



TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Riku Kananen

Kannattavuus selvitys eri vaihtoehdoista vähentää lyhyitä sähkökatkoksia Kainuun Energian sähköverkkotoiminnassa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 7.5.2007.

Valvoja

Professori Matti Lehtonen

Ohjaaja

Diplomi-insinööri Paula Ala-Nojonen

Tekijä:	Riku Kananen
Työn nimi:	Kannattavuusselvitys eri vaihtoehtoista vähentää lyhyitä sähkökatkoksia Kainuun Energian sähköverkkotoiminnassa
Päivämäärä: 7.5.2007	Sivumäärä: 88
Osasto: Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto	
Professori: S-18 Sähköverkot ja suurjännitetekniikka	
Työn valvoja: Professori Matti Lehtonen	
Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri Paula Ala-Nojonen	
<p>Kainuun Energia on ottanut yhdeksi verkkoliiketoimintansa päätavoitteeksi vähentää lyhyitä sähkökatkoksia. Tämän diplomityön tavoitteena on tuottaa kannattavuuslaskentatietoa eri vaihtoehtoista vähentää lyhyitä sähkökatkoksia. Tavoitteena on myös tutkia KAH-arvojen käyttöä verkostoinvestointien kannattavuuden arvioinnissa. Kannattavuuslaskennan tarkoituksena on löytää toimenpiteet, jotka soveltuvat teknistaloudellisimmin käytettäväksi yhtiön jakeluverkossa.</p> <p>Tässä diplomityössä keskitytään käsittelemään menetelmiä, joihin investoiminen on perusteltua pelkästään lyhyiden sähkökatkosten vähenemisellä. Tehokkaimman menetelmän etsiminen aloitettiin tekemällä tilastotutkimus lyhyiden sähkökatkosten aiheuttajista, jotta potentiaalisimmat toimenpiteet osattaisiin valita jatkotarkasteluun. Kannattavuuslaskennan tueksi selvitettiin, kuinka paljon valitut menetelmät vähentävät lyhyitä sähkökatkoksia Kainuun Energian jakeluverkossa. Maasulkuvirran kompensointi-, eläin- sekä puoliventtiilisuojaainvestointien tuottoarviot laskettiin johtolähdöittäin, minkä perusteella johtolähdöt asetettiin kannattavuusjärjestykseen. Investointien tuotto muodostuu lyhyiden sähkökatkosten vähentymisestä, mikä arvoitettiin keskimääräisillä ja asiakasryhmäkohtaisilla KAH-arvoilla. Kannattavuuslaskennan tuloksena löydettiin tuottavin menetelmä ja investointijärjestys lyhyiden sähkökatkosten vähentämiseksi. Kannattavimmaksi menetelmäksi osoittautui häiriöalttiiden kipinäväliä korvaaminen puoliventtiilisuojailla.</p>	
Avainsanat: lyhyet sähkökatkokset, jälleenkytkentä, sähkön laatu, puoliventtiilisuojaat, maasulkuvirran kompensointi, eläinsuojat	

Author:	Riku Kananen
Name of the Thesis:	Profitability Analysis of Options to Mitigate Short Interruptions in the Electricity Distribution Network Business of Kainuun Energia
Date: May 7, 2007	Number of Pages: 88
Department: Department of Electrical and Communications Engineering	
Professorship: S-18 Power Systems and High Voltage Engineering	
Supervisor: Professor Matti Lehtonen Dr.Sc. (Tech)	
Instructor: Paula Ala-Nojonen M.Sc. (Tech)	
<p>One of the objectives of Kainuun Energia's distribution network business area is to mitigate the short interruptions in its medium voltage (MV) electricity distribution networks. This master's thesis provides a profitability analysis of the options suitable for completing the objective. The main goal is to point out the most applicable options taking the local conditions into account. Existing methods of evaluating the outage cost experienced by customers are also being studied in order to acquire information about using them in network investment planning.</p> <p>The thesis focuses on options that are designed to improve the power quality mainly by mitigating the short interruptions. Two studies based on interruption statistics were carried out in order support the selection of the most potential option in the profitability calculations. In the first study, causes of short interruptions, and in the second, effectiveness of the options, were estimated. The most potential options chosen were earth fault compensation, animal protection and combination surge arresters. As a conclusion, a list of real MV feeders in order of profitability was provided for every option under consideration. By comparing the reduction in outage costs for the same amount of investment, the most profitable option for the MV network of Kainuun Energia was found. This is to replace the old spark gaps by using combination surge arresters as over-voltage protectors.</p>	
Keywords: short interruptions, power quality, time-delayed autorecloser, high-speed autorecloser, surge arrester, earth fault compensation	

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Kainuun Energialle. Tavoite oli tuottaa taustatietoa sähkön laadun parannusinvestointien tueksi. Tausta-aineiston kerääminen aloitettiin syyskuussa 2006 ja diplomityö saatiin painokelpoiseksi toukokuussa.

Haluan kiittää diplomityöni ohjaajaa diplomi-insinööri Paula Ala-Nojosta sekä valvojaa professori Matti Lehtosta. Erityiskiitos kuuluu diplomi-insinööri Jussi Niskaselle avusta käytännön ongelmissa. Kainuun Energian henkilökunnan positiivinen työilmapiiri sekä kiinnostus diplomityötäni kohtaan ovat olleet suureksi avuksi projektini etenemiselle.

Kiitos vanhemmilleni opiskeluun kannustavasta ilmapiiristä sekä Ninalle kaikesta tuesta.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
2	LYHYET SÄHKÖKATKOKSET	3
2.1	JÄNNITEKUOPAT.....	4
2.2	STANDARDI.....	5
2.3	ENERGIATEOLLISUUS RY:N SUOSITUKSET LYHYISIIN SÄHKÖKATKOKSIIN	5
3	TAUSTATIETOA KAINUUN ENERGIASTA JA SEN TOIMINTAYMPÄRISTÖSTÄ ...	7
3.1	YHTIÖ	7
3.2	JAKELUVERKKOALUE.....	7
3.3	JAKELUVERKKO	8
3.3.1	<i>Johdot ja komponentit</i>	8
3.3.2	<i>Kulutus</i>	9
3.3.3	<i>Ympäristöolosuhteet</i>	9
3.3.4	<i>Pohdinta KAI:n jakeluverkosta ja toimintaympäristöstä</i>	10
4	SÄHKÖMARKKINALAKI JA TOIMITUSVARMUUS	11
4.1	SÄHKÖMARKKINALAKI	11
4.2	SÄHKÖMARKKINALAKI JA TOIMITUSVARMUUS: RAJAPYYKKEJÄ	12
5	KAH-ARVOT	14
6	LYHYIDEN SÄHKÖKATKOSTEN SYYT	16
6.1	JÄLLEENKYTKENTÄMÄÄRIEN KORRELOINTI SÄÄTILASTOIHIN.....	16
6.1.1	<i>Tuulen nopeus</i>	16
6.1.2	<i>Salamat</i>	17
6.1.3	<i>Johtopäätökset korrelaatiokertoimista</i>	19
6.2	VUOROKAUDENAICA- JA KUUKAUSIJAKAUMAT	20
6.2.1	<i>Kuukausijakaumat</i>	20
6.2.2	<i>Pjk:den tuntijakaumat</i>	23
6.2.3	<i>Ajk:den tuntijakaumat</i>	25
6.2.4	<i>Senerin arvio pjk:den aiheuttajista</i>	25
6.3	ELÄIMET JÄLLEENKYTKENTÖJEN AIHEUTTAJINA.....	26
6.4	MENETELMÄ	27
6.5	TULOKSET	29
7	LYHYIDEN SÄHKÖKATKOSTEN VÄHENTÄMISTOIMENPITEET	32
7.1	KOMPENSOINTI	32

7.2	YLIJÄNNITESUOJAUS	34
7.3	ELÄINSUOJAUS	36
7.4	KASVUSTON KÄSITTELY	38
7.5	KUNNON VALVONTA	39
7.6	RELEASETTELU	40
7.7	MUITA MENETELMIÄ	41
8	TOIMENPITEIDEN JÄLLEENKYTKENTÖJÄ VÄHENTÄVÄN VAIKUTUKSEN SELVITTÄMINEN	45
8.1	LASKENTAMENETELMÄ	46
8.1.1	<i>Esimerkki</i>	47
8.2	EPÄVARMUUSTEKIJÄT	49
8.3	TULOSTEN ESITTÄMINEN	51
8.4	KOMPENSOINTI	52
8.5	ELÄINSUOJAT	54
8.6	PUOLIVENTTIILISUOJAT	56
8.6.1	<i>Pohdinta</i>	60
8.7	KASVUSTON KÄSITTELY	61
8.7.1	<i>Pohdinta</i>	64
8.8	YHTEENVETO	64
9	KANNATTAVUUSSELVITYS ERI VAIHTOEHDOISTA VÄHENTÄÄ LYHYITÄ SÄHKÖKATKOKSIA	66
9.1	KANNATTAVUUSLASKENTA	66
9.2	NYKYARVOLASKENTA JA SISÄINEN KORKO	67
9.3	TULOSTEN ESITTÄMINEN	70
9.4	TULOKSET	72
9.4.1	<i>Kompensointi</i>	72
9.4.2	<i>Eläinsuojat</i>	74
9.4.3	<i>Puoliventtiilisuojat</i>	77
9.5	JOHTOPÄÄTÖKSET KANNATTAVUUSLASKENNAN TULOISTA	80
10	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	83
	LÄHDELUETTELO	86
	LIITTEET	

LYHENTEET

ajk	aikajälleenkytkentä
EMV	Energiamarkkinavirasto
ET	Energiateollisuus ry
IRR	internal rate of return, sisäinen korko
KAH	keskeytyksestä aiheutunut haitta
KAH-arvot	keskeytyksestä aiheutuneen haitan arvo, käytetään arvottamaan sähköverkossa tapahtuvia katkoksia euromääräisiksi
KAI	Kainuun Energia, yleisnimitys koko konsernista, johon kuuluu myös Kainuun Sähköverkko Oy.
KTM	Kauppa- ja teollisuusministeriö
LTY	Lappeenrannan teknillinen yliopisto
mp	muuntopiiri
NPV	net present value, nettonykyarvo
pjk	pikajälleenkytkentä
pupl	per unit per length
sa	sähköasema
Sener	Sähköenergialiitto ry
TKK	Teknillinen korkeakoulu
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto

1 JOHDANTO

Lyhyet sähkökatkokset ovat merkittävä osa sähkön laatua. Sähkön laadun merkitys asiakkaille on kasvanut lisääntyneen elektroniikan ja tietotekniikan käytön myötä. Kainuun Energia (KAI) on asettanut jakeluverkkotoimintansa ensimmäiseksi tavoitteeksi sähkön laadun parantamisen ja toiseksi hyvän tuoton saavuttamisen. Nämä tavoitteet yhdistyvät sähkömarkkinaviranomaisen eli Energiamarkkinaviraston (EMV) seuraavan valvontajakson vaatimusten myötä. Jakeluverkon investointien pitkäikäisyyden vuoksi sähkön laadun parantamisinvestoinnit kannattaa tehdä kuitenkin alueelliset olosuhteet huomioonottaen kulkien teknistaloudellista keskitietä. Tällöin viranomaisen valvontamallin muutoksiin liittyvät riskit minimoituvat pitkällä aikavälillä.

Lyhyet sähkökatkokset aiheutuvat sähköverkon automaattisista korjaustoimenpiteistä eli jälleenkytkennöistä, joiden avulla pyritään vähentämään pitkäaikaisia katkoksia sähkönjakelussa. Jälleenkytkennöillä pystytään korjaamaan muun muassa ilmastollisista ylijännitteistä ja eläimistä aiheutuvia oikojia maasulkuja. Ne ovat ongelma etenkin maaseudun jakeluverkoissa, missä käytetään ilmajohtoja. Lyhyitä sähkökatkoksia ei ole tarkoituksenmukaista vähentää pitkien katkosten lisääntymisen kustannuksella.

Tämän diplomityön tarkoituksena on löytää kannattavin toimenpide lyhyistä sähkökatkoksista aiheutuneen haitan minimoimiseksi Kainuun Energian jakeluverkkoalueella sekä etsiä kohteet, joissa niiden käyttöönotto johtaisi parhaimpiin tuloksiin. Tavoitteena on myös tutkia KAH-arvojen¹ käyttöä todellisten verkostoinvestointien kannattavuusselvitysten laadinnassa.

Tarkasteltavat toimenpiteet valitaan siten, että niiden käyttäminen on perusteltavissa pelkästään lyhyiden sähkökatkosten vähenemisellä. Diplomityössä käsiteltävät toimenpiteet perustuvat jo olemassa olevaan tekniikkaan, jotta niiden käyttöönotto olisi lähivuosina mahdollista.

¹ KAH (keskeytyksestä aiheutunut haitta). Tarkempi selitys ks. luku 5.

Tässä diplomityössä tehdään ensin arvio lyhyiden sähkökatkosten syistä. Jotta erilaiset toimenpiteet katkosten vähentämiseksi voitaisiin kohdentaa taloudellisesti kannattavimmin, tulisi vikojen syyt tuntea mahdollisimman tarkasti. Yksittäisen jälleenkytkennän syytä ei voida täydellä varmuudella tietää, mutta vuoden aikana tapahtuvien jälleenkytkentöjen aiheuttajien osuuksia voidaan arvioida tilastojen avulla. Syiden selvittämisen jälkeen arvioidaan jo käytössä olevien toimenpiteiden tehokkuuksia eli sitä kuinka paljon lyhyet sähkökatkokset ovat vähentyneet toimenpiteiden käyttöönoton jälkeen. Lopuksi tehdään johtolähtökohtainen kannattavuusselvitys toimenpiteiden käyttämisestä Kainuun Energian jakeluverkossa.

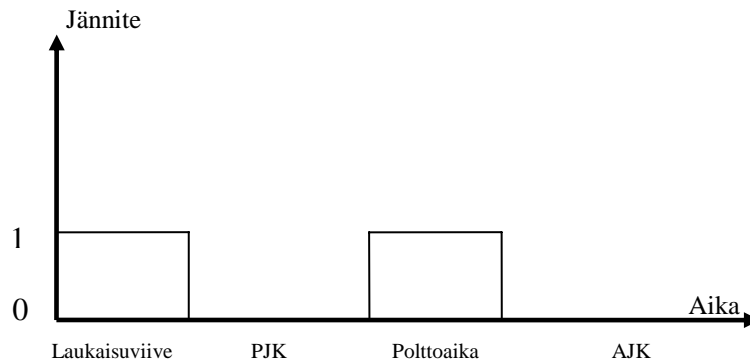
2 LYHYET SÄHKÖKATKOKSET

Lyhyet sähkökatkokset aiheutuvat pääosin jälleenkytkennöistä, jotka ovat sähköverkon automaattisia suojaustoimenpiteitä. Jälleenkytkentä tarkoittaa katkaisijan automaattista aukaisemista ja sulkemista lyhyen ajan kuluessa. Niillä pyritään poistamaan ohimeneviä vikoja ilmajohtoa sisältävissä sähköverkoissa. Ohimeneviä vikoja ovat esimerkiksi salaman iskujen, eläinten tai puiden oksien aiheuttamat maa- ja oikosulut. Häviävän pieni osa lyhyistä sähkökatkoksista aiheutuu esimerkiksi syöttöjärjestelyjen muutoksista, jotka tehdään harkitusti ilman, että johtolähdöllä olisi jokin katkaisijatoimintaa vaativa vika. Tästä eteenpäin lyhyitä sähkökatkoksia ja jälleenkytkentöjä käytetään tarkoittamaan samaa asiaa. Lyhyitä sähkökatkoksia voidaan käytännössä vähentää vain vähentämällä jälleenkytkentöjen tarvetta.

Jälleenkytkennät luokitellaan pikajälleenkytkentöihin (pjk) ja aikajälleenkytkentöihin (ajk). Jälleenkytkentäreleiden havaittua vian johtolähdöllä käynnistyy jälleenkytkentäohjelma (kuva 2.1). Vian havaitsemisen jälkeen seuraa noin 0,2 sekunnin viive ennen katkaisijan avaamista pjk:n jännitteettömäksi ajaksi, joka on asetuksista riippuen noin 0,2 – 0,4 sekuntia. Pjk:n jännitteettöntä aikaa seuraa polttoaika (myös noin 0,2 s). Pjk:ta edeltävän viiveen ja polttoajan tarkoitus on polttaa vian aiheuttaja pois vikapaikasta. Polttoajalla estetään myös kytkentävirtasysäystä aiheuttamasta turhaa ajk:ta. Jos vika on edelleen olemassa polttoajan jälkeen, katkaisija avataan ajk:n jännitteettömäksi ajaksi (0,5 – 3 min). Katkaisija suljetaan ja rele mittaa viiveen jälkeen, onko vika hävinnyt. Jos vika on edelleen olemassa, automatiikka avaa katkaisijan pysyvästi ja vika jää valvomohenkilökunnan selvitettäväksi. Jälleenkytkentäautomaatiikan asetukset tehdään tapauskohtaisesti, joten edellä mainitut arvot ovat vain suuntaa-antavia.

Valvomohenkilökunta pyrkii paikantamaan ja erottamaan vioittuneen verkon osan mahdollisimman nopeasti, jotta sähkö voidaan palauttaa verkon ehjiin osiin. Paikantaminen tapahtuu vikapaikanlaskennan ja kytkentäkokeilujen kokemusta hyväksi käyttäen. Kytkentäkokeilut aiheuttavat lyhytaikaisia säh-

köt ”päällä ja pois” – tilanteita, mutta ne ovat välttämättömiä toimenpiteitä, jotta vika voidaan paikantaa ja korjaustoimet aloittaa.



Kuva 2.1. Jälleenkytkentäohjelman periaatekaavio.

2.1 Jännitekuopat

Jännitekuopat ovat satunnaisia jännitteen alenemia, joiden suuruus on 1 - 90 % jäljellejäävänä jännitteenä [Sfs 00]. Niitä esiintyy yleensä suurivirtaisten tapahtumien kuten oikosulkuvikojen, kytkintoimintojen, muuntajien magnetoinnin, suurten moottoreiden sekä muiden kuormien käynnistämisen yhteydessä. Jännitekuopan syvyys riippuu virran suuruudesta sekä sähköverkon jännitejäykkyydestä [Hei 05].

Oikosulun tapauksessa vikaantuneessa johtolähdössä tapahtuu pjk ja/tai ajk. Muissa saman sähköaseman johtolähdöissä suuri oikosulkuvirta aiheuttaa jännitekuopan ennen kuin katkaisija laukeaa. Maasulku ei yleensä aiheuta jännitekuoppia muissa sähköaseman johtolähdöissä, koska maasulkuvirta on usein alhaisempi kuin kuormitusvirta. Jännitekuoppa syntyy myös silloin, kun katkaisija suljetaan. Silloin kaikki johtolähdöllä sijaitsevat jakelumuuntajat magnetoituvat yhtä aikaa ja ottavat suuren virran. Isot moottorit ottavat myös käynnistyessään suuren käynnistysvirran. Joissain tapauksissa viat eivät itsessään aiheuta jännitekuoppia, mutta katkaisijoiden sulkeutuminen aiheuttaa. [Hei 05]

Jännitekuoppien haittavaikutukset ovat hyvin samantyyppisiä kuin lyhyiden sähkökatkostenkin. Siksi jännitekuopat voidaan rinnastaa lyhyisiin sähkökatkoksiin. Lyhyitä sähkökatkoksia vähentämällä vähennetään myös jännitekuoppia ja sähkön laadun paraneminen yhdellä johtolähdöllä vaikuttaa sähköaseman kaikilla johtolähdöillä. Jännitekuopat eivät ole yhtä yksiselitteinen sähkön laadun osatekijä kuin lyhyet sähkökatkokset, eikä niitä ole huomioitu EMV:n esittelemissä suuntaviivoissa [Ene 07] seuraavalle valvontajaksolle 2008 - 2011. Jännitekuoppia ei oteta huomioon tämän diplomityön tarkastelussa, eikä niitä käsitellä enää myöhemmin. Niiden jälleenkytkentöihin rinnastettavat vaikutukset on kuitenkin hyvä tiedostaa lyhyiden sähkökatkosten vähentämiseen tähtääviä investointeja suunniteltaessa, koska samalla jännitekuopatkin vähenevät.

2.2 Standardi

Suomessa voimassa oleva standardi SFS-EN 50160 *Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet* määrittelee sähkön laadun muun muassa lyhyiden keskeytysten osalta. Lyhyellä keskeytyksellä tarkoitetaan standardin mukaan korkeintaan kolmen minuutin kestoisia keskeytyksiä. Lyhyiden keskeytysten määrän mainitaan vaihtelevan vuosittain muutamasta kymmenestä useisiin satoihin ja 70 % voi olla kestoltaan alle yhden sekunnin. [Sfs 00]

2.3 Energiateollisuus ry:n suositukset lyhyisiin sähkökatkoksiin

Energiateollisuus ry¹ (ET) on julkaissut toukokuussa 2005 ohjeen *Sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje*. Siinä otetaan kantaa sähkömarkkinalain pykälään 27 c ja ohjeistetaan sen tulkintaa koskien virhetä sekä virheestä aiheutuvia seuraamuksia. Ohje ottaa kantaa lyhyiden sähkökatkosten määrään eli pjk:den ja ajk:den summaan. Suurimmat sallitut määrät on annettu suosituksena neljässä eri olosuhteessa. Yksikkönä käytetään kappaletta asiakasta kohden vuoden aikana. ET:n suositukset ovat taulukossa 2.1. Suositukset eivät kuitenkaan ole yhtiöitä sitovia. Kyseessä ole-

¹ Energiateollisuus ry on sähkö- ja kaukolämpöalaa edustava elinkeino- ja työmarkkinapolitiinen etujärjestö Suomessa.

vat suositukset ovat lähes samat kuin vuonna 2001 Sähköenergiailiiton¹ (Sener) julkaisemassa suosituksessa [Sen 01] pj-k-määrille. Ne ovat olleet käytössä siitä lähtien ja osoittautuneet toimiviksi. [Ete 05]

Taulukko 2.1. ET:n suosittelemat lyhyiden sähkökatkosten määrät sähkömarkkinalain mukaiseksi virherajaksi [Ete 05].

olosuhde	lyhyet keskeytykset
	[kpl/a]
kaupunki	20
taajama	50
haja-asutus	100
erityisolosuhteet	yhtiön määriteltävissä

Energiateollisuuden taulukon 2.1 mukaiset arvot ovat voimassa normaaliolosuhteissa. Normaaliolosuhteista poikkeavat tilanteet ovat Force majeure², poikkeukselliset sääolot ja muiden hallussa olevasta suurjänniteverkosta johtuvat keskeytykset. Poikkeuksellisiin sääoloihin luetaan muun muassa kova tuuli, raju paikallinen ukkonen ja merkittävä jää- tai lumikuorma. [Ete 05]

¹ Sener ry on sähkökauppaa ja –verkkotoimintaa sekä tutkimusta, kehitystä ja opetustoimintaa sähköalalla kehittävä yhdistys. Ennen vuotta 2005 se hoiti myös nykyisen Energiateollisuuden tehtäviä. [Ete 05]

² ylivoimainen este, esimerkiksi sota tai suuronnettomuus

3 TAUSTATIETOA KAINUUN ENERGIASTA JA SEN TOIMINTAYMPÄRISTÖSTÄ

3.1 Yhtiö

Kainuun Energia Oy harjoitti sähköverkkotoimintaa vuoden 2006 loppuun saakka. Vuoden 2007 alusta sähköverkkotoimintaa on harjoittanut Kainuun Energia Oy:n kokonaan omistama tytäryhtiö Kainuun Sähköverkko Oy. Sähköverkkotoiminnan yhtiöittäminen toteutettiin sähkömarkkinalain edellytysten johdosta. Tässä diplomityössä Kainuun Energiaa (KAI) käytetään yleisnimikkeenä kuvaamaan koko konsernia, johon myös Kainuun Sähköverkko Oy kuuluu.

Nykyisen Kainuun Energian juuret ulottuvat vuoden 1994 alkuun, kun Kainuun Sähkö Oy aloitti maakunnan kattavana sähköyhtiönä. Vuonna 1997 yhtiön vähemmistöomistajaksi tuli ruotsalainen energiayhtiö Granninge AB. Yhtiön nimi muuttui vuonna 2002 Granninge Kainuu Oy:ksi, kun Granninge AB:stä tuli enemmistöomistaja. Seuraavana vuonna Sydkraft AB osti Granninge AB:n ja vuonna 2005 Sydkraft AB-nimi vaihdettiin E.ON Sverige AB:ksi. Samaan aikaan Granninge Kainuu Oy:n nimi muutettiin Kainuun Energia Oy:ksi. Yhtiön pääomistaja on E.ON Sverige AB (50,5 %) ja muut omistajat ovat Kajaanin kaupunki (37,5 %) sekä Sotkamon kunta (12 %).

3.2 Jakeluverkkoalue

Kainuun Energian jakeluverkkoalue muodostuu yhdeksästä Kainuun kunnasta sekä Kestilästä ja Pyhännästä, joissa on yhteensä noin 90 000 asukasta. Alueen sijoittuminen Suomen kartalla on esitetty kuvassa 3.1. Sen maapinta-ala on 22 500 km², joka on 7 % Suomen pinta-alasta. Asukastiheys jakeluverkkoalueella on lähteiden [Kai 06], [Pyh 06] ja [Kst 06] perusteella laskettuna 3,9 as./maa-km², kun maan keskiarvo on 17,3. Kainuun Energian jakeluverkkoalue on suurelta osin maaseutua ja samalla harvaan asuttua.



Kuva 3.1. Kainuun Energian verkkovastuualue (lähde: Adato Energia Oy).

3.3 Jakeluverkko

3.3.1 Johdot ja komponentit

Kainuun Energian yhteenlaskettu verkostopituus on 12 645 km sisältäen 0,4 – 110 kV:n jännitetasot. Keskijänniteverkon pituus on 7 096 km, mikä jakautuu 177 johtolähdölle. Yhtiöllä on verkostoa 231 metriä jokaista sähköliitymää kohden maan keskiarvon ollessa lähteestä [Ene 05] laskettuna 118 metriä. Keskijänniteverkon johtopituudet johtolaaduittain on esitetty taulukossa 3.1.

Taulukko 3.1. Kainuun Energian keskijänniteverkon johtopituudet ja -laadut vuonna 2006.

avojohto	PAS	ilmakaapeli	maakaapeli
[km]	[km]	[km]	[km]
6678	129	9	280

Keskijänniteverkon (6 – 70kV) kaapelointiaste on maaseutus sähköyhtiöllä tyypillisesti hyvin pieni. KAI:n keskijänniteverkolle se on 3,9 %. Lähteen [Ete 06]

mukaan laskettuna keskimääräinen kaapelointiaste on Suomessa 9,6 %. KAI:n jakeluverkon avojohdojen keski-ikä on pylväiden kyllästysvuoden perusteella laskettuna noin 25 vuotta. EMV:n valvontamallissa maksimi-ikä on rajoitettu 45 vuoteen. Siihen verrattuna jakeluverkon avojohdot ovat hieman keskimääräistä vanhempaa.

3.3.2 Kulutus

Jakeluverkossa siirrettiin energiaa vuonna 2005 yhteensä 0,718 TWh, mikä vastaa alle prosenttia Suomen sähköenergian kulutuksesta. Asiakasryhmien koot ja niiden kulutukset on esitetty taulukossa 3.2. Asiakasryhmän *kotitalous* muodostavat vakituinen asutus ja loma-asutus. *Kotitalous*-asiakasryhmään kuuluu 89 % kulutuspaikoista ja sen käyttämä energia muodostaa 40 % yhtiön alueella siirretystä energiasta. *Teollisuus* ja *palvelu* kuluttavat yhteensä lähes saman verran kuin *kotitalous*. Vapaa-ajan asuntoja on liittyneenä KAI:n jakeluverkkoon noin 9 300 kpl eli noin 17 % sähkönkäyttöpaikoista on vapaa-ajan asuntoja. Niiden vuosittainen kulutus on kuitenkin vain noin 0,030 TWh eli 4 % jakeluverkossa siirretystä energiasta.

Taulukko 3.2. Asiakasryhmien suuruudet ja osuudet kulutuksesta sekä käyttöpaikoista KAI:n jakeluverkossa 2005.

asiakasryhmä	määrä		kulutus	
	[kpl]	[%]	[TWh]	[%]
kotitalous	48178	89	0,290	40
maatalous	1636	3	0,040	6
teollisuus	427	1	0,154	21
julkinen	1385	3	0,092	13
palvelu	2542	5	0,142	20

3.3.3 Ympäristöolosuhteet

KAI:n jakeluverkon avojohdoista sijaitsee metsässä arviolta 70 %. Koko maan vastaava luku on 34 % [Ete 06]. 1940- ja 50-luvuilla rakennetut johtokadut rakennettiin viivasuoriksi keskelle metsiä ja siten mahdollisimman lyhyiksi. 1960- ja 70-luvuilla johtokadut pyrittiin sijoittamaan teiden läheisyyteen jättäen usean kymmenen metrin metsäkaistale näkösuojaksi. Tästä syystä

huomattava osa jakeluverkosta sijaitsee edelleen metsien ympäröiminä. Vasta 70-luvun puolivälin jälkeen vakiintui käytäntö rakentaa avojohtoja näköetäisyydelle teistä. Nykyään jakeluverkkoa uusitaan vuosittain ja samalla metsän ympäröimänä sijaitsevat johdot siirretään mahdollisuuksien mukaan teiden varsille paremman sähkön laadun saavuttamiseksi.

3.3.4 Pohdinta KAI:n jakeluverkosta ja toimintaympäristöstä

Kainuun Energian jakeluverkkoalue on kansallisessa vertailussa keskimäärin harvemmin asuttua kuin muualla Suomessa ja keskijänniteverkkoa on enemmän sähköliittymää kohden. Jakeluverkkoalue on myös keskimäärin metsäisempää verrattuna Suomen keskiarvoon. KAI:n jakeluverkkoalue kattaa 7 % Suomen pinta-alasta, mutta Suomen asukkaista alueella asuu alle 2 %. Harvaanasuttu toimialue tarkoittaa väistämättä pitkiä johtopituuksia sähköliittymää kohden. Näiden tietojen valossa näyttäisi siltä, että Kainuun Energian jakeluverkko olisi erityisen altis lyhyille sähkökatkoksi.

4 SÄHKÖMARKKINALAKI JA TOIMITUSVARMUUS

4.1 Sähkömarkkinalaki

Nykyinen sähkömarkkinalaki (386/1995) astui voimaan kesäkuun alussa 1995 ja siihen on tehty useita lisäyksiä ja muutoksia sen jälkeen. Lain tarkoituksena on muun muassa turvata kohtuuhintaisen ja riittävän hyvälaatuisen sähkön saanti asiakkaille. Kohtuuhintainen sähkö varmistetaan luomalla tarpeeksi hyvät olosuhteet kilpailulle niin sähkön tuotannossa, myynnissä, tuonnissa kuin viennissäkin. [Par 06b]

Sähkömarkkinalain mukaan sähkön tuotanto, myynti, siirto ja jakelu on eriytettävä toisistaan. Eriyttämisen ensimmäisessä vaiheessa sähkön myynnin ja tuotannon osalta markkinat avattiin kilpailulle vuonna 1995. Aluksi kilpailuttaminen oli mahdollista vain suurille yli 500 kW:n asiakkaille. Vuoden 1997 alusta tehorajan poistuttua kilpailun eduista pääsivät nauttimaan kaikki sähköasiakkaat. Käytännössä pienimpien sähköasiakkaiden pääsy kilpailun piiriin aukeni vasta syksyllä 1998, kun tuntitehon mittaustarve poistui tyyppi-kuormituskäyräjärjestelmään siirtymisen myötä [Par 06b]. Siirron ja kaupan eriyttämisen takarajana oli vuoden 2007 alku, jolloin useita sähköverkkoyhtiöitä perustettiin Suomeen.

