

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

Kriittisten verkostoinfrastruktuurien toiminnallisuuden arviointi

Lars Östring
Mat-2.4108 Sovelletun matematiikan erikoistyö

Ohjaaja: DI Jussi kangaspunta

Valvoja: Prof. Ahti Salo

Merkinnät ja lyhenteet

$\Phi_t(A)$ verkoston toiminnallisuus hetkellä t

n_i verkoston solmukohta i

(i,j) solmuja i ja j yhdistävä kaari

f_{ij} solmujen i ja j välisen yhteyden virtaus

l_{ij} solmujen i ja j välisen suoran linkin virtauksen minimimäärä

u_{ij} solmujen i ja j välisen suoran linkin virtauksen maksimimäärä

v_{ij} solmujen i ja j välisen yhteyden pienin vasteaika

d_{ij} solmujen i ja j välisen yhteyden lyhimmän reitin pituus

$\langle d \rangle$ verkoston keskimääräinen lyhimmän reitin pituus

E verkoston keskimääräinen liikkumisen tehokkuus

ΔP_L sähköverkoston tehon muutos

K_n sähköverkoston luonnollinen tehonsäätövoima

Δf sähköverkoston taajuuden muutos

Sisältö

1	Johdanto.....	1
1.1	Työn rakenne.....	2
2	Verkostojen toiminnallisuutta kuvaavat tunnusluvut	3
2.1	Verkostot	4
2.2	Sähköverkosto	5
2.2.1	Ominaisuudet	5
2.2.2	Tunnusluvut ja soveltuvuus	6
2.3	Tietoliikenneverkosto.....	8
2.3.1	Ominaisuudet	8
2.3.2	Tunnusluvut ja soveltuvuus	8
2.4	Kuljetusverkosto.....	10
2.4.1	Ominaisuudet	10
2.4.2	Tunnusluvut ja soveltuvuus	11
3	Esimerkkitapaus verkostosta	13
3.1	Alkutilanne	14
3.2	Virhetilanteet ja vaikuttavuus.....	15
4	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	22
5	Lähteet	24
	Liite 1: Kahden vikaantuneen solmun tunnusluvut	26
	Liite 2: Kahden kaaren katkeamisen tunnusluvut	28

1 Johdanto

Häiriötilanteet yhteiskunnan kriittisissä verkostoissa voivat aiheuttaa merkittäviä taloudellisia menetyksiä ja muodostavat myös merkittävän uhan kansallisen turvallisuuden ylläpitämiselle. Tätä korostaa se, että eri verkostojen välissä on merkittäviä riippuvuussuhteita, jolloin yhden verkoston vikaantuminen voi aiheuttaa joko alentunutta käytettävyyttä, vikaantumisriskejä tai suoria käyttökatkoksia myös muissa verkostoissa. Katkokset tietoliikenneverkossa heikentävät merkittävästi sähköverkoston seurattavuutta altistaen sen vikatiloille ja vastaavasti sähköverkoston vikatilanteet vaikuttavat suoraan tietoliikenneverkostoon, jos verkostoa ylläpitävien osien sähköntoimitus häiriintyy tai katkeaa. Vikaantumisten suuren vaikuttavuuden sekä muihin verkostoihin vaikuttavien kerrannaisvaikutusten takia onkin tarpeellista tunnistaa verkoston merkittävimmät vikaantumistapahtumat, jotta niihin pystytään varautumaan. (Valtioneuvosto 2010)

Erikoistyössä tarkastellaan yhteiskunnan kriittisen infrastruktuurin järjestelmien muodostamien verkostojen toiminnallisuuden arviointiin käytettäviä tunnuslukuja. Tunnuslukujen avulla esitetään verkoston toiminnallisuus tarkasteluhetkellä. Työssä vertaillaan myös tunnuslukujen käyttömahdollisuuksia verkoissa tapahtuvien häiriöiden laajuuden arviointiin. Vikatilanteiden laajuuden tunnistamisen auttaa tekemään päätöksiä siitä, miten verkostojen vikaherkkyttä voitaisiin parhaiten vähentää tai miten vikaantumistilanteisiin tulisi reagoida. Jotta tunnuslukujen määrittämisestä on hyötyä, niiden on onnistuttava kuvaamaan verkoston toiminnallisuutta hyvin ja johdonmukaisesti myös erilaisissa virhetilanteissa.

Työssä tehdään katsaus kirjallisuudessa käytettyihin erilaisten verkostojen toiminnallisuutta kuvaaviin tunnuslukuihin sekä pohditaan, miten hyvin ne kuvaavat kyseisen verkoston toiminnallisuutta. Työssä tarkastellaan kolmen erilaisen kriittisen verkoston – sähkönsiirto, tietoliikenne- sekä kuljetusverkoston toiminnallisuudesta kertovia tunnuslukuja. Pohditaan myös, miten eri verkostoja kuvaavat tunnusluvut ovat sovellettavissa eri verkostoihin.

Työssä tutkitaan esimerkkitapauksena rajallisen kokoista verkostoa, josta lasketaan verkoston toiminnallisuutta kuvaavia tunnuslukuja eri vikaskenaarioissa ja pohditaan laskettujen tunnuslukujen hyvyttä verkoston toiminnallisuuden kuvaamisessa. Pohditaan myös, että miten muuten verkoston toiminnallisuutta voitaisiin indikoida vikatilanteissa.

1.1 Työn rakenne

Työn toisessa kappaleessa tehdään katsaus sähkö-, tietoliikenne- sekä kuljetusverkostojen toiminnallisuudesta kertoviin tunnuslukuihin sekä eri verkostojen ominaisuuksiin ja vikatiloihin. Kolmannessa kappaleessa esitetään esimerkkitapaus verkostosta, josta lasketaan edellisessä kappaleessa esitetyt tunnusluvut ja tarkastellaan miten tunnusluvut kertovat vikatilanteista. Neljännessä kappaleessa tehdään työstä yhteenveto ja käydään läpi työn merkittävimmät tulokset.

2 Verkostojen toiminnallisuutta kuvaavat tunnusluvut

Monet yhteiskunnan tärkeimmistä toiminnoista riippuvat erilaisten verkostojen toimintakyvystä. Näihin lukeutuvat mm. sähkönsiirtoverkosto, tietoliikenneverkosto, kuljetusverkosto, yhdyskuntatekniikka ja elintarvikehuolto. Verkostojen toimintakykyyn ja häiriönsietokykyyn on otettu kantaa myös Valtioneuvoston vuonna 2010 muodostamassa yhteiskunnan turvallisuusstrategiassa, jonka mukaan: ”Voimahuollon häiriötön tuotanto ja jakelu ovat koko yhteiskunnan toiminnan ja myös kaiken yhteiskunnan kriittisen toiminnan perusedellytys.” (Valtioneuvosto 2010)

Verkostojen ohjaus- ja valvontajärjestelmät ovat valtaosin tietoliikenteen varassa, joten ongelmat yhdessä näistä järjestelmistä synnyttävät ongelmia myös muissa järjestelmissä. Järjestelmien välinen riippuvuus lisää niiden haavoittuvuutta hyökkäyksille ja merkittävien solukohtien vikaantumisille (Cappaneira ja Scaperra 2011). Erityisesti sähkö- ja tietoliikenneverkostojen riippuvuus toisistaan on lisääntynyt suurentuneen automaation sekä etäseuranta ja hallintajärjestelmien käytön myötä (Raatikainen ja Horsmanheimo 2013).

Jotta yhteiskunnalle merkittävimpien verkostojen toimintakyky voitaisiin taata häiriötilanteissa, verkostojen tulisi olla mahdollisimman vakaita, jolloin paikalliset vikatilanteet eivät vaaranna koko verkoston toimintaa. Investointeja verkostojen parantamiseen ei välttämättä pysytä perustelemaan taloudellisin perustein, koska taloudellisesti merkittävien vikaantumisten todennäköisyydet ovat yleisesti pieniä (Cappaneira ja Scaperra 2011). Tästä syystä lainsäädännön sekä ohjauksen ja valvonnan tulee varmistaa merkittävien verkostojen käytettävyys ja turvallisuus mahdollisimman hyvin kaikille käyttäjille sekä normaali- että poikkeusolosuhteissa. (Valtioneuvosto 2010)

Jotta yksittäisten tai useampien samanaikaisien häiriötilanteiden vaikutukset tunnistetaan paremmin, on tarpeen selvittää häiriöiden vaikutus verkoston toiminnallisuuteen. Merkittävimpien toiminnallisuutta alentavien vikaantumistilanteiden tunnistaminen auttaa tekemään toimenpiteitä, jotka vaikuttavat merkittävimpien vikaantumistilanteiden realisoitumisen todennäköisyyksiin tai vaikutuksiin.

Verkostojen toiminnallisuutta kuvataan erilaisin tunnusluvin, joiden avulla havainnollistetaan erilaisten vikatilanteiden vaikuttavuutta sekä verrataan niitä toisiinsa. Verkostojen toiminnallisuuden mittareilla kuvataan verkoston siirtokapasiteettia

(Crucitti 2004), siirtonopeutta (Crucitti 2004), solmujen saavutettavuutta (Albert ym. 2004) sekä näistä johdettuja tunnuslukuja (Zolfangiri 1994).

Verkoston rakenteesta, kuten solmukohtien ja niitä yhdistävien kaarien jakautumisesta voidaan myös päätellä verkoston haavoittuvuutta vikatilanteille. Verkostojen ominaisuuksista voidaan laskea tunnuslukuja ja näiden perusteella arvioida verkoston kuuluvuutta eri tyyppisiin ja tätä kautta niiden reagoimista erilaisiin häiriötilanteisiin. Ominaisuuksia kuvaavien tunnuslukujen käyttö on hyödyllistä tilanteissa, joissa tarkasteltava verkosto on hyvin laaja tai sen tarkka mallintaminen on hankalaa. (Albert ym. 2000)

2.1 Verkostot

Verkoston avulla voidaan kuvata lähes jokaista luonnossa havaittavaa systeemiä, jossa solmukohdilla kuvataan systeemiin kuuluvat osat ja kaarilla niiden vuorovaikutus toisiensa kanssa (Latora ym. 2001). Verkosto A koostuu solmuista $n_i \in N, i \in [1, \dots, K]$, missä K on verkoston sisältämien solmukohtien määrä, sekä solmuja yhdistävistä kaarista $(i, j) \in A, i \neq j$. Kaarille voidaan antaa rajoitteita niiden läpi kulkevalle virtaukselle f_{ij} asettamalla virtaukselle ala- ja ylärajoja $[l_{ij}, u_{ij}]$ sekä kustannuksia c_{ij} kaaren ylittämistä, joilla kuvataan kaarien pituutta tai niiden ylitykseen kuluva aikaa ja näiden muutosta häiriötilanteessa. Verkoston kaaret voivat olla suunnattuja tai suuntaamattomia. Jos kaikki kaaret ovat suuntaamattomia, kutsutaan verkostoa suuntaamattomaksi. (Bertsimas ja Tsitsiklis 1997)

Tässä työssä tarkastellaan verkoston toiminnallisuudesta kertovia tunnuslukuja. Erityisesti tutkitaan tunnuslukujen muutosta alkutilanteesta, joiden avulla arvioidaan häiriötilanteen suhteellista vaikuttavuutta verkoston toiminnallisuuteen. Merkitään verkoston A suhteellista toiminnallisuutta hetkellä t

$$\Phi_t(A) = \frac{\phi_t(A)}{\phi_0(A)}, \quad (1)$$

missä $\Phi_t(A)$ on ajanhetkellä t ja $\Phi_0(A)$ alkutilanteessa laskettu toiminnallisuus. Koska tarkastellaan häiriöiden vaikutusta verkostoon, niin merkitään $0 \leq \Phi_t(A) \leq 1$ olettaen, että verkostossa tapahtuva häiriö ei voi lisätä verkoston toiminnallisuutta.

