

Eetu Heikkinen

**KAJAVE OY:N KESKIJÄNNITEJAKELUVERKON JAKORAJOJEN  
OPTIMOINTI**

# **KAJAVE OY:N KESKIJÄNNITEJAKELUVERKON JAKORAJOJEN OPTIMOINTI**

Eetu Heikkinen  
Opinnäytetyö  
Kevät 2021  
Sähkö- ja automaatiotekniikan  
tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikka, Sähkötekniikka

---

Tekijä: Eetu Heikkinen

Opinnäytetyön nimi: Kajave Oy:n keskijännitejakeluverkon jakorajojen optimointi  
Title of thesis: Optimization of Switching States in Kajave Oy's MV Distribution Network

Työn ohjaajat: Heikki Kurki, Jussi Niskanen ja Jari Moilanen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2021

Sivumäärä: 37+ 13 liitettä

---

Tämä opinnäytetyö on tehty Kainuun ja osittain Pohjois-Pohjanmaan alueella toimivalle jakeluverkkoyhtiö Kajave Oy:lle. Työn aiheena oli Kajave Oy:n hallinnoiman keskijännitejakeluverkon jakorajojen optimointi. Työn tavoitteena oli hakea jakorajoille optimaaliset sijainnit sekä laskennallisesta että käyttöteknisestä näkökulmasta.

Jakorajoilla määritellään verkon syöttösuunnat ja siten kuormien jakautuminen verkossa. Jakorajojen optimoinnilla voidaan vaikuttaa verkossa esiintyvien häviöiden määrään, verkon käytettävyyteen sekä osaltaan myös verkon turvallisuuteen.

Työssä jakorajaoptimointi toteutettiin hakemalla yksitellen jokaiselle keskijänniteverkon jakorajalle optimaalinen sijainti. Menetelmänä käytettiin häviöenergian määrään pohjautuvaa haarukointia sekä käyttötekniisiin asioihin pohjautuvaa harkintaa. Häviöenergiamäärä saatiin verkostolaskennalla tehonjakolaskentaa käyttäen. Käyttötekniisiä asioita, joiden pohjalta jakorajaoptimointia myös tehtiin, olivat kytkinlaitteiden käyttötapa ja käyttöpaikkojen keskeytyskriittisyys.

Työn lopputuloksena saatiin suunnitelma jakorajoista, joiden paikkaa olisi järkevää muuttaa. Suunnitelman mukaisten muutosten seurauksena vuosittainen häviöenergian kokonaismäärä pienenisi 231 MWh ja 12 käsikäyttöiseltä kytkinlaitteelta jakoraja siirtyisi kauko-ohjattaville kytkinlaitteille. Lisäksi työn aikana muodostettiin pohja prosessille, jonka kautta Kajave Oy:n keskijännitejakeluverkon jakorajoja jatkossa hallitaan. Jakorajatarkastelun tulokset sisältäviä liitteitä on 13. Ne sisältävät luottamuksellista tietoa, joten ne jäävät vain toimeksiantajan käyttöön.

---

Asiasanat: jakorajaoptimointi, keskijänniteverkko, häviöenergia,

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Electrical and Automation Engineering, Electrical Engineering

---

Author: Eetu Heikkinen

Title of thesis: Optimization of Switching States in Kajave Oy's MV Distribution Network

Supervisor: Heikki Kurki, Jussi Niskanen ja Jari Moilanen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2021

Pages: 37 + 13 appendices

---

This thesis has been made for Finnish distribution network company Kajave Oy which operates in Kainuu and partly in Northern Ostrobothnia. The objective of the thesis was to optimize the switching state in Kajave Oy's medium voltage distribution network.

The optimization of the switching states was made based on the amount of energy losses and usability of the distribution network. The amount of energy losses was obtained by calculation of load flow which includes the determination of energy losses. The consideration based on usability was made based on possibility of remote controlling switching devices. In addition, criticality of power supply for different customer types was one aspect which had to be considered.

The result of this thesis is a plan on how the current switching states should be changed to minimize energy loss and improve usability. According to the plan, the annual energy losses of the medium voltage distribution network could be reduced by 231 MWh. In addition, it would be possible to get better usability in the distribution network by changing switching states from 12 manually operated switching devices to as many remote-controlled switching devices.

---

Keywords: medium voltage distribution network, energy losses, switching state optimization, usability of medium voltage distribution network

## **ALKULAUSE**

Haluan kiittää opinnäytetyöni toimeksiantajaa Kajave Oy:tä opinnäytetyön mahdollistamisesta. Kiitos myös koko Loisteen henkilökunnalle erityisesti opinnäytetyöni ohjaajille Jussi Niskaselle ja Jari Moilaselle. Lisäksi haluan myös kiittää opinnäytetyöni ohjannutta opettajaa Heikki Kurkea.

30.5.2021 Eetu Heikkinen

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
SANASTO	8
1 JOHDANTO	9
2 TOIMEKSIANTAJAN ESITTELY	10
2.1 Kajave Oy	10
2.2 Keskipäijätjakeluverkon kehittyminen	10
3 JAKORAJAOPTIMOINNIN HYÖDYT	12
3.1 Sähkön laatu	12
3.2 Taloudelliset hyödyt	13
3.3 Sähköverkon turvallisuus	14
4 VERKOSTOLASKENTA	15
4.1 Tehonjakolaskenta	15
4.1.1 Jännitteenalenema	15
4.1.2 Häviöenergia	16
4.2 Vikavirtalaskenta	17
4.2.1 Oikosulkulaskenta	17
4.2.2 Maasulkulaskenta	18
5 OPTIMOINTI KÄYTTÖTEKNISESTÄ NÄKÖKULMASTA	21
5.1 Kytkinlaitteiden käyttötapa	21
5.2 Keskeytyskriittiset asiakkaat	22
6 KAJAVEN KJ-VERKON JAKORAJOJEN OPTIMOINTI	24
6.1 Lähtötilanteen määrittely	24
6.2 Laskennallinen optimointi	25
6.2.1 Laskennan taustatiedot	25
6.2.2 Tehonjako-mitoituslaskenta	26
6.2.3 Vikavirtalaskenta	30
6.3 Käyttötekniinen optimointi	30
6.4 Kokonaisoptimoinnin tulokset	31

7 KAJAVEN KJ-VERKON JAKORAJOJEN HALLINTA TULEVAISUUDESSA	33
8 YHTEENVETO	34
LÄHTEET	36
LIITTEET	37

## **SANASTO**

DMS	Distribution Management System, käytöntukijärjestelmä
KJ	Keskijännite
NIS	Network Information System, verkkotietojärjestelmä
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition, käytönvalvontajärjestelmä

# 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Kainuun sekä osittain Pohjois-Pohjanmaan alueella toimivalle jakeluverkkoyhtiö Kajave Oy:lle (jatkossa Kajave). Työn ensisijainen tavoite on optimoida Kajaven keskijännitejakeluverkossa olevien jakorajojen sijainnit huomioiden sekä laskennallinen että käytöntekninen näkökulma. Työn toisena merkittävänä tavoitteena on muodostaa jakorajojen optimoinnista prosessi, jonka avulla pyritään jatkossa helpottamaan jakorajojen sijoittelun ja dokumentoinnin hallintaa.

Aihe oli Kajaven verkkoalueella ajankohtainen kahdestakin syystä. Kajaven keskijännitejakeluverkolle on tehty aiemminkin jakorajojen tarkastelua, mutta viimeisimmästä tarkastelusta on kulunut jo aikaa, eivätkä aiemmat tarkastelut ole olleet laajuudeltaan yhtä kattavia kuin tämän työn aikana tehtävä jakorajatarkastelu. Lisäksi jakeluverkon rakenne on muuttunut viime vuosien aikana merkittävästi kaapeloinnin sekä lisääntyneiden kaukokäytettävien kytkinlaitteiden ansiosta.

Työssä käydään läpi merkittävimmät jakorajojen sijainteihin vaikuttavat tekijät sekä työvaiheet. Lisäksi esitellään näiden asioiden pohjalta tehtävä jakorajojen optimointi Kajaven keskijännitejakeluverkolle.

## **2 TOIMEKSIANTAJAN ESITTELY**

Suomen sähköverkko on murrostilassa, jossa erityisesti keskijänniteverkon rakenne muuttuu merkittävästi. Muutos on kaikkein suurinta maaseutumaisissa jakeluverkkoyhtiöissä, joihin myös tämän työn toimeksiantaja Kajave kuuluu.