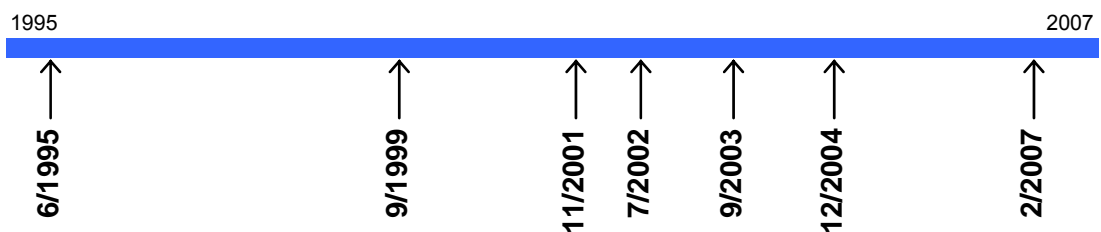
Sähköverkon haltijoilla ei ole markkinoiden säätelyä painetta pitää toimintaansa mahdollisimman tehokkaana ja hintoja alhaisena. Monopoliaseman väärinkäytön ehkäisemiseksi sähkömarkkinalain perusteluissa mainitaan, että verkkopalvelun hinnoittelulle ja tehokkuudelle on syytä asettaa vaatimuksia. EMV julkaisee etukäteen valvonnan periaatteet tietyille valvontajaksolle, mutta tekee valvontapäätökset jälkikäteen verkkoyhtiöiden tilinpäätöstietoihin ja kullakin hetkellä voimassa olevan valvontamallin periaatteisiin perustuen. [Par 06b]

Sähkömarkkinalaki määrää verkonhaltijoille kehittämisvelvollisuuden, mikä tarkoittaa, että verkonhaltijan täytyy pitää verkkonsa asiakkaiden kohtuullis-

ten tarpeiden mukaisena ja turvata riittävän hyvälaatuisen sähkön saanti. Sähkömarkkinalain mukaan sähkötoimitus on virheellinen, jos laatu tai toimitustapa ei ole käyttäjän ja jakeluverkonhaltijan sopimuksen mukainen. Toimitus on myös virheellinen, jos laatu ei vastaa Suomessa noudatettavia standardeja, toimituksessa on ollut pitkäaikaisia keskeytyksiä tai keskeytyksiä on ollut usein. Suomessa voimassaoleva standardi, joka määrittelee sähkön laadun, on SFS-EN 50160. Standardin sisältö lyhyiden sähkökatkosten osalta on käsitelty luvun 2 kohdassa 2.2.

4.2 Sähkömarkkinalaki ja toimitusvarmuus: rajapyykkejä

Nykyistä sähkömarkkinalakia edelsi vuonna 1979 asetettu sähkölaki (319/1979). Sähkölaki otti kantaa pääasiassa sähköturvallisuuteen. Vuonna 1980 Kauppa- ja teollisuusministeriö (KTM) vahvisti sähkötoimitusehdot, joiden mukaan sähkölaitoksen tulee huolehtia siitä, että sähköverkon ”käyttöhäiriöt ja laatupoikkeamat pysyvät teknillisen käytännön ja taloudellisen tarkoituksenmukaisuuden edellyttämässä rajoissa” [Ktm 06]. Kuva 4.1 esittää tärkeimpiä lakiin tehtyjä muutoksia sekä tapahtumia, joilla on ollut oletettavasti merkitystä lain suhtautumisessa toimitusvarmuuteen. Kuvassa esitetään rajapyykkejä vuonna 1995 voimaan tulleen sähkömarkkinalain jälkeen.



Kuva 4.1. Sähkön toimitusvarmuuden rajapyykkejä lainsäädännön kehityksessä.

- | | |
|--------|--|
| 6/1995 | Sähkömarkkinauudistus erotti sähkön laadun ja sähköturvallisuuden sääntelyn. Sähkömarkkinalakiin (386/1995) sisällytettiin sähkön laadun sääntely. |
| 9/1999 | Sähkömarkkinalakiin lisättiin määritelmä sähkön toimituksen virheestä ja siitä aiheutuvista seuraamuksista. Lain mukaan ky- |

seessä on virhe, jos sähkön laatu ei vastaa Suomessa noudatettavia standardeja tai jos keskeytyksiä on kohtuuttoman paljon. Laki ottaa tässä vaiheessa kantaa lyhyisiin sähkökatkoksiin standardien kautta.

- 11/2001 Pyryn ja Janikan päivän myrskyt aiheuttivat huomattavia vahinkoja Suomen sähköjakeluverkoille ja siitä seurasi asiakkaille pitkiä sähkökatkoksia. KTM asetti selvitysmiehen tutkimaan toimitusvarmuuden parantamista.
- 7/2002 Selvitysmies Jarl Forsténin raportti julkaistiin. Siinä ehdotettiin vakiokorvauskäytäntöä yli 12 tunnin keskeytyksille.
- 9/2003 Sähkömarkkinalain lisäys vakiokorvauksista tuli voimaan.
- 12/2004 Sähkömarkkinalain muutos 1172/2004 tuli voimaan ja samalla EMV otti käyttöön valmistellun valvontamallin. Sähkön laatu, mukaan lukien lyhyet sähkökatkokset, eivät sisälly vuosina 2005 - 2007 voimassa olevaan valvontamalliin sallittua tuottoa määritettäessä.
- 2/2007 EMV julkaisi hinnoittelun *kohtuullisuuden arvioinnin suuntaviivat vuosille 2008 – 2011* [Ene 07]. Sen mukaan ”Energiamarkkinavirasto ottaa sähkön laadun ja sähkötoimituksissa tapahtuneet keskeytykset huomioon sähköverkonhaltijan verkkotoiminnan tuoton arvioinnissa sähkötoimituksen keskeytyksistä asiakkaalle aiheutuvana haittana (KAH)”. Lyhyiden sähkökatkokosten osalta mukana verkkotoiminnan tuoton arvioinnissa ovat pika- ja aikajälleenkytkennät. [Ene 07]

5 KAH-ARVOT

Keskeytyksestä aiheutunut haitta (KAH) on tapa arvottaa rahamääräisenä sekä lyhyitä että pitkiä sähkökatkoksia. KAH-arvot, joiden yksikkö on €/kWh tai €/kW, määritetään eri asiakasryhmille erilaisten kyselyiden ja haastatteluiden perusteella. Arvot laaditaan jokaiselle asiakasryhmälle erikseen niin keskeytysten määrien kuin kestonkin perusteella. Näiden arvojen perusteella voidaan määrittää jakeluverkonhaltijan keskeytyskustannukset, joita käytetään osana sähköverkonhaltijan verkkotoiminnan tuoton arvioinnissa viranomaisen valvontamallissa 2008 – 2011 [Ene 07].

Lyhyistä sähkökatkoksista aiheutunut haitta on riippuvainen niiden esiintymistiheydestä ja ajankohdasta sekä laitteiden käyttäytymisestä lyhyiden katkosten tapahtuessa. Haitta voi olla suoranaista, välillistä tai henkistä. Suoranaista menetystä voi koitua asiakkaalle vikaantuneesta laitteesta tai tallentamattomien tietojen, myynnin tai työpanoksen menetyksestä. Välilliset kustannukset aiheutuvat mahdollisesti resurssien uhraamisesta tai palvelujen käyttämisestä toimintojen palauttamiseen. Rahallisesti hankalampaa on arvioida lyhyistä katkoksista aiheutuvaa henkistä haittaa. Henkistä haittaa aiheutuu, kun asiakas kokee saavansa huonolaatuista sähköä ja tulleensa palvelluksi huonosti. [Sen 01]

KTM:n Lappeenrannan teknilliseltä yliopistolta (LTY) ja Tampereen teknilliseltä yliopistolta (TTY) tilaamien sähkönjakelun toimitusvarmuutta koskevien selvitysten tuloksena syntyneessä raportissa [Par 06a] on esitetty yhteenveto Teknillisen korkeakoulun (TKK) ja TTY:n vuoden 2005 lopussa julkaistusta perusteellisesta keskeytyshaittojen tutkimuksesta [Sil 05]. Yhteenvedon lisäksi raportissa on laadittu tarkennuksia tutkimuksen tuloksiin keskimääräisten KAH-arvojen saamiseksi asiakasryhmille. Tarkennukset on tehty määrittämällä kertoimet, jotka ottavat huomioon katkosten ajankohdan sekä jälleenkytkentöjen kasautumisen vaikutukset. Lisäksi raportissa on esitetty kertoimet KAH-arvojen muuttamiseksi siten, että keskeytyskustannusten laskennassa voidaan käyttää keskitehoa huipputehon sijaan. Raportin

[Par 06a] esittämät kertoimilla tarkennetut KAH-arvot viiden asiakasryhmän jälleenytkennöille on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. Asiakasryhmäkohtaiset KAH-arvot jälleenytkennöille.

	pjk	ajk
	[€/kW]	[€/kW]
kotitalous	0,11	0,48
maatalous	0,20	0,62
teollisuus	2,19	2,87
julkinen	1,49	2,34
palvelu	1,31	2,44

EMV:n julkaisemissa suuntaviivoissa [Ene 07] valvontajaksolle 2008 - 2011 esitetään käytettäväksi keskimääräisiä KAH-arvoja. Keskimääräiset KAH-arvot jälleenytkennöille on esitetty taulukossa 5.2. Taulukon arvot on saatu taulukon 5.1 arvoista painottamalla niitä valtakunnallisella asiakasryhmien energijakaumalla. Tämä käy ilmi lähteestä [Hon 06], jossa vastaavat keskimääräiset arvot on laskettu. Taulukon 5.2 arvot ovat alustavia, jotka mahdollisesti muuttuvat Energiamarkkinaviraston Lappeenrannan teknilliseltä yliopistolta keväällä 2007 tilaaman selvitystyön perusteella. Molempien taulukoiden KAH-arvot on esitetty vuoden 2005 hintatasossa.

Taulukko 5.2. Keskimääräiset KAH-arvot jälleenytkennöille.

pjk	ajk
[€/kW]	[€/kW]
0,89	1,53

6 LYHYIDEN SÄHKÖKATKOSTEN SYYT

Tiedossa olevia lyhyiden sähkökatkosten syitä on useita, mutta niitä on vaikea osoittaa yksittäisille vioille. Vielä muutama vuosi sitten Kainuun Energian vallitseva käytäntö oli, että jälleenkytkentäreleiden laskurien lukemat käytiin keräämässä kuukausittain sähköasemilta ja ainoa tieto jälleenkytkennöistä oli johtolähtökohtainen kuukausisumma. Nykyään releet on integroitu käytöntukijärjestelmään, johon jälleenkytkentätiedot rekisteröityvät yksilöidysti aikaleimalla varustettuna. Jälleenkytkennän tapahtuma-ajan tunteminen parantaa mahdollisuutta selvittää lyhyiden sähkökatkosten syitä.

Sener teki vuonna 2001 selvityksen pj:den aiheuttajista. Senerin tutkimusten tulokset on esitetty kohdassa 6.2.4. Tässä diplomityön kannattavuuslaskennan tueksi haluttiin tehdä arvio niin pj:den kuin aj:denkin syistä, koska niiden avulla voidaan päätellä, minkälaiset toimenpiteet toimisivat mahdollisesti tehokkaimmin lyhyiden sähkökatkosten vähentämisessä. Saatavissa olevat tilastot ja aikaleimalliset jälleenkytkentätiedot antoivat hyvät lähtökohdat aikaisempaa tarkemman arvion tekemiseksi.

6.1 Jälleenkytkentämäärien korrelointi säätilastoihin

Lyhyiden sähkökatkosten syiden selvittämisen tueksi arvioitiin jälleenkytkentämäärien korrelointia säätilastoihin.

6.1.1 *Tuulen nopeus*

Kainuun Energian Kuhmossa ja Kestilässä sijaitsevien säämittausasemien tuulen nopeuksia verrattiin 50 kilometrin säteellä olevien sähköasemien lyhyiden sähkökatkosten määriin. Säätilamuuttujista tarkasteluun otettiin mukaan tuulen nopeus. Sähköasemien johtolähtöjen loppupäät ovat maksimissaan noin 80 kilometrin etäisyydellä. Säämittauksia verrattiin jälleenkytkentöihin vuoden mittaiselta ajalta 1.10.2005 – 30.9.2006. Aika on lyhyehkö luotettavaan korrelaation määrittämiseen. Tätä diplomityötä tehdessä edellä mainittu vuoden jakso oli ainoa kokonaisia vuosia sisältävä, jolta oli saatavilla säämittaustietoa sekä aikaleimalliset tiedot jälleenkytkennöistä.

Tuulen nopeuden vuorokausikeskiarvon ja -maksimin yhteyttä lyhyiden sähkökatkosten määriin tutkittiin laskemalla korrelaatiokertoimet kesältä (5/2006 - 10/2006) ja talvelta (11/2005 – 4/2006). Kestilän säätiöiden yhteydessä analysoitiin 252 pjk:ta ja 68 ajk:ta ja Kuhmon 843 pjk:ta ja 161 ajk:ta vuoden ajalta. Kestilän sääaseman tuulen vuorokausikeski- ja maksiminopeuden ja sitä ympäröivien sähköasemien jälleenkytkentöjen korrelaatiokertoimet on esitetty taulukossa 6.1. Kuhmon vastaavat arvot ovat taulukossa 6.2.

Taulukko 6.1. Kestilän säämittausaseman tuulen vuorokausikeski- ja maksiminopeuden korrelaatio alueen sähköasemien vuorokautisiin jälleenkytkentöihin kesällä ja talvella.

KESÄ				TALVI			
		pjk	ajk			pjk	ajk
tuulen nopeus	ka	-0,08	-0,02	tuulen nopeus	ka	0,17	0,14
	max	-0,07	-0,01		max	0,16	0,13

Taulukko 6.2. Kuhmon säämittausaseman tuulen vuorokausikeski- ja maksiminopeuden korrelaatio alueen sähköasemien vuorokautisiin jälleenkytkentöihin kesällä ja talvella.

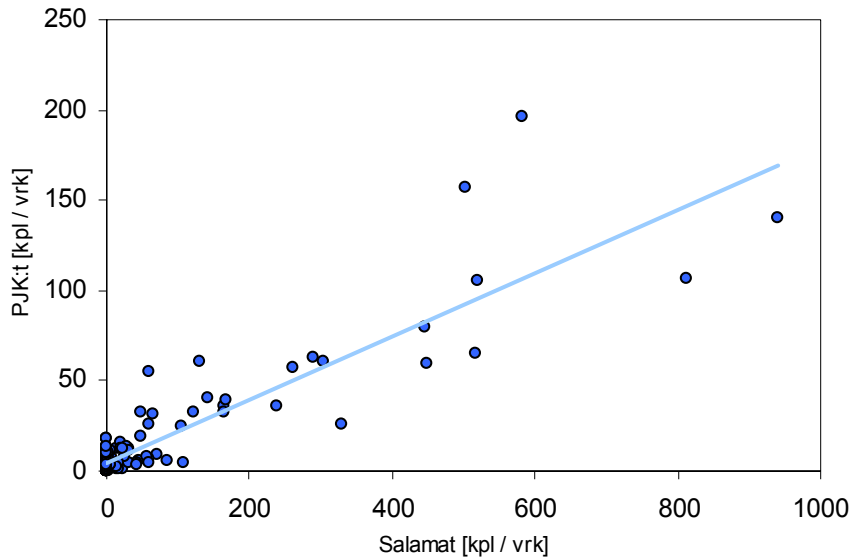
KESÄ				TALVI			
		pjk	ajk			pjk	ajk
tuulen nopeus	ka	0,02	0,03	tuulen nopeus	ka	0,31	0,05
	max	0,19	0,15		max	0,30	0,04

6.1.2 Salammat

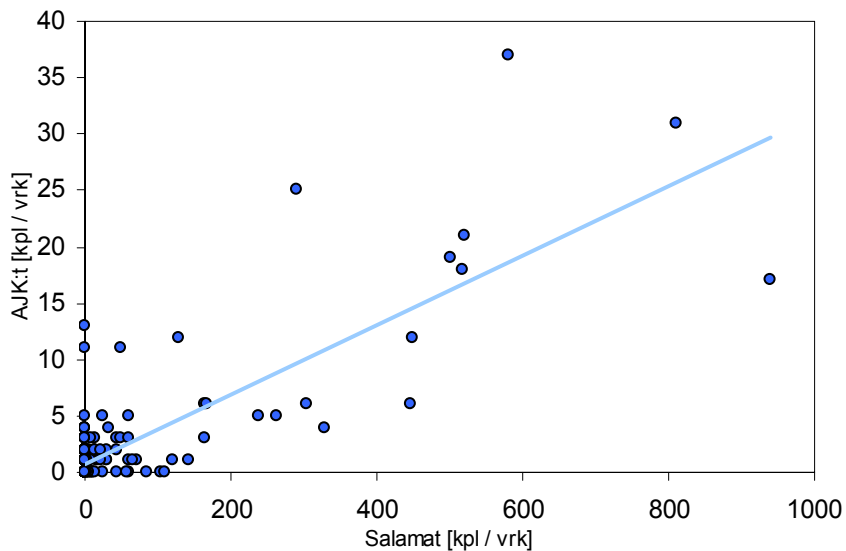
Salamien esiintymisen yhteyttä lyhyiden sähkökatkosten määriin tutkittiin kahden vuoden ajalta 2005 - 2006. Molemmilta vuosilta tutkittiin aikaa toukuun alusta elokuun loppuun, jolloin molempina vuosina esiintyi yli 99 % salamista. Salamatilastoon, joka on laadittu koko Kainuun Energian jakeluverkoalueelta, verrattiin kaikkia kyseisenä aikana tapahtuneita jälleenkytkentöjä vuorokausikohtaisesti. Korrelaatiokertoimia ja pistediagrammeja määrittäessä analysoitiin noin 2500 pjk:ta, 450 ajk:ta ja 8500 salamaniskua.

Kuvien 6.1 ja 6.2 pistediagrammeista voi silmämääräisesti arvioida jälleenkytkentöjen korrelaatiota salamiin. Kuvan 6.1 pistediagrammi esittää vuoro-

kauden pjk:t ja kuvan 6.2 ajk:t vuorokauden salamien lukumäärän funktiona. Pjk:den korrelaatio on suurempi kuin ajk:den, sillä pisteet muodostavat lähempänä suoraa olevan kuvion. Korrelaatiokertoimet ovat merkittävän suuret.



Kuva 6.1. Pjk:den ja salamien pistediagrammit.



Kuva 6.2. Ajk:den ja salamien pistediagrammi.

Taulukko 6.3 esittää salamien ja jälleenkytkentöjen korrelaatiokertoimet. Käytännössä määritetyt korrelaatiokertoimet kuvaavat jälleenkytkentöjen ja uk-

kosmyrskyn välisen korrelaation vahvuutta. Tämä johtuu siitä, että salamien yhteydessä esiintyy voimakkaita tuulenpuuskia. Oletettavasti salamat ovat kuitenkin pääasiallinen jälleenkytkentöjen aiheuttaja ukkosmyrskyn aikana, koska tuulen voimakkuuden korrelaatio jälleenkytkentämääriin on heikohko (taulukko 6.1 ja 6.2).

Taulukko 6.3. Salamien ja jälleenkytkentöjen korrelaatiokertoimet.

	pjk	ajk
salamat	0,91	0,74

6.1.3 Johtopäätökset korrelaatiokertoimista

Taulukon 6.3 korrelaatiokertoimet vahvistavat yleisesti tunnetun käsityksen, että päivinä, jolloin salamoi, esiintyy myös jälleenkytkentöjä. Jälleenkytkentöjen syitä määritettäessä voidaan salamapäivien jälleenkytkentöjä pitää hyvällä varmuudella salamien eli ilmastollisten ylijännitteiden aiheuttamana.

Tuulen voimakkuuden ja jälleenkytkentöjen korrelaatiokertoimien erilaisuus (taulukko 6.1 ja taulukko 6.2) kahden alueen välillä kuvastaa saatujen tulosten epäluotettavuutta. Kuhmon säämittausaseman tuulen nopeuksiin verrattiin huomattavasti suurempaa määrää pjk:ta, minkä vuoksi Kuhmon tuloksille voi antaa suuremman painoarvon. Kuhmon pjk:den korrelaatio tuulen voimakkuuteen talvella (11/2005 - 4/2006) oli luokkaa 0,30. Korrelaatio on heikohko, mutta sitä on selvästi olemassa jossain määrin.

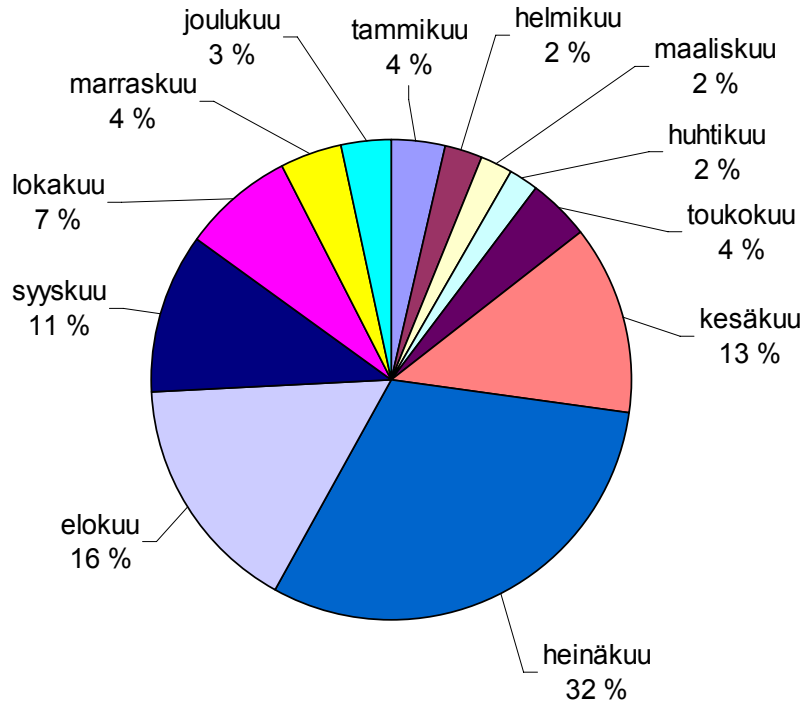
6.2 Vuorokaudenaika- ja kuukausijakaumat

Vuoden lyhyet sähkökatkokset jakautuvat epätasaisesti eri kuukausille. Katkosten jakautuminen eri vuorokauden tunneille vaihtelee myös hyvin paljon vuodenajasta riippuen, mikä johtuu oletettavasti aiheuttajien erilaisesta esiintymisestä eri vuoden- ja vuorokaudenaikaan. Erilaisista ajan perusteella tehdyistä jakaumista voidaan tehdä karkeita arvioita tai oletuksia lyhyiden sähkökatkosten aiheuttajista.

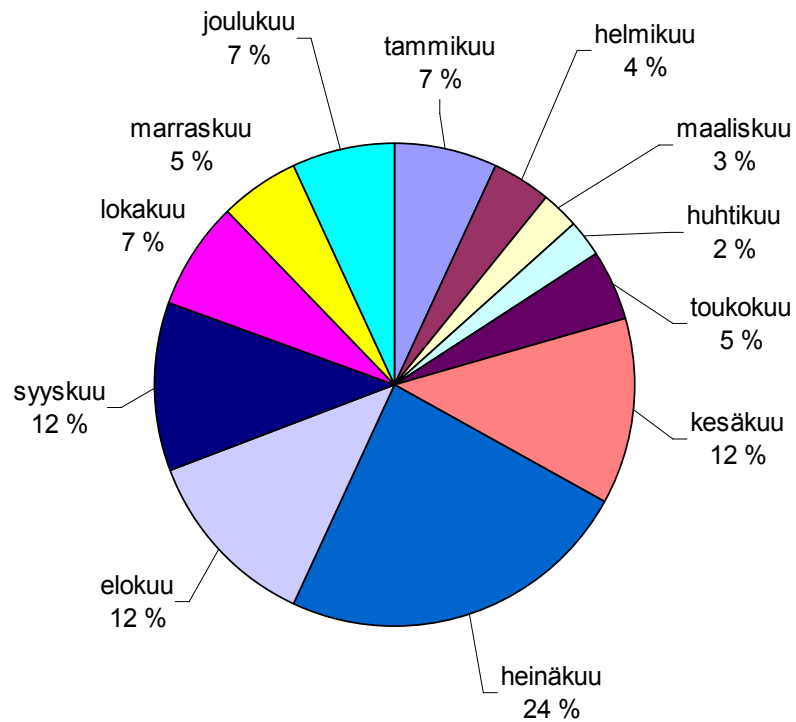
Tilastotietoa lyhyistä sähkökatkoksista on saatavilla sähköisessä muodossa vuodesta 1990 lähtien. Vuoteen 2005 asti mukana tilastoissa ovat kaikki eivätkä vain onnistuneet pjk:t ja ajk:t. Kaikkien pjk:den ja ajk:den sisällyttäminen tuo vikojen verran ylimääräisiä ajk:ta ja onnistuneiden ajk:den verran liikaa pjk:ta. Tämä tuo epätarkkuutta laadittuihin kuukausijakaumiin, mikä tulee ottaa huomioon tuloksia tarkasteltaessa. Tuntijakaumat on laadittu vain onnistuneiden jälleenkytkentöjen perusteella.

6.2.1 Kuukausijakaumat

Kuvista 6.3 ja 6.4 nähdään kuinka pjk:t ja ajk:t ovat jakautuneet vuoden kuukausille keskimäärin. Kaaviot on määritetty 16 vuoden ajalta vuosilta 1990 – 2005. Viiden kuukauden jakso kesäkuusta lokakuuhun erottuu selvästi muista kuukausista. Edellä mainitun jakson aikana tapahtuu keskimäärin 79 % kaikista pjk:sta ja 67 % ajk:sta. Kuvista nähdään, että ajk:t ovat tasaisemmin jakautuneet eri kuukausille kuin pjk:t.



Kuva 6.3. Kuukausien osuudet vuosittaisista pjk:sta.



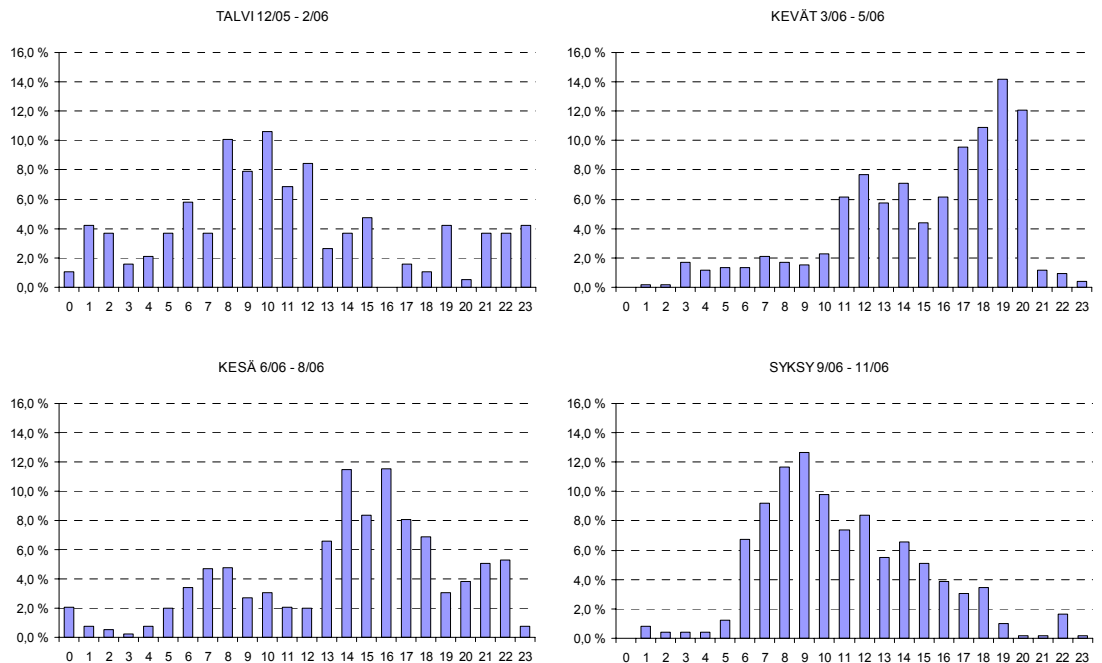
Kuva 6.4. Kuukausien osuudet vuosittaisista ajk:sta.

Heinäkuussa esiintyy eniten jälleenkytkentöjä. Heinäkuun osuus vuoden pjk:sta on 32 % ja ajk:sta 24 %. Salammat tunnetusti aiheuttavat pjk:ta. Salamista noin 60 % esiintyy heinäkuussa, mikä selviää Ilmatieteen laitoksen Kainuun Energian verkkoaluetta koskevista tilastoista vuosilta 1998 - 2006. Salamien runsas esiintyminen heinäkuussa selittää myös heinäkuun suuren osuuden lyhyistä sähkökatkoksista.

Jos oletetaan, että lumi- ja jääkuormat ovat yleisin jälleenkytkentöjen aiheuttaja joulukuussa ja tammikuussa, niin lumi- ja jääkuormat näyttäisivät aiheuttavan lähes suhteellisesti kaksinkertaisen määrän ajk:ta pjk:hin verrattuna. Voisi olla mahdollista, että vasta ajk:n jälkeen lunta putoaa sen verran puista, että puut nousevat irti johdoista. Kuvista 6.3 ja 6.4 nähdään, että jakso helmikuusta huhtikuuhun muodostaa huomattavan pienen osan vuoden tapahtumista. Silloin ei esiinny salamia, lunta ei sada, eikä lintujen kevätmuutto ole vielä kiivaimmillaan.

6.2.2 Pjk:den tuntijakaumat

Lyhyiden sähkökatkosten tuntijakaumat ovat erilaiset vuodenajasta riippuen. Tähän on oletettavasti syynä yleisimpien aiheuttajien erilainen esiintyminen eri vuorokauden aikoihin. Kuvassa 6.5 on esitetty pjk:den jakautuminen eri tunneille neljänä vuodenaikana. Kaaviot on saatu analysoimalla yhden vuoden pjk:ta ajalta 10/2005 – 9/2006. Yhteensä käsiteltävänä oli noin 2500 pjk:ta. Yhden vuoden mittaiselta ajalta tehtyjen pjk:den tuntijakaumista ei voida tehdä kovin luotettavia yleistyksiä. Kuvissa on havaittavissa pjk:den painottumista eri puolille vuorokautta riippuen vuodenajasta. Käsitelty tietomäärä on sen verran suppea etenkin talven ja kevään kaavioiden kohdalla, että esimerkiksi yhden päivän runsas salamointi toukokuussa aiheuttaa kevään kaavion tapauksessa jakauman painottumisen alkuiltaan. Kaaviosta voidaan joka tapauksessa tehdä varovaisesti tulkitsemalla havaintoja syiden selvittämisen tueksi.



