LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Joona Rannanmaa

Toimitusvarmuustasojen arviointi ja vaatimuksiin vastaavan verkon kaapelointitarpeiden määrittämien

Työn tarkastajat: Apulaisprofessori Jukka Lassila
TkT Juha Haakana
Työn ohjaaja: DI Lauri Kurki

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Joona Rannanmaa

Toimitusvarmuustasojen arviointi ja vaatimuksiin vastaavan verkon kaapelointitarpeiden määrittämien

Diplomityö
2021

62 sivua, 29 kuvaa, 21 taulukkoa ja 3 liitettä
Työn tarkastajat: Apul. prof. Jukka Lassila
TkT Juha Haakana
Ohjaaja: DI Lauri Kurki
Hakusanat: suurhäiriö, maakaapelointi, sähkönjakelu, toimitusvarmuus

Vuoden 2013 sähkömarkkinalainmuutoksen asettamat toimitusvarmuusvaatimukset ohjaavat saneeraamaan jakeluverkkoa toimitusvarmemmaksi lain vaatimusten täyttämiseksi. Työ on tehty PKS Sähkönsiirto Oy:lle, joka toimii pääasiassa Pohjois-Karjalan ja Pohjois-Savon alueilla. Toimitusvarmuusvaatimusten täyttämiseksi yhtiö on pääasiassa kaapeloinut asemakaava-alueet ja kaapelointi alkaa painottua haja-asutusalueille. Haja-asutusalueiden kaapeloinnin määrittämistä vaikeuttaa erityisesti käyttöpaikkojen alhainen tiheys johtokilometriä kohti.

Työssä selvitettiin nykyisen PKSS:n tavoiteverkon toimitusvarmuus mallintamalla tapahtuneista suurhäiriöstä kerättyjen tietojen avulla. Toimitusvarmuutta tarkasteltiin tekemällä suurhäiriömalli ja mallintamalla nykyinen tavoiteverkko ja tarkasteltavien suurhäiriöiden aikainen verkko. Lisäksi työssä tarkasteltiin yhtiön nykyistä kaapelointistrategiaa ja sitä verrattiin runkojohtopainotteiseen kaapelointiin. Kaapelointistrategioita vertailtiin valitsemalla alueita, joille mallinnetiin niillä syntyvät KAH-kustannukset. Alueiden erilaisia kaapelointitoteutuksia vertailtiin niiden aiheuttamien KAH-kustannusten perusteella ja maakaapeloidulle alueelle tulevien käyttöpaikkojen ja sähkönkulutuksen mukaan.

Suurhäiriövarman verkon määrää suositellaan kasvatettavan 16 % KJ-verkossa ja 8 % PJ-verkossa, jotta toimitusvarmuusvaatimukset täyttyvät. Tykkylumisuurhäiriöihin tavoiteverkon suurhäiriövarman verkon määrä on riittävä. Yhtiön nykyinen kaapelointistrategia on parempi johtolähdöillä, joissa kulutus ja käyttöpaikat keskittyvät lähelle sähköasemaa ja runkopainotteinen on parempi vaihtoehto niiden keskittyessä runkojohdoille tai kauas sähköasemasta.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Joona Rannanmaa

Assessing security of supply of the grid and determining the network cabling needs to meet the requirements

Master's Thesis
2021

62 pages, 29 figures, 21 tables and 3 appendixes

Examiners: Assoc. Prof. Jukka Lassila
D. Sc Juha Haakana
Instructor: M. Sc. Lauri Kurki
Keywords: Major disturbance, underground cabling, electricity distribution, security of supply

The security of supply requirements set by the 2013 amendment to the Electricity Market Act guide the restructuring of the distribution network to make it more secure to meet the requirements of the law. The work has been done for PKS Sähkönsiirto Oy which operates mainly in the regions of North Karelia and North Savo. To meet security of supply requirements, the company has mainly cabled town plan areas and now cabling focuses on sparsely populated areas. Determining the cabling of sparsely populated areas is made more difficult by the low density of customers per line kilometer.

The work investigated the security of supply during a major disturbance of the current PKSS target network by modeling the data collected from the major disturbances. Security of supply was examined by making a major disturbance model and modeling the current target network and the network at the time of the major disturbances. In addition, the work examined the company's current underground cabling strategy and compared it to trunk-line-weighted cabling. Cabling strategies were compared by selecting areas for which the interruption costs they generated were modeled. The different cabling implementations in the areas were compared based on the interruption costs they caused and by the number of customers and electricity consumption were in the cabled areas.

The amount of major-disturbance-proof line must be increased by 16 % in the MV-network and 8 % in the LV-network to meet the security of supply requirements. For major crown snow loads, the current target network is sufficient in meeting security of supply demands. The company's current cabling strategy is more suitable when consumption and customers are concentrated close to the substation and trunk-focused-cabling is preferred when consumption and the customers are concentrated on trunk lines or far away from the substation.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty PKS Sähkönsiirto Oy:lle. Haluan kiittää koko verkon kehityksen henkilökuntaa heiltä saamastani avusta ja erityisesti ohjaajaani DI Lauri Kurkea kaikesta opastuksesta ja neuvonnasta työn aikana. Lisäksi haluan kiittää käytön henkilöstöä heiltä saamistani avusta ja kommenteista työn aikana.

Haluan myös kiittää työni tarkastajia apulaisprofessori Jukka Lassilaa sekä tutkijatohtori Juha Haakanaa heiltä saamistani palautteesta ja neuvoista diplomityön teon ajalta.

Suuri kiitos myös vanhemmilleni, sisarilleni sekä ystävilleni kaikesta heiltä saamastani tuesta opiskelun aikana.

Joensuussa, 21.6.2021

Joona Rannanmaa

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO 8
2 TOIMINTAYMPÄRISTÖ 9
2.1 Sähkömarkkinalain muutos 9
2.2 Tulevaisuuden muutokset 9
2.3 Ilmastonmuutoksen vaikutus suurhäiriöihin 10
2.4 PKS Sähkönsiirto Oy 10
2.5 Vertailutilanteen vyöhykejako 10
2.6 1000 V tekniikka 11
2.7 Vian erottava kuormaerotin 12
2.8 Sähkömarkkinalaki 12
2.8.1 Nykyinen valvontamalli 13
3 NYKYISEN TAVOITEVERKON SUURHÄIRIÖVARMUUS 15
3.1 Suurhäiriön määritelmä 15
3.2 Suurhäiriön mallinnus 16
3.3 Verkon sijainnin ja rakenteen vikatiheydet 17
3.4 Vian rajaus ja paikannus 19
3.5 Korjausresurssien toiminta 19
3.6 Vikamäärän kehitys 20
3.7 Päivö-myrsky 21
3.8 Valio-myrsky 23
3.8.1 Valion ja Päivön vertailua 24
3.9 Talvimyrsky 24
4 HERKKYYSTARKASTELU 27
4.1 Yli 36 h keskeytykset 27
4.2 Viankorjausnopeus 31
4.3 Tapahtuneiden vikojen määrän muutos 32
4.4 Vioista kerättävän tiedon lisääminen 34
5 VYÖHYKEJAKO OSANA VERKON KEHITTÄMISTÄ 35
5.1 Vyöhykejakoon vaikuttavat tekijät 35
5.2 Verkon automaation ja kaukokäytön merkitys 35
5.3 Etätaajamien huomiointi 36

5.4 Case-alueiden valinta ja rajaus 36
5.5 Case-alueiden tarkastelu 37
5.6 Haarajohtojen kustannusvertailua 38
5.7 Tarkasteltavat vaihtoehdot 41
5.8 Case-alue I 41
5.9 Case-alue II 45
5.10 Case-alue III 48
5.11 Case-alue IV 50
5.12 Runkopainotteisen kaapeloinnin edut 53
5.13 Yhteenveto vyöhykejaon tarkastelusta 54
6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET 55
LÄHDELUETTELO 58
LIITTEET
Liite 1: KJ-maakaapelin kustannus EV:n yksikköhinnoilla.
Liite 2: PJ-maakaapelin kustannus EV:n yksikköhinnoilla.
Liite 3: Muuntajien kustannus EV:n yksikköhinnoilla.

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

AMKA	Riippukierrekaapeli
EV	Energiavirasto
h_{AJK}	AJK:n yksikköhinta.
h_e	keskeytyksestä aiheutuneen haitan energian hinta
h_{PJK}	PJK:n yksikköhinta
h_w	keskeytyksistä aiheutuneen haitan tehon hinta
KJ	Keskijännite
kp	Käyttöpaikka
PJ	Pienjännite
PKSS	PKS Sähkönsiirto Oy
SJ	Suurjännite
SHV	Suurhäiriövarma

MUUTTUJAT

d	nykyarvo
d_n	vuosikustannusten nykyarvo
f_{AJK}	aikajälleenkytkentöjen tiheys
f_{PJK}	pikajälleenkytkentöjen tiheys
f_{vika}	pysyvän vian vikatiheys
K_{tot}	tarkasteluajan investointien nykyarvo
K_{inv}	vuosittainen investointi
KAH	Keskeytyksestä aiheutunut haitta
KAH_{JK}	jälleenkytkennöistä aiheutunut KAH-kustannus
KAH_{vika}	pysyvästä viasta aiheutunut KAH-kustannus
L	KJ-verkon pituus
n	pitoaika
P	keskeytyksen kokeneiden käyttöpaikkojen keskiteho
P_{AJK}	AJK:n kokeneiden käyttöpaikkojen kokonaiskeskiteho
P_{PJK}	PJK:n kokeneiden käyttöpaikkojen kokonaiskeskiteho
p	Korkoprosentti
t	keskeytyksen pituus

1 JOHDANTO

Sähkömarkkinalaki asetti toimitusvarmuusvaatimukset jakeluverkkoyhtiöille, joiden mukaan säästä johtuvat keskeytykset eivät saa kestää taajamassa yli kuutta tuntia ja taajaman ulkopuolella yli 36 h (Sähkömarkkinalaki 588/2013). Tämä ohjaa verkkoyhtiötä investoimaan verkkojansa toimitusvarmemmiksi, esimerkiksi maakaapeloimalla KJ- ja PJ-verkkoja. Koska kuusi tuntia on niin tiukka aikaraja, taajamat on käytännössä kaapeloitava tämän saavuttamiseksi (Partanen et.al 2012).

PKS Sähkönsiirto Oy:n (PKSS) verkossa taajamat on työn kirjoittamisen hetkellä pääasiassa kaapeloitu ja kaapelointi kohdistuu haja-asutusalueille taajamien ulkopuolelle. Tämä tuo omat haasteensa johtuen haja-asutusalueen pitkistä verkkopituuksista ja alhaisesta väestötiheydestä, jolloin tarvitaan enemmän kaapelointia verrattuna taajamaan saman asiakasmäärän toimitusvarmuuden takaamiseksi. Tämä johtaa myös siihen, ettei vakiokorvausten tai KAH-kustannusten pienenemistä saatavat säästöt keskimäärin ole yhtä suuria kuin taajamissa.

Diplomityön tavoitteena on selvittää täyttääkö PKSS:n nykyinen tavoiteverkko sähkömarkkinalain asettamat toimitusvarmuusvaatimukset. Lisäksi työssä arvioidaan yhtiön nykyisen kaapelointistrategian toimivuutta ja verrataan sitä runkojohtopainotteiseen kaapelointistrategiaan.

Tavoiteverkon toimitusvarmuutta arvioidaan tekemällä suurhäiriömalli, jonka avulla mallinnetaan tapahtuneita suurhäiriöitä niistä kerättyjen tietojen avulla. Suurhäiriömallin lisäksi mallinnetaan kunkin suurhäiriön aikainen verkko, sekä nykyinen tavoiteverkko. Mallin avulla tarkastellaan myös, kuinka vikojen määrän tai korjausresurssien muutos vaikuttaa toimitusvarmuustasoon. Kaapelointistrategiaa arvioidaan valitsemalla verkosta erilaisia alueita, joille mallinnetaan KAH-kustannukset ja nykyistä kaapelointistrategiaa verrataan runkojohtopainotteiseen kaapelointiin kaapeloidulle alueelle tulevien käyttöpaikkojen, sähkönkulutuksen määrän sekä KAH-kustannussäästöjen avulla.

2 TOIMINTAYMPÄRISTÖ

PKS Sähkönsiirto Oy:n jakelualue on laajalti maaseutumaista. Jakelualue on paikoitellen hyvin harvaan asuttua mikä luo haasteita tulevaisuudessa toimitusvarmuusvaatimusten täyttämiseen. Yhtiön pitää pyrkiä saneeraamaan verkkoa toimitusvarmemmaksi haja-asutusalueilla samalla, kun haja-asutusalueiden väestö vähenee. Luvussa kerrotaan PKS Sähkönsiirto Oy:sta, sekä jakeluverkkotoiminnan regulaatiosta ja toimitusvarmuusvaatimuksista ja toiminta-alueella tapahtuvista muutoksista, kuten sähkömarkkinalain muutoksesta ja sähkönkulutuksesta tulevaisuudessa.

2.1 Sähkömarkkinalain muutos

Diplomityön tekemisen aikana Eduskunta valmistelee sähkömarkkinalain muutosta. Muutoksella pyritään hillitsemään sähkönjakelun hintojen nousua. Lain muutoksen vaikutuksesta Energiaviraston on muutettava jakeluverkon haltioiden tariffien laskentamenetelmiä jo kuluvan valvontajakson aikana. Tämä laskee 32 % jakeluverkonhaltioiden sallitun tuoton määrää vuonna 2022 nykyisiin menetelmiin verrattuna. Lisäksi haja-asutusalueilla toimiville jakeluverkonhaltijoille toimitusvarmuusvaatimusten täytäntöönpanoaikaa jatketaan vuoteen 2036. Tosin tätä joustoa kompensoidaan tiukemmalla sähkökatkojen korvausten aikarajalla. (TEM 2020/172)

Lain muutos johtaa pienempään tuottoon jakeluverkkoyhtiöille, samalla kun verkkoa tulee investoida toimitusvarmemmaksi. Tämä voi johtaa toimitusvarman verkon saneeraamisen hidastumiseen.

2.2 Tulevaisuuden muutokset

Tulevaisuuden sähkönkulutuksen muutostekijät, kuten liikenteen sähköistyminen, lämmitystapamuutokset ja sähkönpientuotanto tulevat yhteisvaikutukseltaan kasvattamaan verkon huipputehoja samalla kun energiankulutus vähenee (Lassila et.al 2019). Näiden muutostekijöiden takia yhteiskunta tulee yhä enemmän riippuvaisemmaksi sähköstä ja sähköntoimitusvarmuudesta. Etenkin haja-asutusalueilla sähkömarkkinalain asettamien toimitusvarmuusvaatimusten täyttäminen on haastavaa. Alueilla väestön tiheys on matala ja tietyillä alueilla asiakaskato vaikeuttaa kaapelointikohteiden valintaa. Alueet, joilla asiakaskato on mahdollista, on tärkeä tunnistaa ja niiden saneerausta on suositeltavaa pyrkiä mahdollisuuksien mukaan lykkäämään. Tällä pyritään välttämään investoimasta alueille,

joilta häviää asiakkaat ennen sinne saneeratun verkon teknistaloudellisen pitoajan päättymistä.

2.3 Ilmastonmuutoksen vaikutus suurhäiriöihin

Tykkylumella tarkoitetaan puiden oksille kertyvää lunta. Lumi painaa puiden latvoja ja oksia ilmajohtojen päälle, mikä voi aiheuttaa vian verkkoon. Tykkylumi syntyy pääasiassa märän lumen sataessa oksille ja puiden latvoihin, jonne se kertyy ja painaa niitä alaspäin. Toinen tykkylumen syntytapa on vesihöyryn huurtuminen oksille. (Lehtonen et. al. 2019)

Tulevaisuudessa puiden lumikuormien odotetaan kasvavan etenkin itäisessä ja pohjoisessa Suomessa, kun taas muualla Suomessa niiden odotetaan vähenevän (Lehtonen et. al. 2016). Tämänhetkisen tutkimustiedon mukaan myrskyjen voimakkuus tai tiheys ei kuitenkaan ole Suomessa muuttumassa merkittävästi, kun tarkastellaan eri ilmastomallien keskiarvoja. On kuitenkin huomioitava, että talven keskilämpötilojen nousu ja talven siirtyminen edemmäksi johtaa roudan vähenemiseen ja maaperän suurempaan kosteuspitoisuuteen. Tällöin puiden kaatumisen riski kasvaa ja tuulen aiheuttamien tuhojen voidaan olettaa kasvavan hiukan. (Lehtonen et. al. 2019)

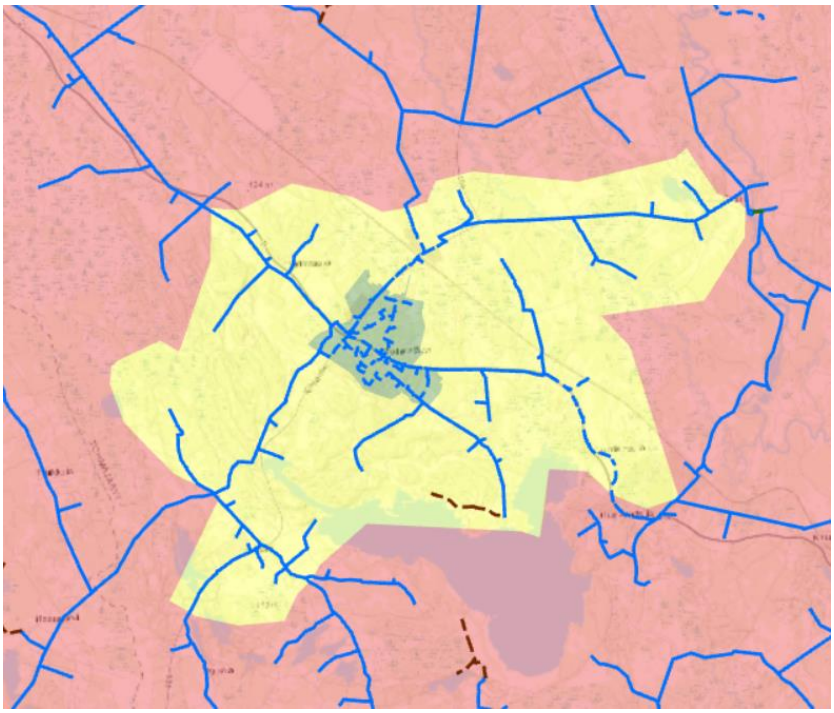
2.4 PKS Sähkönsiirto Oy

PKSS:n jakelualue keskittyy pääasiassa Pohjois-Karjalan ja Pohjois-Savon alueelle. Jakelualue koostuu suurimalta osin haja-asutusalueesta ja taajamista. Jakelualue on laajalti muuttotappiollinen. Silti sähkömarkkinalain toimitusvarmuusvaatimukset ohjaavat voimakkaasti saneeraamaan verkkoa toimitusvarmemmaksi. Tämä luo painetta valita maakaapeloitavat alueet tarkkaan, jottei maakaapeloinnit mene hukkaan, jos alueen asiakkaat häviävät.

2.5 Vertailutilanteen vyöhykejako

PKSS:n nykyinen jakeluverkko on jaettu kolmeen eri vyöhykkeeseen. Vyöhyke I kattaa taajamat, jotka tehdään täysin toimitusvarmoiksi kaapeloimalla KJ- ja PJ-verkko kuuden tunnin toimitusvarmuusvaatimuksen täyttämiseksi. Vyöhyke II kattaa pääasiassa taajamaa ympäröivät asukaskeskittymät ja sähköasemien läheiset kulutuskeskittymät. Vyöhykkeeseen II kuuluu myös sähköasemien välisten varasyöttöyhteyksien runko, sekä rungon suurikulutukselliset haarat. Vyöhyke II kaapeloidaan kokonaan ja

pienikulutukselliset haarat tehdään 1 kV tekniikkaa hyödyntämällä. Vyöhyke III koostuu lähinnä haja-asutusalueista. Vyöhykkeellä III KJ-verkko toteutetaan tienvarteen siirretyillä ilmajohdoilla ja pienikulutukselliset haarat 1 kV tekniikalla. Vyöhykkeen II ja III rajalle asetetaan katkaisija. Esimerkki tästä vertailutilanteen vyöhykejaosta on esitetty kuvassa 2.1



Kuva 2.1 Esimerkki vertailutilanteen vyöhykejaosta. Sisimmäinen, vihreä alue tarkoittaa vyöhykettä I, sitä ympyröi keltainen vyöhyke II ja uloimpana punainen vyöhyke III.

Kuvassa 2.1 esitettynä Tohmajärven asemakaava-alueen ympäristön vyöhykejako. Vertailutilanteen vyöhykejaot ovat tyypillisesti taajamien ympärillä ympyrämäisiä eli vyöhykettä I ympäröi vyöhyke II ja loppualue on vyöhykettä III. Tiheämmin asutuilla alueilla 2. vyöhykkeet voivat ulottua taajamasta toiseen.

Työn tavoitteena on uudelleenarvioida edellä mainitun vertailutilanteen vyöhykejaon toimintaa. Etenkin tarkastellaan, kuinka maakaapeloinnin painottaminen runkojohdoille vertautuu nykyiseen vyöhykejakoon.