### **2.1 Kajave Oy**

Kajave on Kainuun sekä osittain Pohjois-Pohjanmaan alueella toimiva sähkönjakeluverkkoyhtiö. Kajave on osa Loiste-konsernia yhdessä kaukolämpöpalveluita tarjoavan Loiste Lämpö Oy:n sekä energiapalveluja tarjoavan Loiste Energia Oy:n kanssa. Kajaven alueella on noin 59 000 käyttöpaikkaa ja keskijännitejakeluverkkoa 7330 km, josta maakaapeloitua on 997 km (1).

Vuonna 2013 astui voimaan sähkömarkkinalain 588/2013 (2) muutos, joka asetti uudet toimitusvarmuusvaatimukset sähkönjakeluverkoille. Se on vaikuttanut myös Kajaven jakeluverkon rakenteeseen. Toimitusvarmuusvaatimuksien seurauksena Kajaven jakeluverkosta on pyritty tekemään entistä säävarempaa ja sen seurauksena erityisesti maakaapelointiaste on noussut ja kasvaa edelleen tulevien vuosien aikana.

### **2.2 Keskijännitejakeluverkon kehittyminen**

Keskijännitejakeluverkko kehittyi koko ajan enemmän maakaapeliverkkopainotteiseksi. Vaikka tämän suuntainen toiminta parantaa selkeästi verkon säävaremutta, aiheuttaa se myös tietynlaisia haasteita erityisesti Kajaven kaltaisille jakeluverkkoyhtiöille, joiden jakelualueeseen sisältyy runsaasti harvaan asuttua maaseutua ja paljon pitkiä keskijännitejohtolähtöjä.

Ilmajohdoverkon muuttaminen maakaapeliverkoksi on johtanut kompensointitarpeiden ja siten kompensointilaitteiden määrän kasvuun. Kompensoinnin tarpeen kasvu johtuu maakaapeliverkon ilmajohtoverkkoa huomattavasti suuremmasta maasulkuvirrasta, joka on jopa 50-kertainen ilmajohtoverkkoon verrattuna. Kaapeliverkon lisääntyminen lisää myös loistehon määrää. (3.)

Tähän asti maasulkuvirran kompensointi on toteutettu pääasiassa sähköasemille sijoitetuilla keskitetyillä kompensointilaitteistoilla, mutta maakaapeliverkon määrän lisääntymisen seurauksena tämä ei enää yksistään ole riittävää. Tästä johtuen myös Kajaven verkkoalueella on päädytty jatkossa käyttämään keskitetyn kompensoinnin lisäksi hajautettua kompensointia. Hajautettu kompensointi tulee vaikuttamaan osaltaan myös jakorajojen sijoitteluun, sillä on olennaista, että kompensointilaitteisto kompensoi juuri sitä maakaapeliosuutta, jota sen on suunniteltu kompensoivan. Hajautetuilla kompensointilaitteistoilla on maasulkuvirran lisäksi mahdollista kompensoida myös loistehoa.

### 3 JAKORAJAOPTIMOINNIN HYÖDYT

Keskijännitejakeluverkon jakorajojen optimoinnilla voidaan saavuttaa monenlaisia hyötyjä riippuen siitä, minkälaisia asioita optimoinnissa halutaan painottaa. Jakorajojen optimoinnilla on mahdollista saavuttaa sähkön laatuun, verkon turvallisuuteen ja taloudellisuuteen liittyviä hyötyjä.

#### 3.1 Sähkön laatu

Sähkökatkot sekä jännitteen ja taajuuden poikkeamat ovat yleisimpiä sähkön laatuun ongelmia aiheuttavia tekijöitä. Jakorajojen sijainneilla voidaan suoraan vaikuttaa jakeluverkon jännitteeseen sekä osaltaan myös sähkönjakelun keskeytyksiin. (4, Luku 4.)

Jakorajoilla määritetään se, miltä sähköaseman lähdöltä mitäkin verkon osaa syötetään, eli käytännössä kuinka pitkiä matkoja ja miten suuria tehoja mitäkin johtoa pitkin sähköä siirretään. Jakorajojen sijoittelu vaikuttaa siis suoraan jännitteenalenukseen, johon vaikuttavat tekijät ovat johdinten ominaisuudet, pituudet sekä niiden kautta siirrettävät tehot. Jos verkoston jännitteenalenukset halutaan minimoida, tulee jakorajat sijoittaa siten, että johtojen syöttöpituudet pysyvät mahdollisimman lyhyinä ja verkon kuormat jakautuvat mahdollisimman tasaisesti johdinten ominaisuudet huomioiden.

Sähkökatkot ovat toinen merkittävä sähkön laatuun ongelmia aiheuttava tekijä, johon jakorajojen sijoittelulla voidaan vaikuttaa. Jakorajojen sijoittelulla ei voida vaikuttaa keskeytyksien absoluuttiseen määrään. Jakorajoilla voidaan kuitenkin vaikuttaa siihen, kuinka pitkänä ja kuinka monella käyttöpaikalla sama keskeytys aiheutuu. Niihin voidaan vaikuttaa siten, että erotetaan ei-vikaherkät ja vikaherkät johdot eri johtolähdöille. Usein tämä tarkoittaa, että jakoraja sijoitetaan jakamaan kaapeliverkko ja ilmajohtoverkko eri johtolähdöille. Käyttöpaikoilla olevien keskeytyksien kestoon voidaan vaikuttaa sijoittamalla jakorajat kauko-ohjatuille kytkinlaitteille. Kauko-ohjatut kytkinlaitteet mahdollistavat erityisesti vikatilanteissa vian nopeamman rajauksen ja siten lyhentävät käyttöpaikkojen keskeytyksiä.

### 3.2 Taloudelliset hyödyt

Jakorajojen sijoittelulla voidaan saavuttaa myös taloudellisia hyötyjä. Näitä hyötyjä ovat häviöenergian pieneneminen, käyttötoiminnan tehokkuuden parantaminen sekä jo sähkönlaadun yhteydessä mainitut vaikutukset keskeytyksiin.

Jakorajojen optimaalisella sijoittelulla voidaan minimoida häviöenergian määrä ja siten saavuttaa taloudellisia hyötyjä. Häviöenergian minimoiminen on myös selkeimmin mitattavissa oleva jakorajojen optimaalisella sijoittelulla saatava taloudellinen hyöty. Johdoissa syntyvän häviöenergian suuruuteen vaikuttaa johtojen kuormituksen suuruus: mitä suurempi kuormitus sitä enemmän häviöitä syntyy. Jakorajoilla pystytään vaikuttamaan siihen, miten verkossa esiintyvät kuormat jakautuvat eri johtolähdöille. Häviöenergian minimoimiseen jakorajoja hyödyntämällä pätee samat lainalaisuudet kuin jännitteenaleneman minimoimisessakin. Tämä tarkoittaa sitä, että myös verkon häviöenergian minimoimisen kannalta verkon kuormat tulisi jakaa mahdollisimman tasaisesti eri johtolähdöille. Verkon kuormien jakautumista suunniteltaessa on kuitenkin huomioitava myös johdinten ominaisuuksien eroavaisuudet.

Jakorajojen optimoinnilla voidaan parantaa myös käyttötoiminnan tehokkuutta. Vaikka tätä kautta saatavia taloudellisia hyötyjä ei kyetä mittaamaan kovin suoraviivaisesti, ovat nämä hyödyt selkeitä. Käyttötoimintaa pystytään tehostamaan sijoittamalla jakorajat kauko-ohjatuille kytkinlaitteille. Kauko-ohjatut kytkinlaitteet mahdollistavat nimensä mukaisesti kytkinlaitteen ohjauksen etänä, jolloin kytkinlaitteiden ohjaus on nopeampaa. Suurimman taloudellisen hyödyn kytkinlaitteiden kauko-ohjaus tarjoaa vikatilanteissa, jolloin vika-alueen rajaus on nopeampaa. Nopeamman vianrajauksen seurauksena käyttöpaikoille toimittamattomasta sähköstä jakeluverkkoyhtiölle koituvat tulonmenetykset jäävät pienemmiksi.

### 3.3 Sähköverkon turvallisuus

Sähköturvallisuuslain (1135/2016) 6 §:n mukaan sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä käyttötarkoituksensa mukaisesti niin, että

- niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa
- niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä
- niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti (5).

Käytännössä tämän lain täyttämiseksi tulee jakeluverkkoyhtiöllä olla luotettava verkonsuojausjärjestelmä, mikä käytännössä tarkoittaa toimivaa relesuojausta. Relesuojauksen toimivuus perustuu releiden oikeanlaisiin asetteluihin ja aseteluiden oikeellisuus riippuu puolestaan verkon kytkentätilanteesta ja siten myös jakorajojen sijainneista.