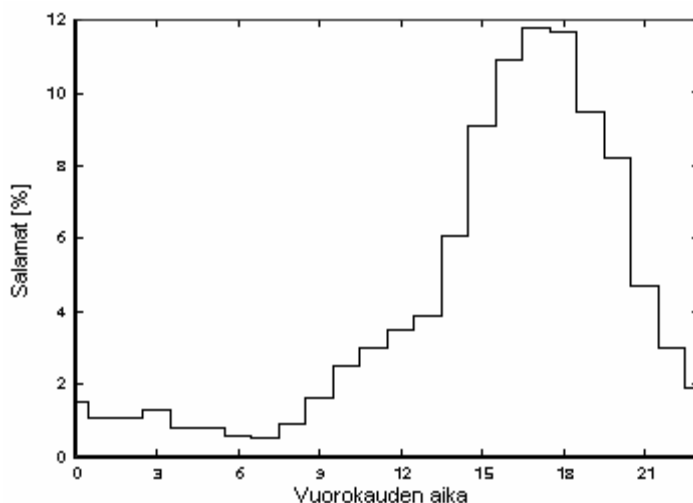
Kuva 6.5. Vuodenaikojen pjk-tuntijakaumat ajalta 10/05 - 9/06.

Talven yleisin pjk:den aiheuttaja on KAI:n valvomohenkilökunnan käsityksen mukaan lumi- ja jääkuormat. Kuvan 6.5 perusteella talven pjk:t ovat tasaisemmin jakautuneet kuin muiden vuodenaikojen. Pjk-määrät saavat talven

huippunsa tunteina 8 – 12. Tähän voi olla useita syytä kuten pieneläinten liikkuminen heti auringonnousun jälkeen tai ilman lämpenemisen vaikutus lumikuormiin puissa.

Kevään alkullalle painottuva tuntijakauma johtuu salamien esiintymisestä toukokuussa, mikä käy ilmi vertailemalla salama- ja jälleenkytkentätilastoja. Oikeastaan kaavio edustaa toukokuun tuntijakaumaa, koska toukokuun pjk:t muodostavat 73 % koko maaliskuulta toukokuun loppuun ulottuvan ”kevään” pjk:sta.

Vuonna 2006 reilu 90 % salamista esiintyi kesän kuukausina (kesä-elokuu). Vuonna 2006 salamointi tapahtui suurimmalta osin klo 12 – 21 välisenä aikana. Salamien tuntijakauma Suomessa vuodelta 2006 on kuvassa 6.6. Kuvasta katsottuna salamia esiintyi Suomessa eniten tunnilla 17 eli klo 16:30 – 17:30 kuvan merkintätapaa käyttäen. KAI:n jakeluverkkoalueella pjk:ta esiintyi eniten vuoden 2006 kesän aikana klo 14 – 15 ja 16 – 17. Siitä löytyy selitys kesän pjk:den tuntijakaumalle etenkin loppuillapäivän kertymälle. Kuvan 6.6 salamajakauma ja kuvan 6.5 kesän pjk-jakauma näyttäisivät silmämääräisesti tarkasteltuna korreloivan iltapäivän huipun kohdalta, mutta klo 6 – 9 esiintyvää pjk:den tihentymää salamajakauma ei selitä.

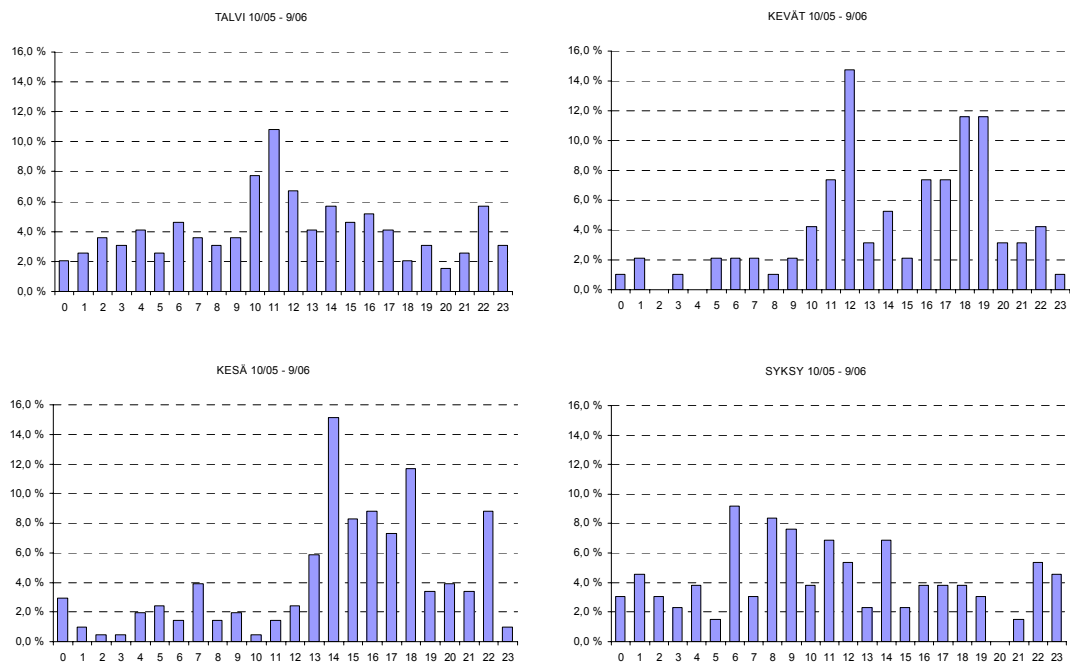


Kuva 6.6. Salamien tuntijakauma Suomessa vuonna 2006 (Lähde: Ilmatieteen laitos).

Syksyn tuntijakauma on painottunut aamulle kello yhdeksän ympärille. Myöhäisemmille tunneille mentäessä pjk-määrät pienenevät tunti tunnilta. Pjk:den painottuminen aamuun saattaa johtua pieneläinten, kuten muuttolintujen ja oravien liikkeiden lisääntymisenä heti auringon nousun jälkeen. Tällainen käsitys vallitsee KAI:n valvomohenkilökunnan keskuudessa, mutta sitä ei voida tämän diplomityön puitteissa todistaa.

6.2.3 Ajk:den tuntijakaumat

Eri vuodenaikojen ajk-tuntijakaumat on esitetty kuvassa 6.7. Jakaumat on laadittu 625 ajk:n perusteella. Koska mukana on vain yhden vuoden ajk:t, sattumalla on suurehko merkitys jakaumiin. Talven jakaumasta nähdään, että huippu osuu klo 11 alkavan tunnin ympärille. Ajk:den kaavioista on mahdollista tehdä samanlaisia havaintoja kuin pjk:den tuntijakaumista. Ajk:n tuntijakaumaa ei käsitellä kuitenkaan tämän enempää.

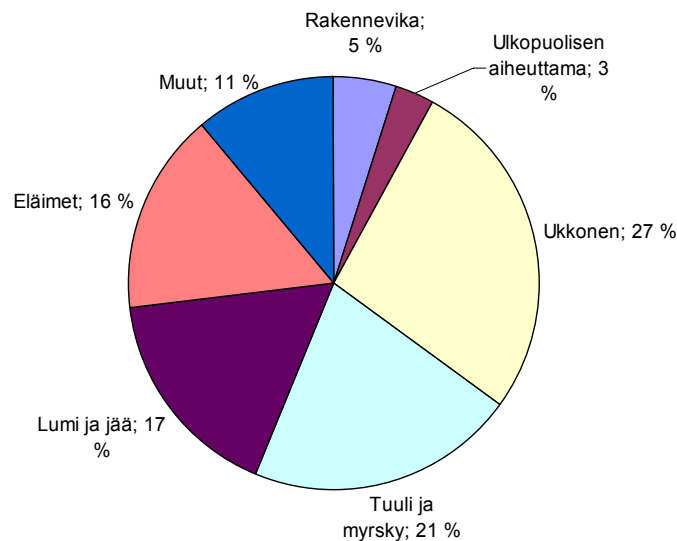


Kuva 6.7. Vuodenaikojen ajk-tuntijakaumat ajalta 10/05 - 9/06.

6.2.4 Senerin arvio pjk:den aiheuttajista

Vuonna 2001 Sener teki selvityksen pjk:den syistä. Se perustui 15 jakeluverkko-yhtiöille tehtyyn kyselyyn. Verkko-yhtiöt arvioivat vuoden 1999 pjk:den aiheuttajat vallitsevasta säätilasta tai muista havainnoista. Siitä saadut tulok-

set on esitetty kuvassa 6.8. Senerin saamaa tulosta käytetään vertailukohtana tässä diplomityössä saatuihin tuloksiin.



Kuva 6.8. Pjk:den aiheuttajien osuudet. Senerin tekemän kyselyn tulokset [Sen 01].

6.3 Eläimet jälleenkytkentöjen aiheuttajina

Ongelmallisimpia eläimiä sähkönjaketulle ovat oravat ja linnut. Jakelumuuntajan kannella muuntajan napojen välissä orava pystyy aiheuttamaan oikosulun ja samalla kohtalokkaan sähköiskun itselleen. Ylijännitesuojana käytetty kipinäväli on kohtalokas laskeutumisaikana pikkulinnuille. [Enu 03]

Kainuun Valo Oy:n asiakaslehden [Kvo 91] artikkelin mukaan lyhyitä sähkökatkoksia esiintyy tavanomaista runsaammin syksyisin, jolloin lintujen vaellusaika on kiivaimmillaan. Artikkelin mukaan ”Varsinaisten muuttajien lisäksi meikäläisistä linnuista tiaiset, tikat ja käpylinnut vaeltavat syksyisin paljon. Erityisesti tiaiset ovat todennäköisiä häiriöiden aiheuttajia, koska ne uteliaina lintuina koluavat kaikki mahdolliset paikat ja vaeltavat juuri syys-lokakuussa.” Artikkelin mukaan linnut hakeutuvat muuntajien kansille ruokaa etsiessään. Muuntajien tuottama lämpö houkuttelee syksyisin pinnoilleen hyönteisiä, joita esimerkiksi tiaiset hakevat ravinnokseen. Pikkulintujen ja oravien raadot houkuttelevat muuntajille puolestaan varislintuja, jotka nekin saattavat aiheuttaa

oikosulkuja. Artikkelin tiedot pohjautuvat lintuharrastaja Hannu Rönkön haastatteluun. [Kvo 91]

Jälleenkytkentöjen kuukausijakaumista (kuva 6.3 ja kuva 6.4) nähdään, että syksyisin, elokuusta lokakuuhun, tapahtuu 34 % vuotuisista pjk:sta ja 31 % ajk:sta. Ottaen huomioon, että elokuussa esiintyy keskimäärin vain 13 % ja syyskuussa 2 % vuotuisista salamista, jälleenkytkentöjen osuudet ovat varsin suuret. Lokakuussa ei esiinny salamia lainkaan. Elo-lokakuun osuudet vuositaisista salamista on laskettu Ilmatieteen laitokselta saadusta, KAI:n jakeluverkkoaluetta koskevasta vuosien 1998 – 2006 salamatilastosta. Edellisessä kappaleessa esitellyn lehtiartikkelin [Kvo 91] mukaan eläimet ja ennen kaikkea linnut aiheuttavat runsaasti jälleenkytkentöjä syksyisin. Pjk:den syksyn tuntijakaumasta (kuva 6.5) havaitaan selkeä tapahtumien painottuminen valoisaan aikaan (klo 6 - 18). Tällöin tapahtuu 93 % kyseisen ajan pjk:sta.

Edellisen perusteella valoisaan aikaan tapahtuvien jälleenkytkentöjen voidaan olettaa aiheutuneen eläimistä, jos ilmasto-olosuhteet ovat muuten olleet normaalit: tuuli ei ole ollut erityisen voimakasta ja salamointia ei ole esiintynyt. Vastaavaan johtopäätökseen on päädytty myös liitteessä [Sen 01].

6.4 Menetelmä

Lyhyiden sähkökatkosten aiheuttajien osuudet määritettiin vuoden ajalta jakamalla aikaleimalliset jälleenkytkennät mahdollisimman tarkasti todennäköisen aiheuttajan perusteella. Todennäköisten aiheuttajien perustelemiseksi kohdassa 6.1 selvitettiin tuuli- ja salamatilastojen korrelointia jälleenkytkentätilastoihin, kohdassa 6.2 laadittiin jälleenkytkentöjen tuntijakauma eri vuodenaikoina sekä kuukausijakauma ja kohdassa 6.3 käsiteltiin eläimiä jälleenkytkentöjen aiheuttajina.

Lyhyiden sähkökatkosten syiden selvittämiseen käytettiin seuraavia tilastoja:

- Kainuun Energian kuukausittainen jälleenkytkentätilasto vuodesta 1990 vuoteen 2006

- Kainuun Energian aikaleimalla varustettu jälleenytkentätalasto ajalta 1.10.2005 - 30.9.2006
- Ilmatieteen laitoksen kuukauden tarkkuudella oleva Kainuun Energian jakeluverkkoaluetta koskeva salamatilasto ajalta 1998 – 2006
- Ilmatieteen laitoksen vuorokauden tarkkuudella oleva Kainuun Energian jakeluverkkoaluetta koskeva salamatilasto ajalta 2005 – 2006
- Kainuun Energian kymmenen minuutin tarkkuudella olevat tuulimitustalastot kahdelta säämittausasemalta ajalta 2005 - 2006

Aiheuttajien arvio tehtiin 1.10.2005 - 30.9.2006 tapahtuneille 2350 onnistuneelle pjk:lle ja 625 ajk:lle. Onnistuneella jälleenytkennällä tarkoitetaan jälleenytkentää, jonka jälkeen oikosulku tai maasulku on hävinnyt verkosta. Salama- ja tuulitalastojen sekä vuodenajan perusteella pystyttiin määrittämään neljä aiheuttajaa: *salamat ja ukkosmyrsky, tuuli ja myrsky, lumi ja jää* sekä *eläimet*. Jälleenytkennät, joille ei löytynyt merkkejä siitä, että ne kuuluisivat johonkin edellä mainituista ryhmistä, nimettiin ryhmään *tuntematon*. Yksittäinen tapahtuma merkittiin eri aiheuttajien aiheuttamaksi seuraavan listan mukaisen ehtojen järjestyksessä siten, että jos ensimmäisen aiheuttajan ehdot eivät täytyneet, haettiin aiheuttajaksi seuraavaa.

1. Kohdassa 6.1.2 selvityksen mukaan vuorokautisen salamien määrän ja jälleenytkentöjen välillä on selvä korrelaatio. Sen vuoksi jälleenytkennät nimettiin ***salamien ja ukkosmyrskyn*** aiheuttamaksi, jos tapahtumavuorokautena oli salamia esiintynyt yli kymmenen kappaletta ja jälleenytkennät olivat osa rajattuaikaista jälleenytkentöjen sarjaa.
2. Vaikka kohdassa 6.1.1 esitettyjen tulosten perusteella näyttääkin siltä, että heikkoa korrelaatiota on olemassa vain talvikuukausien aikana, etsittiin jälleenytkennöille syitä seuraavaksi tuulitalastoista salamatilastojen jälkeen. Käytettävistä tuulitalaston kymmenen minuutin näytteenottovälillä olevista mittaustuloksista laskettiin tuntikohtaiset tuulen keski- ja maksiminopeudet. Jälleenytkentä nimettiin tuulen ja

myrskyn aiheuttamaksi, jos sen tapahtuma-ajan tunnin tuulen keskinopeus oli ollut yli 5 m/s tai maksiminopeus yli 8 m/s. Eli esimerkiksi jonain päivänä klo 18:04 tapahtuneen jälleenkytkennän syyksi nimettiin **tuuli ja myrsky**, jos kyseisenä päivänä ei ollut salamoinut ja tuulen keskinopeus oli ollut yli 5 m/s tai maksiminopeus yli 8 m/s klo 18 – 19 välisenä aikana. Käytettyjen tuulenopeusrajojen yläpuolella sijaitsee likimäärin 15 % vuoden kymmenen minuutin mittausjaksoista KAI:n jakeluverkkoalueella. Tarkastelussa käytettiin kahdesta säämittausasemasta sen aseman tietoja, joka oli lähempänä johtolähtöä, jolla jälleenkytkentä oli tapahtunut.

3. Seuraavaksi syitä arvioitiin vuodenajan perusteella. Marras- ja helmikuun välisen ajan jälleenkytkennät nimettiin **lumen tai jään** aiheuttamaksi, koska kokemuksen mukaan se on yleisin aiheuttaja kyseiseen vuodenaikaan.
4. Jos edellisistä ei löytynyt selittäjää jälleenkytkennälle, oletettiin **eläinten** olevan syynä jälleenkytkentään, jos ne tapahtuivat jaksolla elokuusta lokakuuhun kello 6 - 21 välisenä aikana. Tätä kriteeriä pohjustetaan kohdassa 6.3.
5. Jälleenkytkennöille, joille ei edellä mainittujen kriteerien perusteella löytynyt aiheuttajaa, merkittiin aiheuttajaksi **tuntematon**.

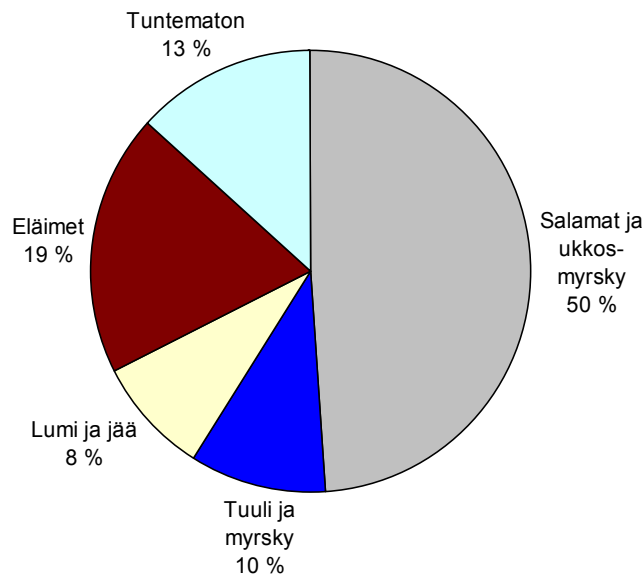
Rakennevikojen aiheuttamat jälleenkytkennät yritettiin saada selville vertaamalla jälleenkytkentöjen toistuvuutta samalla johtolähdöllä. Oletettiin, että esimerkiksi säievika voi mennä ohi pjk:lla ja/tai ajk:lla muutaman kerran ennen kuin se aiheuttaa pysyvän vian. Tällä logiikalla rakennevikoja ei onnistuttu löytämään käsittelyaikavälillä tapahtuneista jälleenkytkennöistä. Menetelmällä saadaan karkea arvio jälleenkytkentöjen aiheuttajista, vaikka sitä ei voida pitää tieteellisesti merkittävänä tehtyjen oletusten vuoksi. Menetelmällä saadut tulokset on esitetty kohdassa 6.5.

6.5 Tulokset

Kuvassa 6.9 nähdään tilastojen ja vuodenajan perusteella laadittu arvio pjk:den aiheuttajien osuuksista ajalta 1.10.2005 - 30.9.2006. Vastaava arvio

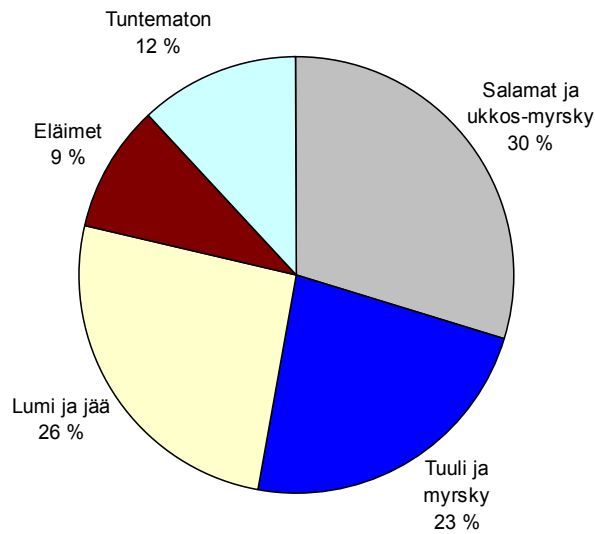
ajk:den aiheuttajista on esitetty kuvassa 6.10. Aiheuttajat on määritetty kohdan 6.1 mukaisella menetelmällä.

Salamat ja ukkosmyrsky ovat selvästi merkittävin pjk:den aiheuttaja. *Salamat ja ukkosmyrsky* aiheuttaa 50 % pjk:sta. Toiseksi suurin aiheuttajien ryhmä on *eläimet* (19 %). Vaikuttaisi siltä, että *tuuli ja myrsky* ei ilman salamointia olisi kovinkaan suuri pjk:den aiheuttaja. Tehdyn arvion mukaan *tuuli ja myrsky* aiheutti 10 % ja *lumi ja jää* 8 % kaikista pjk:sta.



Kuva 6.9. Arvio vuotuisten pjk:den aiheuttajien jakautumisesta.

Ajk:t ovat tehdyn arvion mukaan jakautuneet aiheuttajien kesken tasaisemmin kuin pjk:t. Myös suurimman osan ajk:sta aiheuttaa *salamat ja ukkosmyrsky* (30 %), mutta samassa suuruusluokassa ovat *lumi ja jää* (26 %) sekä *tuuli ja myrsky* (23 %). Eläinten osuus ajk:sta on huomattavasti pienempi kuin pjk:sta.



Kuva 6.10. Arvio ajk:den aiheuttajien jakautumisesta.

Pjk:den ja ajk:den yleisin aiheuttaja tehdyn selvityksen mukaan on *salamat ja ukkosmyrsky*. Salaman aiheuttama ylijännite syyttää avojohtoverkossa maa- ja/tai oikosulun. On loogista ajatella, että pjk sammuttaa valokaaren eikä vika johda ajk:hon. Tämä tukisi havaintoa, että *salamat ja ukkosmyrsky* aiheuttaa suhteellisesti enemmän pjk:ta kuin ajk:ta. Onkin syytä olettaa, että *salamien ja ukkosmyrskyn* ollessa aiheuttajana tuulen lennättämät oksat ovat useammin syynä ajk:hin kuin salaman lyönnit. Tätä ei kuitenkaan tässä diplomityössä käytettyjen menetelmien avulla voida todistaa.

Kuva 6.8 esittää Senerin tekemän pjk:den syiden selvityksen tulokset. Tämän diplomityön arvion mukaan *salamat ja ukkosmyrsky* aiheuttaisi huomattavasti suuremman osan pjk:sta kuin Senerin selvitys osoittaa. Salamien ja jälleenkytkentöjen välisen korrelaatiokertoimen perusteella voidaan olettaa, että saadut tulokset *salamien ja ukkosmyrskyn* osalta ovat varsin luotettavia. Muiden aiheuttajien osuuksien selvittämiseen liittyy yksinkertaistettuja oletuksia, jotka ovat perusteltuja, mutta joita ei voitu todistaa tieteellisesti. Tämän luvun tulosten perusteella näyttäisi siltä, että oikeanlaisilla ylijännitesuojilla olisi suurin lyhyiden sähkökatkosten vähennyspotentialiaali. Seuraavassa osassa käsitellään lyhyiden sähkökatkosten vähentämismenetelmiä.

7 LYHYIDEN SÄHKÖKATKOSTEN VÄHENTÄMISTOIMENPITEET

Lyhyet sähkökatkokset aiheutuvat jälleenkytkennöistä. Poistamalla johtolähtöjen jälleenkytkentäreleet käytöstä saataisiin lyhyet sähkökatkokset hävitettyä kokonaan. Ei ole tietenkään tarkoituksenmukaista vähentää lyhyitä sähkökatkoksia pysyviä katkoksia lisäämällä.

Tässä osassa esitellään pääasiassa sellaisten toimenpiteiden toimintaperiaatteet sekä yksikkökustannukset, joihin liittyvä tekniikka on valmiina otettavaksi käyttöön ja joiden päätarkoitus on vähentää lyhyitä sähkökatkoksia. Käsiteltävät toimenpiteet ovat maasulkuvirran kompensointi (myöhemmin vain kompensointi), eläinsuojat, puoliventtiilisuojat sekä kasvuston käsittely. Lisäksi käsitellään lyhyemmin muita lyhyitä sähkökatkoksia vähentäviä toimenpiteitä. Tämän osan tarkoitus ei ole ottaa kantaa toimenpiteiden kannattavuuteen vaan esittää erilaisia vaihtoehtoja lyhyiden sähkökatkosten vähentämiseksi.

7.1 Kompensointi

Keskijänniteverkon maadoitustapa vaikuttaa lyhyiden sähkökatkosten määrään, koska sillä on vaikutusta maasulkuvalokaaren sammumisolosuhteisiin. Kompensoinnilla tarkoitetaan keskijänniteverkon tähtipisteen maadoittamista induktiivisen reaktanssin kautta suotuisten olosuhteiden luomiseksi maasulkuvirran automaattiselle sammumiselle ilman katkaisijatoimintoja [Sen 01]. Jos valokaari ehtii sammua ennen kuin suojareleet toimivat, vältytään maasulun aiheuttamalta pj:ltä. Kompensoinnilla pystytään vähentämään erityisesti pj:ta. Verkkoja, joissa on käytössä kompensointilaitteisto, kutsutaan sammutetuiksi verkoiksi [Cla 96]. Usein maasulku laajenee monivaiheiseksi maa- tai oikosuluksi. Tästä syystä kompensointi vähentää myös oikosulkujen esiintymistä jakeluverkoissa.

Kompensointi voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla: keskitetysti tai hajautevasti. Yleisemmin Suomessa käytössä oleva keskitetty kompensointi tarkoit-

taa sähköasemalle asennettavaa kompensointilaitteistoa. Yleensä tarvitaan yksi laitteisto jokaista syötettävää verkkoa, eli käytännössä sähköaseman kiskoa kohden. Jos sähköasemalla on kaksi päämuuntajaa ja molemmat syöttävät eri verkkoja, tarvitaan molemmille muuntajille omat kompensointilaitteistot. Kompensointilaitteisto koostuu kompensointikuristimen lisäksi tavallisesti automaattisäätäjistä sekä päämuuntajan kytkentätyypistä riippuen maadoitusmuuntajasta [Cla 96].

Hajautettu kompensointi tarkoittaa eri puolille verkkoa asetettuja pieniä kompensointiyksiköitä. Hajautetun systeemin toiminta on hyvin vastaavanlainen keskitetyn kanssa, koska maasulussa yksiköt kytkeytyvät rinnakkain galvanisesti yhtenäisessä verkossa. Hajautetulla kompensoinnilla pyritään keskitettyyn verrattuna edullisempaan ratkaisuun. Jokaista hajautetun kompensoinnin yksikköä kohden täytyy olla riittävä määrä sähköverkkoa, jotta hajakapasitanssien tuottama kapasitiivisen ja kompensoinnin induktiivisen virran suhde olisi suotuisa. Säädön puute on selvä hajautetun järjestelmän haittapuoli keskitettyyn verrattuna erityisesti normaalista poikkeavissa kytkentätilanteissa. Jos verkkomäärä kompensointilaitteistoja kohden muuttuu liian alhaiseksi, liiallinen induktiivinen virta voi aiheuttaa aiheettoman katkaisijatoiminnon [Cla 96]. Tiettävästi uusia hajautettuja kompensointilaitteistoja ei enää nykyään asenneta jakeluverkkoihin Suomessa.

Keskitetyn kompensointilaitteiston hinta on arviolta 138 000 €. Hinta käy ilmi EMV:n julkaisemasta verkkokomponenttien yksikköhintataulukosta vuodelle 2006, joka on tarkoitettu käytettäväksi verkko-omaisuuden arvon määrittämiseen [Ene 06]. Laitteiston hinta ei ole kovin voimakkaasti riippuvainen kompensoitavan maasulkuvirran suuruudesta, joten kyseinen hinta on keskimäärin luotettava arvio.

Kompensoinnin etuna jälleenkytkentöjen vähenemisen lisäksi voidaan mainita, että se vähentää verkoston vaurioitumista ja kulumista. Esimerkiksi kipinävälien vaurioituminen on vähäisempää [Cla 96]. Katkaisijoiden toiminnat vähenevät myös kompensoinnin vaikutuksesta eli niiden huollon tarve piene-

nee [Tai 93]. Eliniän pidentymisestä ei ole varteenotettavaa tutkimustietoa, siksi kompensoinnin myönteisiä vaikutuksia on vaikea sisällyttää kannattavuuslaskelmiin.

Toinen kompensoinnin etu sähkön laadun parantumisen lisäksi on, että maadoituskustannukset pienenevät. Maasulkuvirran pienentyessä sallittu maasulkuresistanssi kasvaa ja tällöin tarvittavan maadoituselektrodin pituus lyhenee. Jakeluverkon maadoitusvaatimukset muuttuvat verkon kehittymisen myötä. Muun muassa PAS-johdon¹ tai maakaapelin lisääminen lisäävät verkon kapasitanssia ja siten myös maasulkuvirta kasvaa. Maasulkuvirran kasvu johtaisi kompensoimattomassa verkossa lisämaadoitusten rakentamiseen. Kompensoinnilla säästetään siis maadoituksen parannuskustannuksissa sähköverkon laajetessa [Cla 96]. On kuitenkin yleistä, että verkon maadoituksissa ei lasketa kompensoinnin varaan ja maadoitukset tehdään kompensoimattoman sähköverkon vaatimusten mukaisesti. Siksi maadoituselektrodin lyhenemistä ei aina voida ottaa mukaan kompensointi-investointien kannattavuuslaskennassa.

7.2 Ylijännitesuojaus

Venttiilisuoja käytetään suojaamaan verkon komponentteja ylijännitteiltä sekä vähentämään pikajälleenkytkentöjen aiheuttamia lyhyitä sähkökatkoksia. Yleisimmät syyt jakeluverkossa esiintyville ylijännitteille ovat salamanisku, kytkentätoimenpide ja kuorman äkillinen irtoaminen verkosta.

Tärkeimmät suojauskohteet sähköverkossa ovat muuntajat, kaapelit ja kaasuieristetyt kytkinlaitokset [Sim 05]. Yleisimmin käytössä oleva ylijännitesuojatyyppi on kipinävälisuoja. Sen toimiessa syttyy valokaari kipinävälin sarvien väliin, mikä vaatii pjk:n, jotta syttynyt valokaari saadaan sammutettua. Toinen kipinävälien haittapuoli on, että ne eivät suojaa muuntajia täysin jyrkkäreunaisilta ylijännitteiltä [Hei 04]. Nykyaikaisilla epälineaarisilla venttiilisuojuilla

¹ PAS-johto on muovipäällysteinen ilmajohto, jonka eristys on tarkoitettu kestämään lyhytaikainen johtimien yhteen koskettaminen sekä puiden koskettaminen johtimiin.

saadaan ylijännitteet johdettua maahan siten, että pjk:ta ei tarvita valokaaren sammuttamiseen. Purkaus sammuu itsestään, koska venttiilisuojan resistanssi kasvaa normaaliarvoonsa ylijännitteen maadoituttua. Venttiilisuojia on neljää eri tyyppiä: levykipinävälisuoja, magneettipuhallussuoja, kipinävälitön venttiilisuoja ja puoliventtiilisuoja¹. [Aro 96], [Hei 05]

Lyhyiden sähkökatkosten kannalta mielenkiintoisin venttiilisuoja on puoliventtiilisuoja, joka on kipinävälin ja venttiilisuojan yhdistelmä. Kuvan 7.1 muuntajan kannella nähdään puoliventtiilisuojan rakenne: kipinäväli on jännitteen puolella ja venttiilisuoja maan potentiaalissa. Puoliventtiilisuojien mitoittaminen on vastaavaa kuin kipinäväleillä: niitä saa käyttää korkeintaan 200 kVA:n muuntajille. Sitä suuremmille on käytettävä kipinävälittömiä venttiilisuojia, koska puoliventtiilisuoja katkaisee ylijänniteaallon jyrkästi kuten kipinävälikin. [Hei 06]



Kuva 7.1. Jakelumuuntaja ja puoliventtiilisuojat [Hei 06].

