



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LAURI PELTOLA  
PIENJÄNNITEVERKON KULUTUSMUUTOSTEN HAVAINNOINTI  
JA SÄHKÖN LAADUN VARMISTUS

Diplomityö

Tarkastaja: Tkt Pertti Pakonen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
8. elokuuta 2018

## TIIVISTELMÄ

**LAURI PELTOLA:** Pienjänniteverkon kulutusmuutosten havainnointi ja sähkön laadun varmistus

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 96 sivua, 6 liitesivua

Lokakuu 2018

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Uusiutuvat sähköenergiateknologiat

Tarkastaja: TkT Pertti Pakonen

Avainsanat: sähkön laatu, kulutusmuutokset, AMR, sähkön laatumittaukset, pientuotanto, lämpöpumput, sähköautot

Tällä hetkellä pienjännitteisen jakeluverkon laatupoikkeamille ei verkostosuunnittelua lukuun ottamatta oikeastaan ole ennakoitua ja laatuvaihteluihin liittyvät selvitykset sekä toimenpiteet tehdään asiakasilmoitusten perusteella. Diplomityössä laatupoikkeamilla tarkoitetaan tilannetta, jossa sähkön laatu ei vastaa standardissa SFS-EN 50160 asetettuja vaatimuksia ja laatuvaihtelulla tarkoitetaan tilannetta, jossa epäillään, että täyttääkö sähkön laatu sille asetetut vaatimukset. Asiakkaan tekemän laatuvaihteluilmoituksen jälkeen toimenpiteinä ovat AMR-mittareilta saatavien mittaustietojen sekä verkkotietojen tarkastaminen ja tarvittaessa paikalliset laatumittaukset. Edellä mainittujen selvitysten jälkeen tyyppillisiä toimia ovat joko jakeluverkon vahvistus tai verkkopalveluehtojen mukainen asiakkaan liittymäkseen ylittävien virtojen / tehojen rajoitus.

Diplomityössä tavoitteena oli pienjännitteisen jakeluverkon sähkön laadulle asetettujen vaatimuksien sekä sähkön laadun nykytilan tutkiminen. Tutkimuksessa tavoitteena oli sähkön laatuselvityksien haasteiden tunnistaminen ja sähköverkossa yleistyvien sähkölaitteiden sähkön laadullisten vaikutusten selvittäminen. Tavoitteena oli myös AMR-mittareilta saatavien mittaussarjojen sekä jännitetietojen hyödyntämisen mahdollisuuksien tutkiminen ja uuden ennakoivan toimintamallin määrittäminen laatuvaihteluiden selvittämisen tueksi.

Työssä tutkittiin jakeluverkon sähkön laadun nykytilaa ja verkossa yleistyviä sähkölaitteita, jotka saattavat lisätä verkossa esiintyviä laatupoikkeamia. Lisäksi työssä tutkittiin AMR-mittareilta saatavien tuntisarjojen, verkkotietojen sekä jännitetietojen hyödyntämisen mahdollisuuksia sähkön laatupoikkeamien havaitsemisessa ja sähkön laadun varmistamisessa. Havaitsemista tutkittiin hyödyntämällä käyttöpaikkoja, joissa oli laatumittauksin todettu esiintyvän laatupoikkeamia. Tutkimuksessa analysoitiin erilaisia tapoja havaita sähkönkäyttäjien kulutusmuutoksia. Analysoituja tapoja olivat muun muassa hajontakaaviot, varianssianalyysit sekä erilaiset muutosanalyysit.

Työssä kehitettiin kulutusmalli, joka hyödyntää verkkotietojärjestelmästä saatavia verkkotietoja, AMR-mittareilta saatavia mittaustietoja sekä Ilmatieteenlaitokselta saatavia kuntakohtaisia lämmitystarvelukuja. Kulutusmallin toimivuutta testattiin tutkimalla noin 2900 käyttöpaikan mittaustietoja ja mallin havaittiin tunnistavan verkossa esiintyviä kulutusmuutoksia. Työssä kehitettiin myös uusi aiempaa ennakoivampi toimintamalli sähkön laatuvaihteluiden havaitsemiseksi sekä laatupoikkeamien käsittelemiseksi. Työssä määriteltiin myös kulutusmallin säännöllisessä käsittelyssä tarvittavan IT-toiminnallisuuden ominaisuudet.

## ABSTRACT

**LAURI PELTOLA:** Detection of consumption changes and ensuring the power quality in low voltage networks

Master of Science Thesis, 96 pages, 6 Appendix pages

October 2018

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Renewable electrical energy technologies

Examiner: TKT Pertti Pakonen

**Keywords:** power quality, consumption change, AMR, power quality measurements, heat pumps, electric cars, solar power

Currently, there isn't really any anticipation in detecting power quality deviations of the low voltage distribution network. Investigations and actions about power quality issues are made on the basis of customer notifications. After the notification made by the customer, the next steps are based on the measurement data obtained from the AMR devices and the network information obtained from the network information system. After the valuation of the data from AMR devices and network information system, local power quality measurements are made if necessary. Following the previous assessments, the typical actions for solving the power quality issues are either fortification of the distribution network or limitation of customer's currents which are exceeding the allowed limits for customer's interface.

The aim of this thesis was to study the power quality requirements and the current state of the power quality in the low voltage distribution network. One goal of the study was to identify the current challenges in power quality surveys. In addition, a goal of this thesis was also to identify electrical equipment which can have an effect on power quality (electric cars, heat pumps, etc.) and to evaluate their impact on power quality as they are becoming more common. The aim was also to study the possibilities of utilizing the measured time series and the voltage data from the AMR devices and defining a new proactive operating model in order to detect the power quality deviations before customer notifications.

