

Aalto-yliopisto
Perustieteiden korkeakoulu
Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma

Kustannustehokkaat riskienhallintatoimenpiteet kuljetusverkostossa

kandidaatintyö
15.5.2015

Joonas Lanne

Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla.
Muilta osin kaikki oikeudet pidätetään.

Tekijä Joonas Lanne

Työn nimi Kustannustehokkaat riskienhallintatoimenpiteet kuljetusverkostossa

Koulutusohjelma Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma

Pääaine Systeemitieteet

Pääaineen koodi F3010

Vastuuopettaja Prof. Ahti Salo

Työn ohjaaja(t) TkT Eeva Vilkkumaa

Päivämäärä 15.5.2015

Sivumäärä 17+3

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Monia kriittisen infrastruktuurin järjestelmiä, kuten sähkön-, lämmön- ja kaasunjakeluverkostoja voidaan mallintaa kuljetusverkostoina, joiden tehtävänä on toimittaa hyödykkeitä ja palveluja asiakkaille. Kuljetusverkoston osat ovat usein alttiita esimerkiksi poikkeuksellisten sääilmiöiden tai teknisten virheiden aiheuttamille vikaantumisille. Jos vikaantumisten seurauksena kaikkien asiakkaiden kysyntää ei saada tyydytettyä, verkoston suorituskyky alenee.

Verkoston kykyä suojautua vikaannuttavia tapahtumia vastaan ja palautua ennalleen vikaannuttavan tapahtuman sattuessa kutsutaan resilienssiksi. Resilienssiä voidaan parantaa riskienhallintatoimenpiteillä, jotka vahvistavat verkostoa ja joiden seurauksena verkosto voi vikaantumisen jälkeen jatkaa operatiivista toimintaansa nopeammin. Toimenpiteet ovat kuitenkin usein kalliita, ja niiden yhteisvaikutukset resilienssin kannalta ovat vahvasti epälineaarisia.

Tässä työssä kehitetään malli kustannustehokkaiden toimenpideyhdistelmien eli -portfolioiden valintaan, kun toimenpiteillä voidaan (i) pienentää kuljetusverkon yksittäisten osien vikaantumistodennäköisyyksiä ja (ii) lyhentää osien korjausaikaa. Mallin avulla voidaan tunnistaa sellaiset toimenpideportfoliot, joiden avulla verkoston keskimääräinen suorituskyky on tarkastellulla aikavälillä mahdollisimman suuri, kun toimenpideportfolion kokonaiskustannusta rajoittaa tietty budjetti. Mallia havainnollistetaan esimerkinomaisella sähkönjakeluverkostolla. Malli on kuitenkin riittävän geneerinen tukeakseen kustannustehokasta riskienhallintatoimenpiteiden valintaa myös muille kriittisille infrastruktuureille, joiden tehtävänä on välittää hyödykkeitä tai palveluja tehokkaasti asiakkaille.

Avainsanat Kustannustehokkuusanalyysi, portfoliovalinta, kriittiset infrastruktuurit, kuljetusverkostot.

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Kirjallisuuskatsaus	2
3	Mallinnusviitekehys	3
3.1	Verkostomalli	3
3.2	Vikaantumiset verkostossa	5
3.3	Riskienhallintatoimenpiteet ja suorituskyky	6
3.4	Optimaalisten toimenpideportfolioiden laskeminen	7
4	Numeerinen esimerkki	10
5	Johtopäätökset	15

1 Johdanto

Kriittiset infrastruktuurit voidaan määritellä sellaisiksi fyysisiksi tai virtuaalisiksi systeemeiksi, jotka ovat yhteiskunnan kannalta niin elintärkeitä, että niiden vikaantumisella on yleistä turvallisuutta, taloudellista toimivuutta, terveyttä tai turvallisuutta heikentävä vaikutus (Moteff ja Parfomak, 2004). Yhdysvaltain Homeland Security -virasto määrittelee yhteiskunnan kannalta kriittisiksi infrastruktuureiksi maatalouden, pankkitoiminnan, kemianteollisuuden, maanpuolustuksen, hätä- ja ensiapupalvelut, energiaverkostot, ruoanjakelun, hallituksen, informaatio- ja puhelinyhteydet, posti- ja lähetyspalvelut, julkisen terveydenhuollon, kuljetusverkot ja vedenjakelun (Brown et al., 2006).

Edellä kuvatun kaltaisia infrastruktuureja voidaan usein mallintaa verkostoilla, joissa solmut on yhdistetty toisiinsa kaarilla. Verkoston komponenttien välisiin yhteyksiin kohdistuu usein joitakin fyysikaalisia tai taloudellisia rajoitteita, kuten maksimivirtaus putkessa (Alderson et al., 2014). Verkostomallin kaarilla kuvataan kaikki mahdolliset yhteydet solmujen välillä ja kaarien rajoittavat ominaisuudet kuvataan asettamalla niille maksimivirtaukset. Edellä mainituissa modernin yhteiskunnan systeemeissä tilanne voisi olla sähkönjakeluverkosto, jossa voimalaa mallinnetaan verkoston lähteenä ja se on yhdistetty kaarilla jakelukeskuksia kuvaaviin verkoston nieluihin tai muihin solmuihin.

Kriittistä infrastruktuuria kuvaavan verkoston solmut tai kaaret voivat vikaantua esimerkiksi poikkeuksellisen sääilmiön, teknisen vian tai ilkeivallan seurauksena. Tällaiset vikaantumiset alentavat tyypillisesti verkoston suorituskykyä, jota voidaan mitata esimerkiksi sähkönjakeluverkoston tapauksessa tarkastelemalla kokonaiskysynnän täyttöastetta. Verkoston vikojen sietokykyä kutsutaan resilienssiksi, ja sitä voidaan mallintaa esimerkiksi tarkastelemalla systeemin kokonaissuorituskyvyn alenemista tai aikaa, jossa sen suorituskyky palautuu normaalille tasolle (Omer et al., 2012). Verkoston resilienssiä voidaan parantaa erilaisilla riskienhallintatoimenpiteillä, kuten solmujen vikaantumistodennäköisyyksiä pienentämällä tai niiden vikaantumisaikoja lyhentämällä. Riskienhallintatoimenpiteiden kustannustehokas valinta on kuitenkin tyypillisesti hankalaa, sillä (i) erilaisia toimenpideyhdistelmiä eli -portfolioita on toimenpiteiden lukumäärään suhteutettuna eksponentiaalinen määrä ja (ii) toimenpiteiden vaikutus verkoston resilienssiin on vahvasti epälineaarinen.

