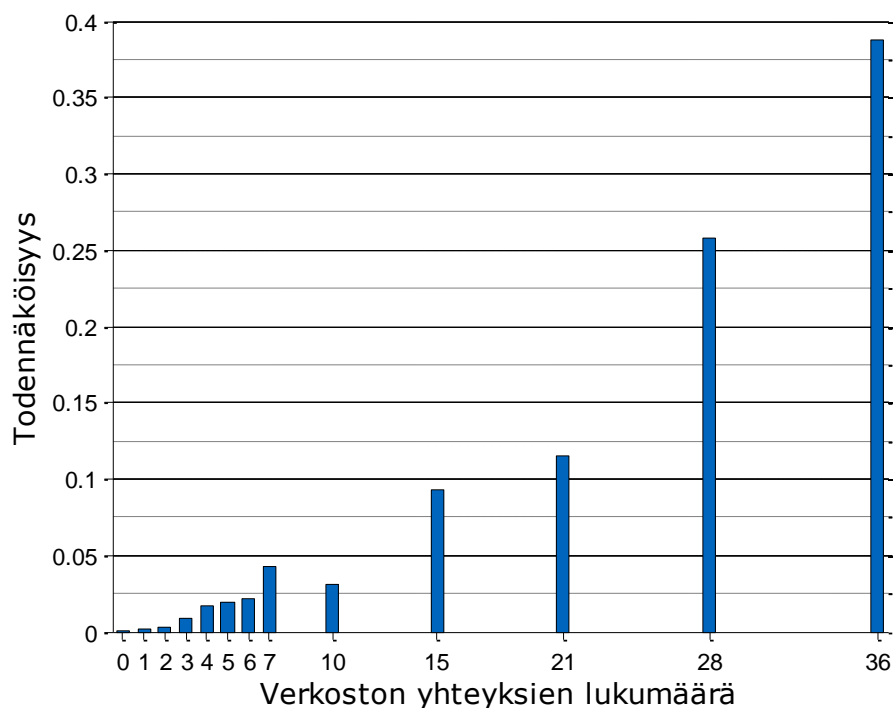
Taulukko 2 Kolme esimerkkiä uhkaskenaarioista ja häiriöiden todennäköisyydet neljässä verkoston solmukohdassa.

Solmu	Häiriön todennäköisyys			
	1	2	3	4
Vesilaitoksen häiriö	-	1.00	-	-
Öljyonnettomuus	0.90	-	0.50	0.10
Syysmyrsky	0.05	0.05	0.05	0.05

Verkostossa tapahtuvien häiriöyhdistelmien todennäköisyydet saadaan johdettua eri uhkaskenaarioiden määrittämisestä yksittäisissä solmuissa tapahtuvien häiriöiden todennäköisyyksistä. Edelleen näiden todennäköisyyksien avulla voidaan arvioida verkoston toimintakyvyn todennäköisyysjakauma eri skenaarioissa. Uhkaskenaarioiden avulla voidaan tarkastella verkoston toimintakykyä myös silloin, kun uhkaskenaariosta ei voida esittää tarkempia arvioita. Tällöin voi olla tarkoituksenmukaista arvioida verkoston solmujen tärkeyttä esimerkiksi siten, että kaikki solmut ovat uhattuna yhtä suurella todennäköisyydellä. Kuvassa

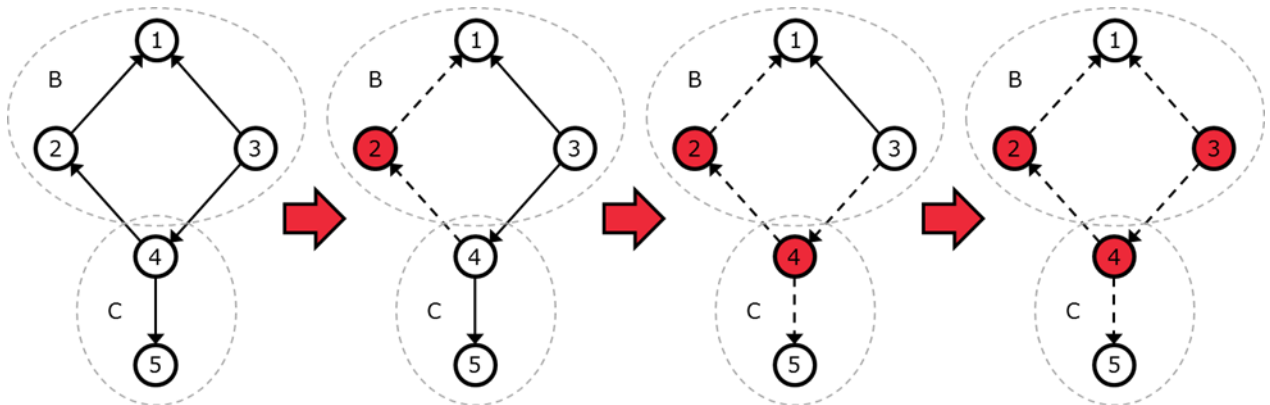
3 on esitetty verkoston A toimintakyvyn todennäköisyysjakauma sellaisessa uhkaskenaariossa, jossa kaikki solmut voivat häiriöityä todennäköisyydellä 0.10.