Vikaantumisella tarkoitetaan tässä kaaren tai solmukohdan vikaantumista, joka ehkäisee virtauksen vikaantuneen verkoston osan läpi. Jos kaarta (i, j) ei pystytä ylittämään vikaantumisen takia, merkitään $x_{ij} = 0$ ja vastaavasti $x_{ij} = 1$, jos kaaren yli pystytään kulkemaan. Jos solmukohta n_i vikaantuu, niin tällöin myös kaikki siihen johtavat suorat kaaret vikaantuvat. Merkitään tällöin $x_{ij} = 0 \forall j \in [1, K]$. Muunlaisia

vikaantumistilanteita voisivat olla kaarien tai solmukohtien heikentynyt kyky kestää kuormitusta tai kaarien ylittämisestä aiheutuvan kustannuksen lisäystä.

Verkostojen toiminnallisuutta kuvaavia tunnuslukuja muodostetaan verkoston ja sen osien ominaisuuksien avulla. Näitä ovat esimerkiksi virtauksen suuruus tai kapasiteetti solmukohtien välillä, välin kulkemisen aiheuttama kustannus, virtauksen tasapaino. Esimerkiksi jos virtauksen maksimikapasiteetti viereisiin solmuihin on 0, niin solmukohtaa pidetään saavuttamattomana.

Tarkastellaan seuraavaksi kolmea erilaista verkostoa, niiden ominaisuuksia sekä niiden toiminnallisuudesta muodostettavia tunnuslukuja.

2.2 Sähköverkosto

2.2.1 Ominaisuudet

Sähköverkosto koostuu kolmentyyppisistä solmuista: generaattori, sähköasema sekä jakelumuuntamo (Albert ym. 2004; Energiateollisuus 2014). Generaattorit tuottavat verkostoon energiaa, sähköasemat toimivat sähköverkoston solmukohtina, joissa erijännitteiset voimajohdot kohtaavat. Sähköasemilla käytettyä jännitettä voidaan muuntaa sekä jakaa tai keskittää sähkön siirtoa. Jakelumuuntamo yhdistää korkeajänniteverkoston alueellisiin verkostoihin ja muuntaa siirtimien jännitteen korkeajännitteestä pienjännitteeksi. Neljäntenä solmukohdan tyyppinä voidaan pitää sähkön kuluttajia, joille sähköä toimitetaan ja joita varten verkostoa ylläpidetään. (Energiateollisuus 2004)

Verkoston osilla on virtausrajat, jotka määrittävät rakenneosien maksimikuormituksen. Kuormitusrajojen ylittäminen voi aiheuttaa rakenneosien kuumentumisesta aiheutuvia häiriöitä (Elovaara ja Haarla 2011a). Kapasiteetin ylittäminen voi aiheuttaa merkittävän solmukohdan vikaantumisen ja siten sähkön kulutuksen merkittävä tason laskun kautta väliaikaisen ylituotannon verkostoon. Ylituotanto voi aiheuttaa merkittäviä häiriötilanteita, jos johtimien tai muuntamoiden kapasiteetti ylitetään.

Sähkönsiirtoverkoston toiminnan ylläpitoon liittyy olennaisena osana jatkuva verkoston tuotetun ja kulutetun sähköenergian tasaaminen. Verkoston jännitteen taajuuden laskeminen voi vaurioittaa sähköä tuottavia generaattoreita ja muodostaa merkittäviä katkoksia (Elovaara ja Haarla 2011b). Tästä syystä Suomen sähkönsiirtoverkostosta vastaava Fingrid ylläpitää voimalaitoksia, joilla voidaan tarvittaessa tuottaa tai kuluttaa energiaa tilanteissa, joissa sähkön kulutus ja tuotanto eivät ole tasapainossa. Tasapaino havaitaan sähköverkoston taajuudesta: Kun tuotanto ja kulutus ovat tasapainossa, sähköverkoston taajuus on 50 Hz. Tuotannon ylittäessä kulutuksen taajuus kasvaa yli

tasapainoarvon ja vastaavasti laskee alla tasapainoarvon, kun kulutus ylittää tuotannon. (Fingrid 2013)

Sähköverkoston katkokset aiheutuvat valtaosin erilaisista luonnontapahtumista, kuten myrskyt, lumikuorma sekä salamaniskut. Ajallisesti eniten katkoksia esiintyy maaseudulla. Katkotiedot kerätään vuosittain julkaistavaan vikatilastoon (Energiateollisuus 2013)

Albert ym. (2004) havaitsivat tutkiessaan Pohjois-Amerikan sähköverkostoa, että suurimmalla osalla sähköverkoston solmukohtista on vain vähän kaaria toisiin solmukohtiin. Toisaalta verkostossa oli myös merkittäviä solmukohtia, jotka sisälsivät useita kaaria toisiin solmukohtiin. Tämä johdosta satunnaiset yksittäiset vikaantumiset eivät alenna verkoston toiminnallisuutta paljoa, mutta tärkeimpien jakelukeskusten tai muuntamoiden vikaantumiset voivat laskea verkoston toiminnallisuutta huomattavasti.

Sähköverkosto voidaan rakentaa säteittäisenä verkostona tai silmukkaverkostona. Säteittäisessä verkostossa yhdelle haaralle rakennetaan yksi voimalinja, jolloin katko haaran alkupäässä katkaisee koko haaran sähköt. Silmukkaverkossa sähköllä on useampi kulkutie, jolloin yksittäisen kaaren katkeaminen ei vielä ehkäise sähkön saantia koko silmukkaverkoston alueella. Säteittäisiä verkostoja rakennetaan maaseudulle kustannussyistä, koska verkoston tulee kattaa huomattavasti laajempi ala kuin taajama tai kaupunkialueella. (Elovaara ja Haarla 2011a)

Suomen sähköverkosto koostuu kanta- ja alue- sekä jakeluverkoista. Kantaverkko on Fingridin ylläpitämä sähkönsiirron runkoverkko, johon suuret voimalaitokset ja tehtaot sekä alueverkot ovat liitetty. Kantaverkkoon kuuluvat myös eri valtioiden kantaverkkoyhtiöiden väliset yhteydet (Fingrid 2010). Häiriöt kantaverkossa tai kantaverkon ja alueverkon välillä ovat harvinaisempia, mutta aiheuttavat merkittävästi laajavaikutteisempia katkoksia, kuin jakeluverkon katkokset (ENTSO-E 2013). Tästä syystä kantaverkko on rakennettu rengaskäyttöiseksi, jolloin yksittäisen johtimen vikaantumisen vaikutukset pienentyvät. (Fingrid 2010)

2.2.2 Tunnusluvut ja soveltuvuus

Sähkönsiirtoverkoston tapauksessa siirtonopeuden tarkastelu ei ole relevanttia, koska siirrossa ei synny merkittäviä viiveitä. Relevantit tunnusluvut liittyvät sähkön kuluttajien saavutettavuuteen, verkoston tasapainon ylläpitämiseen sekä virtauksen ja verkoston rakenneosien käytettävissä olevaan kapasiteettiin.

Jos verkoston solmu n_i vikaantuu, niin merkitään $u_{ij}=0 \forall j \neq i$, missä u_{ij} kuvaa solmujen n_i ja n_j suoran yhteyden maksimivirtauksen määrää.

Merkitään tuotantosolmujen joukkoa verkoston A osajoukkona $A_p \subset A, p \in [1, M]$ ja saavuttamattomien solmukohtien joukkoa $A_f \subset A$. Solmu n_i ei ole saavutettavat, jos

sillä ei ole yhteyttä yhteenkään tuotantosolmuun $n_i \in A_f$, jos $a_{ij} = 0 \forall n_j \in A_p$, missä solmukohta n_j on tuotantosolmu ja a_{ij} solmujen i ja j välinen maksimivirtaus. Kuluttajasolmu on siis saavutettavissa, jos yhdelläkin tuotantosolmulla on siihen yhteys. Merkitään $x_i = 1$, kun solmu $n_i \notin A_f$, eli $\exists a_{ij} > 0, i \in [1, K], j \in [1, M]$ ja $x_i = 0$, kun $n_i \in A_f$. Tällöin saavutettavissa olevien kuluttajien määrä esitetään muodossa

$$\sum_i x_i. \quad (2)$$

Sähköverkoston haavoittuvuutta kuvataan $s - t$ -linkkien (source - target) eli tuotanto- ja kuluttajasolmujen välisten yhteyksien määrän vähenemisellä vikatilanteessa. Linkkien määrä kertoo kuinka monta erilaista tuotanto - kuluttaja -yhteyttä verkostossa on. Mittari kuvaa verkoston haavoittuvuudesta, mutta polkujen määrä ei välttämättä kerro verkoston toiminnallisuudesta. Jos verkostossa on useita tuotantosolmuja, niin yhden tuotantosolmun poistaminen pienentää $s - t$ -linkkien määrää puoleen, vaikka tuotantolaitoksen poistaminen ei vaikuttaisi kotitalouksien sähkön saatavuuteen. (Matisziw 2012) $s - t$ -linkkien määrä verkostossa lasketaan

$$\sum_i \sum_j y_{ij}, \quad (3)$$

missä $y_{ij} = 1$, jos $a_{ij} > 0$, muuten $y_{ij} = 0$.

Sähköverkoston taajuuden avulla kuvataan tuotannon ja kulutuksen tasapainoa. Muutos sähköverkoston kuormituksessa P_L lasketaan verkoston havaitun taajuuden avulla (esim. Partanen 2010)

$$\Delta P_L = K_n \Delta f, \quad (4)$$

missä Δf on havaittu taajuuden muutos tasapainotaajuudesta ja K_n on verkoston luonnollinen tehonsäätövoima. Aseteltuna määritelmän 1 mukaiseen muotoon verkoston taajuuden avulla kuvataan verkoston toiminnallisuutta

$$\Phi_t(A) = \frac{\Delta f}{f_0}, \quad (5)$$

missä f_0 on verkoston tasapainotaajuus.