Jakorajojen muutokset vaikuttavat syötettäviin johtopituuksiin ja johtopituudet vaikuttavat maasulku- ja oikosulkuvirtoihin. Siksi jakorajamuutosten yhteydessä tulee varmistaa, että verkko säilyy turvallisena käyttää. Syötettävien johtopituuksien kasvaessa verkon maasulkuvirta kasvaa ja oikosulkuvirta pienenee verkon kauimmaisissa haaroissa. Ennen jakorajojen muuttamista uusiin sijainteihin verkossa on varmistettava releiden oikeanlainen toiminta myös jakorajamuutoksien jälkeen. Suojauksien toiminnan tarkastelu tehdään vikavirtalaskentojen avulla. Vikavirtalaskentojen osoittaessa, etteivät releet toimi uusilla jakorajoilla halutulla tavalla, tulee esimerkiksi jakorajojen sijaintia tai releiden asetteluita muuttaa suojausten oikeanlaisen toiminnan varmistamiseksi niin normaalissa syöttötilanteessa kuin yleisimmissä varasyöttötilanteissakin.

## 4 VERKOSTOLASKENTA

Verkostolaskentojen avulla tarkastellaan verkon sähkötekniistä tilaa, mikä antaa pohjan monille verkkoyhtiön toiminnoille. Verkostolaskennoilla saatavia tuloksia hyödynnetään hyvin laajasti verkkoon liittyvissä suunnittelu- ja tarkastelutehtävissä. Laskennat perustuvat lähtötietoihin, joten laskennan onnistumiseen ja tulosten luotettavuuteen vaikuttaa olennaisesti verkkotietojärjestelmän dokumentaation taso. Jakorajaoptimoinnissa verkostolaskennoissa käytetään sekä tehonjakolaskentaa että vikavirtalaskentaa. Tehonjakolaskentaa käytetään varsinaiseen optimointityöhön ja vikavirtalaskentaa optimointityön jälkeen verkon turvallisuuden varmistamiseen.

### 4.1 Tehonjakolaskenta

Tehonjakolaskennalla selvitetään verkon sähkötekniinen tila käyttäen kuormitus-tietona pääsääntöisesti huippukuorman aikaisia lukemia, jotka ovat määrääviä verkon mitoituksen kannalta. Tehonjakolaskenta tuottaa tärkeää tietoa verkon kuormittuneisuudesta ja sähköteknisestä suoriutumiskyvystä verkon tietyssä kytkentätilanteessa. Tehonjakolaskennassa lähtötietoina käytetään kulutus- ja verkkotietoja sekä laskentaparametreja. (6.)

Jakorajaoptimointia tehdessä tehonjakolaskenta on merkittävimpiä työkaluja. Tehonjakolaskennalla pystytään selvittämään jakorajoille optimaaliset sijainnit häviöiden sekä jännitteenalennemien kannalta. Optimointia tehtäessä käytetään tehonjako-mitoituslaskentaa, jolloin laskenta käyttää lähtötietoina vuoden aikana esiintyviä suurimpia kuormia ja pienimpiä jännitteitä.

#### 4.1.1 Jännitteenalennema

Standardissa SFS-EN 50160:2010 määritellään, että keskijännitejakeluverkossa jännitetason vaihtelut eivät saisi ylittää  $\pm 10\%$  jakeluverkko-operaattorin ja verkon käyttäjän keskenään sopimasta jakelujännitteestä. Käytännössä tämä määrittely tarkoittaa, ettei varsinaista rajaa keskijänniteverkon jännitteenalennemalle ole standardeissa määritelty. (7.)

Verkostosuosituksessa SA 5:94 keskijänniteverkon jännitteenalenemalle annetaan suositus maksimissaan 7 %:n jännitteenvaihtelusta. Samalla kuitenkin todetaan, että keskijänniteverkon jännitteenalenema voi olla jopa 10 %, jos pienjänniteverkon jännitteenalenema on pieni. (8.)

Kajavella 20 kV keskijänniteverkon alimpana sallittuna jännitteenä on käytetty 18,6 kV, joka vastaa prosenteiksi muutettuna 7 %:n jännitteenalenemaa. Näin suuri jännitteenalenema on kuitenkin katsottu hyväksyttäväksi vain normaalista poikkeavissa lyhytaikaisissa käyttötilanteissa. Jännitteenalenema saadaan laskettua kaavalla 1. (8, Luku 4.3.)

$$U_h = 100 * P * l * \frac{r+x*\tan\varphi}{U^2} \quad \text{KAAVA 1}$$

$U_h$  = jännitteenalenema (%)

P = johdon kautta siirrettävä teho (MW)

l = johdon pituus (km)

r = johtimen resistanssi ( $\Omega$ /km)

x = johtimen reaktanssi ( $\Omega$ /km)

U = laskentajännite (kV)

$\varphi$  = vaihekulma

#### 4.1.2 Häviöenergia

Häviöenergiämäärälle ei ole määritelty raja-arvoja. Häviöenergia aiheuttaa merkittäviä kustannuksia jakeluverkkoyhtiöille ja siksi sen määrä on pyrittävä minimoimaan. Häviöenergian määrä voidaan laskea, kun tiedetään pätötehohäviöiden (kaava 2) määrä sekä kesto. (9, Luku 4.4.)

$$P_h = 3 * (I^2 R)$$

KAAVA 2

$P_h$  = pätötehohäviöt

$I$  = kuormitusvirta

$R$  = johdon resistanssi

Kuormituksen mukaan vaihtelevien pätötehohäviöiden aiheuttama vuosittainen häviöenergia on mahdollista laskea alla olevalla kaavalla 3 (9, Luku 4.4).

$$W_h = \int_0^T P_h dt$$

KAAVA 3

$W_h$  = häviöenergia

$T$  = vuoden pituus tunteina = 8760 h

## 4.2 Vikavirtalaskenta

Verkostolle tehtävien vikavirtalaskentojen avulla voidaan selvittää verkon kyvykkyys selvittää sen eri osissa tapahtuvista vikatilanteista. Olennaisena osana vikavirtalaskentoihin kuuluu verkoston suojauskien tarkastelu, joka viime kädessä on määräävä tekijä verkon turvallisuuden ja vikakestoisuuden täyttymisen kannalta. Tyypillisesti vikavirtalaskenta suoritetaan kolmi- ja kaksivaiheiselle oikosululle sekä yksivaiheiselle maasululle. (6.)

Jakorajaoptimoinnin yhteydessä vikavirtalaskentaa käytetään tarkastuslaskentana varsinaisen optimointityön jälkeen. Käytännössä vikavirtalaskentojen avulla ei tehdä varsinaista optimointityötä vaan varmistetaan verkon suojausten oikeanlainen toiminta myös jakorajamuutosten jälkeen.

### 4.2.1 Oikosulkulaskenta

Tyypillisesti maaseutualueita syöttävissä keskijänniteverkoissa pienin kaksivaiheinen oikosulkuvirta on oikosulkusuojauksen toimivuuden kannalta määrittävä tekijä. Kaksivaiheinen oikosulkuvirta syntyy kahden vaiheen kytkeytyessä yh-

teen. Kaksivaiheinen oikosulku on epäsymmetrinen. Myötä- ja vastakomponenttiverkon impedanssien ollessa erisuuruisia oikosulkuvirta lasketaan Thevenin yhtälöllä, joka on esitettyä kaavassa 4. (4, luku 7.)

$$I_{k2} = \frac{c * U_n}{|Z_1 + Z_2|} \quad \text{KAAVA 4}$$

$I_{k2}$  = kaksivaiheinen oikosulkuvirta

$c$  = jännitekerroin (1 kV - 35 kV  $c = 1$ )

$U_n$  = pääjännite

$Z_1$  = myötäkomponenttiverkon impedanssi

$Z_2$  = vastakomponenttiverkon impedanssi

Myötä- ja vastakomponenttiverkon impedanssien ollessa yhtä suuria voidaan kaksivaiheinen oikosulkuvirta laskea hyödyntäen kolmivaiheista oikosulkuvirtaa kaavan 5 mukaisesti (4, luku 7).

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3} * I_{k3}}{2} \quad \text{KAAVA 5}$$

$I_{k3}$  = kolmevaiheinen oikosulkuvirta

#### 4.2.2 Maasulkulaskenta

Maasulku on sähköturvallisuusmääräyksissä määritelty käyttömaadoittamattoman virtajohtimen ja maan tai maahan johtavassa yhteydessä olevan osan väliseksi eristysviaksi. Maasta erotetussa ja kompensoidussa verkossa täytyy tuntea koko galvaanisesti yhteenkytketty verkko, jotta maasulkuvirrat ja nollajännitteet voidaan määrittää. Sen sijaan verkon impedansseilla ei tässä tarkastelussa ole käytännön merkitystä. (4, luku 8.)