2.6 1000 V tekniikka

Pientehoisia keskijännitehaaroja voidaan toteuttaa hyödyntämällä 1000 V tekniikkaa. Tekniikan hyödyntämisen kannustimena toimii sen alhaisempi investointikustannus ja mahdollisuus hyödyntää samoja komponentteja kuin 0.4 kV verkossa. Jokainen 1000 V lähtö

muodostaa oman katkaisijalla erotettavan suojausvyöhykkeensä, jolloin 1000 V verkkoon sattuvat viat eivät näy korkeamman jännitetason verkossa. (Lakervi 2008)

2.7 Vian erottava kuormaerotin

Vian erottava kuormaerotin on erotin, joka pystyy avaamaan itsensä automatiikan avulla. Erottimen avautuminen voi tapahtua esimerkiksi AJK:n aikana, kun laite havaitsee sen takana olevan vian ja erottaa vikaantuneen verkonosan. Esimerkiksi kun kuormaerottimia sijoittaa haarajohdon alkuun, runkojohdot saadaan palautettua nopeasti sähköön, mikäli haaralle sattuu vika. Rungolla olevat käyttöpaikat kokevat vain AJK:n mittaisen keskeytyksen. Kuormaerottimen automaattinen toiminta ei myöskään kuormita käytönvalvojia niin paljoa suurhäiriöiden aikana verrattuna manuaalisesti ohjattaviin kaukokäyttöerottimiin.

2.8 Sähkömarkkinalaki

Vuoden 2013 sähkömarkkinalain muutos asettaa toimitusvarmuusvaatimukset jakeluverkkoyhtiöille. Vuoteen 2028 (poikkeusluvalla vuoteen 2036) mennessä kaikkien yhtiön asiakkaiden tulee olla toimitusvarman verkon piirissä, jossa ei ole asemakaava-alueella kuutta tuntia pidempiä katkoja ja sen ulkopuolella 36 h pidempiä katkoja (Sähkömarkkinalaki 588/2013). Asemakaava-alueilla kuuden tunnin maksimikeskeytysaika vaatii käytännössä täysin säävarman rakenteen sekä KJ- että PJ-verkossa sen saavuttamiseksi. Asemakaava-alueiden ulkopuolella sallittu pidempi maksimikeskeytysaika mahdollistaa muiden verkostorakenteiden käytön (Partanen et.al 2012).

Toimitusvarmuusvaatimusten kehittyminen tapahtuu asteittain. Ensimmäinen toimitusvarmuusvaatimus porras oli vuoden 2019 loppuun mennessä, jolloin vähintään 50 % jakeluverkkoyhtiön asiakkaista tulee olla toimitusvarmuusvaatimukset täyttävän verkon piirissä. Toinen porras on vuoden 2023 lopussa jolloin 75 % asiakkaista on oltava toimitusvarman verkon piirissä ja viimeinen porras on vuonna 2028, jolloin kaikkien asiakkaiden on oltava toimitusvarman verkon piirissä. Tähän porrastukseen on ollut mahdollista saada poikkeus, mikäli näiden vaatimusten saavuttaminen vaatii jakeluverkkoyhtiöltä keskiarvoa merkittävästi suuremman määrän PJ- ja KJ-verkon kaapelointia ja ennenaikaista verkon uusimista. Nämä vaatimukset täyttävä verkkoyhtiö sai enintään vuoteen 2036 asti aikaa kaikkien asiakkaiden toimitusvarmuuden saavuttamiseksi,

ja 75 % portaan saavuttamiseksi määräaika siirtyi vuoden 2028 loppuun. (Sähkömarkkinalaki 588/2013). Sähkömarkkinalaissa mainitaan erikseen, että yhteiskunnan kannalta kriittiset käyttöpaikat on huomioitava verkon kehittämissuunnitelmassa.

Sähkömarkkinalaki määrää sähkönjakelunkeskeytyksen pituudesta riippuen, ilman erillistä vaatimusta jakeluverkkoyhtiön maksamaan korvauksia asiakkaille siirtomaksuistaan. Tämä ei kata keskeytyksiä, joihin jakeluverkkoyhtiö ei ole voinut varautua. Vakiokorvauksen määrä sähkön loppukäyttäjän vuotuisesta verkkopalvelumaksusta määräytyy seuraavasti:

- 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.

Kustannukset eivät kuitenkaan voi kalenterivuodessa olla loppukäyttäjälle enemmän kuin 2000 euroa. (Sähkömarkkinalaki 588/2013)

2.8.1 Nykyinen valvontamalli

Energiaviraston jakeluverkkotoiminnan valvonnan tavoitteena on verkkopalveluiden hintojen kohtuullisuus ja korkea laatu. EV:n valvontamalli määrää, kuinka verkkoyhtiölle lasketaan kohtuullinen tuotto ja oikaistu tulos. Verkkoyhtiön kohtuullinen tuotto lasketaan kertomalla oikaistu pääoma kohtuullisella tuottoasteella. Tämä vähennetään yhtiön toteutuneesta oikaistusta tuloksesta, joka lasketaan yhtiön liikevoitosta tai -tappiosta, josta vähennetään eri kannustimien ja korjauserien vaikutus. (Energiavirasto 2018)

Tässä työssä tarkastellaan KAH-kustannusten muutosta erilaisilla maakaapelointialueilla. Laatukannustin vertaa aikaisempien vuosien toteutuneiden KAH-kustannusten tasoa nykyiseen ja näiden erotuksen avulla saadaan sen vaikutus liikevaihtoon. KAH-kustannuksissa erityyppiset keskeytykset hinnoitellaan eri tavalla. Kunkin keskeytystyypin yksikköhinnat on esitetty taulukossa 2.1

Taulukko 2.1 KAH-kustannuksien yksikköhinnat (Energiavirasto 2018).

Odottamaton keskeytys		**Suunniteltu keskeytys**		**AJK**	**PJK**
€/ kWh	**€ / kW**	**€/ kWh**	**€ / kW**	**€/ kW**	**€/ kW**
11.0	1.1	6.8	0.5	1.1	0.55

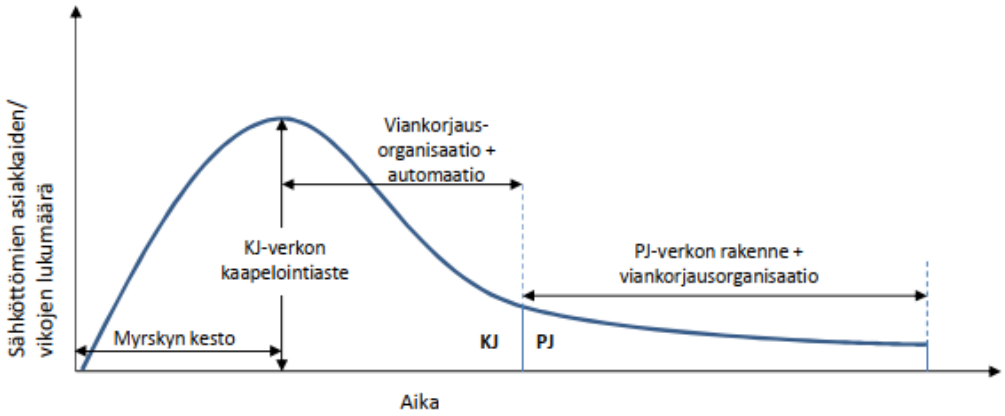
KAH-kustannukset vaikuttavat suoraan verkkoyhtiön tuottoon. KAH-kustannusten vaikutus liikevaihtoon määritetään vähentämällä kahden aikaisemman valvontajakson KAH-kustannusten keskiarvosta toteutuneet KAH-kustannukset. Tämä laatubonus voi olla suurimmillaan 15 % yhtiön vuoden kohtuullisesta tuotosta. Mahdolliset laatusanktiot eivät voi myöskään olla suuremmat kuin tämä arvo. (Energiavirasto 2018)

3 NYKYISEN TAVOITEVERKON SUURHÄIRIÖVARMUUS

Sähkömarkkinalain asettamat toimitusvarmuusvaatimukset säädettiin useiden 2000-luvulla sattuneiden myrskyjen johdosta, kun Eduskunta päätti, ettei yhteiskunta siedä pitkiä ja laajoja sähkönjakelukeskeytyksiä (Partanen 2018). Luvussa käydään läpi suurhäiriömallin laatiminen ja sen eri vaiheet. Mallin perusteella saadaan sähkömarkkinalain asettamien toimitusvarmuusvaatimusten mukainen suurhäiriövarmuustaso PKSS:lle. Tehtyä mallia voidaan hyödyntää myös tulevaisuudessa arvioimaan vaadittua toimitusvarmuustasoa erilaisilla suurhäiriöillä.

3.1 Suurhäiriön määritelmä

Suurhäiriöllä tarkoitetaan tilannetta, jossa yli 20 % jakeluverkkoyhtiön asiakkaista on sähköttä tai sähköasema vioittuu pitkäksi aikaa (Partanen et. al 2012). Suurhäiriössä vikojen kestoon ja määrään vaikuttavia tekijöitä havainnollistetaan kuvassa 3.1.

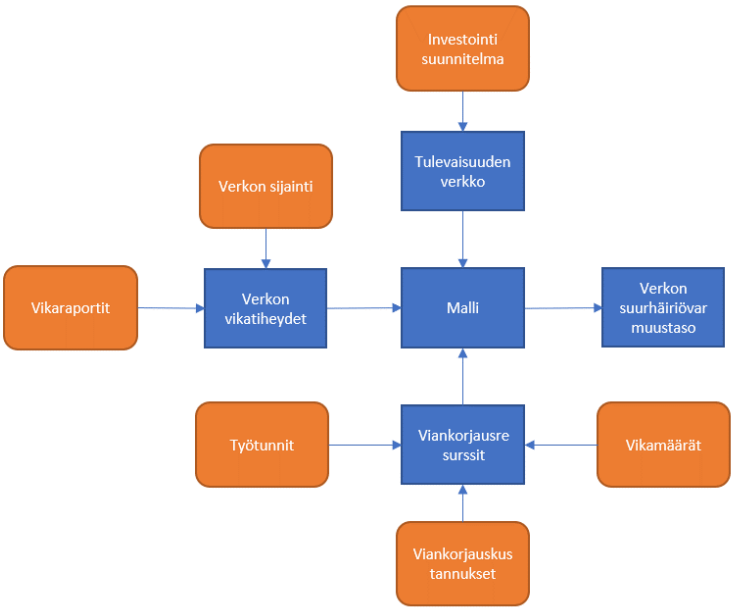


Kuva 3.1 Periaatekuva vikojen kestoon ja määrään vaikuttavista asioista suurhäiriössä. (Partanen et. al. 2012)

Vikojen määrän huippuun voidaan vaikuttaa suurhäiriövarmoilla rakenteilla, kuten maakaapeleilla. Huipun saavuttamisen kesto riippuu taas myrskyn kestosta ja viankorjausresursseista. PJ-verkon pitkä korjausjakso verrattuna KJ-verkon korjauksien kestoon johtuu PJ-verkon automaation ja vianindikoinnin puutteesta. Tyypillisesti PJ-viat saadaan selville vain asiakasilmoitusten perusteella, kun taas KJ-viat voidaan havaita verkon suoja- ja vianilmaisulaitteiden avulla. Tulevaisuudessa AMR-mittareihin perustuva PJ-vikojen havainnointi voi tosin helpottaa PJ-vikojen paikannusta.

3.2 Suurhäiriön mallinnus

Suurhäiriön mallintamisessa tavoitteena on arvioida, onko nykyisen investointisuunnitelman mukainen saneerausmäärä riittävä sähkömarkkinalain asettamien toimitusvarmuusvaatimusten täyttämiseen. Suurhäiriön mallintamiseen tarvitaan tilastoituja tietoja vioista, verkosta ja viankorjausresursseista. Mallin tehtävänä on määrittää vaadittu verkon suurhäiriövarmuustaso, joka täyttää toimitusvarmuusvaatimukset. Kuvassa 3.2 on esitettynä mallin käyttämät tiedot.



Kuva 3.2 Suurhäiriömallin käyttämät tiedot ja se mihin niitä hyödynnetään.

Tässä diplomityössä suurhäiriötä tarkastellaan käytöntukijärjestelmästä saatavien raporttien pohjalta, joista saadaan selville vikojen alku- ja loppuaika. Raporteissa on nähtävissä vian vaikutuksen kokeneiden asiakkaiden lukumäärä ja vian alkuhetkellä vian vaikutusalueen teho. Osalle raporteista on merkitty myös erikseen vikojen sijainti kartalta.

Vuonna 2036 PKSS:n jakeluverkon tulee täyttää sähkömarkkinalain mukaiset toimitusvarmuusvaatimukset eli käyttöpaikoilla ei saa olla yli 6 h keskeytyksiä asemakaava-alueella ja sen ulkopuolella keskeytykset eivät saa kestää yli 36 h (Sähkömarkkinalaki 588/2013). Poikkeuksena tähän ovat esimerkiksi saaret, joihin ei ole tieyhteyttä. Näille käyttöpaikoille yhtiöt saavat itse määrittää suurimman sallitun keskeytysajan. Vuonna 2028 yhtiön käyttöpaikoikoista vähintään 75 % tulee olla toimitusvarman verkon piirissä ja

vuonna 2036 kaikkien käyttöpaikkojen tulee täyttää toimitusvarmuusvaatimukset. Tämän takia vuoden 2036 verkon mallintaminen on tärkeä osa suurhäiriövarmuustason määrittämistä, jotta saadaan arvio siitä, tarvitseeko nykyistä investointisuunnitelmaa muuttaa. Tässä tulee huomioida ympäristöt mihin ilmajohtoverkko rakentuu, sekä kuinka paljon verkkoa rakennetaan. On myös huomioitava muut suurhäiriövarmuuteen vaikuttavat toimenpiteet, kuten vierimetsänhoito. Vierimetsänhoidolla tarkoitetaan esimerkiksi riskipuiden poistoa ja johtokatujen puuvarmennusta eli johtokatujen tekemistä niin leveiksi, etteivät puut yllä kaatua linjoille. Vuosien 2028 ja 2036 verkon mallintamisessa käytettiin investointisuunnitelman mukaisia arvoja arvioimaan maakaapelin ja ilmajohtojen määriä ja vierimetsänhoitojen määrä arvioitiin nykyisten vierimetsähoitotilausten avulla. Ilmajohtojen sijainnin arvioinnissa käytetään aikaisempien vuosien toteutuneiden saneerauskohteiden sijaintitietoja. Osan vierimetsänhoidosta oletettiin poistuvan metsän luonnollisen kasvun takia.

3.3 Verkon sijainnin ja rakenteen vikatiheydet

Työssä saneerausympäristöjen sijaintia arvioidaan käyttämällä aikaisempien vuosien toteutuneita saneerausympäristöjä, sekä yhtiön nykyistä arviota tulevaisuuden vierimetsänhoidoista. Mallinnetuille verkon ympäristöille ja verkkotyypeille määritetään niiden suurhäiriövarmuusriskitaso. Suurhäiriövarmuusriskitasoa arvioidaan suurhäiriössä tapahtuneiden vikojen sijaintien avulla. Osalle vikaraporteista käytönvalvoja on merkinnyt koordinaatit. Vikojen sijainnit selvitetään sijoittamalla ne kartalle, johon mallinnetaan suurhäiriön aikainen verkko. Verkko mallinnetaan merkitsemällä verkon pylväille niiden ympäristöluokka maastotietokantojen ja toteutuneiden vierimetsänhoito alueiden avulla. Vikojen tapahtumaympäristö haetaan lähimmältä pylväältä ja vikojen määrät kustakin ympäristöluokasta summataan yhteen ja jaetaan kunkin ympäristöluokan verkon pituudella. Tämän tarkastelun lopputulos suhteutetaan vastaamaan suurhäiriön aikaisten vikaraporttien määrää. Metsässä sijaitseva 20 kV ilmajohto valittiin ns. vertailutasoksi eli sen suurhäiriövarmuusriskitasoksi valittiin 1. Muiden ympäristöluokkien vikatiheyttä verrataan metsässä olevan ilmajohdon vikatiheyteen ja niiden suuruutta muokataan aikaisemmin määritettyjen vikatiheyksien perusteella. Mitä pienempi suurhäiriövarmuusriskitaso sitä suurhäiriövarmempi kyseinen rakenne tai ympäristöluokka on. Taulukossa 3.1 on esitettynä vikatiheydet ympäristöluokittain.

Taulukko 3.1 Päivö-myrskyn aikaiset vikatiheydet. Ilmajohtojen vikatiheydet arvioitu Päivö-myrskynvikatilastojen ja aikaisempien suurhäiriöiden käytöntukijärjestelmän vikaraporttien perusteella. Maakaapelille arvioitiin pieni vikatiheys.

Tyyppi ja sijainti	Vikatiheys [vika/100 km]	Mallissa käytetty suurhäiriöriskitaso [%]	Päivön aikaiset vikamäärät [kpl]
Metsä	9.4	100	189
Avomaa	1.7	20	7
Tienvarsi	3.8	50	41
Harvennettu tienvarsi	3.0	40	6
Harvennettu metsä	6.3	80	16
Puuvarmennettu	1.2	10	5
Maakaapeli	0.05	1	-

Taulukossa esitetyt lukemat ovat Päivö-myrskyn aikaisten vikaraporttien mukaisten viansijaintien perusteella määritetty. Avomaan vikatiheys voidaan selittää sillä, että avomaaksi merkitty alue voi sisältää pieniä ”puusaarekkeita”, jotka voivat aiheuttaa häiriöitä verkossa. Lisäksi salamaniskut ovat mahdollisia vianaiheuttajia avomaalla sijaitsevalle verkolle. Puuvarmennetulla verkolla salamaniskut ovat myös mahdollisia vianaiheuttajia ja pitkät, kohtisuoraan linjalle kaatuvat puut voivat myös aiheuttaa vikoja. Tyypillisesti PKSS on hyödyntänyt johtokatujen harvennusta etenkin tykkylumihäiriöiden aikaisten vikojen ehkäisyssä, joissa harvennuksella on saatu vähennettyä vikamääriä, mutta Päivö-myrkyn aineistojen perusteella harvennuksesta voi olla hyötyä myös kesämyrskyissä. Harvennusten arvioitu hyöty suurhäiriössä perustuu pääasiassa Päivön-myrskyn aikaisiin havaintoihin, joten harvennusten todellinen hyöty kesämyrskyssä voi olla liian suureksi arvioitu pienen otoskoon takia. Maakaapelit on oletettu lähes suurhäiriövarmoiksi. On tosin hyvä huomata, että niillekin voi tapahtua myrskyn aikana vikoja. Esimerkiksi puut voivat kaatua puistomuuntamoiden tai erotinasemien päälle, mikä voi aiheuttaa häiriöitä.

Koska 1000 V järjestelmän ilmakaapelit käyttävät samanlaista tekniikkaa kuin PJ-ilmakaapelit, niiden vikatiheydet oletettiin samoiksi. Johtuen puutteellisesta tilastoinnista 1000 V ja 400 V johdoille ei voida laske vikatiheyksiä ympäristöluokittain. Näille johdoille vikatiheydet määritetään pelkästään ilmakaapelille ja maakaapelille. PJ-johtojen vikatiheydet eri rakenteilla on esitetty taulukossa 3.2.

Taulukko 3.2 PJ-johtojen vikatiheydet eri rakenteilla. Vikatiheydet perustuvat vuosien 2015–2020 suurhäiriöiden aikaisiin vikatietokannan tietoihin. Arviossa hyödynnettiin myös vuositilastoja vian aiheuttajasta (Pohjois-Karjalan Sähkö Oy 2015–2020).

Tyyppi	Vikatiheys vika/100 km	Mallissa käytetty suurhäiriöriskitaso [%]
PJ-ilmakaapeli	3.0	35
PJ-maakaapeli	0.05	1

3.4 Vian rajaus ja paikannus

Kun suurhäiriövarman verkon määrä kasvaa, myös verkon vianrajaus ja -paikannus nopeutuu. Tienvieressä sijaitsevan verkon mahdollisten vikojen paikantaminen on huomattavasti nopeampaa verrattuna metsässä sijaitsevaan verkkoon. Aikaisemman PKSS:n selvityksen mukaan viankorjaajan kävelynopeus metsässä päivällä on n. 2 km/h ja yöllä 1 km/h. Kun näitä nopeuksia verrataan autolla partiointiin jo pelkästään 30 km/h ajonopeudella kävelynopeuteen verrattuna ero on päivällä 15-kertainen. Lisäksi tienvieressä olevalle verkolle voidaan helposti tuoda tarvittavia työkoneita. Esimerkiksi pylväänvaihto keskellä metsää on huomattavasti haastavampaa verrattuna samaan toimenpiteeseen tienvarressa. Kaivinkone ei välttämättä pääse johtokatua pitkin vikapaikalle, jolloin sille täytyy etsiä uusi reitti metsää pitkin tai pahimmassa tapauksessa raivata kokonaan uusi kulkuväylä koneelle (PKSS 2020). Tienvarressa sijaitsevalla johdolla tapahtuvat tulevat helpommin huomatuksi myös ulkopuolisten toimesta, jotka voivat ilmoittaa niistä verkkoyhtiölle.

Kun verkon kaukokäyttölaitteiden määrä kasvaa, vikoja pystytään helpommin rajaamaan pienemmille alueille. Tämä vähentää niin KAH-kustannuksia kuin vakiokorvauksia. Kun vikoja saadaan rajattua etänä nopeasti, pystytään myös paremmin arvioimaan vikojen todellista lukumäärää. Jos esimerkiksi yksikään KJ-rungon haaroista ei ole erotettavissa kaukokäytön avulla, on vaikea arvioida vian tarkkaa sijaintia tai sitä, kuinka monta eri vikapaikkaa alueella on. Jos taas verkon haarajohdot ovat erotettavissa, vika saadaan todennäköisemmin rajattua pienemmälle alueelle, mikä helpottaa viankorjausresurssien ohjaamista vikapaikoille. Mallissa automaation lisääntymisen maaseudulla oletetaan vähentävän suurhäiriön alussa olevaa ”rajausaikaa” eli aikaa, jossa vikoja pyritään rajaamaan mahdollisimman pienille alueille, mutta vikoja ei välttämättä aleta heti korjaamaan. Tyypillisesti häiriön alussa pyritään saaman vialliset verkonosat erotettua nopeasti, jotta mahdollisimman monelle käyttöpaikalle saadaan palautettua sähköt.