Tässä työssä kehitetään analyttinen malli, jonka avulla voidaan valita kustannustehokkaat riskienhallintatoimenpideportfoliot kuljetusverkostossa, jos-

sa tavoitteena on täyttää eri solmujen kysynät kaarien virtausta rajoittavien maksimikapasiteettien puitteissa. Erityisesti keskitytään tarkastelemaan toimenpiteitä, joilla voidaan joko (i) pienentää verkoston solmujen vikaantumistodennäköisyyttä tai (ii) lyhentää vikaantuneen solmun korjausaikaa. Mallin käyttöä esitellään numeerisen esimerkin avulla.

Työn rakenne on seuraavanlainen. Luvussa 2 tarkastellaan aiheesta kirjoitettua kirjallisuutta ja aiempia lähestymistapoja. Luvussa 3 esitellään verkostomalli, jonka käyttöä havainnollistetaan numeerisen esimerkin valossa luvussa 4. Luvussa 5 tehdään johtopäätökset ja pohditaan mallin käyttötarkoituksia, rajauksia ja laskennallisia haasteita.

2 Kirjallisuuskatsaus

Verkostojen riskejä ja niiden resilienssiä sekä niiden tarkasteluun vaadittavia työkaluja on tutkittu laajasti vuosituhanen alusta lähtien. Perinteiset menetelmät pyrkivät löytämään mahdollisimman luotettavia verkostorakenteita siten, että solmujen väliset yhteydet säilyvät mahdollisimman hyvinä vikaannuttavan tapahtuman jälkeen (Latora ja Marchiori, 2005), (Israeli ja Wood, 2002). Tämänkaltaisissa menetelmissä verkostorakenteiden luotettavuutta mitataan solmujen välisten yhteyksien määrällä tai niiden pituuksilla.

Vaikka verkostorakenteiden tarkastelu antaa mielenkiintoisia tuloksia rakenteiden suunnittelusta, niistä on vain vähän hyötyä tilanteisiin, joissa verkoston rakennetta on liian kallista muuttaa. Lisäksi solmujen välisten yhteyksien tarkasteleminen saattaa olla toimiva menetelmä muun muassa tietoliikenneverkkojen luotettavuuden mittaamiseen, mutta se voi olla riittämätön mittari tarkasteltaessa verkostoja, joiden tehtävänä on välittää hyödykkeitä ja palveluita tehokkaasti asiakkaille (Scaparra ja Church, 2008).

Kuljetusverkostoissa hyödykkeet tai palvelut liikkuvat kaaria pitkin nielusolmuihin, joiden kysyntä pyritään täyttämään. Kuljetusverkostojen luotettavuuden arviointiin sopii paremmin kokonaiskysynnän odotusarvoinen täyttöaste. Omer et al. (2012) esimerkiksi tarkastelevat kokonaiskysynnän täyttöastetta kuljetusverkostoissa, joissa hyödykkeet liikkuvat meriteitse satamien välillä. Toimintakyvytön satama ei voi vastaanottaa rahtialuksien toimittamia hyödykkeitä riippumatta yhteyksien pituuksista ja niiden määrästä. Toimintakyvyn alenema ei pelkästään vähennä yhteyksien määrää vaan myös pidentää aikaa, jonka kuluessa hyödykkeet tai palvelut saadaan kuljetettua. Tämä alentaa kokonaiskysynnän täyttöastetta.

Kuljetusverkostoihin liittyvät vikaantumistapahtumat voivat johtua esimerkiksi älykkään vastapuolen verkostoon kohdistamista hyökkäyksistä. Tällaisilta hyökkäyksiltä suojautumisen tueksi on kehitetty peliteoreettinen malli (Brown et al., 2006). Tässä työssä rajoitutaan kuitenkin tarkastelemaan yleisimpiä tahattomia vaurioita, kuten komponenttien hajoamiset, poikkeukselliset sääilmiöt ja inhimilliset virheet (Murray, 2013).

Systeemin sietokykyä vikaantumisia vastaan voidaan kuvata resilienssillä. Omer et al. (2012) määrittelevät systeemin resilienssin sen kyvyksi ottaa vastaan vikaannuttava tapahtuma ja järjestäytyä uudelleen muutoksen jälkeen saavuttaakseen alkuperäistä vastaavan toiminnallisuuden, rakenteen ja tasapainon. Resilientin systeemin kokemalla vikaantumistapahtumalla on vähäinen vaikutus systeemin toimintoihin (Alderson et al., 2014). Murray (2013) tarkastelee kuljetusverkoston resilienssiä sen läpi kulkevan maksimivirtauksen avulla, jolloin vikaantumisten aiheuttamat alenemat maksimivirtauksessa vaikuttavat kokonaiskysynnän täyttöön. Tässä työssä tarkastellaan kuljetusverkostoja, joiden resilienssin mittarina käytetään sen odotusarvoista kokonaiskysynnän täyttöastetta.

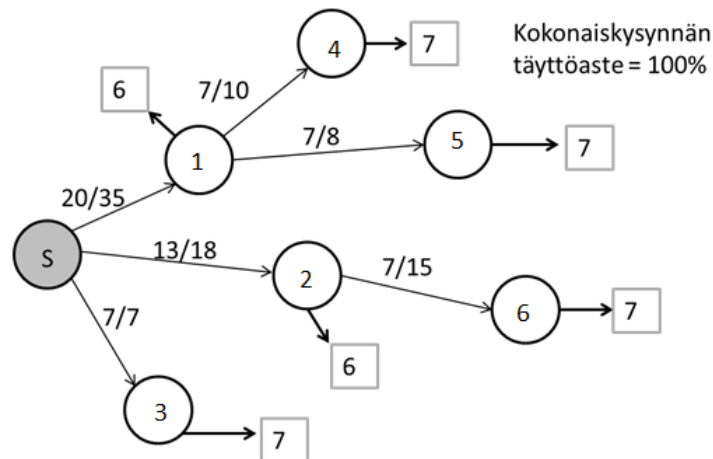
Resilienssiä voidaan parantaa toimenpiteillä, jotka vahvistavat systeemiä ja joiden seurauksena systeemi voi vaurioitumisen jälkeen jatkaa operatiivista toimintaansa nopeammin (Omer et al., 2012). Vugrin et al. (2009) mittaavat systeemin resilienssiä todennäköisyydellä, jolla sen suorituskyky on riittävällä tasolla jonkin ajan kuluttua vikaantumisesta. Tässä asetelmassa verkoston resilienssiä voidaan parantaa pienentämällä yksittäisten solmujen korjaamisaikoja. Kangaspunta ja Salo (2014) kehittävät menetelmän, jonka avulla voidaan tarkastella eri vikaantumistapahtumien vaikutuksia kuljetusverkoston resilienssiin. Tällä menetelmällä voidaan löytää kustannustehokkaat riskienhallintatoimenpideportfoliot eli yhdistelmät yksittäisten solmujen vikaantumistodennäköisyyksiä pienentävistä riskienhallintatoimenpiteistä. Tässä työssä tätä menetelmää laajennetaan ottamalla huomioon myös sellaiset toimenpiteet, joilla solmujen korjaamisaikaa voidaan lyhentää.