Terveessä tilassa verkon vaihejännitteet maahan nähden ovat symmetrisiä eli niiden summa on joka hetki nolla. Vastaavasti maakapasitanssien kautta kulkeva

osa verkon varausvirroista muodostaa symmetrisen järjestelmän. Maasulun sat-  
tuessa terveiden vaiheiden vaihejännitteet maahan nähden kasvavat. Epäsym-  
metrian seurauksena varausvirtojen summa poikkeaa nolasta ja tämä osa va-  
rausvirtaa kulkee vikapaikan kautta maahan muodostaen maasulkuvirran. Maa-  
sulkuvirran itseisarvon suuruus suorassa (vikaresistanssittomassa) maasulussa  
voidaan laskea kaavan 6 mukaisesti. (4, luku 8.)

$$I_e = \sqrt{3} * \omega * C_0 * U$$

KAAVA 6

$I_e$  = maasulkuvirta (A)

U = verkon laskentajännite (pääjännite) (V)

$C_0$  = yhden vaiheen maakapasitanssi (F)

$\omega$  = kulmataajuus =  $2 \pi f$

f = verkon taajuus (50 Hz)

Kaava 6 pätee ainoastaan tilanteessa, jossa käytössä ei ole maasulkuvirran kom-  
pensointia. Jos johdolla on käytössä keskitetty maasulkuvirran kompensointilait-  
teisto, saadaan maasulkuvirran jäännösarvo laskettua kaavalla 7. Jos käytössä  
on hajautettu maasulkuvirran kompensointi, saadaan maasulkuvirran jäännös-  
arvo likimääräisesti vähentämällä ilman kompensointia olevasta maasulkuvir-  
rasta hajautettujen kompensointikelojen nimellisvirtojen summa. (4, luku 8.)

$$I_{es} = \frac{\sqrt{R_0^2 * (3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})^2}}{\sqrt{(R_f + R_0)^2 + R_f^2 * R_0^2 * (3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})^2}} * \frac{U}{\sqrt{3}}$$

KAAVA 7

$I_{es}$  = maasulkuvirran jäännösarvo (A)

U = nimellisjännite (V)

$R_f$  = vikaresistanssi ( $\Omega$ )

$R_0$  = kompensointikuristimen ja tähtipisteen redusoitu verkon häviöresistanssi ( $\Omega$ )

$C_0$  = koko galvaanisesti yhteen kytketyn verkon maakapasitanssi /vaihe (F)

L = kompensointikuristimen induktanssi (H)

$\omega$  = kulmataajuus =  $2\pi f$

f = verkon taajuus (50 Hz)

## 5 OPTIMOINTI KÄYTTÖTEKNISESTÄ NÄKÖKULMASTA

Jakorajojen paikkoja ei ole järkevää määritellä pelkästään verkostolaskentojen tulosten perusteella, sillä näin ei päädytä kokonaisuuden kannalta parhaaseen mahdolliseen lopputulemaan. Jotta lopputulos olisi kokonaisuuden kannalta paras mahdollinen, tulee jakorajojen sijoittelussa huomioida myös käyttötekniisiä asioita. Käyttötekniisiin asioihin kuuluvat keskeytyskriittisten asiakkaiden sijainti, kytkinlaitteiden käyttötapa sekä joissakin tilanteissa myös kytkinlaitteiden luoksepäästävyys ja niiden katkaisukyky.

### 5.1 Kytkinlaitteiden käyttötapa

Kytkinlaitteet voidaan jakaa käyttötavan perusteella kahteen luokkaan: käsiohjattuihin ja kauko-ohjattuihin. Kauko-ohjattujen kytkinlaitteiden tilaa on mahdollista ohjata etänä käyttökeskuksesta. Käsiohjattun kytkinlaitteen tilan ohjaaminen taas vaatii sen luona tapahtuvaa manuaalista ohjaamista.

Jakorajojen sijainteja määriteltessä on järkevää huomioida myös kytkinlaitteiden käyttötavat. Lähtökohtaisesti jakorajat kannattaisi pyrkiä sijoittamaan kauko-ohjatuille kytkinlaitteille johtuen niiden kustannustehokkaasta sekä nopeasta käytettävyydestä. Kauko-ohjattujen kytkinlaitteiden hyöty korostuu erityisesti vikatilanteissa, joissa kytkinlaitteiden kauko-ohjaus mahdollistaa huomattavasti nopeamman vianrajauksen.

Kun tarkastellaan jakorajoja kytkinlaitteiden käyttötavan mukaan, on kuitenkin syytä muistaa, että jokaista jakorajaa on tarkasteltava omana kokonaisuutenaan. Samalla tulee ottaa huomioon jakorajaa ympäröivä verkko kokonaisuudessaan. Jos kauko-ohjattun kytkinlaitteen käyttö jakorajana ei jossakin tilanteessa ole mahdollista tai järkevää, voidaan jakoraja sijoittaa käsikäyttöiselle kytkinlaitteelle. Näissä tapauksissa tulee kuitenkin kiinnittää erityistä huomiota kytkinlaitteen sijaintiin sekä luoksepäästävyyteen. Näihin on tärkeää kiinnittää huomiota, jotta kytkinlaitteen tilaa päästään tarvittaessa muuttamaan mahdollisimman helposti.

## 5.2 Keskeytyskriittiset asiakkaat

Asiakkaiden keskeytyskriittisyyden määrittelyyn vaikuttavia asioita ovat kuinka kriittinen käyttöpaikka on yhteiskunnan toimivuuden kannalta ja kuinka suuri on käyttöpaikan kulutus. Kajavella asiakkaat on luokiteltu näiden asioiden pohjalta keskeytyskriittisyydeltään kuuteen eri luokkaan (10). Jakorajojen sijoittelussa näistä luokista tulee huomioida ”keskeytys sovittava” -luokat sekä mahdollisuuksien mukaan ”mastot ja tukiasemat” -luokka. Luokat ovat esitettyinä taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Käyttöpaikkojen keskeytyskriittisyys

Kriittisyysluokka	Keskeytyssuunnittelu	Selitys
10 Keskeytys sovittava, yhteiskunnallinen vaikutus	Keskeytyksestä sovittava asiakkaan kanssa	Yhteiskunnan kannalta kriittiset toimijat, kuten sairaalat, terveyskeskukset, vesihuolto, lämpöhuolto, kuljetuslogistiikka ja jätevedenhuolto
9 Keskeytys sovittava	Keskeytyksestä sovittava asiakkaan kanssa	Suuret kuluttajat, joille sähkökatkos voi aiheuttaa merkittäviä taloudellisia menetyksiä. Esimerkiksi kuluttajat, joiden vuosienenergia on yli 100 MWh/a
7 Sähköntuotanto	Otettava huomioon suunnittelussa	Sähköntuotanto
6 Mastot ja tukiasemat	Otettava huomioon suunnittelussa (keskeytys max 3 h)	Mastot ja tukiasemat
5 Huomioitava keskeytys-suunnittelussa	Otettava huomioon suunnittelussa	Oppilaitokset, päiväkodit, vanhainkodit, palvelutalot, julkinen hallinto, vesihuolto (ei niin kriittinen, keskeytys max 3 h)
0 Normaali ilmoitustapa		

Keskeytys sovittava -luokkaan kuuluvat käyttöpaikat ovat kohteita, joiden sähköntoimitus tulisi pyrkiä turvaamaan kaikissa tilanteissa. Tästä syystä näiden käyttöpaikkojen syöttömatkojen olisi hyvä olla mahdollisimman lyhyet sekä mahdollisuuksien mukaan toteutettuna maakaapeliyhteyksillä. Lisäksi jakorajojen tulisi olla kaukokäytettävillä kytkinlaitteilla.

Mastot ja tukiasemat -luokan kohteilla on yleensä olemassa akustot, joten ne kykenevät toimimaan tietyn ajan ilman verkosta saatavaa virtaa. Kajavella näiden

kohteiden maksimikeskeytysajaksi on määritelty kolme tuntia. Mastojen ja tukiasemien merkitys korostuu erityisesti suurhäiriötilanteissa. Tästä johtuen näille kohteille kannattaa antaa lisäpainoarvoa jakorajojen sijoittelun yhteydessä. Näiden kohteiden luona jakorajat tulisi pyrkiä sijoittamaan mahdollisimman lähelle käyttöpaikkaa. Lisäksi syöttö tulisi olla lähdöllä, jolla esiintyy vähemmän vikoja. Myös näillä kohteilla tulee jakoraja pyrkiä lähtökohtaisesti sijoittamaan kauko-ohjatulle kytkinlaitteelle.

## 6 KAJAVEN KJ-VERKON JAKORAJOJEN OPTIMOINTI

Tässä luvussa käsitellään tehtyä optimointityötä. Optimointityö voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen: lähtötilanteen määrittely, laskennallinen optimointi ja käytöntekninen optimointi.