2.3 Tietoliikenneverkosto

2.3.1 Ominaisuudet

Tietoliikenneverkostot koostuvat erilaisista laitteista sekä niiden välisistä yhteyksistä, joita käytetään tiedon välittämiseen. Tietoliikenneverkosto kattaa käsitteenä useita erilaisia verkostoja, kuten puhelinverkostot, radioverkostot ja dataverkostot, joiden tarkoituksena on viestien välittäminen eri solmujen välillä. (Jäntti 2012)

Tietoliikenneverkosto koostuu kahdenlaisista solmukohtista: päätteistä, joita käytetään välitettävän tiedon tulkitsemiseen ja reitittimistä jotka jakavat tietoa eri päätteiden välillä (Crucitti ym. 2004). Toisin kuin sähköverkoston tapauksessa, tietoliikenneyhteydet ovat usein langattomia, joten verkoston kattavuus voidaan käsitellä maantieteellisesti eikä pelkästään saavutettavien solmukohtien määränä.

Langaton viestintä tuo verkostoon huomattavasti lisää vapautta ja mahdollistaa yhteyden verkostoon ilman fyysistä yhteyttä verkoston kattavuusalueella. Langattomassa viestinnässä etäisyys tukiasemasta vaikuttaa kuitenkin merkittävästi yhteyden vahvuuteen ja tiedonsiirtonopeuteen (Jäntti 2012). Langattomaan yhteyden toimintaan vaikuttavat myös muuta yhteyttä rajoittavat tekijät, kuten fyysiset esteet ja maastonmuodot. Tietoliikenneverkoston siirtokapasiteetin alentuminen käsitetään katkotilana, jos alentunut kapasiteetti ei ole riittävä tarvittavien toimintojen ylläpitoon tai alittaa operaattorin lupaaman minimikapasiteetin.

Kuten sähköverkoston tapauksessa, suurimmassa osassa tietoliikenneverkoston solmuista on vähän yhteyksiä muihin solmukohtiin, mutta verkosto sisältää merkittäviä tietoa jakavia reitittimiä. Tämän ansiosta tietoliikenneverkostot ovat vakaita satunnaisissa vikaantumisissa ja verkoston ominaisuudet eivät muutu merkittävästi, vaikka satunnaisia vikaantumisia tapahtuu merkittävästi normaaleja vikaantumistapahtumia enemmän. Toisaalta rakenteensa takia tietoliikenneverkosto ovat alttiita hyökkäyksille. (Albert ym. 2000)

2.3.2 Tunnusluvut ja soveltuvuus

Tietoliikenneverkostossa merkittäviä toiminnallisuutta osoittavia mittareita muodostetaan tiedonsiirtonopeudesta, siirtokapasiteetista sekä verkoston saavutettavuudesta ja maantieteellisestä kattavuudesta. Kuten edellisessä kappaleessa esitettiin, tietoliikenneverkoston solmukohdan saavuttamattomuus voi johtua siirtonopeuden alentumisesta eikä välttämättä edellytä fyysisen tai langattoman yhteyden katkeamista.

Jos solmukohtien n_i ja n_j välinen siirtokapasiteetti ei saavuta sille annettua tavoitearvoa u_0 , virtaus käsitetään katkenneeksi. Saavuttamattomaksi solmuksi merkitään silloin solmut, joille $u_{ij} < u_0 \forall j \in [1, N]$, missä N on verkoston solmujen määrä. Merkitään tällöin $x_i = 1$ kuten edellisessä kappaleessa, jolloin saavuttamattomien solmujen määrä esitetään kaavalla 2.

Verkoston toiminnallisuudesta kertoo myös tiedon siirron vasteaika eli tiedon siirtoon kuluva aika solmukohtien välillä. Merkitään v_{ij} solmukohtien n_i ja n_j välisenä minimivasteena eri reittien kombinaatioiden suhteen. Jos solmujen välinen yhteys on katkennut, niin $v_{ij} = \infty$. Tällöin verkoston keskimääräinen verkoston vasteaika saadaan kaavalla

$$\langle v \rangle = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in A} v_{ij}. \quad (5)$$

Huomataan, että $\langle v \rangle = \infty$, jos yksikin solmukohta on katkennut, joten tarkastelu on relevantti vain tilanteissa, joissa kaikki solmukohtat ovat saavutettavissa. Ongelma korjataan huomioimalla laskennassa vain saavutettavissa olevat solmukohtien yhteydet. Tämä kuitenkin vääristää laskennan tuloksia tapauksissa, joissa on useita saavuttamattomia solmukohtia (Costa ym. 2008). Kaaren katkaiseva häiriö saattaa jopa parantaa verkoston suorituskykyä, jos verkostosta poistuu häiriön myötä huonosti saavutettava solmukohta. Toisaalta tarkastelu pätee tilanteissa, joissa häiriöt eivät katkaise yhteyttä kokonaan tai oletetaan, että yhteys korjataan asetetun aikarajan puitteissa.

Latora ja Marchiori (2005) kuvaavat verkoston toiminnallisuutta sen keskimääräisenä siirtotehokkuutena

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in A} I_{ij}, \quad (6)$$

missä $I_{ij} = \frac{1}{v_{ij}}$, kun $v_{ij} \neq 0$ ja $I_{ij} = 0$, kun $v_{ij} = 0$. Keskimääräisellä siirtotehokkuudella kuvataan, kuinka tehokkaasti tietoa pystytään keskimäärin siirtämään solmujen välillä verkostossa. Lasketussa tunnusluvussa huomioidaan myös saavuttamattomat solmukohtat

Langattomalle tietoliikenneverkostolle merkittäviä ominaisuuksia saadaan verkoston kattamasta alasta. Kattavuutta kuvataan verkoston kattaman pinta-alan laajuutena tai osuutena ennalta määrätyn alueen (kuten kaupungin tai valtion) pinta-alasta, joka pystytään kattamaan verkostolla.

Kuvataan langatonta tietoliikenneverkostoa verkostona, joka koostuu N kappaleesta langattomia tukiasemia. Merkitään verkoston A kattamaa alaa kaksiulotteisessa alueessa M_w . Langaton tukiasema n_i sijaitsee pisteessä x_i, y_i ja kattaa säteen r_i . Verkosto kattaa

siis pisteen x_n, y_n , jos $\exists n_i \in A$ s.e. $\sqrt{|x_i - x_n|^2 + |y_i - y_n|^2} \leq r_i$, eli piste sijaitsee jonkun verkoston langattoman tukiaseman kattavuusalueella.

Merkitään $P(M_w)$ langattoman verkoston kattamaa pinta-alaa. Tällöin verkoston suhteellinen toiminnallisuus alkutilanteeseen verrattuna esitetään

$$\Phi_{t1} = \frac{P_{t1}(M_w)}{P_{t0}(M_w)}, \quad (7)$$

ja verkoston kattavuus tarkasteltavan alueen M_0 alasta

$$\Phi(M_w) = \frac{P(M_w)}{P(M_0)}. \quad (8)$$

2.4 Kuljetusverkosto

2.4.1 Ominaisuudet

Kuljetusverkoston toiminta on tärkeää kansallisen turvallisuuden turvaamisessa, jotta yhteiskunnalle tärkeiden ruoka- ja lääkehuollon sekä pelastushenkilöstön tehokas liikkuminen voidaan taata (Valtioneuvosto 2010). Kuljetusverkostot eivät rajoitu vain tieliikenteeseen, vaan kuljetusverkostolla kuvataan myös lento- ja merikuljetuksia. Erilaisilla kuljetusverkostoilla voi olla siis merkittävästi erilaisia ominaisuuksia: Tieliikenneverkostossa kulku on rajoitettu rakennettuihin teihin, mutta solmukohtien tuhoutuminen ei välttämättä tarkoita, että niiden yli ei pystyttäisi kulkemaan. Lento- ja meriliikenteessä kulku solmujen välissä ei välttämättä rajoitu yhteen reittiin vaan liikkuminen solmukohtien välillä on vapaampaa. Laskeutumis- ja satamapaikkojen saavutettavuus kuitenkin rajoittavat näiden liikuntamuotojen liikkuvuutta. Tieliikenneverkostolla on myös erilaisia ominaisuuksia taajama-alueella ja sen ulkopuolella.

Kuljetusverkoston solmukohtilla kuvataan kuljetusverkoston määränpäitä, lähtöpisteitä ja merkittäviä solmukohtia. Kaaret kuvaavat näiden välissä olevaa yhteyttä. Kuljetusverkostolla kuvataan myös tavarantoimituksen logistiikkaverkostoa, jossa hyödykkeitä kuljetetaan tuottajalta välivarastoille ja jakelukeskuksille ja sieltä eteenpäin loppukäyttäjälle. Kuten sähköverkoston tapauksessa, jakelukeskukset, jotka toimivat välittäjinä tuottajien ja kuluttajien välillä, muodostavat merkittäviä solmukohtia, joiden vikaantuminen tai saavuttamattomuus voi vaikuttaa verkoston toiminnallisuuteen huomattavasti.

Kuljetusverkoston häiriötilanteita voidaan tarkastella myös dynaamisena optimointiongelmana, jossa käiriö kaareissa ohjaa liikenteen uudelleen, jolloin uudelleenohjattu liikenne valitsee taas nopeimman mahdollisista reitin. Uudelleenohjattu liikenne aiheuttaa liikenteen ruuhkautumista ja liikennevirran hidastumista, jos verkoston siirtokapasiteetti ylitetään, minkä seurauksena edellisessä kohdassa laskettu nopein reitti ei välttämättä ole enää nopein vaihtoehto. Crucitti ym. (2004) esittivät, että dynaamisessa ongelmassa liikenteen hidastuminen jää paikalliseksi, jos uudelleenohjatun liikenteen aiheuttama ylikuormitus on pientä, mutta jos uudelleenohjaus aiheuttaa merkittävään ylikuormaa, voi tämä ehkäistä koko verkoston tehokkaan liikkuvuuden.

2.4.2 Tunnusluvut ja soveltuvuus

Kuljetus ja tietoliikenneverkostossa merkittäviä toiminnallisuutta osoittavia mittareita saadaan siirtonopeudesta, -kapasiteetista sekä saavutettavuudesta.

Kahden solmun i ja j välinen lyhin reitti minimoi reitin kaarien yli kulkemisesta aiheutuvia kustannuksia $\sum_{(i,j) \in A} d_{ij} y_{ij}$, missä $y_{ij}=1$, jos kaaren läpi kuljetaan ja 0, jos kaaren läpi ei kuljeta. Merkitään solmujen i ja j välistä, mahdollisesti useasta kaaresta koostuvan reitin, minimietäisyyttä d_{ij} . Jos solmujen välillä ei ole yhteyttä merkitään $d_{ij} = \infty$. Jos $d_{ij} = \infty \forall j \in [1, N], i \neq j$ merkitään $x_i = 1$, jolloin saavuttamattomien solmukohtien määrä saadaan kaavalla 2.