3 Mallinnusviitekehys

3.1 Verkostomalli

Tarkastellaan verkostoa $G(V, E)$, joka koostuu solmuista $V = \{S, 1, \dots, n\}$ ja suunnatuista kaarista $E \subseteq \{(i, j) | i, j \in V\}$. Tässä solmu S on lähde ja solmujoukko $W \subseteq \{1, \dots, n\}$ on nieluja. Solmujen kysynnat ovat d_i ja

$d_i = 0, \forall i \in V \setminus W$. Virtausmuuttuja f_{ij} kuvaa virtausta kaarella (i, j) , ja sitä rajoittaa kyseisen kaaren maksimikapasiteetti r_{ij} . Esimerkki verkostosta nähdään kuvassa 1. Kaarien maksimikapasiteetit ja niiden optimaaliset virtaukset on esitetty kaarien vieressä ja solmuista ulospäin suuntautuvat neliöt kuvaavat solmujen kysyntöjä.

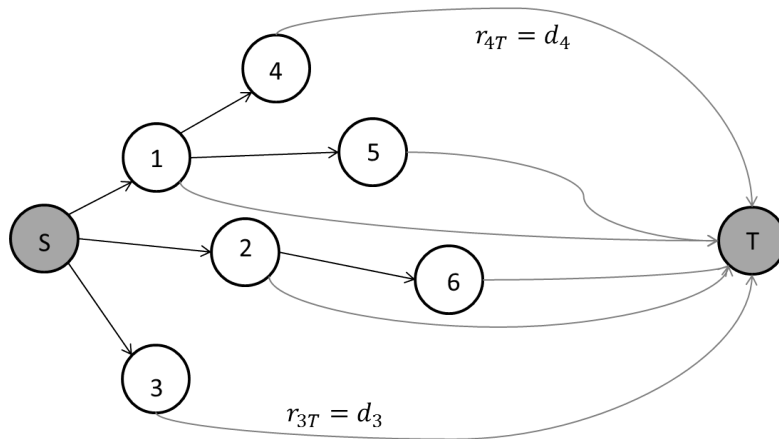


Kuva 1: Esimerkkiverkosto

Solmujen kysynnän täyttävä virtaus voidaan ratkaista määrittelemällä jokaisesta solmusta $i \in \{1, \dots, n\}$ kaari (i, T) keinotekoiseen loppusolmuun T ja asettamalla jokaisen kaaren kapasiteettirajoitteeksi sen alkupisteenä olevan solmun kysyntä ($r_{iT} = d_i$). Solmujen yhdistäminen loppusolmuun T tapahtuu kuten kuvassa 2. Verkoston $G(V, E)$ suurin mahdollinen kokonaiskysynnän täyttö saadaan maksimoimalla loppusolmuun T virtaavien hyödykkeiden tai palveluiden määrää, kun solmuihin $\{1, \dots, n\}$ tuleva ja sieltä lähtevä virtaus rajoitetaan yhtä suuriksi. Kokonaiskysynnän täytön maksimointi voidaan muotoilla LP-tehtävänä (1).

$$\begin{aligned}
 \max_f F(G(V, E)) &= \sum_{i=1}^n f_{iT} \\
 \text{s.t. } 0 &\leq f_{ij} \leq r_{ij}, \quad i, j \in V \\
 0 &\leq f_{iT} \leq d_i, \quad i \in V \\
 f_{Sj} + \sum_{i \neq j} f_{ij} &= \sum_{k \neq j} f_{jk} + f_{jT}, \quad j \in V
 \end{aligned} \tag{1}$$

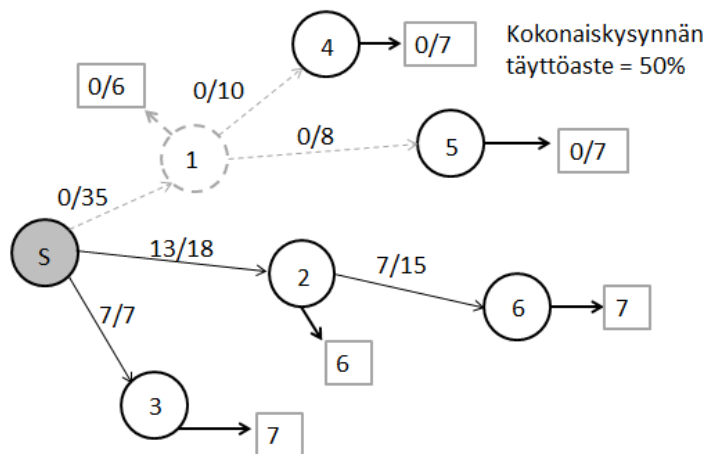
Tämän maksimivirtaustehtävän ratkaisemiseen käytetään valmista ratkaisumenetelmää (Boykov ja Kolmogorov, 2004).



Kuva 2: Loppusolmu T

3.2 Vikaantumiset verkostossa

Oletetaan, että solmut $\{1, \dots, n\}$ voivat vikaantua toisistaan riippumatta todennäköisyyksillä $p = [p_1, \dots, p_n]$, $p_i \in [0, 1] \forall i$. Vikaantuneen solmun korjaamiseen kuluu kaikille solmuille sama aika $\Delta t_i = \Delta t \forall i$. Vikaantumisia voidaan kuvata binäärisellä vektorilla $z(h) = [z_1(h), \dots, z_n(h)]$, missä $h \subseteq V$ on vikaantuneiden solmujen muodostama joukko ja $h_i = 1$ jos ja vain jos solmu i on vikaantunut. Vikaantunut verkosto on tällöin $G(V', E')$, missä $V' = V \setminus h$ ja $E' = E \setminus \{(i, j) | i \in h \vee j \in h\}$. Solmun 1 vikaantuessa kuvan 1 esimerkiverkosto on kuten kuvassa 3.