¹Puoliventtiilisuojia kutsutaan myös yhdistelmäsuojiksi, virtaa rajoittavaksi suojiksi tai puhekielessä usein myös Moren suojiksi.

Puoliventtiilisuojien asennuksen yhteydessä poistetaan vanhanaikaiset kipinävälit, jotka ovat alttiita eläinten aiheuttamille jälleenkytkennöille. Niiden asentaminen poistaa tarpeen lintupiikkien asentamiselle. Muuntamolle tehdään yleensä eläinsuojaus puoliventtiilisuojien asennuksen yhteydessä [Sen 01]. Vaikka puoliventtiilisuojassa on ilmaeristetty kipinäväli, maasulkua ei tapahdu, jos eläin tai puun oksa oikosulkee kipinävälin. Tämä on mahdollista, koska venttiilisuojaosan läpilyöntijännite on suurempi kuin jakeluverkkojen pääjännite (noin 20 kV). Eläimen tai puun oksan sulkiessa puoliventtiilisuojan kipinävälin ei siis tapahdu lyhyttä sähkökatkosta aiheuttavaa pjk:ta. [Ens 06]

Venttiilisuojan (yli 200 kVA) hinta on arviolta noin 900 € ja puoliventtiilisuojan 600 €. Arviot sisältävät kolmen vaiheen suojat sekä asennuksen. Käyttökatkon aiheuttamat kustannukset lisätään edellä mainittuihin hintoihin. Käyttökatko vaatii keskeytyksen suunnittelun ja ilmoitukset asiakkaille. Sen kustannukset ovat noin 200 € katkoa kohden. Yhdelle katkolle kannattaa siis suunnitella mahdollisimman monta puoliventtiilisuojien asennusta, jotta keskeytyskustannukset olisivat asennettua yksikköä kohden mahdollisimman alhaiset. Puoliventtiilisuojien uusimistarpeista ja vika-alttiudesta ei ole tarkkaa tietoa. Niiden vioittuminen on kokemusten perusteella kuitenkin hyvin harvinaista [Huu 07].

7.3 Eläinsuojaus

Eläinten aiheuttamien lyhyiden sähkökatkosten vähentämiseen käytetään erilaisia suojia, joilla estetään eläimiä pääsemästä kosketuksiin kahden eri potentiaalissa olevan sähköverkon komponentin kanssa. Pylväsmuuntamoissa on useita paikkoja, joissa eläimet voivat aiheuttaa maa- tai oikosulun: läpiviennit, johtimet ja kipinävälit. Läpivientien ja venttiilisuojien suojaukseen käytetään yksinkertaisia muovisia suojahattuja. Uusia muuntamoita asennettaessa kannattaa käyttää päällystettyjä johtimia. Vanhojen muuntamoiden paljaiden johtimien suojaukseen käytetään muovilettoa, joka kiinnitetään nipusiteilla. Kipinävälisuojien varustaminen lintupiikeillä estää lintuja ja muita eläimiä aiheuttamasta maasulkua kipinäväleissä [Sen 01].

Lintupallot ovat muovisia pyöreitä sähköjohtoihin kiinnitettäviä palloja, jotka helpottavat sähkölinjojen havaitsemista. Sähkölinjoihin törmääminen on kohdalokasta erityisesti suurille linnuille. Lintujen muuttoreiteille ja lintujärvien läheisyyteen on syytä asentaa lintupalloja lintujen suojelemiseksi sekä lyhyiden sähkökatkosten vähentämiseksi.

Eläinsuojat ovat rakenteeltaan hyvin yksinkertaisia. Itse suojaa suuremmat kustannukset syntyvät suojan asennustyöstä ja keskeytyskustannuksista. Eläinsuojaus kannattaakin suorittaa muun rakentamisen yhteydessä, mutta sitä tehdään myös jälkiasennuksena.

Eläinsuojauksen esimerkkihintoja on esitetty taulukossa 7.1. Taulukossa kohdalla eläinsuojaus tarkoitetaan muuntamon paljaiden johtimien suojaamista muoviletkuilla sekä muuntajan napojen suojaamista suojahatuilla. Eläinsuojauksen ja lintupallojen hinnat on saatu selvityksestä [Sen 01] laskemalla hintojen nykyarvo vuonna 2007 vuotuisella 4 %:n korolla. Lintupiikkien hinta perustuu arvioon, joka ei sisällä jakelukeskeytyksestä aiheutuvia kustannuksia. Lintupallot voidaan asentaa jännitetyönä, joten niiden asennuksen yhteydessä ei tule keskeytyskustannuksia.

Taulukko 7.1. Eläinsuojauksen hinta-arvioita.

suoja	hinta	
eläinsuojaus	120	€ / muuntamo
lintupiikit	170	€ / muuntamo
lintupallot	3800	€ / km

Eläimet aiheuttavat kuvissa 6.9 ja 6.10 esitetyn arvion mukaan 19 % pj:sta ja 9 % ajk:sta. Eläinsuojauksella on siis jälleenkytkentöjen vähentämispotentiaalia etenkin pj:den osalta. Lintupalloja käytetään paikoissa, joissa lintujen muuttoreitin on todettu kulkevan. Lintupalloilla varustetun avojohtoverkon osuus KAI:n jakeluverkosta kokonaismäärästä on promilleluokkaa, joten merkittävää sähkön laadun parannusta niillä ei saada aikaan. Lintujen henkiä niillä kuitenkin pelastetaan.

Lintupiikkejä ei ole KAI:n jakeluverkkoon asennettu vuoden 2003 jälkeen. Niiden käyttö etenkin uusissa muuntaja-asennuksissa on lopetettu kokonaan puoliventtiilisuojiin korvataksaan kipinävälit ylijännitesuojina. Lintupiikit vähentävät kuitenkin kiistatta eläinten aiheuttamia jälleenkytkentöjä kipinäväleissä.

7.4 Kasvuston käsittely

Johtokatuja kasvuston käsittely eli raivaus ja oksinta kuuluvat avojohtoverkon kunnossapitorutiineihin. Johtokadut raivataan siten, ettei aluskasvusto pääse aiheuttamaan maasulkuja. Oksinnalla vältetään johtojen yläpuolelta tapahtuvat puuston kosketukset johtimiin etenkin lumikuorman takia. Oksinnan ansiosta puut taipuvat lumikuorman kertyessä niihin pois päin johtokadusta. Kasvuston käsittely suoritetaan yleensä tietyin, alueen kasvunopeuden kannalta sopivaksi osoittautunein väliajoin. Suomessa käytetyt kasvuston käsittelyvälit ovat pituudeltaan tietyvästi 6 - 8 vuotta.

Jos kasvuston käsittelyllä halutaan vähentää lyhyitä sähkökatkoksia, voidaan kasvuston käsittelyväliä lyhentämällä sähkölinjoja uhkaavat kallistuneet puut ja pitkät oksat saada poistettua aikaisemmin. Toinen tapa on ulottaa metsänhoidolliset toimenpiteet aivan johtokatuja reunassa olevien puiden lisäksi reunusmetsien puihin, jotka taipuessaan ylettävät koskemaan sähkölinjoihin. Tämä ei ole yksinkertaista metsänomistajien ja sähköverkkoyhtiön välisten sopimusten vuoksi.

Jos jakeluverkkojen johtokadut voitaisiin tehdä puuvarmoiksi kanta- ja alueverkkojen tapaan, saataisiin puiden kaatumisista johtuvat jakelukeskeytykset estettyä kokonaan. Samalla etenkin lumikuorman painosta taipuneiden puiden aiheuttamat jälleenkytkennät saataisiin poistettua kokonaan. Johtokatuja puuvarmuuden taloudellisuutta arvioidessa painavin tekijä on kuitenkin pysyvien vikojen huomattava vähentäminen. Jos Kainuun Energian jakeluverkko tehtäisiin puuvarmaksi, jouduttaisiin hakkaamaan yli 20 000 hehtaaria metsää, mikä olisi pois metsätaloudesta. Jakeluverkkojen puuvarmuus ei ole tästä syystä taloudellisesti kannattava vaihtoehto [Nis 03].

Raivaus voidaan suorittaa joko miesvoimin maasta käsin tai siihen tarkoitukseen suunnitellulla metsäkoneella. Johtokadun reunapuiden oksinta voidaan tehdä edellä mainituilla menetelmillä ja lisäksi helikopteriraivauksella. Helikopterioksinnan etuna on nopeuden lisäksi se, että sillä voidaan raivata myös kaikista korkeimmalla olevat oksat ja johtokadulle päin taipuneet latvat, jotka ovat alttiita taipumaan johtokadulle lumikuorman painosta. Raivauksen ja oksinnan kustannukset vaihtelevat käytetyn menetelmän mukaan. Arviot kustannuksista on esitetty taulukossa 7.2. Hinnat eivät sisällä mahdollista kasvimaan jälkikäsitteilyä ja poiskuljetusta, mikä varsinkin taajamien läheisyydessä usein joudutaan tekemään.

Taulukko 7.2. Kasvuston käsittelyn kustannusarvioita.

menetelmä	raivaus [€/km]	oksinta [€/km]	molemmat [€/km]
jalkaisin			150
koneella	150	150	300
helikopterilla		750	

Kohdassa 6.5 esitetyn selvityksen mukaan *lumi ja jää* aiheuttavat arviolta 8 % pj:sta ja 26 % aj:sta. Tehdyn arvion mukaan lumikuormista aiheutuu selvästi enemmän aj:ta kuin pj:ta, siksi raivauksen ja oksinnan aj:den vähennyspotentiaali on oletettavasti pj:ta suurempi.

7.5 Kunnan valvonta

Sähköverkon komponenttien kulumisesta ja vanhenemisesta aiheutuvien jälleenkytkentöjen määrää on vaikea arvioida. Jälleenkytkentöjen aiheuttajien selvityksessä (kohta 6.5) ei ollut mahdollista saada selville mitkä jälleenkytkennöistä olivat aiheutuneet rakenneviasta. Senerin selvityksen mukaan (kuva 6.8) rakenneviasta aiheutuu noin 5 % vuoden pj:sta. Senerin esittämä lukema ei ole ristiriidassa tässä diplomityössä tehdyn arvion kanssa, jonka mukaan 13 % pj:sta ja 12 % aj:sta luokiteltiin aiheutuneen tuntemattomasta syystä. Kunnossapidon laadun parantamisella voisi olla mahdollista vähentää

rakennevioista aiheutuneita jälleenkytkentöjä. Vähennyspotentiaali verrattuna muihin vaihtoehtoihin ei liene kuitenkaan kovin suuri.

Käytäntö on osoittanut, että avojohtojen säievika, orrelle putoaminen ja eristimien halkeamat ovat keskijänniteverkon jälleenkytkentöjä aiheuttavia rakennevikoja. Säievika syntyy yleensä kaatuneen puun tai jääkuorman rasittamassa johtimessa. Säie purkautuu ajan mittaan ja katkenneen säikeen pituus kasvaa niin suureksi, että se ylittää aiheuttamaan oikosulun viereisen vaiheen kanssa. Säie palaa luultavasti poikki oikosulkuvirran vaikutuksesta jo ennen pjk:ta tai sen jälkeen polttoaikana. Säie alkaa purkautua uudelleen poikkipalamisen jälkeen ja aiheuttaa uuden jälleenkytkennän mahdollisesti pitkänkin ajan kuluttua. 1960-luvulla rakennetut johdot esimerkiksi BT-johtimet (bantam) ovat kokemuksen mukaan keskimääräistä alttiimpia säievi-oille. [Rei 06]

Sähköverkon säännölliset kuntotarkastukset kuuluvat sähköverkkoyhtiöiden toimintarutiineihin. Sen vuoksi kunnossapitojärjestelmissä ei ole paljoakaan parantamisen varaa lyhyiden sähkökatkosten vähentämistä ajatellen. Tilanteissa on tietenkin yhtiökohtaisia eroja riippuen esimerkiksi käytettävästä tarkastuskierroksen pituudesta eli ajasta, jonka kuluessa koko verkkomassa tarkastetaan kertaalleen läpi. Normaalin kuntotarkastuskierroksen lisäksi voidaan ottaa käyttöön erityisiä tehotarkastusalueita, jotka tarkastetaan muuta verkkoa nopeammilla kierrosväleillä. Tällaisia alueita voisivat olla esimerkiksi taajamat, vaara-alueet sekä vanhimmat verkon osat. Kunnonhallinnan tehostamiseksi voidaan tarkastuksessa käyttää apuvälineitä kuten purkauskame-roita. Kunnonhallintajärjestelmien parantamiselle on vaikea arvioida yksiselitteistä hintaa.

7.6 Releasettelu

TKK:n tekemissä mittauksissa Kestilän sähköasemalla on havaittu, että osa ajk:sta on turhia. Turha ajk tarkoittaa että pjk on jo selvittänyt vian, mutta liian lyhyen polttoajan (kuva 2.1) takia rele tulkitsee pjk:n jälkeisen kytkentävirtasysäyksen vikavirraksi ja avaa katkaisijan ajk:n ajaksi. Maasuluista aiheu-

tuvia ajk:ta voidaan siis vähentää säätämällä polttoaikaa pidemmäksi. Oikosulut täytyy kuitenkin katkaista välittömästi niiden maasulkuja huomattavasti suuremman vikavirran vuoksi. Turhien ajk:den määrä johtolähdöillä riippuu luultavasti useasta eri muuttujasta.

Releasettelun muutokset on hyvin edullista tehdä. Kustannukset muodostuvat ainoastaan asetusten muuttamiseen käytetystä ajasta. Releasettelujen vaikutuksia jälleenkytkentöjen määriin ei ollut mahdollista tutkia tähän diplomityöhön käytettävän ajan puitteissa. Lisätutkimusta ja erilaisten releasetusten kokeiluja olisi syytä tehdä, koska releasettelut vaikuttaisivat kannattavalta tavalta vähentää ajk:ta.

7.7 Muita menetelmiä

Lyhyisiin sähkökatkoksiin vaikuttavat suurin osa menetelmistä, joilla pyritään vaikuttamaan myös pitkien katkosten määriin. Useat eri menetelmät liittyvät verkkojen topologiaan eli johtojen ja sähkö- sekä erotinasemien sijoitteluun. Eri johtolajeista avojohtojen käyttö keskijänniteverkoissa on ollut yleisintä edullisuutensa ansiosta. Vähemmän vikaherkkien johtolaatujen käyttö on perusteltua, jos pyritään sähkön laadun kokonaisvaltaiseen parantamiseen. On myös olemassa toimenpiteitä, joilla nopeutetaan ja helpotetaan vikojen paikantamista ja vikojen havaitsemista. Tässä kohdassa mainitaan toimenpiteitä, jotka aikaisemmin mainittujen lisäksi vähentävät lyhyitä sähkökatkoksia, mutta joita ei käsitellä tässä diplomityössä sen enempää. Toimenpiteen luonteesta riippuen niille pyritään tekemään myös karkeat hinta-arviot.

Nykytrendin mukaan keskijännitejakeluverkon avojohdot pyritään siirtämään korvausinvestointien yhteydessä teiden varsille. Siihen on päädytty, koska teiden varsille siirrettyjen johtojen vikojen havaitseminen ja korjaaminen on nopeampaa kuin keskellä metsää kulkevien johtojen. Kun toiselta puolelta johtokatua puuttuvat puut tien ansiosta, myös lyhyitä sähkökatkoksia aiheuttavien puiden taipumiset ja oksien lentämiset johdoille vähentyvät. Teiden varsille siirtämisen vaikutuksista lyhyiden sähkökatkosten vähentymiseen ei ole tutkittua tietoa. Avojohtojen siirtämisestä teiden varsille on vaikea antaa

hinta-arviota. Kustannukset riippuvat siitä, joudutaanko johdot rakentamaan aikaisempaa pidemmiksi. Maankäyttösopimukset voivat olla helpommin ja edullisemmin järjestettävissä teiden varsille kuin keskelle maanomistajan maita. Keskijännitejohtojen teiden varsille siirtoa puoltavana tekijänä on ennen kaikkea keskeytysaikojen lyhentäminen. Lyhyiden sähkökatkosten vähentyminen on myös syytä ottaa huomioon.

Topologiaan liittyvä tärkeä vaihtoehto on pylväskatkaisija. Se on pylväsrakennelmaan asennettava edullinen kauko-ohjattava katkaisija-asema, jolla on myös verkon suojausautomaatiikkaa. Pylväskatkaisijan ero kauko-ohjattavaan erotinasemaan on siinä, että se sisältää suojarieleet ja sillä voidaan katkaista suurempia kuormitusvirtoja. Pylväskatkaisijan hinnat ovat tällä hetkellä luokkaa 20 000 € kappaleelta verkkoon asennettuna. Pylväskatkaisijoilla on suuri toimitusvarmuutta parantava vaikutus, koska niillä voidaan rajata niin pysyvien kuin lyhytaikaistenkin vikojen vaikutusaluetta pienemmäksi, jolloin asiakkaiden kokema vikojen kokonaismäärä ja -aika vähenevät. Ne soveltuvat erittäin hyvin esimerkiksi vikaherkkien johtolähtöjen alkuun tai erottamaan pitkät johtohaarat runkojohdosta.

Lähivuosina paljon puhetta ja tutkimusta herättänyt 1 kV:n järjestelmä voisi olla taloudellisesti kannattava sähkön laadun parantamisvaihtoehto. 1 kV:n siirtotekniikalla voidaan muuttaa pienitehoisia ja vika-alttiita keskijännitejohtohaaroja toimintavarmempaan muotoon. 1 kV:n järjestelmässä johtimena voidaan käyttää tavallista AMKA-riippukierrekaapelia. Koska vikaherkän avojohdon määrä vähenee, myös pitkien ja lyhyiden sähkökatkosten määrät pienenevät.

Keskijänniteverkon kaapeloinnilla voidaan poistaa lyhyet sähkökatkokset kokonaan, koska maakaapeleissa ei esiinny ohimeneviä vikoja. Samalla ilmastin vaikutukset myös pysyviin sähkökatkoksiin saataisiin poistettua. Taajami- en ulkopuolisen käytön esteenä ovat kaapeloinnin korkeat rakennuskustannukset, jotka ovat 2 – 3-kertaiset avojohdon verrattuna. Kaapeloinnin oletetaan lisääntyvän myös maaseudulla tiukentuvien ympäristövaatimusten, kaa-

pelien valmistustekniikan ja maahanauraustekniikan kehittymisen sekä elin-jaksokustannusajattelun yleistymisen myötä [Ktm 06]. Yleistyminen alentaa myös kaapeloinnin kustannuksia. Maakaapelin ja avojohdon käyttökustannusten ero saattaa pienentyä ennestään maakaapelin eduksi lähivuosikymmeninä. Lähteen [Mar 06] mukaan ilmastonmuutoksesta aiheutuva kunnos-sapitokustannusten kasvu voi olla merkittävää avojohtoverkoissa, mikä voi parantaa huomattavasti maakaapelin kannattavuutta.

PAS-johdoilla voidaan vähentää ohimeneviä vikoja. PAS-johtoa ympäröivän eristeainekerroksen vuoksi ne kestävät avojohtoa paremmin sääolosuhteita ja niiden tarvitsema johtokatu voidaan jättää kapeammaksi. Johtojen lyhyt-kaiset kosketukset toisiinsa, puihin sekä oksiin eivät aiheuta käyttöhäiriöitä. PAS-johdot ovat noin 20 % avojohtoja kalliimpia, mutta PAS-johtojen pienempi vikatiheys parantaa niiden taloudellisuutta [Nis 03].

Keskijännitteinen riippukierrekaapeli on pienjännitteisen riippukierrekaapelin tapaan hyvin tunteeton ympäristön vaikutuksille. Riippukierrekaapelia käyttämällä saataisiin myös jakeluhäiriöitä vähennettyä huomattavasti. Riippukierrekaapelin hinta on lähellä maakaapelia, joka lienee syynä siihen, että se ei ole Suomessa käytössä kuin erikoistapauksissa (0,3 % keskijännitejohdoista on riippukierrekaapelia [Ete 06]).

Oikosulun laskennallinen paikantaminen on jo käytössä useissa käytöntukijärjestelmissä, mutta maasulun paikantaminen on laskennallisesti haastavampaa. Maasulun paikantamiseen voidaan käyttää käytöntukijärjestelmään integroituja verkkoon sijoitettuja vianilmaisimia. Vikapaikanlaskennalla voidaan vähentää kokeilukytkentöjä, joita käytetään vikapaikan määrittämiseen sen jälkeen, kun johtolähdön katkaisija on lauennut pysyvän vian vuoksi.

Nollajännitteen seurannalla voidaan seurata sähköverkon vikojen kehittymistä ja havaita tulevat vikapaikat ennen kuin jälleenkytkentä tai pysyvä vika tapahtuu. Nollajännitteen seuraaminen tarkoittaa sähköaseman avokolmiokäämin jännitteen mittaamista ja otosten seuraamista riittävän pitkältä

ajalta, jotta hitaatkin muutokset olisivat mahdollista havaita [Sen 01]. Käytännössä nollajännitteen mittausta käytetään hyväksi siten, että havaittaessa muutos nollajännitteessä ryhdytään siirtämään johto-osia naapurisähköaseman perään, kunnes nollajännitteen muutos havaitaan toisellakin sähköasemalla. Johto-osalla, jonka siirtäminen toisen sähköaseman syötettäväksi aiheutti nollajännitteen muutoksen naapurisähköasemalla, on alkava vika. Johto-osien siirtäminen voidaan tehdä erottimilla siten, että katkaisijan käyttämistä ei tarvita ja asiakkaat eivät koe sähkökatkoksia lainkaan.

8 TOIMENPITEIDEN JÄLLEENKYTKENTÖJÄ VÄHENTÄVÄN VAIKUTUKSEN SELVITTÄMINEN

Luvussa 6 esitettiin arvio lyhyiden sähkökatkosten syistä ja luvussa 7 käytiin läpi mahdollisia toimenpiteitä lyhyiden sähkökatkosten vähentämiseksi. Luvun 6 perusteella yleisimmät aiheuttajat ovat *salamat ja ukkosmyrsky, eläimet* sekä *tuuli ja myrsky*. Niiden vaikutuksia voimme vähentää puoliventtiilisuojoilla, kompensoinnilla sekä eläinsuojoilla. Kasvuston käsittelyllä voimme vähentää lumikuormien ja kovan tuulen aiheuttamia jälleenytkentöjä. Kyseiset lyhyiden sähkökatkosten vähennystoimenpiteet ovat ainoita, joiden tekniikka on käytännössä testattu ja helposti saatavissa. Jotta toimenpiteille voidaan suorittaa kannattavuuslaskentaa, täytyy tietää kuinka paljon ne vähentävät jälleenytkentöjä. Mainitut toimenpiteet ovat käytössä osassa Kainuun Energian jakeluverkkoa, minkä vuoksi tehokkuuden määrittämiseen tarvittavaa tilastotietoa on saatavilla. Toimenpiteet ovat kuitenkin käytössä vain siinä laajuudessa, että niihin lisäinvestoimisen harkitseminen on edelleen mielekästä.

Tässä luvussa arvioidaan kompensoinnin, puoliventtiilisuojojen, eläinsuojojen sekä kasvuston käsittelyn vaikutuksia lyhyiden sähkökatkosten määriin. Arviointiin käytetään tilastoja vuosilta 1990 – 2006, jotka sisältävät johtolähtökohteisesti vuosittaiset pjk- ja ajk-määrät sekä avojohtopituudet. Lisäksi tilastoista käy ilmi, minä vuonna toimenpiteet on otettu käyttöön. Puoliventtiilisuojojen toimintaa tarkastellaan erikseen kompensoidussa ja maasta erotetussa verkossa. Tarkoituksena on löytää arviot toimenpiteiden keskimääräisistä vähennysprosentteista niin pjk:lle kuin ajk:llekin niiden käyttöönoton jälkeen. Jatkossa käytetään käsitettä *toimenpiteen tehokkuus*, jolla tarkoitetaan toimenpiteen jälleenytkentöjä vähentävää vaikutusta, sekä termiä *tehokkuusprosentti* vähennysprosentin sijaan. Tehokkuusprosentit on tarpeellista määrittää toimenpiteiden kannattavuuslaskentaa varten. Toimenpiteiden tehokkuusprosenttien laskentaan käytetty menetelmä on selitetty seuraavassa kappaleessa.

8.1 Laskentamenetelmä

Toimenpiteiden tehokkuutta tutkittiin vertailemalla johtolähtöjen jälleenkytkentämääriä kaikilta johtolähdöiltä, joilla tarkasteltava toimenpide on käytössä, ennen toimenpiteiden käyttöönottoa sekä käyttöönoton jälkeen. Vertailu tehtiin erikseen pjk- ja ajk-määrille.

Vuosi, jolloin toimenpide oli otettu käyttöön johtolähdöllä, merkittiin niin sanotuksi nollavuodeksi. Käsiteltävien johtolähtöjen jälleenkytkentämäärät normeerattiin koko jakeluverkkoalueen vuotuisella ajk- tai pjk-summalla, jotta vuosien väliset jälleenkytkentämäärät saataisiin vertailukelpoisiksi. Peräkkäisten vuosien välillä voi olla suuriakin eroja: vuonna 1996 KAI:n jakeluverkkoalueella oli 3859 pjk:ta ja seuraavana vuonna niitä oli 6201.

Johtolähtöjen pjk- ja ajk-aikasarjat (vuotuiset jälleenkytkennät) järjestettiin uudelle aikajanelle nollavuoden perusteella siten, että nollavuotta edeltävien ja jälkeisten vuosien jälleenkytkentämäärät eri vuosilta voidaan laskea yhteen. Vastaava uudelleenjärjestely nollavuoden perusteella tehtiin avojohtopituuksille. Uuden aikajanan jälleenkytkentämäärien vuosisummat suhteutettiin vastaavaan avojohtopituuteen, koska rakentamisen ja kytkentäjärjestelyjen vuoksi johtolähtöjen avojohtopituudet ovat muuttuneet vuosien kuluessa. Tällä tavalla saatiin määritettyä toimenpiteiden tehokkuuden selvittämiseen käytetyt pupl-arvot (per unit per length), jotka kehitettiin tätä laskentamenetelmää varten. Toimenpiteiden tehokkuusprosentit määritettiin laskemalla pupl-arvoista keskiarvot uuden aikajanan vuosilta ennen ja jälkeen toimenpiteen käyttöönoton sekä laskemalla niiden prosentuaalinen erotus. Pupl-arvoista ei voida päätellä mitään absoluuttisina arvoina. Niiden tarkoitus onkin mahdollistaa lyhyitä sähkökatkoksia vähentävien toimenpiteiden tehokkuuden laskeminen kootusti usean johtolähdön jälleenkytkentäaikasarjojen perusteella, kun toimenpiteet on otettu käyttöön eri kalenterivuosina.

Seuraava esimerkki selventää laskentamenetelmää, jolla kompensoinnin, eläinsuojien ja kasvuston käsittelyn sekä pienellä erolla puoliventtiilisuojien

pjk:den ja ajk:den tehokkuusprosentit on laskettu. Laskentamenetelmän eroa puoliventtiilisuojiin kohdalla on selitetty tulosten yhteydessä.

8.1.1 Esimerkki

Esimerkkinä tarkastellaan, kuinka paljon eläinsuojien asennus on vähentänyt pjk:ta määritettynä kaikilta johtolähdöiltä, joille eläinsuojat on asennettu vuosina 1990 - 2006. Kyseessä on pelkkä esimerkki, jonka arvot eivät perustu todelliseen tilanteeseen. Esimerkkiä ja laskentamenetelmää havainnollistava kaavio on esitetty kuvassa 8.1, johon esimerkissä käytetyt merkinnät viittaavat.

Tarkastellaan viittä johtolähtöä, joilta on tiedossa vuosittaiset pjk-määrät, vuoden keskimääräinen avojohtopituus sekä eläinsuojien asennusajankohta vuosilta 1990 - 2006. Nimetään johtolähdöt seuraavasti: Lähtö 1, 2, 3, 4 ja 5. Kaavion (kuva 8.1) osassa **a** on tarkasteltavien johtolähtöjen avojohtopituudet eri vuosilta. Nollavuodet eli vuodet, jolloin eläinsuojat on asennettu, on korostettu keltaisella. Osassa **b** on eläinsuojattujen johtolähtöjen vuotuiset pjk-määrät ja osassa **c** koko jakeluverkkoalueen pjk:den summat. Osassa **d** on eläinsuojattujen johtolähtöjen pjk:den vuosisummat normeerattuna osan **c** koko jakeluverkkoalueen pjk-summalla ja kerrottuna kymmenellä (vain tässä esimerkissä) kuvausteknisistä syistä. Johtolähtöjen normeeratut pjk-määrät ja avojohtopituudet järjestetään nollavuoden mukaan uudelle aikajanelle osien **e** ja **f** näyttämällä tavalla. Osissa **e** ja **f** ei pystysarakkeiden otsikkoina ole siis enää kalenterivuosi vaan vuodet (-8) – (+8), jotka tarkoittavat aikaa ennen ja jälkeen kompensoinnin asentamisen. Nollavuoden mukaan järjestetyistä pjk-määristä ja avojohtopituuksista lasketaan summat. Niiden perusteella lasketaan osassa **g** esitetyt pupl-arvot jakamalla normeerattujen ja järjestettyjen pjk-määrien summa vastaavalla avojohtopituuksien summalla ja kertomalla kuvausteknisistä syistä sadalla (vain tässä esimerkissä). Kuvan punaiset nuolet näyttävät osan **g** uuden aikajanan vuoden (-8) pupl-arvon laskutekijät. Osassa **h** on esitetty saatujen tulosten perusteella lasketut keskimääräiset pupl-arvot ennen ja jälkeen eläinsuojien asennuksen sekä niiden avulla laskettu eläinsuojien pjk:den tehokkuus.