### 6.1 Lähtötilanteen määrittely

Lähtötilanteen määrittelyssä ratkaistiin, miten työtä lähdetään toteuttamaan, miten eri asioita painotetaan, mikä on alkutilanne, josta työtä lähdetään toteuttamaan, ja toteutetaanko tarkastelu koko verkkoalueella vai rajataanko joitakin osia pois.

Ensimmäisenä todettiin, että NIS:iin dokumentoitu verkon kytkentätilanne täytyi saada vastamaan mahdollisimman hyvin verkon todellista kytkentätilannetta, jotta työn aikana suoritettaville laskennoille saataisiin luotettava lähtökohta. Tämän takia ensimmäinen työvaihe oli selvittää DMS:n ”poikkeavassa tilassa olevat kytkinlaitteet” -työkalulla kytkinlaitteet, jotka olivat eri tilassa DMS:ssä kuin NIS:ssä ja korjata nämä tilat NIS:iin oikeaksi. Tämän työvaiheen yhteydessä nousi esille, että NIS:n ja DMS:n välillä on joitakin eroja verkon kytkentätilanteen mallinnuksessa. Nämä erot johtuivat verkon uudistamishankkeista, jotka eivät olleet vielä kokonaan käyttöönotettuja ja siten myöskään lopullista dokumentointia ei ollut vielä tehtynä NIS:iin.

Työn lähtökohtia määriteltäessä linjattiin, että suurimmat painoarvot jakorajojen sijoittelussa laitetaan häviöiden minimoimiselle sekä kytkinlaitteiden käytettävyydelle. Näitä asioita painottamalla pyrittiin mahdollisimman pieneen häviöenergian kokonaismäärään sekä mahdollisimman monen jakorajana toimivan kytkinlaitteen etäkäyttöön.

Työssä päädyttiin myös rajaamaan tiettyjä verkon alueita pois. Kyseiset alueet olivat sellaisia, joille oli NIS:ssä jo dokumentoitu uusi verkko, mutta sitä ei kuitenkaan ollut vielä otettu käyttöön. Tähän rajaukseen päädyttiin, koska todettiin, että ei ole järkevää määrittää uusia jakorajojen sijainteja käytöstä poistuvalla vanhalla verkolle. Näillä alueilla jakorajojen optimointi olisi ollut mahdollista tehdä myös

uutta verkkoa käyttäen. Tätä ei kuitenkaan katsottu järkevästi tehdä, koska silloin ei olisi ollut käytettävissä verkon todellisia kuormia. Todellisten kuormien puute olisi johtanut laskentatulosten epäluotettavuuteen ja siten mahdollisesti huonoon lopputulokseen.

## **6.2 Laskennallinen optimointi**

Laskennallisen optimoinnin työvaihe oli suurin kokonaisuus työssä ja siten myös eniten aikaa vienyt työvaihe. Tämän työvaiheen voi jakaa kolmeen osakokonaisuuteen, jotka olivat laskennan taustatietojen oikeellisuuden todentaminen, tehonjakolaskentojen suoritus ja vikavirtalaskentojen suoritus. Laskennat tehtiin yhdelle sähköasemalle kerrallaan käyden jokaisen lähdön jokainen jakoraja yksittellen läpi. Tässä työssä kaikki laskennat suoritettiin Trimble NIS:n verkostolaskentaominaisuuksia hyödyntäen.

### **6.2.1 Laskennan taustatiedot**

Ennen laskentojen aloittamista tarkasteltiin laskentoihin vaikuttavien taustatietojen dokumentoinnin oikeellisuutta sekä pohdittiin dokumentoinnin puutteiden osalta parannuksia. Näillä toimilla tarkasteltiin sekä parannettiin laskentatulosten luotettavuutta. Tarkasteltaviin taustatietoihin kuuluivat taustaverkon mallinnus, NIS:iin mallinnettujen verkkokomponenttien oikeellisuus, jakorajojen sijainti, verkon kuormitustiedot, suojausten mallinnus sekä laskentaparametrien oikeellisuus.

Taustatiedoista varmuudella ajantasaisiksi voitiin todeta jakorajojen sijainti sekä suojausten mallinnus. Jakorajojen sijaintien oikeellisuudesta voitiin olla varmoja, koska ne päivitettiin vastaamaan verkon todellista tilannetta tämän työn lähtötilanteen määrittelyvaiheessa. Suojausten mallinuksen oikeellisuudesta voitiin olla varmoja, koska niihin liittyen Kajavella tehtiin vuoden 2020 syksyn aikana kennonterminaalimallinnus-projekti. Tämän aikana päivitettiin NIS:iin koko verkkoalueen releasettelutiedot vastaamaan todellisia verkossa olevia releasetteluja.

Verkon kuormitustietojen oikeellisuus todettiin tarkastelussa riittävän luotettavaksi. Verkon kuormitustiedot saadaan suoraan käyttöpaikkakohtaisten tuntimit-

taustietojen kautta, jolloin niiden voidaan olettaa olevan luotettavia. Kuormitustietoihin liittyviä ongelmia on ilmennyt välillä mittaustietojen siirrossa NIS:iin. Jakorajojen tarkastelun yhteydessä näillä ei kuitenkaan ole merkittävää vaikutusta lopputulokseen, ellei kyseessä ole poikkeuksellisen suuri virheellinen kulutuspiikki. Tämän työn yhteydessä tällaiset virheet kävivät ilmi laskentojen yhteydessä poikkeuksellisen suuresta jännitteenalenemasta, mutta yleisemmin nämä voidaan huomata päämuuntajakohtaisesta summatehokuvaajasta.

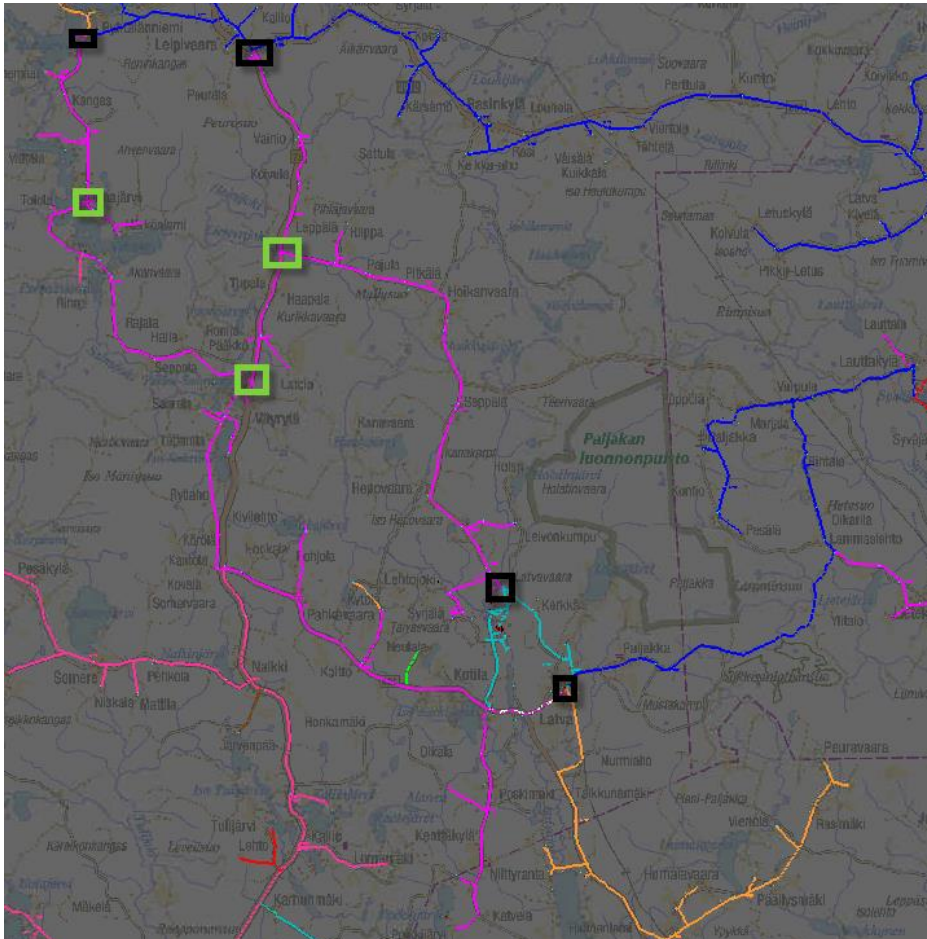
Laskentaparametreista laskentajännitteen paikkansapitävyys voidaan varmistaa ottamalla SCADA:sta sähköasemalta kiskojännitteen ja vertaamalla tätä arvoa NIS:iin sähköasemalla olevalle päämuuntajalle tallennettuun laskentajännitteen. Tämän työn yhteydessä tarkastelua aloittaessa huomattiin, ettei edellisestä tämän kaltaisesta tarkastelusta ole kovin kauaa aikaa. Näin ollen todettiin riittäväksi tarkasteluksi edellisessä tarkastelussa saatujen tietojen löytymisen varmistaminen NIS:stä.