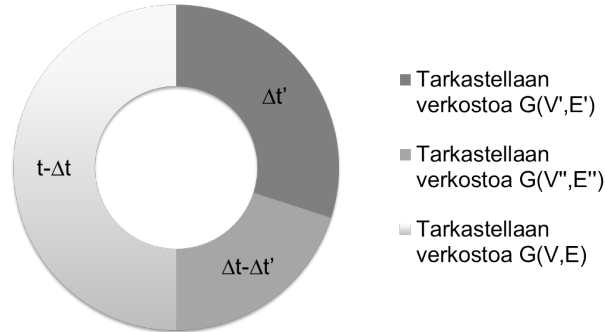
Kuva 3: Verkoston vikaantumiset

Verkoston $G(V', E')$ kokonaiskysynnän täyttöaste voidaan laskea vertaamalla vikaantuneen verkoston kysynnän täyttöä $F(G(V', E'))$ sellaisen verkoston kysynnän täyttöön $F(G(V, E))$, jonka yksikään solmu ei ole vikaantunut. Kuvan 3 esimerkkiverkoston kokonaiskysynnän täyttöaste on 50%.

3.3 Riskienhallintatoimenpiteet ja suorituskyky

Tarkastellaan tilannetta, jossa verkostolle voidaan tehdä kahdenlaisia riskienhallintatoimenpiteitä: (i) solmujen vikaantumistodennäköisyyksiä voidaan pienentää p_i :stä p'_i :hin ja (ii) solmujen korjausaikaa voidaan lyhentää Δt :stä $\Delta t'$:hen. Toimenpiteet muodostavat binäärisen portfolion $y = [y_1, \dots, y_{2n}]$, jossa indeksit $i = 1, \dots, n$ kuvaavat toimenpiteitä (i) ja indeksit $i = n + 1, \dots, 2n$ toimenpiteitä (ii) siten, että $y_i = 1$, jos ja vain jos toimenpide i on valittu portfolioon. Riskienhallintatoimenpideportfolion kustannukset koostuvat yksittäisten toimenpiteiden kustannuksista $c_i, i = 1, \dots, 2n$. Valitun toimenpideportfolion kokonaiskustannus ei saa ylittää budjettia b . Riskienhallintatoimenpiteillä vahvistetussa verkostossa $G(V, E)$ solmun i vikaantumistodennäköisyys on p_i , jos $y_i = 0$ ja $p'_i \leq p_i$, jos $y_i = 1$. Solmun i korjaamisaika on Δt , jos $y_{n+i} = 0$ ja $\Delta t' \leq \Delta t$, jos $y_{n+i} = 1$.

Olkoon $G(V, E) =: G$ verkosto, jonka solmuja on vahvistettu toimenpideportfoliolla y , ja jonka vikaantuneita solmuja kuvataan joukolla $h \subseteq V$. Ne vikaantuneet solmut, joiden korjaamisaikaa ei ole lyhennetty toimenpiteillä, muodostavat joukon $h' = h \setminus \{i | y_{n+i} = 1\}$. Tarkastellaan aikaikkunaa $t \geq \Delta t$, jonka alussa hetkellä $t = 0$ solmujoukko h vikaantuu. Tällöin aikavälillä $[0, \Delta t']$ toimiva verkosto on $G(V', E') =: G'$, missä $V' = V \setminus h$ ja $E' = E \setminus \{(i, j) | i \in h \vee j \in h\}$. Aikavälillä $[\Delta t', \Delta t]$ toimivaan verkostoon sisältyvät ne solmut, joiden korjaamisaikaa on lyhennetty. Merkitään tätä verkostoa $G(V'', E'') =: G''$, missä $V'' = V \setminus h'$ ja $E'' = E \setminus \{(i, j) | i \in h' \vee j \in h'\}$. Aikavälillä $[\Delta t, t]$ kaikki hetkellä $t = 0$ vikaantuneet solmut on korjattu ja toimiva verkosto on G . Mallin aikaikkunaa havainnollistetaan kuvassa 4.



Kuva 4: Mallin aikaikkuna

Kokonaiskysynnän täyttöaste $\tilde{F}(G, h, y)$ saadaan vertaamalla näiden kolmen aikavälin kokonaiskysynnän täyttöjen painotettua keskiarvoa virheettömästi toimivan verkoston G kysynnän täyttöön. Tehtävän askeleet on muotoiltu algoritmissa 1. Mallin parametrit ja muuttujat on kerätty taulukkoon 1.

Algoritmi 1 Max flow -tehtävän ratkaiseminen

- 1: $F(G', h)$: Ratkaistaan (1) verkostolle $G(V', E')$.
 - 2: $F(G'', h, y)$: Ratkaistaan (1) verkostolle $G(V'', E'')$.
 - 3: $F(G)$: Ratkaistaan (1) verkostolle $G(V, E)$.
 - 4: $\tilde{F}(G, h, y) = \frac{\Delta t' F(G', h) + (\Delta t - \Delta t') F(G'', h, y) + (t - \Delta t) F(G)}{t F(G)}$
-

3.4 Optimaalisten toimenpideportfolioiden laskeminen

Vikaantumiskombinaatioiden määrä kasvaa eksponentiaalisesti solmujen määrän kasvaessa, jolloin laskenta-aika pitenee merkittävästi tuottaen vain vähän lisäarvoa huomioimalla kaikkein epätodennäköisimmät kombinaatiot. Mahdollisten vikaantumiskombinaatioiden määrä n solmusta koostuvassa verkostossa on 2^n . Rajataan kaikkein epätodennäköisimmät vikaantumiskombinaatiot tarkastelun ulkopuolelle asettamalla vikaantumisten lukumäärälle yläraja $|\mathbf{h}| = \sum_{i=1}^n z_i(h) \leq u$. Tällöin erilaisia vikaantumiskombinaatioita on yhteensä $M = \sum_{l=1}^u \binom{n}{l}$ kappaletta. Näitä vikaantumiskombinaatioita

Taulukko 1: Mallissa käytetyt notaatiot

n	:	Solmujen lukumäärä verkostossa
d_i	:	Solmun i kysyntä
r_{ij}	:	Kaaren (i, j) kapasiteettirajoite
f_{ij}	:	Kaaren (i, j) läpi kulkeva virtaus
h	:	Vikaantuneiden solmujen muodostama joukko
$z(h)$:	Vikaantumisjoukkoa h kuvaava binäärinen vektori
u	:	Yläraja riittävän todennäköisten vikaantumiskombinaatioiden vikaantumisten lukumäärälle
p_i	:	Vahvistamattoman solmun vikaantumistodennäköisyys
p'_i	:	Vahvistetun solmun vikaantumistodennäköisyys
Δt	:	Vahvistamattoman solmun korjaamisaika
$\Delta t'$:	Vahvistetun solmun korjaamisaika
y	:	Riskienhallintatoimenpiteitä kuvaava binäärinen vektori
c_i	:	Riskienhallintatoimenpiteen i kustannus
t	:	Valitun aikaikkunan pituus
$F(G, h, y)$:	Kokonaiskysynnän täyttö verkostolle $G(V, E)$
$\tilde{F}(G, h, y)$:	Kokonaiskysynnän keskimääräinen täyttöaste verkostolle $G(V, E)$ aikaikkunan t yli
b	:	Budjettirajoite

