

Janne Kuusisto

# SÄHKÖKATKOJEN VÄLTÄMINEN

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologia ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Pekka Verho  
Joulukuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Janne Kuusisto: Sähkökatkojen välttäminen  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Sähkötekniikan kandidaattiohjelma: Sähköenergiatekniikka  
Joulukuu 2022

---

Yhteiskunnan nopea sähköistyminen kasvattaa riippuvuutta sähköstä, mikä johtaa sähkökatkojen aiheuttamien haittojen kasvuun. Pahimmillaan sähkökatkot saattavat vaikuttaa koko yhteiskuntaan. Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää yleisimmät sähkökatkojen syyt Suomessa ja esittää tapoja niiden ehkäisemiseen sekä vertailla niitä.

Suomessa sähkön siirto voimalaitokselta loppukäyttäjälle tapahtuu sähköjärjestelmän kautta. Sähköjärjestelmään kuuluu voimalaitosten ja loppukäyttäjien lisäksi kantaverkko, suurjännitteiset jakeluverkot ja jakeluverkot. Jakeluverkot jakautuvat vielä kahteen verkkotyyppiin: keskijänniteverkkoon ja pienjänniteverkkoon. Kantaverkon omistaa Fingrid Oyj ja jakeluverkon omistavat sähköverkkoyhtiöt.

Loppukäyttäjien kokemista sähkökatkoista valtaosa johtuu keskijänniteverkon avojohdoissa esiintyvistä vioista, joista suurin osa johtuu sääolosuhteista. Puiden kaatuminen tai taipuminen johtojen päälle myrskyn tai lumi- ja jääkuorman takia on suurin vikojen aiheuttaja. Poikkeuksellisen suuria sähkökatkoja kutsutaan suurhäiriöiksi. 2000-luvulla koettujen suurhäiriöiden vaikutukset ovat olleet niin laajoja, että ne aiheuttivat vuonna 2013 muutoksia sähkömarkkinalakiin. Muutokset velvoittavat sähköverkkoyhtiötä parantamaan toimitusvarmuuttaan.

Työssä esitellään kolme eri keinoa keskijänniteverkon avojohdoissa tapahtuvien sähkökatkoon johtavien vikojen vähentämiseen. Kaksi ensimmäistä keinoa perustuvat jo olemassa olevan avojohdon toimitusvarmuuden parantamiseen. Keinot ovat riskipuiden poistaminen ja ylläleävän johtokadun raivaaminen. Kolmantena vaihtoehtona tutkitaan avojohdon korvaamista maakaapelilla.

Jokaisella toimitusvarmuuden parantamiseen esitetyllä keinolla on oma vaikutuksensa sähkökatkojen määrään. Myös kustannukset keinojen välillä vaihtelevat suuresti. Sähköverkkoyhtiöt painottavatkin kustannuksilla saavutettua hyötyä toimitusvarmuuden parantamista suunnitellessaan. Toimitusvarmuuden parantamiseen ei ole yhtä oikeaa ratkaisua, vaan käytössä olevien menetelmien soveltuvuus ja kannattavuus vaihtelee kohteen mukaan.

Avainsanat: sähkökatko, toimitusvarmuus, suurhäiriö, jakeluverkko, sähkömarkkinalaki

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. SÄHKÖVERKKO SUOMESSA .....	3
2.1 Kantaverkko .....	4
2.2 Jakeluverkko .....	6
3. SÄHKÖKATKOJEN SYYT JA SEURAUKSET .....	8
3.1 Sähkökatkojen syyt .....	8
3.2 Suurhäiriöt .....	10
3.3 Suurhäiriöiden seuraukset .....	10
4. SÄHKÖKATKOJEN EHKÄISEMINEN .....	12
4.1 Ehkäisemistavat .....	12
4.2 Vikataajuus .....	13
4.3 Kustannukset .....	13
5. EHKÄISEMISTAPOJEN KANNATTAVUUS .....	15
5.1 Vyöhykkeisiin jakaminen .....	15
5.2 Vyöhykekohtaiset kehittämissstrategiat .....	16
6. YHTEENVETO .....	18
LÄHTEET .....	20

# 1. JOHDANTO

Yhteiskunnan nopeasti etenevä sähköistyminen on ilmiö, jonka odotetaan jatkuvan vielä pitkään. Kasvava riippuvuus sähköstä pahentaa sähkökatkoista aiheutuneita seurauksia. Kaikkein vakavimmat sähkökatkot vaikuttavat koko yhteiskuntaan, ja pelkästään lyhyetkin sähkökatkot saattavat aiheuttaa merkittävää haittaa. Sähkönkäytön jatkuvasti kasvaessa sähkön katkeamaton toimitus onkin siis erittäin tärkeää. Sähkönjakelun toimitusvarmuus on sähköverkkoyhtiöiden vastuulla. Toimitusvarmuuden parantaminen tarkoittaa sähköverkkoyhtiöille merkittäviä investointeja, jotka näkyvät myös sähkön loppukäyttäjien siirtohinnoissa. Sähköverkkoyhtiöiden tuleekin tehdä investoinnit järkevästi, jotta toimitusvarmuus paranee mahdollisimman paljon pitäen kustannukset kuitenkin mahdollisimman alhaisina.

Suomessa sähkön siirto voimalaitokselta loppukäyttäjälle tapahtuu sähköjärjestelmän kautta. Sähköjärjestelmään kuuluu erilaisia verkkoja, joissa sähköä siirretään eri jännite-  
tasolla. Sähkönjakelun toimitusvarmuus vaihtelee verkkojen välillä huomattavasti. Toimitusvarmuuden parantaminen edellyttääkin perehtymistä verkoissa esiintyvien sähkökatkojen määrään ja niiden aiheuttajiin. Hyvä perehtyminen auttaa sähköverkkoyhtiöitä kohdistamaan resursseja oikeanlaisiin toimenpiteisiin vaihtelevissa tilanteissa.

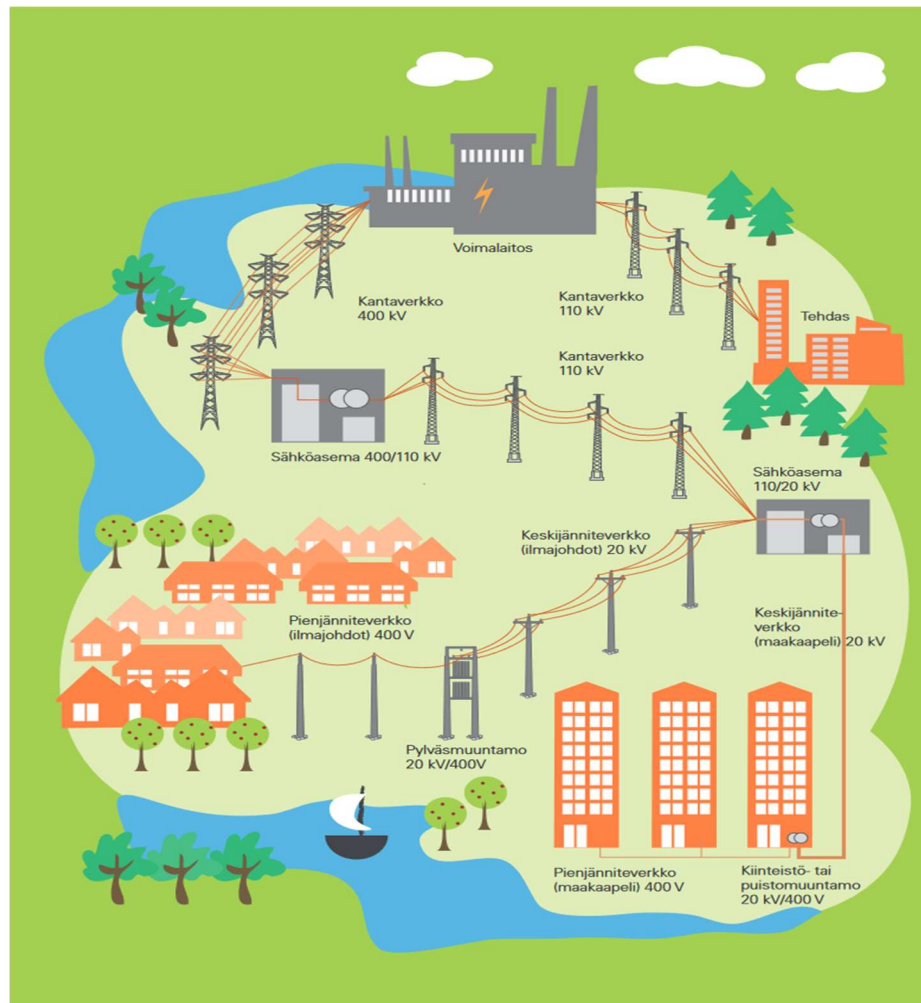
Työn tavoitteena on esitellä sähkökatkoihin johtavien vikojen syitä Suomessa ja keinoja niiden välttämiseen. Sähkökatkoihin johtavia vikoja on mahdotonta ennakoida ja estää täysin, mutta oikeanlaisilla toimenpiteillä niiden määrää pystytään vähentämään. Toisaalta työn toisena tavoitteena on vertailla toimitusvarmuuden parantamiseen esiteltyjä keinoja ja niiden kannattavuutta.

