

TIIVISTELMÄRAPORTTI

YHTEISKUNNAN KRIITTISEN INFRAN DYNAAMINEN HAAVOITTUVUUSMALLI

Prof. Kirsi Virrantaus (tutkimuksen johtaja)
Aalto-yliopisto, Maankäyttötieteiden laitos
kirsi.virrantaus@aalto.fi

DI Hannes Seppänen (tutkija)
Aalto-yliopisto, Maankäyttötieteiden laitos
hannes.seppanen@aalto.fi

Kriittisten infrastruktuurien jatkuvasti kasvava keskinäisriippuvuus asettaa haasteita sietokykyisen infrastruktuurin kehittämiseksi. Tietyn infrastruktuurin sietokyky itsessään ei riitä, vaan myös toisiinsa liittyneiden infrastruktuurien on oltava sietokykyisiä kokonaisuutena eri uhkia vastaan. Aiemmassa Matine-hankkeessa tutkimme sitä, miten kriittisten infrastruktuurien rakenteellisia haavoittuvuuksia ja niiden kasautumista voidaan tutkia. Tutkimuksessa rajattiin verkostojen toiminnallisuudet ja erilaisten uhkien vaikutusmuodot ulkopuolelle. Tässä tutkimuksessa kuvataan miten kriittisten infrastruktuurien haavoittuvuutta voidaan arvioida huomioimalla sekä rakenteelliset että toiminnalliset näkökulmat. Menetelmää kehitettiin kahden kohdealueen avulla. Tuloksena esitetään menetelmä kriittisten infrastruktuurien haavoittuvuuksien tarkasteluun sekä sovelluskehityksen arkkitehtuuri sen toteutusta varten.

1. Johdanto

Kriittiset infrastruktuurit monimutkaistuvat ja ovat yhä vahvemmin keskinäisriippuvaisia, ja häiriöiden seurausvaikutukset voivat olla monikertaisia alkuperäiseen vaikutukseen verrattuna. Infrastruktuurien ylläpidon lisäksi tulisi kiinnittää huomiota myös niitä suojaavaan varautumiseen sekä rakenteellisia muutoksia tehdessä uusien haavoittuvuuksien minimointiin ja sietokyvyn parantamiseen. Kriittisten infrastruktuurien toiminta ja niihin vaikuttavat uhkat eivät rajoitu pelkästään organisaatioihin tai kuntarajoihin. Tästä huolimatta alueelliset toimijat ja viranomaiset vastaavat alueen kehittämisestä ja varautumisesta, jolloin on tarvetta laajapohjaisemmalle tarkastelulle ja toiminnalle. Maankäyttö ja infrastruktuuriratkaisuiden kustannustehokkuus ei välttämättä huomioi verkoston haavoittuvuutta kattavasti eri toimijoiden näkökulmasta. Huomioimalla verkostojen haavoittuvuus monen toimijan näkökulmasta, voidaan kriittisten infrastruktuurien sietokykyä parantaa.

Tutkimuksen tavoitteena on kehittää malli kriittisten infrastruktuurien haavoittuvuuksien arviointiin huomioimalla fyysisten rakenteiden ja niihin liittyvien ilmiöiden vaikutusten keskinäisriippuvuuksia. Yhdistämällä asiantuntijatietämyksen mallintaminen ja alueellisten erityispiirteiden analysointi sekä kuvaus, voidaan ymmärtää enemmän kuin yksin fyysisiä keskinäisriippuvuuksia tarkastelemalla voitaisiin löytää. Tutkimuksessa kehitettävän menetelmän lähtökohdiksi on otettu päätöksenteon menetelmistä tunnettu vaikutusmalli, jota pyritään laajentamaan siten, että siihen voidaan yhdistää fyysistä ympäristöä kuvaava paikkatieto ja paikkatietoanalyysimenetelmät. Kolmantena menetelmätaustana on käytetty tulevaisuuden tutkimuksen lähestymistapoja asiantuntijatietämyksen keräämiseen ja hyväksikäyttöön vaikutusmallien laatimisessa. Menetelmän avulla voidaan arvioida infrastruktuurien haavoittuvuutta joko tietyn uhkan näkökulmasta tai eri suunnitteluvaihtoehtojen näkökulmasta.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimus jatkaa vuoden 2012 Matine-tutkimusta "Yhteiskunnan kriittisen infran suojaaminen - case: Pirkanmaan logistiikkajärjestelmä" yhdistämällä asiantuntijatietämyksen osaksi