Verkoston toiminnallisuutta kuvataan verkoston välisten solmujen lyhyimpien reittien summana, joka esitetään

$$\sum_{i \neq j \in A} d_{ij}. \quad (9)$$

Lyhimpien reittien summan avulla tarkkaillaan mahdollisia häiriöistä aiheutuneita solmujen välisten siirtoaikojen kasvua. Verkoston keskimääräisellä lyhimmällä reitillä kuvataan paremmin verkoston toiminnallisuutta, koska siinä otetaan huomioon verkoston koko ja laskettuja tunnuslukuja vetaillaan eri verkostojen kesken.

Verkoston keskimääräinen lyhin reitti esitetään kuten samaan tapaan kuin keskimääräinen vasteaika (esim. Costa ym. 2008)

$$\langle d \rangle = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in A} d_{ij}. \quad (10)$$

Suhteellinen poikkeama alkutilanteesta häiriön aiheutuessa saadaan

$$\Phi(\langle d \rangle) = \frac{\langle d \rangle_0}{\langle d \rangle_j}, \quad (11)$$

missä $\langle d \rangle_0$ on keskimääräinen lyhimmän reitin etäisyys alkutilanteessa ja $\langle d \rangle_j$ keskimääräinen lyhimmän reitin pituus virhetilanteessa j.

Keskimääräinen siirtotehokkuus esitetään kuten tietoliikenneverkoston tapauksessa kaavalla 6, kun minimivasteaika l_{ij} korvataan lyhimmän reitin pituudella d_{ij} . Keskimääräisellä siirtotehokkuudella kuvataan, kuinka tehokkaasti kuljetusverkostossa voidaan siirtyä solmujen välillä.

Logistiikkaverkoston kuvauksessa on relevanttia tarkastella saavutettavuutta ja $s - t$ -linkkien määrää, kuten sähköverkoston tapauksessa. Saavutettavissa olevien solmukohtien määrä saadaan kaavalla 2 ja $s - t$ -linkkien määrä kaavalla 3

Kuljetusverkoston tapauksessa verkoston toiminnallisuutta kuvataan myös verkoston paikallisen liikkuvuuden avulla. Paikallinen liikkuvuus määrittää kuinka hyvin yhteydet toimivat läheisimpiin solmuihin (Holme ym. 2010) ja näin kuvataan esimerkiksi kaupungin ruuhkautumista.

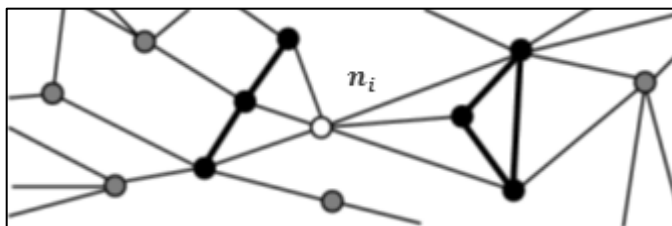
Verkoston A paikallista liikkuvuutta mitataan solmujen keskimääräisen klusterointikerroin (Engl. *Clustering coefficient*) $\langle \gamma \rangle$ avulla, joka esitetään muodossa (Holme ym. 2010)

$$\langle \gamma \rangle = \frac{1}{N} \sum_{v \in A} \gamma_v, \quad (12)$$

missä γ_v on solmun paikallinen klusterointikerroin, joka määritetään

$$\gamma_i = \frac{\mu_i}{\binom{k_i}{2}}, \quad (13)$$

missä k_i on solmun n_i suorien kaarien määrä naapurisolmuihin ja μ_i on näiden naapurisolmujen välisten suorien kaarien määrä. Paikallisen klusterointikerroimen laskentaa on havainnollistettu alla (Kuva 2.1), jossa solmun n_i naapurisolmut on merkitty tummennettuina palloina ja niitä yhdistävät suorat tummennettuina kaarina.

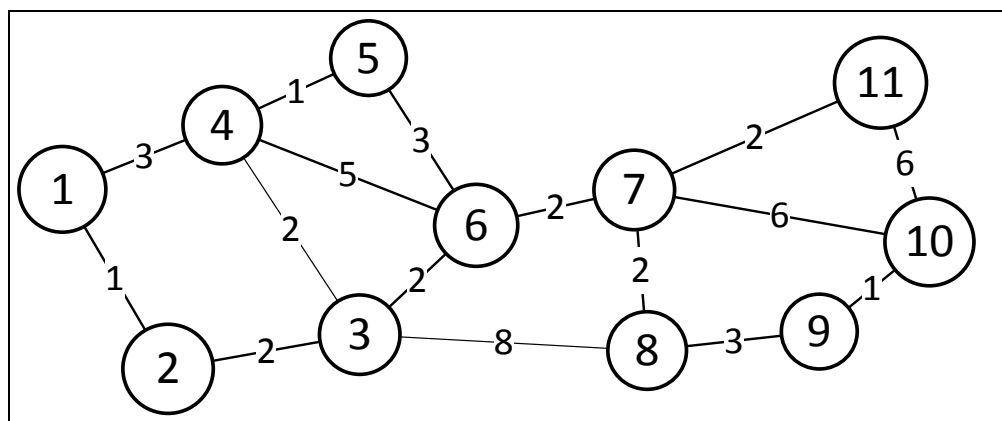


Kuva 2.1 Paikallisen klusterointikerroimen laskennan havainnollistaminen (muokattu Holme ym. (2010) kuvauksesta)

3 Esimerkkitapaus verkostosta

Käydään seuraavaksi läpi esimerkkitilanne verkostosta ja tutkitaan, miten erilaiset tunnusluvut kuvaavat verkoston toiminnallisuutta simuloituissa häiriötilanteissa. Verkoston toiminnallisuudesta kertovat tunnusluvut lasketaan eri häiriötilanteiden sekä niiden kombinaatioiden tapauksissa käyttäen Matlab -ohjelmistoa.

Alla on kuvattu 11 solmukohdan kuljetusverkosto, jossa on esitetty solmukohtien väliset yhteydet sekä kaarien ylittämiseen kuuluva aika, eli kaarien yli kulkemisen kustannus. Kaaret ovat suunnattomia ja oletetaan, että verkoston kapasiteetti on niin suuri, että liikenteen uudelleenohjautumisesta ei aiheudu merkittäviä vaikutuksia kaarien ylittämiseen kuluvaan aikaan.



Kuva 3.1 Esimerkkitapauksen kuljetusverkostosta

Verkoston rakenteesta nähdään, että solmujen 6 ja 7 vikaantumiset vaikuttavat merkittävästi verkoston toiminnallisuuteen, koska tällöin liikenne verkoston ääripäiden välillä hankaloituu. Huomataan myös, että yksittäisen kaaren poistaminen ei vielä saa yhtään verkoston solmukohtaa saavuttamattomaksi, mutta kaaren (6,7) vikaantuminen nostaa verkoston vasemman ja oikean ääripään välillä liikkumiseen kuluva aikaa merkittävästi.

Verkoston toiminnallisuuden tarkastelussa käytetään tunnuslukuina kaavan 10 mukaan laskettua verkoston kesimääräisen lyhimmän reitin etäisyyttä sekä kaavalla 6 laskettua kesimääräistä siirtotehokkuutta. Tarkastellaan myös saavuttamattomien solmujen lukumäärää.

Tarkastellaan verkostoa myös lähde – vastaanottaja verkostona, jossa solmukohta 7 toimii lähteenä ja loput solmukohdat vastaanottajina. Koska lähteitä on vain yksi, niin $s - t$ -linkkien määrä saadaan laskettua kaavalla 3.

3.1 Alkutilanne

Lasketaan seuraavaksi verkoston toiminnallisuutta kuvaavat tunnusluvut alkutilanteessa. Taulukossa 3.1 on esitetty solmujen suorien yhteyksien kustannuksen matriisimuodossa ja taulukossa 3.2 kaavalla 9 lasketut solmukohtien lyhimmät etäisyydet, kun verkostossa ei ole tapahtunut häiriöitä. Näiden avulla saadaan laskettua alkutilanteen verkoston keskimääräinen lyhyin reitti $\langle d \rangle = 5,93$ kaavalla (10) ja keskimääräinen siirtotehokkuus $E = 0,26$ kaavalla (6). Verkoston $s - t$ -linkkien määräksi saadaan 10 kpl kaavalla (3).

Taulukko 3.1 solmujen välinen suora etäisyys

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	1	-	3	-	-	-	-	-	-	-
2	1	0	2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	2	0	2	-	2	-	8	-	-	-
4	3	-	2	0	1	5	-	-	-	-	-
5	-	-	-	1	0	3	-	-	-	-	-
6	-	-	2	5	3	0	2	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	2	0	2	-	6	2
8	-	-	8	-	-	-	2	0	3	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	3	0	1	-
10	-	-	-	-	-	-	6	-	1	0	6
11	-	-	-	-	-	-	2	-	-	6	0

Taulukko 3.2 Solmukohtien väliset lyhimät etäisyydet erimerkkitalanteen verkostossa ennen häiriötä

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	1	3	3	4	5	9	11	14	15	11
2	1	0	2	4	5	4	6	8	11	12	8
3	3	2	0	2	3	2	4	8	9	10	6
4	3	4	2	0	1	5	5	8	11	12	8
5	4	5	3	1	0	3	5	7	10	11	7
6	5	4	2	5	3	0	2	4	7	8	4
7	9	6	4	5	5	2	0	2	5	6	2
8	11	8	8	8	7	4	2	0	3	4	4
9	14	11	9	11	10	7	5	3	0	1	7
10	15	12	10	12	11	8	6	4	1	0	6
11	11	8	6	8	7	4	2	4	7	6	0

Simuloidaan seuraavaksi erilaisia vikaantumisskenaarioita ja tarkastellaan niiden vaikutusta verkoston toiminnallisuuteen laskettujen tunnuslukujen avulla.

3.2 Virhetilanteet ja vaikuttavuus

Tutkitaan ensiksi yhden solmukohdan tai kaaren vikaantumistilanteen vaikutusta toiminnallisuuteen ja lasketaan tämän jälkeen useamman vikatilanteen vaikutukset verkoston tunnuslukuihin. Taulukossa 3.3 on esitetty yhden solmun vikaantumisen vaikutus verkoston toiminnallisuuteen. Verkoston toiminnallisuus on laskettu ennen vikaantumista sekä yksittäisten solmujen vikaantumisen jälkeen. Solmun vikaantuessa kaikki siihen liittyvät kaaret katkeavat, eli solmun yli ei voida kulkea.

Huomataan, että kuten aikaisemmin kappaleessa 2.3.2 todettiin, keskimääräiset lyhimmän reitin kuvaus ei anna hyvää kuvaa siitä, että kuinka paljon verkoston toiminnallisuus laskee solmun vikaantumistilanteessa, koska vikaantuminen ei välttämättä alenna verkoston toiminnallisuutta. Vikatilanteissa 1-3 ja 11 verkoston toiminnallisuus jopa parantuu, kun siitä poistetaan solmukohta. Tämä nähdään parhaiten suhteellista muutosta kuvaavista sarakkeesta $\Phi(< d >)$. Koska solmukohdan saavuttamattomuudesta ei aseteta keskimääräisen lyhimmän reitin laskennassa sakkokustannusta, niin heikosti saavutettavan solmukohdan poistaminen pienentää keskimääräistä lyhimmän reitin pituutta.