Työn alussa luvussa 2 käsitellään Suomessa käytössä olevaa sähköjärjestelmää. Luvussa esitetään sähköjärjestelmän eri jännite-  
tasoja ja komponentteja. Seuraavaksi luvussa 3 perehdytään yksittäisiin sähkökatkoihin johtaviin vikoihin sekä niiden aiheuttajiin. Luvussa käsitellään myös poikkeuksellisen laajoja sähkökatkoja aiheuttavia suurhäiriöitä, sekä takavuosina koettujen suurhäiriöiden vaikutuksia yhteiskuntaan. Luvussa 4 esitellään erilaisia keinoja sähkönjakelun toimitusvarmuuden parantamiseksi ja niiden ominaisuuksia. Lopuksi luvussa 5 pohditaan luvussa 4 esiteltyjen keinojen mahdollisia

sovelluskohteita ja sähköverkkoyhtiöiden tapoja vertailla eri kohteita ja niille sopivia toimitusvarmuuden parantamiseen käytössä olevia tapoja. Luvussa pohditaan myös käytössä olevien keinojen kannattavuutta.

## 2. SÄHKÖVERKKO SUOMESSA

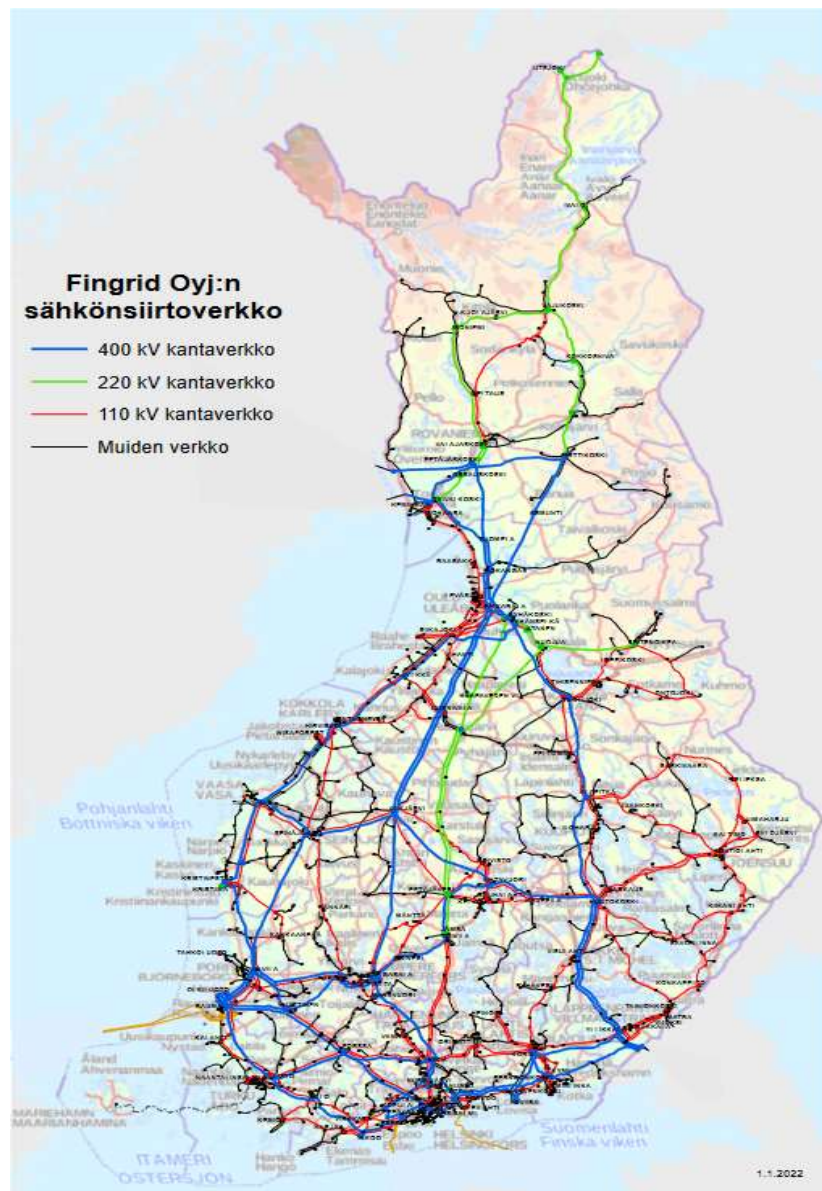
Sähkijärjestelmän tehtävä on tuottaa sähköä, ja siirtää se loppukäyttäjille. Suomen sähkijärjestelmä sisältää voimalaitokset, kantaverkon, suurjännitteiset jakeluverkot, jakeluverkot sekä sähkön loppukäyttäjät. [1] Sähköä tuotetaan voimalaitoksissa, joista se siirretään kantaverkkoon. Kantaverkko siirtää sähkön jakeluverkkoon, joka siirtää sen loppukäyttäjälle. Kantaverkko siirtää sähköä 400, 220 tai 110 kilovoltin jännitteellä. Jakeluverkossa keskijänniteverkko siirtää sähköä yleensä 20 kilovoltin jännitteellä ja pienjänniteverkko yleensä 400 voltin jännitteellä. Kantaverkon ja jakeluverkkojen välissä on sähköasemia, jotka muuntavat jännitteen sopivaksi. Keskijänniteverkosta pienjänniteverkkoon jännitteen muuntaa jakelumuuntajat. [2] Kuvassa 1 on esitetty Suomessa käytettävä sähkönsiirtojärjestelmä.



**Kuva 1. Sähkönsiirtojärjestelmä Suomessa. [2]**

## 2.1 Kantaverkko

Kantaverkko mahdollistaa sähkön siirron koko maahan, ja siihen on liitetty kaikki suuret voimalaitokset ja tehtaat. Kantaverkon omistajan Fingrid Oyj:n tärkein tehtävä on varmistaa kantaverkon toimivuus. Kantaverkkoon kuuluu noin 14 000 km voimajohtoja sekä yli 100 sähköasemaa. Kantaverkossa sähköä siirretään suurella jännitteellä, joka mahdollistaa pienet energiahäviöt. Käytetyt jännitetasot ovat 400 kV, 220 kV sekä 110 kV. [1] Kantaverkko mahdollistaa sähkönsiirron myös ulkomaille. Kantaverkko on yhteydessä Norjaan, Ruotsiin, Venäjään ja Viroon. [3] Kuvassa 2 on esitetty Suomen kantaverkko eri jännitetasoineen.