Johtolähtöjen avojohtopituudet [km]

a)

vuosi	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Lähtö 1	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	26	26	26	26	26	26	26
Lähtö 2	99	99	99	105	105	105	132	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151
Lähtö 3	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	72	72	72	72	72	72	72
Lähtö 4	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	99	99	84	84	84	84	84
Lähtö 5	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	102	102	102	102	102	102	102

Johtolähtöjen pj:t [kpl]

b)

Lähtö 1	2	2	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	3	1	0	0	2
Lähtö 2	0	2	2	0	16	18	14	9	3	22	0	7	23	0	3	9	7
Lähtö 3	53	33	14	7	0	0	2	3	0	4	4	4	19	5	3	0	1
Lähtö 4	36	34	15	26	13	16	1	5	0	7	4	11	8	21	15	1	7
Lähtö 5	25	10	21	7	0	1	1	0	1	6	3	5	11	6	1	0	5

KAI:n jakeluverkkoalueen pj-summa [kpl]

c)

Summa	348	243	159	120	87	105	54	51	15	117	36	81	192	99	66	30	66
-------	-----	-----	-----	-----	----	-----	----	----	----	-----	----	----	-----	----	----	----	----

Normeeratut pj:t [kpl]

d)

Lähtö 1	0,06	0,08	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,28	0,00	0,16	0,10	0,00	0,00	0,30
Lähtö 2	0,00	0,08	0,13	0,00	1,84	1,71	2,59	1,76	2,00	1,88	0,00	0,86	1,20	0,00	0,45	3,00	1,06
Lähtö 3	1,52	1,36	0,88	0,58	0,00	0,00	0,37	0,59	0,00	0,34	1,11	0,49	0,99	0,51	0,45	0,00	0,15
Lähtö 4	1,03	1,40	0,94	2,17	1,49	1,52	0,19	0,98	0,00	0,60	1,11	1,36	0,42	2,12	2,27	0,33	1,06
Lähtö 5	0,72	0,41	1,32	0,58	0,00	0,10	0,19	0,00	0,67	0,51	0,83	0,62	0,57	0,61	0,15	0,00	0,76

Normeeratut nollavuoden perusteella järjestetyt pj:t [kpl x 10]

e)

vuosi (- / +)	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
Lähtö 1					0,06	0,08	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,28	0,00	0,16	
Lähtö 2		1,84	1,71	2,59	1,76	2,00	1,88	0,00	0,86	1,20	0,00	0,45	3,00					
Lähtö 3							1,52	1,36	0,88	0,58	0,00	0,00	0,37	0,59	0,00	0,34	1,11	
Lähtö 4			1,03	1,40	0,94	2,17	1,49	1,52	0,19	0,98	0,00	0,60	1,11	1,36	0,42	2,12	2,27	0,33
Lähtö 5			1,32	0,58	0,00	0,10	0,19	0,00	0,67	0,51	0,83	0,62	0,57	0,61	0,15	0,00	0,76	
Summa	3,16	3,33	3,99	2,80	4,41	3,46	3,78	2,92	3,89	1,20	1,63	4,72	2,55	1,00	3,16	2,61	1,60	

Nollavuoden perusteella järjestetyt avojohtopituudet [km]

f)

vuosi (- / +)	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Lähtö 1					7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	26	26	26
Lähtö 2		105	105	132	151	151	151	151	151	151	151	151	151				
Lähtö 3							71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	72
Lähtö 4			103	103	103	103	103	103	103	103	103	99	99	84	84	84	84
Lähtö 5		101	101	101	101	101	101	101	101	102	102	102	102	102	102	102	102
Summa	206	309	336	355	362	362	433	433	434	434	434	430	279	264	283	181	182

g)

pupl x 100	1,53	1,08	1,19	0,79	1,22	0,95	0,87	0,67	0,90	0,28	0,37	1,10	0,91	0,38	1,12	1,44	0,88
------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

h)

- Lasketaan keskiarvo kuudelta vuodelta ennen ja jälkeen nollavuoden
- ennen
jälkeen
- Eläinsuojien vähennys pj-määrissä: 27,0 %

Kuva 8.1. Esimerkki toimenpiteiden tehokkuuksien arvioimiseen käytetystä laskentamenetelmästä. Lukemat eivät perustu todelliseen tilanteeseen.

Muutoksen laskemiseen käytettiin esimerkissä kuuden vuoden arvoja ennen ja jälkeen eläinsuojien asennuksen. Kuten tässä esimerkissä niin todellissakin tapauksissa laskuihin käytettävien vuosien määrät valittiin siten, että laskuihin käytettävä avojohtopituus olisi likimäärin yhtä pitkä ja mahdollisimman suuri kaikilta laskentaan käytetyiltä uuden aikajanan vuosilta. Nollavuotta ei oteta mukaan laskuihin, koska toimenpiteet on otettu käyttöön nollavuoden kuluessa ja tarkasteluun haluttiin kokonaisia vuosia.

8.2 Epävarmuustekijät

Toimenpiteiden tehokkuusprosenttien määrittämiseen liittyy suuri määrä muuttujia ja epävarmuustekijöitä. Tässä kohdassa luetellaan ja pohditaan epävarmuustekijöiden vaikutuksia pinnallisesti. Varsinaisia varmuusmarginaaleja ei yritetty määrittää. Toimenpiteiden tehokkuus voidaan laskea myös muilla tavoilla, joilla saadaan erilaisia tuloksia. Tämän diplomityön yhteydessä päätettiin käyttää kohdassa 8.1 esitettyä menetelmää, koska sen arvioitiin olevan vähiten altis paikallisille ja ajallisille jälleenkytkentämäärien vaihteluille.

Toimenpiteiden tehokkuuden määrittämiseen käytettyihin lähtötietoihin sisältyy epävarmuustekijöitä. Pjk- ja ajk-määrät ovat johtolähtöjen jälleenkytkentäreleiltä kuukausittain haettuja laskurilukemia. Koska releiden lukemat on käyty lukemassa paikanpäällä, lukemat on käytännössä luettu kuukauden vaihteessa muutaman päivän tarkkuudella. Toimenpiteiden tehokkuuslaskennassa johtolähtöjen jälleenkytkennöistä lasketaan vuosisummat, jotka normeeraataan kaikkien johtolähtöjen jälleenkytkentöjen summalla vuosittain. Vuosisummassa releiden lukemisajankohdalla ei ole suurta merkitystä, koska ainoastaan tammikuun ja joulukuun muutamien päivien jälleenkytkennät voivat mennä väärälle vuodelle.

Johtolähtöjen jälleenkytkentämäärät eroavat toisistaan maasto-, kasvusto- ja ilmasto-olosuhteiden vuoksi. Kainuun Energian jakeluverkkoalue on laaja. Tästä syystä sääilmiöt, kuten myrskyt ja ukkonen, eivät esiinny kaikilla alueilla samalla voimakkuudella. Laskentamenetelmässä tutkitaan jälleenkytkentö-

jen muutoksia samoilla johtolähdöillä ennen ja jälkeen toimenpiteiden käyttöönoton ja sen vuoksi niihin ei sisälly kovin suurta epätarkkuutta johtuen alueellisista vaihteluista.

Jälleenkytkentämäärät vaihtelevat vuosien välillä suurestikin riippuen lähinnä vuotuisesta salamamäärästä ja lumikuormatilanteesta. Käytetyssä laskentamenetelmässä johtolähtöjen jälleenkytkentämäärät on normeerattu koko jakeluverkkoalueen pj:den tai ajk:den vuosisummalla. Tästä syystä vuosien välisellä vaihtelulla ei pitäisi olla suurta merkitystä lopputuloksen kannalta. Vuosien välisen vaihtelun merkitystä käytetyssä menetelmässä vähentää myös se, että johtolähtöjen aikajanaat järjestetään uudelle aikajanelle sen mukaan milloin toimenpide on otettu käyttöön.

Kompensoinnin, eläinsuojien ja kasvuston käsittelyn yhteydessä ei ole eroteltu johtolähtöjä sen perusteella, onko sillä muita jälleenkytkentöihin vähentävästi vaikuttavia toimenpiteitä käytössä. Esimerkiksi eläinsuojaus ja kompensointi vaikuttavat osin samaan ongelmaan: eläinten aiheuttamiin maasulkuihin sähköverkon päällystämättömissä ja jännitteisissä osissa. Tämän epävarmuustekijän vuoksi on mahdollista, että toimenpiteiden tehokkuus näyttää pienemmältä kuin mitä se olisi verkossa, jossa olisi käytössä ainoastaan yksi toimenpide jälleenkytkentöjen vähentämiseksi. Vastaavasti on myös mahdollista, että tutkittaessa yhtä toimenpidettä toisen käyttöönotto on vaikuttanut suhteelliseen jälleenkytkentämäärien tasoon alentavasti ja tehokkuudeksi saadaan sen vuoksi pienempi prosenttiluku. Puoliventtiilisuojien kohdalla tehokkuuden määrittäminen on tehty erikseen kompensoidulle ja maasta erotetulle verkolle.

Kainuun Energian jälleenkytkentätilastot sisältävät kaikki jälleenkytkennät eivätkä vain onnistuneita. Tarkastelussa olevilla toimenpiteillä voidaan ja on tarkoitus vähentää vain lyhyitä sähkökatkoksia eli käytännössä jälleenkytkentöjä. Koska pysyviä vikoja edeltäviä pj:ta ja ajk:ta ei voida tarkastelussa olevilla toimenpiteillä estää, laskentamenetelmällä saadut tehokkuusprosentit

ovat oletettavasti pienempiä kuin, jos mukana olisivat vain onnistuneet jälleenkytkennät.

Useista epävarmuustekijöistä johtuen käytetyllä laskentamenetelmällä saadut arviot toimenpiteiden tehokkuusprosentteista ovat melko karkeita. Toimenpiteiden tehokkuus on riippuvainen olosuhteista, ajasta ja paikasta. Laskentaan käytetty verkkomassa, jälleenkytkentöjen sekä vuosien määrät ovat kuitenkin riittävän suuret toimenpiteiden tehokkuuksien suuruusluokan määrittämiseen. Tässä työssä käytetyn laskentamenetelmän käyttämiseen päädyttiin, koska siihen arvioitiin sisältyvän vähiten epävarmuuksia verrattuna muihin mahdollisiin laskentamenetelmiin. Käytetyssä menetelmässä tulokset saadaan useilta eri johtolähdöiltä ja vuosilta summatuista *pupl*-arvoista. Muita mahdollisia laskentamenetelmiä ei käsitellä tässä työssä lainkaan. Tulokset ovat laskentamenetelmästä riippumatta karkeita ja monesta muuttujasta riippuvaisia arvioita.

8.3 Tulosten esittäminen

Laskentamenetelmän avulla saadaan toimenpiteiden tehokkuusprosentit erikseen *pjk*:lle ja *ajk*:lle. Esimerkiksi eläinsuojien *pjk*:den tehokkuusprosentti kertoo, kuinka monta prosenttia eläinsuojien asentaminen johtolähdölle laskee *pjk*:den vuotuista tasoa verrattuna asennusta edeltävään tilanteeseen. Lasketut tehokkuusprosentit *pjk*:lle ja *ajk*:lle esitetään taulukossa jokaiselle käsiteltävälle toimenpiteelle erikseen. Taulukossa esitetään tehokkuusprosenttien lisäksi avojohtopituus ja vertailuaika. Avojohtopituudella tarkoitetaan tässä yhteydessä keskimääräistä avojohtopituutta. Keskimääräinen avojohtopituus on laskettu keskiarvona vuosilta, joita on käytetty tehokkuusprosenttien laskentaan. Vertailuaika tarkoittaa vuosien määrää, joita on käytetty *pupl*-arvojen keskiarvon laskentaan ennen ja jälkeen nollavuoden. Avojohtopituus ja vertailuaika kerrotaan tehokkuusprosenttien yhteydessä, jotta lukija saisi kuvan kuinka suurta verkkomassaa ja miten pitkältä ajalta on käytetty laskennassa.

Tulosten käsittelemisen yhteydessä esitetään pylväsdiagrammina tehokkuusprosenttien laskentaan käytetyt pupl-arvot eri vuosilta. Vaaka-akselilla on nollavuoden perusteella luodun aikajanan vuodet ennen ja jälkeen käyttöönoton. Arvoakselilla on pupl-arvot kerrottuna 10 000:lla, jotta lukemat saataisiin lähelle nollaa ja desimaaleja vähemmäksi. Syy on siis puhtaasti kuvausteknillinen. Kuvan tarkoituksena on tuoda visuaalisesti esille toimenpiteiden vaikutukset jälleenkytkentämääriin ja luoda lukijalle mahdollisuus arvioida tuloksia. Pylväsdiagrammien lisäksi kuvassa on merkitty tummansinisellä laskennassa käytettyjen johtolähtöjen avojohtopituuksien summa. Tehokkuusprosenttien taulukossa esitetty avojohtopituus on laskettu avojohtopituuksien summien keskiarvona vertailuajalta.

Jokaisen toimenpiteen tehokkuuksien laskentatulosten ja kaavioiden lisäksi esitetään tehokkuuksia laskettaessa käytettyjen pupl-arvojen variaatiokerroimet ennen ja jälkeen nollavuoden. Variaatiokerroin (V) lasketaan keskihajonnan (s) ja keskiarvon (x) suhteena kaavan 1 mukaisesti [Til 07]. Variaatiokerroin ilmaisee, kuinka monta prosenttia laskentaan käytettyjen pupl-arvojen keskihajonta on niiden keskiarvosta. Variaatiokerroin esitetään tulosten yhteydessä, jotta tulosten epävarmuutta voidaan tarkastella ja vertailla muiden toimenpiteiden tuloksiin.

$$V = \frac{s}{x} (*100\%) \quad (1)$$

8.4 Kompensointi

Käytetyn laskentamenetelmän perusteella kompensointi vähentää pj:ta 35 % ja ajk:ta 17 %. Avojohtopituudet kompensoinnin asennushetken mukaisen aikajanan vuosina (-5) - 5 olivat keskimäärin 3163 km. Tulokset on koottu taulukkoon 8.1. Tulosten laskennassa on vertailuajana käytetty viittä vuotta.

Taulukko 8.1. Kompensoinnin jälleenkytkentöjä vähentävä vaikutus.

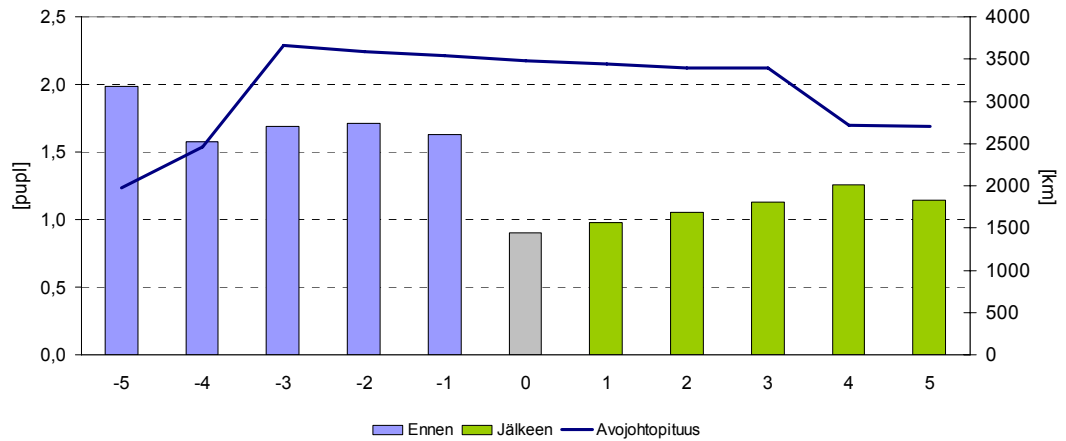
pjk	ajk	avojohtopituus	vertailuaika
[%]	[%]	[km]	[a]
35 %	17 %	3163	5

Taulukon 8.1 tehokkuusprosenttien laskemiseen käytettyjen pupl-arvojen variaatiokertoimet ennen ja jälkeen kompensoinnin asentamisen on esitetty taulukossa 8.2. Pjk:den variaatiokerroin on pienempi kuin ajk:den. Molempien variaatiokertoimet ovat lähes samansuuruiset ennen ja jälkeen kompensoinnin asennuksen.

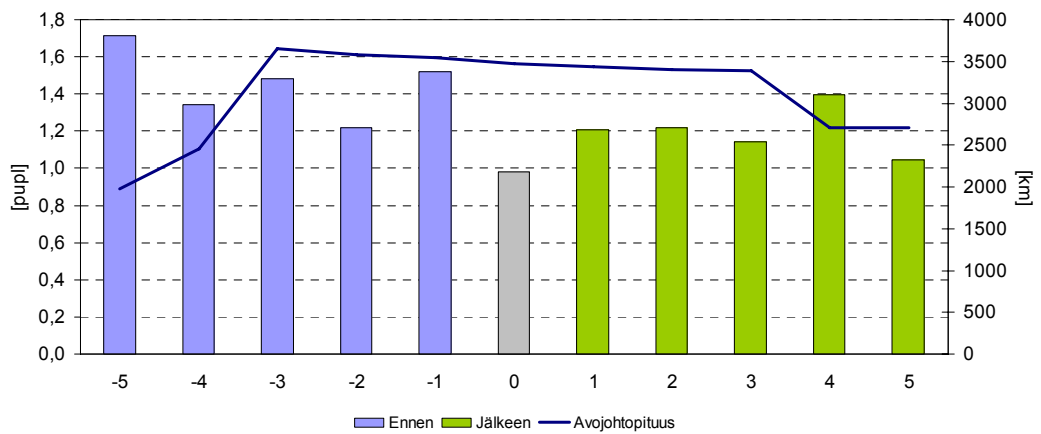
Taulukko 8.2. Kompensoinnin tehokkuuden laskemiseen käytettyjen pupl-arvojen variaatiokertoimet.

	ennen	jälkeen
	[%]	[%]
pjk	9	9
ajk	13	11

Kuvat 8.2 ja 8.3 esittävät jälleenkytkentöjen vuosittaiset pupl-arvot viisi vuotta ennen ja jälkeen kompensoinnin asennuksen. Kuvien esittämistä arvoista on määritetty edellä esitetyt tehokkuusprosentit ja variaatiokertoimet. Pjk:den pupl-arvoissa nähdään selkeää putoamista nollavuoden jälkeen, mutta ajk:den väheneminen ei ole niin selkeästi havaittavissa suuremman variaatiokertoimen vuoksi. Kuvissa nollavuoden palkki on värjätty harmaalla, koska nollavuotta ei ole otettu tulosten laskennassa huomioon. Sininen käyrä kuvaa avojohtopituutta. Vuoden (-5) pupl-arvon laskentaan käytetty avojohtopituus on selvästi alhaisempi muiden vuosien arvoihin verrattuna. Tämä tuo lisää epävarmuutta kyseisen vuoden arvoon.



Kuva 8.2. Kompensoinnin vaikutus pjk:hin.



Kuva 8.3. Kompensoinnin vaikutus ajk:hin.

Kirjallisuudessa on esitetty arvioita, joiden mukaan kompensointi voisi vähentää pjk:sta jopa 80 % [Sen 01]. Tässä kohdassa esitetyt tulokset ovat huomattavasti pienempiä ja oletettavasti myös realistisempia.

8.5 Eläinsuojat

Kainuun Energian jakeluverkosta noin 30 % on suojattu eläinsuojilla avojohtopituuksista laskettuna. Niiden asentaminen on ajoittunut vuosille 1998 - 2003. Nykyisen käytännön mukaan KAI:n jakeluverkkoon ei tehdä enää laajamittaisia eläinsuojien asennuksia. Tässä diplomityössä tarkastellaan kuitenkin niiden tehokkuutta ja arvioidaan kannattaisiko asennusta mahdollisesti jatkaa. Eläinsuojilla tarkoitetaan kipinäväleihin asennettavia lintu-

piikkejä sekä muuntajien napojen ja liitosjohtojen suojausta. Lintupallojen tehokkuutta ei tutkittu.

Kohdassa 8.1 esitetyllä laskentamenetelmällä saatiin tulokseksi, että eläinsuojat vähentävät pjk:ta 15 % ja ajk:ta 13 %. Lukemat on laskettu käyttämällä viittä vuotta ennen ja jälkeen nollahetken. Tällöin laskennassa mukana oleva avojohtopituus on keskimäärin 1827 km. Tulokset on koottu taulukkoon 8.3.

Taulukko 8.3. Eläinsuojien jälleenkytkentöjä vähentävä vaikutus.

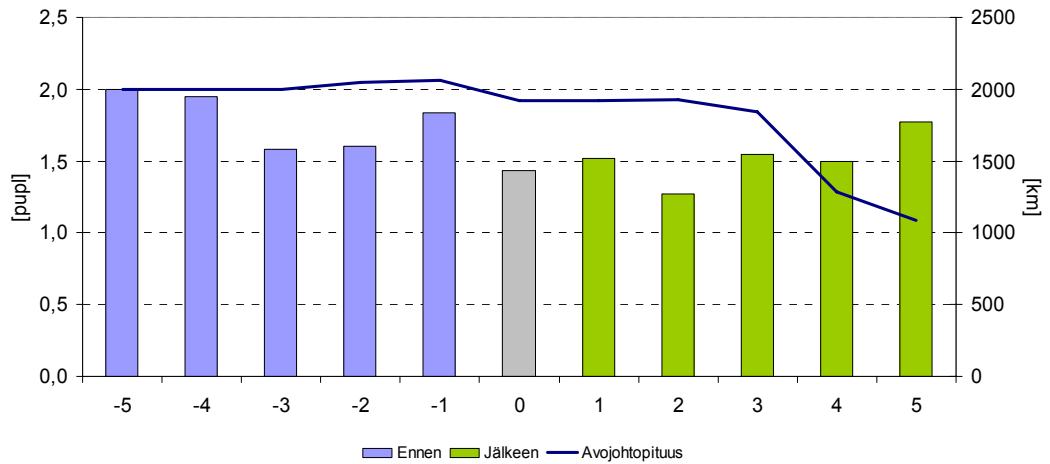
pjk	ajk	avojohtopituus	vertailuaika
[%]	[%]	[km]	[a]
15 %	13 %	1827	5

Tulosten laskentaan käytettyjen järjestettyjen pupl-arvojen variaatiokertoimet on esitetty taulukossa 8.4. Kuten kompensoinnin tehokkuuden laskuissakin, myös eläinsuojien laskentaan käytettyjen arvojen variaatiokertoimet ovat kohtuullisen pienet.

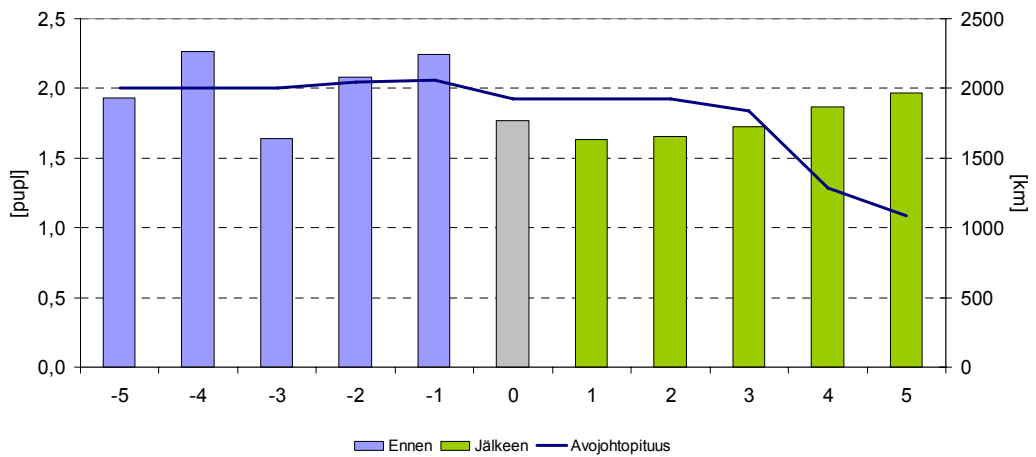
Taulukko 8.4. Eläinsuojien tehokkuuden laskemiseen käytettyjen pupl-arvojen variaatiokertoimet.

	ennen	jälkeen
	[%]	[%]
pjk	11	12
ajk	13	8

Menetelmällä saadut pupl-arvot on esitetty graafisesti kuvissa 8.4 ja 8.5. Molemista kuvaajista voidaan silmämääräisesti havaita jälleenkytkentämäärien vähentyminen eläinsuojien asennuksen jälkeen. Eläinsuojien asennuksen jälkeisistä vuosista kahden viimeisen kohdalla laskentaan käytetty avojohtopituus laskee selvästi, mikä tuo lisää epävarmuutta tuloksiin.



Kuva 8.4. Eläinsuojien vaikutus pjk:hin.



Kuva 8.5. Eläinsuojien vaikutus ajk:hin.

Eläinsuojien jälleenkytkentöjä vähentävä vaikutus tulosten perusteella on varsin alhainen. Laskentaan käytettyjen johtolähtöjen avojohtopituus on pitkä, joten otoksen koon ei pitäisi tuoda tulosten epävarmuuteen huomattavaa lisää. Luvussa 6 arvioitiin, että eläimet aiheuttaisivat vuosittain 19 % pjk:sta ja 9 % ajk:sta. Näiden lukemien valossa eläinsuojien pikajälleenkytkentöjä vähentävän vaikutuksen arvio on realistinen.

8.6 Puoliventtiilisuojat

Kainuun Energian jakeluverkossa puoliventtiilisuojia on asennettu vain kahdella sähköasemalla yhteensä neljälle johtolähdölle. Toisella sähköasemasta on käytössä kompensointilaitteisto. Kuhmon ja Kestilän sähköasemat, joiden

johtolähdöille puoliventtiilisuoja on asennettu, sijaitsevat noin 200 km etäisyydellä toisistaan itä-länsi-suunnassa. Kestilän sähköaseman kahdelle johtolähdölle on asennettu puoliventtiilisuoja vuosina 2001 ja 2002. Kuhmon sähköasemalle suojat asennettiin vuoden 2005 alussa ja vuoden 2006 toukokuussa. Tehokkuustarkasteluun otettiin mukaan kaksi Kestilän ja yksi Kuhmon sähköaseman johtolähdöistä. Toinen Kuhmon sähköaseman johtolähdöistä jätettiin tarkastelun ulkopuolelle, koska tilastotietoa puoliventtiilisuoja toiminnasta oli saatavilla alle vuoden ajalta. Puoliventtiilisuoja tehokkuusprosenttien määrittäminen poikkesi muista laskentadatan vähyyden vuoksi.

Käytetty laskentamenetelmä on lähes samanlainen kuin kompensoinnille ja eläinsuojailekin. Erona on, että normeeraukseen ei käytetty kaikkien johtolähtöjen jälleenkytkentämäärien summia, kuten muiden toimenpiteiden tarkastelun kohdalla, koska käsittelyssä oli vain kolmea johtolähtöä. Normeeraukseen koottiin samalla tavalla maadoitetuista ja lähellä sähköasemia olevista johtolähdöistä erilliset ryhmät. Tällä tavalla pyrittiin ottamaan huomioon erilaisten maadoitustapojen vaikutukset puoliventtiilisuoja tehokkuusprosentteihin.

Puoliventtiilisuojaile saadut tulokset kompensoidussa ja maasta erotetussa verkossa on esitetty taulukossa 8.5. Puoliventtiilisuojaile varustettujen johtolähtöjen ja normeerauksen käytettyjen johtolähtöjen avojohtopituudet on myös esitetty taulukossa. Muiden toimenpiteiden tehokkuuden määrittämisestä poiketen vertailuaika ei ollut lähtödatan vähäisyydestä johtuen yhtä pitkä ennen ja jälkeen nollahetken.

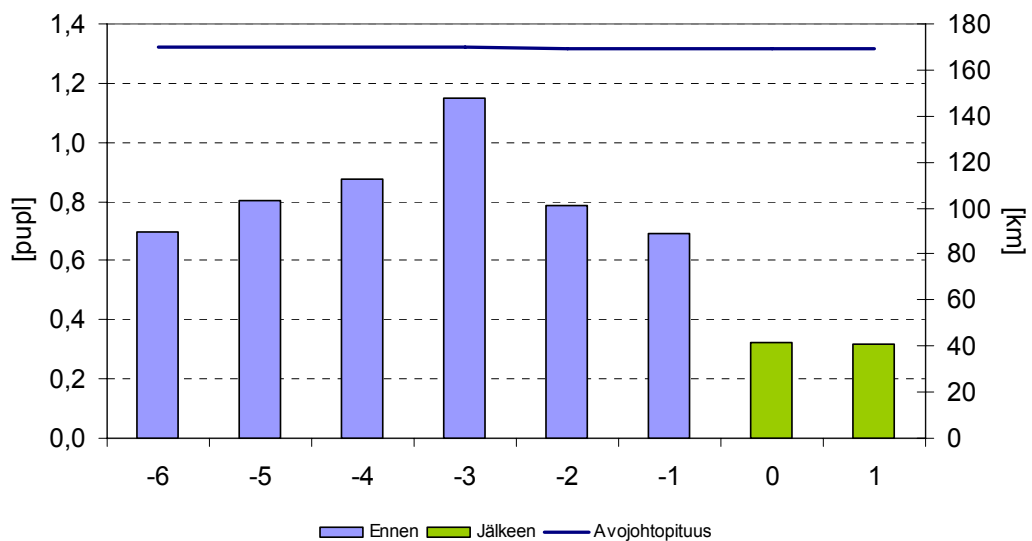
Taulukko 8.5. Puoliventtiilisuojaile jälleenkytkentöjä vähentävä vaikutus.

verkko	pjk	ajk	avojohtopituus	norm. lähdöt avojohtopituus	vertailuaika	
					ennen	jälkeen
	[%]	[%]	[km]	[km]	[a]	[a]
kompensoitu	62	77	169	1026	6	2
maasta erotettu	71	60	99	593	6	5,5

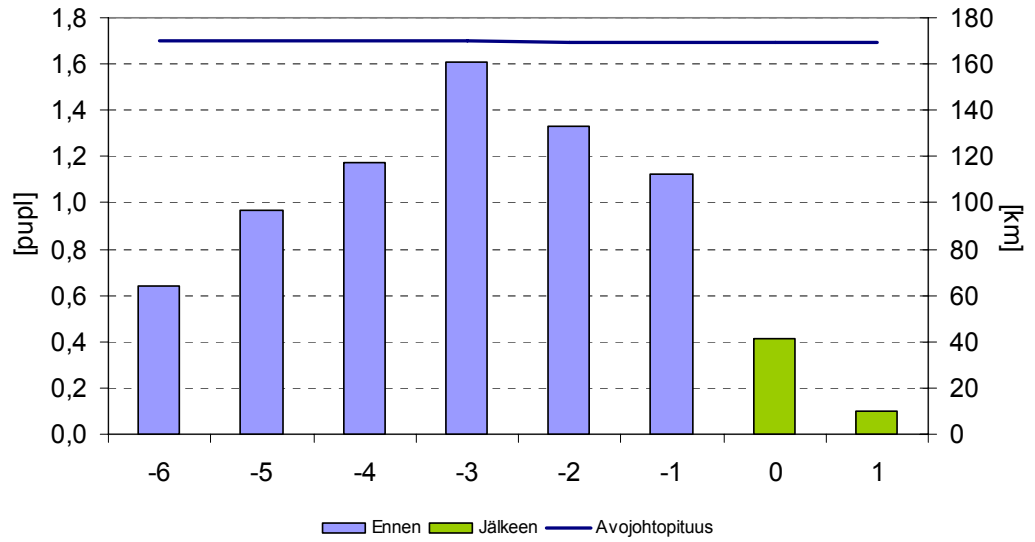
Puoliventtiilisuojien tehokkuuden määrittämiseen kompensoidussa verkossa käytettyjen pupl-arvojen variaatiokertoimet (taulukko 8.6) ovat varsin suuret verrattuna kompensoinnin ja eläinsuojien vastaaviin. ”Jälkeen”-arvot puoliventtiilisuojille kompensoidussa verkossa on laskettu vain kahden vuoden arvojen perusteella, joten niistä ei voi tehdä luotettavia johtopäätöksiä pupl-arvojen pitkäaikaisesta hajonnasta. Maasta erotetun verkon tulosten laskentaan käytettyjen arvojen variaatiokertoimet ovat suuret ”jälkeen”-arvoilla. Vaikka variaatiokertoimet ovat melko suuret, ovat keskiarvojen erot selvästi nähtävissä kuvista 8.6 – 8.9, eikä variaatiokertoimien suuruus luo suurta epäilystä puoliventtiilisuojien tehokkaasta toimimisesta.

Taulukko 8.6. Puoliventtiilisuojien tehokkuuden laskemiseen käytettyjen pupl-arvojen variaatiokertoimet.