NIS:iin mallinnettujen verkkokomponenttien tiedoissa esiintyi hankealueilla laskentaan vaikuttavia virheellisiä tai puutteellisia tietoja. Näillä alueilla virheelliset tiedot johtuivat Kajavella käytössä olevasta ”purettava kj-johto” -johtolajista. Tämä johtolaji aiheuttaa ongelmia laskennoissa, koska sen tekniset tiedot eivät vastaa maastossa olevien johtojen todellisia tietoja. Näitä kohteita ei kuitenkaan tarvinnut tämän työn puitteissa tehdyissä laskennoissa ottaa huomioon. Tämä perustui lähtötilanteen määrittelyssä tehtyyn linjaukseen, ettei jakorajatarkastelua suoriteta näille alueille. Hankealueita lukuun ottamatta voidaan verkkokomponenttien tietoja pitää luotettavina.

### **6.2.2 Tehonjako-mitoituslaskenta**

Tehonjakolaskennalla pyrittiin löytämään jakorajoille mahdollisimman optimaaliset sijainnit häviöenergian kannalta. Käytännössä tällä menetelmällä pyrittiin löytämään se kahden syöttävän pisteen välissä oleva kytkinlaite, jonka toimiessa jakorajana näiden kahden lähdön yhteenlaskettu häviöenergia olisi mahdollisimman pieni. Laskentatulosten vertailussa hyödynnettiin Excel-taulukkoa (liite 1), johon kirjattiin jakorajavaihtoehdot, niitä syöttävät lähdöt ja näiden lähtöjen laskentatulokset.

Seuraavassa esimerkissä käydään läpi kuvien avulla jakorajan optimaalisen sijainnin hakuprosessia. Kuvassa 1 violettina näkyvä johto on Paljakan sähköaseman Lehtojoen johtolähdön syöttämä alue. Kuvaan on korostettu mustalla kohdat, joissa jakorajat nykyisellään sijaitsevat ja vihreällä kohdat, joista jakorajoille lähdettiin haarukoimaan optimaalisempia sijainteja.

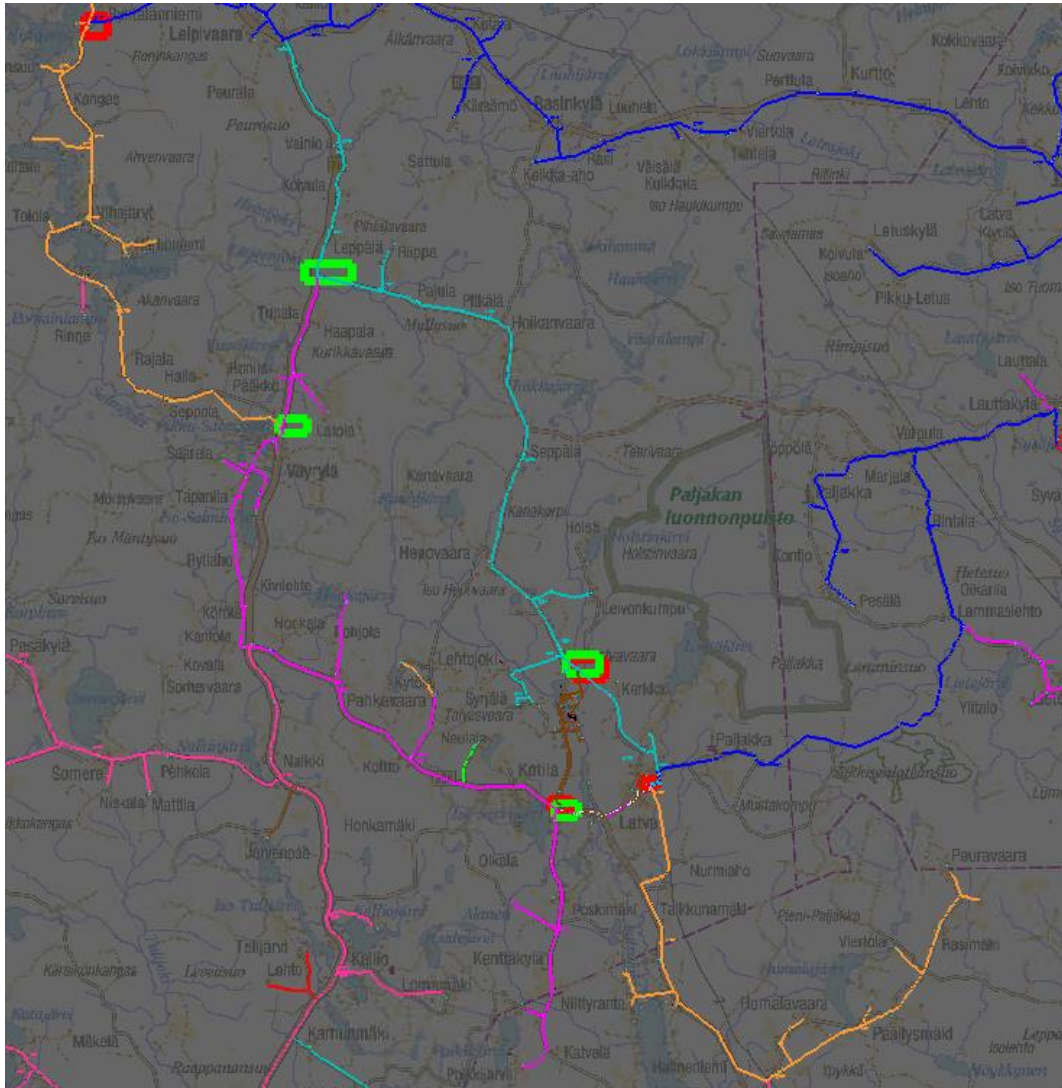


*KUVA 1. Paljakan sähköaseman johtolähtöjen verkkotopologia ennen jakorajamuutoksia*

Häviöenergian kannalta optimaalisimpien jakorajojen etsiminen toteutettiin yhdelle jakorajalle kerrallaan. Ensiksi suoritettiin johtolähtöjen laskennat nykyisellä jakorajalla ja kirjattiin saadut tulokset Exceliin. Tämän jälkeen lähdettiin haarukoimalla etsimään optimaalisinta kytkinlaitetta jakorajaksi. Haarukointi toteutettiin lähtökohtaisesti niin, että etsittiin nykyiseltä jakorajalta seuraava mahdollinen jakorajaksi soveltuva kytkinlaite kumpaankin jakorajan toisistaan erottamien johto-

lähtöjen syöttösuuntaan. Tämän jälkeen NIS-suunnitelmassa muutettiin vuorotellen jakorajat näille kytkinlaitteille ja suoritettiin tehonjakolaskenta. Tehonjakolaskennasta saadut tulokset kirjattiin Excel-taulukoon. Haarukointia jatkettiin niin kauan, että löydettiin kytkinlaite, jonka toimiessa jakorajana lähtöjen yhteenlaskettu häviöenergia oli pienin.

Kuvassa 2 on esitettyä Paljakan sähköaseman verkkotopologian muutokset yllä kuvatun laskentamenettelyn jälkeen. Kuvaan on korostettu punaisella nykyiset vanhat jakorajojen sijainnit ja vihreällä suunnitellut uudet jakorajojen sijainnit. Verrattaessa kuvaa 2 kuvaan 1 voidaan huomata, että violetilla näkyvän Lehtojoen johtolähdön syöttöalue on pienentynyt huomattavasti. Tämän seurauksena Lehtojoen johtolähdön häviöenergiamäärä sekä jännitteenalenema ovat pienentyneet huomattavasti. Laskentatuloksia on nähtävissä taulukossa 2 ja liitteessä 1.