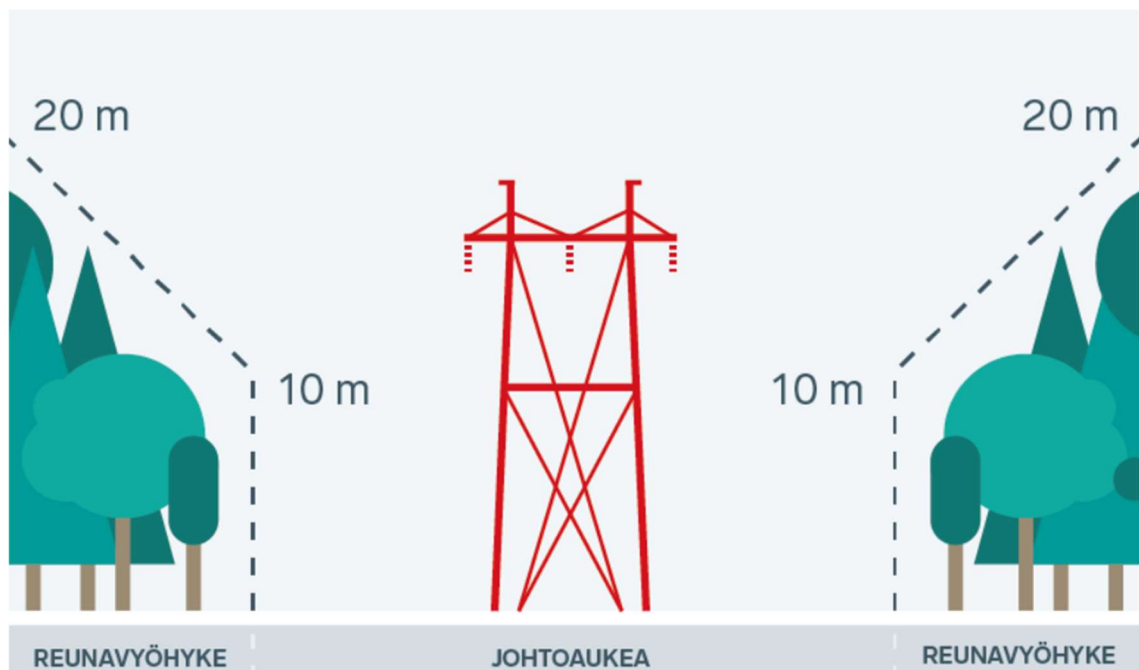
**Kuva 2. Fingrid Oyj:n kantaverkko. [1]**

Suomessa siirtoetäisyydet ovat usein pitkiä, jolloin maakaapelin kustannukset nousevat kohtuuttoman suuriksi. Kantaverkossa voimajohdot ovatkin lähes kaikki avojohtoja.

Myös kantaverkon sähköasemat ovat pääasiassa ilmaeristeisiä eli ulosasennettuja. Suomen kantaverkkoon kuuluu kaiken kaikkiaan:

- 5100 km 400 kV voimajohtoja
- 1300 km 220 kV voimajohtoja
- 7300 km 110 kV voimajohtoja
- noin 115 sähköasemaa. [1]

Fingridin kantaverkon siirtovarmuus on erittäin hyvä ja häiriöiden takia siirtämättä jäänyt energia on hyvin pieni. Tämä on saavutettu käyttämällä leveää johtoaluetta paikoissa, joissa sääolosuhteet pääsisivät vaikuttamaan siirtolinjaan, esimerkiksi metsässä. Johtoalue tarkoittaa sitä aluetta, johon Fingrid on lunastanut rajoitetun käyttöoikeuden. Johtoalue sisältää johtoaukean sekä reunavyöhykkeet. Johtoaukea tarkoittaa sitä aluetta, joka on raivattu kasvustolta ja jonka keskellä voimajohtot kulkevat. Johtoaukealla ei ole tiettyä standardileveyttä, vaan se vaihtelee riippuen johdon rakenteista ja jännitteestä. Yleensä johtoaukean leveys on 26–42 metriä. Reunavyöhykkeet tarkoittavat johtoaukean molemmilla puolilla olevia alueita, reunavyöhykkeen leveys on yleensä noin 10 metriä. Reunavyöhykkeillä puiden korkeutta rajoitetaan, estäen puun mahdollisuus kaatua johtojen päälle. [1] Kuvassa 3 on esitetty kantaverkon siirtolinjoissa käytettävä johtoalue.



**Kuva 3. Kantaverkon johtoalue. [1]**



## 2.2 Jakeluverkko

Suomessa jokainen sähköverkkoon liitetty kotitalous ja suuri osa muista sähkön loppukäyttäjistä saa sähkönsä jakeluverkosta. Jakeluverkko kattaa Suomen kaikki etäisimmätkin kuluttajat, jonka takia siihen kuuluu moninkertainen määrä verkkoa verrattuna kantaverkkoon. Toisin kuin kantaverkolla, jakeluverkolla ei ole yhtä omistajaa. Jakeluverkon omistajia ovat sähköverkkoyhtiöt, joita Suomessa on yhteensä noin 80. [1]

Suurjännitteiset jakeluverkot, toisin sanottuna alueverkot, koostuvat 110 kV voimajohtoista, jotka eivät kuulu kantaverkkoon. Alueverkot liittyvät kantaverkkoon ja siirtävät sähköä tietyllä alueella. [2] Alueverkot siirtävät sähköä jakeluverkkoon ja keskiuurille asiakkaille, kuten suurille tehtailla [1].

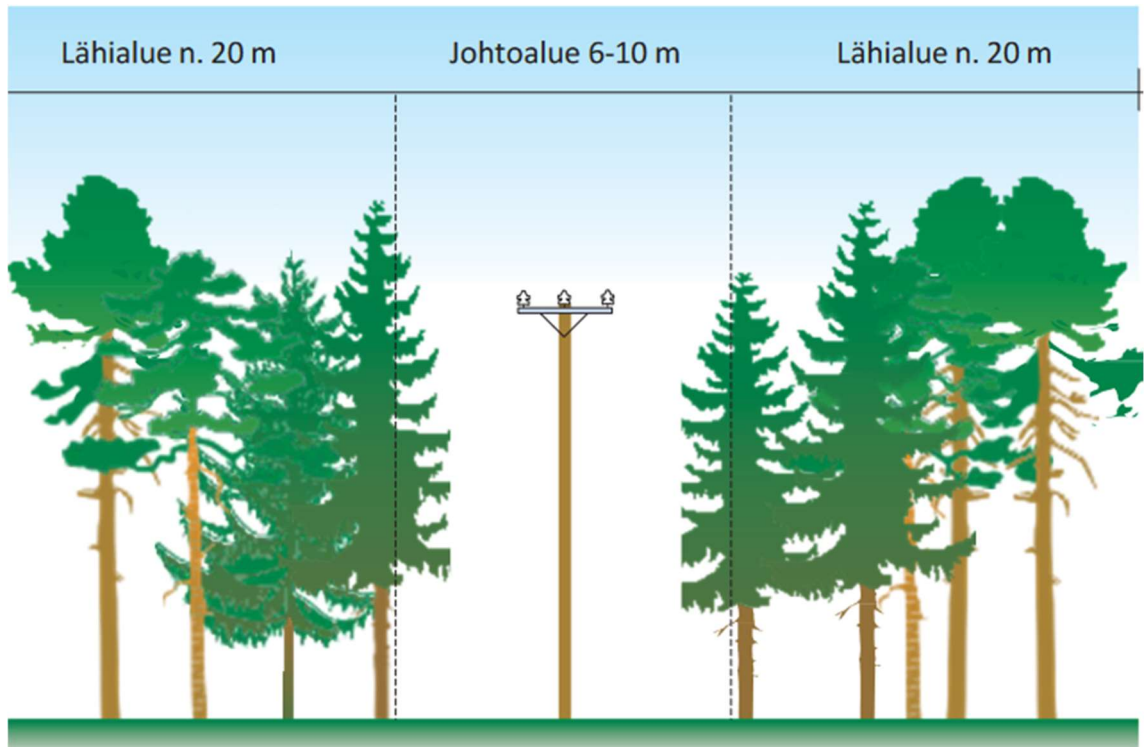
Jakeluverkko jaetaan keskijänniteverkoksi ja pienjänniteverkoksi. Keskijänniteverkoksi lasketaan verkko, jonka jännite on yli 1 kV mutta pienempi kuin 36 kV. Suomessa yleisin keskijänniteverkon jännite on 20 kV. [3] Taajamissa keskijänniteverkko on usein maakaapeloitua. Haja-asutusalueella, jossa välimatkat ovat pidempiä, keskijänniteverkko on usein avojohtoa tai päällystettyä avojohtoa. Suomessa keskijänniteverkkoa on noin 150 000 km, josta noin 60 % on avojohtoa. [4]

Pienjänniteverkoksi lasketaan verkko, jonka jännitteenä käytetään 400–1000 voltia. Suomessa yleisin pienjänniteverkon jännite on 400 V. Keskijänniteverkon tavoin pienjänniteverkko on taajamissa usein maakaapeloitu. Haja-asutusalueella pienjänniteverkkoa rakennetaan niin maahan kuin ilmaankin. Ilmaverkossa käytetään riippukierrehoidinta avojohtimen sijaan. [3] 400 V pienjänniteverkon vaihejännite on 230 V, joka on yleisin sähkölaitteiden käyttöjännite. Sopivan jännitteensä takia pienjänniteverkko on suosituin sähköverkon liityntämuoto. Pienjänniteverkkoa on Suomessa noin 220 000 km [2].