3.5 Korjausresurssien toiminta

Suurhäiriön aikana korjausresurssien määrällä ja tehokkuudella on vaikutus siihen, kuinka nopeasti häiriöstä selvitään. Tässä työssä korjausresurssien toimintaa ja määrää arvioitiin hyödyntämällä viankorjausorganisaatiolta saatuja työtuntimääriä suurhäiriön ajalta, sekä urakoijien laskutuksia. Viankorjausta kussakin suurhäiriössä arvioitiin todellisten

vikatapahtumien määrällä ja niiden kestolla. Korjausresurssit mallinnettiin korjaamaan viat samalla nopeudella kuin kyseisessä suurhäiriössä alun perin. Tätä korjausnopeutta hyödynnetään mallintamaan vikojen korjausta vuonna 2036. Vuoteen 2036 mennessä vikamäärän katsottiin laskevan suurhäiriövarman verkon lisääntymisen myötä, jolloin resurssien tarvitsee korjata vähemmän vikoja.

Suurhäiriömallissa huomioidaan 1000 V tekniikkaa hyödyntävän verkon lisääntyminen ja sen vaikutus verkon vianrajauksen nopeuttamiseen. Koska 1000 V verkossa kukin lähtömuuntajan toisiolta lähtevä lähtö on oma suojavyöhykkeensä, niillä tapahtuvat viat erottuvat verkosta itsestään. Tällöin suurhäiriössä partioitavan verkon määrä vähenee. Lisäksi verkon partiointia nopeuttaa tienvarressa sijaitsevan verkon osuuden kasvu sekä verkon kaukokäytön ja automaation määrän kasvu. Nämä tekijät huomioitiin mallissa vianrajausta nopeuttavina tekijöinä suurhäiriön ensimmäisen 24 h aikana. Verkko mallinnettiin pelkistettynä, jonka jälkeen arvioitiin, kuinka pitkään vianrajaajilla menee keskimäärin vianrajaamiseen nykyisellä SHV-verkon määrällä ja tavoiteverkon mukaisella SHV-verkon määrällä. Tarkastelluissa myrskyissä verkon kaukokäytön hyödyntämisen tehokkuuden oletetaan pysyvän samana. PKSS:n käytönvalvojien mukaan maltillinen lisäys verkon automaation ja kaukokäytön määrässä ei vielä huomattavasti vaikuta kaukokäyttölaitteiden ohjausaikaan (PKSS 2020). On tosin huomioitava, että keskimääräinen ohjausaika voi kasvaa, jos kaukokäytön ja automaation määrä lisääntyy merkittävästi.

3.6 Vikamäärän kehitys

Suurhäiriövarman verkon määrän kasvaessa vikojen määrä vähenee, koska verkkoa saneerataan toimitusvarmemmaksi esimerkiksi maakaapeloimalla tai rakentamalla ilmajohtoa tienvarteen metsästä. Mallissa vikojen määrä vähenee lineaarisesti suurhäiriövarman verkon määrän kasvaessa, eli viat jakautuvat tasaisesti koko verkon alueelle. Suurhäiriövarma verkko määritetään suurhäiriöriskitason avulla. Vuoden 2036 vikojen määrä mallinnetaan laskemalla lähtövuoden ja tarkasteluvuoden suurhäiriövarman verkon määrien suhde. Päivön osalta nämä on esitetty taulukossa 3.3.

Taulukko 3.3 Kuinka paljon vikoja syntyy vuosina 2028 ja 2036 verrattuna vuoteen 2020.

	2028	**2036**
KJ	71.2 %	52.1 %
PJ	74.9 %	51.6 %

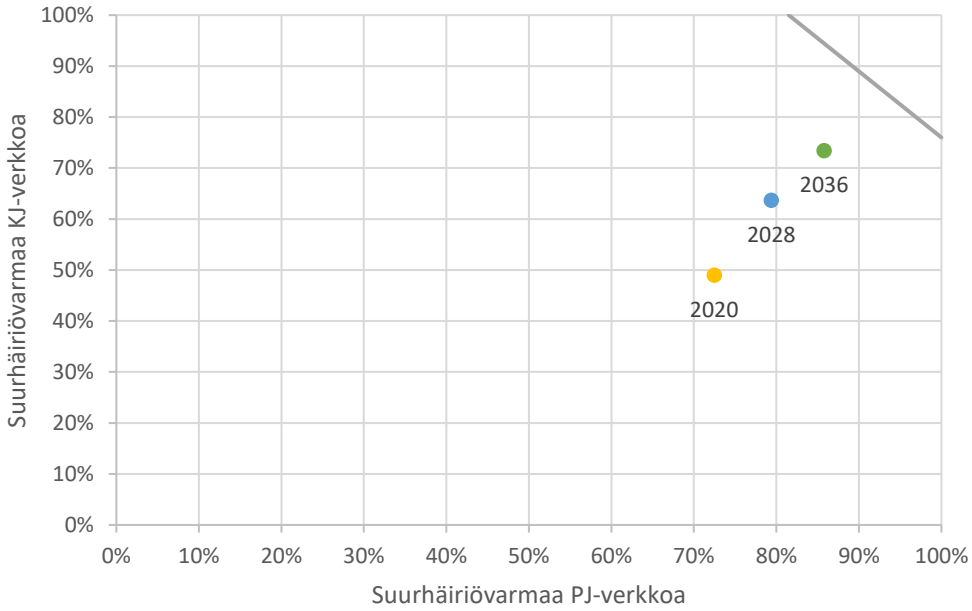
Taulukon 3.3 suhteilla lasketaan, kuinka paljon vähemmän vikoja syntyy vuonna 2036. Viankorjausresurssien määrä oletettiin samaksi joka vuodelle. Resurssien toiminnan oletettiin tehostuvan vikojen vähenemisen ja suurhäiriövarman verkon määrän kasvamisen myötä. Lopuksi vielä huomioidaan verkon automaation ja tienvarsiverkon vaikutus suurhäiriön rajausajan pituuteen.

Tulokset piirretään XY-koordinaatistoon, josta nähdään, millainen suurhäiriövarmuus pitää olla vuonna 2036, jotta sähkömarkkinalain asettamat tavoitteet täyttyvät. Vaatimusrajat saatiin laskemalla KJ-verkonvaatimustaso, jos PJ-verkon suurhäiriövarmuus on 100 % ja sama toisinpäin eli mikä on PJ-verkonvaatimustaso, jos KJ-suurhäiriövarmuus on 100 % (Haakana 2013).

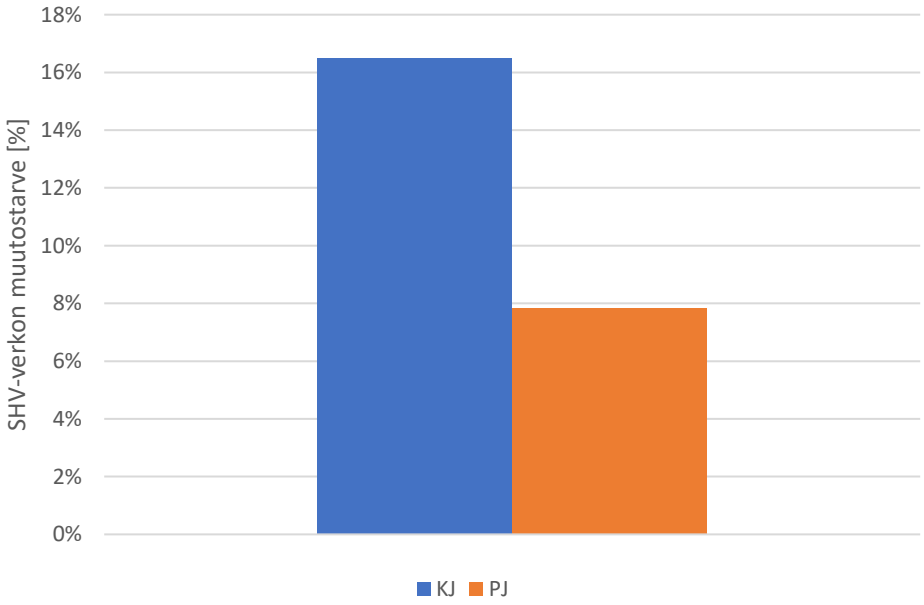
3.7 Päivö-myrsky

Päivö myrsky aiheutti runsaasti tuhoa sähköverkkoihin Itä-Suomessa, sen pahimmat myrskytuulet puhalsivat 30.6.2020-1.7.2020 välillä. Tuhot olivat mittavia sekä PJ-verkossa, että KJ-verkossa ja pahimmillaan sähköt olivat 40 000 PKSS:n asiakkaalta ja viimeiset viat saatiin korjattua vasta kuusi vuorokautta myöhemmin.

Tässä työssä mallinnetaan Päivö-myrsky ja tarkastellaan, onko nykyisen tavoiteverkon suurhäiriövarmuustaso vuonna 2036 riittävä, jotta Päivön kaltaisesta suurhäiriöstä selvitään ilman keskeytysaikarajojen ylittämistä. Päivölle mallinnetut suurhäiriövarmuusrajat on esitetty kuvassa 3.3 ja kuvassa 3.4 on esitettynä, kuinka paljon verkon suurhäiriövarman verkon määrää tulee kasvattaa, jotta Päivön kaltaisesta suurhäiriöstä selviydytään ilman yli 36 h kestäviä vikoja.



Kuva 3.3 Vaadittu toimitusvarmuustaso Päivö-myrskyn aineistojen perusteella, sekä suurhäiriövarman verkon määrä vuosille 2020, 2028 ja 2036.



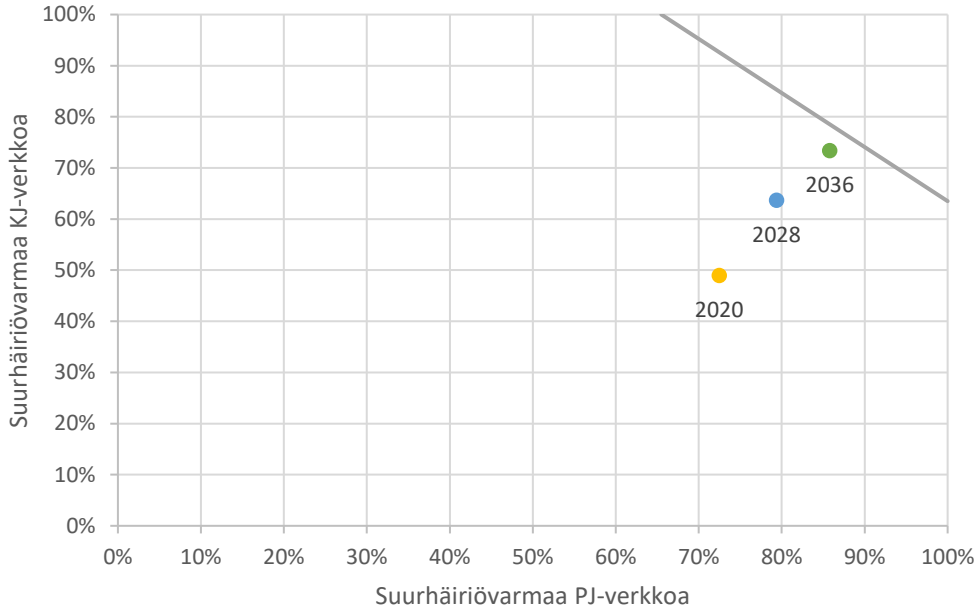
Kuva 3.4 Suurhäiriövarman verkon muutostarve Päivö-myrskyn aineistojen perusteella. Verkon saneerauksen arvioitiin tapahtuvan PJ/KJ-verkon suhteella 1.2 eli keskimäärin KJ-kilometriä kohti saneerataan 1.2 km PJ-verkkoa.

Kuvasta 3.4 nähdään, että verkon suurhäiriövarman verkon määrää tulee kasvattaa 16 % KJ-verkossa ja 8 % PJ-verkossa. Tuloksesta on hyvä huomata, että Päivön aikana osa PKSS:n PJ-vikailmoituksista tuli monta päivää myrskyn jälkeen. Jälkikäteen vikojen alkuaikoja korjattiin PJ-vioilla huomattavasti aikaisemmaksi kuin ilmoitus oli asiakkaalta tullut. Tällöin

vika näyttäytyi niin kuin se olisi ollut päällä jo monta päivää. Tämän takia on mahdollista, että verkon saneeraustarve kasvaa todellisuutta suuremmaksi.

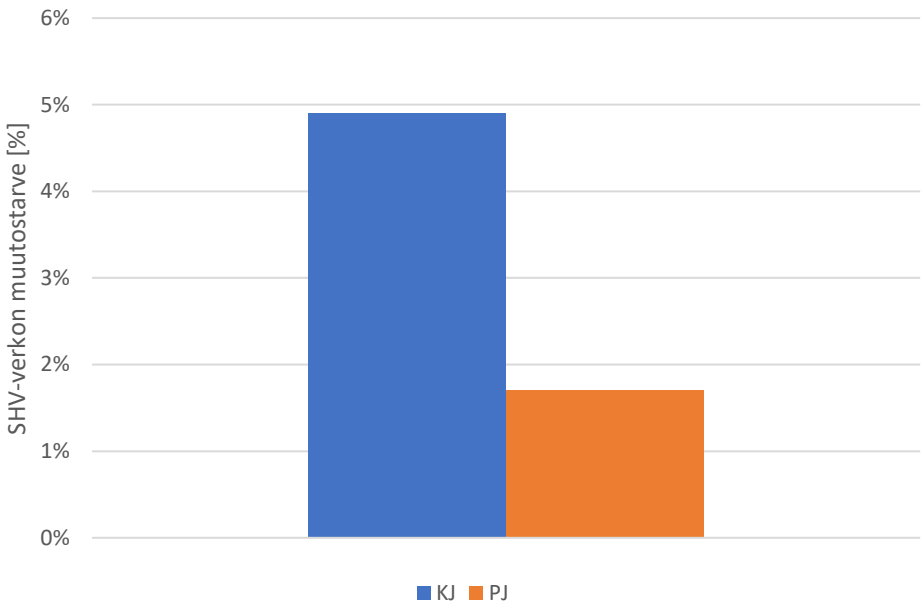
3.8 Valio-myrsky

Valio-suurhäiriö tapahtui vuonna 2015 syksyllä. Valio ei aiheuttanut yhtä pitkiä keskeytyksiä tai vikoja kuin Päivö. Kuvassa 3.5 on esitetty toimitusvarmuusvaatimustaso Valio-myrskylle.



Kuva 3.5 Valio-suurhäiriön toimitusvarmuusvaatimustaso vuonna 2036. Eri vuosien suurhäiriövarmuudet on määritetty taulukon 3.1 mukaan.

Kuvasta 3.5 huomataan, että Valio-myrskynkin laskelmien mukaan suurhäiriövarman verkon määrää suositellaan lisättävän. Ero on vuoden 2036 suurhäiriövarmuuden ja lasketun vuoden 2036 suurhäiriövarmuustason välillä pienempi kuin Päivössä, mutta suurhäiriövarman verkon lisääminen on suositeltavaa. Kuvassa 3.6 on esitettynä vaadittu suuhäiriövarman verkon muutos.



Kuva 3.6 Suurhäiriövarman verkon lisäystarve PJ- ja KJ-verkossa Valio-myrskyn aineistojen perusteella.

3.8.1 Valion ja Päivön vertailua

Päivön ja Valion asettamilla SHV-verkon muutostarpeilla on eroa KJ-verkossa n. 11 %-yks ja PJ-verkossa n. 6 %-yks. Valion aikana vikoja oli noin 40 % vähemmän kuin Päivön aikana ja Valion aikana keskeytykset olivat pisimmillään 100 h kun taas Päivön aikana pisimmät keskeytykset olivat jopa 200 h pitkiä. Lisäksi Päivön aikaiset viankorjauskustannukset olivat 3.5 kertaa suuremmat kuin Valion aikana. Päivö on siis ollut merkittävästi tuhoisampi myrsky verrattuna Valioon.

3.9 Talvimyrsky

Tykkylumien aiheuttama suurhäiriö on hyvin erilainen verrattuna kesämyrskyihin. Kesämyrskyissä viat syntyvät tyypillisesti alle 10 tunnin sisällä, kun taas tykkylumista johtuvat viat voivat syntyä usean viikon aikana. Lisäksi jo korjatuille verkko-osuuksille voi syntyä uusia vikoja, jolloin samoja alueita pitää partioida useampaan kertaan. Talvisin olosuhteet tuovat myös omat haasteensa. Öisin pimeys rajoittaa viankorjausta ja kaivinkoneurakoijia voi olla haastavaa löytää yli 20 °C pakkaseen (PKSS 2020). Näistä syistä tykkylumisuurhäiriöt kuormittavat viankorjausresursseja eri tavalla verrattuna kesällä tai syksyllä tapahtuviin suurhäiriöihin.

Tykkylumien aiheuttamassa suurhäiriössä verkon erilaisissa ympäristöissä vikatiheydet voivat poiketa kesämyrskyistä. Linjakatujen harvennus ja riskipuiden poisto ovat tehokkaita keinoja vähentää tykkyvikoja.

Taulukko 3.4 Lentohavaintoja tykkyvioista eri aikaväleiltä. (Kurki 2020)

	25.12.2017-4.1.2018	7.1.2018-29.1.2018	1.1.2019-31.2.2019
	Vika/100 km	**Vika/100 km**	**Vika/100 km**
Metsä	17.0	1.9	6.8
Tienvarsi	3.7	0.0	0.0
Avomaa	2.6	0.1	1.9
Harvennettu johtokatu	0	0.2	0.5
Puuvarmennettu	0	0.0	0.1

Lentohavaintojen perusteella vierimetsähoidetuilla alueilla vikojen määrä on pienempi kuin hoitamattomilla alueilla. Tästä syystä talvimyrskyille käytetään erilaisia arvoja toimitusvarmuuden laskennassa verrattua kesämyrskyihin. Arvot on esitetty taulukoissa 3.5 ja 3.6.

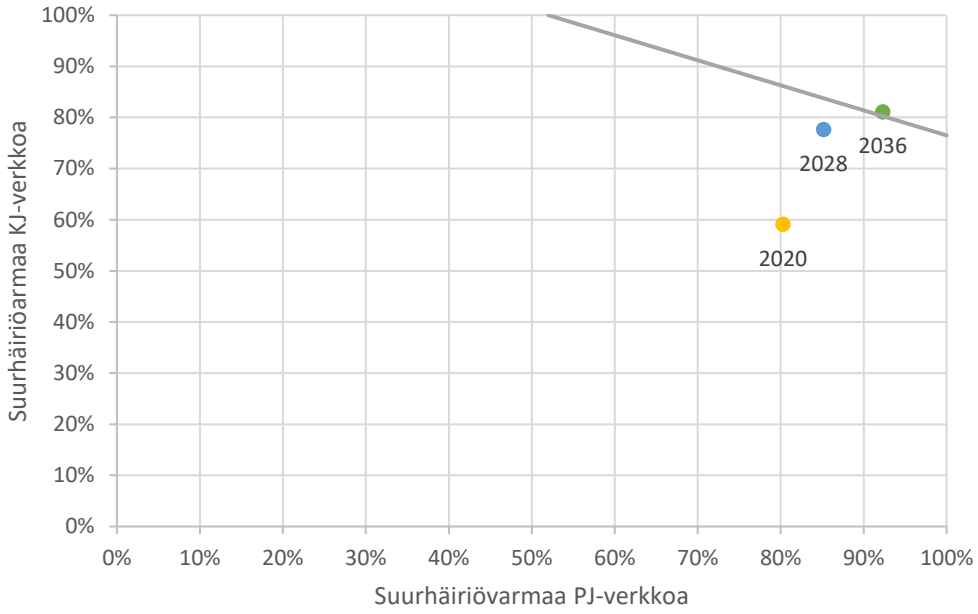
Taulukko 3.5 Suurhäiriöriskiprosentit eri ympäristöille KJ-verkossa tykkylumisuurhäiriössä. Prosentit perustuvat taulukon 3.4 vikatiheyksiin.

Tyyppi ja sijainti	**Mallissa käytetty suurhäiriöriskitaso [%]**
Metsä	100
Avomaa	10
Tienvarsi	40
Harvennettu tienvarsi	10
Harvennettu metsä	20
Puuvarmennus	1
Maakaapeli	1

Taulukko 3.6 PJ-verkon vikatiheydet tykkylumisuurhäiriössä. Prosentit perustuvat taulukon 3.4 vikatiheyksiin sekä aikaisempien vuosien vikatilastoihin (Pohjois-Karjalan Sähkö Oy 2015–2020)

Tyyppi ja sijainti	**Mallissa käytetty suurhäiriöriskitaso [%]**	**Vikatiheys [vika/100 km]**
PJ-ilmakaapeli	25	0.5
PJ-maakaapeli	1	0.05

PJ-verkolle vikatiheydet on määritetty aikaisempien suurhäiriöiden vikatiheyksien avulla, sekä pitkän ajan vikatilastojen avulla. Työssä mallinnetaan 2017–2018 vuoden vaihteessa tapahtunut tykkylumisuurhäiriö. Kyseisen myrskyn toimitusvarmuustaso on esitetty kuvassa 3.7.