Riskienhallintatoimenpideportfolio

$$\begin{aligned}
 y_{1,\dots,n} &= \begin{cases} 1, & \text{jos solmun } i \text{ vikaantumistodennäköisyyttä pienennetään} \\ 0, & \text{muuten} \end{cases} \\
 y_{n+1,\dots,2n} &= \begin{cases} 1, & \text{jos solmun } i \text{ korjaamisaikaa lyhennetään} \\ 0, & \text{muuten} \end{cases}
 \end{aligned}$$

$h^m, m = 1, \dots, M$ kuvataan binäärisillä vektoreilla $z(h^m)$. Vikaantumiskombinaation h^m todennäköisyys riskienhallintatoimenpideportfoliolla y vahvistetussa verkostossa voidaan laskea kaavalla (2)

$$P(h^m, y) = \prod_{i=1}^n [z_i(h^m)(p_i(1-y_i)+p'_i y_i) + (1-z_i(h^m))((1-p_i)(1-y_i)+(1-p'_i)y_i)]. \quad (2)$$

Vikaantumiskombinaation todennäköisyys on tulo yksittäisten solmujen todennäköisyyksistä olla vikaantumiskombinaation osoittamassa tilassa. Jos solmulle ei ole valittu vikaantumistodennäköisyyttä vahvistavaa toimenpidettä, sen vikaantumistodennäköisyys on p_i ja toimimistodennäköisyys on $1 - p_i$. Jos solmulle on valittu vikaantumistodennäköisyyttä vahvistava toimenpide, sen vikaantumistodennäköisyys on p'_i ja toimimistodennäköisyys on $1 - p'_i$.

Kokonaiskysynnän odotusarvoinen täyttöaste $\mathbb{E}_h[\tilde{F}(G, h, y)]$ portfoliolla y vahvistetussa verkostossa on tällöin

$$\mathbb{E}_h[\tilde{F}(G, h, y)] = \sum_{m=1}^M P(h^m, y) \tilde{F}(G, h^m, y). \quad (3)$$

Ratkaisumenetelmä on muotoiltu algoritmiksi 2.

Algoritmi 2 Odotusarvoisen kysynnän täyttöasteen laskeminen

- 1: Muodostetaan vikaantumiskombinaatiot h^1, \dots, h^M .
 - 2: **for** $m = 1$ to M **do**
 - 3: Lasketaan $\tilde{F}(G, h^m, y)$ vikaantumiskombinaatiolle h^m algoritmillä 1.
 - 4: Lasketaan $P(h^m, y)$ käyttäen kaavaa (2).
 - 5: **end for**
 - 6: Lasketaan $\mathbb{E}_h[\tilde{F}(G, h, y)]$ käyttämällä kaavaa (3).
-

Tehtävän lopullinen muoto on löytää kokonaiskysynnän odotusarvoisen täyttöasteen $\mathbb{E}_h[\tilde{F}(G, h, y)]$ maksimoiva portfolio y , kun budjettirajoitteena on b . Tehtävä on formuloitu esityksessä (4).

$$\begin{aligned} \max_y \quad & \mathbb{E}_h[\tilde{F}(G, h, y)] \\ \text{s.t.} \quad & \sum_i^{2n} c_i y_i \leq b \end{aligned} \quad (4)$$

Tehtävä 4 ratkaistaan luomalla ensin kaikki mahdolliset portfoliot y^k budjettirajoitteiden puitteissa. Näistä poistetaan ne, jotka eivät hyödynnä budjettia tehokkaasti; toisin sanoen sellaiset portfoliot y^k , joihin voitaisiin lisätä jokin toimenpide y_i^k ylittämättä budjettirajoitetta. Odotusarvoiset kokonaiskysynnän täyttöasteet lasketaan kullekin käyvälle portfoliolle ja näiden joukosta etsitään kokonaiskysynnän odotusarvoisen täyttöasteen maksimoivat ratkaisut. Tehtävän ratkaisu on esitetty algoritmossa 3.

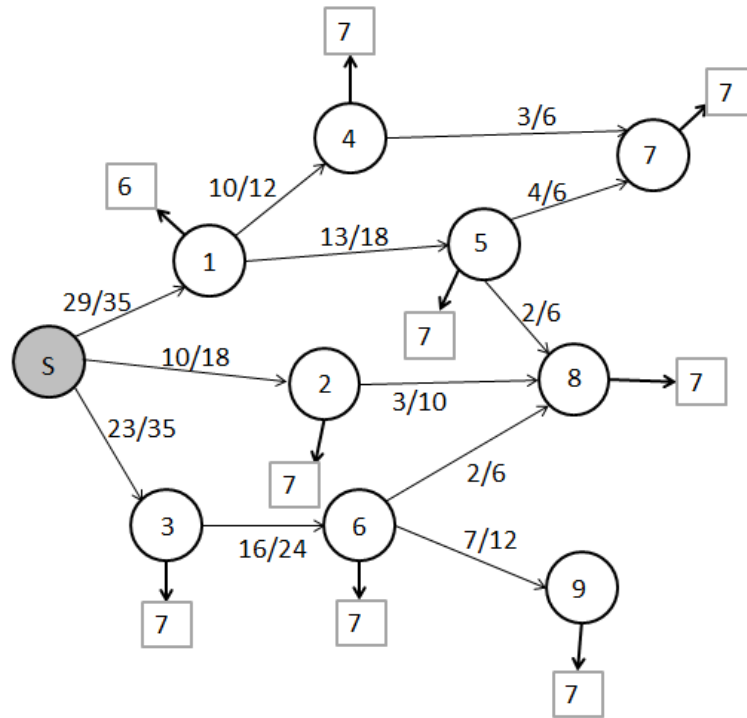
Algoritmi 3 Portfolio-optimointi

- 1: Muodostetaan käyvät portfoliot y^1, \dots, y^K
 - 2: **for** $k = 1$ to K **do**
 - 3: Lasketaan $\mathbb{E}_h[\tilde{F}(G, h, y^k)]$ algoritmilla 2.
 - 4: **end for**
 - 5: Etsitään optimaaliset portfoliot y^* , jotka maksimoivat kokonaiskysynnän odotusarvoisen täyttöasteen.
-

Algoritmin 3 tuloksena saadaan jokaiselle budjettitasolle optimaaliset riskienhallintatoimenpideportfoliot y^* ja niitä vastaavat kokonaiskysynnän täyttöasteet. Optimiratkaisut muodostavat Pareto-optimaalisen joukon, jossa kokonaiskysynnän odotusarvoista täyttöastetta ei voida parantaa kasvattamatta budjettia.