KUVA 2. Paljakan sähköaseman johtolähtöjen verkkotopologia jakorajamuutosten jälkeen

TAULUKKO 2. Paljakan sähköaseman jakorajaoptimoinnin tulosten koonti

Asema	Lähtö	Eh (MWh)		Umin		Kauko-ohjattavat		Käsi­käyt­ty­i­set		Oikosulkulaskenta	Maasulkulaskenta
		Nykyinen	Suunnitelma	Nykyinen	Suunnitelma	kytkinlaitteet	kytkinlaitteet	kytkinlaitteet	kytkinlaitteet		
PJK	Hoikanvaara	1,35	0,92	20,15	20,15	1	1	2	1	Tehty/ok	Tehty/ok
PJK	Lehtojoki	20,63	0,74	19,7	20,16	2	1	2	0	Tehty/ok	Tehty/ok
PJK	PJK J04	0	1,5		20,14	0	0	1	0	Tehty/ok	Tehty/ok
PJK	Uva	0,31	0,31	20,15	20,15	1	0	1	0	Tehty/ok	Tehty/ok
<b>Summa</b>		<b>22,29</b>	<b>3,47</b>			<b>4</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>1</b>		

### 6.2.3 Vikavirtalaskenta

Vikavirtalaskentaan kuuluivat oikosulku- ja maasulkulaskenta. Se suoritettiin tarkastuslaskentana sen jälkeen, kun oli suoritettu sekä laskennallinen että käyttötekniinen optimointi. Tarkastuslaskennalla tarkoitettiin tässä yhteydessä sitä, että vikavirtalaskentoja ei käytetty varsinaiseen jakorajojen optimointiin vaan niiden avulla varmistettiin suojausten oikeanlainen toiminta jakorajamuutosten jälkeen.

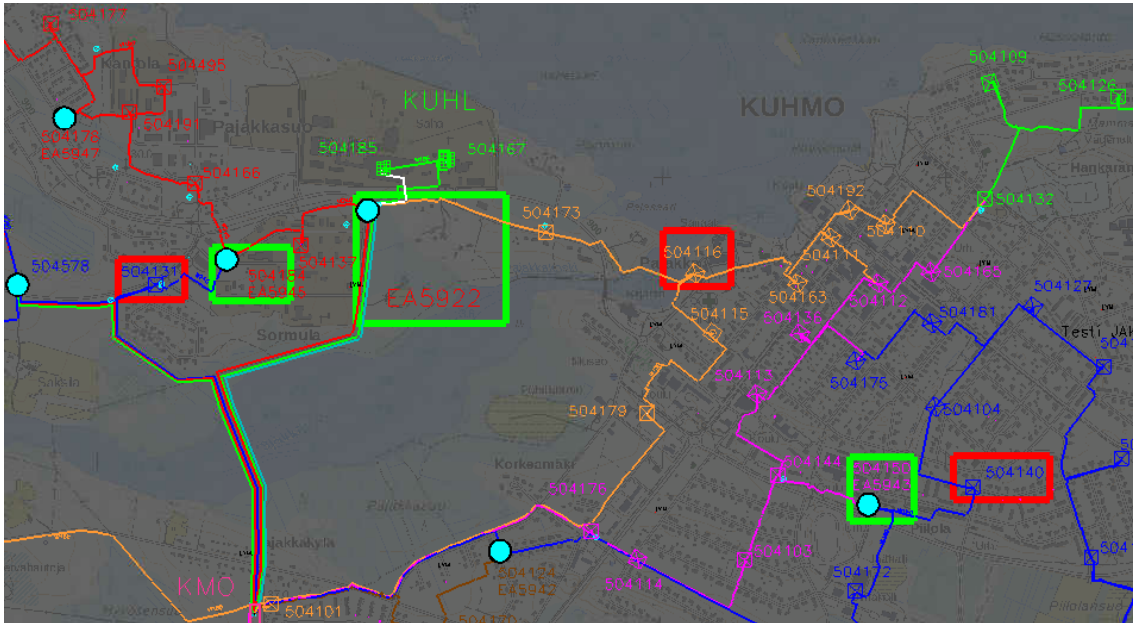
Tämän työn puitteissa ei tullut jakorajamuutoksia, jotka olisivat edellyttäneet muutoksia myös johtolähtöjen suojausasetteluihin. Yleisesti voidaan todeta, että pelkän ilmajohto- tai maakaapeliverkon sisällä tapahtuvissa jakorajamuutoksissa suojausasetteluiden muutoksia harvemmin tarvitaan. Muutoksia suojausasetteluihin tarvitaan yleisemmin silloin, jos jakorajamuutos tehdään ilmajohto- ja maakaapeliverkon välillä. Esimerkiksi jälleenkytkentöjen käyttöä on syytä tarkastella tällaisessa tilanteessa.

### 6.3 Käyttötekniinen optimointi

Tehonjakolaskennan avulla suoritettua häviöenergiaoptimoinnin jälkeen tarkasteltiin jakorajoja käyttöteknisestä näkökulmasta. Käyttöteknisistä asioista ensimmäisenä otettiin tarkasteluun kytkinlaitteiden käyttötapa. Tämä tarkastelu toteutettiin muodostamalla finder-kysely, jolla saatiin korostettua kartalle kaikki sellaiset muuntamot ja erotinasemat, joissa on kauko-ohjattavia kytkinlaitteita. Näin nähdään suoraan kartalta, missä lähimpänä jakorajoja olevat kauko-ohjattavat kytkinlaitteet ovat, ellei jakoraja ole jo valmiiksi sellaisella. Tämän jälkeen tulee vertailla, onko jakorajaa järkevää muuttaa kaukokäytettävälle kytkinlaitteelle. Tässä vertailussa huomioitiin muutoksen vaikutus häviöenergian määrään ja jollei siinä tapahtuva muutos ollut erityisen suuri, vaihdettiin jakoraja kaukokäytettävälle kytkinlaitteelle.

Kuvassa 3 on punaisella ympäröitynä kohteet, joissa nykyiset jakorajat sijaitsevat ja vihreällä kohteet, joihin jakorajat on suunniteltu siirrettäväksi. Turkoosit pallot kuvassa tarkoittavat finder-kyselyn kautta saatuja kauko-ohjattavia kytkinlaitteita. Kuvassa näkyvissä kohteissa on järkevää tehdä jakorajaoptimointia käyttöteknisestä näkökulmasta siirtämällä jakorajat kaukokäytettäville kytkinlaitteille. Näillä

muutoksilla pystytään parantamaan käytön tehokkuutta, kuitenkin ilman merkittävää vaikutusta häviöenergiamääriin.



*KUVA 3. Käyttöteknisestä näkökulmasta suunniteltuja jakorajamuutoksia*

Käsitteellisten kytkinlaitteiden osalta jakorajojen sijoittelussa tuli myös huomioida kytkinlaitteen katkaisukyky. Katkaisukyky huomioitiin jakorajojen osalta siten, ettei katkaisukyvyltään riittämättömiä erottimia käytetty jakorajoina. Tällaisille kohteille on Kajavella olemassa myös oma parannusohjelmansa. Tässä ohjelmassa pyritään järjestelmällisesti uusimaan vanhat riittämättömän katkaisukykyyn omaavat kytkinlaitteet.

Käyttötekniistä optimointia tehtiin myös keskeytyskriittisten käyttöpaikkojen perusteella. Näille kohteille pyrittiin saamaan mahdollisimman varma sähkönsyöttö kaikissa tilanteissa. Käytännössä tämä toteutettiin hakemalla finder-kyselyllä keskeytyskriittiset käyttöpaikat ja vertailemalla laskentojen avulla saatujen jakorajasijaintien toimivuutta näiden kannalta.

#### **6.4 Kokonaisoptimoinnin tulokset**

Alla olevissa taulukoissa on koottu tiedot tehtyjen jakorajatarkastelujen määrästä sekä suunnitelluilla muutoksilla saatavista hyödyistä. Taulukossa 3 on esitetty ja-

korajatarkestelun määrät. Taulukossa 4 on esitettyä 10 kV verkkoon suunnitel-tujen jakorajamuutosten vaikutukset. Taulukossa 5 on esitettyä 20 kV verkkoon suunniteltujen jakorajamuutosten vaikutukset.

Suunniteltuja jakorajamuutoksia on 48 kappaletta. Näillä muutoksilla voidaan pie- nentää vuotuista häviöenergian kokonaismäärää 231 MWh. Lisäksi näiden muu- tostien myötä jakorajoina toimivien kauko-ohjattujen kytkinlaitteiden määrä kas- vaksi 12 kappaleella. Kaikki suunnitellut jakorajamuutokset ja niiden vaikutukset ovat nähtävillä taulukoituina liitteissä 2–5 ja karttapohjalle kuvattuina liitteissä 6– 13.