verkoston haavoittuvuuden fyysistä analyysia. Toteutus jakautuu seuraaviin kokonaisuuksiin: (i) kirjallisuustutkimus keskeisten menetelmien osalta; (ii) menetelmän kokonaisarkkitehtuurin hahmottaminen; (iii) koeaineiston kerääminen; (iv) erillisten menetelmien tarkastelu koeaineistolla; (v) menetelmän integroiminen; sekä (vi) testaus ja raportointi. Tutkimuksen koealueina ovat Etelä-Karjala sekä Pirkanmaa.

Tuloksena saadaan konseptuaalinen malli, joka yhdistää verkostojen haavoittuvuuden analysoinnissa asiantuntijatietämyksen (loogiset keskinäisriippuvuudet) vaikutusmallin kautta kohdennettuihin paikkatietoanalyysiin (fyysiset keskinäisriippuvuudet). Mallia voidaan käyttää rakenteellisesti ja toiminnallisesti monimutkaisten infrastruktuurien haavoittuvuuden arvioimiseen ja kehittämiseen.

3. Aineisto ja menetelmät

Tutkimus soveltaa kolmen tieteenalan menetelmiä: tulevaisuuden tutkimuksen menetelmiä systeemin kuvaamiseksi ja keskinäisriippuvuuksien tunnistamiseksi; päätöksenteon menetelmiä vaikutusmallin kuvaamiseksi; sekä paikkatietomenetelmiä tuottamaan analyysitietoa vaikutusmalliin.

Uhkien vaikutusten, haavoittuvuuksien sekä verkoston toiminnallisuuksien ymmärtämiseksi on kokonaisuudesta muodostettava kattava kuvaus asiantuntijatietämyksen avulla. Pelkkä nykytilan ymmärtäminen ei riitä yksin, vaan on oltava käsitys myös mahdollisista tulevaisuuden kehityskuluista ja asioiden keskinäisriippuvuuksista. Skenaariopohjaisilla tulevaisuudentutkimuksen menetelmillä voidaan kuvata toimintaympäristön nykytila, tulevaisuudentila ja prosessi joka liittää nämä toisiinsa. Systeemin nykytilaa voidaan kuvata strukturoidusti tai ei strukturoidusti. Päättävänä on saada kattava kuvaus eri näkökulmista systeemin nykytilasta haastatteluiden, työpajojen sekä haastatteluiden avulla. Tulevaisuudentilan sekä muuttujien ja niiden keskinäisvaikutusten kuvaamiseen voidaan käyttää edellä mainittujen menetelmien lisäksi erilaisia skenaariotyöskentelyn apumetodeja sekä Delfoi-tekniikkaa. Menetelmien tavoitteena on kuvata systeemi, sen muuttuja sekä niiden väliset suhteet mahdollisimman kattavasti ja perustellusti asiantuntijoiden avulla. (Mannermaa 1999)

Vaikutuskaavioita käytetään päätöksenteon yhteydessä kuvaamalla päätöksentekoprosesseja ja niiden sisältämiä vaikutussuhteita. Päätöksenteon prosessi kuvataan suunnattuna graafina käyttäen hyväksi erimuotoisia solmuja sekä niitä yhdistäviä kaaria. Solmut kuvaavat päätöksiä (suorakaide), sattumia (ovaali) sekä näiden seurauksena muodostuvaa arvoa (kulmista pyörästetty neliö). Päätökset ovat vaihtoehtoja tai valintoja, joihin päätöksentekijä voi vaikuttaa. Sattumasolmut kuvaavat puolestaan epävarmoja tai todennäköisyyteen perustuvia muuttujia joihin päätöksentekijä ei voi vaikuttaa. Arvosolmulla kuvataan tavoitteita tai maksimoitavaa hyötyä. Solmuja yhdistävillä kaarilla kuvataan mahdollisuuksia tai saatavilla olevaa informaatiota. Arvo- ja sattumasolmuihin osoittavat kaaret kuvaavat todennäköisyyksiin perustuvia riippuvuuksia kun taas informaatiokaarilla kuvataan saatavilla olevaa informaatiota. Päätösslomuihin johtavat kaaret ovat informatiivisia, eli ne kuvaavat päätökseen käytettävää tietoa. (Clemen 1996)