Häiriöt verkoston solmuissa voivat aiheuttaa häiriöitä myös muissa verkostoissa ja edelleen nämä häiriöt voivat eskaloitua eteenpäin muodostaen laajamittaisen häiriöiden ketjun. Kuvassa 4 on esitetty esimerkki kahden verkoston välisistä keskinäisriippuvuuksista sekä tilanne, jossa yhden solmun häiriö aiheuttaa häiriöt myös kahdessa muussa solmussa. Verkosto B muodostuu solmuista 1-3 ja verkosto C solmuista 4 ja 5. Solmujen toiminnan riippuvuus muiden solmujen toiminnasta on kuvattu nuolilla. Esimerkiksi solmu 4 toimii, jos solmut 2 ja 5 toimivat.



Kuva 3 Verkoston yhteyksien lukumäärän todennäköisyysjakauma uhkaskenaariossa.

Verkoston B solmussa 2 aiheutunut häiriö ei suoraan vaikuta verkoston B muiden solmujen toimintaan, mutta aiheuttaa häiriön verkoston C solmussa 4. Edelleen solmun 4 häiriö aiheuttaa häiriön verkoston B solmussa 3. Toisin sanoen verkoston B solmussa 2 tapahtunut häiriö aiheuttaa verkostojen keskinäisriippuvuuksista johtuen häiriön myös verkoston B solmussa 3. Taulukossa 3 on esitettyä verkostojen B ja C eri solmujen häiriöistä eskaloituneet häiriöt. Esimerkiksi solmussa 1 tapahtunut häiriö aiheuttaa eniten häiriöitä ja vastaavasti solmun 3 häiriöllä ei ole vaikutusta muiden solmujen toimintaan.



Kuva 4 Häiriön eskaloituminen kahden verkoston välillä.

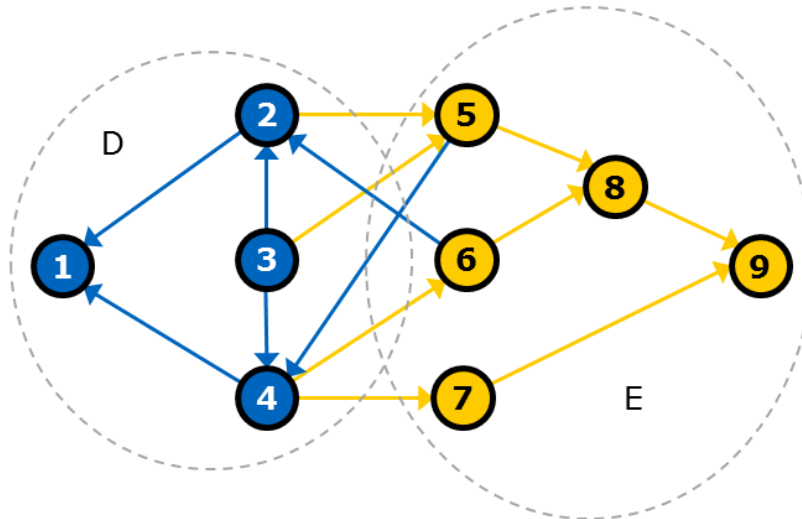
Verkostojen toimintaan vaikuttavien häiriöiden arvioimiseksi on siis huomioitava yksittäisten verkostojen solmujen välisten riippuvuuksien lisäksi myös eri verkostojen solmujen väliset riippuvuudet. Näin yksittäisen verkoston toimintakyvyn kannalta vähemmän tärkeä solmu voi osoittautua kokonaisuuden kannalta tärkeäksi, jos verkostojen keskinäisriippuvuudet otetaan huomioon. Solmujen toiminta voi olla riippuvainen yhden tai useamman solmun toiminnasta ja lisäksi voidaan huomioida esimerkiksi sellaisia riippuvuuksia, joissa solmun toiminta edellyttää sitä, että vähintään yksi kolmesta solmusta toimii. Tällaisia tilanteita voi esiintyä esimerkiksi yritysten tilaus-toimitus-ketjuissa, joissa yritys hyödyntää useita alihankkijoita samanlaisen tilauksen osalta.

