

## Kaustisen keskijänniteverkon tavoiteverkkosuunnitelma

Eeva-Maria Heininen

Tekniikan koulutusalan opinnäytetyö  
Sähkövoimatekniikka  
Insinööri (AMK)

KEMI 2013

## TIIVISTELMÄ

## KEMI-TORNION AMMATTIKORKEAKOULU, Tekniikka

Koulutusohjelma:	Sähkötekniikka
Opinnäytetyön tekijä:	Eeva-Maria Heininen
Opinnäytetyön nimi:	Kaustisen keskijänniteverkon tavoiteverkkosuunnitelma
Sivuja (joista liitesivuja):	64 (7)
Päiväys:	22.5.2013
Opinnäytetyön ohjaaja:	Ins. Martimo Antero
<p>Toimeksiannon opinnäytetyöhön antoi Verkko Korpela Oy. Tavoitteena oli tehdä Kaustisen kunnan alueelle keskijänniteverkon maakaapelointisuunnitelma, jota Verkko Korpela voisi hyödyntää muissakin osissaan jakeluverkkoaan. Suunnitelmasa oli tarkoituksena tarkastaa, että tekniset reunaehdot toteutuvat ja arvioida myös investointikustannukset.</p> <p>Työn teoriaosassa käytiin läpi, miksi jakeluverkkoyhtiöiden on parannettava sähkön toimitusvarmuuttaan. Sähkön merkitys jokapäiväisessä elämässämme kasvaa koko ajan. Viime vuosien rajut myrskyt aiheuttivat monille kuluttajille jopa useita päiviä kestäviä keskeytyksiä sähkönjakelussa. Aihetta lähestyttiin selvittämällä olennaisilta osilta sähkönjakeluverkkojen rakennetta Suomessa. Perehdyttiin aiheen kannalta olennaisiin viranomaisten vaatimuksiin kuten sähkömarkkinalakiin sekä työ- ja elinkeinoministeriön ja Energiamarkkinaviraston rooleihin sähkönjakelun toimitusvarmuuden parantamisessa. Lisäksi selvitettiin, millaisia vaihtoehtoja sähkön toimitusvarmuuden parantamiseksi on ja mitkä ovat niiden hyvät ja huonot puolet.</p> <p>Työn aineistona käytettiin useita virallisia raportteja sähkönjakeluverkkojen keskeytyksistä, sähköalan standardeja, sähkötekniikan oppikirjoja ja opintojaksojen kurssimateriaaleja. Monet työssä käytetyistä lähteistä ovat internetissä kaikkien saatavilla. Lisäksi työssä hyödynnettiin toimeksiantajan osaamista, materiaaleja ja muita hyödyllisiä resursseja.</p> <p>Työn huomattavimpina tuloksina olivat keskijänniteverkon malli, jota Verkko Korpela voi käyttää muilla samankaltaisilla asemakaava-alueilla kuten Kaustinen, sekä kustannusarviolaskenta Excel-tiedostossa, joka on myös helposti hyödynnettävissä. Tultiin myös siihen tulokseen, että tämänkaltainen kaapelointisuunnitelma on mahdollista toteuttaa teknisten reunaehto- jen puitteissa.</p>	
Asiasanat: sähkönjakelu, sähkökatkot, kaapelointi.	

## ABSTRACT

KEMI-TORNIO UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, Technology

Degree programme:	Electrical Engineering
Author:	Eeva-Maria Heininen
Thesis title:	Medium Voltage Network Plan in Kaustinen
Pages (of which appendixes):	64 (7)
Date:	22 May 2013
Thesis instructor:	Antero Martimo, Engineer
<p>The applicant of this final project was Verkko Korpela Oy. The purpose was to make a plan for underground cables of the medium voltage network in Kaustinen. The plan was meant to be useful when Verkko Korpela wants to make the same kind of plans for other parts of its network. It was important to check that the plan will fulfill technical conditions. One of the goals was also to estimate the investment.</p> <p>The theoretical part of the thesis was about why the electrical companies have to improve reliability of the electricity distribution networks. The importance of electricity is huge in our lives. In recent years, storms have caused consumers an interruption in electricity supply for even several days. The first thing to do was to explore the structure of the electricity distribution networks in Finland. In the project were studied authorities' demands for reliability of the electricity distribution networks. Legislation, Ministry of Employment and the Economy and Energy Market Authority have their requirements. Additionally, it was examined what the ways to improve reliability are and what the benefits and disadvantages of the different options are.</p> <p>The material used in the project consisted of official reports of interruptions in electricity distribution networks, electrical standards, electrical engineering textbooks and course materials. Many of the sources are available on the internet. Know-how, materials and other useful resources of the applicant were also used.</p> <p>Significant results were a medium voltage network model, which Verkko Korpela can use in other similar city plan areas as Kaustinen, and an investment cost calculation excel file, which is also easily accessible. Conclusion was that it is possible to carry out this type of cabling within technical conditions.</p>	
<p>Keywords: electricity supply, blackouts, cabling.</p>	

## SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ .....	2
ABSTRACT .....	3
SISÄLLYS .....	4
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET .....	6
1 JOHDANTO .....	7
2 SÄHKÖJAKELUVERKOT .....	10
3 SÄHKÖVERKKOJEN TOIMITUSVARMUUS .....	12
3.1 Keskeytysten aiheuttajat .....	12
3.2 Viranomaisten vaatimukset .....	14
3.2.1 Sähkömarkkinalaki .....	14
3.2.2 Työ- ja elinkeinoministeriö .....	14
3.2.3 Energiamarkkinavirasto .....	16
3.3 Keinoja toimitusvarmuuden parantamiseen .....	16
4 SÄHKÖJAKELUVERKKOJEN LASKENTA KESKIJÄNNITEVERKOSSA..	19
4.1 Kaapeleiden valinta .....	19
4.2 Oikosulkulaskenta .....	19
4.3 Oikosulkukestoisuus.....	21
4.4 Maasulkulaskenta .....	23
4.4.1 Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku .....	23
4.4.2 Kompensoidun verkon yksivaiheinen maasulku.....	25
4.4.3 Kaksoismaasulku .....	27
4.4.4 Maasulun aikaisia ilmiöitä .....	27
4.5 Jännitteenalenema .....	29
5 SUUNNITTELUKOHTEENA OLEVA VERKKO.....	31
5.1 Verkon nykytila ja kaapeloitavien alueiden rajaus.....	31
5.2 Suunnitelma.....	33
5.2.1 Sähköaseman lähdöt.....	36
5.2.2 Jakelumuuntamot .....	39
5.2.3 Suunnitelman toteutuksen aikataulu .....	40
5.3 Oikosulkulaskenta .....	42
5.4 Oikosulkukestoisuus.....	47
5.5 Maasulkuvirran kasvu .....	49

5.6	Jännitteenalennalaskenta .....	49
5.6.1	Hanhikosken lähtö.....	49
5.6.2	Vetelin lähtö .....	51
5.7	Investointikustannukset .....	52
	POHDINTA .....	54
	LÄHTEET .....	56
	LIITTEET .....	57

## KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

AJK	aikajälleenkytkentä
EMV	Energiamarkkinavirasto
JM	jakelumuuntamo
PJK	pikajälleenkytkentä
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö

## 1 JOHDANTO

Sähköllä on suuri merkitys Suomessa. Hyvin monet teollisuuden ja kotitalouksien laitteista tarvitsevat sähköä toimiakseen. Sähköä tarvitaan muun muassa lämmitykseen, valaistukseen ja sähkömoottoreihin. Sähkömoottorit mahdollistavat esimerkiksi astianpesukoneiden, pyykinpesukoneiden, kylmälaitteiden ja pölynimureiden toiminnan. Pienikin katkos sähkönjakelussa voi aiheuttaa teollisuudelle mittavat tappiot. Sähkön puuttuminen häiritsisi jokapäiväistä elämäämme.

Viime vuosina Suomen yli on liikkunut harvinaisen voimakkaita myrskyjä. Kesällä 2010 Asta-, Veera-, Lahja- ja Sylvi-myrskyt aiheuttivat suurta tuhoa tullen eri ilmansuunnista ja näin aiheuttaen liian suuren rasituksen johtoja ympäröiviin metsiin ja kaa-  
taen puita linjojen päälle. Vuoden 2011 lopulla Hannu- ja Tapani-myrskyt aiheuttivat kahden päivän aikana paljon mittavampia vahingot kuin kesän 2010 myrskyt yhteensä. Jotkut verkkoyhtiöt joutuivat molempien myrskyjen kohteeksi. Lukuisat ihmiset olivat ilman sähköjä jopa useita päiviä.

Nämä myrskyt ovat saaneet viranomaiset sekä siirto-, jakelu- ja alueverkkojen haltijat pohtimaan, kuinka näitä pitkiä keskeytyksiä voitaisiin ennaltaehkäistä ja vähentää. Sähkön toimitusvarmuuden lisäämiseen on olemassa monia hyviä vaihtoehtoja.

Tässä opinnäytetyössä selvitetään, mitkä ovat suurimmat sähkönjakelun keskeytysten aiheuttajat, mitä sähkön toimitusvarmuus oikeastaan tarkoittaa ja mitä viranomaisilla tästä kaikesta on sanottavana. Vilkaistaan myös pikaisesti keinoja, joilla sähkön toimitusvarmuutta voidaan parantaa. Yksi vaihtoehtoista on maakaapelointi, joka on kallis, mutta tehokas tapa poistaa sääolosuhteista aiheutuvat katkokset sähkönjakelussa.

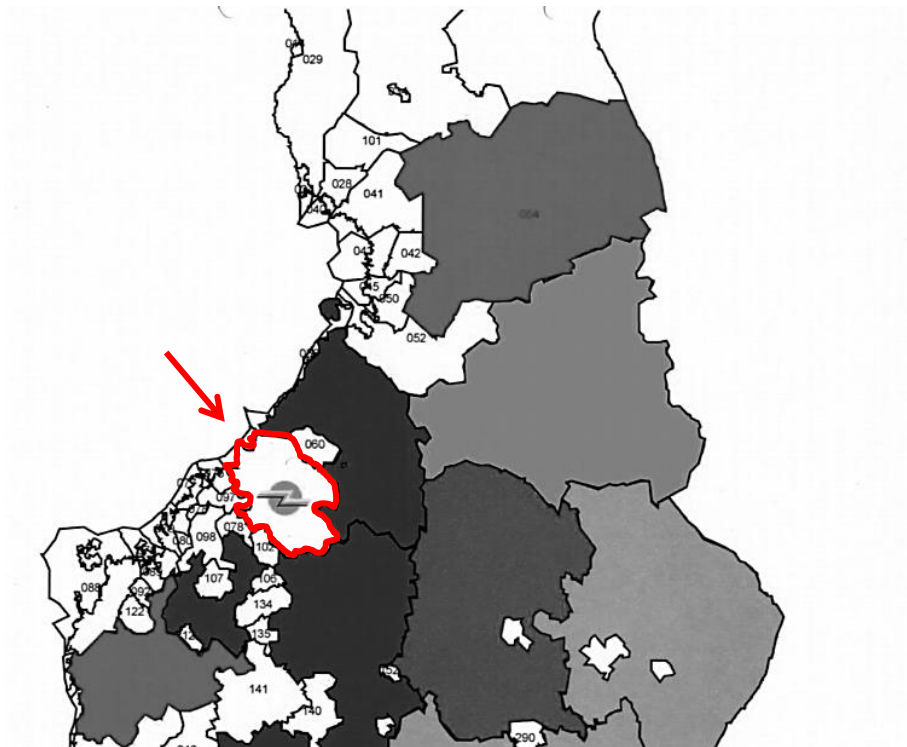
Verkko Korpela Oy on päättänyt panostaa maakaapelointiin. Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä keskijänniteverkon maakaapelointisuunnitelma Kaustisen kunnan alueelle. Tämä suunnitelma tulee toimimaan pohjana, jolla kaapelointisuunnitelma voidaan tehdä myös muihin osiin Verkko Korpelan jakelualueita. Suunnitelmassa selvitettiin myös, että tekniset reunaehdot toteutuvat ja arvioitiin investointikustannukset vuositasolla. Tavoitteena oli tehdä investointisuunnitelmista Excel-laskenta, jonka avulla kustannukset on helppo laskea myös muihin osiin verkkoa.

Työssä keskitytään perustellusti vain keskijänniteverkkoon. Työ- ja elinkeinoministeriön ehdotus toimenpiteistä sähkönjakelun toimitusvarmuuden parantamiseksi ja sähkökatkojen vaikutusten lievittämiseksi antoi aikataulun suunnitelman toteutukselle ja lopullisen varmistuksen työn aiheen ajankohtaisuudesta.

### Verkko Korpela Oy

Verkko Korpela Oy on Korpelan Voima kuntayhtymäkonsernin tytäryhtiö ja harjoittaa sähkön siirtotoimintaa. Konserni on 94-vuotias, ja sen pääkonttori sijaitsee Keski-Pohjanmaalla Kannuksessa. Vuonna 2011 konsernin liikevaihto oli 30,3 miljoonaa ja henkilöstön määrä 52. (Verkko Korpela Oy 2013.)

Verkko Korpela Oy:n jakelualue ulottuu Keski-Pohjanmaan ja Pohjois-Pohjanmaan alueille. Alue on suuruudeltaan 5 000 m<sup>2</sup> ja asiakkaita on lähes 20 000. Alueeseen kuuluvat Kannus, Sievi, Toholampi, Lestijärvi, Kaustinen, Halsua, Ullava (Kokkola), Kälvä (Kokkola), Lohtaja (Kokkola), Himanka (Kalajoki) ja Rautio (Kalajoki). Verkko Korpelan jakelualueen sijainti on ympyröity Suomen kartalta kuvassa 1. (Verkko Korpela Oy 2013.)



Kuva 1. Verkko Korpelan jakelualueen sijainti Suomen kartalla (Verkko Korpela Oy 2013.)



Verkko Korpelan jakeluverkossa on kahdeksan 110/20 kV:n sähköasemaa ja kolme 20 kV:n kytkinasemaa. Keskijännitejohtojen kokonaispituus on yhteensä noin 1 600 km, joista ilmajohtoja on 96 % ja loput 4 % maakaapelia. 20/0,4 kV:n jakelumuuntajia on noin 1450, joista huomattavan suuri osa on pylväsmuuntamoita. Keskijännitejohdoista vain noin 6 % sijaitsee taajamien alueella ja loput 94 % taajamien ulkopuolella, metsissä, pelloilla ja teiden varsilla. (Verkko Korpela Oy 2013.)

## 2 SÄHKONJAKELUVERKOT

Sähkönjakeluverkkojen tehtävänä on siirtää tuotettu sähkö käyttäjille mahdollisimman laadukkaasti, mutta myös taloudellisesti. Koko Suomen laajuinen sähkönjakeluverkko koostuu useista komponenteista ja johdoista ja sen kokonaishankinta-arvo on noin 12 miljardia euroa. Verkko voidaan jakaa alueverkkoihin (110 ja 45 kV), keskijänniteverkkoihin (20 kV) ja pienjänniteverkkoihin (0,4 kV). (Lakervi & Partanen 2008, 11.)

Sähkönjakeluverkko voidaan rakentaa säteittäiseksi tai rengasmaiseksi. Säteittäisverkkoa käytetään enemmän. Säteittäisverkon hyviä puolia ovat muun muassa helpompi häiriöiden rajoittaminen, pienemmät oikosulkuvirrat sekä yksinkertaisempi suojaus. Rengasverkossa puolestaan jännitteenalenema ja energiahäviöt ovat pienemmät. Keski-jänniteverkko rakennetaan etenkin taajamissa usein rengasmaiseksi, mutta sitä käytetään normaalitilanteessa säteittäisenä. Tällöin varayhteys on kuitenkin helposti käytettävissä mahdollisissa vikatilanteissa. Haja-asutusalueilla rengasverkon rakentaminen ja ylläpitäminen tulisi kalliimmaksi kuin siitä saatava hyöty keskeytyskustannuksissa. (Lakervi & Partanen 2008, 13.)

Jakeluverkkojen ominaisuudet vaikuttavat suoraan sähkön laatuun, käyttövarmuuteen sekä sähkön siirron hintaan. Pienasiakkaan sähkön hinnasta yli 30 % muodostuu sähkön siirrosta. Jakeluverkkoyhtiöillä on alueellinen monopoli, joten verkkoa on tärkeä kehittää ja käyttää tehokkaasti, että sähkön kokonaishinta pysyy kurissa. Koska sähköverkot ovat lähellä meitä ja asuinympäristöjämme, on huolehdittava myös riittävästä sähköturvallisuudesta, jolle on asetettu tarkat vaatimukset. Näiden teknisten ja taloudellisten vaatimusten toteutumista valvovat sähkömarkkinaviranomaiset, joista lisää myöhemmin. (Lakervi & Partanen 2008, 17-18.)

### Jakelumuuntamot

Suomessa jakelumuuntamoissa muunnetaan jännite 20 kV:n tasosta 400 V:n tasoon. Taajamissa sijaitsevat muuntamot ovat usein kalliimpia kuin haja-asutusalueilla sijaitsevat, koska niiltä vaaditaan suurempaa tehoa ja ympäristöä on huomioitava enemmän. Pylväs- ja puistomuuntamot ovat yleisimmin käytettyjä muuntamotyyppisiä. Pylväs-muuntamoita käytetään tyypillisesti maaseudun ilmajohtoverkoissa ja ne sopivat vain enintään 315 kVA:n muuntajille. Puistomuuntamoita on puolestaan käytössä enimmäk-

seen taajamissa ja ne ovat usein keskijännitekaapelirenkaan osana. Maakaapeliverkoissa käytössä on myös niin sanottuja satelliittimuuntamoita, joita syötetään säteittäisjohdoilla. Ne ovat pienikokoisia ja niitä käytetään etenkin, kun tiheän rakennetun alueen kulu- tus kasvaa. (Lakervi & Partanen 2008, 157-158.)