Semanttisia verkkoja käytetään tietämyksen esittämiseen kuvaamalla käsitteitä ja niiden välisiä suhteita graafeilla. Kielitieteen lisäksi semanttisia verkkoja hyödynnetään paljon tietotekniikassa. (Allemang & Hendler 2011)

Paikkatietoanalyysillä voidaan tuottaa tietoa spatio-temporaalisista ilmiöistä sekä verkkojen rakenteesta ja toiminnallisuuksista. Spatio-temporaalisilla analyysillä tarkoitetaan aikaan ja paikkaan liittyvän tiedon analysointia ja kuvaamista. Spatio-temporaalisten analyysien avulla voidaan esimerkiksi lisätä tulipalojen riskimalliin ajallisen dimension, jolloin otetaan huomioon väestön sijainti suhteessa vuorokaudenaikoihin (Špatenková 2009).

Verkkoja mallinnetaan tyypillisesti graafeilla, jotka koostuvat solmuista ja niitä yhdistävistä kaarista. Kaaret voivat olla joko suunnattuja tai suuntaamattomia. Verkon solmuille ja kaarille voidaan kuvata myös painoja perustuen mallinnettaviin tunnuslukuihin. Verkostojen rakennetta voidaan analysoida graafiteorian menetelmiä soveltamalla. Tyypillisiä menetelmiä ovat verkon rakennetta kuvaavat analyysit kuten keskeisyyden (centrality) ja välillisyyden (betweenness) mittarit. Lokaalisti keskeisellä solmulla tai kaarella on paljon yhteyksiä ympäröiviin kohteisiin, kun taas globaalisti keskeinen solmu tai kaari on lähellä verkon muita kohteita. Välillisuus puolestaan kuvaa onko solmu tai kaari välittäjän roolissa, eli onko se usean kohteen välissä. Vaikuttamalla esimerkiksi suuren välillisyyden omaavaan kaareen kuten siltaan, voidaan eristää verkon osia toisistaan. Verkon keskeisyyden ja välillisyyden tunnuslukuja voidaan käyttää myös verkkoa kehitettäessä ja erilaisia vaihtoehtoja vertailtaessa. Niiden avulla voidaan hakea esimerkiksi sietokykyisintä topologiavaihtoehtoa painotetulle verkolle käyttäen sen toiminnallisuuksia kuvaavia tunnuslukuja painoina. (Demsar et al. 2008)

Tutkimuksessa suoritettiin tapaustutkimuksia Etelä-Karjalan sekä Pirkanmaan alueilla hyödyntäen tulevaisuuden tutkimuksen menetelmiä. Tavoitteena oli selvittää kriittisten infrastruktuurien haavoittuvuuksien analysoinnin tarpeita sekä kerätä asiantuntijatietämystä menetelmän hyödynnettävyydestä.