Taulukko 3 Verkostojen B ja C solmujen häiriöiden eskaloituminen muihin solmuihin.

Häiriötynyt solmu	1	2	3	4	5	
Häiriön eskaloituminen		2,3 → 4	4 → 3	-	3	4 → 3

Häiriötilanteiden aiheuttamat muutokset verkostojen toimintakykyyn voi aiheutua sekä taloudellisia että muita tappioita. Esimerkiksi raaka-aineiden tuotannossa tapahtuvat häiriöt voivat aiheuttaa viivästyksiä elintarvikehuollon toimitusaikatauluissa. Teollisuusalueen toimijat tuottavat teollisuuden raaka-aineita sekä verkoston muille toimijoille että verkostojen ulkopuolelle yhteiskunnan muiden toimijoiden käyttöön. Verkoston solmuilla on siis verkoston toimintavarmuuden lisäksi arvoa myös yleisemmin huoltovarmuuden kannalta.

Kuvassa 5 on havainnollistava esimerkki tehdasalueesta, jossa toimii kaksi verkostoa D ja E, joiden solmujen välillä on riippuvuuksia. Esimerkiksi solmu 2 toimii, jos solmut 1 ja 5 toimivat. Tehdasalueen toimintakykyä arvioidaan suhteessa toimivien tehtaiden yhteenlaskettuun arvoon huoltovarmuuden kannalta. Taulukossa 4 on listattuna eri tehtaiden suhteelliset tärkeydet. Tehtaiden 1 ja 9 osalta suhteelliset tärkeydet ovat nolla ja esimerkki kuvastaa tilannetta, jossa verkostot voivat olla osa suurempaa kokonaisuutta ja solmuista 1 ja 9 on yhteys muihin verkostoihin.



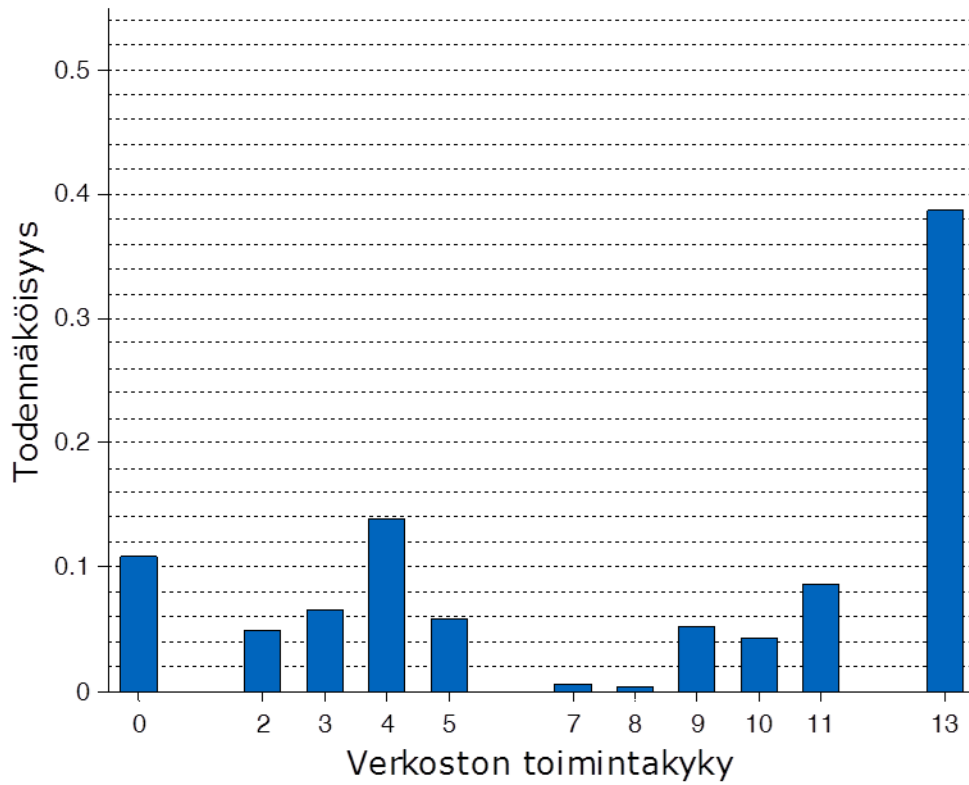
Kuva 5 Kaksi teollisuusalueen verkostoa ja niiden väliset keskinäisriippuvuudet.