During the thesis the current state of the power quality in the distribution network and the power quality effects of heat pumps, electric cars, power electronics and solar electric were studied. In addition, the study examined the possibilities of using AMR devices, the measured time series and the voltage data in the detection of power quality deviations. Power quality detection techniques were investigated by using the locations where power quality deviations had been found in the past with power quality measurements.

A consumption model was developed in the thesis. This consumption model utilizes the network data available from the network information system, the metering data obtained from the AMR devices and the local heating figures available from the Finnish Meteorological Institute. The functionality of the consumption model was tested by examining consumption data of approximately 2900 customers and testing if the consumption model would be able to find any changes. Developed consumption model was able to detect changes in the customers consumption. The project also developed a new, more proactive approach to dealing with power quality deviations. The work also defined the characteristics of the IT functionality needed for the regular utilization of the consumption model.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin vuoden 2018 kevään ja syksyn välisenä aikana Elenia Oy:n Verkon käyttö ja kehitys -yksikön Kunnonhallinta -tiimille. Työssä ohjaajana toimi DI Turo Ihonen Elenia Oy:ltä ja tarkastajana TkT Pertti Pakonen Tampereen teknillisen yliopiston sähkötekniikan laitokselta.

Haluan kiittää työssä ohjaajana toiminutta Turoa mahdollisuudesta kirjoittaa diplomityö kiinnostavasta aiheesta, sekä asiantuntevasta ohjauksesta ja kommentoinnista työn aikana. Lisäksi haluan kiittää ohjausryhmän jäseniä kaikista saamistani ideoista ja kehitysehdotuksista. Kiitokset myös kaikille Elenialaisille, jotka avustivat diplomityöhöni liittyvien aineistojen hankkimisessa. Lopuksi haluan kiittää työn tarkastajana toiminutta Perttiä kaikista hyvistä kommenteista, ajatuksista sekä neuvoista, joita sain diplomityöprosessini aikana.

Tampereella, 23.10.2018

Lauri Peltola

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Tutkimuksen tausta .....	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet.....	3
2.	PIENJÄNNITEVERKON SÄHKÖN LAATU .....	5
2.1	Laatuvaatimukset .....	6
2.1.1	Sähkömarkkinalaki.....	6
2.1.2	Sähköturvallisuuslaki .....	8
2.1.3	SFS-EN 50160 .....	8
2.1.4	Verkkopalveluehdot VPE 2014 .....	9
2.1.5	Sähkön tuotannon liittymisehdot TLE 2014 .....	10
2.2	Jännitteen laatupoikkeamat .....	11
2.2.1	Välkyntä ja nopeat jännitemuutokset.....	12
2.2.2	Jännitekuopat .....	14
2.2.3	Jännitteen nousu.....	15
2.2.4	Transienttiylijännitteet .....	17
2.2.5	Harmoniset yliaaltojännitteet .....	19
2.2.6	Väliharmoniset yliaaltojännitteet .....	21
2.2.7	Jännitteen epäsymmetria .....	22
3.	PIENJÄNNITEVERKON SÄHKÖN LAADUN VARMISTUS .....	23
3.1	Sähkön laadun nykytila .....	23
3.2	Loistehon nykytila.....	27
3.3	Sähköenergiamittarit .....	29
3.3.1	Nykyinen AMR-sukupolvi.....	30
3.3.2	AMR-mittareiden seuraava sukupolvi .....	32
3.3.3	Laatumittarit.....	33
3.4	Tietojärjestelmät.....	35
3.5	Tietosuoja-asetus .....	37
4.	LAATUVAIHTELUIDEN SELVITYS .....	39
4.1	Laatumittaukset .....	42
4.2	Sähköverkossa yleistyvät laitteet ja niiden vaikutus sähkön laatuun.....	44
4.2.1	Lämpöpumppujen yleistyminen.....	45
4.2.2	Sähköautot.....	48
4.2.3	Pien- ja mikrotuotanto sekä energiavarastot .....	50
4.2.4	Tehoelektroniikka .....	53
4.3	Nykyisen selvitysmallin haasteet .....	54
4.4	Tavoitteet selvitykselle tulevaisuudessa.....	55
5.	KULUTUSMALLIN LUOMINEN .....	56
5.1	Kulutusmallin määrittely AMR-datan pohjalta.....	57
5.1.1	Lämmitysmuodon muutoksesta aiheutuvan kulutusmuutoksen mallintaminen.....	58

5.1.2	Sähköautojen lataamiseen liittyvän kulutusmuutoksen mallintaminen.....	71
5.2	AMR-datan ja verkkotietojen yhdistäminen .....	72
5.3	Kulutusmallin toiminnan tarkastelu .....	73
5.4	Kulutusmallin määrittelyjen tarkennus .....	80
5.5	Kulutusmallin käsittelyyn tarvittavat IT-ominaisuudet.....	80
5.6	Vaatimukset seuraavan sukupolven AMR-mittareille .....	82
5.6.1	Mittausjaksojen pituus .....	83
5.6.2	Tarkempien AMR-mittareiden hyödyntäminen kulutusmallissa ...	84
6.	UUDEN TOIMINTAMALLIN MÄÄRITTELY .....	86
7.	YHTEENVETO .....	90
	LÄHTEET.....	92