Pienjänniteverkko ei sen suuresta määrästä huolimatta ole syypäänä suureen määrään sähkökatkoja. Jakelumuntajat sijaitsevat yleensä lähellä kuluttajia, eikä yksittäinen pienjännitejohto syötä suurta määrää kuluttajia. Pienjänniteverkossa tapahtunut vika ei täten aiheuta laajaa sähkökatkoa. Keskijänniteverkko sen sijaan kulkee varsinkin harvaan asutetulla alueella usein metsien läpi pitkiä etäisyyksiä, ja se syöttää suurta määrää kuluttajia. Keskijänniteverkossa esiintyvät viat aiheuttavatkin yli 90 % kaikista kuluttajien kokemista sähkökatkoista. [4]

Vaikka keskijänniteverkkoa onkin jo maakaapeloitu nopeaan tahtiin varsinkin taajamissa, siitä on silti suurin osa avojohtoa. Metsässä kulkevalla keskijänniteverkolla ei ole kantaverkon kaltaista leveää johtoaluetta, vaan paljon kapeampi. Usein johtoalue on noin 6–10 metriä leveä, riippuen käytetystä johtolajista. Yleisimmällä johtolajilla eli avojohtolla

johtoalue on yleensä 10 metriä leveä. [5] Kuvassa 4 on esitetty tavanomainen keskijänniteverkon johtoalue.



**Kuva 4. Keskijänniteverkon johtoalue. [5]**

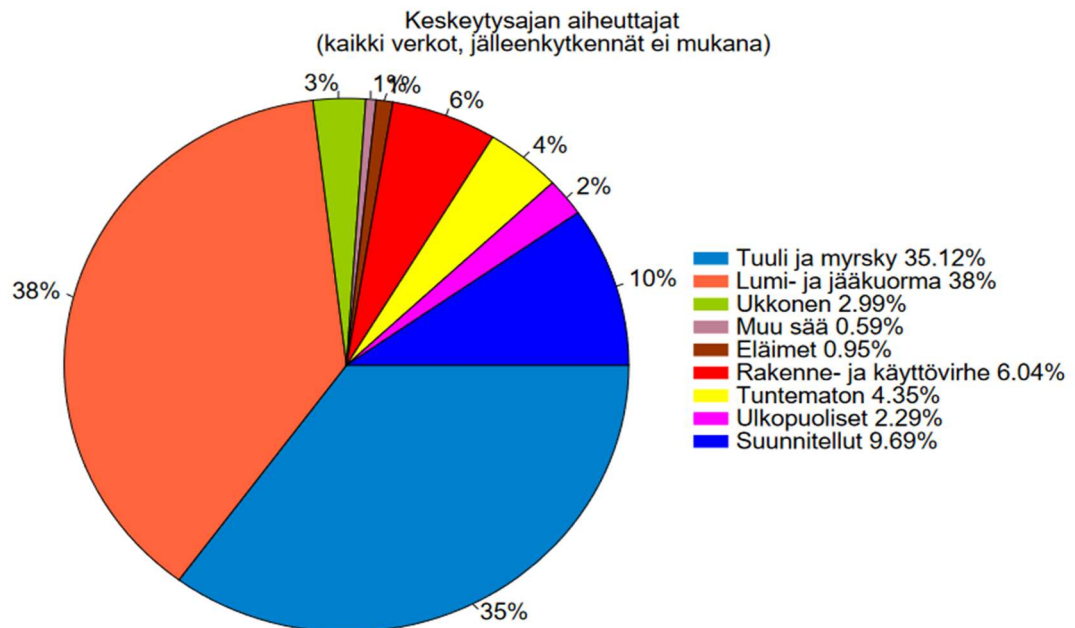
### 3. SÄHKÖKATKOJEN SYYT JA SEURAUKSET

Sähköjen katketessa valot sekä kodinkoneet sammuvat ja sähkölämmiteinen talo alkaa viilenemään. Tehtaat pysähtyvät eivätkä kauppojen sähköiset liukuovet enää avaudu. Sähkökatko saattaa siis aiheuttaa paljonkin harmia riippuen sen laajuudesta ja kestosta.

#### 3.1 Sähkökatkojen syyt

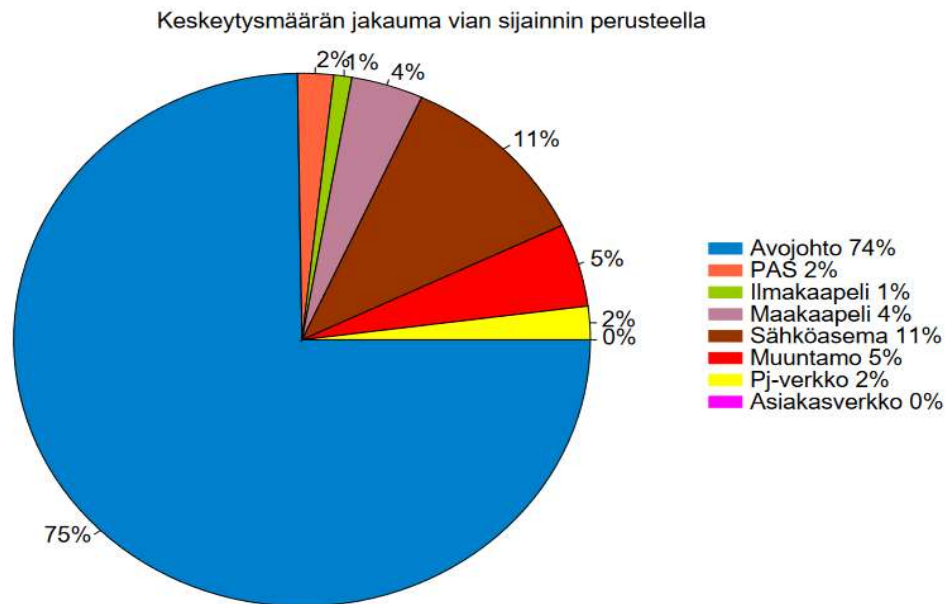
Yleisimmät sähkökatkoksiin johtavat viat ovat maa- ja oikosulut. Oikosulussa sähköverkon eri vaiheet pääsevät koskettamaan toisiaan, kun taas maasulussa yksi tai useampi vaihe koskettaa maata tai jotain laitteiston maadoitettua osaa. Muita sähköjärjestelmän vikoja ovat esimerkiksi salaman aiheuttamat ylijännitteet ja laitteiden toimintahäiriöt. Jakeluverkot ovat usein suunniteltu kestämään yksi vika katkaisematta sähköä siirtoa asiakkaille. [6]

Kuvassa 5 on esitetty sähkökatkoihin johtavien vikojen aiheuttajat. Kuvasta huomataan, että syitä sähkökatkoille on useita. Kuitenkin valtaosa sähkökatkoista johtuu sään aiheuttamista vioista. Tuuli, myrskyt, lumi- ja jääkuormat, ukkonen sekä muu sää aiheuttavat yhteensä yli 75 % kaikista sähkökatkoista. [4]



**Kuva 5. Keskeytysajan aiheuttajat. [4]**

Valtaosa sähkökatkoista tapahtuu keskijänniteverkossa, joka sisältää paljon avojohtoa. Vikoja esiintyy ylivoimaisesti eniten avojohdossa, johon sääolosuhteet pääsevät helpoiten vaikuttamaan. [4] Kuvassa 6 on esitetty sähköjakelun keskeytysten määrän jakauma vian sijainnin perusteella. Kuvasta huomataan keskijänniteverkon avojohtojen olevan vastuussa 74 % kaikista keskeytyksistä. Pienjänniteverkon osuus keskeytyksistä on vain 2 %.