Jakelumuuntamo rakentuu keskijännitekiskosta, yhdestä tai useammasta muuntajasta, pienjännitelähdöistä sekä mahdollisesti myös apujännitejärjestelmästä. Suomessa jokai- nen pienjännitelähtö suojataan sulakkeilla. Jakelumuuntamoita rakennetaan muun mu- assa, kun saneerataan vanhaa verkkoa tai sähköistetään uusia alueita. (Lakervi & Parta- nen 2008, 157.)

### 3 SÄHKÖVERKKOJEN TOIMITUSVARMUUS

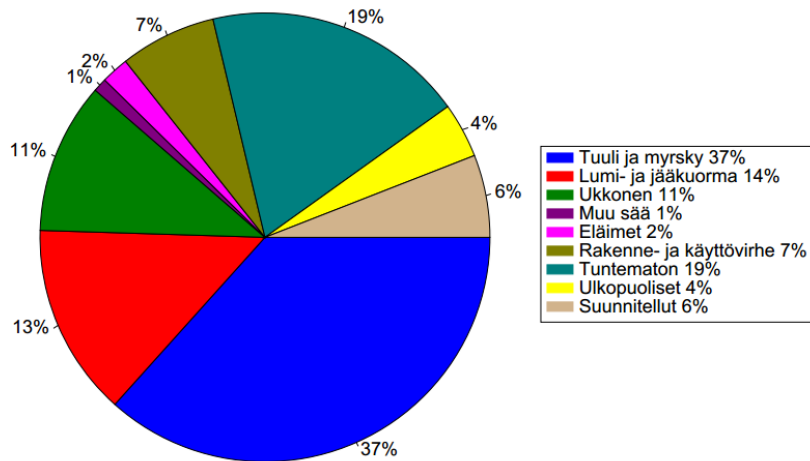
Sähköverkkojen toimitusvarmuus tarkoittaa sitä, kuinka häiriöttömästi sähkön siirto verkossa voidaan toteuttaa (Energiamarkkinavirasto 2012, hakupäivä 9.4.2013). 90 % asiakkaiden kokemista sähkönjakelun keskeytyksistä aiheutuu keskijänniteverkon vioista, joten keskijänniteverkolla on suuri vaikutus verkon käyttövarmuuteen (Lakervi & Partanen 2008, 125).

#### 3.1 Keskeytysten aiheuttajat

Keskeytys voi olla häiriökeskeytys tai etukäteen suunniteltu korjaus- tai rakennustöiden takia. Häiriökeskeytykset aiheutuvat yleisimmin tuulesta ja myrskystä, lumi- ja jääkuormista, rakenne- ja käyttövirheistä, ukkosesta sekä eläimistä. Työkeskeytyksistä ilmoitetaan yleensä asiakkaalle etukäteen. Keskeytykset jaetaan myös pitkiin ja lyhyisiin keskeytyksiin. Keskeytys on lyhyt jos se on kestoltaan alle kolme minuuttia. Pitkän keskeytyksen aiheuttaa yleensä jokin pysyvä vika ja lyhyen keskeytyksen puolestaan ohimenevä vika, joka poistuu jälleenkytkennällä. (ABB Oy 2000.)

Sähkönjakelun keskeytyksistä jopa puolet on puiden aiheuttamia. Myrskyissä täysikasvuiset puut kaatuvat sähkölinjojen päälle ja lumikuormat ja kova tuuli painavat nuoria hoitamattomia metsiä linjojen päälle. Näiltä ongelmilta välttyttäisiin parantamalla johtoalueiden reunusmetsien hoitoa. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2012, hakupäivä 23.3.2012.)

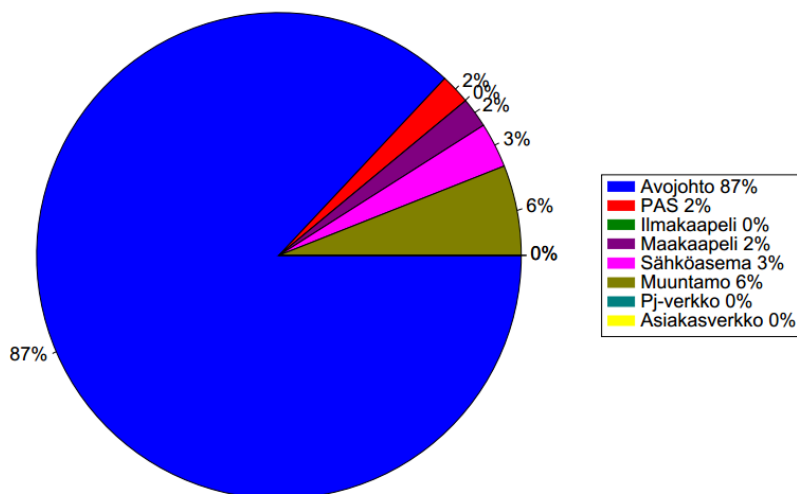
Vuonna 2011 sähkönjakelun keskeytyksistä asiakkaalle yhteensä jopa 63 % aiheutui luonnonilmiöistä, mikä nähdään kuvasta 1. Kuvassa ei ole mukana jälleenkytkentöjä. PJK selvitti kaikista vioista 57 %, AJK 19 % ja pitkien keskeytysten määrä oli 24 %. Noin viidennes keskeytysten aiheuttajista jää tuntemattomiksi. Työkeskeytyksiä vuonna 2011 oli 6 %. (Energiateollisuus ry 2012, hakupäivä 9.4.2013.)



Kuva 2. Keskeytysmäärien osuudet aiheuttajittain (Energiateollisuus ry 2012, hakupäivä 9.4.2013.)

Vuodesta 2011 on otettava huomioon, että joulun välipäivinä peräkkäisinä päivinä Hannu- ja Tapani-myrskyt tekivät tuhoa laajoilla alueilla. Keskeytysaikoja pahensi myrskyjen ajankohta talvella ja että monet verkkoyhtiöt joutuivat molempien myrskyjen uhreiksi. Myrskyjen vuoksi vuoden 2011 tilastot toimitusvarmuudesta ovat poikkeukselliset. (Energiamarkkinavirasto 2012, hakupäivä 9.4.2013.)

Keskijänniteverkon pituuksista yli 80 % on avojohtoverkkoja ja metsässä avojohdoista on 52 %. Kuvasta 2 nähdään, että vuonna 2011 87 % keskeytyksistä tapahtui avojohtoverkoissa. Maakaapeliverkossa tapahtui vain 2 % keskeytyksistä. (Energiateollisuus ry 2012, hakupäivä 9.4.2013.)



Kuva 3. Keskeytysmäärän jakauma vian sijainnin perusteella (Energiateollisuus ry 2012, hakupäivä 9.4.2013.)

## 3.2 Viranomaisten vaatimukset

### 3.2.1 Sähkömarkkinalaki

Sähkömarkkinalaki tuli voimaan vuonna 1995. Sähkömarkkinalain (386/1995) tarkoituksena on varmistaa, että voidaan turvata riittävän hyvälaatuinen ja kohtuuhintainen sähkön saanti. Siinä on siis myös paljon sähkön toimitusvarmuuteen liittyviä säännöksiä.

Sähkömarkkinalain mukaan verkonhaltijalla on verkon kehittämisvelvollisuus. Siitä mainitaan sähkömarkkinalain 3. luvussa 9 §:ssä seuraavasti:

*”Verkonhaltijan tulee ylläpitää, käyttää ja kehittää sähköverkkoaan sekä yhteyksiä toisiin verkkoihin asiakkaiden kohtuullisten tarpeiden mukaisesti ja turvata osaltaan riittävän hyvän sähkön saanti asiakkaille (verkon kehittämisvelvollisuus).”*

Sähkömarkkinalaissa on myös määritelty, milloin sähköntoimitus on virheellinen. Siitä kerrotaan luvun 6 a kohdassa 27 c §. Sähköntoimitus on virheellinen, jos sähkön laatu tai toimitustapa poikkeavat sovitusta. Lain mukaan sähköntoimitus on virheellinen myös, jos se ei vastaa laadultaan Suomessa käytettäviä standardeja tai jos sähköntoimitus keskeytyy useasti tai keskeytys kestää kohtuuttoman kauan.

### 3.2.2 Työ- ja elinkeinoministeriö

Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM) on Suomessa vastuussa yrittäjyyden ja innovaatio-toiminnan toimintaympäristöstä, työmarkkinoiden toimivuudesta, työntekijöiden työllistymiskyvystä ja alueiden kehittymisestä. Sen toimialaan kuuluu muiden ohessa energia-politiikka ja sitä kautta myös sähkön toimitusvarmuuden parantaminen. (Työ- ja elinkeinoministeriön nettisivut, hakupäivä 12.5.2012)

TEM on tehnyt ehdotuksen toimenpiteistä sähkönjakelun toimitusvarmuuden parantamiseksi ja sähkökatkojen vaikutusten lievittämiseksi. Siinä ehdotetaan muutoksia sekä sähkömarkkinalakiin että maantielakiin. Muutokset sähkömarkkinalakiin aiotaan sisällyttää hallituksen esitykseen, joka tullaan antamaan eduskunnalle kesällä 2012. Muutos-ehdotus maantielakiin valmistellaan vuoden 2012 loppuun mennessä. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2012, hakupäivä 23.3.2012.)

TEM ehdottaa sähköjakelun toimitusvarmuuden tason nostamista ehkäisemään sähkökatkojen aiheuttamia haittoja. Tavoitteena on, että asemakaava-alueella asiakkaalle ei saisi aiheutua yli kuuden tunnin keskeytystä sähköjakelussa myrskyn tai lumikuorman vuoksi ja muualla kuin asemakaava-alueella ei yli 24 tunnin keskeytystä. Tavoite saavutettaisiin portaittain. Vuoden 2019 loppuun mennessä tavoitteen pitäisi toteutua 50 %:lla asiakkaista, 2023 loppuun mennessä 75 %:lla asiakkaista ja vuoden 2027 loppuun mennessä 100 %:lla asiakkaista. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2012, hakupäivä 23.3.2012.)

Verkonhaltija saisi päättää itse, kuinka aikoo työ- ja elinkeinoministeriön ehdotuksen mukaiset vaatimukset saavuttaa. Käytännössä tavoitteen saavuttaminen tarkoittaa maakaapelointiasteen nostamista paljon nykyiseen verrattuna. Kaapelointi on kuitenkin kallista, ja sen vuoksi halutaankin helpottaa kaapeleiden sijoittamista maanteiden varsille, koska sen on arvioitu olevan jopa 30 % halvempaa kuin muualle sijoittaminen. Maantielakia (503/2005) tai maankäyttö- ja rakennuslakia (132/1999) halutaan muuttaa siten, että maantiealue olisi paikka, johon sähköverkoilla olisi oikeus sijoittaa sähkökaapeleita. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2012, hakupäivä 23.3.2012.)

Ehdotuksessa TEM tuo esille myös maaseudun keskijännitteisten ilmajohtojen reunusmetsien hoidon tehostamisen. Sähkömarkkinalakiin ehdotetaan muutosta, jossa jakeluverkonhaltijalle annettaisiin oikeus sähkötoimitusvarmuuden turvaamiseksi tehdä toimenpiteitä sähköjohtojen reunusmetsissä. Metsänomistaja saisi puustosta täyden korvauksen, ja toimenpiteet rajoitettaisiin vain selvän riskin aiheuttaviin puihin. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2012, hakupäivä 23.3.2012.)

Ehdotuksen mukaan jakeluverkkojen tulisi laatia kehittämissuunnitelma, jossa kerrotaan, kuinka toimitusvarmuudelle asetetut vaatimukset aiotaan saavuttaa. Kehittämissuunnitelma tulisi päivittää kahden vuoden välein. Suunnitelman toteutumista valvoisi Energiamarkkinavirasto. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2012, hakupäivä 23.3.2012.)

Myös Energiateollisuus ry on antanut oman suosituksensa sähkön toimitusvarmuudesta. Siinä määritellään suositeltavat jakeluverkon toimitusvarmuuden tavoitetasot vuonna 2030. Tämä Energiateollisuuden suositus työ- ja elinkeinoministeriön ehdotus tukevat toisiaan (Työ- ja elinkeinoministeriö 2012, hakupäivä 23.3.2012). Suosituksen mukainen tavoitetaso kokonaiskeskeytysajalle kaupunkikeskustoissa on enintään yksi tunti

vuodessa, taajamissa enintään kolme tuntia vuodessa ja maaseudulla enintään kuusi tuntia vuodessa. Tavoitteet koskevat ainoastaan häiriökeskeytyksiä. Suositus sallii yhden poikkeuksen tavoitetasosta kerran kolmessa vuodessa esimerkiksi erityisen vaikean yksittäisen vian tai laajan suurhäiriön vuoksi. (Energiateollisuus ry 2010, hakupäivä 14.4.2012.)

### **3.2.3 Energiamarkkinavirasto**

Energiamarkkinavirasto on työ- ja elinkeinoministeriön alaisuudessa toimiva asiantuntijavirasto. Energiamarkkinavirasto perustettiin sähkömarkkinalain voimaantulon myötä vuonna 1995 nimellä Sähkömarkkinakeskus. Nykyisen nimensä Energiamarkkinavirasto sai vuonna 2000, kun sen tehtäväksi tuli myös maakaasumarkkinoiden valvonta. EMV:n tehtäviin kuuluu muun muassa valvoa sähköverkkotoimintaa, siirtohinnoittelua ja sähkömarkkinalain noudattamista. Se myöntää myös luvat sähköverkkotoimintaan ja kerää sekä julkaisee sähkömarkkinoihin liittyviä tietoja. (Energiamarkkinaviraston www-sivut 2013, hakupäivä 1.5.2013.)

Energiamarkkinavirasto laatii neljän vuoden välein suuntaviivat sähköverkkotoiminnan hinnoittelun kohtuullisuuden valvontamenetelmiksi. Vuoden 2012 alusta alkoi kolmas valvontajakso. Kun valvontajakso päättyy, EMV tarkistaa erikseen jokaisen jakeluyhtiön kohdalta, että sen siirtohinnoittelu on ollut kriteerien mukainen. Jos tuotto ylittää kohtuullisuuden rajat, EMV velvoittaa jakeluyhtiötä laskemaan siirtohintoja seuraavan valvontajakson aikana. (Energiamarkkinaviraston www-sivut 2013, hakupäivä 1.5.2013.)

Energiamarkkinavirasto on kerännyt ja tilastoinut vuodesta 1996 lähtien lukuja, jotka kuvaavat sähköverkkojen toimitusvarmuutta. Tämä koskee verkonhaltijoita, joilla on Energiamarkkinaviraston myöntämä verkkolupa. Vuodesta 2005 lähtien tunnuslukujen joukossa on ollut pitkien keskeytysten lisäksi myös jälleenkytkentöjen luvut. Kerätyt luvut ovat julkisia. (Energiamarkkinaviraston www-sivut 2013, hakupäivä 1.5.2013.)

### **3.3 Keinoja toimitusvarmuuden parantamiseen**

Tehokkain tapa parantaa sähköverkkojen toimitusvarmuutta on korvata ilmajohdot maakaapeleilla. Näin häiriökeskeytykset vähenisivät lähes olemattomiin, kun sääolosuh-



teet tai luonto muuten eivät aiheuttaisi vikoja. Maakaapelointi on kuitenkin myös kalkein tapa ja ei ole paras vaihtoehto joka paikassa. Lisäksi maakaapeleiden vikojen paikantaminen ja korjaaminen on hitaampaa kuin ilmajohtojen. Koska vian korjaus on hidasta, on oltava varayhteyksiä. On otettava myös huomioon, että maakaapelit aiheuttavat suuremmat maasulkuvirrat. (Lakervi & Partanen 2008, 146-147; Energiateollisuus ry:n www-sivut 2013, hakupäivä 1.5.2013.)

Toimitusvarmuutta voidaan lisätä siirtämällä johdot teiden varsille, jolloin niiden korjaaminen vian sattuessa on helpompaa ja keskeytysaika asiakkaalla lyhenee. Suuri osa haja-asutusalueiden johdoista sijaitsee metsässä, jossa ne ovat hyvin alttiita puiden aiheuttamille vioille. Alun perin ilmajohdot on sijoitettu metsiin, jotta muun muassa materiaalikustannukset saatiin mahdollisimman pieniksi johtopituuksia minimoimalla. 1950- ja 1960-luvuilla ei juurikaan välitetty sähkön toimitusvarmuudesta. Näistä puiden aiheuttamista vioista aiheutuvia keskeytyksiä, voitaisiin vähentää tehostamalla johtoalueiden vierusmetsien hoitoa. Hyvä kunnossapito luo perustan toimitusvarmuuden parantamiselle. (Lakervi & Partanen 2008, 143; Energiateollisuus ry:n www-sivut 2013, hakupäivä 1.5.2013.)

Sähköverkkoja voitaisiin parantaa myös rakentamalla verkko rengasmalliin, jolloin olisi aina varasyöttöyhteys. Tällöin verkkoa voitaisiin käyttää normaalitilanteessa säteissäisenä, mutta vian sattuessa varasyöttöyhteys olisi helppo ottaa käyttöön. Käytännössä koko verkon rengastaminen olisi todella kallista, koska etenkin maaseudulla asutus on harvaa ja asiakkaat voivat olla hyvinkin etäällä toisistaan. (Energiateollisuus ry:n www-sivut 2013, hakupäivä 1.5.2013.)

Keskijänniteverkoissa käytetään osittain myös niin sanottuja PAS-johtoja eli päällystettyjä avojohtoja. PAS-johdon investointikustannukset ovat jopa 30 % suuremmat kuin vastaavan avojohdon. Niitä kannattaa käyttää lähinnä sähköasemilta lähtevissä kaksois- ja kolmoisjohdoissa sekä alueilla, joilla sähkön toimitusvarmuus on huono esimerkiksi tykkylumen vuoksi. (Lakervi & Partanen 2008, 145.)