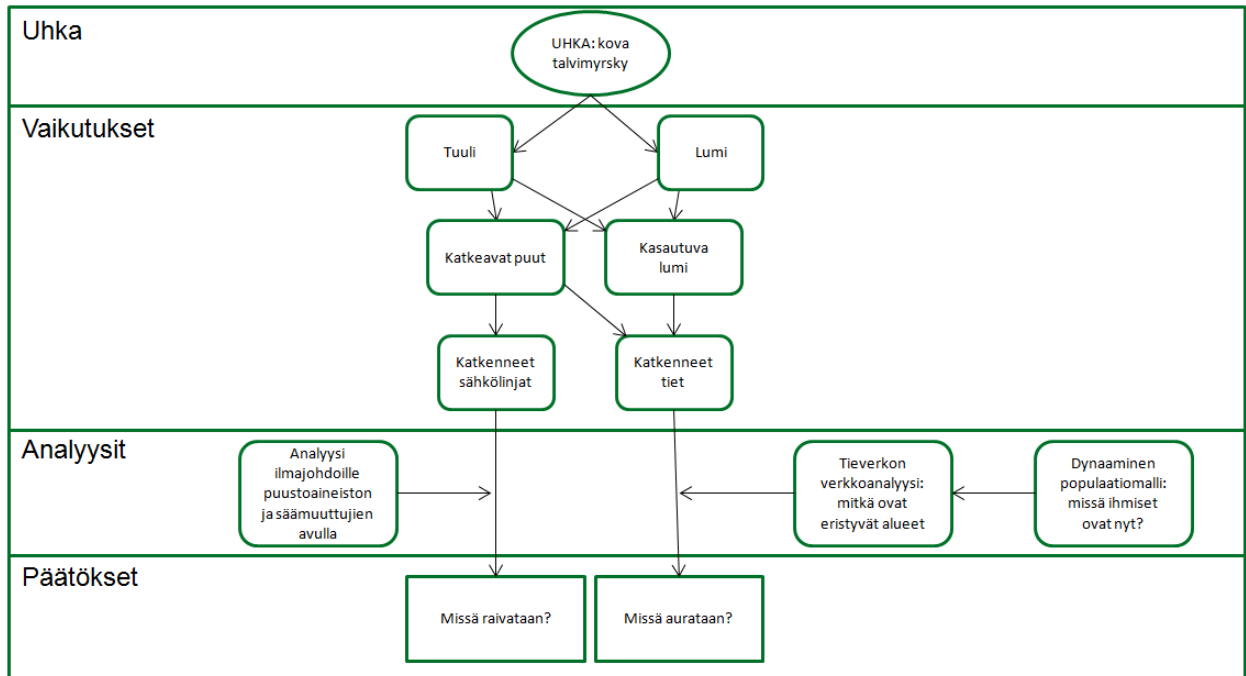
Case Etelä-Karjala

Etelä-Karjalan alueella toimii maakuntatasolla Etelä-Karjalan turvallisuus- ja valmiustoimikunta (EK Turva) jonka yhtenä tavoitteena on varautumiseen sekä valmiussuunnitteluun liittyvän maakunnallisen toimintamallin kehittäminen ja jalkauttaminen. Toimikuntaan kuuluvat sisäisen turvallisuuden vastuviranomaisten edustajat (pelastus, poliisi, rajavartiolaitos, puolustusvoimat sekä sosiaali- ja terveystoimi), kuntien, kirkon, elinkeinoelämän sekä vapaaehtoissektorin edustajat. Tutkimuksessa suoritettiin haastattelu, jossa alueen EK Turvan toimijoiden kanssa kerättiin tietoa liittyen mahdollisiin uhkaskenaarioihin ja niiden vaikutuksiin alueella. Tarkastelukohteeksi valittiin alueelle mahdollisesti iskevä kova talvimyrsky ja sen vaikutukset kriittisiin infrastruktuureihin. Haasteena on myrskyn vaikutusten ulottuminen yli kuntarajojen ja vaikuttaminen useisiin infrastruktuureihin samanaikaisesti. Ajallisesti tarkastelu rajattiin käsittämään myrskyn välittömiä vaikutuksia ja varautumista Etelä-Karjalan maakunta-alueella, jolloin olemassa olevaa infrastruktuuria ja sen mahdollisia haavoittuvuuksia ei voida muuttaa. Toimijoiden visio eli tulevaisuuden tahtotila liittyen varautumiseen ja haavoittuvuuksien hallintaan voi perustua esimerkiksi kuntalakiin ja visio voi olla esimerkiksi asukkaiden hyvinvoinnin turvaaminen sekä häiriötoleranssien vakauttaminen.

Keskeisenä tavoitteena uhkaperusteisessa haavoittuvuuksien tarkastelussa on saada tarkasteltavasta systeemistä kattava kuva sekä löytää keskeiset muuttujat ja niiden väliset vaikutukset. Menetelmiä näiden tunnistamiseen ja kuvaamiseen löytyy etenkin tulevaisuudentutkimuksen skenaariotyöskentelystä. Skenaariotyöskentely voidaan toteuttaa esimerkiksi rakenteellisen analyysin avulla, jolla tutustutaan systeemiin sekä toimintaympäristöön. Menetelmän avulla kuvataan sisäiset sekä ulkoiset muuttujat ja niiden väliset riippuvuussuhteet.