Keskimääräisen siirtotehokkuuden kuvaus antaa johdonmukaisemman kuvan verkoston toiminnallisuudesta ja sen avulla verrataan paremmin toiminnallisuutta alkutilaan.

Kummankin mittarin mukaan verkoston toiminnallisuutta alentaa eniten solmukohtien 7 ja 6 katkeamiset. Tämä korostuu erityisesti keskimääräisen lyhimmän reitin pituuden kuvaamassa mittarissa, jossa verkoston toiminnallisuus tippuu puoleen alkutilastaan. Solmukohtien 7 ja 6 tärkeys verkoston toiminnallisuutta kuvaavissa tunnusluvussa tukee jo verkoston rakenteesta tehtyjä havaintoja.

Esitetään myös katkenneiden solmujen välisten yhteyksien määrä verkostossa. Koska yksittäisen solmun vikaantuminen ei katkaise esimerkkiverkoston tapauksessa muiden solmukohtien välisiä yhteyksiä kokonaan, katkenneita yhteyksiä on 10 kappaletta jokaisessa virhetilanteessa. $s - t$ -linkkien määrä pienenee vastaavasti yhdellä, paitsi solmukohdan 7, eli verkoston ainoa lähteen vikaantuessa, jolloin verkoston kaikki $s - t$ -linkit katkeavat.

Taulukko 3.3 yhden solmukohdan vikaantumisen vaikutus verkoston toiminnallisuuteen

Vikaantunut solmu	$\langle d \rangle$	E	$\Phi(\langle d \rangle)$	$\Phi(E)$	Katkenneet yhteydet
Alkutilanne	5,93	0,26	100,0 %	100,0 %	10
1	5,78	0,21	102,5 %	81,4 %	10
2	6,20	0,20	95,4 %	78,3 %	10
3	7,00	0,20	81,9 %	75,8 %	10
4	6,11	0,20	96,9 %	77,2 %	10
5	6,00	0,21	98,8 %	80,3 %	10
6	8,51	0,19	56,4 %	72,2 %	10
7	9,31	0,18	42,9 %	70,7 %	10
8	6,33	0,21	93,1 %	82,9 %	10
9	5,64	0,21	104,8 %	82,9 %	10
10	5,40	0,22	108,9 %	84,9 %	10
11	5,89	0,22	100,6 %	86,0 %	10

Tutkitaan seuraavaksi yksittäisen kaaren katkeamisen vaikutusta verkoston toiminnallisuuteen. Yhden kaaren katkeamisen tapauksessa lasketut tunnusluvut on esitetty taulukossa 3.4. Taulukossa kaaret on numeroitu tulosten esittämisen helpottamiseksi. Koska yksittäisen kaaren katkeaminen ei vielä katkaise verkostossa yhdenkään solmunkohdan saavuttavuutta, eli $s - t$ -linkkien määrä on 10, kuvaavat tunnusluvut paremmin verkoston toiminnallisuutta, kuin solmukohdan katkeamisen yhteydessä. Nähdään tuloksista, että suurin toiminnallisuuden laskeminen seuraa kaaren (7,6) katkaisemisesta. Toisaalta nähdään, että kaarien (8,3), (6,4) ja (10,7) katkeaminen ei aiheuta vielä toiminnallisuuden alentumista, koska suorille yhteyksille löydetään yhtä nopeita tai nopeampia siirtymisreittejä.

Taulukko 3.4 yhden kaaren vikaantumisen vaikutus verkoston toiminnallisuuteen

Kaari #	Solmut	<d>	E	$\Phi<d>$	$\Phi(E)$	
-	-	-	5,93	0,26	100,0 %	100,0 %
1	2	1	6,29	0,24	94,2 %	92,0 %
2	4	1	6,00	0,25	98,8 %	98,5 %
3	3	2	6,69	0,24	88,6 %	93,4 %
4	4	3	6,04	0,25	98,2 %	96,7 %
5	6	3	6,80	0,24	87,2 %	92,7 %
6	8	3	5,93	0,26	100,0 %	100,0 %
7	5	4	6,18	0,24	95,9 %	91,7 %
8	6	4	5,93	0,26	100,0 %	100,0 %
9	6	5	6,15	0,25	96,4 %	98,0 %
10	7	6	8,44	0,22	70,3 %	85,8 %
11	8	7	6,76	0,24	87,6 %	92,7 %
12	10	7	5,93	0,26	100,0 %	100,0 %
13	11	7	7,31	0,24	81,1 %	92,0 %
14	9	8	6,36	0,25	93,1 %	96,4 %
15	10	9	6,18	0,24	95,9 %	92,7 %
16	11	10	5,96	0,26	99,4 %	99,7 %

Tarkastellaan seuraavaksi tilanteita, joissa verkostossa on useampia samanaikaisia vikaantumistilanteita. Esimerkkiverkostossa vikaantumistilanteiden erilaisia permutaatioita on solmujen katkeamisessa $2^{11}=2048$ kappaletta ja kaarien katkeamisessa $2^{16} = 65\,536$ kappaletta, joten rajataan tarkastelu kahteen vikaantumiseen. Käsitellään erikseen solmukohtien sekä kaarien vikaantumiset. Tulokset on esitetty kuvissa 3.2 - 3.7 sekä tarkemmin liitteissä 1 ja 2. Tulokset esitetään kuvissa yläkolmiomatriisina, koska suuntaamattomassa verkostossa $d_{ij}=d_{ji}$.

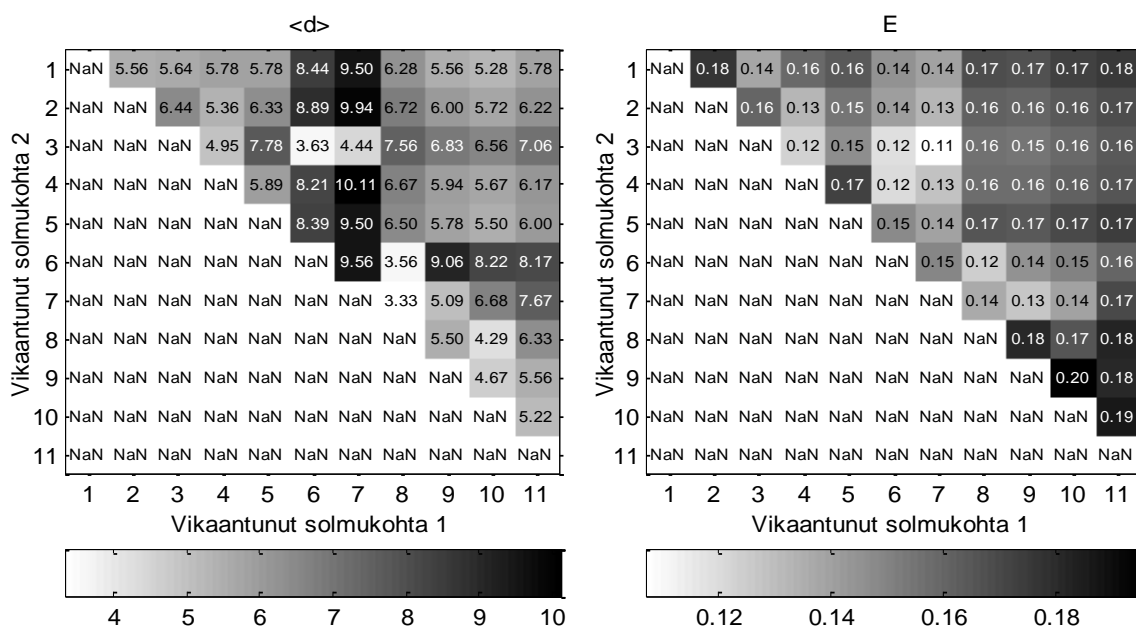
Huomataan, että Kahden solmun ja kaaren vikaantumistilanteissa löytyy tilanteita, joissa verkosto jakautuu kahdeksi klusteriksi ehkäisten liikkumisen niiden välillä. Esimerkiksi tilanteessa, jossa solmut 3 ja 6 vikaantuvat tai kaaret (3,8) ja (6,7) katkeavat, verkosto jakautuu kahdeksi pienemmäksi verkostoksi, joiden välillä ei ole yhteyksiä. Tämä nähdään selvimmin kahden kaaren katkeamisen yhteydessä kuvassa 3.9, jossa kaarien (3,8) ja (6,7) katkeaminen aiheuttaa merkittävän heikentymisen verkoston toiminnallisuudessa. Jakautuminen kahdeksi klusteriksi havaitaan myös liitteessä 2 esitettyssä katkenneiden yhteyksien määrän suuressa määrässä.

Kuten edellä todettiin, ei verkoston keskimääräisen lyhimmän reitin laskenta kuvaa toiminnallisuutta hyvin tilanteissa, joissa esiintyy useita katkoksia. Tämä nähdään parhaiten kuvassa 3.8, jossa kaarien 6 ja 10 katkeaminen kasvattaa verkoston toiminnallisuutta merkittävästi. Samasta syystä keskimääräisen lyhimmän etäisyyden mittarista kahden solmukohdan vikaantumisen yhteydessä ei saada havainnollisia

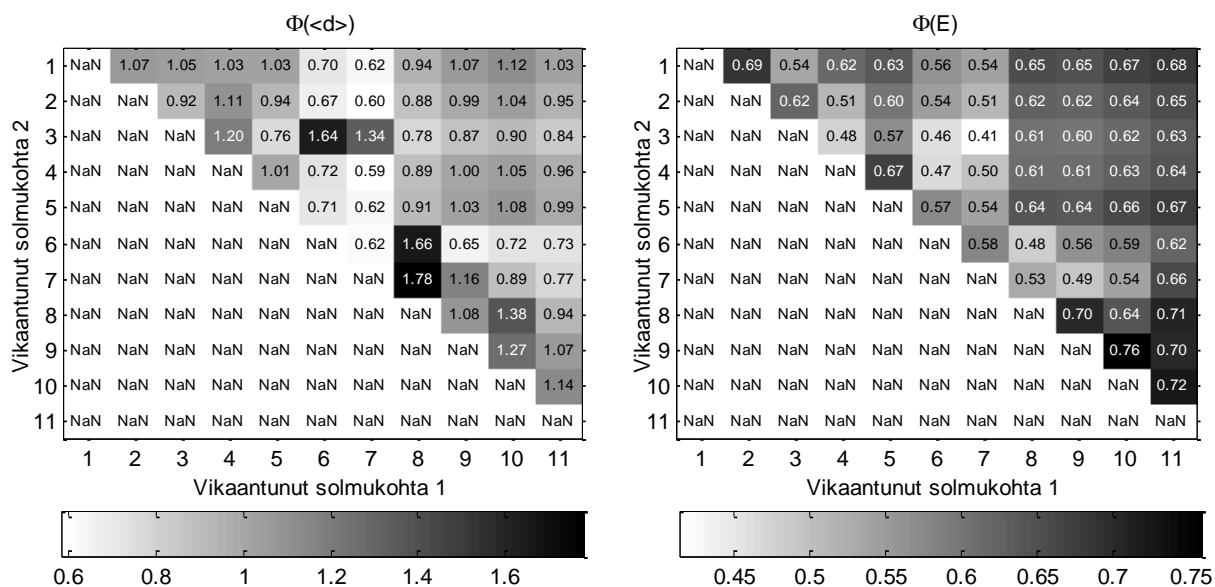
tuloksia, kun suuri osa eri kahden solmukohtan katkeamisen skenaarioista parantaa verkoston toiminnallisuutta (Kuva 3.3).