**Kuva 6. Keskeytysmäärän jakauma vian sijainnin perusteella. [4]**

Suurimman osan vioista aiheuttavat luonnonilmiöt, kuten myrskyt ja kovat tuulet sekä lumi- ja jääkuormat. Tuuli ja myrskyt aiheuttavat sähkökatkoja taivuttamalla tai jopa kaatamalla puita sähkölinjojen päälle. Lumi- ja jääkuorman tapauksissa kyseessä on usein niin sanottu tykky eli tykkylumi. Tykky tarkoittaa puiden latvukseen ja oksille kasaantuvaa raskasta lumikuormaa. Tykkylumi on normaalia lunta huomattavasti raskaampaa. Runsaista tykkylumikertymiä syntyy pääasiassa kahdella tavalla, huurtamalla ja satamalla. Huurteesta ja huurteen sitomista jääkiteistä sekä lumihietaleista syntynyttä tykkylunta kutsutaan huurretykyksi. Kostean sataneesta lumesta tai kostean lumen sitomista lumihietaleista syntynyttä tykkylunta kutsutaan nuoskatykyksi. Sähkölinjan lähellä olevat puut saattavat raskaan tykkylumikuorman takia taipua tai jopa kaatua johtojen päälle. Myös puista katkeavat oksat saattavat aiheuttaa katkon tippuessaan johtojen päälle. [7]

## 3.2 Suurhäiriöt

Suurhäiriö tarkoittaa sähkönjakelun poikkeuksellisen laajaa ja vakavaa häiriötä. Suurhäiriölle käsitteenä ei ole yhtä virallista määritelmää. Usein suurhäiriöksi lasketaan tilanne, jossa sähköverkkoyhtiön asiakkaista yli 20 % on ilman sähköä tai jossa 110 kV:n johto tai 110/20 kV:n sähköasema tai päämuuntaja vikaantuu useiksi tunneiksi [8]. Suomessa tapahtuneet suurhäiriöt ovat usein johtuneet myrskyjen aiheuttamista tuhoista. Tunnettuja suurhäiriöitä Suomessa ovat esimerkiksi seuraavat:

- Syksyllä 2001 Pyry- ja Janika-myrskyt
  - Sähkökatkot koskivat yhteensä 860 000 asiakasta
  - Pisimmät katkokset kestivät yli viikon
- Kesällä 2010 Asta-, Veera-, Lahja- ja Sylvi-ukkosmyrskyt
  - Sähkökatkot koskivat yhteensä 481 000 asiakasta
  - Pisin katkos kesti 42 päivää
- Joulukuussa 2011 Tapani- ja Hannu-myrskyt
  - Sähkönjakelun keskeytyksestä kärsi yhteensä 570 000 asiakasta. [9]

Myrskyjen lisäksi suurhäiriöitä on aiheuttanut myös raskaat lumikuormat. Alkuvuonna 2011 lumikuormat aiheuttivat kymmenille tuhansille asiakkaille sähkökatkoja, joista pahimmat kestivät noin viikon. Kovat pakkaset ja suuret lumimäärät vaikeuttivat metsässä kulkemista ja vikojen korjaamista. [9]

## 3.3 Suurhäiriöiden seuraukset

Pyry- ja Janika-myrskyjen seurauksena sähkömarkkinalakia muutettiin vuonna 2003 ottamalla käyttöön vakiokorvaukset. Vakiokorvauksia maksetaan sähkönkäyttäjille pitkistä toimituskeskeytyksistä. Sähkönkäyttäjän saama korvaus lasketaan vuotuisen verkkopalvelumaksun perusteella. Korvauksen määrä vuotuisesta verkkopalvelumaksusta vaihtelee riippuen keskeytysajan pituudesta. Nykyisen eli vuoden 2013 sähkömarkkinalain mukaiset korvaukset ovat

- 10 %, kun keskeytysaika on ollut vähintään 12 h mutta vähemmän kuin 24 h
- 25 %, kun keskeytysaika on ollut vähintään 24 h mutta vähemmän kuin 72 h
- 50 %, kun keskeytysaika on ollut vähintään 72 h mutta vähemmän kuin 120 h
- 100 %, kun keskeytysaika on ollut vähintään 120 h mutta vähemmän kuin 192 h

- 150 %, kun keskeytysaika on ollut vähintään 192 h mutta vähemmän kuin 288 h
- 200 %, kun keskeytysaika on ollut vähintään 288 h.

Loppukäyttäjälle vuodessa maksettavien vakiokorvausten määrä ei voi kuitenkaan ylittää 200 % tai 2000 €. [10]

Vuosien 2010 ja 2011 myrskyjen jälkeen vuonna 2013 sähkömarkkinalakia muutettiin taas asettamalla sähköverkkoyhtiöille toimitusvarmuusvaatimukset. Muutoksissa määrättiin, että asemakaava-alueilla ei saa esiintyä yli 6 tunnin yhtäjaksoisia keskeytyksiä ja muilla alueilla ei saa esiintyä yli 36 tunnin yhtäjaksoisia keskeytyksiä. Sähköverkkoyhtiöiden tulisi tehdä muutoksia verkkoihinsa, jotta ehdot täyttyisivät vuoteen 2028 mennessä. Vuonna 2017 sähkömarkkinalakia täydennettiin, joka mahdollisti tavoiteaikataulun siirtämisen vuoteen 2036 erityisen painavista syistä. [10,11]

Uusi sähkömarkkinalaki tarkoitti siis monelle sähköverkkoyhtiölle verkon toimitusvarmuuden parantamista nopealla aikataululla. Sähkömarkkinalaissa määrättiin, että 50 % asiakkaista on oltava uuden maksimikeskeytysajan vaatimuksen piirissä 31.12.2019 mennessä. 75 % asiakkaista 31.12.2023 mennessä tai 31.12.2028 mennessä, mikäli yhtiö on saanut aikatauluun lisäaikaa. 100 % asiakkaista 31.12.2028 mennessä tai lisäajalla 31.12.2036 mennessä. [10,11]

## 4. SÄHKÖKATKOJEN EHKÄISEMINEN

Sähkökatkojen välttämiseksi ja toimitusvarmuusvaatimusten täyttämiseksi on käytössä monia tapoja. Valtaosa sähkökatkoista johtuu vioista keskijänniteverkon avojohdossa. Onkin siis järkevää rakentaa keskijänniteverkkoa uusiksi, tai tehdä siihen parannuksia. Hyviä keinoja keskijänniteverkon toimitusvarmuuden parantamiseksi ovat sen muokkaaminen puuvarmaksi tai maakaapelointi. Tässä työssä esitetyt tavat sähkökatkojen ehkäisemiseen keskittyvät lähinnä olemassa olevan keskijohtoverkon avojohdon toimitusvarmuuden parantamiseen tai avojohdon korvaamiseen maakaapelilla.

### 4.1 Ehkäisemistavat

Metsässä kulkeva keskijänniteverkon avojohdo kulkee yleensä noin 10 m leveää johtokatu pitkin. Itse johtokatu raivataan ja puiden kasvaminen estetään, jottei puista aiheudu linjalle ongelmia. Usein puun takia tapahtunut vikaantuminen johtuukin vierimetsän puista. Vierimetsäksi kutsutaan johtokatuun kuulumatonta keskijänniteverkon läheisyydessä sijaitsevaa metsää. Vierimetsässä pitkäksi kasvanut puu saattaa kaatua tai taipua johtolinjan päälle. Tällaisia yksittäisiä puita kutsutaan nimellä riskipuut. Lehtipuut nähdään usein riskipuina, niiden taipuessa helpommin raskaan lumikuorman alla. Riskipuiksi lasketaan myös riukuuntuneet, vaurioituneet sekä kallistuneet puut. [12] Riskipuut poistamalla estetään niiden mahdollisesti aiheuttamat viat ja verkon toimitusvarmuus paranee. Riskipuiden poistamisen toimitusvarmuutta parantava vaikutus ulottuu vain lähitulevaisuuteen, sillä vuosien saatossa vierimetsä kasvaa ja muodostuu uusia riskipuita.