PAS-johtojen eristyksen vuoksi risut ja linnut eivät aiheuta vikaa osuessaan johtoon, ja jos johtimet hetkellisesti koskettavat toisiaan, ei aiheudu läpilyöntiä. Puu voi nojata PAS-johtoon jopa päiviä aiheuttamatta keskeytystä, mutta ajan kuluessa eristysrakente vaurioituu ja aiheutuu pysyvä keskeytys. Ongelma on myös, jos johdolle kaatunut tai

taipunut puu aiheuttaa suuri-impedanssisen maasulun, jota suojauslaitteet eivät välttämättä havaitse. Tämän vuoksi kosketusjännitteet vikapaikan läheisyydessä voivat nousta vaarallisen suuriksi. Jotta PAS-johdolle aiheutuneet vauriot olisi helpompi todeta myrskyn jälkeen, ne sijoitetaankin yleensä teiden varsille. (Lakervi & Partanen 2008, 145.)

Kauko-ohjattavien erotuslaitteiden avulla keskijänniteverkon viat paikallistetaan nopeasti, mutta pienjänniteverkon vioista tietoa tähän asti saatu suoraan asiakkailta. Uusien etäluettavien mittareiden myötä tähän tulee muutos, ja jatkossa jakeluverkkoyhtiöt saavat tiedon pienjänniteverkon keskeytyksestä automaattisesti. Näin keskeytysajat lyhenevät. (Energiateollisuus ry:n www-sivut 2013, hakupäivä 1.5.2013.)

## 4 SÄHKÖNJAKELUVERKKOJEN LASKENTA KESKIJÄNNITEVERKOSSA

### 4.1 Kaapeleiden valinta

Kaapeleiden valinnassa tulisi kiinnittää huomiota paitsi teknisiin niin myös taloudellisiin seikkoihin. Kaapelin toiminta-aikana syntyvien kustannusten nykyarvon tulisi olla mahdollisimman pieni. Niin sanotut suosituimmuskaapelit ovat edullisempia kuin erikoisemmat. Suosituimmuskaapeleilla tarkoitetaan kaapeleita, joiden poikkipinta on yleinen ja niitä on saatavilla valmistajilta jatkuvasti. Usein esimerkiksi jakeluverkkoyhtiöillä on vain muutama tietty kaapelityyppi käytössä, ja niitä pidetään aina tietty määrä varastossa. (ABB Oy 2000.)

Kaapeleiden on täytettävä tietyt tekniset vaatimukset. Jännitteenaleneman tulee pysyä sallituissa rajoissa, termisen ja dynaamisen oikosulkukestoisuuden tulee olla riittävät sekä oikosulkusuojaus täytyy olla mahdollista toteuttaa. On otettava huomioon myös kuormituksen kasvu ja ympäristöolosuhteet mahdollisine muutoksineen. (ABB Oy 2000.)

### 4.2 Oikosulkulaskenta

Oikosulku sattuu, kun jakeluverkon virtapiiri sulkeutuu eristysvian tai ulkoisen kosketuksen vuoksi. Tämä voi tapahtua suoraan, valokaaren tai muun vikaimpedanssin kautta. Vika voi sattua kahden tai kolmen vaihejohtimen välillä tai myös johtimen ja maan välille, jolloin on kyseessä maasulku. Oikosulkuvirta on yleensä suurempi kuin kuormitusvirta. Oikosulut voivat aiheuttaa häiriöitä ja keskeytyksiä sähkönjakeluun. Myös henkilövahingot sekä johtojen ja laitteiden kuumeneminen ovat mahdollisia seurauksia oikosulusta. (Lakervi & Partanen 2008, 28.)

Oikosulkulaskennan tarvitaan, kun määritetään verkon johdinten oikosulkukestoisuutta ja oikosulkusuojauksen asetteluja. Oikosulkuvirtalaskennassa vikavirran vaihekulma ei ole tärkeä, jolloin laskut voidaan tehdä käyttäen itseisarvoja. 20 kV:n verkon oikosulkulaskuissa käytetään johtimien resistanssien arvoja + 40 °C:n lämpötiloissa. Oikosulkuvirta voidaan laskea käyttäen Theveninin menetelmää. Tällöin tarvitaan vikapaikan jännite ja siitä näkyvä verkon impedanssi. (Lakervi & Partanen 2008, 30.)

Seuraavalla kaavalla voidaan laskea keskijänniteverkon kolmivaiheinen oikosulkuvirta.

$$I_{k3} = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z_{kok}}, \quad (1)$$

missä  $c$  on jännitekerroin,  $U$  on laskentajännite (kV) ja  $Z_{kok}$  on kokonaisimpedanssi ( $\Omega$ ).

Kokonaisimpedanssi muodostuu syöttävän verkon, päämuuntajan ja johtojen impedansseista. Syöttävän verkon oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi tulee redusoida keskijänniteportaaseen. Tämä tapahtuu seuraavilla kaavoilla. (Martimo 2010, kurssimateriaali.)

$$R_k = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \cdot R_{k110}, \quad (2)$$

missä  $R_k$  on syöttävän verkon oikosulkuresistanssi keskijänniteverkon tasoon redusoituna ( $\Omega$ ),  $U_1$  on muuntajan ensiöpuolen nimellisjännite (kV),  $U_2$  on muuntajan toisiopuolen nimellisjännite (kV) ja  $R_{k110}$  on syöttävän verkon oikosulkuresistanssi ( $\Omega$ ).

$$X_k = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \cdot X_{k110}, \quad (3)$$

missä  $X_k$  on syöttävän verkon oikosulkureaktanssi keskijänniteverkon tasoon redusoituna ( $\Omega$ ),  $U_1$  on muuntajan ensiöpuolen nimellisjännite (kV),  $U_2$  on muuntajan toisiopuolen nimellisjännite (kV) ja  $X_{k110}$  on syöttävän verkon oikosulkureaktanssi ( $\Omega$ ).

Oikosulkulaskennassa tarvittavat muuntajan oikosulkuresistanssi, -reaktanssi ja -impedanssi voidaan määrittää seuraavilla kaavoilla.

$$Z_M = \frac{z_m}{100\%} \cdot \frac{U_N^2}{S_N}, \quad (4)$$

missä  $Z_M$  on muuntajan oikosulkuimpedanssi ( $\Omega$ ),  $z_k$  on muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi (%),  $U_N$  on muuntajan nimellisjännite (kV) ja  $S_N$  on muuntajan nimellisteho (MVA).

$$R_M = \frac{r_m}{100\%} \cdot \frac{U_N^2}{S_N}, \quad (5)$$

missä  $R_M$  on muuntajan oikosulkuresistanssi ( $\Omega$ ) ja  $r_m$  on muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi (%).

$$X_M = \sqrt{Z_M^2 - R_M^2}, \quad (6)$$

missä  $X_M$  on muuntajan oikosulkureaktanssi

Keskijänniteverkon oikosulkusuojauksen asettelujen määrittämiseksi täytyy laskea minimioikosulkuvirta eli kaksivaiheinen oikosulkuvirta. Jotta suojausrele toimisi vian satuttaessa, on sen asettelun oltava pienempi kuin kaksivaiheinen oikosulkuvirta. (Martimo 2010, kurssimateriaali).

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta saadaan kaavalla:

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3} \quad (7)$$

Laskuissa tarvittava jännitekerroin  $c$  määritellään IEC 60909-0 standardissa. Keskijännitteellä (1 kV – 35 kV) jännitekerroin on maksimioikosulkuvirtaa laskettaessa 1,1 ja minimioikosulkuvirtaa laskettaessa 1,0.

#### 4.3 Oikosulkukestoisuus

Jakeluverkon osana olevien johtimien ja laitteiden on kestävä oikosulun aikaiset dynaamiset ja termiset rasitukset. Laitteiden dynaamisen kestoisuuden määrittämiseksi on laskettava sysäysoikosulkuvirta. Sysäysoikosulkuvirta on oikosulkuvirran hetkellinen huippuarvo. Tämä huippuarvo saavutetaan yleensä 10 ms kuluttua oikosulun syntymis-

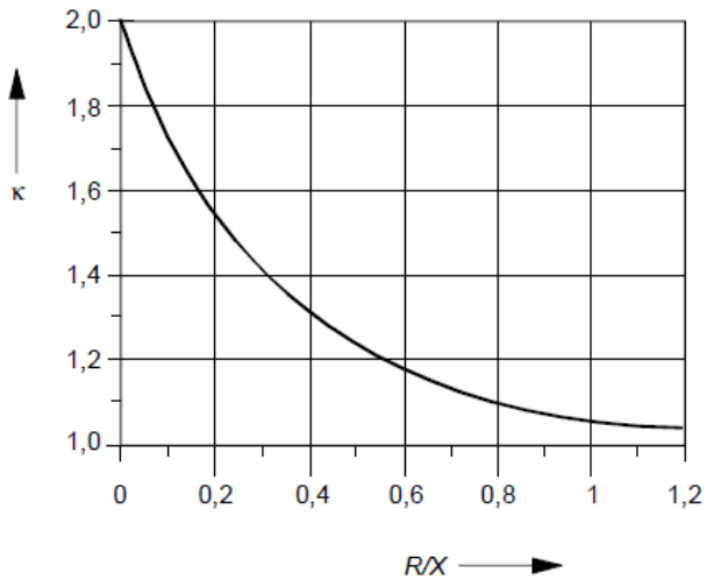
sestä. Sysäysaikosulkuvirta voidaan laskea seuraavalla kaavalla. (Martimo 2010, kurssimateriaali.)

$$i_s = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (8)$$

missä  $\chi$  on sysäyskerroin ja  $I_k''$  on alkuoikosulkuvirta.

Jakeluverkkojen laskennassa, kun ei tarvitse huomioida tahtikoneiden alku- ja muutosreaktansseja ja niiden vaikutusta oikosulkuvirtaan, voidaan alkuoikosulkuvirran arvona käyttää kolmivaiheisen oikosulkuvirran arvoa. Sysäyskerroin saadaan oikosulkupiirin resistanssin ja reaktanssin suhteesta kuvan 4 mukaisesti. Kerroin voidaan laskea myös kaavalla 9. Suurjänniteverkkojen laskennassa sysäyskerroimelle voidaan käyttää arvoa 1,8 riittävän tarkan tuloksen saamiseksi. (Martimo 2010, kurssimateriaali.)

$$\chi = 1,022 + 0,969 \cdot e^{-3,03 \cdot R/X} \quad (9)$$



Kuva 4. Sysäyskerroin riippuvuus resistanssin ja reaktanssin suhteesta (Martimo 2010, kurssimateriaali.)

Johtimien tulee kestää oikosulkuvirran aiheuttamaa lämpenemistä eli termistä oikosulkuvirtaa tietyn ajan verran. Yleensä laskennassa määritetään yhden sekunnin oikosulkestoisuus. Laskennassa on otettava huomioon jälleenkytkennät, koska johdin pääsee

jäähtymään niiden aikana. Tämän vuoksi on laskettava oikosulun ekvivalenttinen kesto-aika, joka saadaan seuraavalla kaavalla.

$$t = t_1 \cdot e^{-\frac{t_0}{\tau}} + t_2, \quad (10)$$

missä  $t_1$  on oikosulun kesto-aika ennen ajk:n jännitteetöntä aikaa,  $t_0$  on ajk:n jännitteetön aika,  $\tau$  on johtimen jäähtymisaikavakio ja  $t_2$  on ajk:n jälkeisen oikosulun kesto-aika.

Oikosulkuvirta, jonka johdin kestää yhden sekunnin ajan, saadaan laskettua seuraavalla kaavalla.

$$I_{kt} = \frac{I_{k1s}}{\sqrt{t}}, \quad (11)$$

missä  $I_{k1s}$  on johtimen yhden sekunnin maksimioikosulkuvirta ja  $t$  on oikosulun ekvivalenttinen kesto-aika.

#### 4.4 Maasulkulaskenta

Maasulku on määritelty standardissa SFS 6001 seuraavasti:

*”Vian aiheuttama johtava yhteys päävirtapiirin vaihejohtimen ja maan tai maadoitetun osan välillä.”*

Kaksi yleisintä Suomessa käytettyä maadoitustapaa ovat maasta erotettu järjestelmä ja sammutettu järjestelmä tai osittain kompensoitu järjestelmä. Alla käydään läpi yksivaiheiset maasulut näissä järjestelmissä.

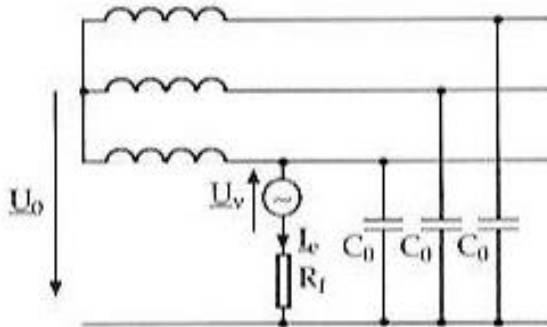
##### 4.4.1 Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku

Kun maasta erotettu verkko on terveessä tilassa, vaihejännitteet maahan nähden ovat symmetriset eli niiden summa on nolla. Maasta erotettu verkko on nimensä mukaisesti erotettu maasta, jolloin sillä ei ole johtavaa yhteyttä maahan muuten kuin jännitemuun-

tajien kautta. Yksivaiheinen maasulku tapahtuu, kun jokin vaihejohtimista joutuu yhteyteen maan kanssa. Tämä voi tapahtua suoraan tai vikaimpedanssin kautta. (Mörsky 1992, 298.)

Maasta erotetun verkon yksivaiheisessa maasulussa viallisen vaiheen jännite ja varausvirta pienenevät. Terveiden vaiheiden jännitteet maata vasten ja varausvirrat puolestaan kasvavat. Varausvirtojen summa ei olekaan enää nolla ja terveiden vaiheiden varausvirrat kulkevat vikapaikan kautta maahan muodostaen maasulkuvirran. (Mörsky 1992, 298-299.)

Kuvasta 5 nähdään, kuinka maasulkuvirralla on reitti terveiden vaiheiden kautta päämuuntajan käämityksiin ja sieltä viallista vaihetta pitkin vikapaikkaan. Samassa kuvassa näkyy myös vikaresistanssi  $R_f$ , joka on viallisen johtimen ja johtavan maan välinen kokonaisresistanssi. Vikaresistanssi vaikuttaa maasulkuvirtaan pienentävästi. (Mörsky 1992, 301.)



Kuva 5. Maasulkuvirran  $I_e$  ja nollajännitteen  $U_0$  muodostuminen yksivaiheisessa maasulussa maasta erotetussa verkossa (Mörsky 1992, 300.)

Maasulkuvirta voidaan laskea seuraavalla kaavalla.

$$I_e = \frac{\sqrt{3}\omega C_0}{\sqrt{1+(3\omega C_0 R_f)^2}} U, \quad (12)$$

missä  $C_0$  on vaiheen maakapasitanssi,  $R_f$  on vikaresistanssi,  $U$  on verkon pääjännite ja  $\omega$  on  $2\pi f$ , jossa  $f$  on taajuus.



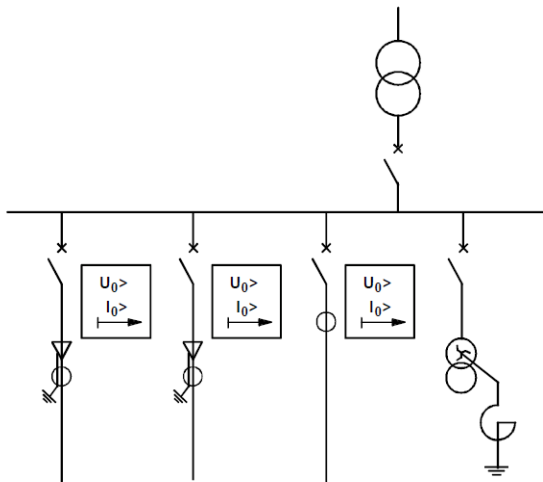
Jos maasulku on vikaresistanssiton, maasulkuvirta voidaan laskea kaavalla:

$$I_e = \sqrt{3}\omega C_0 U, \quad (13)$$

missä  $C_0$  on vaiheen maakapasitanssi,  $U$  on verkon pääjännite ja  $\omega$  on  $2\pi f$ , jossa  $f$  on taajuus.

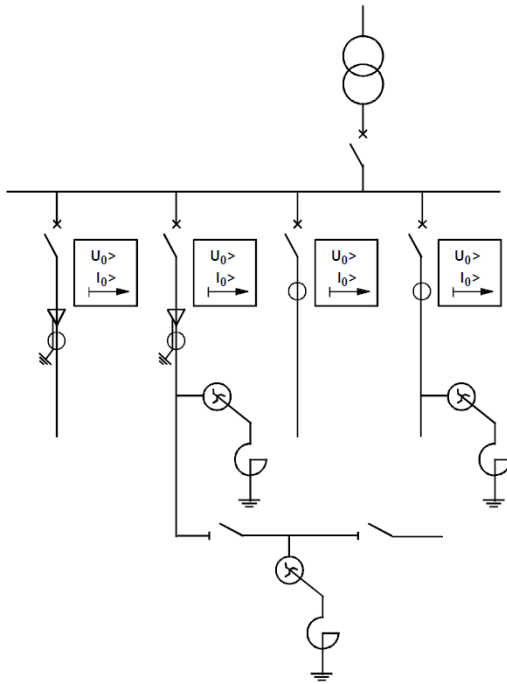
#### 4.4.2 Kompensoidun verkon yksivaiheinen maasulku

Kompensoidussa verkossa maasulkuvirtaa pienennetään kytkemällä kompensointikuristin verkon tähtipisteeseen. Hyvin usein keskijänniteverkoissa joudutaan muodostamaan keinotekoinen tähtipiste, koska muuntajan tähtipiste ei ole käytettävissä. Tällöin kompensointi voidaan toteuttaa keskitetysti tai hajautetusti. Keskitetty kompensointi on taloudellisempi tapa, koska kalliita kuristimia tarvitaan vähemmän. Keskitetyssä kompensoinnissa kompensointikuristin liitetään Z-kytkentäiseen maadoitusmuuntajaan (kuva 6). (ABB Oy 2000.)



Kuva 6. Keskitetty kompensointi (ABB Oy 2000.)

Hajautetussa kompensoinnissa kompensointikuristimia laitetaan tarvittava määrä johtojen varsille (kuva 7). Kuristin mitoitetaan pienentämään kyseessä olevan johdon maasulkuvirtaa. (ABB Oy 2000.)



Kuva 7. Hajautettu kompensointi (ABB Oy 2000.)