Skenaariotyöskentelyn tuloksena voidaan kuvata oleelliset muuttujat, niiden väliset vaikutukset sekä niihin liittyvät keskeiset tietotarpeet. Kuvassa 1 on kuvattu yksinkertaistettu esimerkki uhkasta, sen vaikutuksista sekä päätöksiä varten tuotettavasta analyysitiedosta. Kuvauksen on tarkoitus olla esimerkki vaikutusmallin sekä sitä tukevien analyysien hyödyntämisestä ja on huomioitava, että relevantin vaikutusmallin aikaansaamiseksi vaaditaan asiantuntijoilta laajaa sekä iteratiivista panostusta. Vaikutusmallia ja tarvittavia analyysejä voi kehittää edelleen ja yleistettäessä malli semantiikan avulla on se hyödynnettävissä myös muissa vastaavissa

tapauksissa.



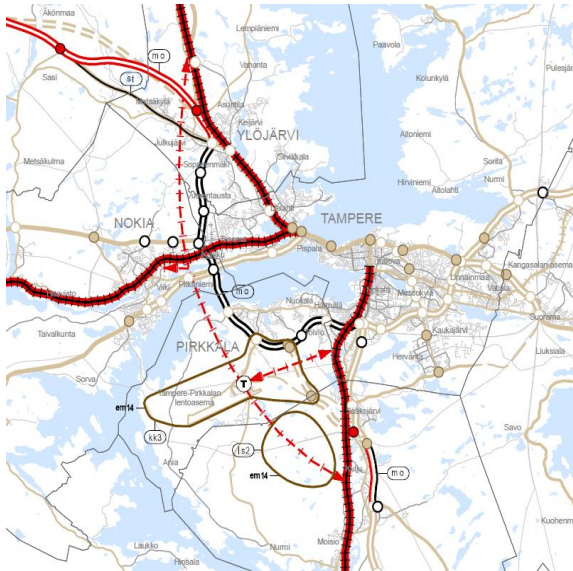
Kuva 1: Esimerkki vaikutusmallista ja sovellettavista paikkatietoanalyyseista

Case Pirkanmaa

Pirkanmaan maakunta on käynnistänyt 2011 kokonaismaakuntakaavan ”Pirkanmaan maakuntakaava 2040” laatimisen, jonka tavoitteellinen hyväksymisvuosi 2016. Yhtenä osana kaavaa tehdään rakennevaihtoehtotarkasteluja etenkin liikenteen, palvelujen, väestön sekä työpaikkojen osalta. Tarkoituksena on konkretisoida alueen kehittämiseen liittyviä mahdollisuuksia ja uhkia (Pirkanmaan liitto 2013). Tässä tarkasteltava haavoittuvuusesimerkki on Tampereen rautatieaseman ratapiha-alue, jossa samalla alueella toimivat henkilö- ja tavaraliikenne sekä kemikaalivaunujen järjestely ja kuljetus. Etelä-Karjalan tapaukseen verrattuna tässä tarkastelussa voidaan vaikuttaa varautumisen lisäksi myös infran varsinaiseen rakenteeseen. Visiona Pirkanmaalla on huomioida kokonaisturvallisuus aluekehityksessä rakentamalla se osaksi yhteiskuntaa. Kriittisten infrastruktuurien näkökulmasta se tarkoittaa sietokykyisen infrastruktuurin kehittämistä sekä väestön ja vaarallisten toimintojen erottamista alueellisesti toisistaan. Tavoitteena on siis monimutkaisten riskikeskittymien purkaminen ja ehkäisy.