Toinen tapa parantaa metsässä kulkevan keskijänniteverkon avojohdon toimitusvarmuutta on ylileveä johtokatu. Ylileveä johtokatu tarkoittaa johtokatu, joka ylittää huomattavasti normaalin 10 metrin leveyden. Ylileveä johtokatu syntyy, kun johtokadun vierimetsälle suoritetaan kaistalehakkuu. Usein johtokadun leveydeksi tulee noin 40 metriä, joka on huomattavasti tavallista leveämpi. Keskijänniteverkon johtokatu levenee 15 metriä molempiin suuntiin, jolloin puiden kaatuminen tai taipuminen johtolinjan päälle on mahdotonta. Ilmajohdosta saadaan näin puuvarma, jolloin sen vikataajuus laskee lähes maakaapelin tasolle. Verkon toimitusvarmuus siis kasvaa merkittävästi. Ylileveä johtokatu takaa puuvarman verkon ja alhaisen vikataajuuden pidemmäksi aikaa kuin riskipuiden poisto, noin 20 vuodeksi. [13]

Keskijänniteverkon toimitusvarmuuden kannalta yksi parhaista ratkaisuista on maakaapelointi. Maassa kulkevan kaapelin vikataajuus on hyvin alhainen ja sen alttius vikaantua

luonnontapahtumista johtuvista syistä on lähes olematon. Maakaapeloidun keskijänniteverkon keskeytyksistä lähes 75 % on suunniteltuja. Harvoista suunnittelemattomista vikaantumisistakin yli puolet johtuu niin sanotusti muista syistä, kuten kaivinkoneen vahingossa katkaisemasta kaapelista. [4]

## 4.2 Vikataajuus

Tärkeä indeksi eri sähkökatkojen ehkäisemistapoja vertaillen on johdon alttius vikaantumiselle, eli vikataajuus. Vikataajuudella tarkoitetaan tietyssä johdossa vuoden aikana koettuja vikoja 100 km kohden. Vikataajuuteen vaikuttaa johdinkohtaisesti eri parametrit. Avojohtoon vaikuttaa johtimen ympäristön metsäisyys sekä johtimen kunto että johtimen tyyppi. Maakaapeliin taas ei vaikuta metsäisyys, vaan maakaapeloinnin rakenne, kaivuualttius sekä johtimen kunto.

Maakaapelin vikataajuus on hyvin alhainen, noin 2 vikaa/a/100 km, eikä siihen vaikuta luonnonilmiöt. Avojohtimen vikataajuus vaihtelee paljon riippuen johtimen ympäristöstä. Avojohtoon vikataajuus huomioimatta sen ympäristöä on noin 3 vikaa/a/100 km. Pellolla kulkeva avojohto on puuvarma, jolloin tuuli ja lumi eivät aiheuta siihen yhtään vikaa. Ylileveän johtokadun omaava avojohto on puuvarma ja täten verrattavissa pellolla kulkevaan avojohtoon. [14]

Avojohtoon kulkiessa metsässä normaalilla 10 m leveällä johtokadulla, voidaan vikataajuuden olettaa olevan 9–12 vikaa/a/100 km. Metsässä kulkevan avojohtoon vikataajuuteen vaikuttaa paljon metsän kunto, puiden keskipituus sekä riskipuiden määrä. Riskipuut poistamalla metsässä kulkevan avojohtimen alttius lumen ja tuulen aiheuttamille vioille pienenee. Tällöin vikataajuus on alle 8 vikaa/a/100 km. Avojohtoon kulkiessa tienvarressa, jolloin se on toiselta puolelta käytännössä puuvarma, sen vikataajuus on noin 6 vikaa/a/100 km. [14]

## 4.3 Kustannukset

Toimitusvarmuusvaatimuksia täyttäessään sähköverkkoyhtiöt pohtivat paljon eri ratkaisujen kustannuksia. Toimitusvarmuuden parantamiseen esitetyt keinot ovat riskipuiden poistaminen, ylileveä johtokatu ja maakaapelointi. Riskipuiden poistaminen on keinoista edullisin. Riskipuiden poiston voi yhdistää johtokadun avaamiseen, jolloin kustannuksia kertyy alle 2000 €/km [15]. Ylileveän johtokadun vaatiman kaistalahakkuun kustannukset ovat keskimäärin noin 6000–8000 €/km [11].

Koska käsitellään olemassa olevaa keskijänniteverkon avojohtoa, maakaapeloinnin kustannukset ovat ymmärrettävästi suurimmat. Maakaapeloinnissa nykyistä verkkoa ei voi



hyödyntää, vaan on rakennettava kokonaan uusi. Maakaapeloinnin kustannukset riippuvat paljon kaapelin kuormituksesta sekä alueesta, johon maakaapeli asennetaan. Tavallinen maakaapeli kustantaa 24 300–44 500 €/km, sekä sen vaatima kaivuu riippuen kaivettavasta alueesta kustantaa noin 10 700–24 200 €/km. [16,17]

Pelkkien vikataajuuksien ja kustannusten perusteella järkevin ratkaisu toimitusvarmuuden parantamiseen on ylileveä johtokatu. Sillä saavutetaan puuvarma verkko ja täten alhainen vikataajuus kustannuksien pysyessä suhteellisen alhaisina. Tilanne kuitenkin muuttuu, mikäli johdon käyttöikä on lähes täynnä ja linja pitää rakentaa joka tapauksessa uudelleen. 20 kV ilmajohtoverkon rakentaminen kustantaa noin 21 800–29 100 €/km riippuen kaapelin kuormituksesta [16,17].

## 5. EHKÄISEMISTAPOJEN KANNATTAVUUS

Jokainen sähköverkkoyhtiö on lain velvoittama täyttämään toimitusvarmuusvaatimukset. Toimitusvarmuusvaatimusten täyttäminen tarkoittaa siis sähköverkkoyhtiöille suuria investointeja. Investointien suuruuden takia sähköverkkoyhtiöt painottavat kustannustehokkuutta hankkeissaan. Investointieurolla pyritään täyttämään toimitusvarmuusvaatimukset mahdollisimman suurella määrällä asiakkaita. [11] Hankkeita suunnitellessa sähköverkkoyhtiöt vertailevat eri ratkaisujen kannattavuutta. Kannattavuuden vertailemiseen käytetään usein alueen jakamista vyöhykkeiksi ja pohtimalla oma strategia jokaiselle vyöhykkeelle.

### 5.1 Vyöhykkeisiin jakaminen

Sähkömarkkina-alueissa määritetyt toimitusvarmuusvaatimukset edellyttävät sähköverkkoyhtiöitä tuomaan asiakkaita toimitusvarmuusvaatimusten piiriin etukäteen määritetyllä aikataululla. Luontaisesti järkevintä on aloittaa paikoista, jossa toimitusvarmuusvaatimukset saadaan täytettyä mahdollisimman suurella määrällä asiakkaita. Sähköverkkoyhtiöiden onkin siis järkevää tutkia omaa aluettaan ja kartoittaa, missä asiakasta kohden on vähiten johtopituutta.

Hyvä tapa kartoittaa asiakkaita ja toimitusvarmuuden parantamiseksi tehtäviä toimenpiteitä on jakaa alue vyöhykkeisiin. Vyöhykejako tehdään yleensä asiakastiheyden mukaan. Tavanomainen jako vyöhykkeille on taajamat, taajamien lähialueet sekä harvaan asutut alueet. Sähköverkkoyhtiö Enontekiön Sähkö Oy:n sähkönjakeluverkon kehittämissuunnitelmassa vyöhykejako on toteutettu seuraavasti.

Vyöhyke 1 kattaa asemakaava-alueet. Vyöhyke 2 sisältää haja-asutusalueita sekä asemakaava-alueen ulkopuolella sijaitsevia kohteita, kuten kyliä ja asutuskeskittyymiä. Vyöhyke 3 sisältää alueet, jotka eivät sisälly vyöhykkeisiin 1 tai 2, sekä paikallisiin olosuhteisiin perustuvat alueet. Esimerkiksi saaret sekä kohteet, joihin ei johda tietä. [18]

Vyöhykejaon voi toteuttaa myös erilaisesti, esimerkiksi sähköverkkoyhtiö Elenia Oy on sähkönjakeluverkon kehittämissuunnitelmassaan jakanut oman alueensa 7 vyöhykkeeseen. Vyöhykejaossa käsitellään erikseen kaupunkialueet, taajama-alueet, taajamien väliset runkoyhteydet, haja-asutusalueen runkoyhteydet, haja-asutusalueen latvaverkot, haja-asutusalueen ylläpidettävä ilmajohtoverkko sekä joustopalvelut. [19]

Vyöhykejaon voi toteuttaa myös yksinkertaisemmin, kuten jakamalla alue kahteen vyöhykkeeseen, asemakaava-alueet kattavaan vyöhykkeeseen ja muut alueet kattavaan

vyöhykkeeseen. Vastaavaa yksinkertaista vyöhykejakoja sähköjakeluverkon kehittämissuunnitelmassaan käyttää esimerkiksi sähköverkkoyhtiö Parikkalan Valo Oy [20]. Vyöhykejakoon ei siis ole yhtä oikeaa tapaa, vaan sähköverkkoyhtiöt saavat itse jakaa alueensa haluamallaan tavalla.