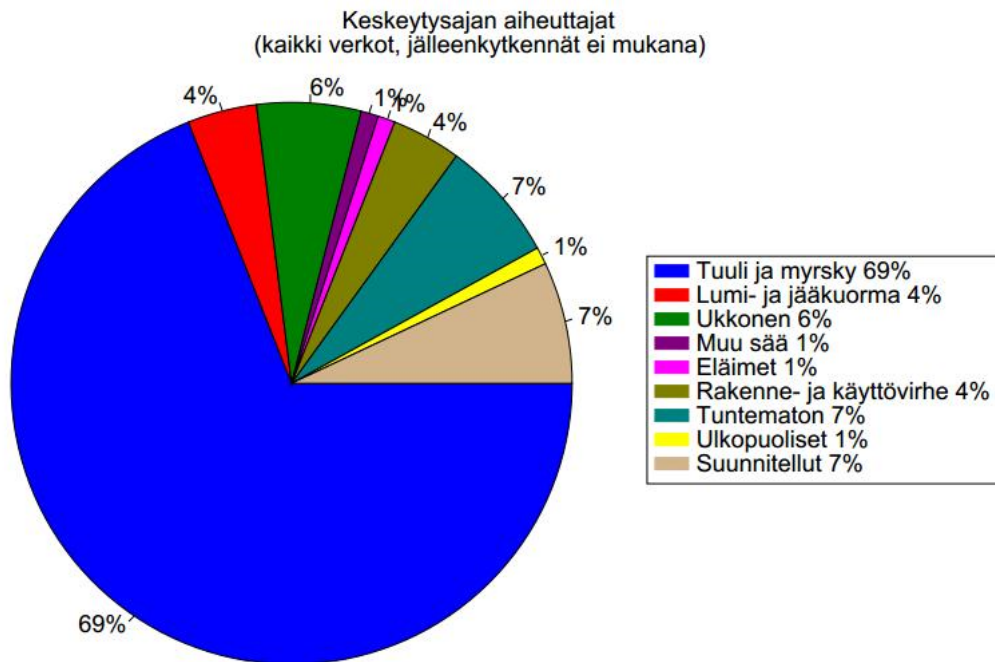
4 Numeerinen esimerkki

Mallia havainnollistetaan esimerkinomaisella sähkönjakeluverkostolla, jonka tehtävänä on välittää energiaa asiakkaille. Sähkönjakeluverkoston lähde on voimala ja nielut ovat jakelukeskuksia, joiden kautta energia toimitetaan asiakkaille. Kuvassa 5 esitetyssä verkostossa on yksi lähde S ja yhdeksän nielua. Kaarien kapasiteetit ja optimivirtaukset on ilmoitettu numeroilla niiden vieressä.

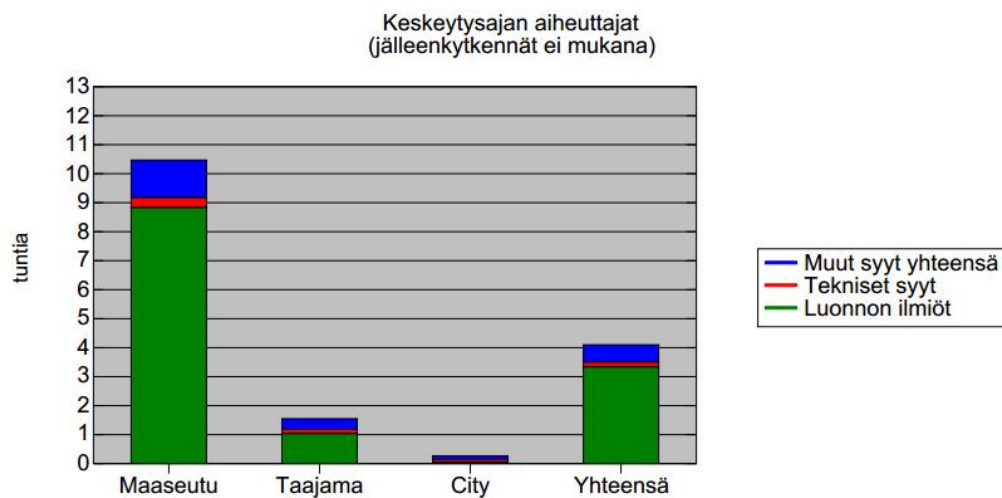


Kuva 5: Numeerisen esimerkin verkostomalli

Kuvassa 6 nähdään sähkökatkoihin johtaneiden vikaantumisten yleisimmät aiheuttajat Suomessa (Energiateollisuus, 2013). Kuvan perusteella suurin osa sähköjakeluverkoston vikaantumisista johtuu luonnonilmiöistä, kuten tuuli, myrsky ja ukkonen. Kuvassa 7 nähdään erilaisten vikaantumisten aiheuttamat vuosittaiset katkosajat (Energiateollisuus, 2013). Näitä tietoja voidaan käyttää mallin parametrivalinnan tukena.



Kuva 6: Vikaantumisten aiheuttajat



Kuva 7: Vikaantumisaajat

Oletetaan solmujen vikaantumistodennäköisyydet identtisiksi. Yksittäisen solmun vikaantumistodennäköisyys voidaan laskea Energiateollisuuden tilastoista saatavien vikaantumisaikojen avulla (kuva 7). Esimerkiksi maaseudulla vuosittainen vikaantumisaika on noin kymmenen tuntia, jolloin sähkökatkoksen todennäköisyyden voidaan arvioida olevan $p = 10h / (24h \times$

365) $\approx 0.1\%$. Vikaantumistodennäköisyyttä voidaan pienentää muun muassa maakaapeloinnilla. Vikaantumistodennäköisyyden valitaan tässä pienentyvän 50% toimenpiteiden seurauksena, eli $p' = 0.05\%$. Näin pienillä vikaantumistodennäköisyyksillä enintään kolmen vikaantumistapahtuman todennäköisyys kattaa 99.9% tapauksista; valitaan näin ollen $|\mathbf{h}| \leq u = 3$. Yhden solmun vikaantumistodennäköisyyden pienentämisen kustannus on 100 yksikköä.