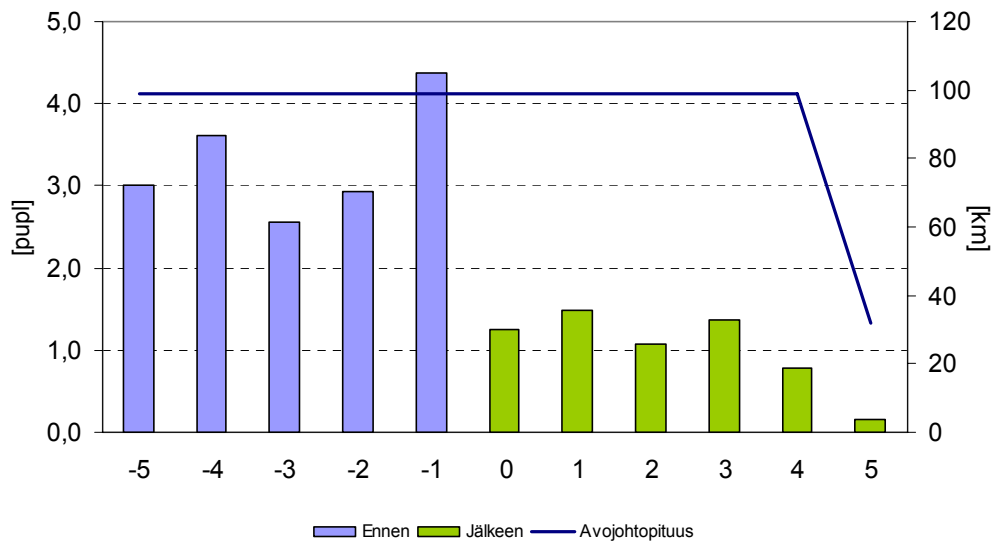
	kompensoitu		maasta erotettu	
	ennen	jälkeen	ennen	jälkeen
	[%]	[%]	[%]	[%]
pjk	20	1	22	55
ajk	29	85	21	37



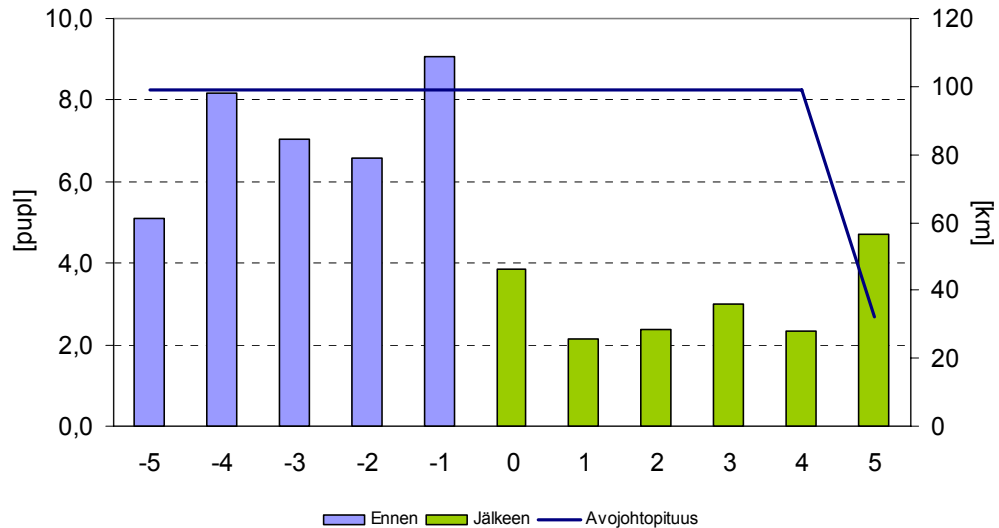
Kuva 8.6. Puoliventtiilisuojien vaikutus pjk:hin kompensoidussa verkossa.



Kuva 8.7. Puoliventtiilisuojien vaikutus ajk:hin kompensoidussa verkossa.



Kuva 8.8. Puoliventtiilisuojien vaikutus pjkhin maasta erotetussa verkossa.



Kuva 8.9. Puoliventtiilisuojien vaikutus ajk:hin maasta erotetussa verkossa.

8.6.1 Pohdinta

Puoliventtiilisuojien tehokkuuden määrittämiseen käytetyt verkkopituudet ja tarkasteluajat eivät ole kovinkaan pitkät verrattuna kompensoinnin ja eläin-suojien tehokkuusvertailuun. Tästä syystä puoliventtiilisuojien tehokkuuden tarkasteluun liittyy suurempia satunnaisvaihteluun liittyviä epävarmuustekijöitä. Toisaalta tuloksena saadut tehokkuusprosentit ovat huomattavan suuret verrattuna edellä mainittuihin, mikä tarkoittaa puolestaan sitä, että vaikka luotettavuusrajat olisivat muiden menetelmien tuloksia suuremmat, toimivat puoliventtiilisuojat tehokkaimmin tässä diplomityössä tutkituista keinoista.

Tässä diplomityössä esitellyille puoliventtiilisuojien tehokkuuksille samansuuntaisia tuloksia esitetään Pirjo Heinen (TKK), Matti Lehtosen (TKK) ja Arvo Oikarisen (Kainuun Energia) julkaisemassa artikkelissa [Hei 04]. Artikkelin mukaan kipinäväleillä suojattujen johtolähtöjen vikatiheys on 192,8 1/100km ja puoliventtiilisuojilla suojattujen johtolähtöjen 31,4 1/100km. Tuloksista laskemalla saadaan, että puoliventtiilisuojilla suojattujen johtolähtöjen vikatiheys on 84 % pienempi kuin kipinävälisuojattujen. Tutkimuksessa käsitellyt vikatiheydet sisälsivät kaikki vikatyypit: pj:t, ajk:t ja pysyvät viat. Tutkimukseen käytetyt niin puoliventtiilisuojilla kuin kipinäväleilläkin suojatut johtolähdöt olivat kaikki maasta erotettuja.

Olettaisin, että vain hyvin harvoissa tapauksissa pjk ei sammuttaisi maa- tai oikosulkuvian valokaarta. Jos tämä oletus pitää paikkaansa, ajk:den ei tulisi vähentyä puoliventtiilisuojiin käyttöönoton takia juuri lainkaan siksi, että ne ohjaavat ylijännitteet virtaa rajoittaen maahan, vaan koska niiden asentaminen poistaa eläimille ja oksille alttiit kipinävälit avojohtoverkosta. Kuitenkin tässä diplomityössä saadut tulokset osoittavat, että ajk:den vähentyminen on lähes samansuuruista kuin pjk:den, mikä ei tue tehtyä oletusta.

Luvun 9 kannattavuuslaskennassa käytetään puoliventtiilisuojiin ajk:den tehokkuusprosenttina kompensoidussa verkossa 60 %:a lasketun 77 %:n sijaan, jotta ylioptimistisilta tuloksilta vältyttäisiin. Puoliventtiilisuojiin tehokkuutta etenkin kompensoidussa verkossa Kainuun Energian jakeluverkkoalueella päästään tutkimaan luotettavammin vasta vuosien kuluttua, kun käyttökokemuksia niistä on kertynyt enemmän.

Kohdassa 8.6 tarkasteltiin puoliventtiilisuojiin tehokkuutta maasta erotetussa ja kompensoidussa verkossa. Tarkastelun perusteella puoliventtiilisuojiin näyttäisi olevan jälleenkytkentöjen vähennyspotentiaalia myös kompensoidussa verkossa ainakin prosenttiosuuksia katsottaessa. Kompensointi laskee jälleenkytkentöjen tasoa huomattavasti (pjk 35 ja ajk 23 %), mutta puoliventtiilisuojiin lisääminen rinnalle näyttäisi vähentävän jälleenkytkentöjä edelleen yli puolella. Tämä voisi johtua siitä, että salamien aiheuttamat maasulut kipinäväleissä muuttuvat oikosuluiksi kompensoidussa verkossa, mutta puoliventtiilisuojiin verkossa muuttumista ei tapahdu eikä pjk:ta tarvita. Yksi syy maasulkujen muuttumiselle oikosuluiksi voisi olla, että salamaylijännite menee läpi usean vaiheen kipinäväleistä, jolloin oikosulku toisen kipinävälin sarvien kanssa syntyy.

8.7 Kasvuston käsittely

Johtokatuja pohjan raivaus ja reunapuiden oksinta kuuluvat jakeluverkon järjestelmällisesti hoidettaviin kunnossapitotehtäviin. Kasvuston käsittelyintervalli riippuu alueen kasvuston kasvunopeudesta ja se on yleensä kuudesta

kymmeneen vuotta. Kainuun Energian jakeluverkkoalueella nopeinta kasvua johtokaduilla on havaittu suurten järvien läheisyydessä ja hitainta jakeluverkkoalueen pohjoisosien kuivilla kankailla. Säännöllisen kasvuston käsittelyn ansiosta johtokatuojen aluskasvillisuus harvoin pääsee aiheuttamaan lyhyitä tai pitkiä sähkökatkoksia. Aivan kasvuston käsittelyintervallin loppupuolella olevien johtokatuojen johdoilla on havaittu maasulkuja lumikuormien painaessa johtimia alaspäin kiinni kasvustoon. Johtokatuojen reunapuiden oksien tai kokonaisten puiden ylhäältäpäin aiheuttamat viat lumikuorman painosta ovat huomattavasti yleisempi, lähes vuosittainen ilmiö. Alueiden, joilla on useina vuosina esiintynyt lumikuormaongelmia, kasvusto käsitellään tehostetusti. Tällaisia ovat Kainuun Energian jakeluverkkoalueella muun muassa vaarat, korkeat mäet ja tietyt suurten järvien läheiset alueet.

Koska raivaus suoritetaan järjestelmällisesti, kasvusto pääsee harvoin aiheuttamaan maasulkuja avojohtojen alapuolelta ja reunusmetsä aiheuttaa ongelmia vain lumikuormien painosta. Nykyisen kasvuston käsittelyjärjestelmän vuoksi käsittelyintervallia tihentämällä tai käsittelyn laatua parantamalla voidaan olettaa olevan vähäinen merkitys lyhyiden sähkökatkosten määriin. Huolimatta siitä että kasvuston käsittelyllä ei ole syytä olettaa olevan suurta lyhyiden sähkökatkosten vähentämispotentiaalia, taulukossa 8.7 esitetyt tulokset ovat erikoiset. Tulosten mukaan pjk:t **lisääntyisivät** raivauksen vaikutuksesta 6 % ja ajk:t 12 %. Näille tuloksille on vaikea keksiä selitystä. Keskimääräiset pupl-arvot vuosille ennen ja jälkeen raivauksen suorittamisen on laskettu kolmelta vuodelta ja 2250 kilometriltä avojohtoa. Vertailuaika on muita toimenpiteitä lyhyempi, johtuen kasvuston käsittelyn luonteesta – kasvuston käsittelyvälin loppu- ja alkupään välillä on syytä olettaa olevan suurin ero jälleenkytkentämäärissä.

Taulukko 8.7. Kasvuston käsittelyn vaikutus jälleenkytkentöihin. Negatiiviset tehokkuusprosentit tarkoittavat jälleenkytkentöjen lisääntymistä.

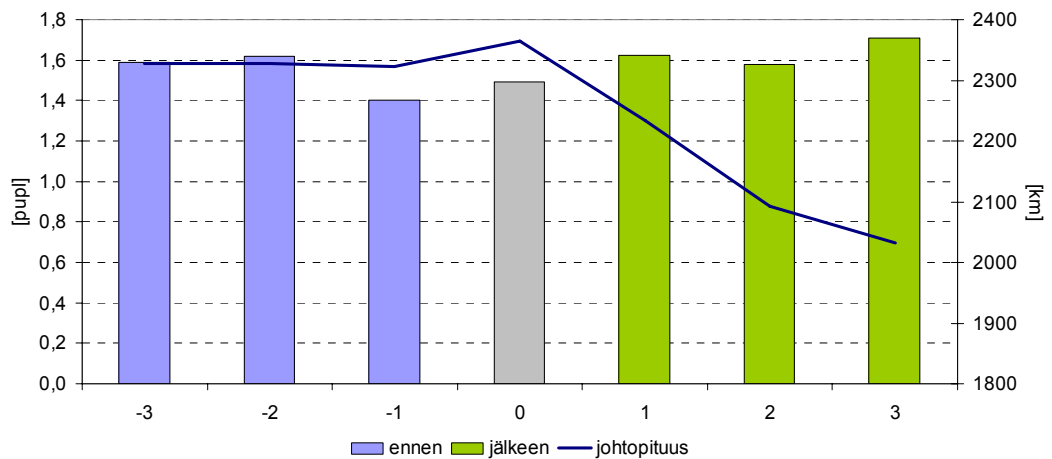
pjk	ajk	avojohtopituus	vertailuaika
[%]	[%]	[km]	[a]
-6 %	-12 %	2243	3

Kasvuston käsittelyn jälleenykytkentöjä vähentävän vaikutuksen määrittämiseen käytettyjen pupl – arvojen variaatiokertoimet (taulukko 8.8) ovat, etenkin pjk:lle, varsin pienet. Sen vuoksi ei tuloksiin voida olettaa sisältyvän muita toimenpiteitä enemmän epävarmuustekijöitä.

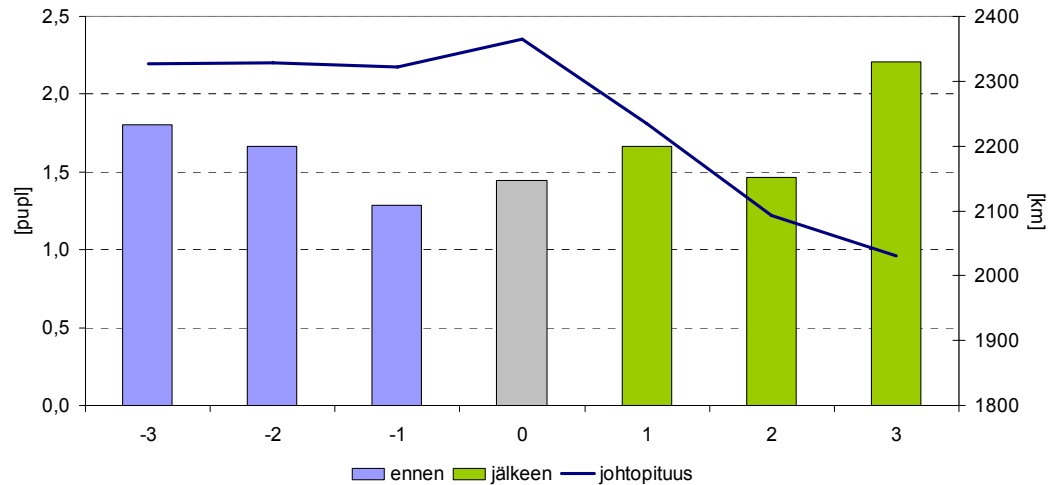
Taulukko 8.8. Kasvuston käsittelyn tehokkuuden laskemiseen käytettyjen pupl-arvojen variaatiokertoimet.

	ennen	jälkeen
	[%]	[%]
pjk	8	4
ajk	17	22

Kuvissa 8.10 ja 8.11 on esitetty raivauksen tehokkuuden laskemiseen käytettyjen pupl-arvojen suuruudet kolmelta vuodelta ennen ja jälkeen raivauksen suorittamisen. Molemmista kuvista on nähtävillä pupl-arvojen keskiarvojen nousu raivauksen jälkeen. Kuten kuvista nähdään, laskentaan käytettyjen johtolähtöjen avojohtopituuksien summa laskee nollavuoden jälkeisillä vuosilla, mutta kovin huomattavaa lasku ei kuitenkaan ole.



Kuva 8.10. Raivauksen ja oksinnan vaikutukset pjk:hin.



Kuva 8.11. Raivauksen ja oksinnan vaikutukset ajk:hin.

8.7.1 Pohdinta

Kasvuston käsittelyn vaikutuksia jälleenkytkentämääriin ei ole yhtä mielekäs-tä tarkastella kuin muiden jälleenkytkentöjä vähentävien toimenpiteiden, joita on aikaisemmin käsitelty tässä luvussa. Saatujen tulosten mukaan kasvuston käsittely olisi lisännyt jälleenkytkentöjen määriä. Näille tuloksille on vaikea löytää uskottavaa selitystä, jonka mukaan jälleenkytkennät todella lisääntyisi-vät. Syyt jälleenkytkentöjen lisääntymiseen löytyvät todennäköisesti lasken-tamenetelmän tulosten luotettavuusrajojen suuruudesta, mutta mitään var-maa tuloksista ei pysty sanomaan, koska luotettavuusrajojen määrittämistä ei tässä diplomityössä yritetty tehdä. Kasvuston käsittelyä ja sen kannattavuutta ei tässä diplomityössä käsitellä jatkossa, koska saadut tulokset osoittavat, että kasvuston käsittelyllä ei ole ainakaan jälleenkytkentöjä vähentävää vai-ikutusta, kun käsittely tehdään säännöllisesti ja Kainuun Energiassa käytössä olevien laatukriteerien mukaisesti.

8.8 Yhteenveto

Kainuun Energian tilastojen perusteella oli mahdollista laskea arviot toimenpi-teiden tehokkuuksista. Mukaan tarkasteluun valittiin kompensointi, eläin-suojat, puoliventtiilisuojat ja kasvuston käsittely. Laskentamenetelmä on mo-nimutkainen ja siihen liittyy paljon epävarmuustekijöitä, joten saadut tulokset

ovat suuntaa-antavia arvioita. Toimenpiteiden, kasvuston käsittelyä lukuun ottamatta, tehokkuusprosentit on esitetty taulukossa 8.9. Kasvuston käsittelyn ei havaittu vähentävän jälleenkytkentöjä noudatettaessa nykyisenkaltaisia laatustandardeja ja toimintatapoja. Taulukon arvoja käytetään luvun 9 kannattavuuslaskennassa lukuun ottamatta puoliventtiilisuojiin kompensoidun verkon ajk:ta koskevaa vähennysprosenttia (77 %). Sen sijaan käytetään 60 %:a, jotta ylioptimaalisilta tuloksilta vältyttäisiin.

Taulukko 8.9. Toimenpiteille määritetyt jälleenkytkentöjen vähennysprosentit KAI:n verkossa.

toimenpide	pjk	ajk
	[%]	[%]
kompensointi	35	17
eläinsuojat	15	13
puoliventtiilisuojat komp.	62	77
maasta erot.	71	60

9 KANNATTAVUUSSELVITYS ERI VAIHTOEHDOSTA VÄHENTÄÄ LYHYITÄ SÄHKÖKATKOKSIA

Luvussa 6 arvioitiin jälleenkytkentöjen syitä, jotta osattaisiin valita parhaat toimenpiteet lyhyitä sähkökatkoksia aiheuttavien jälleenkytkentöjen vähentämiseksi. Luvussa 7 käytiin läpi jälleenkytkentöjen vähentämiseen tarkoitettuja toimenpiteitä sekä niiden kustannuksia. Luvussa 8 tehtiin tilastoihin perustuen arviot neljän toimenpiteen tehokkuudesta eli siitä, kuinka paljon niiden asentaminen vähentää jälleenkytkentöjä toimenpiteen vaikutusalueella. Tässä luvussa esitetään suoritettujen kannattavuuslaskennan tulokset kolmelle kannattavuustarkasteluun valitulle vaihtoehdolle: kompensoinnille, eläin- ja puoliventtiilisuojuille. Niiden katsotaan olevan aikaisempien lukujen perusteella ainoat vaihtoehdot, jotka vähentävät pelkästään lyhyitä sähkökatkoksia, joiden toiminta perustuu jo olemassa olevaan toimivaksi todettuun tekniikkaan, ja jotka on mahdollista ottaa käyttöön tarvittaessa hyvinkin pian.

9.1 Kannattavuuslaskenta

Määritettäessä valittujen toimenpiteiden kannattavuutta investointikohteissa, eli johtolähdöillä ja sähköasemilla, oleellisimpia lähtötietoja ovat luvussa 5 esitetyt KAH-arvot, luvussa 7 arvioidut toimenpiteiden kustannukset sekä luvussa 8 määritetyt toimenpiteiden tehokkuusprosentit. Kannattavuuslaskennan lähtötietoina tarvittiin myös johtolähtöjen muuntopiirimäärät, vuosienenergiat ja asiakasjakaumat. Lisäksi oleellisia lähtötietoja olivat johtolähtöjen onnistuneiden jälleenkytkentöjen lähtötasot, vaadittu pääoman tuottoprosentti sekä pitoaika.

Johtolähtöjen muuntopiirimäärien avulla laskettiin eläin- ja puoliventtiilisuojujen investointikustannukset. Johtolähtöjen vuosienenergia tarvittiin keskitehon laskemiseen, jota käytetään jälleenkytkentöjen arvottamiseen KAH-arvoilla. Myös johtolähtöjen asiakasjakauma arvioitiin, jotta jälleenkytkentöjen arvotus voitiin tehdä keskimääräisien KAH-arvojen lisäksi asiakasryhmäkohtaisilla KAH-arvoilla. Tässä luvussa esitetään tulokset vain keskimääräisillä KAH-arvoilla suoritettusta kannattavuuslaskennasta. Asiakasryhmäkohtaisilla KAH-

arvoilla saadut tulokset on esitetty liitteissä III - V. Niihin viitataan tulosten esittämisen yhteydessä kohdassa 9.4.

Kannattavimmalla toimenpiteellä tarkoitetaan, että siihen toimenpiteeseen investoimalla määritetyssä investointikohteiden (johtolähdöt tai sähköasemat) järjestyksessä saadaan suurin KAH-säästö rahayksikköä kohden. KAH-säästöllä tarkoitetaan lyhyiden sähkökatkosten vähennystä, joka arvotetaan KAH-arvoilla.

Toimenpideinvestointien kannattavuus vaihtelee eri investointikohteiden välillä. Kannattavuus riippuu toimenpiteiden investointikustannuksista, kustannusrakenteesta ja tehokkuudesta sekä investointikohteiden ominaisuuksista kuten vuosienenergiasta, asiakasluokkien jakaumasta, kaapelointiasteesta ja vallitsevasta jälleenkytkentöjen tasosta. Esimerkiksi, jos 90 % johtolähdöstä on kaapeloitu, 10 % on avojohtoa ja tällä avojohto-osuudella sattuu paljon jälleenkytkentöjä, niin eläin- tai puoliventtiilisuojat ovat hyvin kannattavia. Tällöin pienellä investoinnilla saadaan vähennettyä huomattavasti koko johtolähdön asiakkaiden kokemia lyhyitä sähkökatkoksia.

Valittujen toimenpiteiden investointien kannattavuudet määritetään erikseen eikä yhdistelmäratkaisuja arvioida. Toimenpideinvestoinnilla tarkoitetaan tässä yhteydessä investointia, jossa eläinsuojien tai puoliventtiilisuojien vaatimat laitteet asennetaan yhdelle johtolähdölle; kompensoinnin kohdalla yhdelle sähköasemalle. Toimenpideinvestointien kannattavuus määritetään kahdella eri kannattavuuskriteerillä: nettonykyarvolla (net present value, NPV) ja sisäisellä korolla (internal rate of return, IRR). Kahden kriteerin käyttämiseen päädyttiin, koska haluttiin vertailla, kumman kriteerin perusteella luodun järjestyksen mukaan toimenpideinvestoinnit olisi kannattavinta suorittaa. Investointikohteiden NPV:n ja IRR:n laskentaa käsitellään kohdassa 9.2.

9.2 Nykyarvolaskenta ja sisäinen korko

Jälleenkytkentämääriä pienentäville laitteille valittiin kannattavuuslaskennassa pitoajaksi 15 vuotta ja vaadituksi pääoman tuotto prosentiksi alalle suureh-

ko 8 %. Tässä luvussa esitetään tulokset, jossa investointisuunnitelmat suoritetaan IRR:n määräämässä suuruusjärjestyksessä. NPV:n järjestykseen perustuvat tulokset ovat liitteissä I – II. IRR:n ja NPV:n osoittamassa kannattavuusjärjestyksessä tehtyjen investointien eroja arvioidaan tulosten yhteydessä.

KAH-säästöt on oletettu olevan samansuuruiset jokaisen tarkasteluajan vuotena, joten johtolähtöjen tehon nettokasvua tulevina vuosina ei ole otettu huomioon. Jälleenkytkentöjä vähentävien laitteiden ylläpitokustannuksia ei ole myöskään otettu mukaan kannattavuuslaskentaan, koska ne ovat kannattavuuslaskentaan liittyvien epävarmuuksien rinnalla häviävän pieniä.

KULUT

Laskelmissa investointikustannukset laskettiin luvussa 7 esitetyillä hinnoilla. Kompensointilaitteiston investointikustannus oletettiin olevan sama riippumatta sähköaseman (sa) koosta. Eläin- ja puoliventtiilisuojien investointikustannukset johtolähdöittäin määritettiin kertomalla muuntamokohtaiset hinnat johtolähtöjen avojohtoverkon muuntopiirimäärällä (mp). Muuntopiirimäärät olivat tiedossa johtolähtökohtaisesti, mutta ei eroteltuna kaapeli- ja avojohtoverkon perusteella. Tämä seikka otettiin huomioon kertomalla johtolähtöjen muuntopiirien määrät johtolähtöjen avojohtopituuden osuudella maakaapelin ja avojohdon pituuden summasta, jolloin saatiin laskuissa käytetty avojohtoverkon muuntopiirimäärä arvioitua. Keskeytyskustannuksia ei otettu mukaan laskelmiin.

Kannattavuuslaskentaan mukaan otettujen kolmen jälleenkytkentöjä tehokkaimmin vähentävien toimenpiteen asennuksen yksikkökustannukset on esitetty alla. Hinnat ovat keskimääräisiä arvioita. Toimenpiteitä ja niiden yksikkökustannuksia on käsitelty tarkemmin luvussa 7.

Taulukko 9.1. Vertailtavien toimenpiteiden yksikköhinnat.

	hinta	
kompensointi	138 000	€ / sa
eläinsuojat	290	€ / mp
puoliventtiilisuojat	600	€ / mp

TULOT

KAH-arvoilla arvoitetut jälleenytkentämäärät eivät ole reaalista tuloa. KAH-säästöjen realisoituminen on riippuvainen kullakin hetkellä käytössä olevasta viranomaisen regulaatiomallista ja kuinka sähkön laatu siinä on otettu huomioon. Tämän luvun kannattavuuslaskennassa KAH-säästöjä on käsitelty kuin ne olisivat todellista tuloa. KAH-arvoja käyttämällä saadaan joka tapauksessa laskettua investointikohteiden kannattavuusjärjestys eri toimenpiteitä käytettäessä.

Johtolähtöjen pj- ja ajk-tilastoista vuosilta 2003 - 2006 laskettiin jälleenytkentöjen keskiarvot edustamaan jälleenytkentöjen lähtötasoa. Laskuissa käytettiin kaikkia laskurilukemien mukaisia jälleenytkentämääriä, koska jälleenytkentöjen kasautuminen on otettu huomioon KAH-arvoissa [Hon 06]. Kannattavuuslaskennan tulopuolen muodostivat jälleenytkentöjen väheneemisestä saadut vuotuiset KAH-säästöt eli KAH-arvoilla arvoitetut jälleenytkentämäärien pienenemiset. Kannattavuuslaskenta tehtiin käyttäen asiakasryhmäkohtaisia (Taulukko 5.1) ja keskimääräisiä (Taulukko 5.2) KAH-arvoja. Käytetyt KAH-arvot ovat vuoden 2005 hintatasossa. Hintoja ei ole korjattu vastaamaan laskentahetken eli vuoden 2007 hintatasoa, koska asian vaikutuksen kaikkien epätarkkuuksien vallitessa oletetaan olevan häviävän pieni.

Asiakasryhmäkohtaisten KAH-arvojen käyttämiseksi tarvittiin asiakasryhmien energijakaumat johtolähdöittäin. Todellista jakaumaa ei ollut saatavilla, joten tyydyttiin arvioon. Johtolähtöjen asiakasryhmien energijakauman arvio perustui Kainuun kuntien asiakasjakaumiin, jotka olivat saatavissa Kainuun Energialla. Johtolähtöä valittiin edustamaan sen kunnan asiakasryhmi-

en energiaajakauma, jossa johtolähtöä syöttävä sähköasema sijaitsee. Tarkennukseksi jokaisen kunnan 20. suurimman asiakkaan energiat sijoitettiin todellisille johtolähdöille. Niiden osuus kunnan kokonaisenergiasta vaihteli välillä 21 - 60 %, joten energioiden sijoittamisella saatiin parannettua johtolähtöjen asiakasryhmien energiaajakauman tarkkuutta merkittävästi. Johtolähtöjen asiakasryhmien keskivuositehot laskettiin jakamalla asiakasryhmän energia vuoden tuntien lukumäärällä (8760).

Johtolähtökohtainen toimenpiteen aikaansaama vuosittainen KAH-säästö keskimääräisillä ja asiakasryhmäkohtaisilla KAH-arvoilla laskettiin kaavalla 2. Käytettäessä keskimääräisiä KAH-arvoja kaavan summaa ei lasketa. Kompensoinnin kannattavuutta laskettaessa tarvittiin sähköaseman vuotuista KAH-säästöä. Siinä tapauksessa laskettiin sähköaseman kaikkien johtolähtöjen KAH-säästöt yhteen.

$$\Delta K_{KAH} = \sum_i (\varepsilon_{PJK} \cdot f_{PJK} \cdot k_{i,PJK} + \varepsilon_{AJK} \cdot f_{AJK} \cdot k_{i,AJK}) \cdot P_i \quad (2)$$

ΔK_{KAH}	KAH-säästö (€/a)
ε_{PJK}	toimenpiteen pjk:den vähennyskerroin (%)
ε_{AJK}	toimenpiteen ajk:den vähennyskerroin (%)
f_{PJK}	johtolähdön pjk:den lähtötaso (1/a)
f_{AJK}	johtolähdön ajk:den lähtötaso (1/a)
$k_{i,PJK}$	asiakasryhmän i KAH-arvo pjk:lle (€/kW)
$k_{i,AJK}$	asiakasryhmän i KAH-arvo ajk:lle (€/kW)
P_i	asiakasryhmän keskivuositeho (kW)

9.3 Tulosten esittäminen

Tässä luvussa esitetään tulokset, jotka perustuvat keskimääräisiin KAH-arvoihin. Asiakasryhmäkohtaisilla KAH-arvoilla saadut tulokset ja niiden erot keskimääräisillä arvoilla laskettuihin käsitellään ja arvioidaan sanallisesti tässä luvussa. Asiakasryhmäkohtaisilla KAH-arvoilla saatuja tuloksia esittävät kuvat ovat liitteissä III - V.

Kannattavuuslaskennan lopputuloksena eläin- ja puoliventtiilisuojiin kohdalla saatiin lista KAI:n johtolähdöistä, joista jokaiselle määritettiin toimenpideinvestoinnin NPV ja IRR. Kompensoinnin lopputulos sisälsi listan sähköasemista vastaavilla arvoilla. Toimenpiteiden investointikohteet järjestettiin suuruusjärjestykseen NPV:n ja myös IRR:n perusteella. Laskentaan käytettiin molempia KAH-arvoja: keskimääräisiä ja asiakasryhmäkohtaisia. Siten jokaiselle toimenpiteelle saatiin neljä listaa investointikohteista. Tässä luvussa esitetään keskimääräisillä KAH-arvoilla lasketut tulokset, joissa investointikohteiden kannattavuusjärjestys on määritetty IRR:n mukaan. NPV:n mukaan järjestetyt investointikohteet on esitetty liitteissä I ja II. Tämän luvun tulosten esittämisen yhteydessä viitataan liitteissä esitettyihin eri tavalla järjestettyihin ja KAH-arvoilla laskettuihin tuloksiin sekä verrataan niitä toisiinsa.