Tutkitaan verkoston toiminnallisuutta kahden solmukohtan vikaantuessa siis keskimääräisen siirtotehokkuuden avulla. Kuvasta 3.5 havaitaan, että suurin toiminnallisuuden alentuminen tapahtuu solmukohtien 3 ja 7 vikaantuessa, jolloin verkoston hajooa kahteen eri klusteriin. Kahden solmukohtan vikaantuminen heikentää verkoston toiminnallisuutta merkittävästi ja suurin osa kahden solmukohtan vikaantumista tiputtaa toiminnallisuutta enemmän, kuin vakavin yhden solmun vikaantuminen.

Kahden solmukohtan vikaantumisen toiminnallisuudesta saadut tulokset ovat linjassa yhden solmun vikaantumisen kanssa, jossa huomattiin, että verkoston tärkeimmät solmukohtat ovat 6 ja 7, joiden vikaantuminen alentaa verkoston toiminnallisuutta eniten. Tämä nähdään myös katkenneiden yhteyksien määrästä, joita on eniten solmujen 3 ja 6 sekä 3 ja 7 vikaantumisten yhteydessä, jolloin solmujen välisiä yhteyksiä katkeaa 39 kappaletta. Katkenneiden yhteyksien, $s - t$ -linkkien määrä ja lasketut tunnusluvut eri virhetilanteissa esitetään tarkemmin Liitteessä 1.



Kuva 3.2 Verkoston keskimääräinen lyhin etäisyys ja siirtotehokkuus kahden solmun vikaantuessa



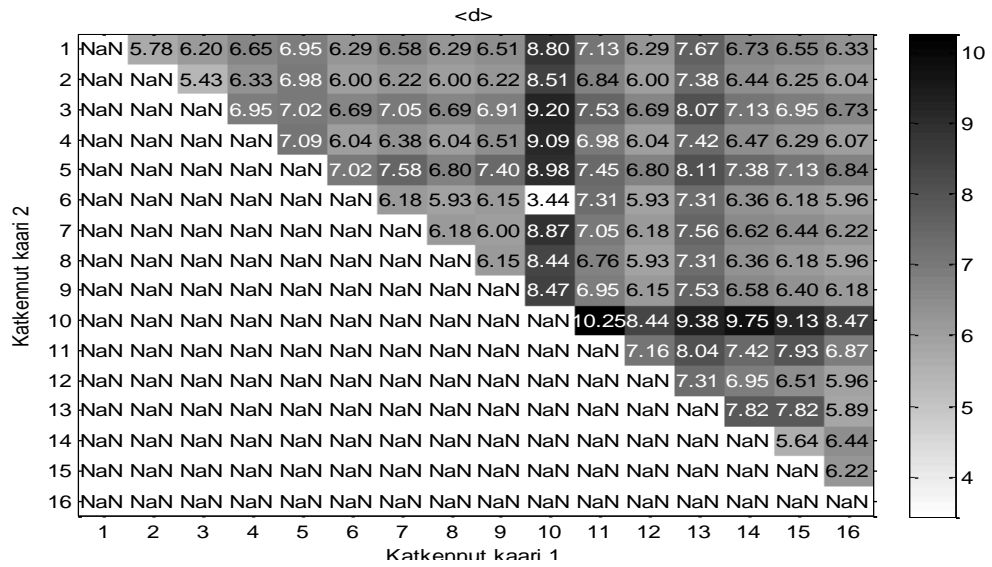
Kuva 3.3 Verkoston toiminnallisuus esitettyä keskimääräisen lyhimmän etäisyyden ja siirtotehokkuuden avulla kahden solmun vikaantuessa

Kahden kaaren katkeaminen ei ole yhtä suuri vikatapahtuma, kuin edellä esitetty kahden solmukohdan vikaantuminen, koska yhden tai useamman kaaren katkeaminen ei välttämättä katkaise täysin solmukohtien välisiä yhteyksiä. Esimerkkiverkostossa kahden kaaren katkeamisen yhteydessä katkenneita yhteyksiä havaitaan vain seitsemässä eri skenaariossa, joista merkittävin on kaarien (3,8) ja (6,7) samanaikainen katkeaminen.

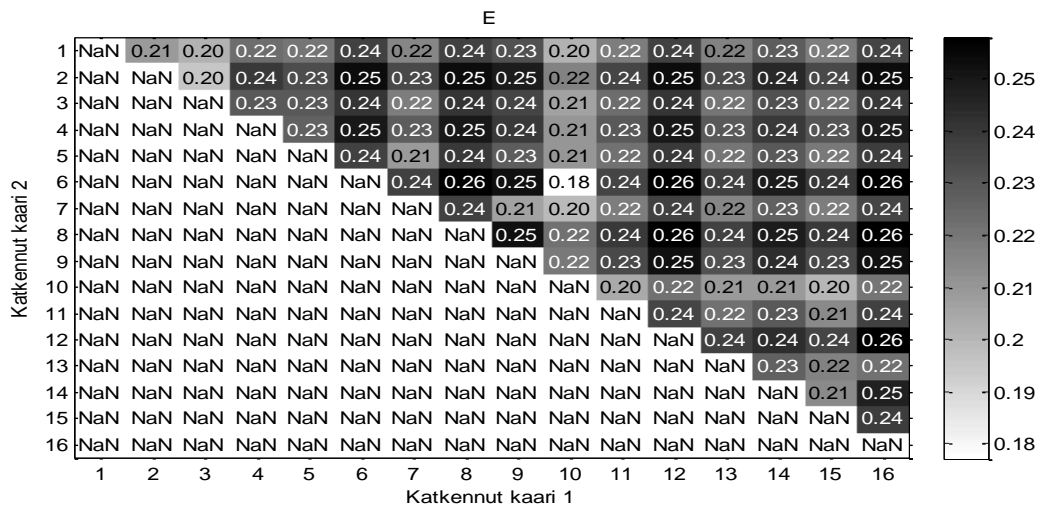
Kuvissa 3.4 – 3.7 esitetään verkoston toiminnallisuutta kuvaavat tunnusluvut kahden kaaren katkeamisen tapauksessa. Kuvissa verkoston kaaret on numeroitu taulukossa 3.4 esitetyllä tavalla.

Keskimääräisen siirtotehokkuuden avulla lasketun verkoston toiminnallisuuden tunnusluvusta nähdään, että verkoston tärkein yksittäinen kaari on kaari 10, joka yhdistää solmukohdat 6 ja 7. Kuten kahden solmun vikaantumisessa, katkenneiden solmukohtien tapauksessa keskimääräisen lyhimmän reitin etäisyyden laskenta ei anna järkeviä tuloksia. Jos nämä tapaukset jätetään pois, niin tuloksista nähdään myös, että toiminnallisuutta alentaa eniten solmuja 6 ja 7 yhdistävän kaaren eri vikaskenaariot.

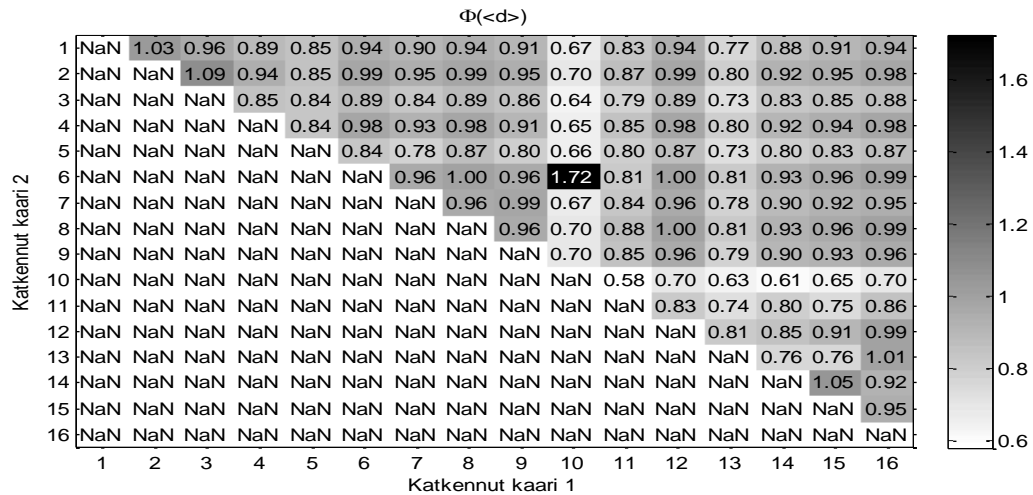
Huomataan myös kuvista 3.8 ja 3.9, että kuten yhden kaaren katkeamisen tapauksissa, verkostossa löytyy kaaria, joiden katkeaminen ei alenna verkoston toiminnallisuutta laskettujen mittareiden mukaan. Esim. solmuja 3 ja 8 sekä 4 ja 6 yhdistävien kaarien 6 ja 8 katkaiseminen ei laske verkoston toiminnallisuutta.