Valitaan yksittäisen solmun korjausajaksi alkutilanteessa $\Delta t = 0.5t$ ja esimerkiksi henkilöstö- ja kalustoinvestoinneilla vahvistetussa verkostossa $\Delta t' = 0.3t$. Tällöin toimenpiteillä voidaan lyhentää korjausaikaa 40%. Solmun korjaamisajan lyhentämisen kustannus on 50 yksikköä.

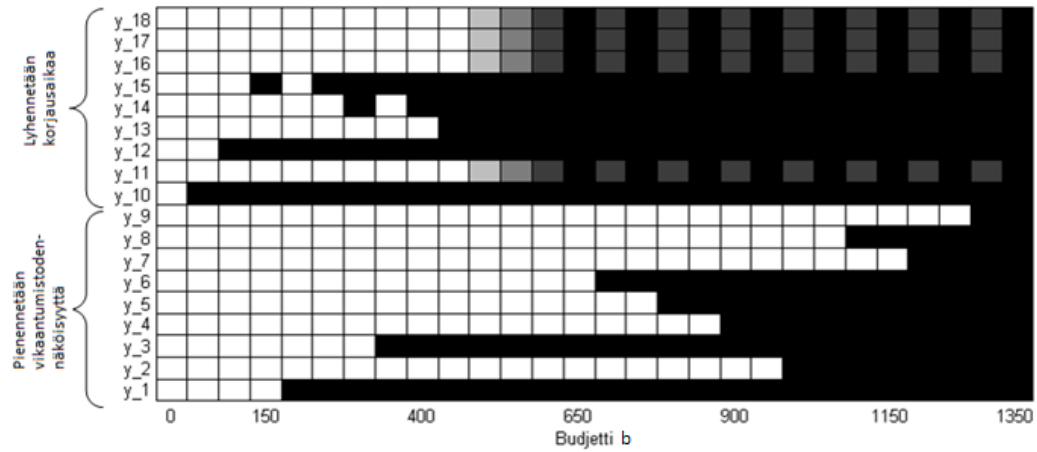
Optimointialgoritmi suoritetaan vaihtelemalla budjettirajoitusta 50 yksikön välein, jolloin kaikki mahdolliset kokonaiskustannukset saadaan huomioitua Pareto-optimaalisia portfolioita määriteltäessä. Mallin parametrit esimerkinomaisen sähköjakeluverkoston tapauksessa on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2: Numeerisen esimerkin parametrit

p	=	0.1%
p'	=	0.05 %
Δt	=	0.5
$\Delta t'$	=	0.3
c_i	=	100 $i = 1, \dots, 9$
c_i	=	50 $i = 10, \dots, 18$
t	=	1
b_k	=	$50k, k = 0, \dots, 27$

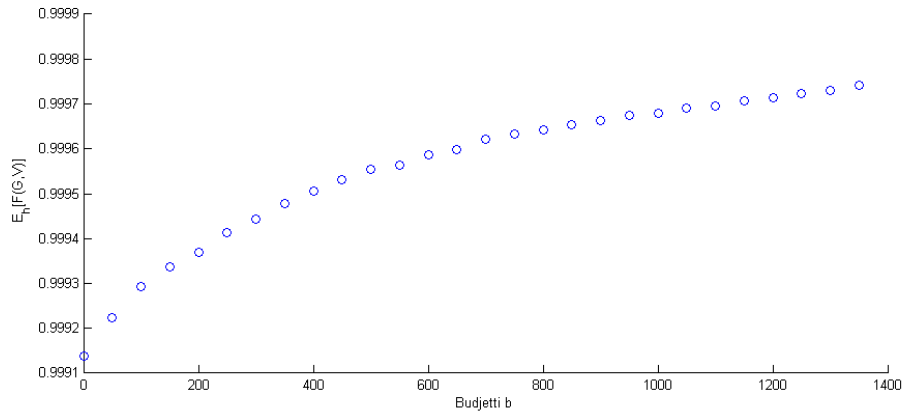
Optimaaliset portfoliot on esitetty kuvaajassa 8, jossa pystyakselilla on toimenpiteet ja vaaka-akselilla budjetit. Toimenpiteen ja budjettitason määrittämän ruudun sävy vastaa sitä osuutta Pareto-optimaalisista portfolioista, joissa kyseinen toimenpide on mukana vaaka-akselin osoittamalla budjettitasolla. Jos sävy on musta, toimenpide on mukana kaikissa Pareto-optimaalisissa portfolioissa ja jos se on valkoinen, se ei ole mukana yhdessäkään. Harmaan värin osoittamat toimenpiteet ovat mukana joissakin, mutteivät kaikissa Pareto-optimaalisissa portfolioissa. Tuloksista nähdään, että verkoston alkupään solmut pyritään vahvistamaan ensin. Solmujen 1 ja 3 kautta kulkee suurimmat sähkövirrat ja esimerkiksi solmut 4,5 ja 7 riippuvat täysin solmusta 1. Toimenpiteet y_1, y_{10} ja y_{12} , jotka vastaavat solmun 1 vikaantumistodennäköisyyden pienentämistä sekä solmujen 1 ja 3 korjaamisajan lyhentämistä otetaan ensimmäisinä mukaan. Verkoston päätesolmuja

7,8 ja 9 vahvistavat toimenpiteet $y_7, y_8, y_9, y_{16}, y_{17}$ ja y_{18} valitaan vain hyvin suurilla budjettitasoilla.



Kuva 8: Optimaaliset portfoliot

Optimaalisilla portfolioilla vahvistettujen verkostojen kokonaiskysynnän odotusarvoiset täyttöasteet on esitetty kuvaajassa 9 budjettitason funktiona. Kehitys kokonaiskysynnän odotusarvoisessa täyttöasteessa on vähenevä budjettitason suhteen. Tätä rintamaa tarkastelemalla voidaan esimerkiksi määrittää sellainen budjettitaso, jonka jälkeen kokonaiskysynnän odotusarvoinen täyttöaste ei enää kasva riittävästi lisätyn budjetin seurauksena. Solmujen vikaantumistodennäköisyydet ovat pieniä, jolloin kokonaiskysynnän odotusarvoinen täyttöaste on ilman riskienhallintatoimenpiteitä yli 0.9991. Energiateollisuuden tavoitteena on kuitenkin etteivät yksittäisen asiakkaan sähkökatkot ylittäisi kuutta tuntia vuositasona. Tällöin pieneltäkin vaikuttavat parannukset täyttöasteessa ovat merkittäviä. Kuvan 7 perusteella esimerkiksi 0.0001 suuruinen parannus kokonaiskysynnän odotusarvoisessa täyttöasteessa vähentää vuosittaisia sähkökatkoja noin tunnin verran.