Tarkasteltaessa haavoittuvuuksia kaavoituksen näkökulmasta on huomioitava eri ratkaisuiden vaikutukset ja mahdollisten uhkien muuttuminen kymmenien vuosien päähän. Eri kaavoitusvaihtoehtojen haavoittuvuuksien tarkastelu nousee keskeiseksi. Tätä varten on asiantuntijoiden kanssa kuvattava toimintaympäristön nykytila kattavasti esimerkiksi asiantuntijahaastatteluilta. Tulevaisuuden kehityskulkujen, keskeisten muuttujien ja haluttujen indikaattoreiden muodostaminen tapahtuu skenaariotyöskentelyn menetelmillä kuten asiantuntijahaastatteluilta, -paneelilla, työpajoilla tai Delfoi-kyselyillä. Keskeisten muuttujien, niiden välisten suhteiden sekä kehityskulkujen löytäminen on menetelmän työläin vaihe ja mitä paremmin se saadaan kuvattua, sitä paremmin voidaan vaikutusmallilla ja tukevilla analyyseilla vastata tarpeisiin. Toimintamallin taso on yhtä yksityiskohtainen kuin tarkastelussa olevat vaihtoehdot, eli kaavoituksen edetessä voidaan tarkasteluita kohdentaa täsmällisempiin ongelmiin. Tarkasteltavat ongelmat voivat olla esimerkiksi logistiikan häiriöiden vaikutukset uusiutuvaan energiantuotantoon tai rakennettujen alueiden lisääntyneiden liikenne-

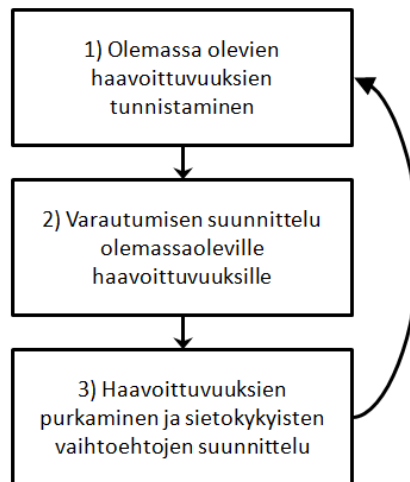
virtojen vaikutukset tieverkon rakennevaihtoehdoille. Tuloksena saadaan kaavavaihtoehtojen haavoittuvuuksien kuvaaminen tukemaan kaavoituksen päätöksentekoa.



Kuva 2: Pirkanmaan maakuntakaavan ehdotus oikoradan linjaukselle. (Pirkanmaan liitto 2013)