Kompensointiaste  $K$  kuvaa kompensoinnin määrää. Kun  $K$ :n arvo on yksi tai hyvin lähellä sitä verkko on täysin kompensoitu. Tällöin puhutaan myös sammutetusta verkosta. Jos  $K$ :n arvo on suurempi kuin yksi, on verkko ylikompensoitu, ja jos arvo on puolestaan pienempi kuin yksi, verkko on alikompensoitu. (ABB Oy 2000.)

$K$ :n arvo voidaan laskea seuraavasta kaavasta:

$$K = \frac{I_L}{I_C}, \quad (14)$$

missä  $I_L$  on kuristimen virta suorassa maasulussa ja  $I_C$  on verkon kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa.

Kun on kyseessä sammutettu verkko, kuristin mitoitetaan siten, että maakapasitanssien kautta kulkeva virta on suunnilleen samansuuruinen kuin kuristimen läpi kulkeva virta. Maasulkuvirta jää pieneksi, koska maakapasitanssien kautta kulkeva virta ja kuristimen kautta kulkeva virta ovat vastakkaisuuntaiset. Vikapaikan läpi kulkee vain niin sanottu jäännösvirta, joka koostuu kuristimen ja verkon häviöistä sekä mahdollisen kuristimen toisiovastuksen aiheuttamasta pätövirrasta sekä yliaalloista. (Lakervi & Partanen 2008, 184-185; ABB Oy 2000.)

Osittain kompensoidussa verkossa maasulkuvirta saadaan seuraavasta kaavasta.

$$I_e = \frac{\sqrt{1+R_0^2\left(3\omega C_0-\frac{1}{\omega L}\right)^2}}{\sqrt{(R_f+R_0)^2+R_f^2R_0^2\left(3\omega C_0-\frac{1}{\omega L}\right)^2}} \frac{U}{\sqrt{3}}, \quad (15)$$

missä  $\omega L$  on kompensointikuristimen reaktanssi,  $R_0$  on kompensointikuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteeseen redusoitu kokonaisresistanssi ja  $R_f$  on vikaresistanssi.

Jos on kyseessä sammutettu verkko, kaava sievenee muotoon:

$$I_e = \frac{1}{R_f+R_0} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

#### 4.4.3 Kaksoismaasulku

Kun kahdessa eri vaiheessa tapahtuu maasulku samaan aikaan, on kyseessä kaksoismaasulku. Maasulkupaikat voivat olla aivan eri kohdissa verkkoa. Vikavirta voi olla hyvin suuri, jopa oikosulkuvirran suuruusluokkaa ja kulkee osan matkasta maan kautta. Se aiheuttaa suuria vahinkoja kaapeleiden vaipoissa kulkiessaan etenkin huonosti johtavassa maaperässä kuten kalliomaastossa. (Lakervi & Partanen 2008, 198.)

Kaksoismaasulkutilanne lähtee hyvin usein liikkeelle yksivaiheisesta maasulusta. Koska maasulku aiheuttaa jännitteen nousun terveissä vaiheissa, viallinen ylijännitesuoja voi toimia virheellisesti ja aiheuttaa kaksoismaasulun. Kaksoismaasulkujen ja niiden aiheuttamien haittojen ehkäisyyn auttavat nopea maasulkusuojaus ja ylijännitesuojien hyvä kunto. (Lakervi & Partanen 2008, 198.)

#### 4.4.4 Maasulun aikaisia ilmiöitä

20 kV:n avojohtojen synnyttämä maasulkuvirta on noin 0,067 A/km. Maakaapeleiden aiheuttama maasulkuvirta on huomattavasti suurempi, kaapelityypistä riippuen 2,7–4 A/km. Kaapeleiden maasulkulaskentaa tehdessä tulisi käyttää aina kaapelivalmistajien

tarkkoja arvoja maakapasitansseista, joihin vaikuttaa suuresti kaapelin rakenne. (Lakervi & Partanen 2008, 186.)

Maasulkuvirta aiheuttaa maasulkupaikassa maadoitusjännitteen, joka puolestaan aiheuttaa kosketusjännitteen, joka voi olla ihmisen tai eläimen kosketeltavissa. Sallitut kosketusjännitteet määritellään standardissa SFS 6001 (taulukko 1). Kosketusjännitteet ovat riippuvaisia vian kestoajasta. (Lakervi & Partanen 2008, 187–188.)

Maadoitusjännite voidaan laskea seuraavalla kaavalla.

$$U_m = I_e R_m, \quad (17)$$

missä  $R_m$  on maadoitusresistanssi ( $\Omega$ ).

Maadoitusjännite ei saa ylittää seuraavan kaavan mukaista arvoa.

$$U_m \leq k \cdot U_{TP}, \quad (18)$$

missä  $k$  on vakio ja  $U_{TP}$  on kosketusjännite (V).

Tavoitteena on saada vakion  $k$  arvoksi 2, jolloin myös pienjänniteverkko tulee maadoitetuksi standardin ohjeen mukaisesti. Jos tavoitetta ei voida saavuttaa, käytetään arvoa  $k = 4$ . Silloin ehtona on kuitenkin, että on huonot maadoitusolosuhteet, muuntamolle tehdään potentiaalinhojaus tai jokainen pienjännitejohtohaara maadoitetaan pituudesta riippumatta. Jos koko muuntopiirin alue on esimerkiksi kalliota, soraa tai muuta huonosti johtavaa maaperää, voidaan käyttää arvoa  $k = 5$ . Silloin ehtoina on, että muuntamolle tehdään potentiaalinhojaus, jokaisella liittymällä on maadoitus tai liittymän rakennuksen ympärille tehdään potentiaalinhojaus. (Lakervi & Partanen 2008, 188–189.)

Taulukko 1. Sallittu kosketusjännite vian kestoajan funktiona

<b>Vian kesto aika (s)</b>	0,14	0,20	0,29	0,39	0,49	0,64	0,72	1,1
<b>Sallittu kosketusjännite <math>U_{TP}</math></b>	600	500	400	300	220	150	125	100

Maadoitusjännitteelle asetellut vaatimukset voidaan saavuttaa parantamalla maadoituksia, pienentämällä maasulkuvirtaa tai lyhentämällä maasulkusuojauksen toiminta-aikaa.

Maasulkuvirtaa puolestaan voidaan pienentää jakamalla verkkoa pienempiin osiin tai käyttämällä sammutettua verkkoa. Mitä pienempi maasulkuvirta on, sitä parempi on myös mahdollisuus, että keskijänniteverkossa hyvin yleiset valokaarimaasulut sammuvat itsestään. (Lakervi & Partanen 2008, 189.)

#### 4.5 Jännitteenalenema

Sähkökäyttäjälle toimitetun jännitteen tulee olla tietyn suuruinen. Jos jännite on liian suuri tai pieni, sähkölaitteet eivät välttämättä toimi kuten pitäisi. Laskennassa ollaan kiinnostuneita johdon loppupäässä olevan jännitteen itseisarvosta maksimikuormituksella sekä jännitteenalenemasta. Jännitteenalenema on johdon alku- ja loppupään jännitteiden itseisarvojen erotus. (Lakervi & Partanen 2008, 38.)

Senerin verkostosuosituksessa SA 5:94 on määritelty suositellut jännitealueet ja jännitteenalenemat (taulukko 2). Siitä käy ilmi, että keskijänniteverkon jännitteenaleneman olisi hyvä olla välillä 3-7 %. Keskijänniteverkko kannattaa kuitenkin suunnitella siten, että jännitteenalenema olisi alle 5 %. Joskus näin pienen jännitteenaleneman saavuttaminen vaatii niin suuria investointeja, että se ei ole enää kannattavaa. Joten edellä mainittua arvoa kannattaa käyttää joustavasti tilanteesta riippuen. Jos esimerkiksi pienjänniteverkon jännitteenalenema on hyvin pieni, voi keskijänniteverkon alenema olla jopa 10 %. (ABB Oy 2000.)

Taulukko 2. Suositellut jännitealueet ja jännitteenalenemat (Verkostosuositus SA 5:94, 8.)

Osaverkko	Jännitteen vaihtelualue		Jännitteenalenema
	Minimi	Maksimi	
Keskijänniteverkko alkupää loppupää	20 kV 19 kV	21 kV 21 kV	3-7 %
Muuntamo <sup>1)</sup>	220 V	244 V	2-4 %
Pienjänniterunkoverkko	210 V	244 V	3-7 %
Liittymisjohto <sup>2)</sup>	207 V	244 V	1-5 %
Sähkökäyttäjän sähköasennukset	198 V	244 V	1-4 %

<sup>1)</sup> Jännitetasoa voidaan säätää, jos käytettävissä on väliottokytkin.

<sup>2)</sup> Liittymisjohto kuluttajan liittämiskohtaan saakka

Keskijänniteverkoissa jännitteenalenema voidaan laskea riittävällä tarkkuudella seuraavilla kaavoilla.

$$U_h = IR\cos\varphi + IX\sin\varphi, \quad (19)$$

$$U_{h\%} = 100\% \cdot \frac{U_h}{U} \quad (20)$$

missä  $U_h$  on jännitteenalenema (V),  $U_{h\%}$  on jännitteenalenema %,  $I$  on johtimen virta (A),  $R$  on johtimen resistanssi ( $\Omega$ ),  $X$  on johtimen reaktanssi ( $\Omega$ ),  $\varphi$  on vaihejännitteen ja -virran välinen vaihesiirtokulma ja  $U$  on laskentajännite (V).

Tarkasteltavan johto-osan läpi kulkeva virta voidaan laskea seuraavalla kaavalla.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi}, \quad (21)$$

missä  $P$  on pätöteho (kW),  $U$  on pääjännite (kV) ja  $\cos\varphi$  on jännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma.

## 5 SUUNNITTELUKOHTEENA OLEVA VERKKO

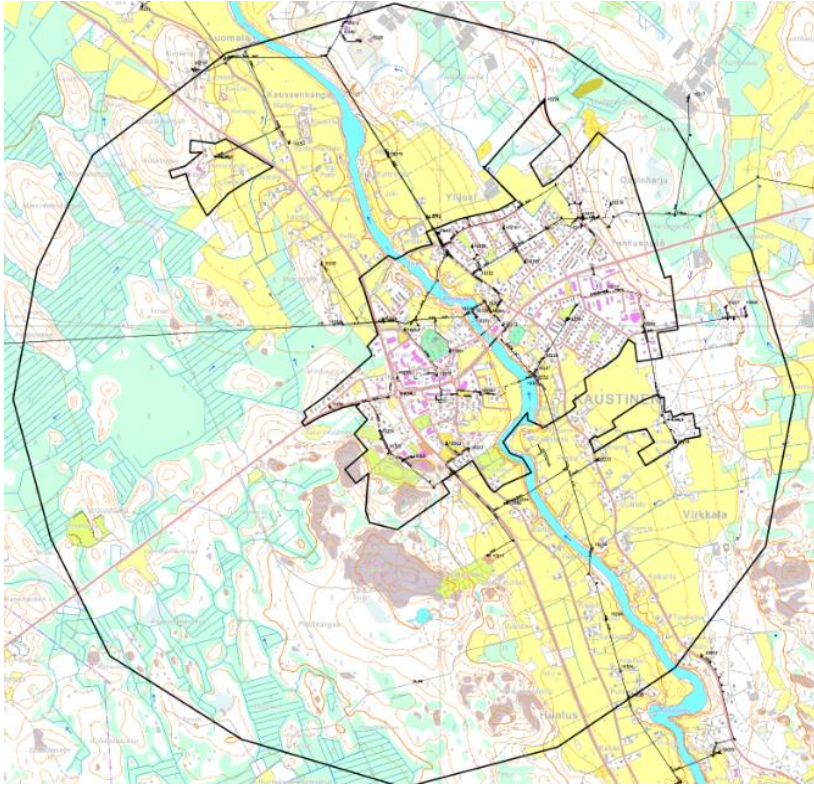
### 5.1 Verkon nykytila ja kaapeloitavien alueiden rajaus

Kaustisella olevalla sähköasemalla on yksi 110/20 kV:n päämuuntaja, joka on teholtaan 16 MVA. Sähköasemalla on yhteensä kahdeksan keskijännitelähtöä, joista kuusi on tällä hetkellä käytössä ja kaksi on varalla. Käytössä olevat lähdöt ovat Hanhikoski, Salonkylä, Kirkonkylä, Veteli, Teerijärvi ja Köyhäjoki. Varalla olevat ovat Kentala ja Kalavesi.

Kaustisella on keskijänniteverkkoa noin 140 km. Suurin osa (95 %) verkosta on ilmajohtoa. Keskustaajamassa on kaapeloitu pieniä pätkiä, mutta yksikään sähköaseman lähdöistä ei ole puhtaasti säävarmaa. Verkkoa käytetään säteittäisenä eikä varayhteyksiä keskustaa lukuun ottamatta juurikaan ole.

Koska Kaustisen alueella on kuluttajia 2 466, joista lähes puolet asemakaava-alueella, ja suurin osa keskijänniteverkosta on haja-asutusalueilla sekä suurin kulutus on taajamassa ja sen ympärillä, oli luonnollista lähteä rajaamaan kaapeloitavia johto-osuuksia lähinnä asemakaava-alueelle ja sen ympärille. Lisäksi TEM:n ehdotus toimitusvarmuuden parantamisesta ja sen tavoitteet edellyttävät käytännössä koko asemakaava-alueella sijaitsevan verkon maakaapelointia.

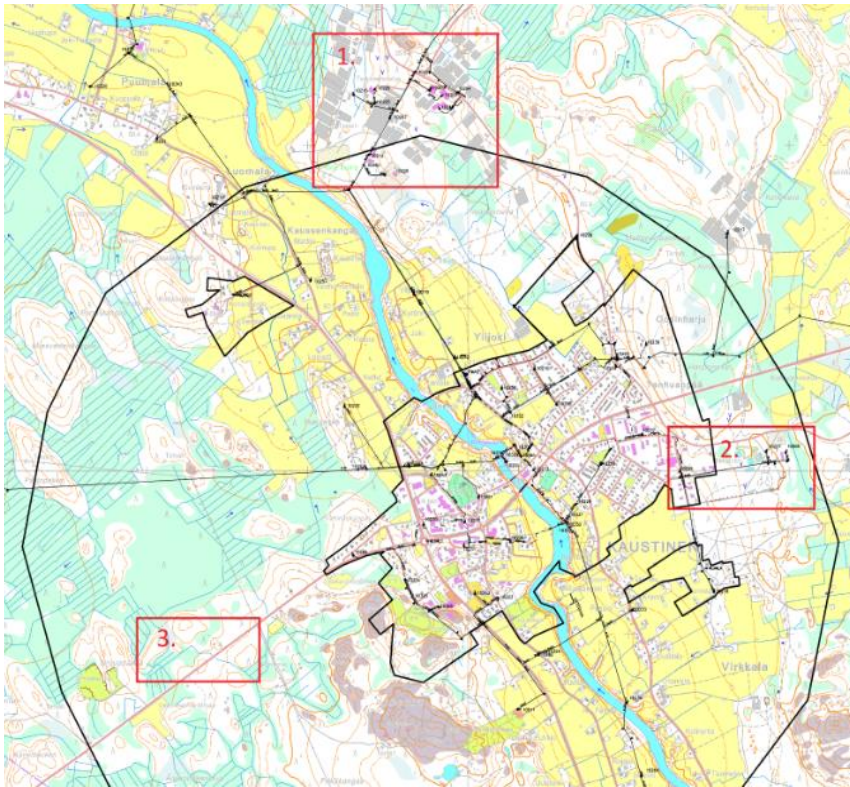
Kaapeloitavan verkon rajaus tehtiin hyvin yksinkertaisesti. Kaustisen keskustasta haettiin piste, jota voitiin pitää asemakaava-alueen keskipisteenä. Sitä käytettiin keskipisteenä, kun asemakaava-alueen ympärille piirrettiin ympyrä kuvan 8 mukaisesti. Ympyrän säde on noin 2,5 km. Ympyrän sisälle jää myös tilaa asemakaavan laajenemiselle. Suunnitelman lähtökohtana pidettiin, että tämän ympyrän sisällä olevat kuluttajat tulevat olemaan säävarman verkon piirissä.



Kuva 8. Kaapeloitavien alueiden rajaus

Kaapeloitavia alueita miettiessä otettiin myös huomioon erityiskohteet kuten tehtaat ja erilaiset teollisuusalueet. Tällaisia erityiskohteita löytyi kolme. Kuvassa 9 on merkitty punaisiin laatikoin ja numeroiden huomioitavat erityiskohteet. Näistä numeroilla 1 ja 2 merkityt ovat olemassa olevia teollisuusalueita, joilla sijaitsee suurikulutuksisia tehtaita. Numerolla 1 merkitty alue on rajatun alueen ulkopuolella, mutta on niin merkittävä kohde, että on otettava huomioon. Lisäksi Kaustiselle ollaan kaavoittamassa uutta teollisuusaluetta ja se on merkitty kuvassa numerolla 3.





Kuva 9. Suunnitelmassa huomioon otettavat erityiskohteet

Kaustinen laajenee koko ajan joen vartta pitkin etenkin Vetelin suuntaan ja on oletettavissa, että verkkoa siellä suunnalla joudutaan laajentamaan ja parantamaan. Tämä haluttiin ottaa myös huomioon tässä suunnitelmassa.