Kuva 3.7 Toimitusvarmuusraja vuoden 2017–2018 vuodenvaihteen tykkylumisuurhäiriölle. Pisteet kuvaavat suurhäiriövarman verkon määrää eri vuosina. Viiva kuvaa vaadittua toimitusvarmuustasoa kyseisen suurhäiriön osalta.

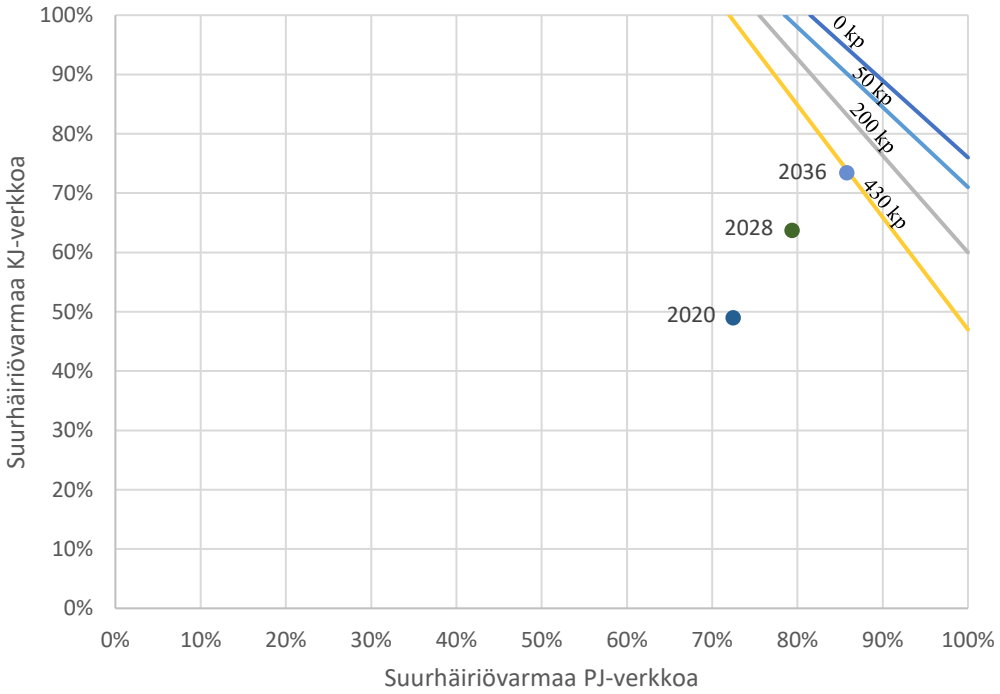
Erilaisten suurhäiriöriskiprosenttien ansiosta eri vuosien suurhäiriövarman verkon määrän vaatimukset ovat pienemmät kuin kesämyrskyissä. Tosin suurhäiriövarman verkon määrän kasvu vähenee KJ-verkon puolella johtuen vierimetsähoidon vähenemisestä ja niiden luonnollisesta poistumasta. Nykyisellä investointisuunnitelmalla tämän kaltaisesta suurhäiriöstä selvitään vuoden 2036 suurhäiriövarman verkon määrällä.

4 HERKKYYSTARKASTELU

Toimitusvarmuusvarmuuden määrittämisessä tehtiin monia oletuksia ja arvioita erilaisille tekijöille kuten viankorjausresursseille ja vikamäärille. Tämän takia tässä luvussa tarkastellaan kuinka näiden tekijöiden muutokset vaikuttavat suurhäiriönmallintamisen lopputuloksiin. Näille tekijöille lasketaan, kuinka niiden muutos vaikuttaa suurhäiriövarman verkon investointimäärään. Lisäksi luvussa arvioidaan, kuinka paljon suurhäiriövarman verkon määrää voidaan muuttaa, jos toimitusvarmuusvaatimuksista joustaminen tulee mahdolliseksi.

4.1 Yli 36 h keskeytykset

Päivön kaltaisesta suurhäiriöstä ei suurhäiriömallin mukaan selvitä vuonna 2036 nykyisellä saneerausmäärällä ilman toimitusvarmuusvaatimusten asettamien keskeytysaikojen ylittämistä. Tarkastellaan, kuinka toimitusvarmuusrajat muuttuvat, jos tietyllä määrällä käyttöpaikkoja sallitaan yli 36 h keskeytyksiä. Rajoja erimäärille käyttöpaikkoja on esitetty kuvassa 4.1.



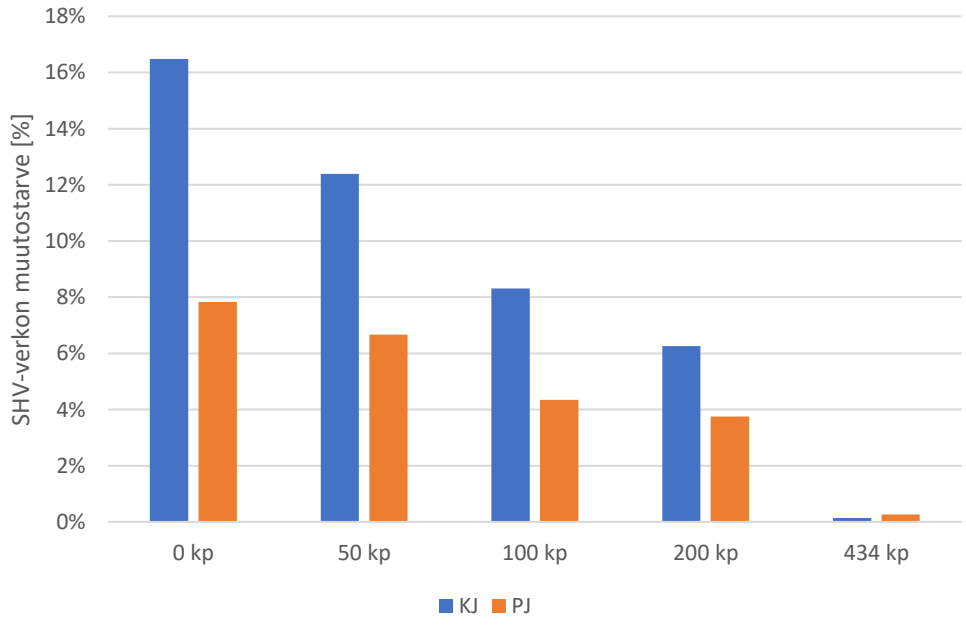
Kuva 4.1 Viivat kuvaavat toimitusvarmuustasoa Päivö-myrskyssä, jos sallitaan yli 36 h kestäviä vikoja tietyllä määrällä käyttöpaikkoja vuonna 2036. Pisteet kuvaavat eri vuosien suurhäiriövarman verkon määrää.

Vikamäärät kullekin eri käyttöpaikkamäärälle on esitetty taulukossa 4.1 ja suurhäiriövarman verkon investointitarpeen muutos eri määrillä yli 36 h keskeytyksiä kokeneita käyttöpaikkoja on esitetty kuvassa 4.2.

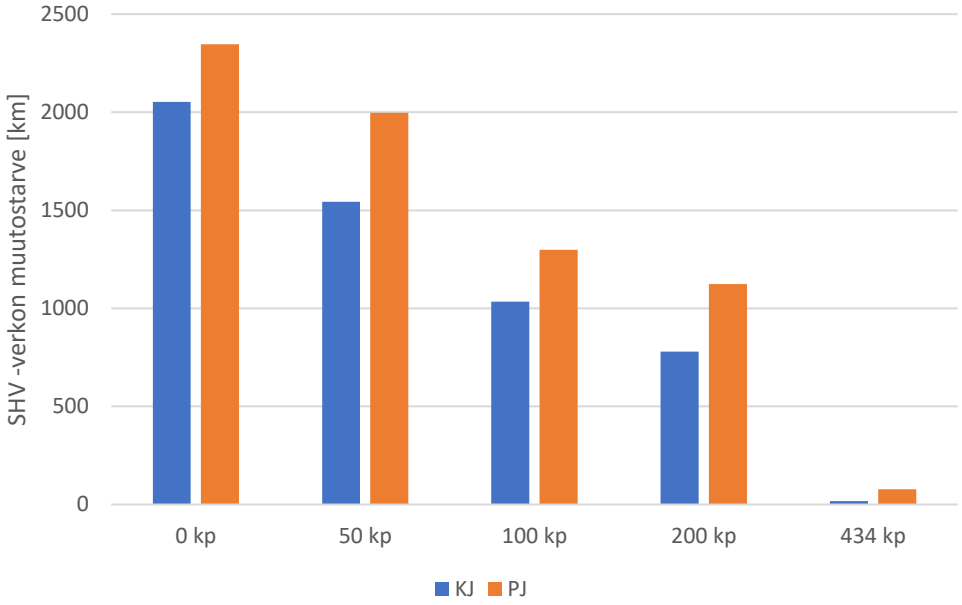
Taulukko 4.1 Kuvan 4.1 mukaisten rajojen vikamäärät ja tarkat käyttöpaikkojen määrät.

KJ-vikoja [kpl]	**PJ-vikoja [kpl]**	**Yli 36 h keskeytyksen kokeneet käyttöpaikat [kpl]**	**Osuus kaikista käyttöpaikoista [%]**	**Osuus Päivön aikana vian kokeneista käyttöpaikoista [%]**
0	0	0	0.00	0.00
0	13	24	0.03	0.06
0	18	50	0.06	0.12
0	35	100	0.11	0.24
1	48	303	0.35	0.73
3	60	434	0.49	1.05

Taulukon 4.1 mukaan jos sallitaan 430 käyttöpaikalla yli 36 h keskeytys, mallin mukaan suurhäiriövarman verkon lisäystarve vuoden 2036 tavoiteverkkoon pienenee sekä KJ- että PJ-verkossa alle 0.5 %:iin. Tosin jo pelkästään 50 käyttöpaikalla investointitarve vähenee KJ-verkossa 12 %:iin 16 %:sta ja PJ-verkossa 7 %:iin 8 %:sta. Suhteellisesti 430 käyttöpaikkaa on noin 0.5 % kaikista PKSS:n käyttöpaikoista. Kuvassa 4.2 esitettynä kuinka paljon SHV-verkon muutostarve on vuoden 2036 tilanteesta toimitusvarmuusvaatimusten täyttämiseksi eri määrillä yli 36 h keskeytyksen kokeneita käyttöpaikkoja ja kuvassa 4.3 muutostarve on esitetty kilometreinä.



Kuva 4.2 Pylväskaaviossa esitettynä kuinka paljon PJ- ja KJ-verkon suurhäiriövarman verkon määrää on lisättävä erilaisilla toimitusvarmuusjoustorajoilla.



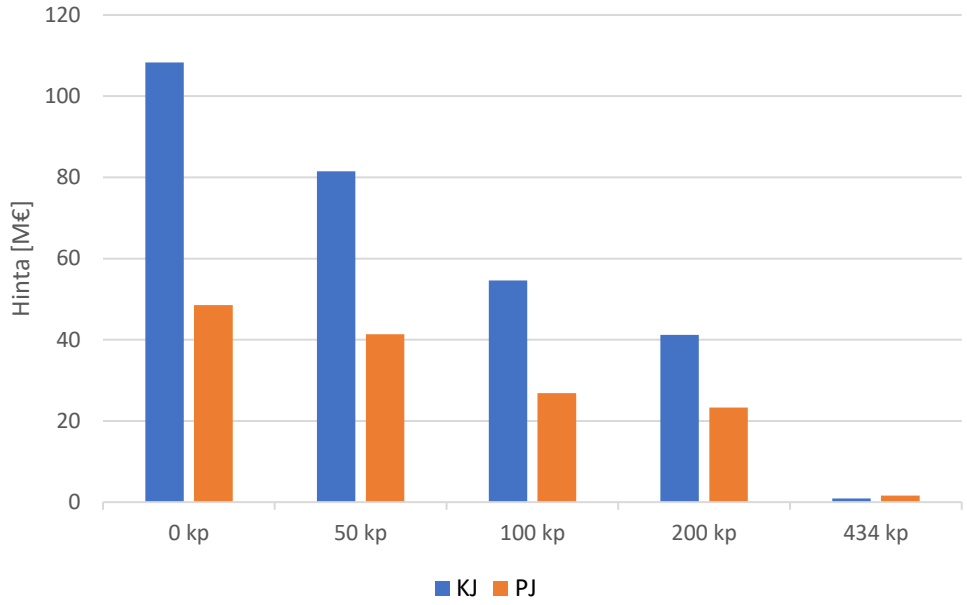
Kuva 4.3 Suurhäiriövarman verkon muutostarve. Verkkoa oletettiin saneerattavan keskimääräisestä ilmajohtoverkon ympäristöstä maakaapeliksi. Jos verkkoa saneerataan keskimääräisesti enemmän vikaisemmasta ympäristöstä saneerattavan verkon määrää voidaan vähentää.

Kuvan 4.3 mukaan SHV-verkon määrää tulee kasvattaa KJ-verkossa 2100 km ja PJ-verkossa 2300 km. Verkon saneerauksen laskettiin tapahtuvan keskimääräisestä ilmajohtoverkon ympäristöstä maakaapeliksi. Jos verkkoa pystytään saneeraamaan enemmän vikaalttiimmista ympäristöistä, kuten metsästä, saneerausmäärää voidaan vähentää. Taas jos verkkoa joudutaan saneeraamaan keskimäärin varmemmista ympäristöistä, kuten avomaalta tai puuvarmennetuilta johtokaduilta saneerausmäärää voi joutua kasvattamaan enemmän. Jos kuvan 4.3 mukainen SHV-verkon muutostarve toteutetaan vuoteen 2036 mennessä saneeraus kohdistuu pääasiassa hyvin harvaan asutetulle alueelle. Lasketaan EV:n yksikköhinnoilla kuvan 4.3 verkkomäärän investointikustannus, olettaen että investoinnit jakautuvat tasan seuraaville 15 vuodelle. Investoinnit lasketaan korkoprosentilla 4 % ja ne diskontataan nykyarvoon yhtälöllä 4.1.

$$K_{\text{tot}} = \sum_{n=1}^{15} K_{\text{inv}} \cdot \frac{1}{(1+p/100)^n} \tag{4.1}$$

, joissa K_{tot} on tarkasteluajan investointien nykyarvo
K_{inv} on vuosittainen investointi
p on korkoprosentti
n on pitoaika

KJ-verkon maakaapelin yksikköhinta muuntajien kanssa on kilometriä kohti n. 71.2 k€/km ja PJ-verkon maakaapelin yksikköhinta on 33.5 €/km (Liite 1; Liite 2; Liite 3). Kuvassa 4.4 esitettynä kuinka suuri on kuvassa 4.3 esitettyjen SHV-verkon muutostarpeiden arvo EV:n yksikköhinnoilla.



Kuva 4.4 Investoinnin kustannus kuvan 4.3 SHV-verkonpituuksille.

Kuvasta 4.4 nähdään, että KJ- ja PJ-verkon kustannus on yhteensä nykyarvossa 155 M€ mikäli ei sallita yhtään yli 36 h keskeytystä. Jos keskeytyksiä sallitaan 50 käyttöpaikalle investointikustannus laskee 80 M€

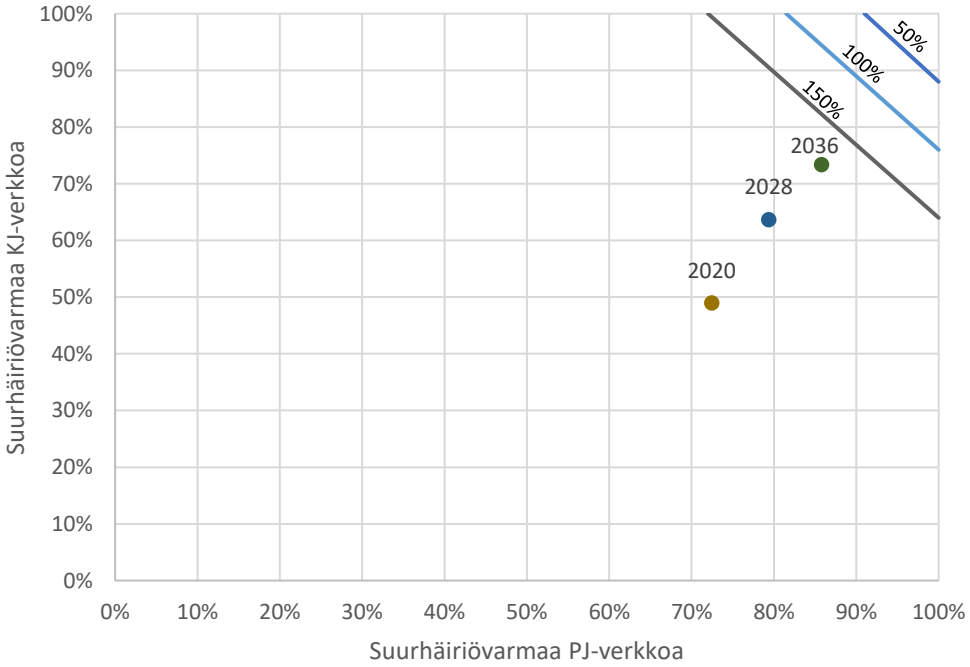
Taulukon 4.1 mukaiset käyttöpaikkamäärät pätevät vain Päivö-myrskyyn. Muissa suurhäiriöissä käyttöpaikkamäärät ovat todennäköisesti erilaiset ja käyttöpaikat, jotka kokevat yli 36 h keskeytyksiä eivät ole samat.

Jos käyttöpaikoilla salittaan yli 36 h katkoja sen hyödynnettävyys riippuu siitä, kuinka toimitusvarmuusjousto toteutetaan. Jos toimitusvarmuusjoustoon pitää tehdä sopimus kunkin käyttöpaikan kanssa erikseen, sopimusten pitää toteutua vähintään muuntopiiritasolla ja mieluummin laajemmalla tasolla. Jos muuntopiirissä yksikin jättää suostumatta toimitusvarmuusjoustoon, muiden kanssa tehdyt sopimukset ovat lähes hyödyttömiä, koska joustosta kieltäytyneelle käyttöpaikalle tulee palauttaa sähköt vähintään 36 tunnissa, jolloin joustoon suostuneisiin käyttöpaikkoihin vaikuttaneet viat korjataan

luultavasti samalla. Jos taas toimitusvarmuusjousto toteutettaisiin ns. ”liikkuvana” eli esimerkiksi kussakin suurhäiriössä on tietty määrä käyttöpaikkoja, joille sallitaan toimitusvarmuusrajat ylittäviä katkoja ja näitä käyttöpaikkoja ei tarvitse määrittää etukäteen, jouston hyödyntäminen on helpompaa. Toimitusvarmuusjoustoa tosin luultavasti rajoittaa keskeytyskriittiset käyttöpaikat, joilla sähkönjakelunkeskeytykset tulee pitää mahdollisimman lyhyinä.

4.2 Viankorjausnopeus

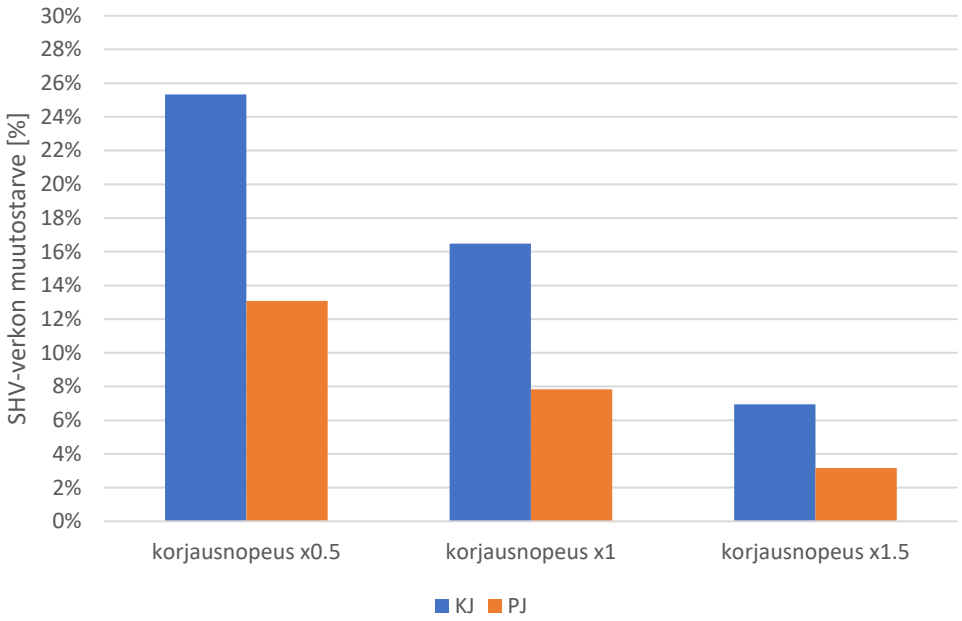
Korjausresurssien määrällä ja niiden toiminnalla voidaan vaikuttaa suurhäiriövarman verkon määrään. Mallissa korjausresurssien määrä pidettiin vakiona, mutta niiden tehokkuutta kasvatetaan vikojen määrän vähentyessä ja suurhäiriövarman verkon määrän kasvaessa. Resurssien määrää mallinnetaan viankorjausorganisaatiolta saatujen työtuntien määrän perusteella, sekä laskutettujen kustannusten perusteella. Kuvassa 4.5 esitettynä resurssien korjausnopeuden muutoksen vaikutus toimitusvarmuustasoihin.



Kuva 4.5 Päivö-myrskyn toimitusvarmuustasot erilaisilla korjausnopeuksilla. Pisteet kuvaavat suurhäiriövarman verkon määrää eri vuosina.