LIITE A: ASIAKASKYSELY KULUTUSMALLIN ILMOITTAMILLE KÄYTTÖ-  
PAIKOILLE

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b> <i>Välkynnän lyhytaikainen häiritsevyyssindeksi.</i> .....	13
<b>Kuva 2.</b> <i>Välkynnän pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi.</i> .....	13
<b>Kuva 3.</b> <i>Jännitekuoppa, joka on aiheutunut yksivaiheisesta maasulusta. Perustuu lähteeseen [14].</i> .....	15
<b>Kuva 4.</b> <i>Yksivaiheisesta maasulusta aiheutunut jännitteen nousu. Perustuu lähteeseen [14].</i> .....	16
<b>Kuva 5.</b> <i>Salaman aiheuttama transienttivirta [14].</i> .....	18
<b>Kuva 6.</b> <i>Viidennen harmonisen yliaallon vaikutus perustaajuiseen sinimuotoiseen virtaan [57].</i> .....	20
<b>Kuva 7.</b> <i>Laatuselvityspyyntöjen yleisimmät syyt Kymenlaakson Sähköverkko Oy:ssä [47].</i> .....	25
<b>Kuva 8.</b> <i>Laatuvaihteluiden selvitys asiakasilmoituksen jälkeen.</i> .....	41
<b>Kuva 9.</b> <i>Suomeen myytyjen lämpöpumppujen kumulatiivinen taulukko [43].</i> .....	46
<b>Kuva 10.</b> <i>Virranrajoituksella varustetun maalämpöpumpun käynnistysvirtoja.</i> .....	47
<b>Kuva 11.</b> <i>Rekisterissä olevien sähköautojen ja ladattavien hybridautojen määrä Suomessa. Perustuu lähteeseen [44].</i> .....	49
<b>Kuva 12.</b> <i>Sähkökäyttöpaikan hajontakaavio vuodelta 2013.</i> .....	59
<b>Kuva 13.</b> <i>Sähkökäyttöpaikan sähkönkulutus ennen muutosta.</i> .....	60
<b>Kuva 14.</b> <i>Sähkökäyttöpaikan hajontakaavio vuodelta 2014.</i> .....	61
<b>Kuva 15.</b> <i>Sähkökäyttöpaikan kulutusmuutos vuodelta 2014.</i> .....	62
<b>Kuva 16.</b> <i>Sähkökäyttöpaikan hajontakaavio vuodelta 2015.</i> .....	63
<b>Kuva 17.</b> <i>Sähkökäyttöpaikan sähkönkulutus muutoksen jälkeen.</i> .....	64
<b>Kuva 18.</b> <i>Sähkökäyttöpaikan pysyvyysskäyrät vuosilta 2012-2017.</i> .....	65
<b>Kuva 19.</b> <i>Esimerkki kulutusmalliin määriteltujen suhdelukujen seurannasta.</i> .....	75
<b>Kuva 20.</b> <i>Kulutusmallin testauksessa saadut havainnot kappaleina sekä prosentteina testin käyttöpaikkojen kokonaismäärästä.</i> .....	76
<b>Kuva 21.</b> <i>Asiakaskyselyn perusteella oikeaksi osoittautuneiden havaintojen määrä prosentteina kunkin havaitsemisjakson kokonaishavaintomäärästä.</i> .....	78
<b>Kuva 22.</b> <i>Kaavio uuden toimintamallin mukaisesta laatuvaihtelun selvityksestä.</i> .....	88

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AMI	kehittynyt mittausinfrastruktuuri (engl. Advanced metering infrastructure)
AMR	automaattinen mittarinluenta (engl. Automatic Meter Reading)
ATJ / CRM	asiakastietojärjestelmä (engl. Customer Relationship Management)
EDM	mittaustietojärjestelmä (engl. Energy Data Management)
ET	Energiateollisuus
EV	Energiavirasto
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
KMP	kulutusmittauspalvelu
kWh	kilowattitunti
MTHJ /MDMS	mittaustiedonhallintajärjestelmä (engl. Metering Data Management System)
MWh	megawattitunti
$P_{lt}$	välkynnän pitkäaikainen häiritsevyysindeksi
$P_{st}$	välkynnän lyhytaikainen häiritsevyysindeksi
RF	radiotaajuus (engl. Radio Frequency)
RMS	tehollisarvo (engl. Root Mean Square)
RVC	nopea jännitetason muutos (engl. Rapid Voltage Change)
SCADA	käytönvalvontajärjestelmä (engl. Supervisory Control And Data Acquisition)
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
TD	kokonaissärökerroin (engl. Total Distortion)
THD	harmoninen kokonaissärökerroin (engl. Total Harmonic Distortion)
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
Tukes	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
VTJ / NIS	verkkotietojärjestelmä (engl. Network Information System)



# 1. JOHDANTO

Tämä diplomityö tehtiin sähköjakelupalveluita tarjoavalle jakeluverkkoyhtiö Elenia Oy:lle. Elenia Oy on osa Elenia-konsernia, joka koostuu Elenia Oy:stä sekä sen omistamista tytäryhtiöistä, joita ovat Elenia Lämpö Oy, Elenia Palvelut Oy ja Elenia Finance Oyj. Elenia Oy on Suomen toiseksi suurin sähköverkkoyhtiö. Elenia Oy toimittaa sähköä 425 000 sähkökäyttöpaikalle ja sähköverkon kokonaispituus on 70 170 kilometriä. [9]

Elenia Oy:n tavoitteena on toimia edelläkävijänä sähkönsiirtopalveluissa, säävarmassa sähköjakelussa, sähköjakelun laadussa sekä yleisessä asiakaskokemuksessa. Säävarman sähköverkon saavuttamiseksi Elenia Oy suorittaa sähköjakeluverkkonsa maakaapelointeja, joissa tavoitteena on saavuttaa 75 %:in maakaapelointiaste vuonna 2028. Vuoden 2017 aikana Elenia Oy rakensi yli 3000 km uutta maakaapeloitua sähköjakeluverkkoa ja loppuvuodesta 2017 sähköjakeluverkon maakaapelointiaste ylitti 40 %. Toimintusvarman sähköjakeluverkon rakentamisen sekä kehittämisen ohella Elenia Oy panostaa vahvasti myös älykkään sähköverkon kehittämiseen. Vuoden 2017 aikana Elenia Oy asensi noin 30 000 kappaletta seuraavan sukupolven etäluettavia sähkömittareita, joiden avulla kehitetään muun muassa uutta mittaustietojärjestelmää. [9]