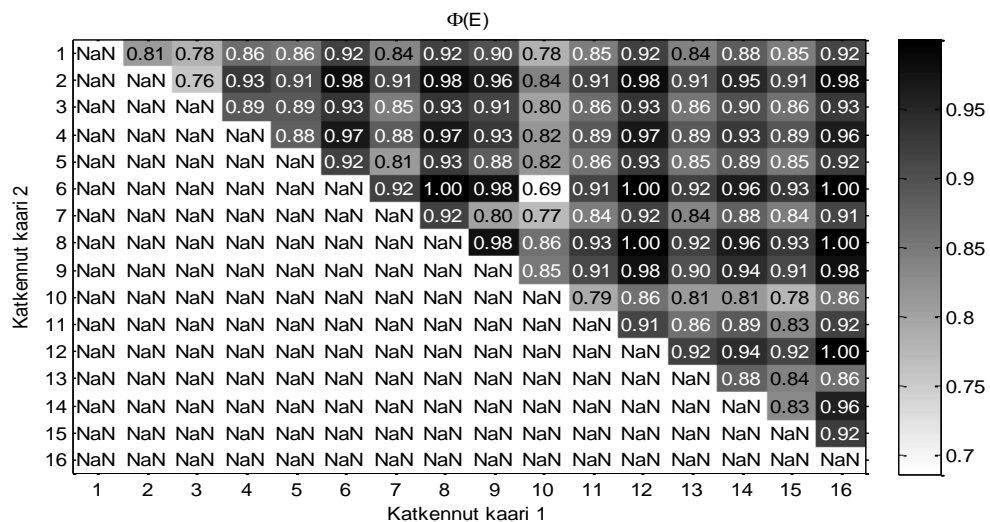
Kuva 3.4 Verkoston keskimääräinen lyhin etäisyys kahden kaaren katketessa



Kuva 3.5 Verkoston keskimääräinen siirtotehokkuus kahden kaaren katketessa



Kuva 3.6 Verkoston toiminnallisuus esitettyä keskimääräisen lyhimmän etäisyyden avulla kahden kaaren katketessa



Kuva 3.7 Verkoston toiminnallisuus esitettyä keskimääräisen siirtotehokkuuden avulla kahden kaaren katketessa

4 Yhteenveto ja johtopäätökset

Työn tarkoitus oli tarkastella yhteiskunnan kriittisen infrastruktuurin järjestelmien muodostamien verkostojen toiminnallisuutta kuvaavia tunnuslukuja ja niiden käyttömahdollisuutta erilaisien verkostoissa tapahtuvien häiriöiden arviointiin. Tarkastelu kohdennettiin kolmeen erilaiseen verkostoon: sähköverkkostoon, tietoliikenneverkkostoon sekä kuljetusverkkostoon, joiden ominaisuuksia sekä toiminnallisuutta kuvaavia tunnuslukuja käsiteltiin kirjallisuuskatsauksen pohjalta.

Verkoston toiminnallisuutta käsiteltiin saavutettavuuden, siirtonopeuden ja siirtokapasiteetin suhteen, joiden avulla muodostettiin tunnuslukuja. Käsitellyissä verkostoissa solmukohtien saavutettavuus nähtiin merkittäväksi mittariksi. Tietoliikenneverkkoston tapauksessa saavutettavuus ja siirtonopeus yhdistettiin siten, että alhainen siirtonopeus käsitellään myös katkoksi.

Verkostojen merkittävimpiä eroja huomattiin tietoliikenneverkkoston kyvyssä langattomaan tiedonsiirtoon. Saavutettavuus kuvattiin tässä tapauksessa myös verkoston kattavuutena ennalta määrättyssä alueessa. Sähkönsiirtoverkkoston tuotannon ja kulutuksen tasapainon seuraaminen verkoston taajuuden avulla erosi myös muiden verkostojen toiminnallisuuteen käytetyistä mittareista. Kuljetusverkkoston tapauksessa esitettiin myös paikallisen liikkuvuuden sekä parittaisen yhdistävyyden käsitteet.

Työssä käsiteltiin myös esimerkkiverkkoston toiminnallisuutta solmukohtien ja kaarten vikaantuessa sekä vikaantumistilanteiden vaikutusta eri verkoston toiminnallisuutta kuvaaviin tunnuslukuihin. Esimerkkitalanne päätettiin suorittaa kuljetusverkosta, koska sen nähtiin etukäteen suoraviivaisimpana vaihtoehtona. Tuloksissa havaittiin, että verkoston keskimääräisen lyhimmän reitin pituuden avulla muodostettu tunnusluku ei toiminut hyvänä mittarina verrattaessa verkoston toiminnallisuutta alkutilanteeseen solmukohtia eristävissä virhetilanteissa. Joissain tilanteissa solmukohdan poistuminen verkostosta jopa paransi verkoston toiminnallisuutta. Mittari toimi paremmin kuvaamaan kaarissa tapahtuvia häiriöitä, joissa solmukohtien väliset yhteydet eivät katkenneet täysin.

Lyhyimmän polun laskentaa voitaisiin täydentää asettamalla saavuttamattomille yhteyksille sakkokustannus, jolloin laskentaa voitaisiin käyttää myös sellaisten häiriötilanteiden toiminnallisuuden kuvaamiseen, jotka aiheuttavat katkoksia saavutettavuudessa.

Paremmen vertauksen häiriön vaikuttavuuden suhteeseen alkutilanteeseen antoi keskimääräisen siirtotehokkuuden avulla muodostettu tunnusluku, jonka avulla pystyttiin evaluoimaan johdonmukaisesti myös katkoksia aiheuttaneet virhetilanteet.

Kummassakin mittarissa tarkastelu kohdistettiin verkoston sen hetkiseen tilaan, eikä niissä huomioitu vaihtoehtoisten reittien vähentymistä ja näin altistumista katkoksille ja uusille virhetapahtumille. Esitetyissä toiminnallisuutta kuvaavissa mittareissa ei siis oteta huomioon tulevien virhetapahtumien riskiä.

5 Lähteet

- Albert, R., Jeong, H., Barabási, A.-L. (2000) Error and Attack Tolerance of Complex Networks, *Nature*, 406, 378-382.
- Banavar, J. R., Maritan, A., Rinaldo, A. (1999) Size and Form in Efficient Transportation Networks, *Nature*, 399, 130-132.
- Bertsimas, D., Tsitsiklis, J. N. (1997) *Kappale 7: Network Flow Problems. Introduction to Linear Optimization*, 265-358. Athena Scientific, Belmont, MA.
- Cappanera, P., Scaparra, M.P. (2011) Optimal Allocation of Protective Resources in Shortest-Path Networks, *Transportation Science*, 45 (1), 64-80.
- Dinh, T., Xuan, Y., Thai, M., Pardalos, P., Znati, T. (2012) On New Approaches of Assessing Network Vulnerability: Hardness and Approximation, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 20 (2), 609-619.
- Elovaara, J., Haarla, L. (2011) *Sähköverkot I*. Helsinki, Otatiето.
- Elovaara, J., Haarla, L. (2011) *Sähköverkot II*. Helsinki, Otatiето.
- Energiäteollisuus (2013) Keskeytystilasto 2012, http://energia.fi/sites/default/files/keskeytystilasto_2012.pdf (18.1.2014).
- Energiäteollisuus (2014) Verkon rakenne, <http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/verkon-rakenne> (18.1.2014).
- European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) (2013) Nordic Grid Disturbance Statistics 2012, http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimajarjestelmaliitteet/S%C3%A4hk%C3%B6n%20toimitusvarmuus/Pohjoismainen_hairioutilasto_2012.pdf (21.11.2013).
- Fingridin kotisivut - Kulutuksen ja Tuotannon Tasapainon Eli Taajuuden Ylläpito, <http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimaj%C3%A4rjestelm%C3%A4nhallinta/kulutuksen%20ja%20tuotannon%20tasapainon%20yll%C3%A4pito/Sivut/default.aspx> (28.12.2013).
- Fingrid (2010) Kantaverkon laajuus – Tiivistelmä ja esitys julkisiksi periaatteiksi, http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Verkkotoimikunta/2010/5.5.2010/kanta_verkon_laaj_6_2010_toimik.pdf (18.1.2014).

- Fingrid (2009) Kantaverkko – Sähköverkon moottoritie, http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Verkkotoimikunta/2009/10.6.2009/kantaverkon_maaritelma.pdf (18.1.2014).
- Holme, P., Kim, B. J., Yoon, C. N., Han, S. K. (2002) Attack Vulnerability of Complex Networks, *Physics Review E*, 65:056109.
- Israeli, E., Wood, R.K. (2002) Shortest-Path Network Interdiction, *Networks*, 40(2), 97-111.
- Jääntti, R. (2012) Luentoministe, S-38.1105 Tietoliikennetekniikan Perusteet, Luento 1.
- Latora, V. Marchiori, M. (2001) Efficient Behavior of Small-World Networks, *Physical Review Letters*, 87(19):198701
- Latora, V., Marchiori, M. (2005) Vulnerability and Protection of Infrastructure Networks, *Physical Review E*, 71:015103.
- Matisziw, T., C., Murray, A., T. (2009) Modeling S-T Path Availability to Support Disaster Vulnerability Assessment of Network Infrastructure, *Computers & Operations Research*, 16 (1), 16-26.
- Partanen, J. (2010) Luentomoniste, Sähkötekniikka – Tehon ja taajuuden säätö, https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0600/luennot/tehon_ja_taajuuden_saato.pdf (12.1.2014).
- Raatikainen, P., Horsmanheimo, S. (2013) Sähkökatkot Lyhyemmiksi Simulointi-Työkalulla, http://www.vtt.fi/files/news/2013/Simulaatiotyokalun_esitys_FINAL_2.pdf (12.1.2014).
- Valtioneuvosto (2010), Yhteiskunnan Turvallisuusstrategia, http://www.yhteiskunnanturvallisuus.fi/fi/materiaalit/doc_download/24-yhteiskunnan-turvallisuusstrategia (23.11.2013).

Liite 1: Kahden vikaantuneen solmun tunnusluvut

Vikaantunut solmu 1	Vikaantunut solmu 2	$\langle d \rangle$	E	$\Phi(\langle d \rangle)$	$\Phi(E)$	Katkenneita yhteyksiä	$s - t$ -linkkien määrä
1	2	5,56	0,18	106,7 %	68,8 %	19	8
1	3	5,64	0,14	105,0 %	53,8 %	27	7
1	4	5,78	0,16	102,6 %	61,8 %	19	8
1	5	5,78	0,16	102,6 %	63,5 %	19	8
1	6	8,44	0,14	70,2 %	56,1 %	19	8
1	7	9,50	0,14	62,4 %	53,8 %	19	0
1	8	6,28	0,17	94,4 %	65,2 %	19	8
1	9	5,56	0,17	106,7 %	64,9 %	19	8
1	10	5,28	0,17	112,3 %	66,8 %	19	8
1	11	5,78	0,18	102,6 %	68,2 %	19	8
2	3	6,44	0,16	92,0 %	61,9 %	19	8
2	4	5,36	0,13	110,6 %	51,3 %	27	7
2	5	6,33	0,15	93,6 %	60,0 %	19	8
2	6	8,89	0,14	66,7 %	54,3 %	19	8
2	7	9,94	0,13	59,6 %	51,5 %	19	0
2	8	6,72	0,16	88,2 %	62,4 %	19	8
2	9	6,00	0,16	98,8 %	62,0 %	19	8
2	10	5,72	0,16	103,6 %	63,9 %	19	8
2	11	6,22	0,17	95,3 %	65,4 %	19	8
3	4	4,95	0,12	119,6 %	47,8 %	33	6
3	5	7,78	0,15	76,2 %	57,0 %	19	8
3	6	3,63	0,12	163,5 %	46,1 %	39	4
3	7	4,44	0,11	133,6 %	41,4 %	39	0
3	8	7,56	0,16	78,4 %	60,6 %	19	8
3	9	6,83	0,15	86,7 %	59,8 %	19	8
3	10	6,56	0,16	90,4 %	61,6 %	19	8
3	11	7,06	0,16	84,0 %	63,5 %	19	8
4	5	5,89	0,17	100,7 %	66,8 %	19	8
4	6	8,21	0,12	72,2 %	46,5 %	27	7
4	7	10,11	0,13	58,6 %	49,7 %	19	0
4	8	6,67	0,16	88,9 %	61,1 %	19	8