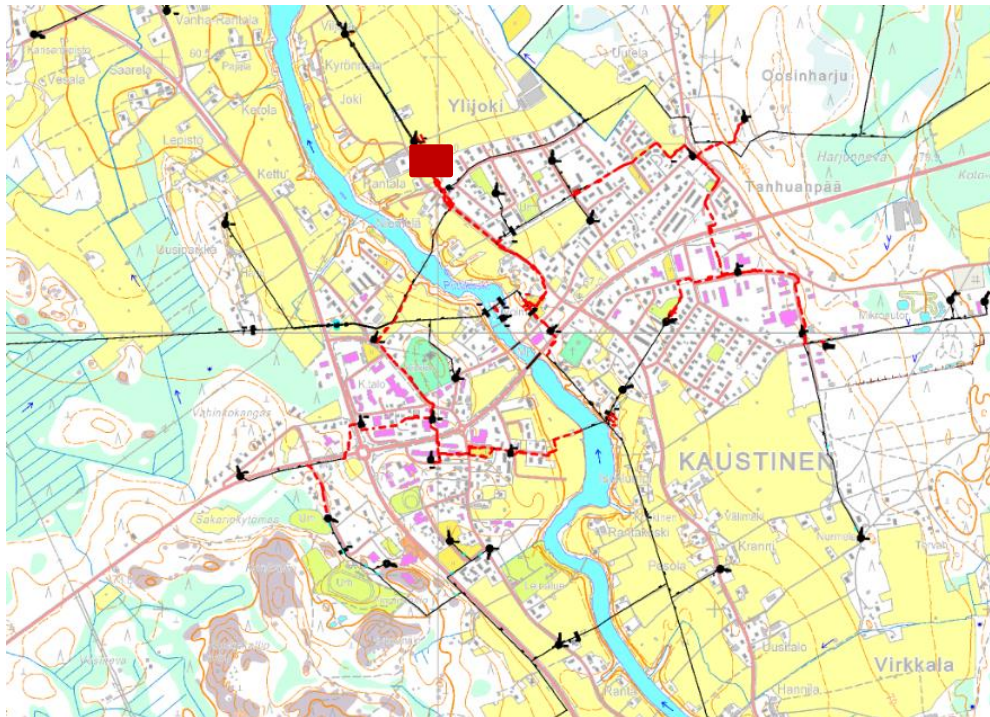
## 5.2 Suunnitelma

Suunnitelma tehtiin Verkko Korpelalla käytössä olevalla Teklan XPower -ohjelmalla. Siellä suunnitelma säilyy hyvin ja on helposti Verkko Korpelan hyödynnettävissä. Kun kaapeloitavien alueiden rajausta oli selvillä, lähdettiin hahmottelemaan verkkoa XPoweriin. Kaustisen alueella on jo jonkin verran kaapeloitu keskijänniteverkkoa asemakaava-alueella. Nämä jo voimassa olevat kaapeloinnit kannatti ehdottomasti hyödyntää ja rakentaa verkkoa niiden mukaan.

Kaapelityypiksi valittiin AHXAMK-W 3x150/35. Suunnitelma tehtiin käyttäen vain tätä yhtä kaapelityyppiä. Kun suunnitelmaa aletaan toteuttaa, voidaan vaihtaa mahdollisuuksien mukaan poikkipinnaltaan pienempään kaapeliin.

Kaapelit pyrittiin sijoittamaan mahdollisuuksien mukaan teiden varsille. Teiden varsille sijoittaminen on helpompaa ja halvempaa, kuin jos verkkoa haluttaisiin rakentaa ihmisten pihoilta. Lupa tien varteen kaivamiseen on helpompi saada ja ihmiset pysyvät tyytyväisinä. Lisäksi viat saadaan korjattua nopeammin, kun kaapelit ovat tien varressa. Kaapelireitit ovat suunnitelmassa vain suuntaa antavia. Kun suunnitelmaa aletaan toteuttaa ja haetaan lupia, voivat reitit hyvinkin muuttua.

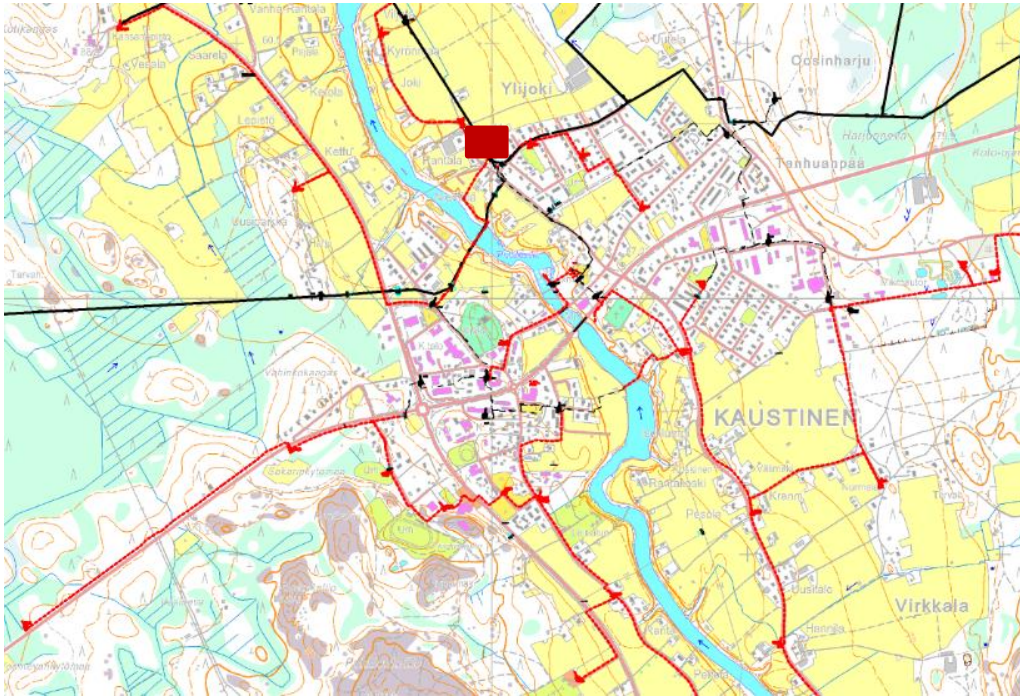
Kuvassa 10 näkyy, millainen keskijänniteverkko on tällä hetkellä Kaustisen keskustassa. Punaisella katkoviivalla merkityt on maakaapelia ja mustalla viivalla merkityt ilmajohtoa. Sähköasema sijainti on merkitty punaisella laatikolla. Kuvasta näkyy, että verkkoa on kaapeloitu pätkiä sieltä täältä, eikä verkkoa voi sanoa säävarmaksi oikeastaan mistään kohtaa.



Kuva 10. Kaustisen keskustan verkko nykytilassaan

Kuvassa 11 näkyy, miten verkkoa kaapeloitaisiin suunnitelman mukaan Kaustisen keskustassa. Mustat katkoviivat ovat verkkoa, joka on jo maakaapeloitu. Punaiset viivat ovat puolestaan suunnitelman mukaan kaapeloitavaa verkkoa. Kuvasta on jo poistettu ilmajohtoverkko, josta tulee suunnitelman myötä tarpeeton. Koko keskusta saadaan säävarmaksi jo muutamalla kaapeloitavalla osuudella, mutta lisäksi on tehty enemmän renkaita, jotta varasyöttöyhteyksiä olisi vian sattuessa.



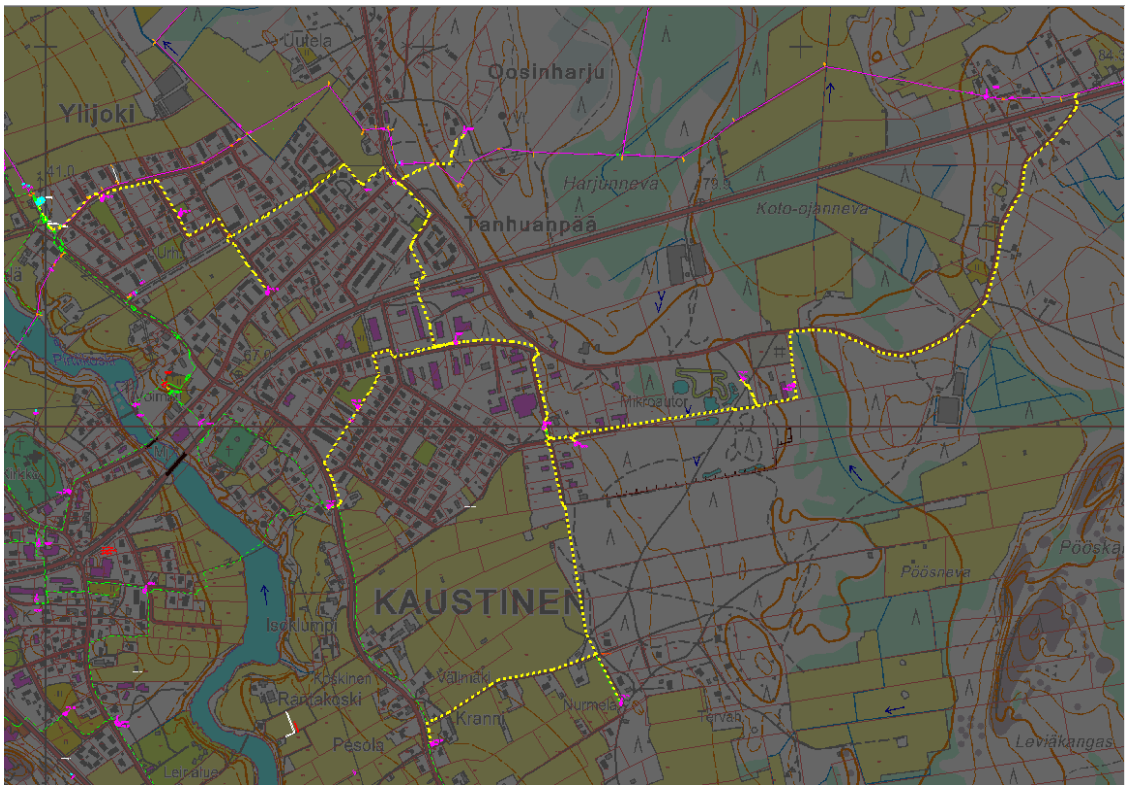


Kuva 11. Kaapeloitavat osuudet Kaustisen keskustassa

Suunnitelman mukaan uutta rakennettavaa verkkoa on yhteensä noin 21,600 km. Poistettavaa ilmajohtoverkkoa on puolestaan yhteensä noin 13,500 km. Ilmajohtoja on voitu vetää hyvinkin suoraviivaisesti lyhintä reittiä, mutta maakaapelireitit menevät teiden varsilla, mikä lisää pituutta.

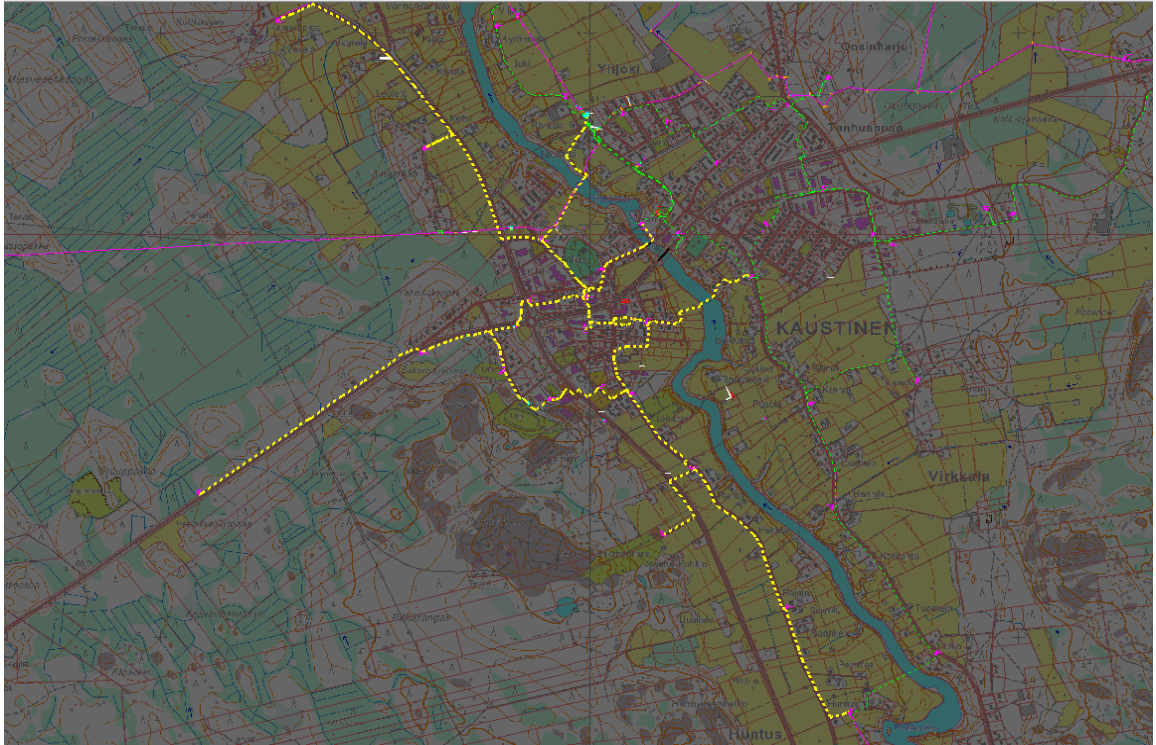
### 5.2.1 Sähköaseman lähdöt

Tämän suunnitelman myötä käyttöön otetaan yksi lähtö lisää. Asemakaava-alueita syöttämään tulee kaksi puhtaasti kaapeloitua lähtöä, Kirkonkylä ja Kentala. Joki jakaa keskustan sopivasti kahtia rajaten myös nämä lähdöt toisistaan. Joen pohjoispuolta syöttää Kirkonkylän lähtö, joka on merkitty kuvaan 12 keltaisella. Kuvan oikeasta reunasta nähdään, että muuten ilmajohtolähtönä pysyvän Köyhäjoen lähtöön rakennetaan varasyöttöyhteys Kirkonkylän lähdön kautta.



Kuva 12. Kirkonkylän lähtö

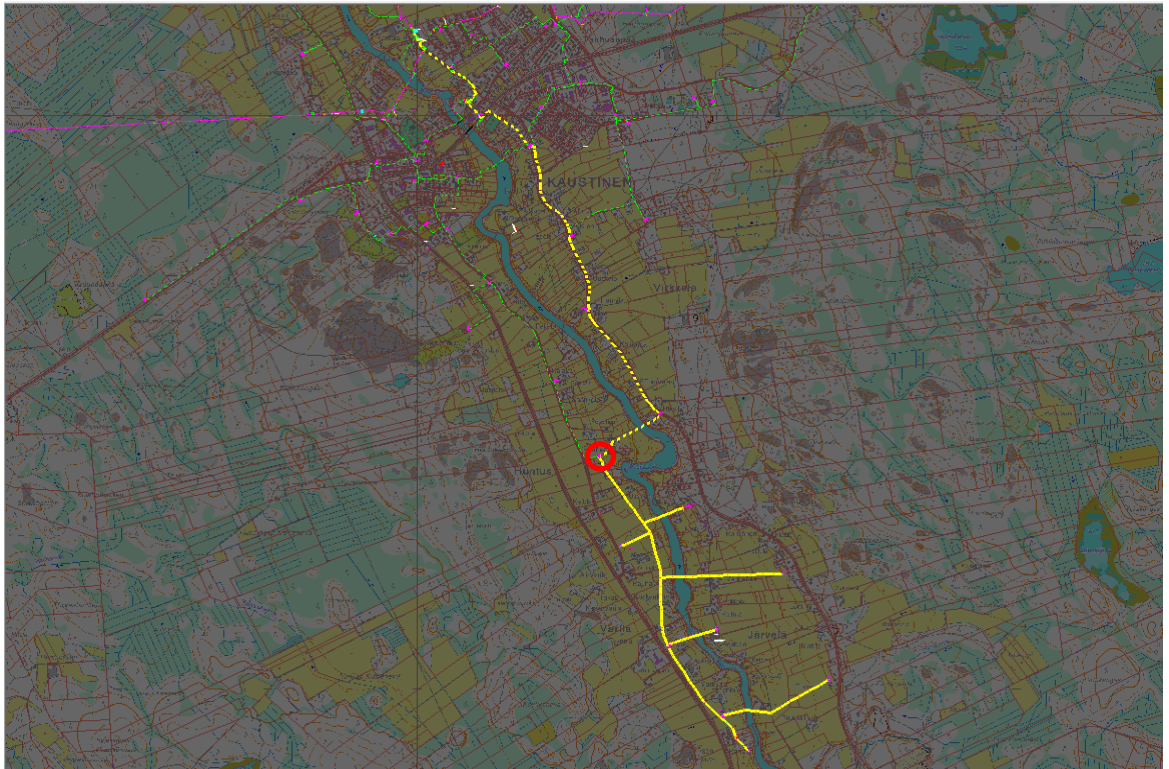
Joen eteläpuolta syöttämään tulee uutena käyttöönottettava Kentalan lähtö. Kuvassa 13 on merkitty keltaisella värillä Kentalan lähtö. Tämän lähdön kautta tullaan syöttämään kuvan 13 yläreunassa näkyvää ja paremmin kuvassa 8 merkittyä pientä asemakaava-alueetta, jota syötettiin aikaisemmin Salonkylänlähdön kautta. Myös uutta teollisuusaluetta, joka on merkitty kuvassa 9 numerolla kolme, tullaan syöttämään tämän lähdön kautta. Kentalan lähtö ulottuu pitkälle Vetelin suuntaan, jossa se lopulta muodostaa renkaan yhdessä Vetelin lähdön kanssa.