Kuvasta nähdään, että jos korjausnopeus on 50 % suurempi kuin mallissa oletettiin, suurhäiriövarman verkon tarve pienenee n. 10 %-yks. Tarkastelussa huomioidaan vain vikojen korjausnopeuden kasvu, eikä korjausnopeuden muutos tapahdu välttämättä samassa

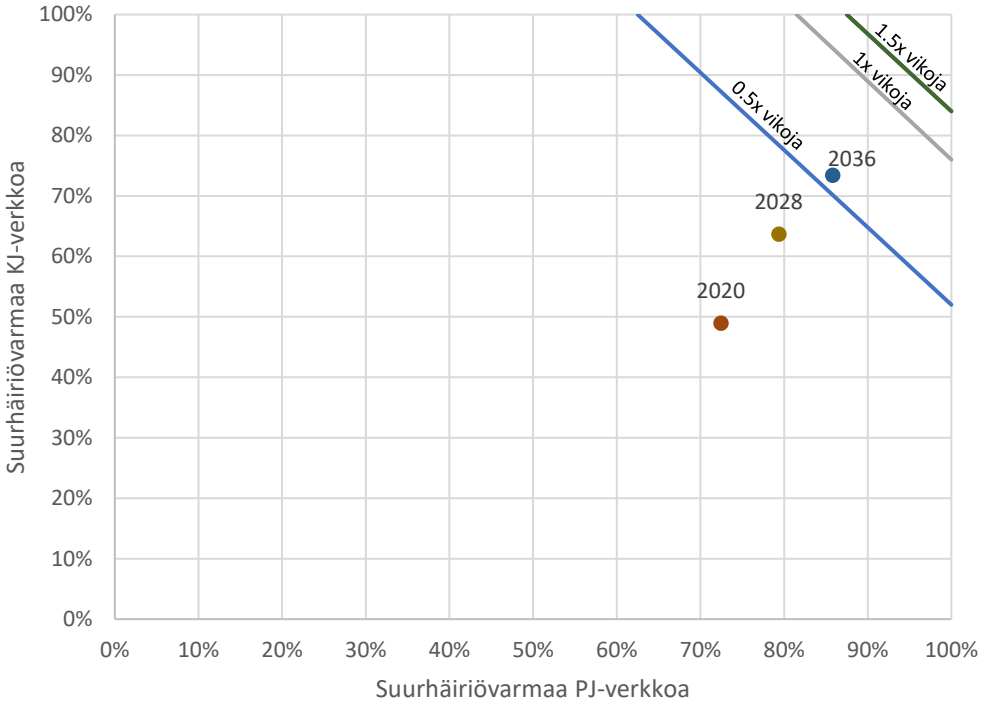
tahdissa kuin viankorjausresurssien määrän muutos. Jotta korjausresurssien kasvatuksesta on hyötyä, on myös huolehdittava resurssien ohjattavuudesta ja tehokkuudesta. Kuvassa 4.6 esitettynä SHV-verkon muutostarve erilaisilla korjausnopeuksilla.



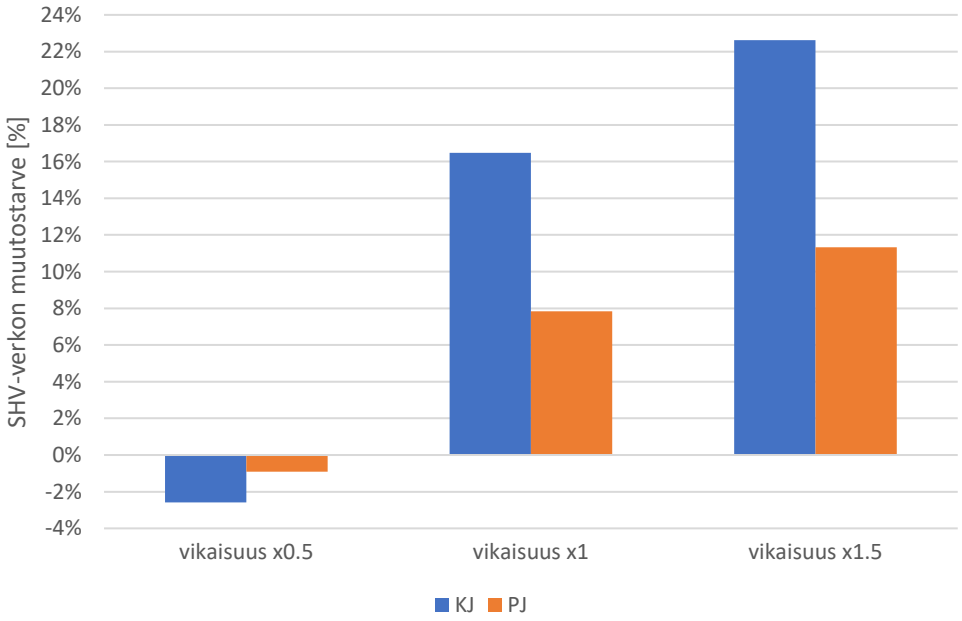
Kuva 4.6 Suurhäiriövarman verkon määrän tarve eri viankorjausnopeuksilla.

4.3 Tapahtuneiden vikojen määrän muutos

Päivö-myrskyn aikaisten vikaraporttien perusteella KJ-vikoja syntyi yhteensä 461 kpl ja PJ-vikoja 289 kpl. Päivö oli siis voimakas myrsky ja sen aiheuttamat viankorjauskustannukset olivat moninkertaiset verrattuna esimerkiksi Valio-myrskyyn. Tarkastellaan, minkälainen toimitusvarmuustaso on erilaisilla vikamäärillä, kun resurssit pysyvät samana. Kuvassa 4.7 on esitettynä toimitusvarmuustasot erilaisilla vikojen määrillä ja eri vikamäärien vaikutus SHV-verkon muutostarpeeseen on esitetty kuvassa 4.8.



Kuva 4.7 Vuoden 2036 toimitusvarmuusvaatimustaso erilaisilla vikamäärillä Päivö-myrskyssä, jos viankorjausresurssit toimivat samalla tehokkuudella. Pisteet kuvaavat suurhäiriövarman verkon määrää eri vuosina.



Kuva 4.8 Suurhäiriövarman verkon tarve erilaisilla vikamäärillä Päivö-myrskyn aineistojen perusteella

Kuvaajista nähdään kuinka pienempi vikaisuus vähentää SHV-verkon tarvetta. Kun vikaisuus puolitetaan, SHV-verkon muutostarve pienenee negatiiviseksi. Tämä johtuu luultavasti Päivön aikaisista pitkistä KJ-vioista. Kun KJ-vikojen määrää vähennetään,

pisimmät PJ-viat saadaan korjattua aikaisemmin eivätkä ne kasvata kaapelointitarvetta paljoa.

4.4 Vioista kerättävän tiedon lisääminen

Suurhäiriönmallin kehittämisen ja luotettavuuden kannalta vikojen tilastointia on hyvä lisätä. Nykyään yhteen KJ-vikaraporttiin voi sisältyä useita eri vikapaikkoja, mutta nämä merkitään raporttiin vain yhtenä vikapaikkana. Lisäksi on mahdollista, että vanhemmissa suurhäiriöissä, kuten Valiossa vikaraportteihin saattaa sisältyä keskimääräisesti useampia vikapaikkoja verrattuna uudempiin suurhäiriöihin. Jos kartalle merkitään kukin yksitäinen vikapaikka tai kullekin raportille kirjataan vikapaikkojen määrä, eri ympäristöluokkien vikatiheyksien arviointi helpottuu. Lisäksi jos on mahdollista tilastoida kunkin vian korjauksen aloitushetkeä, viankorjausresurssien toimintaa voidaan arvioida paremmin.

PJ-vikojen raportoinnissa on eniten kehitettävää. Tällä hetkellä PJ-vikojen todellista sijaintia ei tiedetä tarkalleen, koska vikapaikalle merkitään koordinaatti asiakasilmoitusten perusteella eikä viankorjaaja käy jälkikäteen korjaamassa raportille tätä koordinaattia. Tällöin ei voida päätellä PJ-verkkojen vikatiheyksiä ympäristöluokittain.

Työssä suurhäiriön aikaiset verkot mallinnettiin niiden ajankohtaa lähimmillä tiedoilla verkon rakenteesta. Tulevaisuudessa suurhäiriön sattuessa kannattaa tallentaa häiriön tapahtumahetken pylväiden sijainnit, sekä maakaapelin määrä. Tällöin toimitusvarmuuden tarkastelu on tulevaisuudessa nopeampaa.

5 VYÖHYKEJAKO OSANA VERKON KEHITTÄMISTÄ

PKSS:lla jakeluverkko on jaettu luvun 2.5 mukaisiin vyöhykkeisiin. Tässä vyöhykejaossa vyöhykkeiden I ja II KJ-verkko kaapeloidaan kokonaan ja vyöhyke III toteutetaan ensisijaisesti ilmajohtona tienvarressa. Jos vyöhykkeellä II oleva johtolähtö jatkuu vyöhykkeelle III, niiden rajalle asteettaan katkaisija. Tällöin kaapeloitu verkko ei koe jälleenkytkentöjä ollenkaan. Tätä vertailutilanteen vyöhykejakoa verrataan runkopainotteiseen vyöhykejakoon. Runkopainotteisessa vyöhykejaossa kaapelointi painottuu verkon runkojohdoille ja suurin osa haarajohdoista saneerataan ilmajohdoksi. Ilmajohdoiksi saneerattavien haarojen alkuun sijoitetaan vian erottava kuormaerotin. Runkopainotteisessa vyöhykejaossa jälleenkytkennät ovat käytössä, jolloin haarojen alussa olevat vian erottavat kuormaerottimet erottavat haaran sen vikaantuessa AJK:n aikana.

5.1 Vyöhykejakoon vaikuttavat tekijät

Maakaapeloitavien alueiden valitseminen asemakaava-alueiden ulkopuolelle on hyvin haastava prosessi. Keskeytyskustannukset ovat yksi ohjaava tekijä, joiden avulla pystytään arvioimaan maakaapeloinnista saatavaa rahallista hyötyä ja koska keskeytyskustannukset riippuvat energiankulutuksesta, ne ohjaavat myös lyhentämään keskeytysaikoja suurikulutuksellisilla alueilla. Tosin pelkkien eniten keskeytyskustannuksia aiheuttavien alueiden kaapelointi voi johtaa kaapeloinnin voimakkaaseen keskittymiseen. Työssä vyöhykejakoa tarkastellaan keskeytyskustannusten, käyttöpaikkojen määrän ja kulutetun energian mukaan.

5.2 Verkon automaation ja kaukokäytön merkitys

Verkon kaapelointirajoja määritettäessä on hyvä huomioida kuinka ilmajohtoverkko ja kaapeloitu verkko erotetaan toisistaan. Jos samalla johtolähdöllä on sekä maakaapelia että ilmajohtoa, näiden välinen erotus on tärkeä huomioida maakaapeloinnista saatavan hyödyn maksimoimiseksi. Erotus voidaan toteuttaa esimerkiksi sijoittamalla katkaisija kaapeloidun verkon ja ilmajohdon välille, kuten vertailutason vyöhykejaossa tehdään.

Yksi kaapelointistrategia, jota työssä tutkitaan, on runkopainotteinen kaapelointi. Tässä strategiassa kaapelointia toteutetaan ulottamalla maakaapelia pidemmälle rungolla ja jättämällä ne ilmajohdoiksi ne haarat, joita ei voida toteuttaa 1000 V tekniikalla. Ilmajohtohaarojen erottaminen rungolta haaran vikaantuessa on tässä strategiassa tärkeässä

roolissa. Haarojen erotuksen tulee tapahtua nopeasti, jotta kaapeloidulla rungolla olevat käyttöpaikat saadaan mahdollisimman nopeasti takaisin jännitteiseksi. Tarkastelussa vikaantuneidenhaarojen erotukseen rungosta käytetään vian erottavaa kuormaerotinta.

5.3 Etätaajamien huomiointi

Etätaajamilla tässä työssä tarkoitetaan asemakaava-alueita, joiden lähellä ei ole sähköasemaa, vaan ne saavat syöttönsä huomattavasti kauemmalta sähköasemalta verrattuna toisiin asemakaava-alueisiin. Tämänkaltaisten alueiden varasyöttö normaalin yhteyden vikaantuessa tulee huomioida niiden kuuden tunnin maksimikeskeytysajan takia. Niiden syötön varmistamiseen voi käyttää kaapeliyhteyden sijaan esimerkiksi varavoimakonetta tai akustoa.

5.4 Case-alueiden valinta ja rajaus

Tämän työn case-alueiden valinnassa pyritään valitsemaan alueet, jotka parhaan mukaan kuvaavat PKSS:n verkon eri topologioita. Case-alueita valitaan neljä, joista kolme on sähköasemien välisiä runkoverkkoja ja yksi täysin haaramainen johtolähtö. Valitut runkoyhteydet eivät ole asemien välisiä varasyöttöyhteyksiä, koska nykyisen verkon saneerausstrategian mukaan ne tullaan maakaapeloimaan. Esimerkki case-alueesta on esitetty kuvassa 5.1.

Kuva 5.1 Case-alue, joka koostuu johtolähdöistä RLA-J07, RLA-J06 ja PES-J08. Alueen solmuvälit väritetty johtolähtöjen mukaan.

Case-alueiden tarkastelu aloitetaan rajaamalla kukin alue pienempiin osiin. Alueen rajaksi määräytyy joko vertailutilanteen vyöhykejaon vyöhykkeiden II ja III raja tai merkittävä solmupiste. Merkittäväksi solmupisteeksi ajatellaan pitkien haarojen alku tai suurikulutuksellinen liittymä. Lyhyimmät ja pienitehoisimmat haarat rajataan mukaan runkoalueeseen, koska ne toteutetaan luultavasti 1000 V tekniikalla vyöhykkeestä riippumatta

5.5 Case-alueiden tarkastelu

Alueita rajattiin kartalle ja niiltä kerätään niillä kuluva vuosienergia, käyttöpaikkojen määrä, sekä KJ-verkon sijainti. KJ-pylväiden sijaintia käytetään arvioimaan alueella syntyviä KAH-kustannuksia nykytilanteessa. Kullekin alueelle määritetään myös sen verkon pituus, joka toteutetaan KJ-maakaapelina. Muu alueelle jäävä nykyinen KJ-verkko toteutetaan 1 kV tekniikalla. Tämä arvio perustui PKSS:n aiemmin tekemään selvitykseen, jossa oli määritetty kaikki ne solmuvälit, jotka voidaan tulevaisuudessa toteuttaa 1000 V tekniikalla (Kurki 2019). Alueita tarkasteltiin kartalle teemoittamalla niitä käyttöpaikkojen määrän, kulutetun energian ja KAH-kustannusten mukaan. Näiden avulla muodostettiin erilasia kaapelointi reittejä kullekin case-alueelle ja reittejä vertailtiin keskenään. KAH-kustannukset arvioitiin taulukon 5.1 mukaisilla vikatiheyksillä ja vikatiheydet suhteutettiin erikseen kullekin johtolähdölle niiden vuosina 2015–2019 kokemien vikojen mukaan. Tämän jälkeen KAH-kustannukset suhteutettiin vastaamaan niillä toteutuneita kustannuksia vuosina 2015–2019.

Taulukko 5.1 Tarkastelussa käytettävät vikatiheydet. Vikatiheydet on määritetty pitkän ajan vikatiheyksien avulla ja keskimääräisillä verkonpituuksilla (Pohjois-Karjalan Sähkö Oy 2015–2020). Nämä vikatiheydet poikkeavat toimitusvarmuusrajojen määrittämiseen käytetyistä vikatiheyksistä Toimitusvarmuusrajojen määrittämisessä vikatiheydet perustuivat suurhäiriön aikaisiin vikatiheyksiin ja vikamääriin.

	Pysyvä KJ-vika [vika/100 km, a]	**PJK [PJK/100 km, a]**	**AJK [AJK/100 km, a]**
Metsä	18.0	21	7
Tienvarsi	10.0	10.5	3.5
Avomaa	5.7	4.2	1.4
Puuvarmennettu	4.3	3.36	1.12
Harvennettu metsä	8.9	16.8	5.6
Harvennettu tienvarsi	6.5	8.4	2.8
Maakaapeli	2.2	-	-

Vikatiheyksillä lasketaan kunkin johtolähdön vuosittaiset KAH-kustannukset ja nämä suhteutettiin aikaisempien vuosien toteutuneisiin KAH-kustannuksiin. Suhteutus tehtiin

kullekin johtolähdölle erikseen. KAH-kustannusten laskuun käytetään vuosien 2015–2019 toteutuneita KAH-kustannuksia. Vyöhykerajojen vertailussa ilmajohdoksi jätetyn verkon vikatiheys lasketaan olettamalla johtojen sijaitsevan eri ympäristöissä jakaumalla: 70 % tienvarressa 20 % avomaalla ja 10 % metsässä. KAH kustannukset lasketaan yhtälöiden 5.1 ja 5.2 avulla.

$$KAH_{\text{vika}} = f_{\text{vika}} * L * P * (t * \text{h}_\text{w} + \text{h}_\text{e}) \quad (5.1)$$

$$KAH_{\text{JK}} = L * (f_{\text{PJK}} * \left(P_{\text{PJK}} * \text{h}_{\text{PJK}}\right) + f_{AJK} * \left(P_{\text{AJK}} * h_{\text{AJK}}\right)), \quad (5.2)$$

joissa
KAH_{vika} on pysyvästä viasta aiheutunut KAH-kustannus
KAH_{JK} on jälleenkytkennöistä aiheutunut KAH-kustannus
f_{vika} on pysyvän vian vikatiheys
f_{PJK} on pikajälleenkytkentöjen tiheys
f_{AJK} on aikajälleenkytkentöjen tiheys
L on KJ-verkon pituus
P on keskeytyksen kokeneiden käyttöpaikkojen kokonaiskeskiteho
P_{AJK} on AJK:n kokeneiden käyttöpaikkojen kokonaiskeskiteho
P_{PJK} on PJK:n kokeneiden käyttöpaikkojen kokonaiskeskiteho
t on keskeytyksen pituus
h_e on keskeytyksestä aiheutuneen haitan energian hinta
h_w on keskeytyksistä aiheutuneen haitan tehon hinta
h_{PJK} on PJK:n yksikköhinta
h_{AJK} on AJK:n yksikköhinta.

Kunkin keskeytyksen oletetaan kestävän yhteensä noin 5 h 40 min. Kaukokäyttöerottimilla vian rajaus kestää 10 min, käsierottimilla vian rajaus kestää 1 h 30 min h ja vian korjaus kestää 4 h. Case-alueiden verkolle mallinnetaan erilaisia kaapelointisuunnitelmia ja niitä verrataan toisiinsa sekä vertailutilanteen vyöhykejaon mukaiseen ratkaisuun. Erilaisten reittien mallintamiseen käytetään laskettua KAH-kustannuksia, käyttöpaikkojen määrää alueella sekä alueella kulutettavaa energiaa.

5.6 Haarajohtojen kustannusvertailua

Runkopainotteisessa kaapeloinnissa haarojen vikaantuessa niiden erotuksen muusta verkosta tulee tapahtua mahdollisimman nopeasti, jotta kaapeloidulla rungolla olevat käyttöpaikat kokevat mahdollisimman lyhyitä sähkönjakelun keskeytyksiä. Lasketaan, kuinka pitkälle haaralle maakaapelointi on edullisempi ratkaisu verrattuna kaukoerotettavaan ilmajohtohaaraan. Haaran kustannukset laskettiin tilanteeseen, jossa runkojohdolta lähdetään muuntamosta, josta lähtee yksi johto haaralle. Kustannusten

arviointiin käytetään Energiaviraston yksikköhintoja sekä PKSS:n kunnossapito-, raivaus- ja keskeytyskustannuksia. Laskennassa ei huomioitu muuntajia tai 1 kV verkon kustannuksia, koska niiden oletettiin olevan samat molemmissa tapauksissa. Kustannukset on esitetty taulukoissa 5.2, 5.3, ja 5.4.

Taulukko 5.2 Ilmajohtoverkon investointikustannukset EV:n yksikköhinnoissa (Energiavirasto 2018).

Komponentti	**Yksikköhintahinta [€]**	**Tiheys[kpl/km]**	**€/km**
Johtoerotin: kevyt	3400	0.25	850
Sparrow tai pienempi	21800	1.00	21800
1-pylväsmuuntamo	5100	0.69	3540
2-pylväsmuuntamo	6400	0.20	1253
Yhteensä			27444

Taulukko 5.3 Maakaapeliverkon investointikustannukset EV:n yksikköhinnoissa (Energiavirasto 2018).

Komponentti	**Yksikköhintahinta [€]**	**Tiheys [kpl/km]**	**€/km**
Kojeistopääte	1100	0.67	733
Jatkos	1700	1.25	2125
Hajautetun kompensoinnin laitteisto yli 10 A	19100	0.08	1592
Puistomuuntamo: kevyt	8600	0.08	717
Puistomuuntamo: ulkoa hoidettava, PJ-keskuksen nimellisvirta max 630 A	22900	0.89	20381
Maakaapelioja–helppo olosuhde	10700	0.95	10165
Maakaapelioja–tavallinen olosuhde	24200	0.03	726
Maakaapelioja–vaikea olosuhde	77200	0.02	1544
Maakaapeli 70 mm^2 tai alle	24300	1.00	24300
Yhteensä			62283

Taulukko 5.4 Ilmajohtohaaran pituudesta riippumattomat kustannukset EV:n yksikköhinnoissa (Energiavirasto 2018).