Tämän luvun tuloksissa ovat mukana sellaiset investointikohteet, joiden IRR on suurempi kuin -20 %. Tämän kriteerin perusteella käsittelyn ulkopuolelle jäi johtolähtöjä, joilla on hyvin vähän jälleenkytkentöjä. Luonnollisesti käsittelyn ulkopuolelle jäivät myös johtolähdöt, joilla toimenpiteet ovat jo käytössä.

Tulosten yhteydessä ei esitetä johtolähtöjen tai sähköasemien nimiä, koska niillä ei ole arvoa muille kuin Kainuun Energian jakeluverkkotoiminnan investoinneista vastaaville henkilöille. Tämän luvun kannattavuuslaskennan tulosten esittäminen sisältää kaksi kuvaa toimenpidettä kohden:

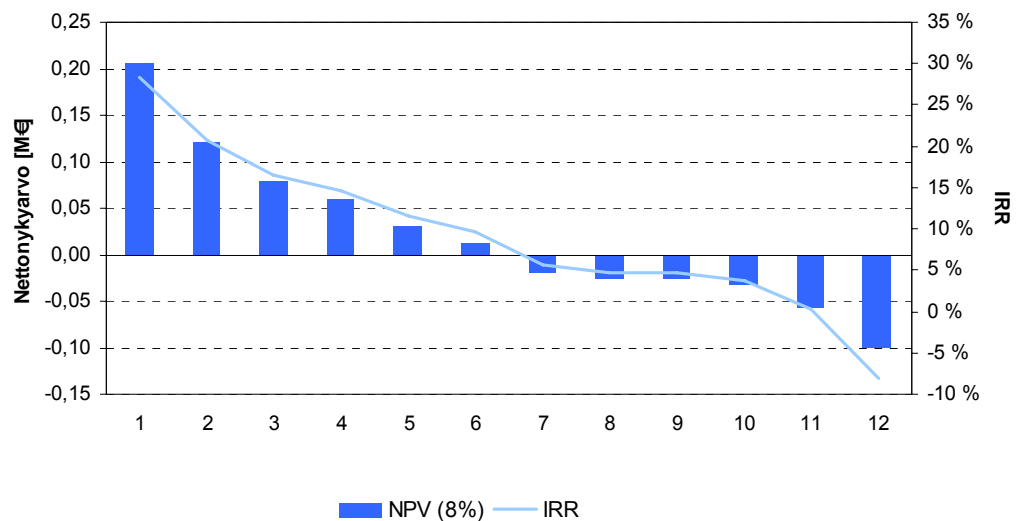
- Ensimmäinen kuvista esittää investointikohteiden IRR:n ja NPV:n, IRR:n suuruusjärjestyksessä. Laskentaan on käytetty keskimääräisiä KAH-arvoja. Kuvissa investointikohteiden IRR on merkitty vaaleansinisellä yhtenäisellä viivalla ja NPV tummansinisellä palkilla. Kaikki kohteet, joissa NPV on suurempi tai yhtä suuri kuin nolla, ovat kannattavia. Vastaavasti kohteet, joiden IRR on suurempi kuin tuottovaatimus eli 8 %, ovat kannattavia.
- Toinen kuva esittää esimerkinomaista investointiohjelmaa, jossa vuodesta 2008 lähtien investoidaan KAI:n jakeluverkon lyhyiden sähkökatkosten vähentämiseen vuosittain noin 0,25 miljoonaa euroa (jatkossa M€), siten että toimenpiteet otetaan johtolähdöillä käyttöön kan-

nattavuusjärjestyksessä, joka määritetään IRR:n suuruuden mukaan. Kompensoinnin kohdalla investointiohjelmat on laadittu 0,28 M€:n portaissa johtuen kompensointilaitteiston hinnasta. Kuvasta nähdään, kuinka paljon KAI:n jakeluverkon lyhyistä sähkökatkoksista aiheutuva haitta pienenee noin 0,25 M€:n investointien välein ja mihin jälleenkytkennöistä aiheutuvan haitan tasoon kyseistä toimenpidettä käyttämällä voidaan päästä verrattuna lähtötasoon (100 %). Jälleenkytkentöjen rahamääräinen kokonaishaitan lähtötaso on Kainuun Energian jakeluverkossa noin 1,77 M€ keskimääräisillä ja 1,21 M€ asiakasryhmäkohtaisilla KAH-arvoilla arvoitettuna. Tuloksissa käytetyt rahasummat ovat vuoden 2007 tasossa.

9.4 Tulokset

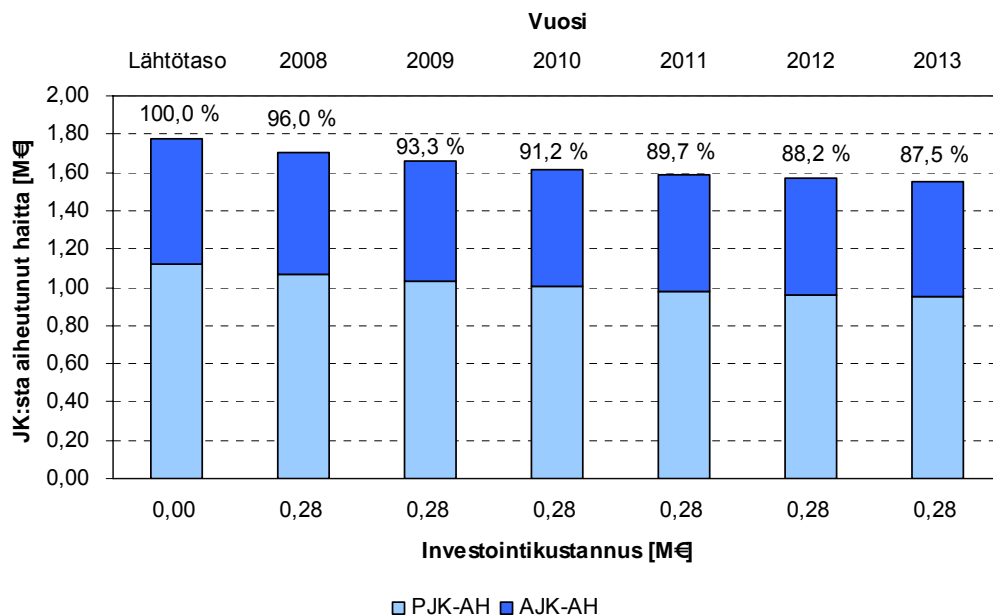
9.4.1 Kompensointi

Kompensointilaitteistoinvestointien kannattavuuslaskentaan otettiin mukaan 12 KAI:n jakeluverkon sähköasemaa. Kuva 9.1 esittää sähköasemien kompensointilaitteistoinvestointien NPV:itä. Kuvasta nähdään, että KAI:n jakeluverkossa on kuusi kappaletta sähköasemia, joille kompensointilaitteiston asentaminen olisi kannattavaa eli NPV:t ovat positiivisia.



Kuva 9.1. Kompensointilaitteistoinvestointien NPV ja IRR 12 sähköasemalla. Laskentaan on käytetty keskimääräisiä KAH-arvoja.

Seuraavassa kuvassa (kuva 9.2) esitellään esimerkinomainen vuosittainen 0,28 M€:n investointiohjelma ja investoinnin jälkeinen jälleenkytkennöistä aiheutuvien KAH-kustannusten taso verrattuna lähtötasoon. Palkit esittävät jälleenkytkennöistä aiheutuvaa haittaa: vaaleammalla on pjk:sta ja tummemmalla ajk:sta aiheutunut haitta (kuvissa käytetään lyhenteitä PJK-AH ja AJK-AH). 0,28 M€:n investointi vastaa kahden sähköaseman varustamista kompensoinnilla. Kuvasta nähdään, että investoimalla yhteensä 1,68 M€ kompensointilaitteistoihin kaikilla 12:sta sähköasemalla voidaan alentaa KAI:n jakeluverkon jälleenkytkentöjen KAH-kustannuksia 12,5 %:a lähtötasosta. Investoimalla vain kuuteen kannattavaan sähköasemaan 0,68 M€ saadaan vähennykseksi 8,8 %.



Kuva 9.2. 0,28 M€:n vuosittaisella kompensointilaitteistojen investointiohjelmalla saavutettavat jälleenkytkennöistä aiheutuvat keskeytyskustannusten tasot KAI:n jakeluverkossa. Investoimalla 1,68 M€ kompensointiin laskisi jälleenkytkennöistä aiheutunut haitta 87,5 %:n lähtötasosta. Laskentaan on käytetty keskimääräisiä KAH-arvoja.

Käyttämällä asiakasryhmäkohtaisia KAH-arvoja kompensointi osoittautuu kannattavaksi neljällä sähköasemalla kuuden sijaan (liite I, kuva 1). Myös sähköasemien kannattavuusjärjestys muuttuu ja prosentuaaliset KAH-säästöt osoittautuvat hieman suuremmiksi – investoimalla kuuteen sähköasemaan saavutetaan 9,6 %:n säästö ja kaikkiin kahteentoista 13,3 %:n säästö (lii-

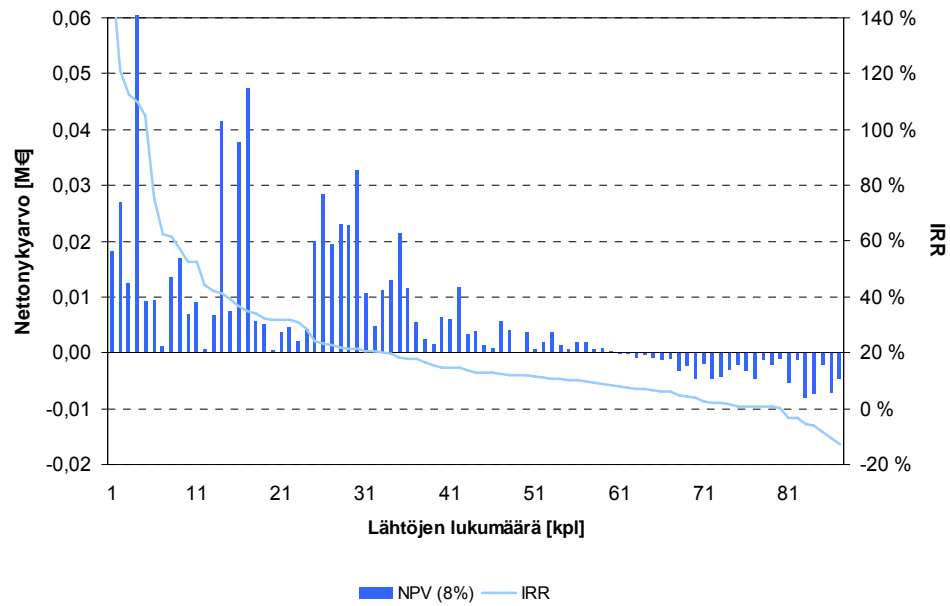
te III, kuva 2). Investointien sisäiset korot pienenevät myös olennaisesti verrattuna keskimääräisillä KAH-arvoilla saatuihin tuloksiin.

Molempien IRR:n ja NPV:n mukaan järjestämällä päädytään samaan järjestykseen. Siksi liitteissä ei ole esitetty kompensointilaitteistojen investointiohjelmaa NPV:n järjestyksessä erikseen.

9.4.2 Eläinsuojat

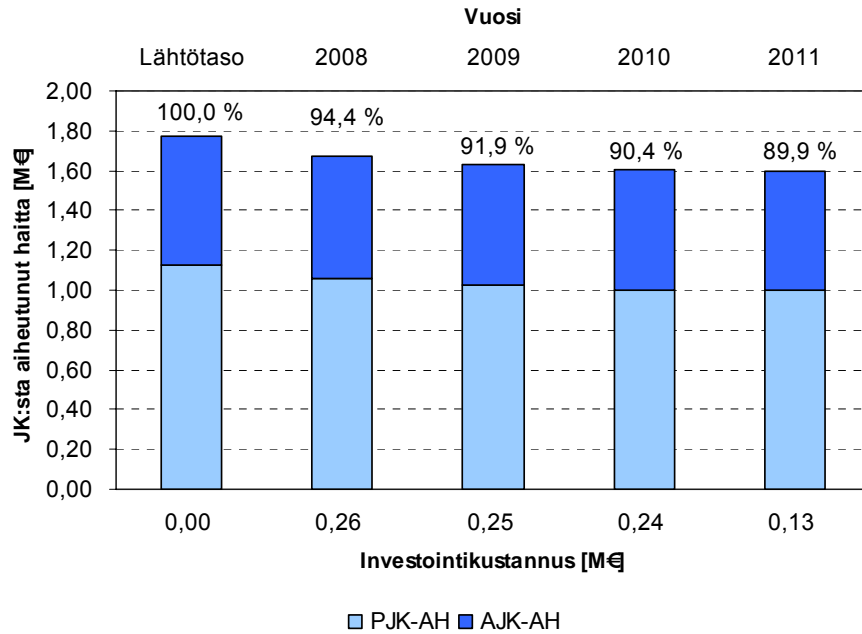
Eläinsuojien kannattavuustarkasteluun otettiin mukaan 88 johtolähtöä. Niistä 61 osoittautui kannattavaksi, kun laskentaan käytetään keskimääräisiä KAH-arvoja. Kuva 9.3 esittää johtolähdöillä tehtävien investointien NPV:t. Kuvassa neljänneksi suurimman IRR:n omaavalla johtolähdöllä investoinnin NPV on noin 0,13 M€. Kuvan arvoakselin asteikon arvot on asetettu siten, että suurin arvo ei näy kuvassa. Tämä vika-altis johtolähtö syöttää katkaisija-asemaa ja on yli 60 km pitkä. Kyseisen johtolähdön jälleenkytkennät vaikuttavat myös katkaisija-aseman takaiseen verkkoon. Myös kolme muuta katkaisija-asemaa syöttävää johtolähtöä on kymmenen kannattavimman joukossa. 20 kannattavimman johtolähdön joukossa on lisäksi taajaman läheisyydessä olevia seka-johtolähtöjä¹, joissa pienillä investoinneilla vaikutetaan suureen asiakasmäärään, sekä teollisuusalueita syöttäviä johtolähtöjä.

¹ Johtolähtö, jossa on maakaapelia sekä avojohtoa.



Kuva 9.3. Eläinsuojainvestointien NPV ja IRR 88 johtolähdöllä. Laskentaan on käytetty keskimääräisiä KAH-arvoja.

Kun tarkastellaan noin 0,25 M€:n vuotuista esimerkinomaista investointiohjelmaa (kuva 9.4), nähdään että investoimalla 0,88 M€ eläinsuojaukseen voidaan jälleenkytkennöistä aiheutuvaa haittaa vähentää 10,1 %. Kuvasta nähdään kuitenkin, etteivät vuosien 2010 ja 2011 investoinneilla saadut hyödyt ole merkittäviä, joten kannattavinta olisi investoida vain 0,51 M€, joilla saavutettaisiin 8,1 %:n jälleenkytkentöjen KAH-säästö.



Kuva 9.4. 0,25 M€n vuotuisella eläinsuojien investointiohjelmalla saavutettavat jälleenkytkennöistä aiheutuvien keskeytyskustannusten vuosittaiset tasot KAI:n jakeluverkossa. Investoimalla 0,88 M€ eläinsuojiiin päästäisiin 89,9 %:n lähtötasosta. Laskentaan on käytetty keskimääräisiä KAH-arvoja.

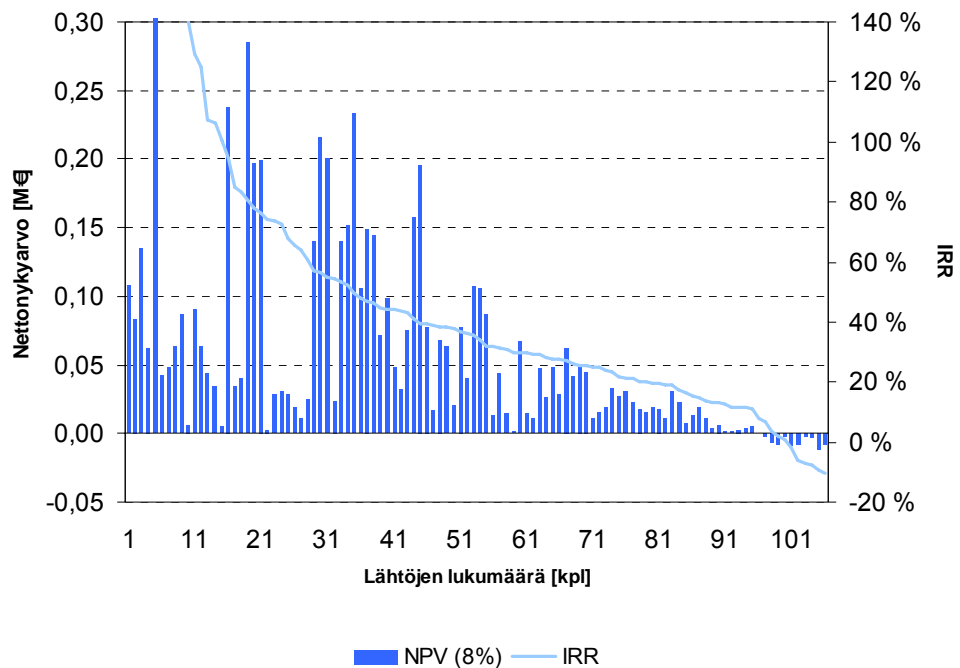
Liitteen I kuva 2 esittää kuvaa 9.4 vastaavaa investointiohjelmaa, mutta investointijärjestys suoritetaan nettonykyarvon perusteella. Erona IRR:n mukaiseen kannattavuusjärjestykseen on, että yhtä suurella rahamäärällä ei investointiohjelman ensimmäisen vuoden jälkeen saavuteta yhtä alhaista KAH-tasoa. Ero on kuitenkin varsin pieni ensimmäisen vuoden osalta ja tasoittuu seuraavien investointivuosien aikana nopeasti. Liitteen I kuva 1 esittää eläinsuojien investointikohteiden NPV:n ja IRR:n järjestettynä NPV:n perusteella. Kuvan tarkoitus on havainnollistaa kannattavuuskriteerin merkitystä investointikohteiden kannattavuusjärjestykseen.

Jos eläinsuojien kannattavuutta tarkastellaan käyttäen asiakasryhmäkohtaisia KAH-arvoja (liite IV, kuva 1), saadaan tulokseksi, että vain 43 johtolähtöä 85:stä olisi kannattavaa varustaa eläinsuojilla edellä mainitun 61:n sijaan. Liitteen IV kuvassa 2 on esitetty kuvaa 9.4 vastaava asiakasryhmäkohtaisilla arvoilla laskettu ja IRR:n suuruusjärjestyksessä suoritettava investointiohjelma. Sen mukaan 0,49 M€:n investoinnilla säästetään 9,3 % vuotuisissa jälleenkytkentöjen KAH-kustannuksissa. Vaikka kannattavia investointikohteita

on vähemmän asiakasryhmäkohtaisilla KAH-arvoilla laskettuna, kahden vuoden investoinneilla saavutetaan prosentuaalisesti suurempi KAH-säästö. Tämä johtuu pääosin siitä, että kannattavimman johtolähdön nettonykyarvo kasvaa lähes kolminkertaiseksi käytettäessä asiakasryhmäkohtaisia KAH-arvoja. Kyseisellä johtolähdöllä on yksi KAI:n jakeluverkon mittakaavassa hyvin suuri teollisuusasiakas. Asiakasryhmäkohtaisten KAH-arvojen käyttäminen vaikuttaa merkittävästi myös kannattavuusjärjestykseen siten, että suurimmaksi osaksi kotitalouksia sisältävät johtolähdöt putoavat alaspäin ja teollisuutta sisältävät ylöspäin.

9.4.3 Puoliventtiilisuoijat

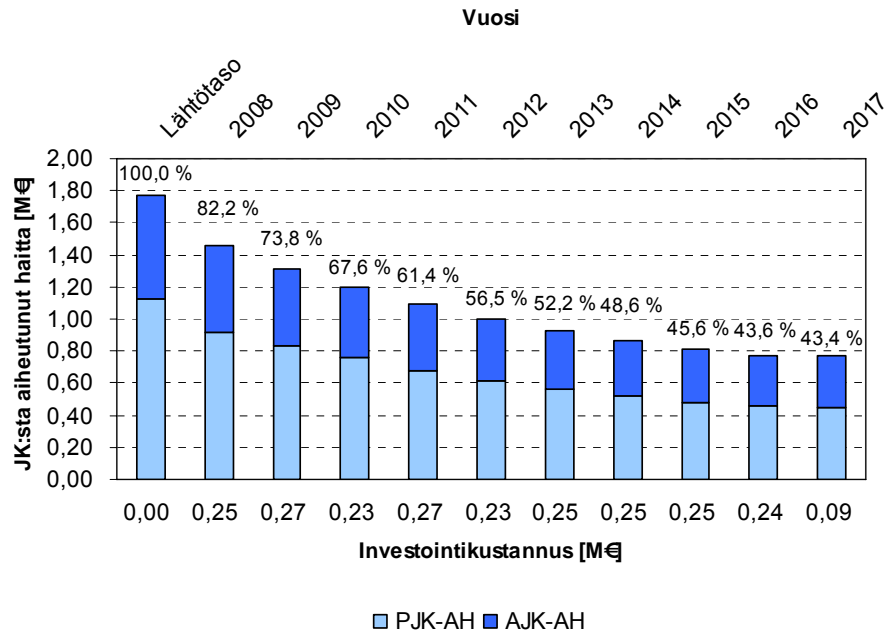
Puoliventtiilisuojiin suuren jälleenkytkentöjä vähentävästä vaikutuksesta johtuen ne vaikuttaisivat erittäin kannattavalta sijoituskohteelta, jos KAH-säästö mielletään reaalisesti tuloksi. Kannattavuuslaskennassa olevasta 106 johtolähdöstä 95 osoittautui kannattavaksi. Kuva 9.5 esittää laskennassa tulokset johtolähdöittäin IRR:n perusteella järjestettynä kannattavuusjärjestykseen. Viidenneksi kannattavimman johtolähdön NPV poikkeaa suuruutensa (0,57 M€) vuoksi muista johtolähdöistä, joten sen arvoa ei näy kuvassa. Johtolähtö on sama katkaisija-asemaa syöttävä johtolähtö, johon kohdistuvan eläinsuojainvestoinnin nettonykyarvo oli myös poikkeuksellisen suuri. Johtolähtöjen kannattavuusjärjestys on lähes samanlainen kuin eläinsuojilla, mikä on odotettavaa samanlaisen investointikustannusrakenteen vuoksi. Erona eläinsuojien 20. kannattavimpaan johtolähtöön mukana on muutama sellainen johtolähtö, joille eläinsuojat on jo asennettu.



Kuva 9.5. Puoliventtiilisuoja-investointien NPV ja IRR 106 KAI:n johtolähdöllä. Laskentaan on käytetty keskimääräisiä KAH-arvoja.

Kannattavuuslaskennassa mukana olevista johtolähdöistä 64 saa syötön kompensoidulta sähköasemalta ja 42 maasta erotetulta sähköasemalta. Puoliventtiilisuoja-investointien kannattavuuslaskennassa otettiin huomioon puoliventtiilisuoja-investointien erilaiset tehokkuusprosentit kompensoidussa ja maasta erotetussa verkossa, jotka on esitetty aikaisemmin luvussa 8. Kompensoinnilla ei näytä olevan merkitystä puoliventtiilisuoja-investointikohteiden kannattavuusjärjestykseen.

Seuraavassa kuvassa (kuva 9.6) on esitetty 0,25 M€:n investointiohjelma, jonka mukaan toimimalla olisi mahdollista saavuttaa jälleenkytkennöistä aiheutuneiden haitan taso, joka on 43,4 % nykytasosta. Tämä taso vaatisi kuitenkin noin 2,3 M€:n kokonaisinvestoinnin.



Kuva 9.6. 0,25 M€n vuosittaisella puoliventtiilisuojiin investointiohjelmalla saavutettavat jälleenyhteyksistä aiheutuvien keskeytyskustannusten tasot KAI:n jakeluverkossa. Investoimalla 2,33 M€ puoliventtiilisuojiin päästäisiin 43,4 %:n lähtötasosta. Laskentaan on käytetty keskimääräisiä KAH-arvoja.

Liitteen II kuvassa 2 on esitetty investointiohjelma suoritettuna NPV:n järjestyksessä. Kuvasta nähdään, kuten jo aikaisemmin on todettu, että suorittamalla johtolähtöjen investoinnit NPV:n suuruusjärjestyksessä, ensimmäisinä vuosina ei saada yhtä suurta KAH-säästöä. Ero kuitenkin tasaantuu nopeasti investointikertojen myötä ja pitkässä juoksussa lopputulos on sama. Liitteen II kuva 1 esittää tulokset järjestettynä NPV:n perusteella.

Jos investoinnin kannattavuuslaskennassa käytetään asiakasryhmäkohtaisia KAH-arvoja, niin 82 johtolähtöä 106:sta osoittautuu kannattavaksi. Asiakasryhmäkohtaisilla KAH-arvoilla saatujen tulosten perusteella (liite V kuva 1 ja 2) saavutettaisiin suurempi prosentuaalinen KAH-säästö, jos kaikki tarkastelussa olevat johtolähdöt varustettaisiin puoliventtiilisuojiin. Ero on merkittävän suuri ensimmäisen vuoden jälkeisessä tasossa. Tämä johtuu samasta syystä kuin eläinsuojien kohdalla. Erilaisten KAH-arvojen käyttäminen vaikuttaa selvästi johtolähtöjen kannattavuusjärjestykseen kuten eläinsuojillakin.

9.5 Johtopäätökset kannattavuuslaskennan tuloksista

Keskimääräisiä KAH-arvoja käyttämällä jälleenkytkennöistä aiheutunut haitta Kainuun Energian jakeluverkossa on tällä hetkellä 1,77 M€ ja asiakasryhmäkohtaisia käyttämällä 1,21 M€. Ero on varsin suuri sekä suhteellisesti että absoluuttisesti. Kuten kannattavuuslaskennan tulosten yhteydessä mainittiin, eri KAH-arvojen käyttäminen muuttaa investointikohteiden kannattavuusjärjestystä. Ei ole siis yhdentekevää kumpia KAH-arvoja käytetään kannattavuuslaskennassa.

Sähkön laatuun ja jälleenkytkentöjen vähentämiseen tähtäävät investoinnit ovat pitkäaikaisia jopa yli 20 vuotta. On siis tärkeää, että löydämme teknistaloudellisesti edullisimman kokonaisratkaisun. Tämän hetkinen regulaation pelisäännöt ovat voimassa täydellä varmuudella ainoastaan neljän vuoden ajan, mikä on riittämättömän lyhyt sähköverkon investointien tarkasteluajaksi. Koska regulaatiomallin kehittymiseen liittyy oleellisia riskejä, ei keskimääräisiä eli Suomen energijakaumalla painotettuja KAH-arvoja ole syytä käyttää teknistaloudellista kannattavuutta tavoiteltaessa KAI:n jakeluverkossa. Asiakasryhmäkohtaisia KAH-arvoja käytettäessä investoinnit kohdistetaan varmimmin teknistaloudellisesti oikeisiin paikkoihin, vaikka ne eivät tuottaisikaan keskimääräisillä KAH-arvoilla laskettuna parasta mahdollista tuottoa viranomaisen valvontamallissa.

Investointiohjelman laajuudesta riippuu, kuinka suuri ero eri KAH-arvoja käyttämisestä aiheutuu. Jos tarkoituksena on esimerkiksi varustaa kaikki sähköasemat kompensointilaitteistolla, ei lopputuloksessa ole suurta eroa asennetaanko kompensointi vuotta aikaisemmin yhdelle sähköasemalle ja seuraavana toiselle vai toisin päin. Mutta jos kompensointiin varattu budjetti riittää vain kahteen sähköasemaan, ei ole merkityksetöntä, mihin sähköasemiin investoidaan. Kuten tässä diplomityössä tehdyt laskelmat osoittavat, eri KAH-arvojen käyttäminen johtaa erilaiseen kannattavuusjärjestykseen esimerkiksi sähköasemien välillä määritettäessä kompensointilaitteistojen kannattavuutta. Keskimääräisillä KAH-arvoilla laskettuna, jos vain kaksi sähköasemaa varustettaisiin kompensoinnilla, tulokset johtaisivat erilaiseen lopputulokseen

verrattuna asiakasryhmäkohtaisiin arvoilla saatuihin tuloksiin. Sama pätee myös eläin- ja puoliventtiilisuojuille.

Tässä luvussa esitettyjen tulosten perusteella johtolähtöjen investointijärjestyksen määrittämiskriteerillä on merkitystä siihen, kuinka nopeasti investoinneilla saadaan haluttuja tuloksia aikaan. On ilmeistä, että IRR:n suuruusjärjestyksessä suoritettujen toimenpideinvestointien tuloksena saadaan nopeammin KAH-säästöjä aikaan. Tämä todettiin vertaillen IRR:n ja NPV:n suuruusjärjestyksessä tehtäviä investointiohjelmia.

Edellisen pohdinnan perusteella asiakasryhmäkohtaisten KAH-arvojen ja IRR:n mukaisen investointijärjestyksen käyttäminen vaikuttaisi kannattavimmalta tavolta lähestyä lyhyiden sähkökatkosten vähentämiseen tähtääviä investointeja. Käytettäessä IRR:n mukaista investointijärjestystä käytettävissä olevat varat kohdennetaan kohteisiin, joista saadaan suhteellisesti suurin tuotto. Asiakasryhmäkohtaisten KAH-arvojen käyttö kohdistaa vaikutukset niihin KAI:n jakeluverkon osiin, joissa on suurimmat asiakkaat. Taulukko 9.2 esittää mihin jälleenkytkennöistä aiheutuvaan KAH-kustannusten tasoon voidaan päästä investoimalla 0,5 M€ tai 1 M€ eri toimenpiteisiin johtolähdöittäin, kun laskennassa käytetään asiakasryhmäkohtaisia KAH-arvoja ja investointijärjestyksenä IRR:n mukaista järjestystä.

Taulukko 9.2. Eri toimenpiteisiin tehtävillä investoinneilla saavutettavat jälleenkytkennöistä aiheutuvien KAH-kustannusten taso, kun investoinnit suoritetaan IRR:n suuruusjärjestyksessä ja laskentaan käytetään asiakasryhmäkohtaisia KAH-arvoja.

investointi	0,5 M€	1,0 M€
	[%]	[%]
kompensointi	93	89
eläinsuojat	91	89
puoliventtiilisuojat	68	55

Taulukosta 9.2 nähdään, että kompensoinnilla ja eläinsuojilla saadaan samansuuruisilla investoinneilla lähes samansuuruiset vähennykset jälleenkytkennöistä aiheutuviin KAH-kustannuksiin. Investoitaessa 0,5 M€ kompen-

sointi on kannattavampi vaihtoehto. Jos investoitava rahasumma kaksinkertaistetaan, eläinsuojilla ja kompensoinnilla saavutetaan yhtä suuret KAH-säästöt eli 11 %.