## 5.2 Vyöhykekohtaiset kehittämissstrategiat

Vyöhykejako helpottaa sähköverkkoyhtiöitä kehittämään strategioita toimitusvarmuuden parantamiseen. Yksittäisen vyöhykkeen toimitusvarmuuden parantamiseen käytettäviä keinoja pohtiessa on hyödyllistä, että käsiteltävä alue on samankaltaista ja sitä koskee vastaavat toimitusvarmuusvaatimukset. Jokaiselle vyöhykkeelle määritetään kehittämissstrategia, jossa vertaillaan toimitusvarmuuden parantamiseen käytössä olevien keinojen soveltuvuutta ja kustannuksia.

Toimitusvarmuuden parantamiseen käytössä olevien keinojen soveltuvuuden arvioiminen on usein kehittämissstrategiaa pohtiessa merkittävä tekijä. Esimerkiksi asemakaava-alueilla ilmajohtoihin liittyviä ratkaisuja on usein mahdoton toteuttaa maankäytöllisten syiden takia [20]. Lähes aina ratkaisu onkin maakaapelointi, vaikkei ratkaisu kustannusten puolesta olisikaan kannattavin. Maakaapelointia tukee myös asemakaava-alueilla vaikuttava tiukempi toimitusvarmuusvaatimus. Asemakaava-alueella johtojen kuormitus on usein suuri verrattuna haja-asutusalueisiin, joten maakaapeloidulla verkkoa saadaan tuotua suhteellisesti suuri määrä asiakkaita toimitusvarmuusvaatimusten piiriin.

Asemakaavatonta aluetta sisältäville vyöhykkeille toimitusvarmuuden parantamiseen soveltuvia ratkaisuja ovat yleensä kaikki käytettävissä olevat ratkaisut. Ratkaisujen kannattavuutta vertaillaessa tulee ottaa huomioon jo olemassa olevien avojohtojen jäljellä oleva käyttöikä, johdon kuormitus ja odotettu kuormituksen kasvu. Mikäli avojohtolla on käyttöikä jäljellä vielä vähintään noin 15 vuotta ja johdon kuormitus on kohtuullinen, on järkevää raivata ylileveä johtokatu uuden verkon rakentamisen sijaan. Mikäli johtimella on käyttöikä jäljellä, mutta kuormitus on pieni ja sen ennakoidaan vielä laskevan, voi olla kannattamatonta investoida ylileveään johtokatuun. Johtokadun kunnossapito ja säännöllinen riskipuiden poistaminen saattaa olla kannattavampi ratkaisu. Riskipuiden poistaminen on toimiva ratkaisu myös tilanteissa, jossa johdon käyttöikä lähenee loppuaan ja johdon kuormitus on pieni. [11] Johtimen uusinnan investointia pystytään näin lykkäämään, jolloin sähköverkkoyhtiö saa lisää aikaa kuormituksen kasvun seuraamiseen. Myöhemmin johdon uusintaa pohtiessa voidaan kuormituksen kasvun muutosta hyödyntää maakaapeloinnin ja ilmajohtojen väliltä valittaessa.

Avojohtimen johtokadun leventäminen ylileveäksi tai riskipuiden poistaminen on järkevää, mikäli se on vyöhykkeelle soveltuva ratkaisu ja johdolla on vielä käyttöikä jäljellä. Sähköverkkoyhtiöille päänvaivaa aiheuttaa tilanne, jossa johtimen käyttöikä on täynnä ja verkko tulee uudelleenrakentaa. Päätökseen vaikuttaa useita tekijöitä, kuten johdon nykyinen reitti. Mikäli johto kulkee pääosin pellolla ja tien vieressä, sen vikataajuus on jo valmiiksi pieni, eikä johtokadun raivaamiseen tarvitse käyttää niin paljon resursseja. Järkevä päätös saattaakin olla rakentaa uusi ilmajohto vanhan tilalle.

Maakaapeloinnin ja ilmajohdon kannattavuuksia vertaillen johdon kuormitus on suuressa roolissa. Johdon kuormitus vaikuttaa vioista aiheutuviin kustannuksiin, mitä isompi tehomäärä jää vian takia toimittamatta, sitä enemmän se sähköverkkoyhtiölle maksaa. Esimerkiksi suuren kuormituksen omaava isoa asumiskeskittymää syöttävä keskijänniteverkon avojohto aiheuttaa vikaantuessaan sähkökatkon suuremmalle määrälle loppukäyttäjiä, kuin vastaava pienen kuormituksen omaava haja-asutusalueita syöttävä johto. Onkin siis järkevää priorisoida johtoa, jolla on suurempi kuormitus, jolloin samalla sijoi- tuksella saadaan suurempi määrä asiakkaita paremman toimitusvarmuuden piiriin.

Maaltamuutto, eli ihmisten muuttaminen maalta lähemmäs ihmiskeskittymiä, kuten suuriin kaupunkeihin on varsin yleinen ilmiö. Usein maaseudulla sijaitseville paikkakunnille muuttavien ihmisten määrä on pienempi kuin sieltä pois muuttavien ihmisten määrä, jolloin puhutaan muuttotappiosta. Tällaisissa paikkakunnissa myös tarvittavan sähkön määrä laskee. Sähköverkkoyhtiöt joutuvatkin pohtimaan mahdollista siirtolinjan uusintatarvetta ikään kuin ennustaen tulevaisuuden väestönkehitystä. Mikäli ihmisten ja sähkönkulutuksen määrä todennäköisesti laskee, saattaa maakaapelointi olla huono sijoitus. Tulevaisuudessa saatetaankin rakentaa uusi ilmajohto, mahdollisesti mitoitettu pienemmälle kuormitukselle. Olemassa olevan avojohdon uusintatarvetta pyritäänkin maaltamuutosta kärsivien paikkakuntien tilanteessa lykkäämään, jolloin saadaan lisää aikaa pohtia sopivaa ratkaisua. Riskipuiden poistaminen voisi siis olla juuri sopiva tapa parantaa toimitusvarmuutta ja samalla lykätä uudelleenrakentamista myöhäisempään ajankohtaan.

## 6. YHTEENVETO

Nopeasti sähköistyvässä yhteiskunnassa sähkön kulutuksen määrä kasvaa, jolloin myös sähkökatkojen aiheuttamat vahingot kasvavat. Pahimmat sähkökatkot saattavat vaikuttaa koko yhteiskuntaan. Tämän työn tavoitteena oli esitellä sähkökatkoihin johtavien vikojen syitä ja keinoja niiden välttämiseen. Työn aihetta pohjustettiin ensin kertomalla Suomen sähköjärjestelmästä ja sen eri komponenteista. Pohjustuksen jälkeen käsiteltiin yleisimpiä sähkökatkoihin johtavia vikoja ja niiden syitä. Sähkökatkojen yhteydessä käsiteltiin sähkönjakelun suurhäiriöitä, jotka ovat laajoilla tuhoillaan aiheuttaneet muutoksia sähkömarkkinalakiin. Työssä esiteltiin erilaisia keinoja, joilla voidaan vähentää sähkökatkoihin johtavia vikoja ja täten parantaa verkon toimitusvarmuutta. Työn lopussa pohdittiin keinojen kannattavuutta erilaisissa tilanteissa.