Komponentti	**Yksikköhinta [€]**
Erotinasema: 1 kauko-ohjattu erotin	13200
Kauko-ohjattavien muuntamoiden ja kauko-ohjattavien erotinasemien määrään perustuva osa (Käytönvalvontajärjestelmä)	2200
Kauko-ohjattavien muuntamoiden ja kauko-ohjattavien erotinasemien määrään perustuva osa (Käytöntukijärjestelmä)	550
Pylväspääte	2200
Yhteensä	18150

Taulukko 6.4 Eri verkon rakenteiden ja ympäristöjen vuosikustannukset. Hinnat perustuvat vuosien 2015–2020 keskimääräisiin toteutuneisiin kustannuksiin PKSS:n verkossa.

	Metsä [k€/100 km, a]	**Tienvarsi [k€/100 km, a]**	**Avomaa [k€/100 km, a]**	**Maakaapeli [k€/100 km, a]**
Kunnossapito ja raivaus	27.8	19.9	22.2	2.8
Viankorjaus	49	25	12	7
Vakiokorvaukset	14.7	7.3	2.9	0.7
KAH-kustannukset	91.3	63.9	30.5	8.6

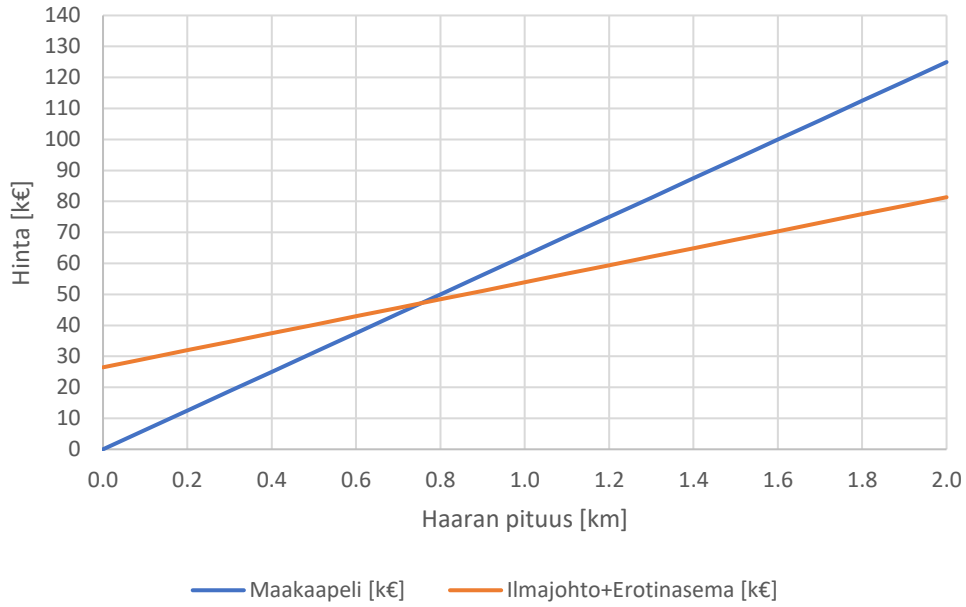
Kustannuksia verrataan laskemalla investointikustannukset yhteen ja tuomalla kaikki pitoajan vuosittaiset kustannukset nykyarvoon yhtälöllä 5.2. Erotinaseman pitoajaksi oletetaan lyhyempi aika kuin muille verkkokomponenteille. Erotinasemalle lasketaan kaksi investointia koko tarkasteluajalta ja toisen investoinnin nykyarvo lasketaan yhtälöllä 5.2.

$$d_n = \frac{\frac{100}{p}}{(1-\left(\frac{1}{1+\frac{p}{100}}\right)^n)} \tag{5.1}$$

$$d = \frac{1}{(1+p/100)^n} \tag{5.2}$$

, joissa d_n on vuosikustannusten nykyarvo
d on nykyarvo
p on korkoprosentti
n on pitoaika

Erotinasemalle oletetaan 20 a pitoaika ja muille verkkokomponenteille 40 a pitoaika ja korkoprosenttina on 4 %. Kuvassa 5.2 on laskettuna, kuinka pitkälle haaralle maakaapelointi on mahdollisesti halvempi ratkaisu verrattuna ilmajohtoon.



Kuva 5.2 Maakaapelin ja kaukoerotettavan ilmajohtohaaran kustannusvertailu. Keskiverto ilmajohtohaaran oletettiin saneerattuna sijaitsevan 70 % tienvarressa 20 % avomaalla ja 10 % metsässä.

Kustannusvertailun perusteella maakaapelin ja ilmajohdon kustannukset ovat yhtä suuret n. 0.75 km pituisella haaralla. Tarkastelussa laskettiin tilanne, jossa koko haara tulee saneerata.

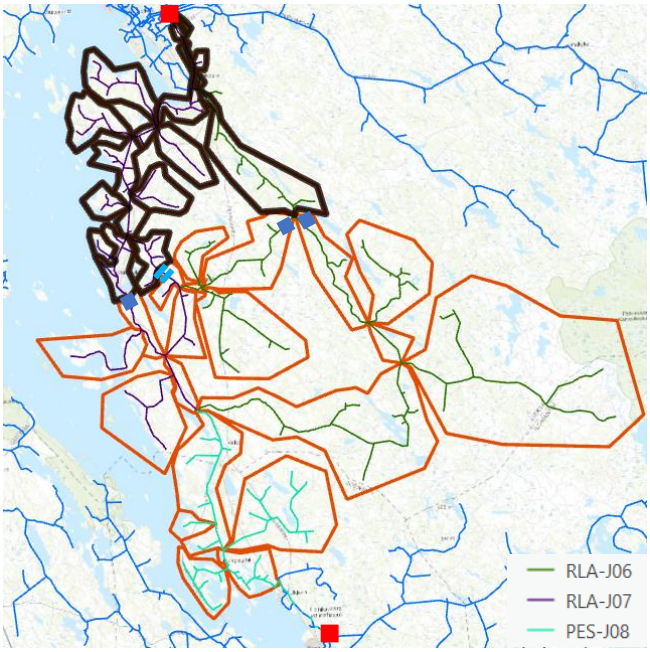
Jos haaralla on merkittävästi pitoaikaa jäljellä, pelkkä erotinaseman laittaminen voi olla kustannusten näkökulmasta parempi ratkaisu.

5.7 Tarkasteltavat vaihtoehdot

Vertailutilanteen vyöhykejakoa verrataan runkopainotteiseen kaapelointiin. Lisäksi case-alueille mallinnetaan, kuinka niille kannattaa sijoittaa mahdollinen kaapeloinnin lisäys. Kaapelointia lisätään kullekin alueelle n. 16 %. Kaapeloinnin lisäyksellä tarkastellaan, kuinka merkittävästi tällä lisäyksellä saadaan säästöä KAH-kustannuksissa ja kuinka paljon enemmän sillä saadaan käyttöpaikkoja ja sähkönkulutusta kaapeloidun verkon piiriin ja voidaanko pelkästään näillä parametreillä perustella kaapeloinnin määrän lisäystä. Vyöhykkeiden II ja III rajalle asetetaan katkaisijat, jolloin vyöhykkeellä II sijaitsevat käyttöpaikat eivät koe jälleenkytkentöjä ollenkaan. Vertailutilanteen vyöhykejakoa verrataan runkopainotteiseen kaapelointiin. Runkopainotteisessa kaapeloinnissa haarat oletetaan erotettavaksi vian erottavalla kuormaerottimella, mutta ne haarat, jotka ovat lyhyempiä, kuin 0.75 km oletetaan kaapeloitavaksi, koska luvun 5.6 mukaan 0.75 km lyhyempien haarojen kaapelointi tulee laskelmien mukaan halvemmaksi. Molempiin vyöhykerajauksiin jätettiin verkossa nykyisellään olevat katkaisijat, ellei niiden takana olevaa verkkoa maakaapeloitu.

5.8 Case-alue I

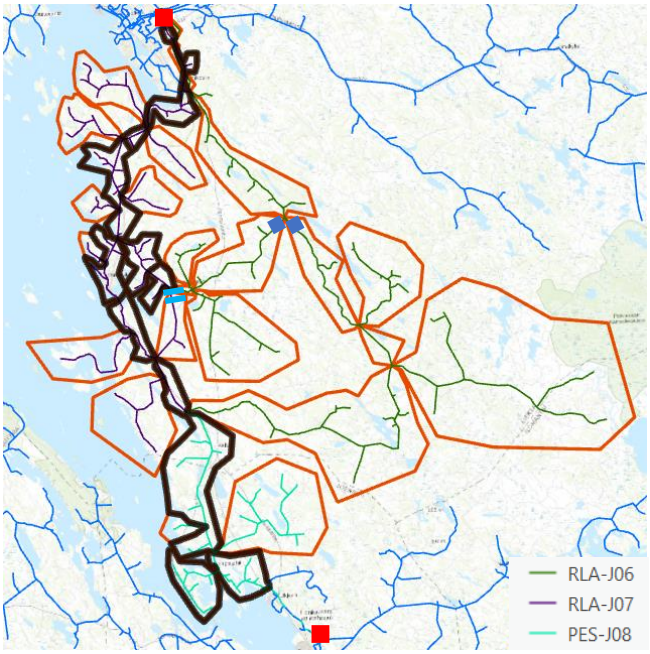
Case-alue I kostuu johtolähdöistä: RLA-J07, RLA-J06 ja PES-J08. Alue valittiin tarkasteltavaksi johtuen sen silmukoituneesta topologiasta ja sähkönkulutuksen jakaumasta. Case-alueella kulutus sijoittuu pääasiassa lännenpuoleiselle, vesistön viereiselle runkoyhteydelle. runkoyhteys koostuu lähdöistä RLA-J07 ja PES-J08. Suurin alueen kulutuskeskittymä on tämän runkoyhteyden puolivälissä. Samanlaisia tapauksia on muuallakin PKSS:n verkossa. Vertailutilanteen vyöhykemallin laskennassa kaapeloidun verkon ja ilmajohtoverkon rajalle sijoitettiin katkaisija, jolloin kaapeloitu verkko ei koe jälleenkytkentöjä. Maakaapeloidun verkon ja ilmajohtoverkon rajalle asetetulla katkaisijalla jälleenkytkennät ovat käytössä. Kuvassa 5.3 esitettynä case-alueen I vertailutilanteen vyöhykejako.



Kuva 5.3 Case-alueen I maakaapeloitavat alueet vertailutilanteen vyöhykemallin mukaan (mustalla merkityt alueet). Kuvaan merkityt kaksi sinistä viivaa merkitsevät auki olevaa erotinta, siniset neliöt merkitsevät katkaisijaa ja punaiset neliöt sähköasemaa. Solmuvälit alueella väritetty johtolähtöjen mukaan.

Vertailutilanteen vyöhykejaossa kaapelointi keskittyy alueen pohjoisosiin lähelle Lieksan taajamaa, kun taas alueen eteläisempi osa jää kokonaan ilmajohdoksi. Kyseinen vyöhykejako kattaa 46 % alueen kulutuksesta, mutta suurhäiriössä eteläisen alueen vianpaikannus voi olla haastavaa.

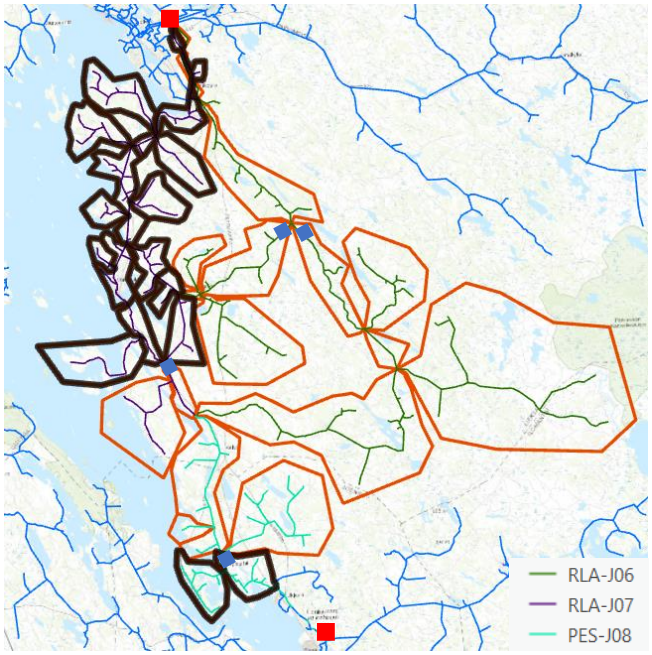
Alueen runkopainotteisessa kaapeloinnissa kaapeloiduilta rungoilta lähteville haaroille asetetaan vian erottavat kuormaerottimet, jotka erottavat niiden takana tapahtuvan vian AJK:n aikana. Kuvassa 5.4. esitettynä runkopainotteinen kaapelointiratkaisu case-alueelle I.



Kuva 5.4 Case-alueen I kaapelointi runkopainotteisesti (mustalla merkityt alueet). Kuvaan merkityt kaksi sinistä viivaa merkitsevät auki olevaa erotinta, siniset neliöt ovat katkaisijoita ja punaiset neliöt sähköasemia. Solmuvälit alueella väritetty johtolähtöjen mukaan.

Runkopainotteisessa ratkaisussa saadaan kaapeloitu yhteys Pesäkankaan ja Rantalan sähköasemien välille. Lisäksi tehdään ”kaapelointipisto” kuvaan 5.4 merkitylle erottimelle. Kaapelointipistojen tekemisellä saadaan varma syöttö merkittäviin solmupisteisiin. Erityisesti häiriönrajauksessa käytölle tulee ongelmia siitä, jos takasyöttöä ei saada järjestettyä alueille useista vioista johtuen. Pistojen tekemisellä voidaan siis nopeuttaa vianrajausta. Johtolähdöllä PES-J08 sijaitseva haara kaapeloitiin siellä olevan sähkönkulutuksen ja käyttöpaikkojen määrän takia.

Jos alueelle lisätään n. 16 % maakaapelia merkittäviä muutoksia ei saada tehtyä. Jos kaapelin lisäys arvioidaan KAH-kustannusten, käyttöpaikkojen määrän ja sähkönkulutuksen avulla saadaan kuvan 5.5 mukainen tulos.



Kuva 5.5 Case-alueen ehdotetut vyöhykerajat, jos maakaapelin määrää lisätään alueella (mustalla merkityt alueet). Siniset neliöt merkitsevät katkaisijaa ja punaiset neliöt sähköasemaa. Solmuvälit alueella väritetty johtolähtöjen mukaan.

Kuvan 5.5 tuloksesta on huomioitava, ettei se välttämättä ole paras ratkaisu suurhäiriöiden kannalta. Laskennassa huomioidaan kunkin johtolähdön erilaiset vikatiheydet, jolloin alueen kaikista vika-alttiimmat alueet merkitään kaapeloitavaksi, mutta tämä ei välttämättä kerro parasta ratkaisua toimitusvarmuusvaatimusten täyttämiseksi. Esiteltyjen vyöhykerajojen vertailu on esitetty taulukossa 5.5 ja alueen nykytilanteen kokonaistiedot taulukossa 5.6.

Taulukko 5.5 Case-alueen I alueen nykytilanteen kokonaistiedot.

Käyttöpaikkoja alueella yhteensä	1422
Koko alueen KJ-verkkopituus [km]	311
1 kV tekniikan maksimipotentiaali alueella [km]	126
Sähkönkulutus [MWh/a]	8600

Taulukko 5.6 Case-alueen I eri vyöhykerajojen arvot, sekä alueen verkon nykytilanne. Prosentit kuvaavat kunkin arvon osuutta nykytilanteen kokonaismäärästä. KJ-maakaapeli kuvaa kunkin kaapeloitavaksi merkityn alueen nykyistä verkkopituutta, joka toteutetaan KJ-maakaapelina.

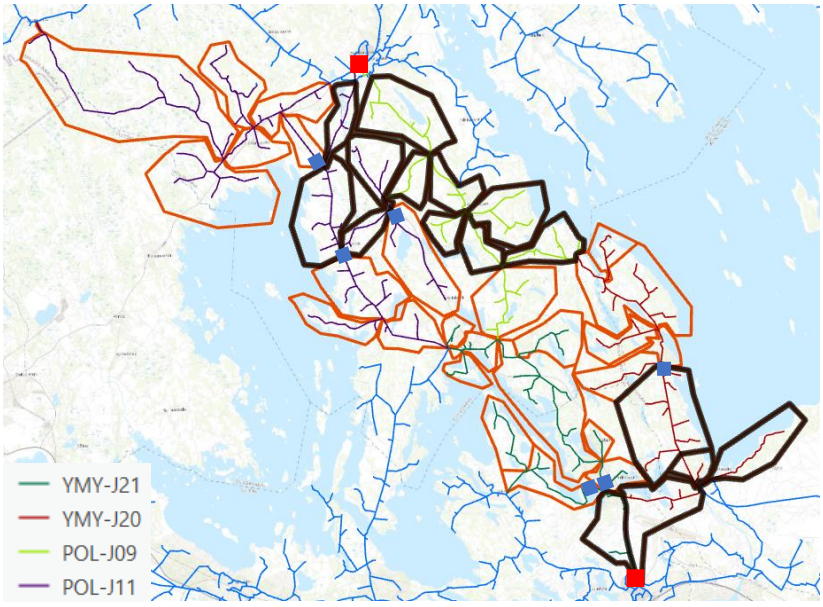
	Vertailutilanne	**Runkopainotteinen**	**Lisätty kaapeli**	**Nykytilanne**
KAH-kustannukset [k€/a]	83	93	75	149
KJ-maakaapelia [km]	60.4 (19 %)	60.5 (19 %)	69.3 (22 %)	0 (0 %)
Sähkönkulutus kaapeloidulla alueella [MWh/a]	3900 (46 %)	4300 (50 %)	5600 (65 %)	0 (0 %)
Käyttöpaikkoja kaapeloidulla alueella [kpl]	631 (44 %)	659 (46 %)	839 (59 %)	0 (0 %)
Jälleenkytkentöjä [kpl/a]	31	29	29	44
Katkaisijoita [kpl]	4	2	4	2
Vian erottavia kuormaerottimia [kpl]	0	10	0	0

Alueella KAH-kustannusten näkökulmasta paras vaihtoehto on vertailutilanteen vyöhykejako. Runkopainotteisella vyöhykejaolla saadaan hieman enemmän käyttöpaikkoja kaapeloidulle alueelle ja rungon alueella on hieman enemmän kulutusta.

Case-alueella I on kuitenkin huomioitava, että runkomainen kaapelointi ei ole näiden lukujen varjossa vertailutilanteen vyöhykejakoa paljoa huonompi. Siinä KAH-kustannukset ovat hieman korkeampia, mutta käyttöpaikkoja ja sähkönkulutusta saadaan enemmän maakaapeliverkon piiriin. Lisäksi runkopainotteisella kaapeloinnilla saadaan kahteen johtolähtörajaan kaapeloitu yhteys sähköasemalta. Tämä voi parantaa lähdön RLA-J06 varasyötettävyyttä häiriötilanteessa.

5.9 Case-alue II

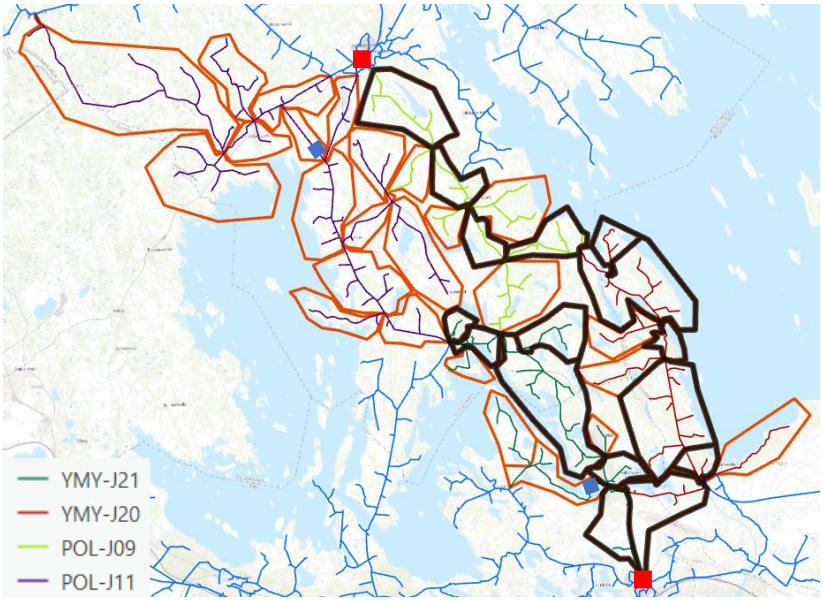
Case-alue II koostuu johtolähdöistä POL-J11, POL-J09, YMY-J21, ja YMY-J20. Alue valittiin tarkasteluihin sen keskimääräisä korkeamman sähkönkulutuksen ja käyttöpaikkojen määrän takia verrattuna muihin haja-asutusalueisiin. Alueella on myös kaksi runkoyhteyttä, joista itäinen koostuu lähdöistä POL-J09 JA YMY-J20 ja läntinen lähdöistä POL-J11 ja YMY-J21. Case-alueella käyttöpaikat ja sähkönkulutus keskittyvät erityisesti idänpuoleiselle runkoyhteydelle ja läntisen runkoyhteyden lähdölle YMY-J21. Case-alueen II vertailutilanteen vyöhykerajan mukainen kaapelointi on esitettynä kuvassa 5.6.



Kuva 5.6 Vertailutilanteen vyöhykejako case-alueella II (mustalla merkityt alueet). Siniset neliöt merkitsevät katkaisijaa ja punaiset neliöt sähköasemaa. Solmuvälit alueella väritetty johtolähtöjen mukaan.