Kuva 13. Kentalan lähtö

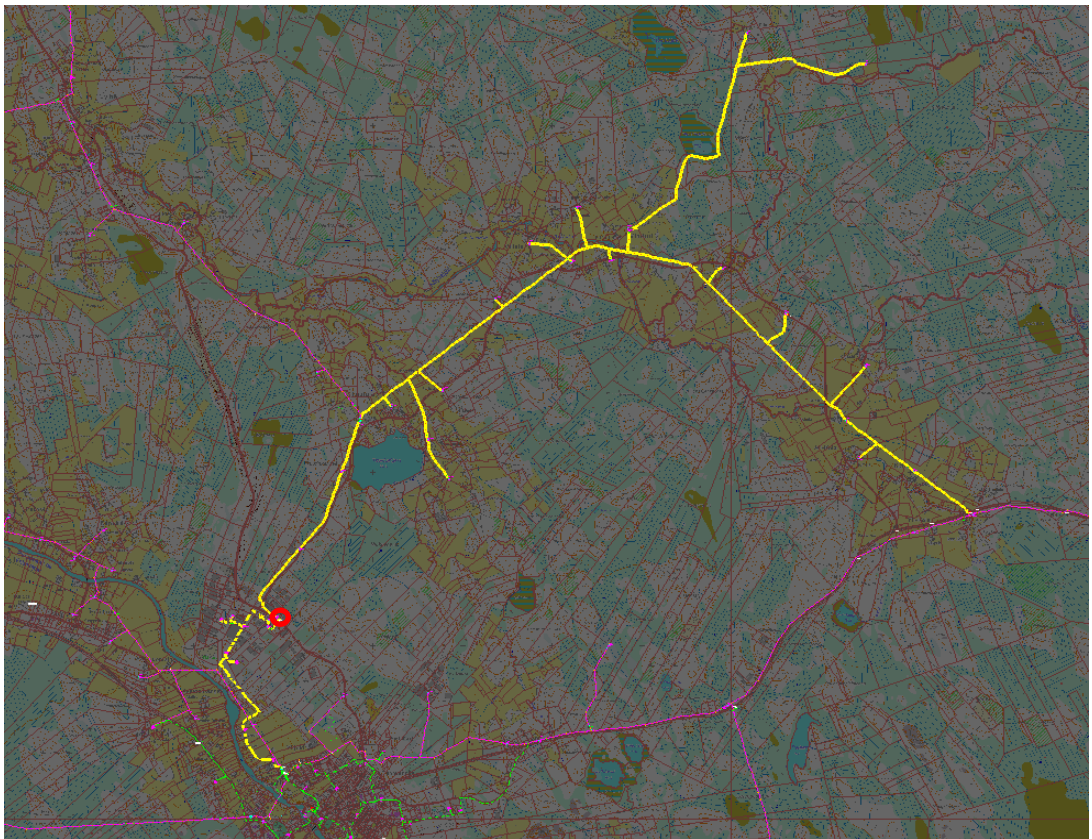


Vetelin lähtö tulee edelleen kulkemaan keskustan läpi joen suuntaisesti nimensä mukaisesti Vetelin suuntaan. Vetelin lähdön reitti näkyy kuvassa 14 keltaisella. Aikaisemmin Vetelin lähtöä käytettiin osittain myös keskustan alueen syöttämiseen, mutta Kentalan lähdön myötä, siitä vapautuu resursseja joen varteen laajenevalle Kaustiselle. Lähtöä kaapeloidaan pitkälle, mutta asutuksen harventuessa se liittyy vanhaan ilmajohtoverkkoon. Tämä liittymiskohta on merkitty kuvaan 14 punaisella ympyrällä.



Kuva 14. Vetelin lähtö

Teerijärven lähtö on toiminut puhtaasti varasyöttöyhteytenä ja siihen ei tehdä mitään muutoksia tässä suunnitelmassa. Salonkylän, Hanhikosken ja Köyhäjoen lähdöt syöttävät lähinnä haja-asutusalueita. Salonkylän ja Köyhäjoen lähdöt pysyvätkin hyvin pitkälti ennallaan. Hanhikosken lähdöllä syötetään muun muassa numerolla 1 kuvassa 9 näkyvää teollisuusaluetta, joka halutaan saada säävarman verkon piiriin. Tästä johtuen verkkoa kaapeloidaan teollisuusalueen läpi, minkä jälkeen se nousee ilmajohtoverkkoon. Kuvassa 15 näkyy keltaisella Hanhikosken lähtö ja punaisella ympyrällä on merkitty kohta, josta se yhdistyy vanhaan ilmajohtoverkkoon.



Kuva 15. Hanhikosken lähtö

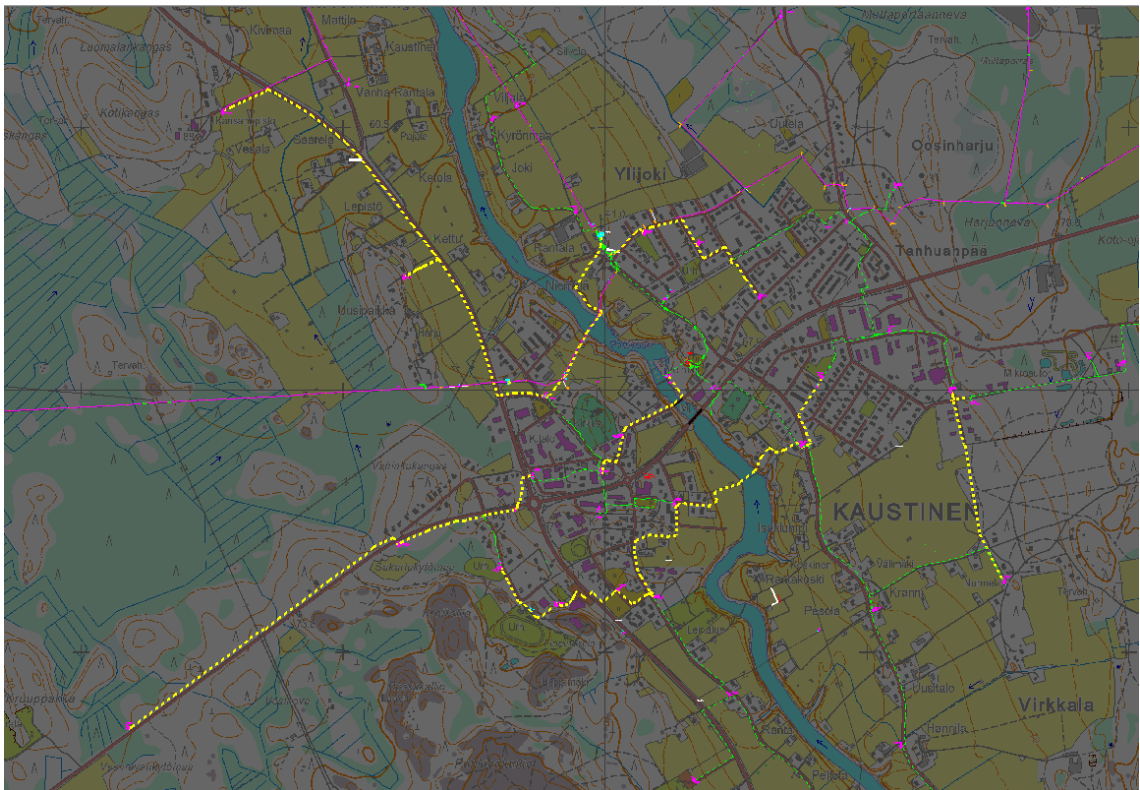
### 5.2.2 Jakelumuuntamot

Suuri osa olemassa olevista muuntamoista Kaustisella on pylväsmuuntamoita. Kun verkkoa kaapeloidaan, nämä pylväsmuuntamot täytyy korvata puisto- ja satelliittimuuntamoilla. Suunnitelman mukaan uusia puistomuuntamoita tullaan rakentamaan 25 ja satelliittimuuntamoita 5. Ainoastaan uudelle teollisuusalueelle tuleva muuntamo on täysin uusi eikä korvaa olemassa olevaa pylväsmuuntamoita.

Muuntamoiden sijoittelussa otettiin huomioon alueet, joille on hyvinkin mahdollista saada lupa rakentaa puistomuuntamo. Hyvin harva tontinomistaja antaisi luvan rakentaa muuntamon omalle tontilleen. Uusien muuntamoiden paikat löytyivätkin aika hyvin läheltä korvattavien pylväsmuuntamoiden sijaintia. Koska tämä on alustava ja suuntaantava suunnitelma, muuntamoiden paikat voivat vielä hyvinkin muuttua, kun rakentamista todenteolla aletaan suunnitella ja lupia haetaan.

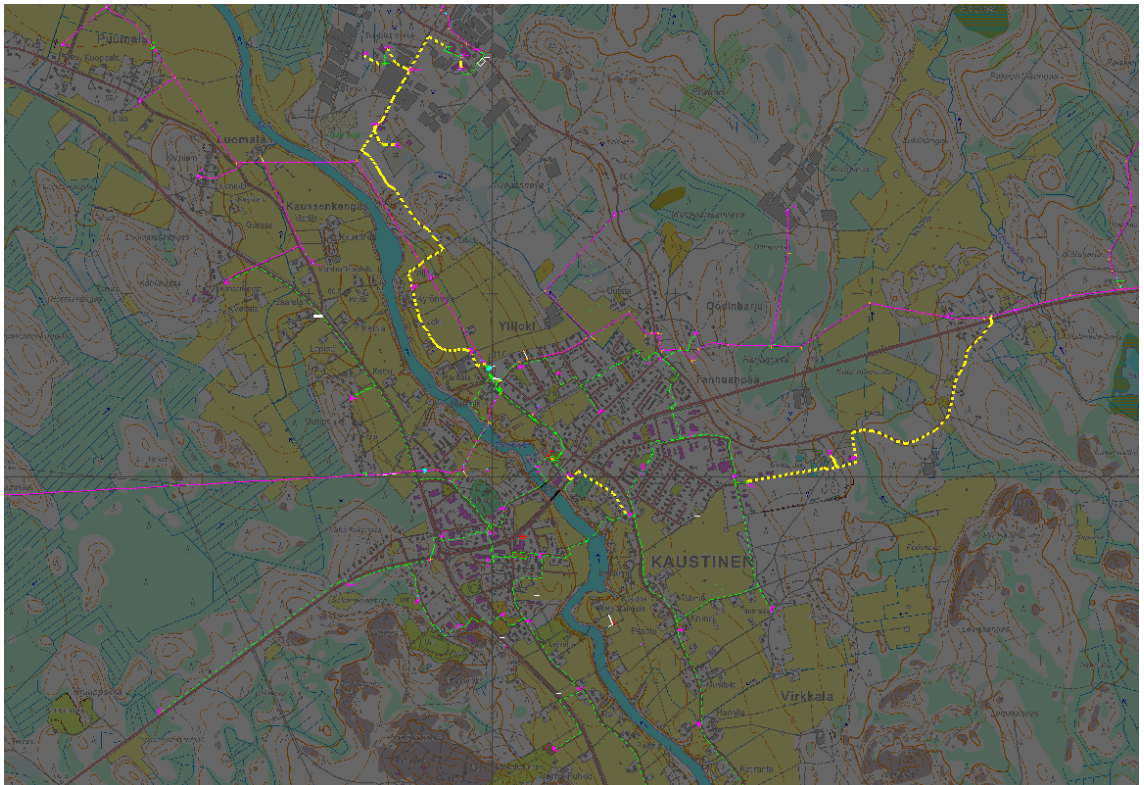
### 5.2.3 Suunnitelman toteutuksen aikataulu

Suunnitelman toteutuksen aikataulutus otettiin TEM:n ehdotuksesta toimenpiteistä sähköjakelun toimitusvarmuuden parantamiseksi ja sähkökatkojen vaikutusten lievittämiseksi. Suunnitelma tullaan siis toteuttamaan vuosina 2013–2027. Vuosina 2013–2019 tullaan toteuttamaan lähinnä asemakaava-alueiden kaapelointia (kuva 16) ja uusia muuntamoita rakennetaan 15 kappaletta. Vuosina 2020–2023 kaapeloidaan Hanhikosken lähtöä ja loput Kirkonkylän lähdöstä (kuva 17) ja muuntamoita rakennetaan kahdeksan. Vuosina 2024–2027 tullaan kaapeloimaan jäljelle jäävät osuudet eli lähinnä Vetelin suuntaan menevää verkkoa (kuva 18) ja muuntamoita rakennetaan seitsemän.

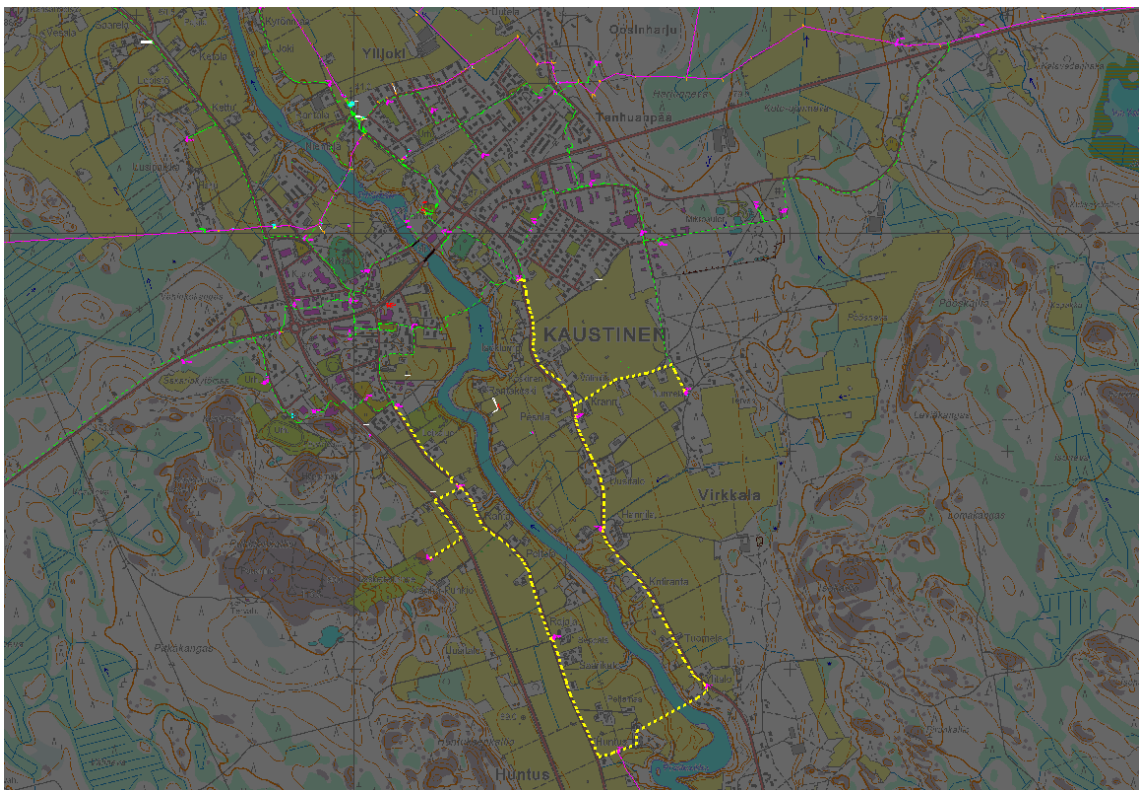


Kuva 16. Vuosina 2013–2019 kaapeloitavat osuudet





Kuva 17. Vuosina 2020-2023 kaapeloitavat osuudet

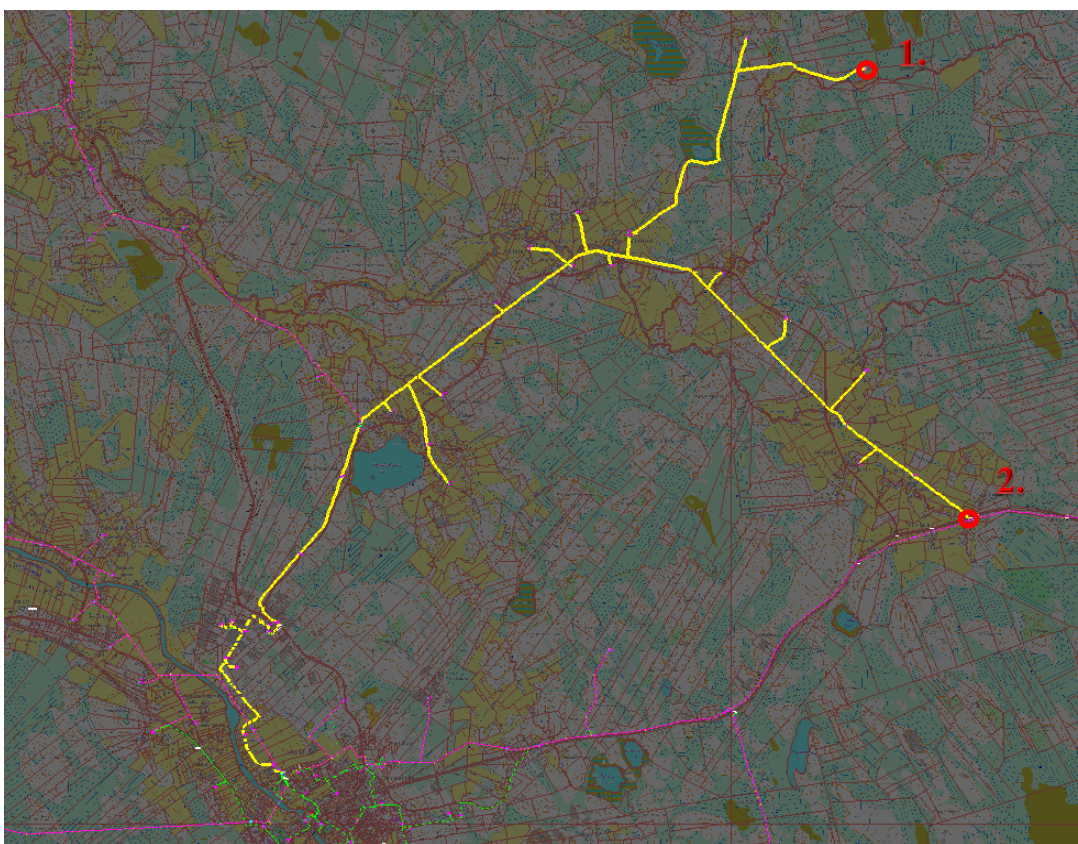


Kuva 18. Vuosina 2024–2027 kaapeloitavat osuudet

### 5.3 Oikosulkulaskenta

Tehdään oikosulkulaskenta Hanhikosken, Kirkonkylän, Kentalan ja Vetelin lähdoille normaalitilanteessa. Esimerkkilaskenta tehdään Hanhikosken lähdon pisteeseen 1 (kuva 19).

Lasketaan kolmivaiheinen ja kaksivaiheinen oikosulkuvirta Hanhikosken lähdössä kahteen kohtaan. Nämä pisteet näkyvät kuvassa 19 ympyröitynä ja merkittynä numeroilla 1. ja 2.