Verkoston solmuihin kohdistuu uhkaskenaario, jonka arvioidaan aiheuttavan häiriön 0.10 todennäköisyydellä eri solmuissa. Kuvassa 6 on esitetty tehdasalueen toimintakyvyn todennäköisyysjakauma tässä uhkaskenaariossa. Verkoston solmuihin on mahdollista tehdä suojaustoimenpiteitä, jotka alentavat häiriön todennäköisyyttä siten, että jäännöstodennäköisyys uhkaskenaariossa on 0.01. Toimenpiteet maksavat saman verran ja toimenpiteistä on käytettävissä olevien resurssien avulla mahdollista toteuttaa enintään kolme. Kuvassa 7 on esitetty verkoston toimintakyvyn todennäköisyysjakauma sen jälkeen, kun solmuihin 3, 7 ja 8 on tehty suojaavia toimenpiteitä. Tavoitteena on tunnistaa sellaiset kustannustehokkaat toimenpiteiden yhdistelmät eli portfoliot, jotka parhaiten ylläpitävät verkostojen toimintavarmuutta (kts. Kangaspunta ja Salo 2013, Kangaspunta ym. 2012).

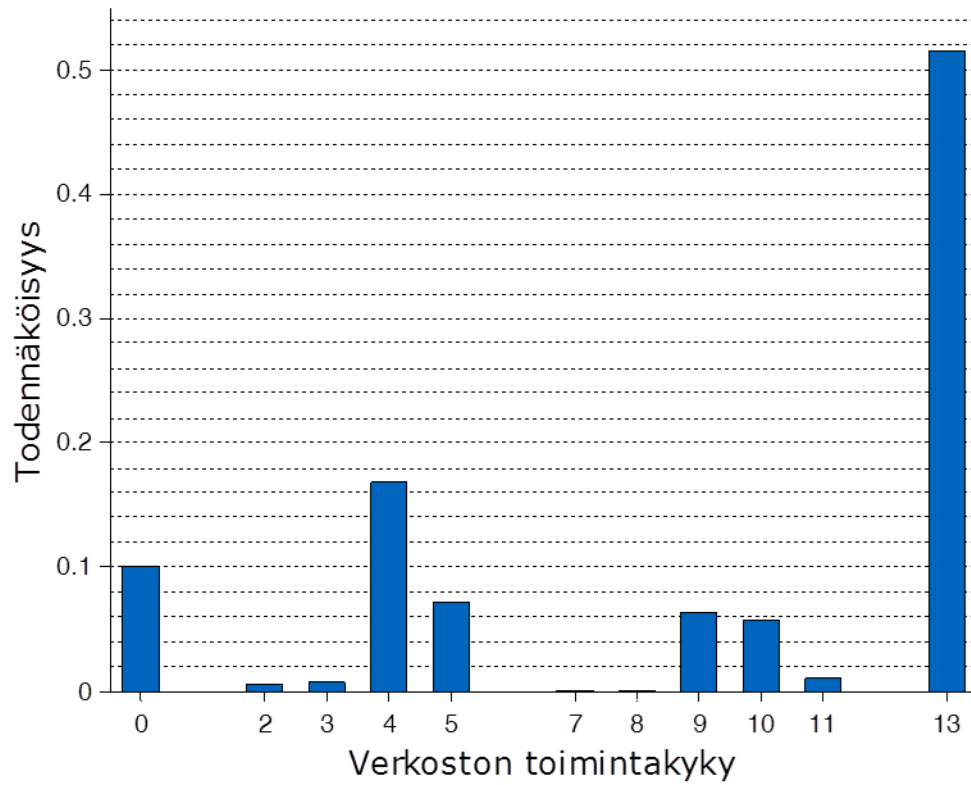
Taulukko 4 Verkostojen D ja E solmujen suhteellinen tärkeys.