Vertailutilanteen vyöhykejako on jakautunut kaikille alueen johtolähdöille. Kaapeloidut alueet kattavat osittain tärkeimmät kulutuspaikat ja käyttöpaikkojen keskittymät, mutta suurimmat keskittymät jäävät ilmajohdon perään. Alue vaatii vertailutilanteen vyöhykejaolla myös kuusi katkaisijaa, jotta kaapeloidulla alueella ei tapahdu jälleenkytkentöjä.

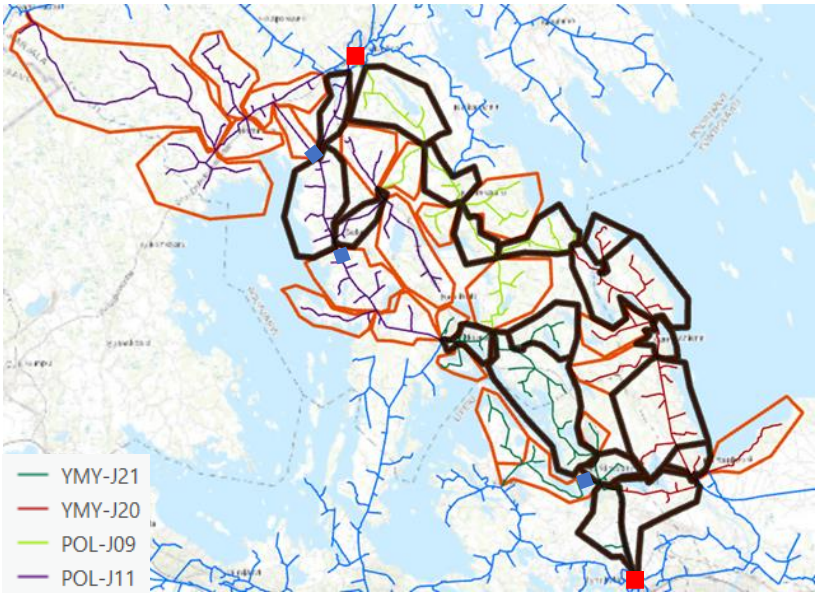
Case-alueen II runkopainotteiseen toteuttamiseen on monta erilaista vaihtoehtoa. johtuen sen silmukoituneesta rakenteesta ja kahdesta ”päärunkoyhteydestä”. Kun alueelle sijoitetaan suunnilleen saman verran kaapelia kuin vertailutilanteen vyöhykejaossa, kaapelia riittää toisen päärunkoyhteyden kaapelointiin ja toisen runkoyhteyden puolivälin kaapelointiin. Ehdotettu runkopainotteinen kaapelointi on esitetty kuvassa 5.7.



Kuva 5.7 Case-alueen II runkopainotteinen ratkaisu (mustalla merkityt alueet). Siniset neliöt merkitsevät katkaisijaa ja punaiset neliöt sähköasemaa. Solmuvälit alueella väritetty johtolähtöjen mukaan. Lähtöjen rajoja muokattu verrattuna vertailutilanteeseen.

Itäinen runko kaapeloitiin läntisen rungon sijasta sen korkeamman käyttöpaikkojen määrän ja sähkönkulutuksen takia. Lännenpuoleiselle rungolle tehtiin kaapelipisto lounaasta tulevan johtolähdön, YMY-J21 ja POL-J11 rajalle pitkin lähtöä YMY-J21. Tämä pisto mahdollistaa varman takasyötön YMY-J21 pitkin, mikä auttaa vianpaikantamista suurhäiriötilanteessa. Myös eniten käyttöpaikkoja ja sähköä kuluttavat haarat kaapeloitiin. Tällä kaapelointiratkaisulla 58 % sähkönkulutuksesta ja 55 % alueen käyttöpaikoista jää kaapeloidun KJ-verkon taakse.

Jos case-alueelle II lisätään maakaapelin määrää KAH-kustannusten, sähkönkulutuksen ja käyttöpaikkojen määrän mukaan, runkopainotteinen kaapelointi on parempi vertailutilanteeseen verrattuna. Kaapeloinnin lisäys voidaan toteuttaa joko tekemällä kaapelointipisto tai kaapeloimalla enemmän rungolta lähteviä haaroja. Jos johtolähtö saadaan kokonaan kaapeloitua, kyseiseltä johtolähdöltä voidaan ottaa jälleenkytkennät pois päältä. Tosin jos haaroilla sähkönkulutus tai käyttöpaikkojen määrä on vähäisempi verrattuna alueen runkojohtoihin, haarojen kaapelointi ei välttämättä ei ole kannattava ratkaisu, vaikka johtolähtö ei tällöin koekaan jälleenkytkentöjä.



Kuva 5.8 Case-alueen II ehdotetut vyöhykerajat, jos maakaapelin määrää lisätään alueella (mustalla merkityt alueet). Siniset neliöt merkitsevät katkaisijaa ja punaiset neliöt sähköasemaa. Solmuvälit alueella väritetty johtolähtöjen mukaan. Lähtöjen rajoja muokattu verrattuna vertailutilanteeseen.

Case-alueella II kaapeloinnin lisäys on suositeltavaa toteuttaa tekemällä johtolähdölle POL-J11 kaapelointipisto kuvan 5.8 mukaisesti, rungolta lähtevien haarojen kaapeloimisen sijasta. Kuvan 5.8 kaapeloitu alue sisältä 67 % kaikesta alueella kuluvasta energiasta ja 59 % kaikista alueen käyttöpaikoista. Lisättävän kaapelin määrä ei riitä lännenpuoleisen rungon kaapelointiin kokonaan. Case-alueen nykytilanteen tiedot ovat esitettynä taulukossa 5.7 ja kunkin kaapelointiratkaisun tiedot ovat esitettynä taulukossa 5.8.

Taulukko 5.7 Case-alueen II nykytilanteen kokonaistiedot.

Käyttöpaikkoja alueella yhteensä	1870
Koko alueen KJ-verkkopituus [km]	231
1 kV tekniikan maksimipotentiaali alueella [km]	84
Sähkönkulutus [MWh/a]	19400

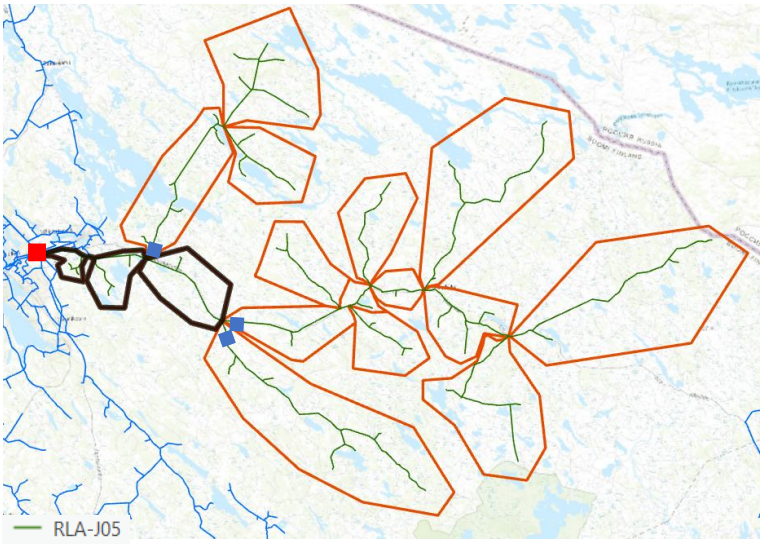
Taulukko 5.8 Erilaisten vyöhykerajojen tiedot, sekä alueen verkon nykytilanne. Prosentit kuvaavat kunkin arvon osuutta kokonaismäärästä. KJ-maakaapeli kuvaa kunkin kaapeloitavaksi merkityn alueen nykyistä verkkopituutta, joka toteutetaan KJ-maakaapelina.

	Vertailutilanne	**Runkopainotteinen**	**Lisätty kaapeli**	**Nykytilanne**
KAH-kustannukset [k€/a]	102.8	90.4	74.6	193.1
KJ-maakaapelia [km]	67.7 (29 %)	68.0 (29 %)	85.6 (37 %)	0 (0 %)
Sähkönkulutus kaapeloidulla alueella [MWh/a]	9000 (46 %)	11300 (58 %)	13000 (67 %)	0 (0 %)
Käyttöpaikkoja kaapeloidulla alueella [kpl]	698 (37 %)	1022 (55 %)	1109 (59 %)	0 (0 %)
Jälleenkytkentöjä [kpl/a]	24	23	18	39
Katkaisijoita [kpl]	6	2	3	3
Vian erottavia kuormaerottimia [kpl]	0	7	10	0

Alueella runkopainotteinen kaapelointi on KAH-kustannusten, kulutetun energian määrän ja käyttöpaikkojen kannalta parempi vaihtoehto verrattuna vertailutilanteen vyöhykejakoon. Suurin osa sähkönkulutuksesta ja käyttöpaikoista sijaitsee kaukana sähköasemasta ja näilläkin alueilla suurin osa painottuu rungolla oleville muuntamoille tai hyvin lyhyille haaroille. Alueella kaapeloinnin lisäystä kannattaa harkita jopa enemmän kuin kuvassa 5.8 on esitetty. Esimerkiksi lännen puoleisen runkoyhteyden tai joidenkin haarojen kaapelointia on syytä harkita.

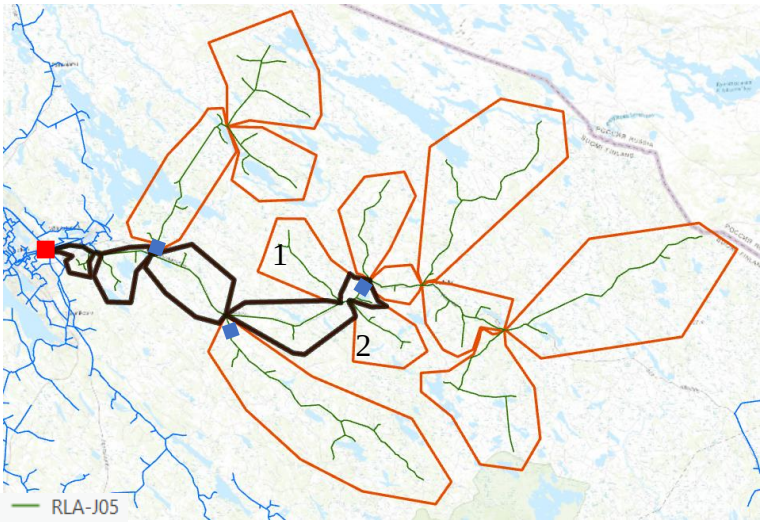
5.10 Case-alue III

Case-alue III koostuu johtolähdöstä RLA-J05, joka valittiin tarkasteluihin sen alhaisen käyttöpaikkatiheyden ja sen haaramaisen rakenteen takia. Alue koostuu vain yhdestä johtolähdöstä, jolle ei ole takasyöttömahdollisuutta. Suurhäiriössä usean vian sattuminen tällaiselle alueelle voi olla erittäin haastavaa häiriönhoidon näkökulmasta. Lähdön alkuun sattunut vika estää sen takana olevan verkon vikojen etsimisen kaukokäytöillä, jolloin viankorjausresurssien on korjattava viat lähdön alussa ennekuin taempana olevia vikoja kannattaa etsiä. Tällöin alueelle tarvittavien resurssien määrää voi olla vaikea arvioida. Lisäksi noin 2/3 KAH-kustannuksista syntyy lähdön alussa olevilla johto-osuuksilla, koska näille alueille sattuvat viat katkaisevat sähköt suurelta osalta verkkoa. Alueen vertailutilanteen vyöhykejako on esitetty kuvassa 5.9.



Kuva 5.9 Case-alueen III vertailutilanteen vyöhykejako (mustalla merkityt alueet). Siniset neliöt merkitsevät katkaisijaa ja punainen neliö sähköasemaa.

Case-alueelle III ei tehty runkopainotteista kaapelointiesimerkkiä johtuen sen harvasta asutuksesta ja alhaisesta sähkönkulutuksesta. Case-alueelle saadaan 16 % kaapelin lisäyksellä kaapelia alle 2 km, joka ei juurikaan vaikuta alueeseen. Kaapeloinnin lisäys mallinnettiin lisäämällä alueen kaapelointia noin 11 km. Tämä on esitetty kuvassa 5.10. Taulukossa 5.9 on esitetty alueen tiedot ja taulukossa 5.10 eri vyöhykerajauksien tiedot.



Kuva 5.10 Case-alueelle lisätty maakaapeli (mustalla merkityt alueet). Haaroille 1 ja 2 laitettiin vian erottavat kuormaerottimet. Siniset neliöt merkitsevät katkaisijaa ja punainen neliö sähköasemaa.

Taulukko 5.9 Case-alueen III nykytilanteen kokonaistiedot.

Käyttöpaikkoja alueella yhteensä	341
Koko alueen KJ-verkkopituus [km]	186
1 kV tekniikan maksimipotentiaali alueella [km]	77
Sähkönkulutus [MWh/a]	3000

Taulukko 5.10 Erilaisten vyöhykerajojen tiedot, sekä alueen verkon nykytilanne. Prosentit kuvaavat kunkin arvon osuutta kokonaismäärästä. KJ-maakaapeli kuvaa kunkin kaapeloitavaksi merkityn alueen nykyistä verkkopituutta, joka toteutetaan KJ-maakaapelina.

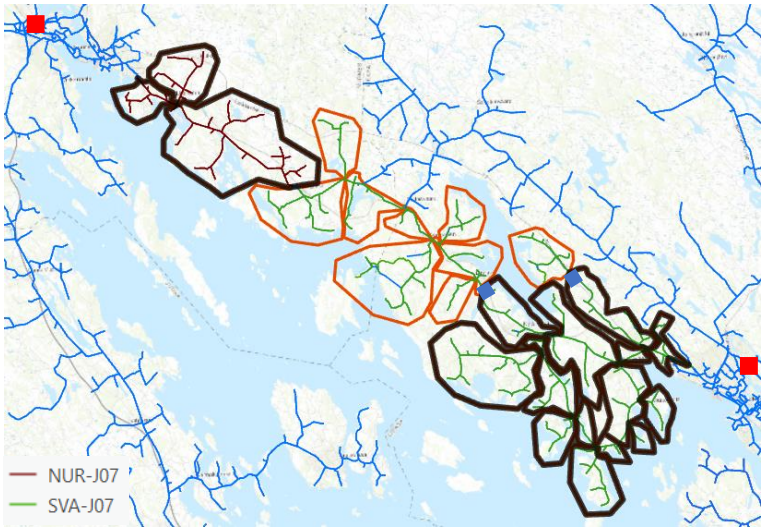
	Vertailutilanne	**Lisätty kaapeli**	**Nykytilanne**
KAH-kustannukset [k€/a]	60.3	55.3	75.8
KJ-maakaapelia [km]	14.7 (8 %)	25.9 (14 %)	0 (0 %)
Sähkönkulutus kaapeloidulla alueella [MWh/a]	220 (7 %)	500 (17 %)	0 (0 %)
Käyttöpaikkoja kaapeloidulla alueella [kpl]	29 (9 %)	49 (14 %)	0 (0 %)
Jälleenkytkentöjä [kpl/a]	41	37	48
Katkaisijoita [kpl]	3	3	2
Vian erottavia kuormaerottimia [kpl]	0	2	0

Case-alueella käyttöpaikkojen tiheys on matala. Jos alueelle lisätään 11 km maakaapelia kaapeloidulle alueelle tulee lisää vain 20 käyttöpaikkaa ja KAH-kustannuksia vähenevät vuosittain vain 5000 €/a vähemmän vertailutasoon verrattuna. Alueen maakaapelin lisäys ei laskelmien mukaan vaikuta hyvältä ratkaisulta ainakaan keskeytyskustannusten näkökulmasta.

Toimitusvarmuusrajojen näkökulmasta RLA-J05 mukainen johtolähtö tulee tarkastella sen perusteella, keretäänkö kyseisellä alueella korjata viat suurhäiriötilanteessa alle 36 tunnissa. Kyseisellä alueella on tällä hetkellä 186 km KJ-verkkoa, jolle ei tällä hetkellä ole takasyöttömahdollisuutta muilta johtolähdöiltä. Lisäksi johtolähdön sijainti on hyvin syrjäinen ja kauimmaisille johto-osuuksille ajoaika voi olla pitkä. Haaramainen rakenne luo myös haasteen vian rajaamiseen kaukokäyttölaitteiden avulla, sillä vian sattuessa lähdön alkuun sen takana olevia vikoja ei voida kaukokäyttöjen avulla etsiä, koska vian taakse jäävä verkko on jännitteetön, jolloin eikä takasyöttömahdollisuutta ole. Tästä syystä kyseiselle alueelle ei voida arvioitujen parametrien avulla arvioida, kuinka kaapelointi on sopiva toteuttaa.

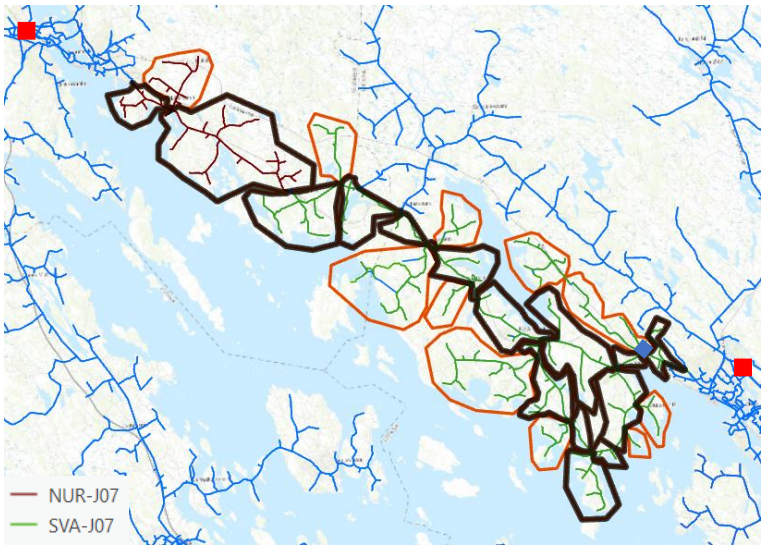
5.11 Case-alue IV

Case-alue IV koostuu johtolähdöistä NUR-J07 ja SVA-J07. Alue valittiin tarkasteluihin sen kulutuksen keskittymisen takia. Merkittävä osa koko alueen kulutuksesta ja käyttöpaikoista keskittyy lähelle johtolähtöjen alkua ja erityisesti johtolähdöllä SVA-J07 olevaan silmukkamaisen verkonrakenteen haaroille. Alueen vertailutilanteen vyöhykejako on esitettynä kuvassa 5.11.



Kuva 5.11 Case-alueen IV kaapeloitavat alueet vertailutilanteen vyöhykemallin mukaan (mustalla merkityt alueet). Siniset neliöt merkitsevät katkaisijaa ja punaiset neliöt sähköasemaa. Solmuvälit alueella väritetty johtolähtöjen mukaan.

Kuvan 5.11 vertailutilanteen kaapelointi kattaa johtolähdön NUR-J07 kokonaan ja suurimman osan johtolähtöä SVA-J07. Tämä kaapelointi kattaa 80 % alueen sähkönkulutuksesta ja 70 % alueen käyttöpaikoista. Alueet, jotka kuvassa 5.11 jätettiin ilmajohdoksi eivät ole tarkasteltavien parametrien mukaan hyviä kaapelointikohteita.

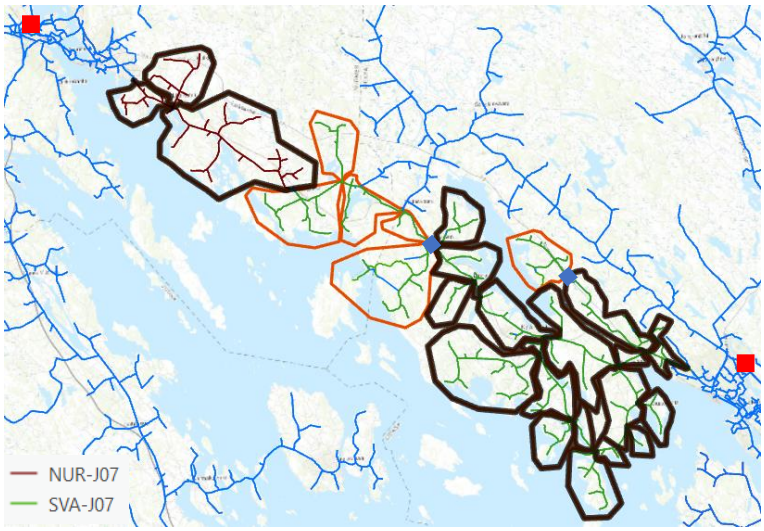


Kuva 5.12 Case-alueen IV runkopainotteinen ratkaisu (mustalla merkityt alueet). Siniset neliöt merkitsevät katkaisijaa ja punaiset neliöt sähköasemaa. Solmuvälit alueella väritetty johtolähtöjen mukaan.

Runkopainotteinen maakaapelointi toteutettiin kaapeloimalla runkoyhteys johtolähtöjen välille ja kaapeloimalla johtolähdön SVA-J07 silmukan runko ja sen alussa oleva pitkä haara jätettiin katkaisijan taakse ilmajohdoksi. Case-alueella IV runkopainotteisen kaapeloinnin ongelmana on sähkönkulutuksen ja käyttöpaikkojen keskittyminen johtolähdön SVA-J07 alussa oleville haarajohdoille, eikä niinkään rungolle. Kuvaan 5.12 kaapeloiduksi merkityille

alueille jää 10 %-yks vähemmän kulutusta ja käyttöpaikkoja verrattuna kuvan 5.11 tilanteeseen.