Puoliventtiilisuojilla saavutettavat KAH-kustannustasot ovat selvästi alhaisemmat kuin kahdella muulla toimenpiteellä. Investoimalla 0,5 M€ puoliventtiilisuojiin päästään 68 %:n ja 1 M€:lla 55 %:n nykytasosta. Taulukon 9.2 esittämien tulosten perusteella puoliventtiilisuojat ovat selkeästi kannattavin vaihtoehto vähentää lyhyitä sähkökatkoksia Kainuun Energian jakeluverkossa.

10 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Lyhyiden sähkökatkosten vähentäminen ja yleisen toimitusvarmuuden parantaminen ovat yhteen nivoutunut ongelma. Useilla yleistä toimitusvarmuutta ja sähkön laatua parantavilla toimenpiteillä vähennetään samalla lyhyitä sähkökatkoksia. Tällaisia keinoja ovat muun muassa avojohtojen siirtäminen teiden varsille, PAS-johdon ja maakaapelin käyttö, johtohaarojen korvaaminen 1kV:n muuntopiireillä sekä pylväskatkaisijoiden käyttö. Koko toimitusvarmuutta parantavien keinojen käytön taloudellisuus perustellaan yleensä muuten kuin lyhyiden sähkökatkosten vähentämisellä.

Yleisesti käytössä olevista toimenpiteistä, jotka on tarkoitettu lähes yksinomaan lyhyiden sähkökatkosten vähentämiseen, varteenotettavimpina vaihtoehtoina tässä diplomityössä käsiteltiin kompensointia, eläin- ja puoliventtiilisuoja. Suurin osa vuoden aikana tapahtuvista pjk:sta aiheutuu ilmastollisista ylijännitteistä eli salamista. Tästä syystä suurin vähennyspotentialiaali tämän diplomityön yhteydessä tehdyn selvityksen perusteella on puoliventtiilisuojailla, jotka voivat vähentää yli 60 % jälleenkytkennöistä.

Jälleenkytkentäreleiden aika-asetteluilla voidaan mahdollisesti saada turhat aikajälleenkytkennät poistettua. Releasetteluihin ei ole tässä diplomityössä kiinnitetty huomiota, mutta niitä olisi syytä tutkia tarkemmin yhtenä potentiaalisen mahdollisuutena vähentää ajk:ta.

Tämän diplomityön yhteydessä tehdyistä lyhyiden sähkökatkosten syiden ja toimenpiteiden tehokkuuksien selvityksestä sekä johtolähtökohtaisesta kolmen toimenpiteen kannattavuuslaskennasta voidaan tehdä selkeät johtopäätökset:

- Puoliventtiilisuojaat ovat tutkituista tavoista selkeästi tehokkain vaihtoehto.

- Puoliventtiilisuojat ovat taloudellisesti kannattavin vaihtoehto, jos niillä aikaansaatu lyhyiden sähkökatkosten väheneminen arvotetaan KAH-arvoilla.
- Kannattavuuslaskennassa tulee käyttää asiakasryhmäkohtaisia KAH-arvoja lyhyiden sähkökatkosten arvottamiseen, jotta kannattavuuslaskenta johtaisi alueelliset olosuhteet huomioon ottaen pitkäaikaisesti kannattavimpaan johtolähtöjen investointijärjestykseen ja viranomaisen valvontamallin muutoksiin liittyvät riskit minimoituisivat.
- Johtolähtöjen puoliventtiilisuojien asennusjärjestys kannattaa määrittää johtolähtökohtaisen investoinnin sisäisen koron (IRR) perusteella. Tällöin johtolähdöt, joilla puoliventtiilisuojien asennus tuottaa suurimman KAH-säästön sijoitettua rahayksikköä kohden, tulee suoritettua ensimmäisenä.

Liitteen V kuva 2 esittää tämän diplomityön tulosten perusteella suotuisinta investointiohjelman, jonka mukaan puoliventtiilisuojat olisi kannattavinta asentaa Kainuun Energian jakeluverkkoon. Kuvaa vastaavat investointiportaat on esitetty taulukossa 10.1. 2 M€:n investointi tarkoittaisi yhteensä 85 johtolähdön varustamista puoliventtiilisuojilla. Niistä lähes kaikki eli 82 kappaletta ovat NPV:n perusteella kannattavia. Kannattavuusjärjestyksen mukainen johtolähtöjen nimilista toimitetaan Kainuun Energian johdolle erikseen, eikä sitä julkaista tässä diplomityössä.

Taulukko 10.1. Diplomityön tulosten perusteella suositellun puoliventtiilisuojiin investointiohjelma. Johtolähdöt varustetaan puoliventtiilisuojiin sisäisen koron suuruusjärjestyksessä. JK-KAH-taso tarkoittaa jälleenykykennöistä aiheutuneen haitan tasoa verrattuna nykytasoon (100 %). Laskentaan on käytetty asiakasryhmäkohtaisia KAH-arvoja.

Investointi	JK-KAH-taso	KAH-kustannus
[M€]	[%]	[M€/a]
0	100	1,21
0,25	75	0,91
0,50	68	0,83
0,75	61	0,73
1,00	55	0,67
1,25	51	0,62
1,50	47	0,57
1,75	44	0,53
2,00	42	0,51

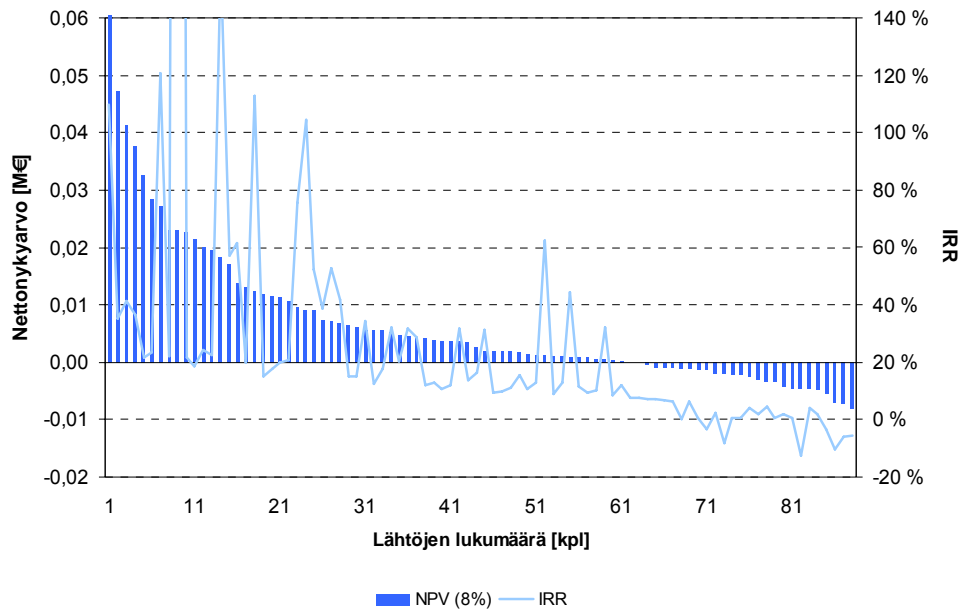
LÄHDELUETTELO

- [Aro 96] Aro M., Elovaara J., Karttunen M., Nousiainen K., Palva V.: Suurjännitetekniikka, Otatiето 1996
- [Cla 96] Claudelin P.: Maasulkuvirran kompensointi. AEL-INSKO-koulutus 1996
- [Ene 05] Energiamarkkinavirasto: Sähköverkkotoiminnan tunnusluvut vuodelta 2005. Saatavissa:
www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Tunlu05.xls
- [Ene 06] Energiamarkkinavirasto: Verkkokomponentit ja indeksikorjatut yksikköhinnat vuodelle 2006. Saatavissa:
www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Sahko_jakelu_yksikkohintataulukko_2006.xls
- [Ene 07] Energiamarkkinavirasto: Sähkön jakeluverkkotoiminnan hinnoittelun kohtuullisuuden arvioinnin suuntaviivat vuosille 2008 – 2011, Dnro 154/422/2007, luonnos 16.2.2007
- [Ens 06] Ensto Oy: Ilmajohdotratkaisut 6-45 kV, 2006. Saatavissa:
www.ensto.com/files/4WPrnJK0X/Attachment/Ilmajohdotratkaisut_6-45_kV.pdf
- [Enu 03] Energiauutiset-lehden numero 3-4/2003
- [Ete 05] Energiateollisuus ry: Sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje. 2005
- [Ete 06] Energiateollisuus ry: Keskeytystilasto 2005 v.2. 21.12.2006
- [Hei 04] Heine P., Lehtonen M., Oikarinen A.: Overvoltage Protection, Faults and Voltage sags, ICHQP 2004, The 11th International Conference on Harmonics and Quality Of Power, Lake Placid, New York, U.S.A., 9/2004
- [Hei 05] Heine P.: Voltage sags in power distribution networks. Doctoral dissertation, TKK, 2005
- [Hei 06] Heine P.: Sähköverkon viat. Sähköpäivien esitelmä ja sitä tukeva moniste. Esitetty Luostolla 15.2.2006
- [Hon 06] Honkapuro S., Tahvanainen K., Viljanainen S., Lassila J., Partanen J., Kivikko K., Mäkinen A., Järventausta P.: DEA-mallilla

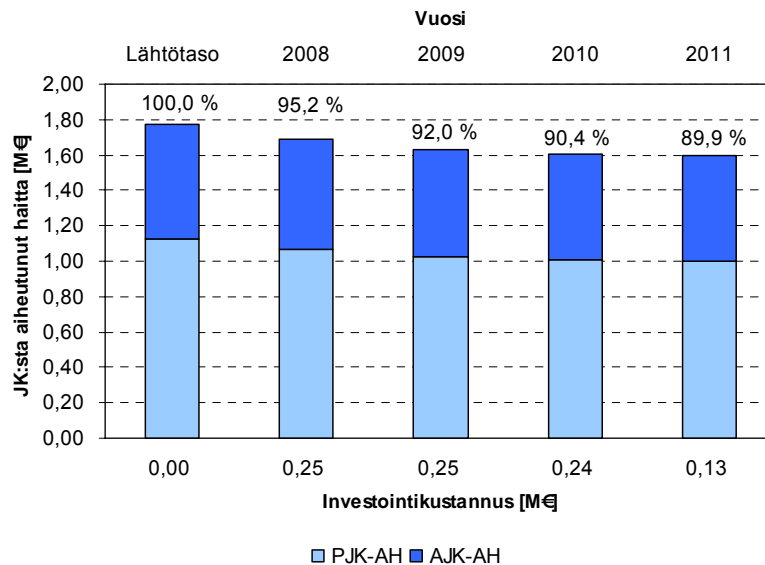
- suoritettavan tehokkuusmittauksen kehittäminen. LUT
18.12.2006
- [Huu 07] Verkostopäällikkö Jouni Huuskon (Kainuun Energia) kanssa käymä keskustelu 10.1.2007
- [Kai 06] Kainuun maakunnan internetsivut www.kainuu.fi. Lainattu 3.10.2006
- [Kvo 91] Kainuun Valo Oy: asiakaslehden numero 2/1991.
- [Kst 06] Kestilän kunnan internetsivut www.kestila.fi. Lainattu 3.10.2006
- [Ktm 06] KTM: Sähkönjakelun toimitusvarmuuden kehittäminen, Sähkön jakeluhäiriöiden ehkäisemistä ja jakelun toiminnallisia tavoitteita selvittäneen työryhmän raportti. 12/2006. Saatavissa: www.ktm.fi/files/17096/Sahkokatkostyoryhman_raportti.pdf
- [Mar 06] Martikainen A.: Ilmastonmuutoksen vaikutus sähköverkkoliiketoimintaan. VTT 2006
- [Nis 03] Niskanen J.: Sähkönjakelun toimitusvarmuuden parantaminen Graninge Kainuu Oy:n keskijänniteverkossa. Diplomityö TKK 2003
- [Par 06a] Partanen J., Lassila J., Kaipia T., Matikainen M., Järventausta P., Verho P., Mäkinen A., Kivikko K., Pylvänäinen J., Nurmi V.: Sähkönjakeluverkkoon soveltuvat toimitusvarmuuskriteerit ja niiden raja-arvot sekä sähkönjakelun toimitusvarmuudelle asetettavien toiminnallisten tavoitteiden kustannusvaikutukset. KTM:n tilaustutkimusraportti, LTY ja TTY, 2006
- [Par 06b] Partanen J., Viljanainen S., Lassila J., Honkapuro S., Tahvanainen K.: Sähkömarkkinat – opetusmoniste. Sähköinen versio: URN:NBN:fi-fe200031793, LTY 2006
- [Pyh 06] Pyhännän kunnan internetsivut www.pyhanta.fi, lainattu 3.10.2006
- [Sen 01] Sener ry: Pikajälleenkytkentöjen aiheuttamat ongelmat ja niiden vähentäminen. Suositus hyväksyttävistä pj-k-määristä. 2001
- [Rei 06] Valvomoteknikko Ismo Reinikan (Kainuun Energia) kanssa käymä keskustelu 5.12.2006

- [Sfs 00] Suomen Standardoimisliitto: standardi SFS-EN 50160, Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet, 2000
- [Sil 05] Silvast A., Heine P., Lehtonen M., Kivikko K., Mäkinen A., Järventausta P.: Sähkönjakelun keskeytyksestä aiheutuva haitta. TKK ja TTY 2005
- [Sim 05] Simonen M.: Ylijännitesuojat. Seminaarityö, LTY 2005
- [Tai 93] Taimisto S.: Maasulkuvirran kompensointi keskijänniteverkossa. Sähkö&tele – lehti, 1993
- [Til 07] Tilastokeskus: internetsivut: www.stat.fi/tup/verkkokoulu/data/tt/02/11/index.html, viitattu 21.2.2007

LIITE I

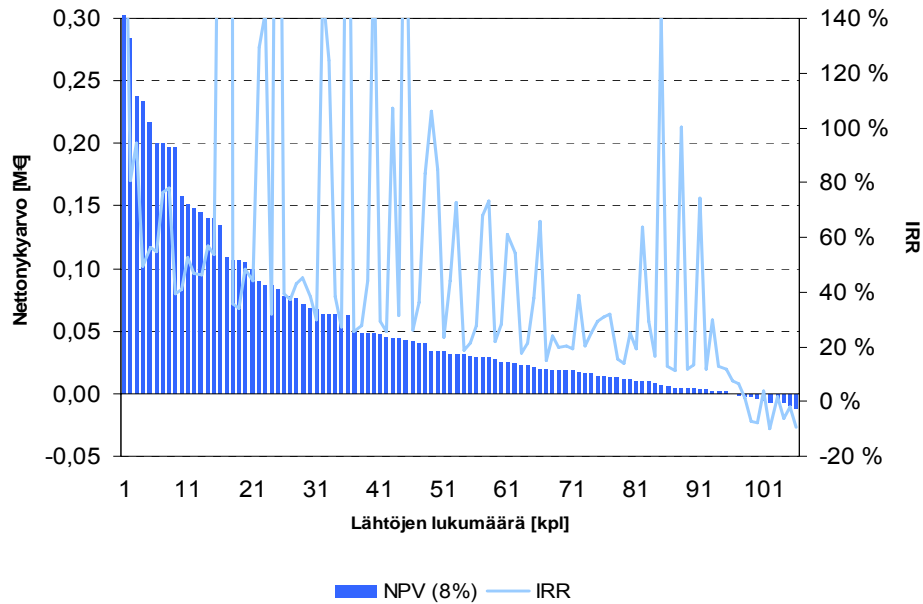


Kuva 1. Eläinsuojainvestointien NPV ja IRR 96 johtolähdöllä järjestettynä NPV:n suuruusjärjestykseen. Laskentaan on käytetty keskimääräisiä KAH-arvoja.

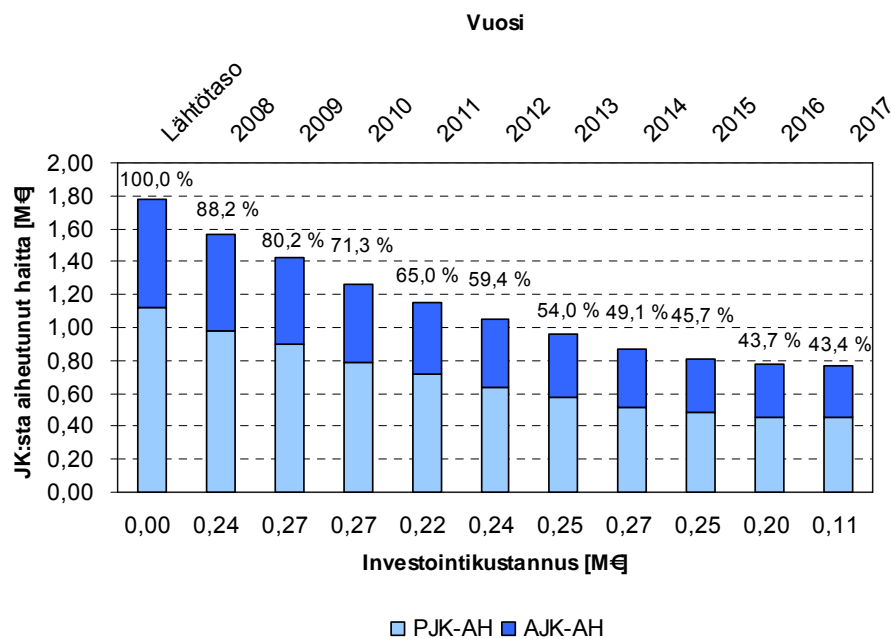


Kuva 2. 0,5 M€n vuotuisella eläinsuojien investointiohjelmalla saavutettavat jälleenykykennöistä aiheutuvien keskeytyskustannusten vuosittaiset tasot KAI:n jakeluverkossa. Investoimalla 0,96 M€ eläinsuojiin päästäisiin 90 %:n lähtötasosta. Laskentaan on käytetty keskimääräisiä KAH-arvoja.

LIITE II

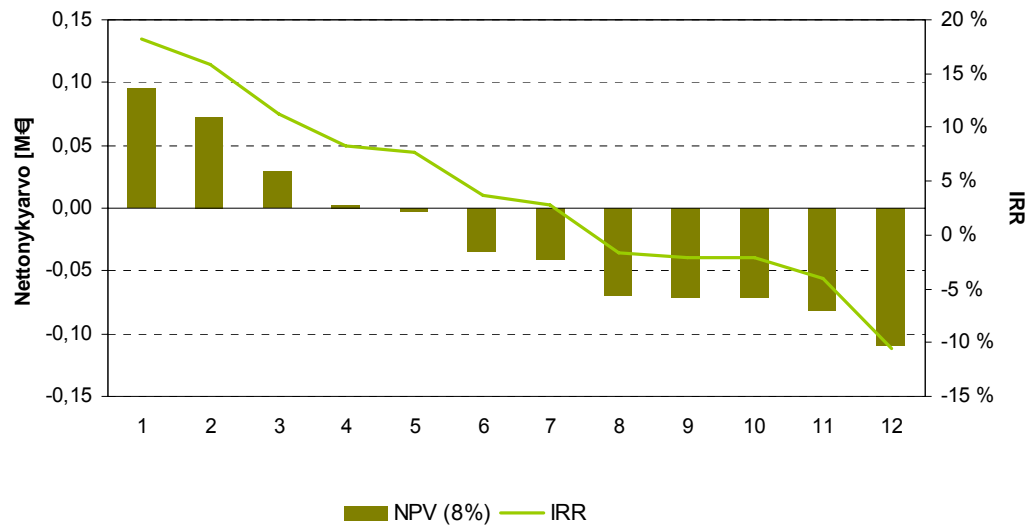


Kuva 1. Puoliventtiilisuoja-investointien NPV ja IRR 124 johtolähdöllä järjestettynä NPV:n suuruusjärjestykseen. Laskentaan on käytetty keskimääräisiä KAH-arvoja.

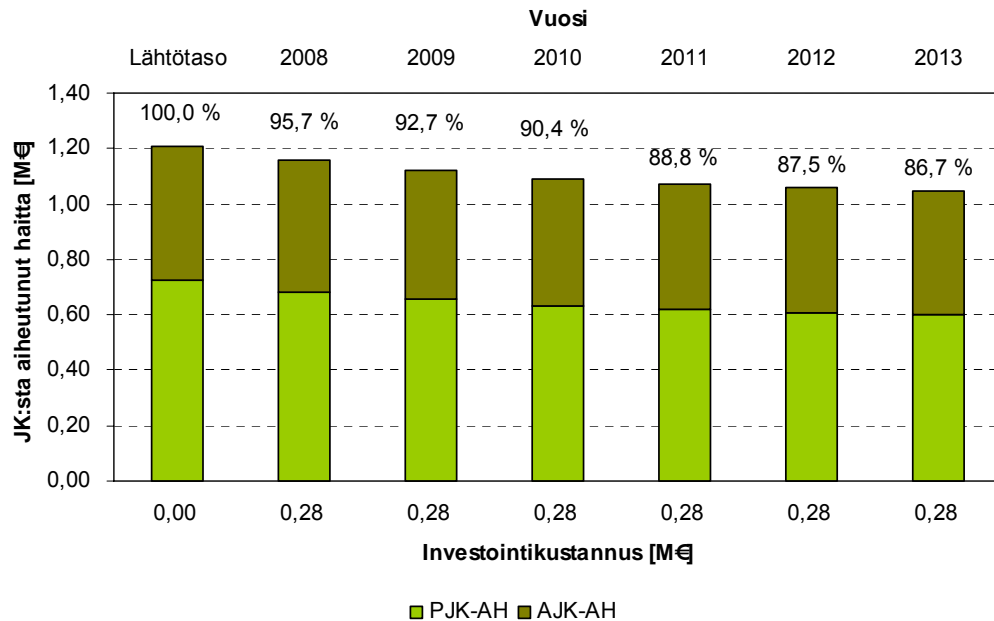


Kuva 2. 0,5 M€n vuotuisella puoliventtiilisuoja-investointiohjelmalla saavutettavat jälleenkytkennöistä aiheutuvien keskeytyskustannusten vuosittaiset tasot KAI:n jakeluverkossa. Investoimalla 2,32 M€ kompensointiin laskisi jälleenkytkennöistä aiheutunut haitta 43,4 %:n lähtötasosta. Investoinnit suoritetaan NPV:n suuruusjärjestyksessä. Laskentaan on käytetty keskimääräisiä KAH-arvoja.

LIITE III

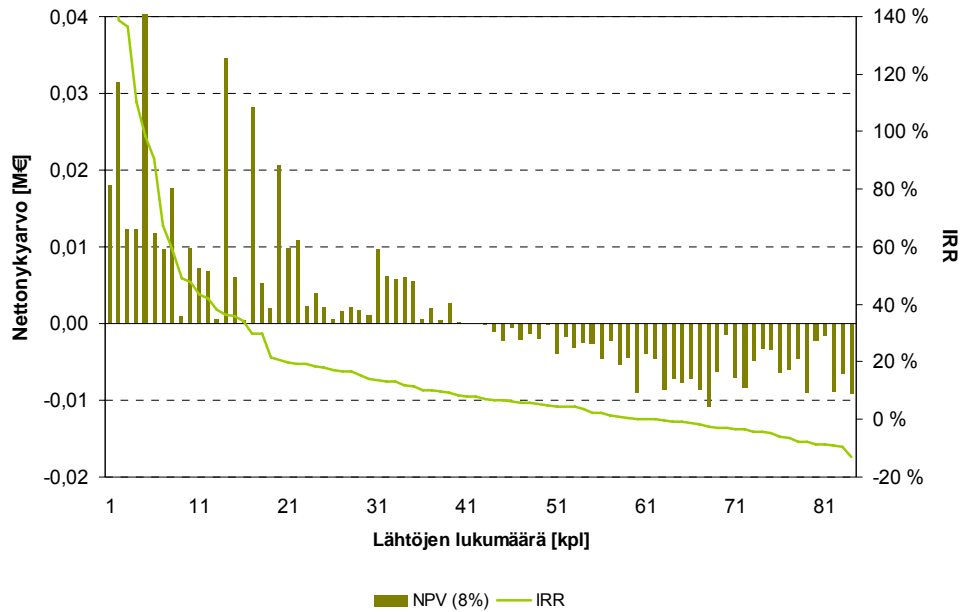


Kuva 1. Kompensointilaitteistoinvestointien NPV ja IRR 12 sähköasemalla. Laskentaan on käytetty asiakasryhmäkohtaisia KAH-arvoja.

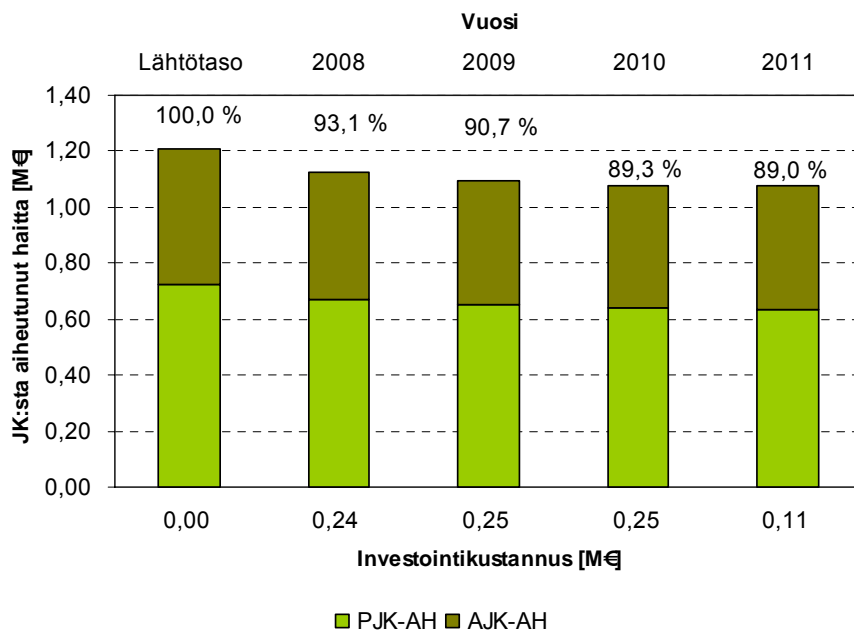


Kuva 2. 0,28 M€n vuosittaisella kompensointilaitteistojen investointiohjelmalla saavutettavat jälleenkytkennöistä aiheutuvat keskeytyskustannusten tasot KAI:n jakeluverkossa. Investoimalla 1,68 M€ kompensointiin laskisi jälleenkytkennöistä aiheutunut haitta 86,7 %:n lähtötasosta. Investoinnit suoritetaan IRR:n suuruusjärjestyksessä. Laskentaan on käytetty asiakasryhmäkohtaisia KAH-arvoja

LIITE IV

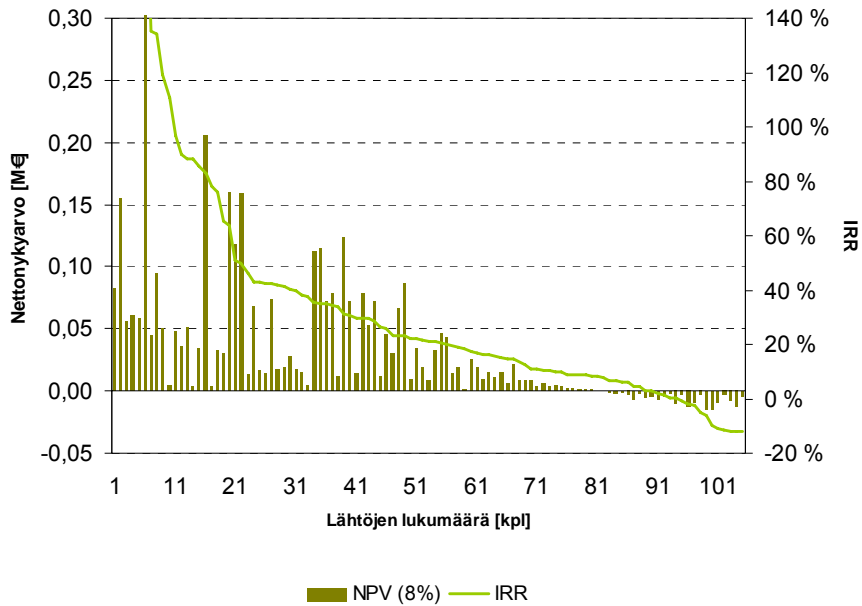


Kuva 1. Eläinsuojainvestointien NPV ja IRR 85 johtolähdöllä IRR:n suuruusjärjestyksessä. Laskentaan on käytetty asiakasryhmäkohtaisia KAH-arvoja.

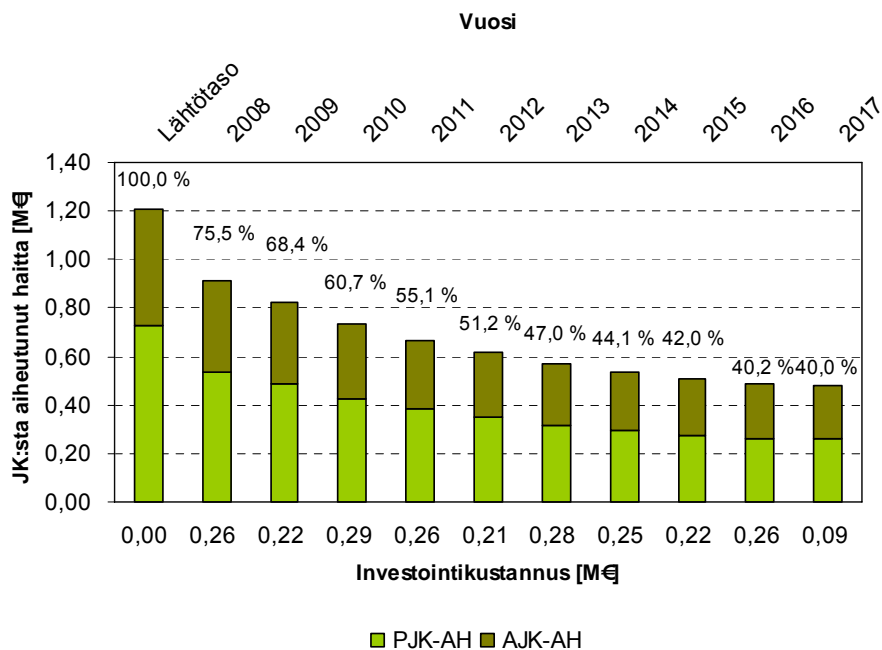


Kuva 2. 0,25 M€n vuotuisella eläinsuojien investointiohjelmalla saavutettavat jälleenkytkennöistä aiheutuvien keskeytyskustannusten vuosittaiset tasot KAI:n jakeluverkossa. Investoimalla 0,85 M€ eläinsuojoihin päästäisiin 89,0 %:n lähtötasosta. Investoinnit suoritetaan IRR:n suuruusjärjestyksessä. Laskentaan on käytetty asiakasryhmäkohtaisia KAH-arvoja.

LIITE V



Kuva 1. Puoliventtiilisuoja-investointien NPV ja IRR 106 johtolähdöllä IRR:n suuruusjärjestyksessä. Laskentaan on käytetty asiakasryhmäkohtaisia KAH-arvoja.



Kuva 2 0,25 M€n vuotuisella puoliventtiilisuoja-investointiohjelmalla saavutettavat jälleenkytkennöistä aiheutuvien keskeytyskustannusten vuosittaiset tasot KAI:n jakeluverkossa. Investoimalla 2,34 M€ puoliventtiilisuojiin päästäisiin 40,0 %:n lähtötasosta. Investoinnit suoritetaan IRR:n suuruusjärjestyksessä. Laskentaan on käytetty asiakasryhmäkohtaisia KAH-arvoja.