Tehdas	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Suhteellinen tärkeys	0	1	2	1	2	3	2	2	0

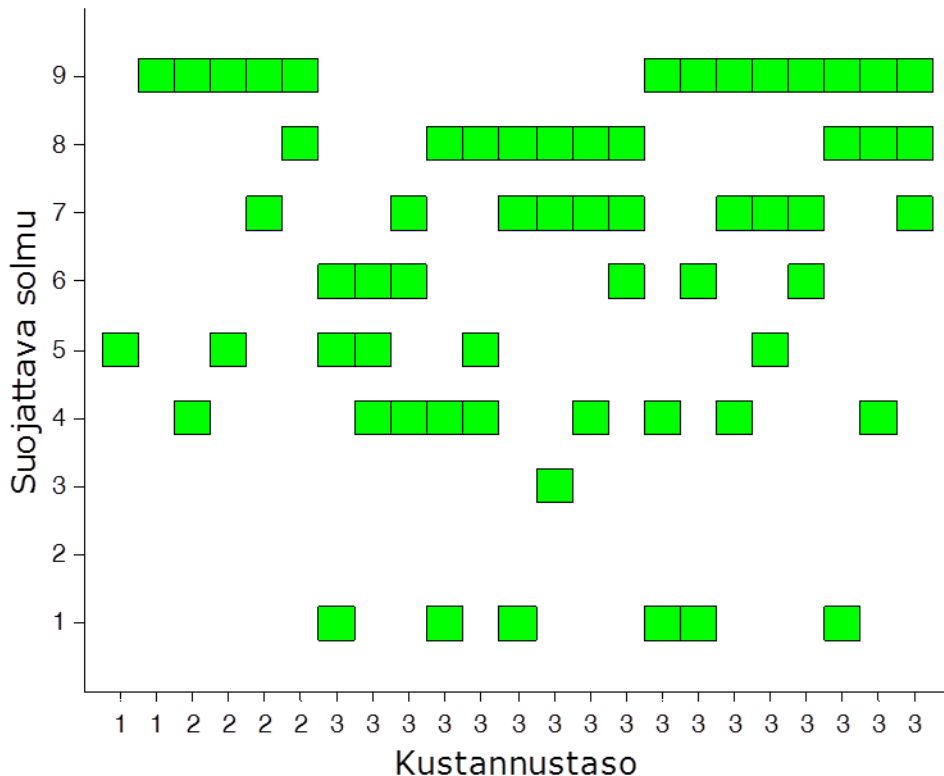
Kustannustehokkaita toimenpideportfolioita on yhteensä 23 ja ne on esitetty kuvassa 8. Useimmat kustannustehokkaat portfoliot koostuvat sekä verkoston D että verkoston E solmuista. Toisin sanoen kokonaisuuden kannalta on kustannustehokkaampaa kohdistaa käytettävissä olevia resursseja sellaisiin toimenpiteisiin, jotka parantavat molempien verkostojen solmuja yhtäaikaaisesti. Kustannustehokkuusanalyysien perusteella eri verkostojen toimijoiden kannattaisi siis tehdä yhteistyötä teollisuusalueen verkoston toimintavarmuuden parantamiseksi.



Kuva 6 Verkostojen D ja E muodostaman kokonaisuuden toimintakyvyn todennäköisyysjakauma.



Kuva 7 Verkostojen D ja E toimintakyvyn todennäköisyysjakauma, kun solmuihin 3,7 ja 8 on tehty suojaavia toimenpiteitä.



Kuva 8 Kustannustehokkaat toimenpideportfoliot eri kustannustasoilla.