Kuva 9: Pareto-optimaalisten toimenpiteiden avulla vahvistetun verkoston kokonaiskysynnän täyttöaste eri budjettitasoille

5 Johtopäätökset

Tässä työssä on kehitetty analyttinen malli tukemaan kustannustehokaiden riskienhallintatoimenpiteiden valintaa kuljetusverkostojen resilienssin parantamiseksi, kun resilienssillä tarkoitetaan systeemin sietokykyä vikaantumisia vastaan. Työssä on myös kehitetty laskennallinen algoritmi verkoston resilienssin määrittämiseen ja sen parantamiseen käyttäen riskienhallintatoimenpiteitä, joiden kokonaiskustannuksien rajoitteena on yksi budjetti. Mallin tuloksia voidaan käyttää antamaan suosituksia budjetin kustannustehokkaasta käytöstä verkoston odotusarvoisen kokonaiskysynnän täyttöasteen parantamiseksi.

Työssä kehitetty malli on riittävän geneerinen tukeakseen kustannustehokasta riskienhallintatoimenpiteiden valintaa eri tyyppisille kriittisille infrastruktuureille, joiden tehtävänä on välittää hyödykkeitä ja palveluja asiakkaille. Verkoston mallinnuksessa on kuitenkin tehty yksinkertaistuksia, jotka useimmissa tapauksissa poikkeavat hieman todellisuudesta. Ensinnäkin, mallissa huomioidaan vain verkoston solmujen vikaantumiset. Tämä ei kuitenkaan ole rajoittava oletus, sillä kaarien vikaantumiset voitaisiin huomioida muuttaen verkoston rakennetta lisäämällä siihen vikaantumisille alttiita kaaria kuvaavia solmuja (Farley, 2009). Toiseksi, vikaantumistodennäköisyydet on oletettu riippumattomiksi. Vikaantumisilla voisi tosiasiasa olla alueellisia riippuvuuksia esimerkiksi laajan sääilmiön tapahtuessa, jolloin solmun tai kaaren mahdollinen vikaantuminen riippuu muiden komponenttien toimi-

vuudesta. Kolmanneksi, identtiset korjausajat helpottavat mallin aikaikkunan tarkastelua jakaen sen kolmeen osaan, mutta eivät kuvaa todellisuutta täydellisesti. Yksinkertaistuksen voisi ohittaa ratkaisemalla maksimivirtaus-tehtävän erikseen jokaiselle aikavälille, jonka alussa yksikin verkoston solmu korjataan.

Työssä on rajoitettu tarkastelemaan tilannetta, jossa jokaisen verkoston komponentin vikaantumistodennäköisyyttä pienennetään tai korjausaikaa lyhennetään joko noin puolet tai ei ollenkaan. Todellisuudessa voisi olla mahdollista myös valita sellaisia riskienhallintatoimenpiteitä, joilla vikaantumistodennäköisyyden pienentäminen ja korjausajan lyhentäminen voisivat resursien käytöstä riippuen olla muutakin. Suorituskyvyn mittaaminen kokonaiskysynnän täyttöasteella toimii kuljetusverkostojen tapauksessa hyvin, mutta jättää huomioimatta kysynnän täytön epätasaisen jakautumisen ja esimerkiksi sähköjakelun puutoksen aiheuttaman puutteen turvallisuudessa ja hyvinvoinnissa, jota ei välttämättä voi kuvata lineaarisesti kysyntävajeen avulla.

Edellä kuvatut yksinkertaistukset on tehty muun muassa laskennallisista syistä. Laskennallisesta näkökulmasta tarkasteltuna mallin haastellisin osa on verkoston tilojen eksponentiaalisesti kasvava määrä solmujen määrän lisääntyessä. Verkoston, jossa on n solmua, mahdollisten vikaantumiskombinaatioiden määrä on 2^n ja mahdollisten riskienhallintatoimenpideportfolioiden lukumäärä on 4^n . Käymällä läpi kaikki 2^n vikaantumiskombinaatiota ja 4^n portfolioita laskenta-aika olisi arviolta yksi viikko. Rajoittumalla korkeintaan kolmen vikaantumisen muodostamiin kombinaatioihin ja budjetin tehokkaasti käyttäviin portfolioihin laskenta-aika saatiin lyhennettyä 21 tuntiin.

Työn malli luo pohjan pidemmälle vietyjen menetelmien rakentamiseksi, joissa esimerkiksi riskienhallintatoimenpiteisiin voitaisiin sisällyttää myös uusien kaarien rakentamiset. Näiden seurauksena vikaantuneen verkoston solmujen keskinäisen yhtenäisyyden parantaminen johtaisi parempaan resilienssiin.

Viitteet

- D. Alderson, G. Brown, ja W. Carlyle. Assessing and improving operational resilience of critical infrastructures and other systems. *INFORMS Tutorials in Operations Research*, 180-215, 2014.
- Y. Boykov ja V. Kolmogorov. An experimental comparison of min-cut/max-flow algorithms for energy minimization in vision. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26:9, 1124-1137, 2004.
- G. Brown, M. Carlyle, J. Salmerón, ja K. Wood. Defending critical infrastructure. *INFORMS Interfaces*, 36:6, 530-544, 2006.
- Energiäteollisuus. Energiäteollisuuden keskeytystilasto. <http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/>, 2013.
- T. Farley. Network reliability and resilience. *Design of Reliable Communication Networks*, 77-116, 2009.
- E. Israeli ja R. Wood. Shortest-path network interdiction. *Networks*, 40:2, 97-111, 2002.
- J. Kangaspunta ja A. Salo. A resource allocation model for improving the resilience of critical transportation systems. *Manuscript*, 2014.
- V. Latora ja M. Marchiori. Vulnerability and protection of infrastructure networks. *Physical Review E* 71, 1-4, 2005.
- J. Moteff ja P. Parfomak. Critical infrastructure and key assets: Definition and identification. *Library of Congress Washington DC Congressional Research Service*, 4-9, 2004.
- A. Murray. An overview of network vulnerability modeling approaches. *GeoJournal* 78, 209-221, 2013.
- M. Omer, A. Mostashari, R. Nilchiani, ja M. Mansouri. A framework for assessing resiliency of maritime transportation systems. *Maritime Policy and Management: The Flagship Journal of International Shipping and Port Research*, 39:7, 685-703, 2012.
- M. Scaparra ja R. Church. A bilevel mixed-integer program for critical infrastructure protection planning. *Computers and Operations Research* 35, 1905-1923, 2008.
- E. Vugrin, D. Warren, M. Ehlen, ja R. Camphouse. A framework for assessing the resilience of infrastructure and economic systems. *Springer: Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems*, 107-114, 2009.