Kuva 19. Pisteet oikosulkulaskennalle Hanhikosken lähdössä

XPowerista saadaan taustaverkon arvot resistanssi  $R_{k110} = 10,4 \Omega$  ja reaktanssi  $X_{k110} = 22,9 \Omega$ . Nämä arvot täytyy redusoida keskijännitepuolelle. Se voidaan tehdä käyttämällä kaavoja 2 ja 3.

$$R_k = \left( \frac{21kV}{110kV} \right)^2 \cdot 10,4\Omega = 0,379\Omega$$

$$X_k = \left( \frac{21kV}{110kV} \right)^2 \cdot 22,9\Omega = 0,835\Omega$$

Päämuuntajalle on ilmoitettu XPowerissa arvot suhteellinen oikosulkuresistanssi  $r_M = 0,56\%$  ja suhteellinen oikosulkuimpedanssi  $z_M = 9,26\%$ . Lasketaan oikosulkuresistanssi, -impedanssi ja -reaktanssi käyttämällä kaavoja 4, 5 ja 6.

$$Z_M = \frac{9,26\%}{100\%} \cdot \frac{(21kV)^2}{16MVA} = 2,552\Omega$$

$$R_M = \frac{0,56\%}{100\%} \cdot \frac{(21kV)^2}{16MVA} = 0,154\Omega$$

$$X_M = \sqrt{(2,552\Omega)^2 - (0,154\Omega)^2} = 2,547\Omega$$

Taulukossa 3 on esitetty johtotyypit ja niiden pituudet sähköasemalta kuvassa 19 näkyvään pisteeseen 1. Taulukossa on myös XPowerista saadut arvot resistanssille ja reaktanssille.

Taulukko 3. Johtotyypit ja pituudet Hanhikosken lähdön 1. pisteelle oikosulkulaskentaa varten

Johtotyyppi	Pituus (km)	Resistanssi ( $\Omega/km$ ) + 40 °C	Reaktanssi ( $\Omega/km$ )
AHXAMK-W 3x70/25	0,12	0,482	0,138
AHXAMK-W 3x95/25	0,24	0,341	0,116
AHXAMK-W 3x150/35	2,68	0,233	0,111
PAS 50	0,32	0,778	0,312
SPARROW	7,46	0,915	0,383
FERSEMAL	1,38	1,68	0,398
AL BLL 3x62	1,53	0,648	0,107

Lasketaan kokonaisresistanssi ja -reaktanssi johtimille käyttäen taulukon 3 arvoja.

$$\begin{aligned} R_{jkok} &= 0,12km \cdot 0,482 \Omega/km + 0,24km \cdot 0,341 \Omega/km + 2,68km \cdot 0,233 \Omega/km \\ &\quad + 0,32km \cdot 0,778 \Omega/km + 7,46km \cdot 0,915 \Omega/km + 1,38km \\ &\quad \cdot 1,68 \Omega/km + 1,53km \cdot 0,648 \Omega/km = 11,15\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_{jkok} &= 0,12km \cdot 0,138 \Omega/km + 0,24km \cdot 0,116 \Omega/km + 2,68km \cdot 0,111 \Omega/km \\
 &\quad + 0,32km \cdot 0,312 \Omega/km + 7,46km \cdot 0,383 \Omega/km + 1,38km \\
 &\quad \cdot 0,398 \Omega/km + 1,53km \cdot 0,107 \Omega/km = 4,01\Omega
 \end{aligned}$$

Seuraavaksi lasketaan kokonaisimpedanssi.

$$Z_{kok} = \sqrt{(0,379\Omega + 0,154\Omega + 11,15\Omega)^2 + (0,835\Omega + 2,547\Omega + 4,01\Omega)^2} = 13,83\Omega$$

Lasketaan kolmivaiheinen maksimioikosulkuvirta Hanhikosken lähdön pisteessä 1 kaavalla 1. Maksimioikosulkuvirtaa laskettaessa jännitekertoimen arvo on 1,1.

$$I_{k3max} = \frac{1,1 \cdot 20,5kV}{\sqrt{3} \cdot 13,83\Omega} = 0,941kA$$

Kaksivaiheisen oikosulkuvirran määrittämiseen tarvitaan kolmivaiheinen minimioikosulkuvirta, joka saadaan kuten edellä, mutta jännitekertoimen arvolla 1,0 ja käytämällä taustaverkon minimioikosulkutehon oikosulkuimpedanssia. Taustaverkon oikosulkuimpedanssin arvoksi minutilanteessa saatiin 41,2  $\Omega$  kantaverkkoyhtiö Fingridiltä. Redusoituna keskijännitetasoon taustaverkon impedanssi on 1,5  $\Omega$ . Nyt saadaan laskettua kaksivaiheisen oikosulkuvirran määrittämiseen tarvittava kokonaisimpedanssi.

$$Z_{kok} = \sqrt{(0,154\Omega + 11,15\Omega)^2 + (2,547\Omega + 4,01\Omega)^2} + 1,5\Omega = 14,57\Omega$$

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta saadaan kaavalla 7.

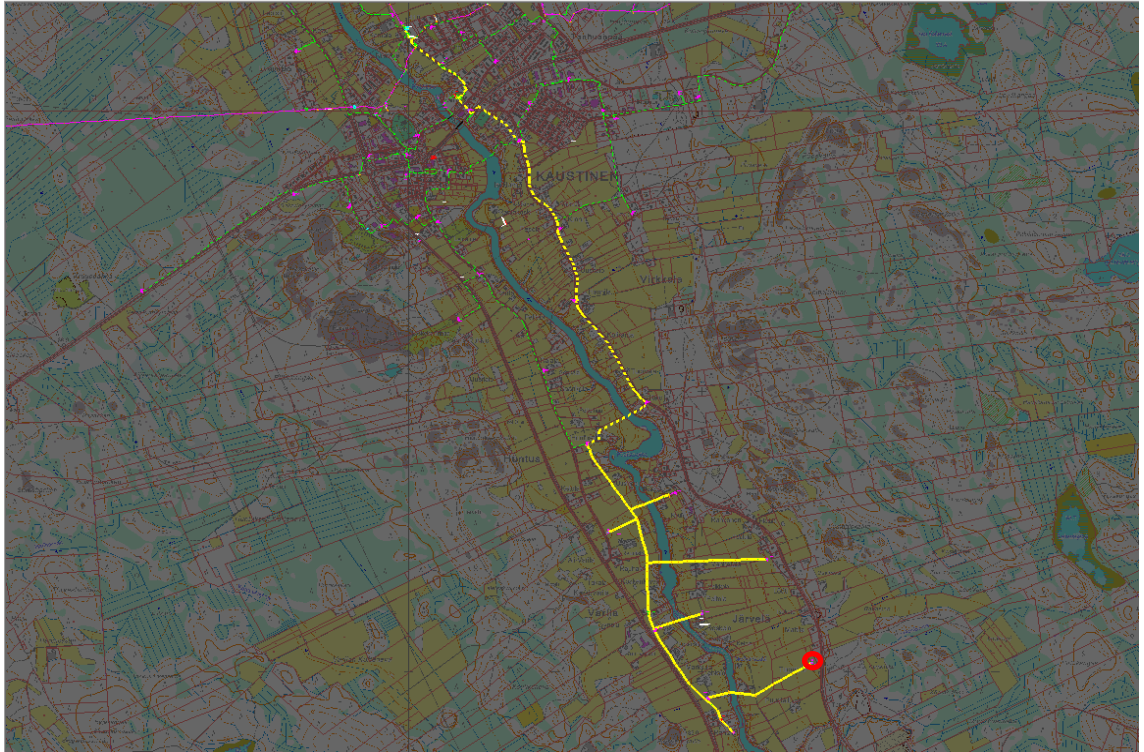
$$I_{k3min} = \frac{1,0 \cdot 20,5kV}{\sqrt{3} \cdot 14,57\Omega} = 0,812kA$$

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 0,812kA = 0,703kA$$

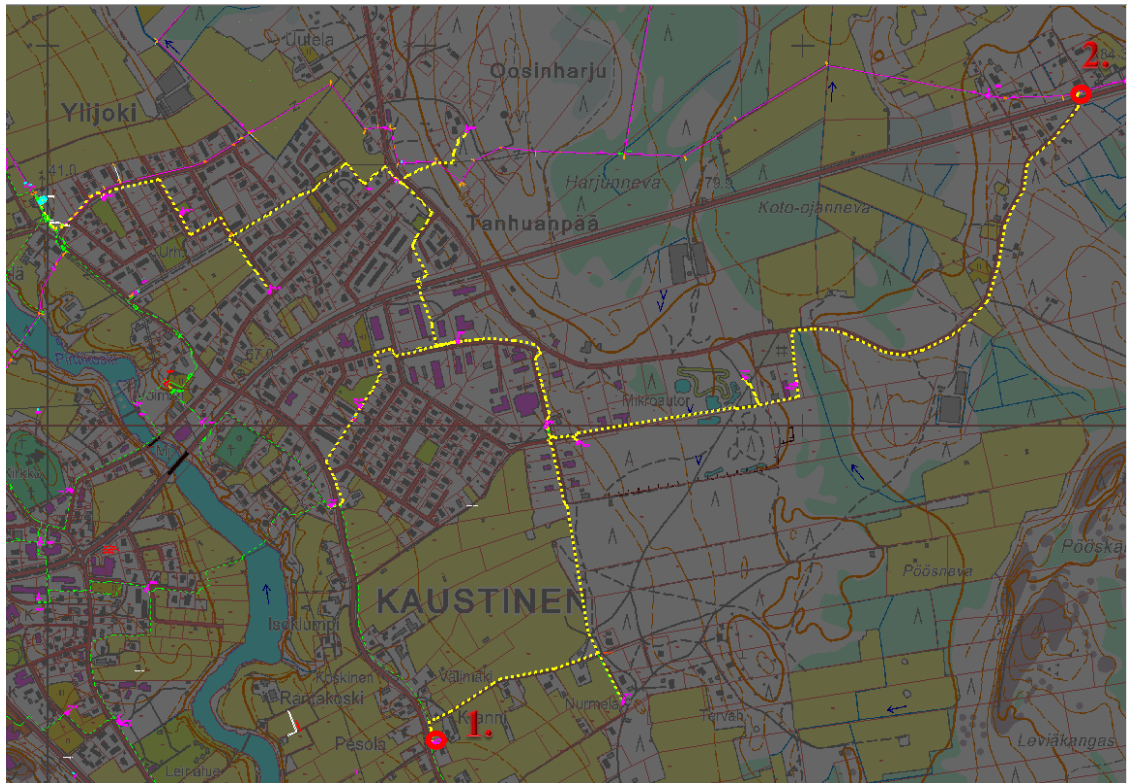
Kun otetaan vielä huomioon Theveninin laskentatarkkuus  $\pm 5\%$ , kaksivaiheisen oikosulkuvirran pienin mahdollinen arvo on 0,668 kA.



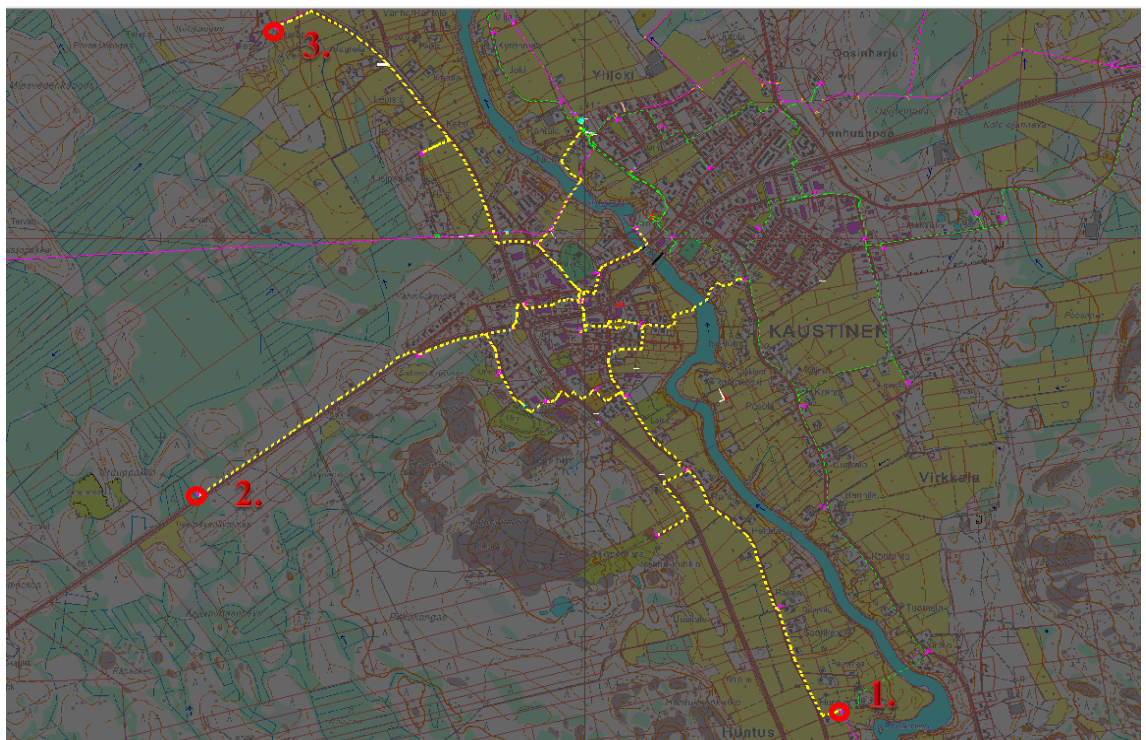
Tehdään sama laskenta Hanhikosken lähdön pisteeseen 2 (kuva 19), Vetelin lähdön kaukaisimpaan pisteeseen (kuva 20), Kirkonkylän lähdön pisteisiin 1 ja 2 (kuva 21) ja Kentalan lähdön pisteisiin 1, 2 ja 3 (kuva 22). Tulokset oikosulkulaskennalle ovat taulukossa 4.



Kuva 20. Vetelin lähdön oikosulkulaskennan piste



Kuva 21. Kirkonkylän lähdön oikosulkulaskennan pisteet



Kuva 22. Kentalan lähdön oikosulkulaskennan pisteet

Taulukko 4. Tulokset oikosulkulaskennalle

Piste	$Z_{\text{kok}} (\Omega)$	$I_{k3\text{max}} (\text{kA})$	$I_{k3\text{min}} (\text{kA})$	$I_{k2} (\text{kA})$
Hanhikosken lähtö piste 1	13,83	0,941	0,812	0,668
Hanhikosken lähtö piste 2	14,19	0,917	0,794	0,653
Vetelin lähtö	5,66	2,300	1,894	1,558
Kirkonkylän lähtö piste 1	4,08	3,191	2,540	2,090
Kirkonkylän lähtö piste 2	4,23	3,078	2,456	2,021
Kentalan lähtö piste 1	4,26	3,056	2,440	2,007
Kentalan lähtö piste 2	4,02	3,239	2,567	2,112
Kentalan lähtö piste 3	3,92	3,321	2,624	2,159

Taulukosta 4 saadaan selville, että Hanhikosken lähdön suojausreleen asettelu pitää olla  $< 0,653 \text{ kA}$ , Vetelin lähdön  $< 1,558 \text{ kA}$ , Kirkonkylän lähdön  $< 2,021 \text{ kA}$  ja Kentalan lähdön  $< 2,007 \text{ kA}$ .

#### 5.4 Oikosulkukestoisuus

Lasketaan sysäysoikosulkuvirta ja terminen oikosulkuvirta Hanhikosken, Vetelin, Kirkonkylän ja Kentalan lähtöjen alussa. Tehdään esimerkkilaskenta Hanhikosken lähdölle.

Lasketaan ensin kolmivaiheinen maksimioikosulkuvirta Hanhikosken lähdön alussa kaavalla 1.

$$I_{k3\text{max}} = \frac{1,1 \cdot 20,5\text{kV}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,379\Omega + 0,154\Omega)^2 + (0,835\Omega + 2,547\Omega)^2}} = 3,803\text{kA}$$

Sysäysoikosulkuvirta voidaan laskea kaavalla 8.

$$i_s = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 3,803\text{kA} = 9,681\text{kA}$$

Johtolähdön laitteiden tulisi siis kestää 9,681 kA:n suuruisen sysäysoikosulkuvirran voimavaikutukset. Tämä sysäysoikosulkuvirta on sama kaikkien sähköaseman lähtöjen alussa.

Lasketaan seuraavaksi oikosulun ekvivalenttinen kesto aika Hanhikosken lähdössä kaavalla 10. Arvot laskentaa varten saatiin XPowerista. Hanhikosken lähdön ensimmäinen kaapeli on tyypiltään AHXAMK-W 3x150/35.

oikosulun kesto aika ennen ajk:ta  $t_1 = 0,68$  s

oikosulun kesto aika ajk:n jälkeen  $t_2 = 0,36$  s

ajk:n jännitteetön aika  $t_0 = 120$  s

johtimen jäähtymisaikavakio  $\tau = 50$  min = 3000 s

johtimen suurin sallittu terminen 1 s oikosulkuvirta = 13,5 kA

$$t = 0,68s \cdot e^{-\frac{120s}{3000s}} + 0,36s = 1,013s$$

Oikosulkuvirta, jonka johdin kestää yhden sekunnin ajan, lasketaan kaavalla 11.

$$I_{kt} = \frac{13,5kA}{\sqrt{1,013s}} = 13,41kA/s$$

Johdin on siis oikosulkukestoisen 13,41 kA:iin saakka. Johtimen oikosulkukestoisuus on reilusti suurempi kuin kolmivaiheinen maksimioikosulkuvirta.

Terminen oikosulkuvirta laskettiin muille tarkasteltaville lähdöille samalla tavalla. Tulokset ovat taulukossa 5. Kaapelin AHMDMK 3x120 jäähtymisaikavakio on 25 min (1500 s) ja suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta on 9,1 kA.