Runkopainotteinen kaapelointi ei siis ole tarkasteltavien parametrien mukaan järkevää, joten kaapeloinnin lisäys tehdään viemällä johtolähdön SVA-J07 kaapelointia pidemmälle kaapeloimalla runkoa ja haarajohtoja. Kuvassa 5.13 on esitettynä kaapeloinnin lisäys case-alueelle IV.



Kuva 5.13 Ehdotettu maakaapelin lisäys case-alueelle IV (mustalla merkityt alueet). Siniset neliöt merkitsevät katkaisijaa ja punaiset neliöt sähköasemaa. Solmuvälit alueella väritetty johtolähtöjen mukaan.

Kaapelin lisäyksellä alueelle ei saada kuin 7 %-yks lisää käyttöpaikkoja ja 4 %-yks lisää sähkönkulutusta kaapeloidulle verkolle. Suurin osa alueen käyttöpaikoista ja sähkönkulutuksesta sijaitsee vertailutilanteen mukaisilla kaapelointialueilla. Case-alueen nykytilanteen kokonaistiedot on esitetty taulukossa 5.11 ja eri vyöhykerajauksien arvot taulukossa 5.12.

Taulukko 5.11 Case-alueen nykytilanteen kokonaistiedot.

Käyttöpaikkoja alueella yhteensä	1422
Koko alueen KJ-verkkopituus [km]	220
1 kV tekniikan maksimipotentiaali alueella [km]	126
Sähkönkulutus [MWh/a]	10500

Taulukko 5.12 Case-alueen IV eri vyöhykerajojen arvot, sekä alueen nykytilanne. Prosentit kuvaavat kunkin arvon osuutta alueen nykytilanteen kokonaismäärästä. KJ-maakaapeli kuvaa kunkin vyöhykerajauksen kaaapeloitavaksi merkityllä alueella olevaa nykyistä verkkopituutta, joka toteutetaan KJ-maakaapelina.

	Vertailutilanne	**Runkopainotteinen**	**Lisätty kaapeli**	**Nykytilanne**
KAH-kustannukset [k€/a]	57.4	64.3	56.8	133
KJ-maakaapelia [km]	66.1 (30 %)	66.4 (30 %)	75.3 (34 %)	0 (0 %)
Sähkönkulutus kaapeloidulla alueella [MWh/a]	8800 (84 %)	7400 (71 %)	9100 (87 %)	0 (0 %)
Käyttöpaikkoja kaapeloidulla alueella [kpl]	1032 (73 %)	894 (63 %)	1135 (80 %)	0 (0 %)
Jälleenkytkentöjä [kpl/a]	7	8	5	28
Katkaisijoita [kpl]	2	1	2	1
Vian erottavia kuormaerottimia [kpl]	0	9	0	0

Case-alueella IV vertailutilanteen vyöhykeratkaisu vaikuttaa paremmalta kuin runkopainotteinen vyöhykejako. Suurin osa alueen kulutuksesta ja käyttöpaikoista sijaitsee idästä tulevan johtolähdön alussa olevassa renkaassa ja siinä olevilla haaroilla. Taas puolivälissä aluetta käyttöpaikkojen ja sähkönkulutuksen määrä on alhaisempi. Tosin runkopainotteisella kaapeloinnilla saadaan kaapeloitu yhteys alueen puolivälissä olevaan pohjoiseen lähtevän johtolähdön rajalle, mikä voi olla avuksi pohjoisen johtolähdön varasyötössä. Maakaapelin lisääminen alueelle vähentää vuosittaista KAH-kustannusta hyvin vähän.

5.12 Runkopainotteisen kaapeloinnin edut

Runkopainotteisessa kaapeloinnissa suurimpana etuna verrattuna vertailutilanteen vyöhykejakoon on mahdollinen vikapaikkojen nopea paikantaminen. Jos kahden sähköaseman välinen runko on kaapeloitu ja haarat laitettu ilmajohdoksi, myrskyn tullessa viat sattuvat todennäköisesti ilmajohtohaaroille. Jos haarajoen alussa on vian erottavat kuormaerottimet, haarat irtoavat rungosta jälleenkytkennän aikana ja runko palaa jännitteiseksi. Tällöin vikaantuneet alueet saadaan rajattua pienemmiksi ja korjaushenkilöstö pystytään ohjaamaan heti kyseisille haaroille. Vertailutilanteen vyöhykejaossa taas kyseinen väli on sähköasemien läheltä täysin kaapeloitu, mutta niiden välillä on edelleen ilmajohtoa. Tästä myrskyn mennessä ohi kaapeloidut alueet eivät koe jälleenkytkentää, mutta ilmajohtoverkossa vikojen paikantaminen voi olla haastavampaa. Jos alueella ei ole paljoa verkon kaukokäyttö- tai automaatiolaitteita viankorjaajien on etsittävä vikaa paljon laajemmalta alueelta. Runkopainotteisella kaapeloinnilla on myös helpompi lykätä niiden haarojen saneerausta, joilla on suuri riski hävitä tulevaisuudessa asiakaskadon myötä.

5.13 Yhteenveto vyöhykejaon tarkastelusta

Case alueista vertailutilanteen vyöhykejako on parempi case-alueille I ja IV, kun taas runkopainotteinen vyöhykeratkaisu on case-alueelle II parempi. Se minkälaista vyöhykejakoa käyttää millekin alueelle riippuu voimakkaasti siitä, mitä tekijää halutaan painottaa ja minkälainen alue on kyseessä. Esimerkiksi, kun johtolähdön kulutus ja käyttöpaikat sijaitsevat pääasiassa johtolähdön alussa olevilla haaroilla, vertailutilanteen vyöhykejaon mukainen ratkaisu, jossa runkoyhteyksien välit jätetään osittain kaapeloimatta voi olla KAH-kustannusten määrän näkökulmasta parempi vaihtoehto.

Runkopainotteinen kaapelointiratkaisu vaikuttaa KAH-kustannusten osalta paremmalta taas tilanteessa, jossa johtolähdön kulutus on kaukana sähköasemasta runkojohdolla tai lähdön alussa oleva kulutus sijaitsee pääasiassa rungolla. Tällöin kaapeloidulla alueella olevat käyttöpaikat tosin kokevat edelleen jälleenkytkentöjä.

Häiriönhoidon näkökulmasta runkoyhteyksien painottaminen kaapeloinnissa voi helpottaa vikojen paikannusta ja rajausta. Kun säävarmaa runkoyhteyttä on rakennettu pidemmälle, vianrajaajien tarkistettava alue pienenee ja rungon haaroille sattuvat viat erottuvat vian erottavilla kuormaerottimilla automaattisesti. Tällöin vikojen määrä pystytään arvioimaan paremmin ja etenkin suurhäiriöissä saadaan nopeammin tilannekuva selville. Tämä auttaa arvioimaan tarvitseeko lisäresursseja hankkia vai riittääkö nykyiset resurssit vikojen korjaamiseen. Myös alueellisia vikamääriä voi olla helpompi arvioida, jolloin viankorjausresursseja voidaan allokoida alueittain paremmin.

Tässä työssä vyöhykejakoa tarkasteltiin lähinnä verkon nykytilanteen mukaan. Jos yhtiöllä on tiedossa tai on arvio jonkin alueen kehittymisestä tulevaisuudessa, se tulee ottaa huomioon vyöhykejaossa, jotta vältytään ennenaikaisten investointien tekemisestä tulevaisuudessa.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli selvittää nykyisen tavoiteverkon toimitusvarmuustaso, sekä uudelleenarvioida verkon vyöhykejaon toteutusta. Kaapelointistrategiaa arvioitiin vertailemalla vertailutilanteen mukaista vyöhykejakoa runkopainotteiseen vyöhykejakoon valituilla haja-asutusalueilla sijaitsevilla case-alueilla. Vertailu tehtiin KAH-kustannusten, sähkönkulutuksen ja käyttöpaikkojen määrän avulla. Toimitusvarmuuden selvittämiseen tehtiin suurhäiriömalli, jota voidaan hyödyntää tulevaisuudessa tapahtuvien suurhäiriöiden vaaditun toimitusvarmuustason arvioimisessa. Toimitusvarmuustarkastelun mukaan SHV-verkon määrää suositellaan kasvatettavan. Etenkin voimakkaat kesämyrskyt voivat nykyisellä investointimäärällä aiheuttaa yli 36 h kestäviä katkoja verkossa vuonna 2036. Tykkylumisuurhäiriöissä tilanne vaikuttaa paremmalta, johtuen vierimetsänhoidon vaikutuksesta toimitusvarmuuteen.

SHV-verkon määrää suositellaan kasvatettavan 16 % KJ-verkossa ja 8 % PJ-verkossa arvioidusta 2036 vuoden tasosta, olettaen ettei viankorjausresurssien määrää kasvateta. Prosenttiluvut vastaavat KJ-verkossa n. 2100 km ja PJ-verkossa 2300 km verkkopituuksia. EV:n yksikköhinnoilla tämän verkkomäärän investointikustannus on nykyarvoltaan 155 M€ olettaen, että investoinnit jakautuvat tasan seuraaville 15 vuodelle.

Vertailutilanteen vyöhykejako on KAH-kustannusten, sähkönkulutuksen ja käyttöpaikkojen määrän kannalta hyvä ratkaisu, mikäli johtolähdön käyttöpaikat ja sähkönkulutus sijaitsevat pääasiassa lähellä sähköasemaa olevia haaroja. Runkopainotteinen maakaapelointi taas on suositeltavampi ratkaisu, kun sähkönkulutus ja käyttöpaikat sijaitsevat kaukana sähköasemasta olevilla runkojohdoilla. Runkopainotteinen maakaapelointi vaatii kullekin kaapeloidulta rungolta lähtevälle haaralle vian erottavan kuormaerottimen, jotta vyöhykejaosta voidaan saada paras mahdollinen hyöty, kun taas vertailutilanteen vyöhykejako vaatii pelkästään katkaisijat ilmajohdon ja maakaapelin rajalle. Kummallakin tarkasteltavalla vyöhykejakotavalla on mahdollista tehdä kaapelointipistoja. Runkopainotteisella kaapeloinnilla tosin riittää lyhyempi kaapelointipituus, koska osa haaroista jätetään ilmajohdoksi. Kaapelointipistot etenkin usean johtolähdön rajalle voivat auttaa muiden johtolähtöjen takasyöttöä.

On kuitenkin huomioitava, että runkopainotteinen kaapelointi voi olla parempi ratkaisu etenkin suurhäiriöitä ajatellen vertailutilanteen vyöhykejakoon verrattuna. Suurhäiriössä kaapeloidut runkojohdot voivat nopeuttaa alueen vianrajausta, sillä ilmajohtohaarat erottuvat verkosta vian erottavilla kuormaerottimella automaattisesti. Tällöin viankorjausresurssit voidaan ohjata suoraan näille haaroille, jolloin vikoja ei tarvitse etsiä niin laajalta alueelta kuin vertailutilanteen vyöhykejaon mukaisessa kaapeloinnissa. Vertailutilanteen vyöhykejaossa sähköasemien väliin voi jäädä runsaasti ilmajohtoa, joilta vian paikantaminen voi olla hidasta. Tämän takia on hyvä harkita runkopainotteista ratkaisua myös alueilla, joissa vertailutilanteen mukainen vyöhykejako vaikuttaa paremmalta tarkastelujen parametrien mukaan.

Tulevaisuudessa vioista kerättävää tietoa on suositeltavaa lisätä. Toimitusvarmuuden määrittämistä voidaan tarkentaa keräämällä enemmän tietoa vioista ja niiden sijainneista. Etenkin PJ-vikojen tilastoinnissa on huomattavasti kehitettävää. Tällä hetkellä PJ-vikojen tarkkaa sijaintia ei merkitä kartalle viankorjauksen jälkeen. Tulevaisuudessa tätä voidaan alkaa tilastoimaan esimerkiksi siten, että viankorjaajat merkitsevät kartalle vikapaikan korjauksen jälkeen, jolloin AMKA:n vikatiheyttä eri ympäristöluokissa voidaan arvioida. KJ-vikojen tilastoinnissa on myös kehitettävää. Tällä hetkellä vikaraporttiin voi sisältyä useita vikoja ja todellista vikapaikkojen määrää ei tiedetä. Tätä voidaan tilastoida esimerkiksi merkitsemällä kullekin vikaraportille todellinen vikapaikkojen määrä. Tällöin absoluuttista vikamäärää voidaan arvioida paremmin. Lisäksi vikojen korjaukseen kuluvaa aikaa kannattaa alkaa tilastoimaan, jotta viankorjausresurssien toimintaa ja viankorjauksen nopeutta voidaan arvioida paremmin.

Runkopainotteisen kaapeloinnin toimivuutta kannattaa arvioida erityisesti suurhäiriössä. Työssä tarkastellut parametrit eivät välttämättä suoraan kerro, onko kyseinen vyöhykejako paras mahdollinen toimitusvarmuusvaatimusten täyttämiseen. Tämän takia runkopainotteista kaapelointia kannattaa aluksi pyrkiä testaamaan alueella, joissa se näyttää jo tarkasteltujen parametrien mukaan sopivalta ratkaisulta. Kun saadaan enemmän tietoa siitä, toimiiko runkopainotteinen vyöhykejako viankorjausta ja -rajausta nopeuttavana tekijänä, voidaan paremmin arvioida sen hyödyntämistä niilläkin alueilla, joissa vertailutilanteen vyöhykejako vaikuttaa paremmalta ratkaisulta. Haja-asutusalueiden maakaapeloinnissa vertailutilanteen mukaisella vyöhykejaolla tulee myös luultavasti

tilanteita, joissa runko saneerataan, mutta rungolta lähtevät haarat jätetään edelleen ilmajohdoksi esimerkiksi haarojen iän tai liittymien irtisanomisen riskin takia. Tällöin runkopainotteista kaapelointia voidaan myös pilotoida asettamalla näille haaroille vian erottavat kuormaerottimet, jolloin saadaan lisäaikaa epävarmoille liittymille menevän verkon saneeraukselle.

Mikäli toimitusvarmuusjousto tulee mahdolliseksi tulevaisuudessa, riippuen sen toteutustavasta se voi vähentää tarvittavan SHV-verkon määrän investointeja. Käyttöpaikkakohtaisena toteutettu toimitusvarmuusjousto vaatii sen, että sopimukset pitää saada solmittua vähintään muuntopiiritasolla ja mieluummin laajemmalla tasolla, sillä muuten jouston hyöty jää pieneksi. Taas toimitusvarmuusjouston toteutuminen ns. ”liikkuvana” on helpommin hyödynnettävissä. Liikkuvalla toimitusvarmuusjoustolla tarkoitetaan sitä, että kussakin suurhäiriössä on tietty määrä käyttöpaikkoja, joille sallitaan toimitusvarmuusrajat ylittäviä katkoja ilman, että näitä käyttöpaikkoja ei tarvitse määrittää etukäteen. Toimitusvarmuusjouston hyödyntämistä voi tosin rajoittaa keskeytyskriittiset käyttöpaikat, joille toimitusvarmuudesta joustoa tuskin voidaan toteuttaa.

LÄHDELUETTELO

Energiavirasto. 2018. Valvontamenetelmät neljännellä 1.1.2016 –31.12.2019 ja viidennellä 1.1.2020–31.12.2023 valvontajaksolla. [Viitattu 15.10.2020] Helsinki. Saatavissa: https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12766832/Valvontamenetelm%C3%A4t-s%C3%A4hk%C3%B6njakelu-2016-2023.pdf/72eac45f-4fe0-6b0a-d5f7-e89ee97b89fc/Valvontamenetelm%C3%A4t-s%C3%A4hk%C3%B6njakelu-2016-2023.pdf

Haakana. J. 2013. Impact of reliability of supply on long-term development approaches to electricity distribution networks. LUT. [Väitöskirja] Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/93851/isbn9789522655080.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Kurki. L. 2019. KJ-saneerausalueet. [Sisäinen karttataso]

Kurki. L. 2020. Vierimetsänhoidon vaikuttavuus lentohavaintoihin perustuen 2016–2019. [Sisäinen dokumentti]

Lakervi E., Partanen J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. 3. painos. Helsinki. Otatieto. s. 168

Lassila J. et.al. 2019. Sähköasiakas ja sähköverkko 2030. LUT, Lappeenranta. Saatavissa: https://www.lut.fi/documents/10633/521610/Sa%CC%88hko%CC%88asiakas+ja+sa%CC%88hko%CC%88verkko+2030-loppuraportti.pdf/a5b20152-8247-45d4-b747-17a236659666

Lehtonen I. et. al. 2019. Suomen muuttuva ilmasto – tietoa sähkönsiirtojärjestelmän riskien arviointia varten. Ilmatieteen laitos. Helsinki. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/337160814_Suomen_muuttuva_ilmasto_-_tietoa_sahkonsiirtojarjestelman_riskien_arviointia_varten

Lehtonen I. et. al. 2016. Heavy snow loads in Finnish forests respond regionally asymmetrically to projected climate change.[Viitattu 15.10.2020] Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/309576804_Heavy_snow_loads_in_Finnish_forests_respond_regionally_asymmetrically_to_projected_climate_change

Partanen J. et. al. 2012. Sähkönjakelun toimitusvarmuuden parantamiseen sekä sähkökatkojen vaikutusten lieventämiseen tähtäävien toimenpiteiden vaikutusten arviointi. [Tutkimusraportti]. LUT. Saatavissa: https://www.lut.fi/documents/10633/138922/S%C3%A4hk%C3%B6njakelun+toimitusvarmuuden+parantamiseen+sek%C3%A4%20s%C3%A4hk%C3%B6-+katkojen+vaikutusten+lievent%C3%A4miseen+t%C3%A4ht%C3%A4%C3%A4vien+toimenpiteiden+vaikutusten+arviointi/bf021a58-24fc-47bd-a893-1804ad813f08

Partanen J. 2018. Sähkönsiirtohinnat ja toimitusvarmuus. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. 43/2018. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161178/43_18_Sahkonsiirtohinnat_ja_toimintavarmuus.pdf

PKSS Oy Käyttö. Haastattelu. 15.12.2020.

Pohjois-Karjalan Sähkö Oy. Vuositilastot. 2015–2020. [Sisäisiä dokumentteja]

Sähkömarkkinalaki. 588/2013. [Verkkodokumentti] [viitattu 10.9.2020]. Saatavissa: https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588

TEM. 2021. Hallituksen esitys eduskunnalle laeiksi sähkömarkkinalain ja sähkö- ja maakaasumarkkinoiden valvonnasta annetun lain 14 §:n muuttamisesta. Työ- ja elinkeinoministeriö. [Viitattu 19.6.2021]. Saatavissa; https://valtioneuvosto.fi/paatokset/paatos?decisionId=0900908f8070963b

LIITTEET

Liite 1. KJ-maakaapelin kustannus EV:n yksikköhinnoilla

Komponentti	EV:n yksikköhinta [€]	Tiheys [kpl/km]	Kilometrikohtainen hinta [€/km]
Kojeistopääte	1100	0.67	733.3
Jatkos	1700	1.25	2125
Hajautetun kompensoinnin laitteisto yli 10 A	19100	0.08	1591.7
Puistomuuntamo: kevyt	8600	0.08	716.7
Puistomuuntamo: ulkoa hoidettava, PJ-keskuksen nimellisvirta max 630 A	22900	0.89	20381
Maakaapelioja–helppo olosuhde	10700	0.95	10165
Maakaapelioja–tavallinen olosuhde	24200	0.03	726
Maakaapelioja–vaikea olosuhde	77200	0.02	1544
Maakaapeli 95 mm^2 tai alle	28300	1	28300
Kauko-ohjattavien muuntamoiden ja kauko-ohjattavien erotinasemien määrään perustuva osa (Käytönvalvontajärjestelmä)	2200	0.05	110
Kauko-ohjattavien muuntamoiden ja kauko-ohjattavien erotinasemien määrään perustuva osa (Käytöntukijärjestelmä)	550	0.05	27.5
Kauko-ohjauslaitteisto muuntamolla tai erotinasemalla	3100	0.05	155
Tiedonsiirtolaitteisto muuntamolla tai erotinasemalla	4800	0.05	240
Yhteensä			**66815**

Liite 2. PJ-maakaapelin kustannus EV:n yksikköhinnoilla

Komponentti	**EV:n yksikköhinta [€]**	**Tiheys [kpl/km]**	**Kilometrikohtainen hinta [€/km]**
Maakaapelioja – helppo olosuhde	10 700	0.95	10165
Maakaapelioja – tavallinen olosuhde	24 200	0.03	726
Maakaapelioja – vaikea olosuhde	77 200	0.02	1544
Maakaapeli 25 mm^2 tai alle	8500	0.03	266
Maakaapeli 50 mm^2	10000	0.39	3906
Maakaapeli 95 mm^2	12100	0.53	6428
Maakaapeli 185 mm^2	18100	0.05	848
0.4 kV haaroituskaappi	670	2.38	1591
0.4 kV kaapelijakokaappi: enintään 400 A	1 400	1.13	1575
0.4 kV kaapelijakokaappi: vähintään 630 A	1 800	0.38	675
0.4 kV jonovarokekytkin: enintään 160 A	300	0.64	192
0.4 kV jonovarokekytkin: 250–400 A	450	0.02	7
Yhteensä			**27924**

Liite 3. Muuntajien kustannus EV:n yksikköhinnoilla

Komponentti	EV:n yksikköhinta [€]	Tiheys [kpl/km]	Kilometrikohtainen hinta [€/km]
Muuntaja 30 kVA	3 600	0.43	1537.9
Muuntaja 50 kVA	3 700	0.23	856.2
Muuntaja 100 kVA	4 500	0.06	280.4
Muuntaja 200 kVA	6 100	0.02	108.6
Kolmikäämimuuntaja 20 / 1.0 /0.4 kV	10 500	0.15	1588.7
Yhteensä			**4371.7**