4	9	5,94	0,16	99,7 %	60,8 %	19	8
4	10	5,67	0,16	104,6 %	62,7 %	19	8
4	11	6,17	0,17	96,1 %	64,1 %	19	8
5	6	8,39	0,15	70,7 %	57,0 %	19	8
5	7	9,50	0,14	62,4 %	53,8 %	19	0
5	8	6,50	0,17	91,2 %	64,4 %	19	8
5	9	5,78	0,17	102,6 %	64,0 %	19	8
5	10	5,50	0,17	107,8 %	65,9 %	19	8
5	11	6,00	0,17	98,8 %	67,4 %	19	8
6	7	9,56	0,15	62,0 %	57,8 %	19	0
6	8	3,56	0,12	166,4 %	48,1 %	39	3
6	9	9,06	0,14	65,5 %	56,2 %	19	8
6	10	8,22	0,15	72,1 %	58,5 %	19	8
6	11	8,17	0,16	72,6 %	62,2 %	19	8
7	8	3,33	0,14	177,8 %	53,2 %	37	0
7	9	5,09	0,13	116,4 %	49,4 %	33	0
7	10	6,68	0,14	88,8 %	53,8 %	27	0
7	11	7,67	0,17	77,3 %	65,7 %	19	0
8	9	5,50	0,18	107,8 %	70,3 %	19	8
8	10	4,29	0,17	138,3 %	64,0 %	27	7
8	11	6,33	0,18	93,6 %	70,8 %	19	8
9	10	4,67	0,20	127,0 %	75,8 %	19	8
9	11	5,56	0,18	106,7 %	70,0 %	19	8
10	11	5,22	0,19	113,5 %	72,1 %	19	8

Liite 2: Kahden kaaren katkeamisen tunnusluvut

#	Katkennut kaari 1	Katkennut kaari 2	<d>	E	$\Phi(<d>)$	$\Phi(E)$	Katkenneita yhteyksiä	s - t - linkkien määrä
1	1	2	5,78	0,21	102,6 %	81,4 %	10	9
2	1	3	6,20	0,20	95,6 %	78,3 %	10	9
3	1	4	6,65	0,22	89,1 %	86,4 %	0	10
4	1	5	6,95	0,22	85,3 %	85,7 %	0	10
5	1	6	6,29	0,24	94,2 %	92,0 %	0	10
6	1	7	6,58	0,22	90,1 %	83,5 %	0	10
7	1	8	6,29	0,24	94,2 %	92,0 %	0	10
8	1	9	6,51	0,23	91,1 %	89,9 %	0	10
9	1	10	8,80	0,20	67,4 %	78,1 %	0	10
10	1	11	7,13	0,22	83,2 %	84,8 %	0	10
11	1	12	6,29	0,24	94,2 %	92,0 %	0	10
12	1	13	7,67	0,22	77,3 %	84,1 %	0	10
13	1	14	6,73	0,23	88,1 %	88,4 %	0	10
14	1	15	6,55	0,22	90,6 %	84,7 %	0	10
15	1	16	6,33	0,24	93,7 %	91,7 %	0	10
16	2	3	5,43	0,20	109,1 %	75,8 %	18	8
17	2	4	6,33	0,24	93,7 %	93,0 %	0	10
18	2	5	6,98	0,23	84,9 %	90,7 %	0	10
19	2	6	6,00	0,25	98,8 %	98,5 %	0	10
20	2	7	6,22	0,23	95,3 %	90,8 %	0	10
21	2	8	6,00	0,25	98,8 %	98,5 %	0	10
22	2	9	6,22	0,25	95,3 %	96,5 %	0	10
23	2	10	8,51	0,22	69,7 %	84,3 %	0	10
24	2	11	6,84	0,24	86,7 %	91,2 %	0	10
25	2	12	6,00	0,25	98,8 %	98,5 %	0	10
26	2	13	7,38	0,23	80,3 %	90,5 %	0	10
27	2	14	6,44	0,24	92,1 %	94,9 %	0	10
28	2	15	6,25	0,24	94,8 %	91,2 %	0	10
29	2	16	6,04	0,25	98,2 %	98,2 %	0	10
30	3	4	6,95	0,23	85,3 %	89,0 %	0	10
31	3	5	7,02	0,23	84,5 %	89,1 %	0	10

32	3	6	6,69	0,24	88,6 %	93,4 %	0	10
33	3	7	7,05	0,22	84,0 %	84,6 %	0	10
34	3	8	6,69	0,24	88,6 %	93,4 %	0	10
35	3	9	6,91	0,24	85,8 %	91,4 %	0	10
36	3	10	9,20	0,21	64,4 %	80,2 %	0	10
37	3	11	7,53	0,22	78,7 %	86,3 %	0	10
38	3	12	6,69	0,24	88,6 %	93,4 %	0	10
39	3	13	8,07	0,22	73,4 %	85,7 %	0	10
40	3	14	7,13	0,23	83,2 %	89,8 %	0	10
41	3	15	6,95	0,22	85,3 %	86,1 %	0	10
42	3	16	6,73	0,24	88,1 %	93,1 %	0	10
43	4	5	7,09	0,23	83,6 %	88,2 %	0	10
44	4	6	6,04	0,25	98,2 %	96,7 %	0	10
45	4	7	6,38	0,23	92,9 %	88,4 %	0	10
46	4	8	6,04	0,25	98,2 %	96,7 %	0	10
47	4	9	6,51	0,24	91,1 %	92,9 %	0	10
48	4	10	9,09	0,21	65,2 %	81,5 %	0	10
49	4	11	6,98	0,23	84,9 %	89,2 %	0	10
50	4	12	6,04	0,25	98,2 %	96,7 %	0	10
51	4	13	7,42	0,23	79,9 %	88,7 %	0	10
52	4	14	6,47	0,24	91,6 %	93,1 %	0	10
53	4	15	6,29	0,23	94,2 %	89,4 %	0	10
54	4	16	6,07	0,25	97,6 %	96,4 %	0	10
55	5	6	7,02	0,24	84,5 %	92,1 %	0	10
56	5	7	7,58	0,21	78,2 %	81,3 %	0	10
57	5	8	6,80	0,24	87,2 %	92,7 %	0	10
58	5	9	7,40	0,23	80,1 %	88,5 %	0	10
59	5	10	8,98	0,21	66,0 %	81,5 %	0	10
60	5	11	7,45	0,22	79,5 %	86,2 %	0	10
61	5	12	6,80	0,24	87,2 %	92,7 %	0	10
62	5	13	8,11	0,22	73,1 %	85,5 %	0	10
63	5	14	7,38	0,23	80,3 %	88,9 %	0	10
64	5	15	7,13	0,22	83,2 %	85,2 %	0	10
65	5	16	6,84	0,24	86,7 %	92,4 %	0	10
66	6	7	6,18	0,24	95,9 %	91,7 %	0	10
67	6	8	5,93	0,26	100,0 %	100,0 %	0	10
68	6	9	6,15	0,25	96,4 %	98,0 %	0	10
69	6	10	3,44	0,18	172,3 %	68,7 %	30	4
70	6	11	7,31	0,24	81,1 %	91,3 %	0	10
71	6	12	5,93	0,26	100,0 %	100,0 %	0	10
72	6	13	7,31	0,24	81,1 %	92,0 %	0	10
73	6	14	6,36	0,25	93,1 %	96,4 %	0	10

74	6	15	6,18	0,24	95,9 %	92,7 %	0	10
75	6	16	5,96	0,26	99,4 %	99,7 %	0	10
76	7	8	6,18	0,24	95,9 %	91,7 %	0	10
77	7	9	6,00	0,21	98,8 %	80,3 %	10	9
78	7	10	8,87	0,20	66,8 %	77,2 %	0	10
79	7	11	7,05	0,22	84,0 %	84,4 %	0	10
80	7	12	6,18	0,24	95,9 %	91,7 %	0	10
81	7	13	7,56	0,22	78,4 %	83,8 %	0	10
82	7	14	6,62	0,23	89,6 %	88,1 %	0	10
83	7	15	6,44	0,22	92,1 %	84,4 %	0	10
84	7	16	6,22	0,24	95,3 %	91,4 %	0	10
85	8	9	6,15	0,25	96,4 %	98,0 %	0	10
86	8	10	8,44	0,22	70,3 %	85,8 %	0	10
87	8	11	6,76	0,24	87,6 %	92,7 %	0	10
88	8	12	5,93	0,26	100,0 %	100,0 %	0	10
89	8	13	7,31	0,24	81,1 %	92,0 %	0	10
90	8	14	6,36	0,25	93,1 %	96,4 %	0	10
91	8	15	6,18	0,24	95,9 %	92,7 %	0	10
92	8	16	5,96	0,26	99,4 %	99,7 %	0	10
93	9	10	8,47	0,22	70,0 %	84,9 %	0	10
94	9	11	6,95	0,23	85,3 %	91,0 %	0	10
95	9	12	6,15	0,25	96,4 %	98,0 %	0	10
96	9	13	7,53	0,23	78,7 %	90,2 %	0	10
97	9	14	6,58	0,24	90,1 %	94,4 %	0	10
98	9	15	6,40	0,23	92,6 %	90,7 %	0	10
99	9	16	6,18	0,25	95,9 %	97,7 %	0	10
100	10	11	10,25	0,20	57,8 %	79,2 %	0	10
101	10	12	8,44	0,22	70,3 %	85,8 %	0	10
102	10	13	9,38	0,21	63,2 %	80,9 %	0	10
103	10	14	9,75	0,21	60,8 %	81,3 %	0	10
104	10	15	9,13	0,20	64,9 %	77,9 %	0	10
105	10	16	8,47	0,22	70,0 %	85,5 %	0	10
106	11	12	7,16	0,24	82,7 %	91,3 %	0	10
107	11	13	8,04	0,22	73,8 %	85,8 %	0	10
108	11	14	7,42	0,23	79,9 %	89,1 %	0	10
109	11	15	7,93	0,21	74,8 %	82,9 %	0	10
110	11	16	6,87	0,24	86,2 %	92,1 %	0	10
111	12	13	7,31	0,24	81,1 %	92,0 %	0	10
112	12	14	6,95	0,24	85,3 %	94,4 %	0	10
113	12	15	6,51	0,24	91,1 %	91,5 %	0	10
114	12	16	5,96	0,26	99,4 %	99,7 %	0	10
115	13	14	7,82	0,23	75,8 %	88,2 %	0	10

116	13	15	7,82	0,22	75,8 %	83,9 %	0	10
117	13	16	5,89	0,22	100,7 %	86,0 %	10	9
118	14	15	5,64	0,21	105,0 %	82,9 %	10	9
119	14	16	6,44	0,25	92,1 %	95,9 %	0	10
120	15	16	6,22	0,24	95,3 %	92,4 %	0	10