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Nykyaikana sähköstä on tullut yhteiskunnalle lähestulkoon välttämättömyys. Globaalisti sähkönkulutus kasvaa tasaisesti ja uusia sähkölaitteita tulee markkinoille jatkuvasti. Sähkölaitteiden toiminnan varmistamiseksi verkosta tulee saada riittävän hyvälaatuista sähköä. Sähkön laadun vaihtelevuus saattaa aiheuttaa laitteiden suorituskyvyn heikkene mistä sekä jopa laiterikkoja [35, s. 2-4]. Yksi jakeluverkkoyhtiöiden tehtävistä on toimittaa sähkökäyttäjille lakien sekä standardien mukaista sähköä [49]. Sähkön laadun turvaamiseksi jakeluverkoissa suoritetaan muun muassa saneerauksia, erinäisiä kunnossapitotoimia, sähkön laatumittauksia ja jakeluverkon kunnan jatkuvaa valvontaa muun muassa maastotarkastuksin sekä mittauksin.

Jakeluverkossa esiintyvät sähkön laatupoikkeamat sekä laatuvaihtelut liittyvät usein joko verkossa esiintyviin vikoihin, sähkönkulutusten vaihteluun tai liittymäkokoon nähden suureen kuormitukseen. Tällä hetkellä pienjännitteisessä jakeluverkossa esiintyvissä laatu poikkeamissa ei oikeastaan ole ennakointia, vaan selvitys sekä toimenpiteet tehdään pääasiassa asiakasilmoitusten perusteella. Asiakkaan tekemän ilmoituksen jälkeen tyypillisinä toimina ovat muun muassa AMR-mittaustietojen sekä verkkotietojen tarkastaminen ja tarvittaessa paikalliset laatumittaukset. Tämän diplomityön yhtenä tavoitteena on luoda

laatuvaihteluiden selvittämisen tueksi kulutusmalli, joka mahdollistaa jakeluverkossa esiintyvien laatuvaihteluiden havaitsemisen ennen asiakasilmoituksia.

Diplomityössä sähkön laatupoikkeamilla tarkoitetaan tilannetta, jossa sähkön laatu ei vastaa sille standardeissa asetettuja vaatimuksia. Pääasiassa laatupoikkeamilla tarkoitetaan tilanteita, joissa liittymispisteen jännite ei täytä standardissa SFS-EN 50160 määriteltyjä raja-arvoja (lisätietoa luvussa 2.1).

Työssä sähkön laatuvaihteluilla tarkoitetaan tilannetta, jossa esimerkiksi sähkökäyttäjä on havainnut vaihtelua sähkön laadussa ja epäilee, ettei sähkön laatu täytä sille asetettuja vaatimuksia. Laatuvaihtelu voidaan todeta laatupoikkeamaksi sitten kun laatumittauksin on todettu, että sähkön laatu ei täytä sille asetettuja vaatimuksia. Laatuvaihtelu voi myös liittyä siihen, että asiakasodotukset sähkön laadusta eivät täyty, vaikka sähkön laatu olisikin laatumittauksin todettu sille asetettujen vaatimusten mukaiseksi ja laatupoikkeamia ei olisi havaittu.

Työssä suoritettavan sähkön laadun varmistuksen taustana on se, että sähkön laadun vaihtelua ja laatupoikkeamia on jossakin määrin esiintynyt aina sähkön käytön alkua ajoista lähtien. Osapuilleen 1900-luvun puoliväliin asti käytössä oli pääasiassa teknologialtaan yksinkertaisia sähkölaitteita, jotka eivät ole olleet nykyisten sähkölaitteiden tavoin herkkiä sähkön laatuvaihdetuille ja silloisilla mittareilla laatuvaihteluiden havainnointi on ollut käytännössä lähestulkoon mahdotonta [35, s. 1-5]. Ensimmäisen sukupolven sähkön laatumittarit tulivat 1970-luvun puolivälissä ja ne tuottivat nykymittapuulla melko epätarkkaa tietoa ilmiöistä ja niiden arvoista [14]. Vanhat sähkölaitteet kuluttivat suuria määriä sähköä ja niiden sähkön laadulliset toimintamarginaalit olivat melko laajat, joten ne toimivat silloisella laadulla odotetusti. Viimeisimmän noin viidenkymmenen vuoden aikana sähkölaitteiden suunnittelussa on panostettu laitteiden taloudellisuuteen ja siitä on seurannut laitteiden hyötysuhteiden paraneminen sekä fyysisen koon pieneneminen. Sähkölaitteiden suunnittelussa ja tuotannossa aloitetusta taloudellisuuteen panostamisesta on seurannut sähkölaitteiden sähkön laatuun liittyvien toimintamarginaalien pienenemistä. Toimintamarginaalien pieneneminen yhdistettynä sähkönkulutuksen kokonaisvaltaiseen kasvuun sai aikaan sen, että sähkön laatuongelmia alettiin havaita aiempaa enemmän ja siten syntyi tarve sähkön laadun määrittelylle ja turvaamiselle [35, s. 2-3].