4. Tulokset ja pohdinta

Yksittäisen verkoston toimijan kannalta voi olla kannattavaa, että myös muut verkoston toimijat sekä muiden verkoston toimijat säilyttävät toimintakykynsä häiriötilanteissa. Tässä asetelmassa tutkimuksessa kehitetyt menetelmät tukevat teollisuusverkostojen varautumistoimenpiteiden suunnittelua ja verkoston eri toimijoiden välisen yhteistoiminnan kehittämistä siten, että mahdollisten häiriöiden varalle suunnitellut toimenpiteet voidaan kohdistaa useimpien toimijoiden kannalta kustannustehokkaasti.

Tutkimuksessa on tarkasteltu teollisuusalueen verkostoja ja niissä esiintyvien keskinäisriippuvuuksien vaikutuksia verkoston toimintavarmuuden parantamiseksi suunniteltujen toimenpiteiden arvioinnissa. Menetelmät ovat kuitenkin yleistettävissä myös muiden verkostojen tarkastelemiseksi kuten esimerkiksi sähkönsiirto- ja tietoliikenneverkkojen välisen keskinäisriippuvuuksien vaikutusten arviointiin. Yleistäminen ei kuitenkaan ole yksioikoista vaan tarvitaan myös tietoa siitä, mitkä verkostojen eri järjestelmät ovat riippuvaisia muiden järjestelmien toiminnasta.

5. Loppupäätelmät

Tutkimushankkeessa on vuoden 2013 aikana kehitetty menetelmiä monimutkaisten järjestelmien muodostamien verkostojen välisen keskinäisriippuvuuksien mallintamiseksi ja niiden vaikutusten arvioimiseksi. Tutkimuksessa on tarkasteltu kemianteollisuusalueen

tuotantolaitosten muodostamia verkostoja ja hyödynnetty verkostoharjoituksessa tuotettuja tietoja teollisuusalueen toimijoiden välisistä keskinäisriippuvuuksista.

Tarkastelemalla useiden teollisuusalueella toimivien verkostojen kokonaisuuksia voidaan verkostoista tunnistaa ne häiriöt, jotka ovat useimpien toimijoiden kannalta merkityksellisimpiä. Näiden tarkastelujen perusteella voidaan tuottaa kustannustehokkuusanalyysjä eri toimijoiden riskienhallintatoimenpiteiden sekä verkostojen toimintavarmuutta parantavien toimenpiteiden suunnittelemiseksi.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tutkimustuloksista on laadittu käsikirjoitus julkaistavaksi kansainväliseen riskien arvioinnin ja operaatiotutkimuksen sarjajulkaisuun. Lisäksi asiantuntijaperusteisesta resurssien allokoinnista on julkaistu artikkeli OR Spectrum lehdessä.

Kangaspunta J., Salo A. (Manuscript) Allocating Resources to Secure the Performance of Critical Transportation Systems.

Kangaspunta, J., Salo, A. (2013) Expert Judgments in the Cost-Effectiveness Analysis of Resource Allocations: A Case Study in Military Planning, OR Spectrum, DOI:10.1007/s00291-013-0325-8.

Viitteet:

Buldyrev, S., Parshani, R., Paul, G., Stanley, H., Havlin, S. (2010) Catastrophic Cascade of Failures in Interdependent Networks, *Nature*, 464, 1025-1028.

Kangaspunta, J., Salo, A. (2013) Expert Judgments in the Cost-Effectiveness Analysis of Resource Allocations: A Case Study in Military Planning, OR Spectrum, DOI:10.1007/s00291-013-0325-8.

Kangaspunta, J., Liesiö, J., Salo, A. (2012) Cost-Efficiency Analysis of Weapon System Portfolios, *European Journal of Operational Research*, 223(1), pp. 264-275.

Nguyen, D., Shen, Y., Thai, M. (2013) Detecting Critical Nodes in Interdependent Power Networks for Vulnerability Assessment, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(1), 151-159.

Rosato, V., Issacharoff, L., Tiriticco, F., Meloni, S., Porcellinis, S., Setola, R. (2008) Modelling Interdependent Infrastructures using Interacting Dynamical Models, *International Journal of Critical Infrastructures*, 4(1), 63-79.

Salo, A., Kangaspunta, J. (2012) Monimutkaisten järjestelmien toimintavarmuuden parantaminen, tiivistelmäraportti 2012, http://www.defmin.fi/files/2355/MATINE_Summary_Report_MAT826.pdf.

Yhteiskunnan turvallisuusstrategia (2010). Valtioneuvoston periaatepäätös 16.12.2010.