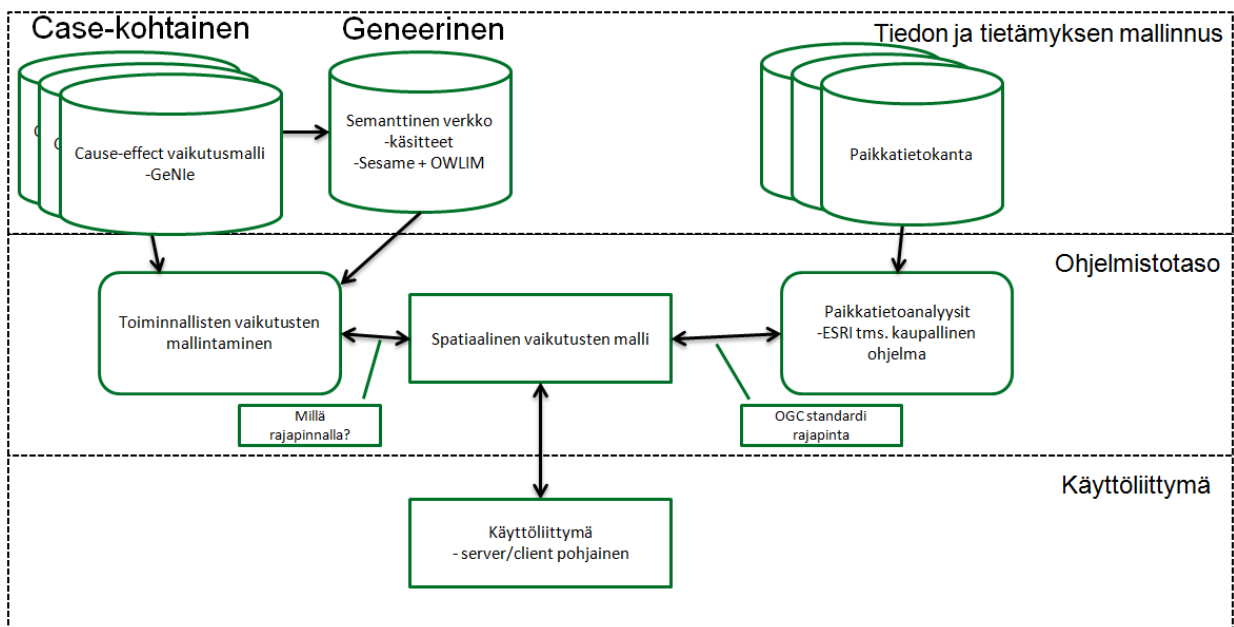
4. Tulokset ja pohdinta

Tutkimuksen tuloksena kuvataan menetelmä kriittisten infrastruktuurien haavoittuvuuksien tarkasteluun ja kehittämiseen sekä sovellusarkkitehtuuri sovelluksen kehittämiseksi. Tutkimuksessa huomattiin, että lähtökohdiltaan erilaiset eri haavoittuvuustarkastelut toimivat kokonaisuutta täydentävinä näkökulmina. Tulokset on yleistettävissä kuvassa 3 esitettävään muotoon, jossa sietokykyisen infrastruktuurin kehittäminen tapahtuu ajallisena jatkumona. Kehittäminen lähtee olemassa olevan infrastruktuurin haavoittuvuuksien tunnistamisella perustuen asiantuntijahaastatteluihin, uhkien seurausvaikutusten mallintamisella sekä täsmentävää tietoa tuottavien analyysien tekemisellä. Lyhyellä tähtäimellä voidaan varautumista ja sen vaikutusta havaittuihin haavoittuvuuksiin suunnitella asiantuntijoiden avulla. Pitkän tähtäimen suunnittelussa voidaan ottaa huomioon vakavat haavoittuvuudet, joita ei varautumisen tai korjaavien toimenpitein voida hallita. Kaavoituksessa eri ratkaisuvaihtoehtoja arvioitaessa tulisi huomioida eri vaihtoehtojen haavoittuvuudet sekä vaihtoehtojen keskeisyys kymmenien vuosien aikajänteellä. Suunnittelussa on huomioitava mm. aluekehitys, muuttuvat uhkat sekä teknologian kehitys.



Kuva 3: Sietokykyisten kriittisten infrastruktuurien kehittäminen.

Mallinnettaessa muuttujia ja niiden välisiä vaikutuksia voidaan hyödyntää olemassa olevia ohjelmistoja, mutta keskeisten analyysien liittäminen osaksi vaikutusmallia ei tämänhetkisillä ohjelmistoilla ole tutkimuksemme mukaan mahdollista. Tutkimuksessa nousi myös tarve tallentaa sovellusalan geneerinen käsitteistö ja käsitteiden ontologia semanttiseen verkkoon ja yhdistää tämä osaksi vaikutusten mallinnusta. Tutkimuksen toisena tuloksena esitetään kuvassa 4 esitetty sovelluskehityksen arkkitehtuuri. Sovelluksen hyödyntäminen koostuu case kohtaiseen vaikutusten kuvaamiseen, vaikutusmallin täydentämisellä tukevin paikkatietoanalyysin sekä tulosten arvioimisella.



Kuva 4: Sovelluskehityksen arkkitehtuuri

Menetelmällä voidaan tukea monimutkaisten systeemien kehittämistä ja sen käyttömahdollisuudet eivät rajoitu pelkkiin kriittisiin infrastruktuureihin. Jatkossa voitaisiin selvittää menetelmän soveltuvuutta laajemmin monimutkaisten järjestelmien haavoittuvuuksien tutkimisessa. Tässä kuvattua menetelmää voidaan hyödyntää konseptuaalisella tasolla jo nyt

osana kuntien ja maakuntien kriittisten infrastruktuurien haavoittuvuuksien tarkastelussa, maankäytön suunnittelussa sekä varautumisen kehittämisessä. Menetelmän tehokas hyödyntäminen edellyttää kattavaa taustatyötä asiantuntijoiden kanssa. Tukevalla analyysillä voidaan tuottaa perusteltua tietoa tätä kautta päätöksenteon tueksi.