Aiemmin verkossa tapahtuvien kulutusmuutoksen havaitsemista on tutkinut muun muassa diplomityössään Tao Chen [4][5]. Yleisesti aiemmissa tutkimuksissa kulutusmuutoksia on mallinnettu muun muassa luomalla kulutushistorian profilointiin sekä klusterointiin perustuvia asiakasluokkia tai yksilöllisiä kulutusprofiileja. Klusterointimenetelmien avulla luotujen kulutusmallien avulla on luotu ennustemalleja tulevalle kulutuksella ja mittaustietoa on sitten verrattu ennustemalleihin. Mikäli huomattava kulutusmuutos on tapahtunut, niin kulutusmuutoksen jälkeisen mittaustiedon avulla on luotu uusi kulutusprofiili sekä ennuste.

Edellä mainittujen kulutusmuutosten havaitsemisen lisäksi sähkölaitteiden aiheuttamia sähkön laatuvaihteluista ja sähkönkulutusta on käsitelty useissa eri tutkimuksissa. Lämpöpumppuihin liittyviä kulutusmuutoksia on tutkinut muun muassa S. Suurinkeroinen tutkimuksessa [46] sekä M. Hagström et al. tutkimuksessa [12]. Sähkön pientuotannon ja tehoelektroniikan vaikutuksia on käsitelty muun muassa M.A. Awadallah et al. tutkimuksessa [2] sekä S. Weckx et al. tutkimuksessa [63]. Sähköautojen lataamisen vaikutuksia sähkön laatuun on käsitelty muun muassa L. Kutt et al. tutkimuksessa [22] sekä C. Mi et al. tutkimuksessa [27]. Mainittuja tutkimuksia on hyödynnetty tässä diplomityössä käsiteltävien laitteiden määrittelyssä sekä kulutusmuutosten havainnoissa.

Tämä työ eroaa hieman aiemmista pienjänniteverkon käyttöpaikkojen kulutusmuutoksiin liittyvistä tutkimuksista. Suurimpana erona on se, että tässä työssä kulutusmuutoksia tutkitaan enemmän pienjänniteverkon sähkön laadun näkökulmasta ja työn pääasiallinen tarkoitus on tehdä sähkön laatuvaihteluiden havaitsemista ennakoivammaksi. Työssä tavoitteena on myös hyödyntää verkkotietoja kulutusmallin tukena ja rajata kulutusmallin käyttöpaikkoja verkkotietoja hyödyntämällä. Tämän työn yhteenvedossa tullaan käsittelemään tarkemmin tämän ja edeltävien tutkimusten eroavaisuuksia.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Diplomityössä tavoitteena on tutkia pienjänniteverkon sähkön laadulle asetettuja vaatimuksia sekä sähkön laadun nykytilaa. Tutkimuksessa tavoitteena on tunnistaa sähkön laatuselvityksien haasteita sekä sähköverkossa yleistyvien sähkölaitteiden vaikutusta sähkön laatuun. Tavoitteena on myös tutkia AMR-mittareilta saatavien tuntisarjojen sekä jännitetietojen hyödyntämisen mahdollisuuksia sähkön laatuongelmien havainnoinnissa ja ennakoinnissa. Työssä on tarkoitus kehittää kulutusmalli, jossa hyödynnetään jakeluverkon verkkotietoja sekä AMR-mittareilta saatavissa olevaa mittaustietoa. Kulutusmallin avulla on tarkoitus selvittää ja tutkia jakeluverkon sähkön laatuun liittyviä ongelmapaikkoja jo ennen asiakasilmoituksia sähkön laatuvaihteluista. Testausvaiheessa kulutusmallin toimivuutta varmistetaan asiakaskyselyin sekä verkossa suoritettavin laatumittauksin. Diplomityön jälkeen pyritään siihen, että määritetty kulutusmalli tulee tukemaan nykyistä sähkön laatuvaihteluiden selvitysprosessia.

Diplomityössä määriteltävän kulutusmallin yhtenä tehtävänä on mahdollistaa jakeluverkon laatuopikkeamien ennakointi sekä tunnistaa alueet, joissa laatuvaihteluista esiintyy ja aloittaa selvitystyö ennen jakeluverkkoyhtiön asiakkaiden ilmoituksia. Koska työssä määritellyn kulutusmallin kaltaista työkalua ei ole aiemmin ollut laatuvaihteluiden selvityksessä, niin yhtenä työn tavoitteena on selvittää kulutusmallin hyödyntämisen vaatimat IT-ominaisuudet. Työssä tavoitteena on myös luoda uusi ennakoivampi toimintamalli sähkön laatuvaihteluiden selvittämiseen. Toimintamallissa tavoitteena on määritellä muun muassa se, että missä tapauksissa kulutusmallia hyödynnetään ja miten asiakkaita informoidaan, jos kulutusmalli ilmoittaa kulutusmuutoksesta.

Työn lopullisena tavoitteena on se, että kun toimintamalli on käytössä, niin jakeluverkon sähkökäyttäjiltä saatavat asiakasilmoitukset laatuvaihteluista vähenevät ja jakeluverkon sähkön laatu jatkaa paranemistaan. Työssä on siis tavoitteena luoda kulutusmalli, joka on suhteellisen helposti integroitavissa nykyisten laatuvaihteluiden havaitsemisessa hyödynnettävään toimintamalliin sekä määritellä uusi toimintamalli, joka huomioi kulutusmallin tuomat mahdollisuudet.