Taulukko 5. Tulokset termisen oikosulkukestoisuudenlaskennalle

Lähtö	Johdin	$t_1$ (s)	$t_2$ (s)	$t_0$ (s)	t (s)	$I_{kt}$ (kA/s)
Hanhikoski	AHXAMK-W 3x150/35	0,68	0,36	120	1,013	13,41
Veteli	AHMDMK 3x120	0,69	0,36	120	0,997	9,11
Kirkonkylä	AHMDMK 3x120	0,50	0,37	120	0,832	9,98
Kentala	AHXAMK-W 3x150/35	0,50	0,37	120	0,832	14,80

Kaikkien johto-osien terminen oikosulkuvirta on suurempi kuin kolmivaiheinen maksimioikosulkuvirta, joten ne ovat oikosulkukestoisia.



## 5.5 Maasulkuvirran kasvu

Lasketaan, kuinka paljon uusi rakennettava maakaapeliverkko lisää maasulkuvirtaa jaksoittain. Vuosina 2013–2019 uutta maakaapeliverkkoa rakennetaan lisää noin 9,3 km, 2020–2023 6,1 km ja 2024–2027 6,2 km. Maasulkuvirran kasvu voidaan laskea kaavalla 13. Kaapelin AHXAMK-W 3x150/35 maakaapasitanssi  $C_0$  on 0,24  $\mu\text{F}/\text{km}$ . Esimerkklaskuna 2013–2019 rakennettavan maakaapeliverkon aiheuttama maasulkuvirta. Tulokset muille ajanjaksoille ovat taulukossa 6.

$$I_e = \sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot \frac{0,24\mu\text{F}}{\text{km}} \cdot 9,3\text{km} \cdot 20,5\text{kV} = 24,9\text{A}$$

Taulukko 6. Tulokset maasulkuvirran kasvulle

Ajanjakso	Uutta maakaapelia (km)	Maasulkuvirran kasvu
2013-2019	9,3	24,9
2020-2023	6,1	16,3
2024-2027	6,2	16,6
<b>yhteensä</b>	<b>21,6</b>	<b>57,8</b>

Kaustisen jakelualueen maasulkuvirta tulee kasvamaan suunnitelman toteutuksen myötä 57,8 A. Kaustisen sähköaseman nykyisellä kompensointilaitteistolla maasulkuvirtaa voidaan kompensoida 80 A. Tällä hetkellä maasulkuvirtaa kompensoidaan noin 30 A, joten kompensointi täytyy suunnitella uudelleen viimeistään ensimmäisen kaapelointijakson loppupuolella.

## 5.6 Jännitteenalenemalaskenta

Jännitteenalenematarkastelua ei ole tarpeen tehdä jokaiselle lähdölle erikseen, joten valittiin esimerkeiksi muutama epäsuotuinen piste jännitteenalenemalaskentaa varten. Lasketaan jännitteenalenema sekä Hanhikosken lähdön että Vetelin lähdön kaukaisimmalle kulutuspiisteelle.

### 5.6.1 Hanhikosken lähtö

Taulukossa 7 on esitetty tarkasteltavan Hanhikosken lähdön jännitteenalenemalaskentaa varten tarvittavat johto-osuudet. Esityksen yksinkertaistamiseksi jakelumuuuntamoista

käytetään lyhenteitä (JM1, JM2, JM3...) niiden oikeiden tunnusten sijaan. Taulukossa on myös kunkin johto-osan johtimien tyypit ja pituudet kilometreinä.

Taulukko 7. Hanhikosken lähdön johto-osat pituuksineen jännitteenalenemalaskentaa varten

Johto-osa (mistä – mihin)	Johtimen tyyppi	Pituus (km)
Muuntaja – JM1	AHXAMK-W 3x150/35	0,17
JM1 – JM2	AHXAMK-W 3x150/35	0,55
JM2 – JM3	AHXAMK-W 3x150/35	1,19
JM3 – JM4	AHXAMK-W 3x150/35	0,68
	AHXAMK-W 3x70/25	0,12
JM4 – JM5	AHXAMK-W 3x150/35	0,09
JM5 – JM6	AHXAMK-W 3x95/25	0,24
JM6 – JM7	PAS 50	0,32
	SPARROW	0,73
JM7 – JM8	SPARROW	1,03
JM8 – JM9	SPARROW	0,62
JM9 – JM10	SPARROW	6,90
JM10 – JM11	SPARROW	0,96

XPowerista saadaan tehot kuormituspisteille. Ensimmäisen kuormituspisteen maksimiteho  $P_{\max}$  on 2686 kW. Kertoimena  $\cos\varphi$  voidaan käyttää riittävän tarkan lopputuloksen saamiseksi arvoa 0,98. Kaavalla 21 voidaan laskea ensimmäisen johto-osan läpi kulkeva virta.

$$I = \frac{2686 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 20,5 \text{ kV} \cdot 0,98} = 77,19 \text{ A},$$

josta saadaan laskettua pätövirta ja loisvirta vaihesiirtokulman avulla seuraavasti.

$$I_p = I \cdot \cos\varphi = 77,19 \text{ A} \cdot 0,98 = 75,64 \text{ A}$$

$$I_Q = I \cdot \sin\varphi = 77,19 \text{ A} \cdot \sin(\cos^{-1} 0,98) = 15,36 \text{ A}$$

XPowerista saadaan kullekin johtotyypille resistanssin ja reaktanssin arvot ( $\Omega/\text{km}$ ). Ensimmäiselle johto-osalle nämä arvot ovat  $r = 0,216 \Omega/\text{km}$  ja  $x = 0,111 \Omega/\text{km}$ .

Käyttäen kaavoja 19 ja 20 voidaan laskea jännitteenalenema ensimmäiselle johto-osalle.

$$U_h = 75,64 \text{ A} \cdot 0,216 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 0,17 \text{ km} + 15,36 \text{ A} \cdot 0,111 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 0,17 \text{ km} = 3,07 \text{ V}$$

$$U_{h\%} = 100\% \cdot \frac{3,07 \text{ V}}{20500 \text{ V}} = 0,015\%$$

Jännitteenalenema laskettiin lopuille johto-osuuksille samalla tavalla ja tulokset ovat taulukossa 8.

Taulukko 8. Tulokset Hanhikosken lähdön jännitteenalenematarkastelulle

Johto-osa	$P_{\max}$ (kW)	I (A)	$I_P$ (A)	$I_Q$ (A)	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )	$U_h$ (V)	$U_{h\%}$ (%)
Muunta - JM1	2686	77,19	75,64	15,36	0,036	0,018	3,07	0,015
JM1 - JM2	2563	73,66	72,19	14,66	0,119	0,061	9,48	0,046
JM2 - JM3	2539	72,97	71,51	14,52	0,257	0,132	20,29	0,100
JM3 - JM4	2444	70,24	68,84	19,98	0,200	0,092	15,08	0,074
JM4 - JM5	316	9,08	8,90	1,81	0,019	0,010	0,19	0,001
JM5 - JM6	316	9,08	8,90	1,81	0,076	0,028	0,73	0,004
JM6 - JM7	199	5,72	5,61	1,14	0,849	0,379	5,19	0,025
JM7 - JM8	180	5,17	5,07	1,03	0,872	0,394	4,83	0,024
JM8 - JM9	170	4,89	4,79	0,97	0,525	0,237	2,74	0,013
JM9 - JM10	86	2,47	2,42	0,49	5,84	2,64	15,43	0,075
JM10 - JM11	23	0,66	0,65	0,13	0,813	0,368	0,58	0,003
						<b>yht.</b>	<b>77,61</b>	<b>0,38</b>

Jännitteenalenemaksi Hanhikosken lähdön kaukaisimmalle kuormituspisteelle saatiin siis 0,38 %, joka on hyvin sallituissa rajoissa.

### 5.6.2 Vetelin lähtö

Vetelin lähdön jännitteenalenema kaukaisimmalle kulutuspiisteelle laskettiin, kuten edellä laskettiin Hanhikosken lähdölle. Taulukossa 9 on esitetty johto-osat tyypeittäin ja niiden pituudet. Taulukossa 10 on tulokset Vetelin lähdön jännitteenalenemalaskennalle.

Taulukko 9. Vetelin lähdön johto-osat pituuksineen jännitteenalenemalaskentaa varten

Johto-osa	Johtimen tyyppi	Pituus (km)
Muuntaja – JM1	AHMDMK 3x120	0,09
	AHXAMK-W 3x150/35	0,81
JM1 – JM2	AHXAMK-W 3x150/35	0,48
JM2 – JM3	AHXAMK-W 3x150/35	0,76
JM3 – JM4	AHXAMK-W 3x150/35	0,57
JM4 – JM5	AHXAMK-W 3x150/35	0,89
JM5 – JM6	AHXAMK-W 3x150/35	0,55
JM6 – JM7	Al 132	1,43
	SPARROW	0,02
JM7 – JM8	SPARROW	0,60
	RAVEN	0,02
JM8 – JM9	RAVEN	0,79

Taulukko 10. Tulokset Vetelin lähdön jännitteenalenematarkastelulle

Johto-osa	$P_{max}$ (kW)	I (A)	$I_p$ (A)	$I_Q$ (A)	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )	$U_h$ (V)	$U_h\%$ (%)
Muntaja – JM1	943	25,84	25,32	5,14	0,205	0,101	5,71	0,028
JM1 - JM2	799	21,90	21,46	4,36	0,104	0,053	2,46	0,012
JM2 - JM3	700	19,18	18,80	3,82	0,164	0,084	3,40	0,017
JM3 - JM4	591	16,20	15,88	3,22	0,123	0,063	2,16	0,011
JM4 - JM5	540	14,80	14,50	2,95	0,192	0,099	3,08	0,015
JM5 - JM6	307	8,41	8,24	1,67	0,119	0,061	1,08	0,005
JM6 - JM7	218	5,97	5,85	1,19	0,329	0,500	2,52	0,012
JM7 - JM8	121	3,32	3,25	0,66	0,519	0,237	1,84	0,009
JM8 - JM9	61	1,67	1,64	0,33	0,423	0,291	0,79	0,004
						<b>yht.</b>	<b>23,04</b>	<b>0,113</b>

Vetelin lähdön suhteellinen jännitteenalenema kaukaisimmalle kuormituspisteelle on 0,11 %, joka on reilusti suositelluissa rajoissa.

### 5.7 Investointikustannukset

Investointikustannukset arvioitiin Energiamarkkinaviraston vuoden 2012 hinnoilla, joten on mahdollista, että hinnat muuttuvat vielä moneen kertaan kunnes päästään vuoteen 2027. Kustannuslaskenta tehtiin Microsoft Office Excel –ohjelmalla, joka jää Verkko Korpelan käyttöön. Liitteessä 1 on nähtävissä excelillä tehty tarkempi laskenta. Tässä esitetään vain yhteenveto. Kokonaiskustannukset uudelle rakennettavalle verkolle ovat nähtävissä taulukossa 11.

Taulukko 11. Kokonaisinvestointikustannukset

	<b>Hinta EMV (€)</b>
<b>Muuntamot</b>	636 250
<b>Muuntajat</b>	229 500
<b>Kaapelit (sis. kaivuun)</b>	1 127 120
<b>Päätteet</b>	100 040
<b>Yhteensä</b>	<b>2 092 910</b>

Investointikustannukset laskettiin myös vuositasolle. Kaapeloitavat alueet on jaettu excel-tiedostossa aikajaksoille 2013–2019, 2020–2023 ja 2024–2027. Joka aikajaksolle laskettiin kustannus, joka jaettiin tasan jakson vuosille. Taulukoissa 12, 13 ja 14 on esitetty kustannukset aikajaksoittain.

Taulukko 12. Investointikustannukset vuosille 2013–2019

	<b>Hinta EMV (€)</b>
<b>2013</b>	140 840
<b>2014</b>	140 840
<b>2015</b>	140 840
<b>2016</b>	140 840
<b>2017</b>	140 840
<b>2018</b>	140 840
<b>2019</b>	140 840
<b>Yhteensä</b>	<b>985 878</b>

Taulukko 13. Investointikustannukset vuosille 2020–2023

	<b>Hinta EMV (€)</b>
<b>2020</b>	142 978
<b>2021</b>	142 978
<b>2022</b>	142 978
<b>2023</b>	142 978
<b>Yhteensä</b>	<b>571 914</b>

Taulukko 14. Investointikustannukset vuosille 2024–2027

	<b>Hinta EMV (€)</b>
<b>2024</b>	133 393
<b>2025</b>	133 393
<b>2026</b>	133 393
<b>2027</b>	133 393
<b>Yhteensä</b>	<b>533 572</b>

## POHDINTA

Yksi opinnäytetyön tärkeimpiä ja suurimpia tavoitteita oli tehdä keskijänniteverkon kaapelointisuunnitelma, jonka periaatteita ja menetelmiä voidaan hyödyntää myös muita Verkko Korpelan jakeluverkon alueiden keskijänniteverkkojen suunnitelmia tehdessä. Kaustisen kunnan alue osoittautui hyväksi ja monipuoliseksi esimerkiksi tähän tehtävään. Keskustaajama oli riittävän iso, minkä ansiosta päästiin tarkastelemaan puhtaasti taajamaa syöttämään tarkoitettuja lähtöjä. Taajaman ympärillä oli paljon haja-asutusaluetta, joten tarkasteltavana oli myös lähes puhtaasti haja-asutusaluetta syöttäviä lähtöjä. Lisäksi Kaustinen laajenee ja siellä on suurikulutuksisia teollisuusalueita, jotka täytyi ottaa suunnitelmassa huomioon.

Toimeksiantajan toiveena oli myös arvio investointikustannuksista. Onnistuttiin tekemään hyvä Excel-laskentapohja, johon tiedot muuttamalla voidaan laskea arvio kustannuksista myös muille alueille. Verkko Korpelan on näin helpompi hahmottaa, millaisista summista puhutaan, kun keskijänniteverkon toimitusvarmuutta lähdetään parantamaan kaapeloimalla.

Tärkeää oli tehdä myös tekninen laskenta, jotta nähtiin, millä ehdoilla tämän kaltaisen suunnitelman toteutus on mahdollista. Oikosulkulaskennalle, oikosulkukestoisuuksille ja jännitteenalenemille saatiin arvot, joilla pysyttiin teknisten reunaehtojen puitteissa. Maasulkuvirta ja kompensointi -tarkastelulle ei annettu paljon tilaa työssä. Se on toki erittäin tärkeä osa jakeluverkkojen suunnittelua, mutta ehkä liian laaja aihe tämän työn lisäksi, ja silloin ei olisi voitu rajata työtä enää pelkästään Kaustisen kunnan alueella, vaan olisi täytynyt ottaa huomioon verkkoa laajemmalla alueella. Sen kaltainen tarkastelu on parempi tehdä omana suunnitelmanaan tämän työn tulokset huomioiden.

Toimeksiantajaa ja opinnäytetyön aihetta etsiessäni oli tärkeää, että työ olisi ajankohtainen ja siitä olisi ihan oikeaa hyötyä toimeksiantajalle sekä minulle tulevaisuudessa. Tämän ajankohtaisempaa aihetta ei olisi melkein voinut löytää. Työssä puhuttiin työ- ja elinkeinoministeriön ehdotuksesta toimenpiteistä sähkönjakelun toimitusvarmuuden parantamiseksi ja sähkökatkojen vaikutusten lievittämiseksi. Tämä ehdotus johti hallituksen eduskunnalle jättämään esitykseen sähkö- ja maakaasumarkkinoita koskevaksi lainsäädännöksi. Tällä hetkellä esitys on valiokuntakäsittelyssä. Aihe kiinnosti minua

oman opiskelualani kannalta, mutta myös tavallisena sähkön käyttäjänä. Tämänkin opinnäytetyön tekeminen olisi ollut paljon vaativampaa ilman sähköä.

## LÄHTEET

- ABB Oy 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja  
Energiamarkkinaviraston www-sivut 2013. Hakupäivä 1.5.2013.  
<<http://www.energiamarkkinavirasto.fi>>
- Energiamarkkinavirasto 2012. Kertomus sähkön toimitusvarmuudesta 2012. Hakupäivä 9.4.2013.  
<[http://www.emvi.fi/files/Kertomus\\_sahkon\\_toimitusvarmuudesta\\_2012.pdf](http://www.emvi.fi/files/Kertomus_sahkon_toimitusvarmuudesta_2012.pdf)>
- Energiateollisuus ry:n www-sivut 2013. Hakupäivä 1.5.2013. <<http://energia.fi>>
- Energiateollisuus ry 2012. Sähkön keskeytystilasto 2011. Hakupäivä 9.4.2013.  
<[http://energia.fi/sites/default/files/keskeytystilasto\\_2011.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/keskeytystilasto_2011.pdf)>
- Energiateollisuus ry 2010. Sähkön toimitusvarmuus 2030. Hakupäivä 14.4.2012.  
<[http://www.energia.fi/sites/default/files/sahkon\\_toimitusvarmuus\\_2030\\_suositus\\_20100827\\_0.pdf](http://www.energia.fi/sites/default/files/sahkon_toimitusvarmuus_2030_suositus_20100827_0.pdf)>
- Lakervi, Erkki & Partanen, Jarmo 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto.
- Martimo, Antero 2010. Sähkönjakelutekniikan kurssimateriaali.
- Mörsky, Jorma 1992. Relesuojaustekniikka. 2. korjattu painos. Hämeenlinna: Karisto Oy
- Sähkömarkkinalaki 386/1995
- Työ- ja elinkeinoministeriön nettisivut. Hakupäivä 12.5.2012  
<<http://www.tem.fi/>>
- Työ- ja elinkeinoministeriö 2012. TEM:n ehdotus toimenpiteistä sähkönjakelun varmuuden parantamiseksi sekä sähkökatkojen vaikutusten leviämiseksi. Hakupäivä 23.3.2012.  
<[http://www.tem.fi/files/32354/Muistio\\_TEMin\\_ehdotuksiksi\\_toimitusvarmuudesta\\_16032012\\_final\\_clean.pdf](http://www.tem.fi/files/32354/Muistio_TEMin_ehdotuksiksi_toimitusvarmuudesta_16032012_final_clean.pdf)>
- Verkko Korpela Oy 2013. Yrityksen sisäinen materiaali.
- Verkostosuositus SA 5:94, 1994. Keski-jänniteverkon sähköinen mitoittaminen. Helsinki: Sähköenergialiitto ry SENER



LIITTEET

Liite 1. Suunnitelman investointikustannukset