*TAULUKKO 3. Tehdyt jakorajatarkastelut*

	20 kV	10 kV	Summa
Johtolähdöt, joille tehty jakorajatarkastelua (kpl)	115	53	168
Jakorajat, joille tehty jakorajatarkastelua (kpl)	222	83	305
Jakorajat, joille suunniteltu muutoksia (kpl)	26	22	48

*TAULUKKO 4. 10 kV verkon jakorajamuutokset*

	Häviöener- gia (MWh)	Käsi-käyttöiset kyt- kinlaitteet (kpl)	Kauko-ohjatut kytkinlaitteet (kpl)
<b>Nykyiset jakorajat (10 kV)</b>	524	47	36
<b>Suunnitellut jakorajat (10 kV)</b>	438	42	41
<b>Muutos</b>	-86	-5	+ 5

*TAULUKKO 5. 20 kV verkon jakorajamuutokset*

	Häviöener- gia (MWh)	Käsi-käyttöiset kyt- kinlaitteet (kpl)	Kauko-ohjatut kytkinlaitteet (kpl)
<b>Nykyiset jakorajat (20 kV)</b>	1942	73	149
<b>Suunnitellut jakorajat (20 kV)</b>	1797	66	156
<b>Muutos</b>	-145	-7	+ 7

## 7 KAJAVEN KJ-VERKON JAKORAJOJEN HALLINTA TULEVAISUUDESSA

Jotta tämän työn aikana tehdystä optimointityöstä saadaan mahdolliset hyödyt, tulee suunnitellut jakorajamuutokset viedä käytäntöön. Lisäksi tehdyt jakorajamuutokset tulee dokumentoida oikein NIS:iin, DMS:ään sekä SCADA:aan. Näiden työvaiheiden jälkeen jakorajojen osalta saavutetaan tilanne, jossa on tärkeää jatkaa jakorajojen hallintaa aktiivisella ja prosessimaisella toiminnalla. Jos jakorajojen hallintaa ei jatketa aktiivisesti, päädytään herkästi saman kaltaiseen tilanteeseen kuin tämän työn alussa, jossa ei ole täyttä varmuutta jakorajojen oikeista sijainneista ja dokumentoinnin paikkansapitävyydestä.

Jatkossa optimaalista jakorajatoteutusta tulee pyrkiä ylläpitämään prosessimaisen toiminnalla, jolloin jakorajojen tarkastelu toteutetaan jokaisen verkostomuutoksen yhteydessä. Käytännössä jakorajojen tarkastelun tulee olla osa suunnittelua aina tavoite- sekä yleissuunnittelusta lähtien. Suunnittelun yhteydessä jakorajat tulee sijoittaa tässä työssä käsiteltyjen tekijöiden pohjalta optimaalisiin sijainteihinsa.

Jakorajojen kannalta verkostomuutokset voi jakaa kolmeen osaan: yleissuunnitteluvaihe, sähkötekni- ja maastosuunnittelun vaihe sekä verkostomuutoksien käyttöönotto vaihe. Yleissuunnittelussa katsotaan isoa kuvaa ja riittää, että tiedetään, miltä johtolähdöltä muutoksen alla olevia kohteita tullaan syöttämään. Sähkötekni- ja maastosuunnittelun yhteydessä jakorajoille määritetään tarkat sijainnit laskentoihin ja käytettävyyteen pohjautuen. Käyttöönotto vaiheessa jakorajan optimaalisesta sijainnista tulee olla tieto, jolloin jakoraja tulee suoraan oikeaan sijaintiinsa. Käyttöönoton jälkeen tulee vielä varmistaa, että tieto jakorajan sijainnista on tallennettu oikein kaikkiin olennaisiin järjestelmiin. Tämä on erityisen tärkeää, jotta jakoraja myös säilyy sille suunnitellulla optimaalisella sijainnilla.

## 8 YHTEENVETO

Työn ensisijaisena tavoitteena oli optimoida Kajaven keskijänniteverkossa olevien jakorajojen sijainnit huomioiden sekä laskennalliset että käytöntechniset näkökulmat. Työn toisena tavoitteena oli muodostaa jakorajojen optimoinnista prosessi, jonka avulla jakorajoja jatkossa hallitaan.

Työn ensisijainen tavoite pystyttiin kokonaisuudessaan täyttämään hyvin, vaikka kaikkia kj-verkon jakorajoja ei ollut mahdollista optimoida. Se, ettei kaikkia jakorajoja ollut mahdollista optimoida, johtui tämän työn kannalta ongelmallisesta tavasta dokumentoida muutosvaiheessa olevien hankealueiden verkkoa NIS:iin. Tämä ongelma ratkaistiin rajaamalla tällaiset alueet pois optimointityöstä. Haasteita työssä esiintyi myös satunnaisista verkon dokumentointivirheistä, jotka vaikuttivat laskentoihin. Nämä haasteet olivat kuitenkin suhteellisen helposti ylitettävissä korjaamalla virheelliset dokumentoinnit oikeiksi. Näiden korjauksien seurauksena työn aikana parannettiin myös yleistä dokumentoinnin tasoa, jota voidaan pitää positiivisena saavutuksena.

Kj-verkon jakorajojen optimoinnin tuloksena saatiin suunnitelma, jonka myötä pystytään pienentämään verkossa esiintyvän häviöenergian määrää sekä parantamaan käytön tehokkuutta. Suunniteltujen jakorajamuutosten seurauksena vuosittainen häviöenergia pieneni 231 MWh. Lisäksi 12 käsikäyttöisellä kytkinlaitteella varustettua jakorajaa siirrettiin kauko-ohjatuille kytkinlaitteille. Tulokset sisältävät liitteet (yhteensä 13 kpl) jäävät luottamuksellisina vain toimeksiantajan käyttöön.

Työn toisena tavoitteena olleen prosessin muodostamisen voidaan todeta onnistuneen osittain. Varsinaista valmista prosessia tämän työn puitteissa ei ole tehty vaan on ennemminkin tunnistettu prosessin aikaansaamiseksi vaadittavat elementit. Työn aikana tunnistettiin, että tämä prosessi olisi sisällytettävä osaksi kaikkia verkostomuutoksia koskevia suunnitteluprosesseja, jolloin jakorajaoptimointia tehtäisiin aktiivisesti. Prosessimuotoisessa jakorajojen hallinnassa tulee huomioida tässä työssä esille tuodut tekijät: kytkinlaitteiden kaukokäytettävyys, keskeytyskriittiset asiakkaat ja häviöenergian määrä. Lisäksi prosessin tulee

edetä tavoite- ja yleissuunnittelun isosta kuvasta siihen, että verkostomuutoksien käyttööntovaiheessa jakorajat tulevat suoraan optimaalisille sijainneilleen ja ovat dokumentoituina oikein kaikkiin olennaisiin järjestelmiin.

## LÄHTEET

1. Kajave Oy 2021. Verkonarvotilastointi koontitaulukko 2020–2023. Sisäinen lähde.
2. Sähkömarkkinalaki 588/2013. Saatavissa <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588>. Hakupäivä 20.05.2021.
3. Niskanen, Jussi 2021. Kehityspäällikkö, Kajave Oy. Teams-haastattelu 26.1.2021.
4. ABB Oy 2000. ABB TTT-käsikirja.
5. Sähköturvallisuuslaki 1135/2016. Saatavissa <https://tukes.edilex.fi/fi/lainsaadanto/20161135>. Hakupäivä 20.05.2021.
6. Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot I: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto. 520 s. ISBN 978-951-672-360-3.
7. SFS-EN 50160 2010. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS.
8. Energiateollisuus ry 1994. Verkostosuositus SA 5:94: Keskijänniteverkon sähköinen mitoittaminen.
9. Korpinen, Leena 2008. Sähkövoimatekniikkaopus WWW-versio. Saatavissa <http://leenakorpinen.com/fi/julkaisut/opetusaineistoja/>. Hakupäivä 20.05.2021
10. Kajave Oy 2021. Keskeytyskriittisyyden pikaohje. Sisäinen lähde.

## **LIITTEET**

Liite 1 Laskentatulosten vertailu Excel (Luottamuksellinen)

Liite 2 10 kV:n jakeluverkon suunnitellut jakorajamuutokset (Luottamuksellinen)

Liite 3 20 kV:n jakeluverkon suunnitellut jakorajamuutokset (Luottamuksellinen)

Liite 4 Jakorajaoptimoidut johtolähdöt yhteenveto 10 kV (Luottamuksellinen)

Liite 5 Jakorajaoptimoidut johtolähdöt yhteenveto 20 kV (Luottamuksellinen)

Liite 6 Kestilän alueen suunnitellut jakorajamuutokset kartalla (Luottamuksellinen)

Liite 7 Vuolijoen alueen suunnitellut jakorajamuutokset kartalla (Luottamuksellinen)

Liite 8 Kajaanin taajama-alueen suunnitellut jakorajamuutokset kartalla (Luottamuksellinen)

Liite 9 Sotkamon ja Vuokatin keskustan suunnitellut jakorajamuutokset kartalla (Luottamuksellinen)

Liite 10 Sotkamon ja Vuokatin alueen suunnitellut jakorajamuutokset kartalla (Luottamuksellinen)

Liite 11 Kuhmon alueen suunnitellut jakorajamuutokset kartalla (Luottamuksellinen)

Liite 12 Paltamon alueen suunnitellut jakorajamuutokset kartalla (Luottamuksellinen)

Liite 13 Puolangan alueen suunnitellut jakorajamuutokset kartalla (Luottamuksellinen)