## 2. PIENJÄNNITEVERKON SÄHKÖN LAATU

Tässä luvussa käsitellään sähkön laadun mittaamisen taustaa sekä laatupoikkeamiin liittyviä ilmiöitä. Nyky-yhteiskunnassa sähkö on lähes välttämättömyys ja sähkölaitteiden toiminta on entistä riippuvaisempaa sähkön tasaisesta laadusta. Sähkön laatu koskettaa kaikkia sähkönkäyttäjiä teollisuudesta kotitalouskuluttajaan. Kun sähkön laatu on riittämätön, niin sähkölaitteiden suorituskyky heikkenee. Heikkenemistä tapahtuu kaiken tyyppisillä laitteilla aina kuluttajan tietokoneista sairaalalaitteisiin. Erilaiset laitteet reagoivat eri tavalla muuttuneeseen sähkön laatuun ja osa laitteista jopa luo itselleen laatuongelmia [35, s. 13-14]. Sähkön laatu on siis sarja erilaisia raja-arvoja sekä määritelmiä, jotka mahdollistavat jakeluverkon sähkön laadun seurannan. Sähkön laadun raja-arvoilla pyritään rajaamaan pois sellainen sähkön laatu, joka heikentää laitteen toimintaa tai lyhentää elinikää [35, s. 1-5].

Vaikka sähkön laadun tärkeys on yleisesti tiedostettu asia, niin silti sähkön laadun hallinta on usein monimutkaista. Sähkön laadun hallintaan vaikuttavat kaikki sen vaiheet tuotannosta, siirrosta ja jakelusta aina loppukäyttäjään asti. Sähkön aineettomuus ja hetkellisyys vaikuttavat siihen, että täysin häiriötöntä sähkönjakelua ei ole mahdollista joka tilanteessa toteuttaa [53]. Sähkön laatupoikkeamat ilmenevät jakeluverkossa usein eri ilmiöin ja poikkeamilla on useita erilaisia aiheuttajia. Laatupoikkeamiin liittyen on säädetty sekä useita kansallisia että kansainvälisiä ohjeita ja vaatimuksia, joita käsitellään alaluvussa 2.1. Laatupoikkeamiin liittyvät pienjänniteverkon yleisimmät ilmiöt ja ilmiöille säädetyt raja-arvot ovat esitettynä tarkemmin luvussa 2.2.

Tässä diplomityössä keskitytään pienjänniteverkon sähkön laatuun, koska valtaosa sähkönkäyttöpaikoista on liittynyt sähköverkkoon pienjänniteverkon kautta. Esimerkiksi Elenia Oy:n noin 425 000 käyttöpaikasta yli 420 000 on pienjänniteverkkoon liitettyjä käyttöpaikkoja [9]. Osa sähkön laatuun liittyvistä laatupoikkeamista voi siirtyä pienjänniteverkkoon keski- tai suurjänniteverkon puolelta, mutta niissä tapauksissa poikkeamat leviävät usein niin laajalle alueelle, että ne havaitaan nopeasti. Suurjänniteverkon laatu poikkeamia on tarkemmin tutkinut muun muassa Onni Härmä diplomityössään *Sähkön laadun mittaus ja valvonta kantaverkossa* [13]. Yksi yleisimmistä ilmiöistä, joita suur- tai keskijänniteverkosta voi siirtyä pienjänniteverkkoon on jännitekuopat. Jännitekuopista ja niiden syntyemisestä on kerrottu tarkemmin luvussa 2.2.2. Rajaus pienjänniteverkkoon liittyy myös siihen, että valtaosa sähkön laadun vaihteluihin liittyvistä asiakasilmoituksista tulee pienjänniteverkkoon liitetyiltä käyttöpaikoilta.

Tässä työssä käsitellään pien- ja mikrotuotantokohteiden vaikutusta sähkön laatuun, mutta myös esimerkiksi 110 kV:n suurjännitteiseen jakeluverkkoon liitettävillä tuotantopaikoilla voi olla ongelmia sähkön laadun kanssa. Suurjännitteiseen jakeluverkkoon lii-

tettyjen tuotantopaikkojen laatupoikkeamat voivat ilmetä esimerkiksi siten, että tuulipuisto putoaa toiminnasta verkossa esiintyvän jännitteen epäsymmetrian takia, joka taas aiheutuu verkon nollakomponentin suuruudesta [62]. Edellä mainitun kaltaiset tapaukset ovat kuitenkin erittäin harvinaisia ja tämän takia tässä työssä keskitytään pääasiassa pienjännitteiseen jakeluverkkoon liitettyihin tuotantokohteisiin. Tuotantokohteita on käsitelty muun muassa luvussa 4.2.3.

## 2.1 Laatuvaatimukset

Tässä alaluvussa käsitellään pienjänniteverkon jakelujännitteelle asetettuja vaatimuksia sekä raja-arvoja. Vaatimuksia käsitellään jakeluverkkoyhtiön verkon kannalta sekä jakeluverkkoon liittyvän sähkökäyttäjän kannalta.

Sähkön laadulle on asetettu useita erilaisia laatuvaatimuksia. Laatuvaatimusten taustalla on sähkölaitteiden turvallisen toiminnan takaaminen koko sähköverkon alueella. Yleisesti sähkön laatua tutkitaan jännitteen ominaisuuksien avulla. Tutkittavia ominaisuuksia ovat muun muassa välkyntä eli jännitteen nopeat muutokset, jännitteen aaltomuoto, jännitteen suuruus ja jännitteen symmetria. [56]

Useimmat tässä alaluvussa käsitellyt laatuvaatimukset ovat usein voimassa vain normaaleissa käyttöolosuhteissa. Epänormaaleilla käyttöolosuhteilla tarkoitetaan muun muassa tilapäisiä syöttöjärjestelyjä silloin, kun järjestely on aiheutunut vikatilanteesta tai verkon rakennus- tai huoltotöistä. Energiateollisuuden perustama työryhmä on julkaisussaan [53] määritellyt hallituksen 20/2013 esityksen pohjalta, millaisissa olosuhteissa virherajat eivät ole voimassa. Työryhmä on julkaisussaan määritellyt seuraavasti:

### ”Virherajat eivät ole voimassa seuraavissa sääolosuhteissa:

- Keskituulenopeus ylittää kovan tuulen rajan
  - tuulennopeuden 10 minuutin keskiarvo ylittää 14 m/s (Lähde Ilmatieteenlaitos).
- Lyhytaikaisissa puuskissa tuulenopeus ylittää myrskyrajan
  - tuulenopeus yli 20 m/s (Lähde: Ilmatieteenlaitos)
- Poikkeuksellisen raju ukkonen
  - salamatiheys ylittää 80 salamaa/100km<sup>2</sup> (Lähde: Ilmatieteenlaitos)
- Lisäksi normaalista poikkeava sääolosuhde voi syntyä esim. merkittävien lumi-kuormien (tykkylumen) tai tulvan tai äkillisen rankkasateen aiheuttaman vedenousun seurauksena.” [53]

### 2.1.1 Sähkömarkkinalaki

Sähkömarkkinalaissa säädetään luvun 4 pykälässä 19 seuraavasti: ”Verkonhaltijan tulee riittävän hyvälatauisen sähkön saannin turvaamiseksi verkkonsa käyttäjille ylläpitää,

käyttää ja kehittää sähköverkkoaan sekä yhteyksiä toisiin verkkoihin sähköverkkojen toiminnalle säädettyjen vaatimusten ja verkon käyttäjien kohtuullisten tarpeiden mukaisesti” [49]. Sähkömarkkina-alueissa verkonhaltijalle asetetaan siis vaatimus siitä, että asiakkaille on turvattava vaatimusten mukainen sähkön laatu.

Sähkömarkkina-alueissa verkonhaltijalle on säädetty muun muassa seuraavaa: Verkonhaltijan tulee suunnitella, rakentaa ja ylläpitää jakeluverkkoaan siten, että se täyttää verkolle säädetyt laatuvaatimukset ja että sähkönsiirron sekä sähkönjakelun tekninen laatu on hyvä. Verkonhaltijan sähköverkon ja siihen liittyvien verkkopalveluiden tulee myös toimia luotettavasti normaaleissa sääolosuhteissa ja kestää niihin kohdistuvat normaalit mekaaniset sekä ulkoiset häiriöt. Sähköverkkoon tulee voida liittää vaatimukset täyttävät käyttöpaikat sekä voimalaitokset ja sähköverkon tulee toimia luotettavasti sekä yhteensopivasti sähköjärjestelmän kanssa [49]. Sähkön laadun kannalta tämä siis tarkoittaa, että verkon tulee toimia laadullisesti luotettavasti normaaleissa käyttöolosuhteissa ja että sähköverkkoon tulee voida liittää vaatimusten mukaiset laitteet ilman häiriöitä.

Sähköverkkoon liittämistä verkonhaltija veloitetaan liittämään omalla verkkoalueellaan sähköverkkoonsa tekniset vaatimukset täyttävät käyttöpaikat ja tuotantolaitokset. Verkonhaltija on oikeutettu saamaan kohtuullisen korvauksen uuden käyttöpaikan liittämistä. Uuden käyttöpaikan liittämistä tulee olla tasapuolinen sekä syrjimätön ja verkonhaltijan tulee huomioida uuden käyttöpaikan toimitusvarmuus sekä tehokkuus. [49]

Sähkömarkkinalain pykälässä 97 on myös määritelty sähkönjakeluun, -toimitukseen ja verkkopalveluun liittyvä virhe. Verkkopalvelun virhe voi liittyä joko sähkön toimitustapaan, sähkön laatuun tai sähkönkuluttajan laskutukseen. Sähkönjakelussa ja sähkötoimituksessa katsotaan olevan virhe silloin, kun sähkön laatu ei vastaa Suomessa noudatettavia standardeja. Kyseisiä Suomessa noudatettavia standardeja käsitellään myöhemmin tässä luvussa. Verkkopalvelun virhe voi esiintyä myös, jos sähkönjakelussa tai toimituksessa todetaan olevan toistuvia tai jatkuvia keskeytyksiä. Keskeytyksiin liittyvissä verkkopalvelun virheissä huomioidaan ympäristön olosuhteet sekä keskeytyksen syy ja kyseessä on virhe, mikäli keskeytystä ei voi pitää vähäisenä. [49]

Sähkömarkkinalain pykälässä 101 käsitellään sähkönkäyttäjän oikeuksia verkkopalvelun virheisiin sekä sähkönjakelun keskeytyksiin liittyen. Pykälässä säädetään, että sähkönkäyttäjällä on oikeus esittää virheisiin liittyvät vaatimukset sähkönjakeluverkon haltijalle pois lukien ne virheet, jotka aiheutuvat sähkön myyjän virheellisestä tai viivästyneestä laskutuksesta. Sähkönkäyttäjän tulee esittää vaatimuksensa kohtuullisessa ajassa virheen havaitsemisesta tai siitä, kun hänen olisi pitänyt havaita se. Jakeluverkonhaltijan tulee joko hoitaa virheestä aiheutuva vahingonkorvaus / hinnanalennus tai ilmoittaa virheestä vastuussa oleva sähkön vähittäismyyjä, joka vastaa korvauksista sähkönkäyttäjälle. [49]

## 2.1.2 Sähköturvallisuuslaki

Sähköturvallisuuslaissa säädetään vaatimuksia sähkölaitteiden ja -laitteistojen häiriökes-  
tolle sekä niiden aiheuttamille häiriöille. Tässä luvussa käsitellään sähköturvallisuuslakia  
sähkön laadun ja laadun varmistuksen kannalta oleellisilta kohdin.