Suomen sähköjärjestelmä koostuu voimalaitoksista, kantaverkosta, suurjännitteisistä jakeluverkoista, jakeluverkoista ja loppukäyttäjistä. Valtaosa sähkökatkoihin johtavista vioista tapahtuu jakeluverkkoon kuuluvassa keskijänniteverkossa. Tarkemmin keskijänniteverkon avojohdoissa, joissa tapahtuu lähes 75 % kaikista sähkökatkoihin johtavista vioista. Valtaosan sähkökatkoista aiheuttaa luonnonilmiöt, kuten tuuli ja myrskyt sekä lumi- ja jääkuormat. Luonnonilmiöt ovat usein myös vastuussa sähkönjakelun suurhäiriöistä, joiksi kutsutaan poikkeuksellisen laajoja sähkökatkoja. Takavuosien suurhäiriöt ovat saaneet aikaan muutoksia sähkömarkkinalaissa. Sähkömarkkinalain muutoksissa on määritetty toimitusvarmuusvaatimukset, jotka velvoittavat sähköverkkoyhtiöt parantamaan toimitusvarmuuttaan vastaamaan annettuja vaatimuksia tiettyyn ajankohtaan mennessä.

Esimerkkejä keinoista parantaa toimitusvarmuutta olemassa olevan keskijänniteverkon avojohdoissa ovat ylileveän johtokadun raivaaminen ja riskipuiden poistaminen. Poistamalla riskipuita saadaan hieman parannettua toimitusvarmuutta suhteellisen alhaisilla kustannuksilla. Ylileveän johtokadun raivaaminen parantaa toimitusvarmuutta huomattavasti, mutta vaatii suuremman investoinnin. Maakaapeloinnilla saavutetaan paras toimitusvarmuus mutta se vaatii verkon uudelleenrakentamisen, jolloin kustannukset ovat huomattavasti suuremmat muihin keinoihin verrattuna. Toimitusvarmuuden parantamisessa kustannukset ovatkin usein suurin pohdinnan aihe. Sähköverkkoyhtiöt joutuvat laskemaan toimitusvarmuuden parantamiskeinon kannattavuutta pohtiessaan sopivaa ratkaisua.

Työn toisena tavoitteena oli vertailla toimitusvarmuuden parantamiseen esitettyjä keinoja sekä niiden kannattavuutta. Työssä tutkittiin eri sähköverkkoyhtiöiden tapoja luokitella jakelualueitaan vyöhykkeisiin, joissa pätee eri toimitusvarmuusvaatimukset ja täten myös vaaditaan erilaiset toimenpiteet niiden täyttämiseksi. Alueilla, joissa toimitusvarmuusvaatimukset ovat tiukimmat, ovat käytettävät keinot myös valittava tarkemmin. Lähes aina asemakaava-alueilla suuremmassa painoarvossa ovat toimitusvarmuusvaatimusten täyttäminen kuin kustannusten minimointi. Maakaapelointi on yleensä järkevin tapa täyttää vaatimukset ja säilyttää ympäristön esteettisyys. Asemakaava-alueiden ulkopuolella toimitusvarmuusvaatimukset kyetään täyttämään muillakin keinoilla, jolloin kustannukset ovat suuremmassa painoarvossa. Ylileveä johtokatu sekä riskipuiden poistaminen ovat varteenotettavia keinoja toimitusvarmuuden parantamiseen haja-asutusalueilla sekä tilanteessa, jossa avojohdolla on vielä käyttöikä jäljellä ja mahdollista investointia maakaapelointiin voidaan lykätä.

Työssä saavutettiin sen ensisijainen tavoite, joka oli esitellä sähkökatkoihin johtavien vikojen syitä ja keinoja niiden välttämiseen. Työn toinen tavoite, eli keinojen sekä niiden kannattavuuden vertailu paljastui odotettua monimutkaisemmaksi. Tilanteet ovat usein hyvin erilaisia, eikä etukäteen voi määrittää yksittäistä parasta keinoa toimitusvarmuuden parantamiseen kustannustehokkaasti. Sopivan keinon päättämiseen vaikuttaa moni asia, kuten nykyisen johdon jäljellä oleva käyttöikä, investointikustannukset sekä johdon nykyinen kuormitus ja kuormituksen ennustettu kasvu. Sähköverkkoyhtiöiden tulee siis päättää sopiva keino toimitusvarmuuden parantamiseen ja vaatimusten täyttämiseen tapauskohtaisesti.

## LÄHTEET

- [1] Suomen sähköjärjestelmä, Fingrid, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.10.2022): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>
- [2] Sähkönsiirto ja -jakelu, Säteilyturvakeskus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.10.2022): <http://www.stuk.fi/aiheet/sahkonsiirto-ja-voimajohdot/sahkonsiirto-ja-jakelu>
- [3] Sähköverkot, Energiateollisuus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24.10.2022): <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/sahkoverkot>
- [4] T. Heikkilä, Keskeytystilasto 2019, Energiateollisuus ry ET, Helsinki, 2020, 25 s. Saatavissa: [https://energia.fi/files/4972/Sahkon\\_keskeytystilasto\\_2019.pdf](https://energia.fi/files/4972/Sahkon_keskeytystilasto_2019.pdf)
- [5] Energiateollisuus, Johtoalueiden vierimetsien hoito, Energiateollisuus ry ET, Helsinki, 2018, 13 s. Saatavissa: [https://energia.fi/files/2739/Johtoalueiden\\_vierimetsien\\_hoito\\_2018.p](https://energia.fi/files/2739/Johtoalueiden_vierimetsien_hoito_2018.p)
- [6] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot 1: Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta, Otatieto, Helsinki, 2011, 520 s.
- [7] Tykky eli tykkylumi, Ilmatieteen laitos, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5. marraskuuta 2022): <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tykky-eli-tykkylumi>
- [8] P. Järventausta, A. Mäkinen, K. Kivikko, J. Partanen, J. Lassila, S. Viljainen, Sähköverkon kehittämisvelvoitteen arviointi käyttövarmuuden näkökulmasta. Energiamarkkinavirasto, Helsinki, 2005, 43 s.
- [9] P. Verho, J. Sarsama, J. Strandén, H. Krohns-Välimäki, V. Hälvä, O. Hagqvist, Sähköhuollon suurhäiriöiden riskianalyysi- ja hallintamenetelmien kehittäminen - Projektin loppuraportti, Tampereen teknillinen yliopisto, VTT, Tampere, 2012, 89 s.
- [10] Sähkömarkkinalaki, 588/2013, 2013. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>
- [11] J. Partanen, Sähkönsiirtohinnot ja toimitusvarmuus, Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki, 2018, 71 s. Saatavissa: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161178/43\\_18\\_Sahkonsiirtohinnot\\_ja\\_toimintavarmuus.pdf](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161178/43_18_Sahkonsiirtohinnot_ja_toimintavarmuus.pdf)
- [12] Energiavirasto, Sähkömarkkinalain muutosten vaikutus toimitusvarmuuskannustimeen. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12766832/Perustelumuuisto+toimitusvarmuuskannustin+2021.pdf/0c40b2b8-37a3-950a-7798->

8409fde3931f/Perustelumuistio+toimitusvarmuuskannus-  
tin+2021.pdf?t=1633345077551

- [13] R. Ranta, Keskijännitteisten ilmajohtojen toimintavarmuuden parantaminen, Tapio, 2013, 14 s. Saatavissa: [https://tapio.fi/wp-content/uploads/2019/10/Osaraporttien\\_tivistelma.pdf](https://tapio.fi/wp-content/uploads/2019/10/Osaraporttien_tivistelma.pdf)
- [14] P. Verho, Luotettavuuspohjainen verkostanalyysi (LuoVa) projektin loppuraportti, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2005, 115 s.
- [15] R. Ranta, H. Niemelä, Keskijännitteisten ilmajohtolinjan vierimetsän hoitoprojektin suunnittelu ja toteutus, Tapio, 2013, 23 s. Saatavissa: [https://tapio.fi/wp-content/uploads/2019/10/Vierimetsanhoito\\_projekti\\_kasikirja.pdf](https://tapio.fi/wp-content/uploads/2019/10/Vierimetsanhoito_projekti_kasikirja.pdf)
- [16] Verkkokomponentit ja yksikköhinnat 2016–2023, Energiavirasto.
- [17] Verkkokomponenttien määritykset, Energiavirasto.
- [18] Enontekiön Sähkö Oy:n sähkönjakeluverkon kehittämissuunnitelma, Napapiirin energia ja vesi Oy, 2022, 63 s.
- [19] Elenia Verkko Oyj:n sähkönjakeluverkon kehittämissuunnitelma 2014–2036, Elenia, 2022, 46 s.
- [20] Sähkönjakeluverkon kehittämissuunnitelma 2022, Parikkalan Valo Oy, 2022, 31 s.