5. Loppupäätelmät

Havaittiin että yhteiskunnan kriittisten infrastruktuurien haavoittuvuuksia tarkasteltaessa määrittelyn uhkan tarkastelun lisäksi mallin tulee tukea infrastruktuurien jatkuvaa kehittämistä huomioiden myös kaavoituksen tarpeet. Vaikutusmallin avulla voidaan kuvata selkeästi syy-seuraussuhteita ja kohdentaa tukevaa tietoa tuottavat analyysit perustellusti. Tutkimuksessa todettiin myös semanttisten verkkojen potentiaali laajan käsitteistön tallentamiseen.

Vaikutusmallien tuottamista tulevaisuuden tutkimuksen keinoin ei tässä tutkimuksessa päästy rajauksen vuoksi tutkimaan tarkemmin. Vaikutusmallien kuvaaminen tulevaisuuden tutkimuksen menetelmillä vaatii lisätutkimusta, sillä tämä kokonaisuus on laaja ja keskeisessä asemassa kokonaisuuden osalta. Tavoitteena ei ollut myöskään kuvata tiettyä uhkaa, sen vaikutuksia ja tukevia analyysieja kattavasti. Pääpaino oli menetelmän kehittämisessä ja sovellusmahdollisuuksien selvittäminen asiantuntijoiden kanssa. Tarpeeseen sekä sovellusmahdollisuuksiin saimme paljon hyvää palautetta ja työssä mukana olleet asiantuntijat näkivät tarvetta esitetylle menetelmälle ja sen jatkokehittämiselle.

Tutkimuksen perusteella haetaan jatkohankkeita menetelmäkokonaisuuden kehittämiseksi: (i) haettu Matinelta jatkohanke vuodelle 2014, jossa tavoitteena on menetelmän jatkokehittäminen yhdessä Matematiikan ja systeemianalyysin laitoksen kanssa analyysien, indikaattorien sekä vaikutusmallien (vaikutuskaavio sekä semanttinen verkko) tarkemman kuvaamisen osalta; (ii) valmistelussa tietotekninen jatkohanke (esimerkiksi TEKES), jossa ohjelmistokehystä rajapintoinen kehitetään eteenpäin yritysten ja kohdealueiden kanssa yhteistyössä; (iii) tutkimusryhmällämme on Suomen Akatemian hakemus liittyen semanttisten verkkojen hyödyntämiseen tietämyksen tallentamisessa ja tilannekuvan kehittämisessä.

Viitteet:

- Allemang, D., Hendler, J., 2011. *Semantic web for the working ontologist – effective modeling in RDFS and OWL*. Morgan Kaufman. ISBN 978-0-12-385965-5.
- Clemen, R., 1996. *Making hard decisions – an introduction to decision analysis*. International Thomson Publishing Europe London. ISBN 0-534-26034-9.
- Demsar, U., Špatenková, O., Virrantaus, K., 2008. Identifying critical locations in a spatial network with graph theory. *Transactions in GIS*, 12 (1), pp 61-82.
- Mannermaa, M., 1999. *Tulevaisuuden hallinta – skenaariot strategiatyöskentelyssä*. WSOY Porvoo. ISBN 951-0-23147-9.
- Pirkanmaan liitto, 2013. *Maakuntakaava 2040*. www.pirkanmaa.fi Viitattu 26.11.2013.
- Seppänen, H., Virrantaus, K., 2013. Shared situational awareness and information quality in disaster management. Sent to *Safety Science Journal* for publication.
- Špatenková, O., 2009. *Discovering spatio-temporal relationships: a case study of risk modelling of domestic fires*. Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu, Maanmittaustieteiden laitos, Espoo.
- Zhang, Z., Virrantaus, K., 2010. Analysis of vulnerability of road networks on the basis of graph topology and related attribute information. 2nd KES international symposium IDT 2010. Berlin 2010, Springer-Verlag, pp 22-36.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tutkimushankkeesta tullaan kirjoittamaan tieteellinen julkaisu vuoden 2014 aikana.