Laitteet ja laitteistot on suunniteltava, rakennettava ja käytettävä niin, että niistä ei ai-  
heudu kohtuutonta häiriötä sähköisesti tai sähkömagneettisesti. Sähkölaitteet ja -  
laitteis-  
tot eivät myöskään saa helposti reagoida sähköiseen tai sähkömagneettiseen häiriöön si-  
ten, että niiden toiminta häiriintyisi. Sähkön laadun ja häiriöiden osalta on myös huomi-  
oitava sähköturvallisuuslain luku kuusi, jossa säädetään muun muassa, että mikäli säh-  
könkäyttäjän sähkölaitte tai -laitteisto aiheuttaa toiselle sähkölaitteelle tai -laitteistolle säh-  
kövahinkoa, niin vahinkoa aiheuttaneen laitteen tai laitteiston haltija on velvollinen kor-  
vaamaan aiheutuneen sähkövahingon. Sähkölaitteen tai -laitteiston haltija ei kuitenkaan  
ole vahingonkorvausvastuussa, mikäli sähkövahingon kokeneen sähkölaitteiston nimel-  
lisjännite on yli 400 volttia. Sähkölaitteen tai -laitteiston haltija ei myöskään ole vastuussa  
sähkövahingosta, mikäli sähkövahingon on aiheuttanut nimellisjännitteeltään yli 400 vol-  
tin kiinteistön sisäisen sähköhuollon sähkölaitte tai -laitteisto tai siihen liitetty sähkölaitte  
tai -laitteisto. [55]

Sähköturvallisuuslain luvussa kuusi tarkennetaan laitteiston omistajan vastuuta häiriö tai  
vaaratilanteessa. Luvun kuusi pykälässä 108 todetaan muun muassa, että mikäli määräys-  
ten mukaisen sähkölaitteiston todetaan aiheuttavan vaaraa tai häiriöitä muille sähkölait-  
teistoille tai sen käytölle, niin myöhemmin rakennetun laitteiston omistajan tulee tehdä  
tarvittavat toimenpiteen ongelmakohdan poistamiseksi. On kuitenkin huomioitava, että  
aiemmin rakennetun laitteiston omistajan tulee tehdä korjaukset, mikäli verkossa esiinty-  
vän häiriön tai vaaran poistaminen on toteutettavissa sähkölaitteistossa siten, että siitä ei  
aiheudu laitteistolle haittaa ja se on toteutettavissa huomattavasti pienemmin kustannuk-  
sin täydentämällä tai muuttamalla sähkölaitteistoa. [55]

## 2.1.3 SFS-EN 50160

Tässä alaluvussa käsitellään standardin SFS-EN 50160 rakennetta sekä sisältöä. Aluksi  
standardista kerrotaan yleisesti ja sitten käsitellään standardissa esitettyjä laatu-  
poik-  
keamia sekä niille asetettuja vaatimuksia ja ohjeistuksia. Kyseisiin laatu-  
poikkeamiin liit-  
tyvät ilmiöt ja standardissa niille esitetyt vaatimukset esitetään tarkemmin alaluvussa 2.2.

Standardi SFS-EN 50160 on eurooppalainen standardi, jossa määritellään verkon jännit-  
teiden ominaisuuksia. Standardi on myös vahvistettu suomalaiseksi kansalliseksi standar-  
diksi. Standardissa määritellään normaaleiden käyttöolosuhteiden raja-arvot jakeluver-  
konverkon sähkönkäyttäjän liittymiskohdan jännitteen ominaisuuksille. Standardissa  
määritellään raja-arvot pien-, keski- sekä suurjänniteverkoille, mutta tässä työssä käsitel-  
lään vain pienjänniteverkolle asetettuja raja-arvoja. Huomioitavaa on, että standardissa



SFS-EN 50160 käsitellään vain jännitteiden ominaisuuksia ja esimerkiksi virtojen aallonmuotoihin tai suuruuksiin ei oteta kantaa [41].

Suomessa jakeluverkon jännitteen jatkuville ominaisuuksille on standardissa määritelty seuraavaa:

- Yhteiskäyttöverkoissa verkon perustajuuden keskiarvon 10 sekunnin aikaväliltä mitattuna tulee olla 99,5 % vuodesta välillä  $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$  ja 100 % vuodesta välillä  $50 \text{ Hz} + 4 \%$  /  $- 6 \%$
- Normaaleissa käyttöolosuhteissa verkon jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvojen tulee olla 95 % ajasta välillä  $U_n \pm 10 \%$  ja 100 % ajasta välillä  $U_n + 10 \%$  /  $- 15 \%$ .

Standardissa SFS-EN 50160 määriteltyjä laatupoikkeamien raja-arvoja sekä ohjeistuksia käsitellään luvussa 2.2.

## 2.1.4 Verkkopalveluehdot VPE 2014

Verkkopalveluehdot ovat osa sähkökäyttäjän ja jakeluverkon haltijan välistä verkkosopimusta. Verkkopalveluehtoja sovelletaan jakeluverkkoon liittyvän sähkökäyttäjän verkkopalvelussa. Verkkopalvelulla tarkoitetaan kaikkea sitä toimintaa, joka jakeluverkon haltijan tulee omassa verkossaan tehdä sähkön jakelun toteuttamiseksi. Sähkön laadun osalta huomioitavaa on, että laatu määritellään sähkökäyttäjän sekä jakeluverkon haltijan välisessä liittämiskohdassa ja laadun määrittelyssä käytetään standardia SFS-EN 50160 [64].

Verkkopalveluehdoissa todetaan, että sähkökäyttäjän tulee noudattaa laitteidensa sekä laitteistojensa osalta verkkohäiriöitä koskevia standardeja. Mikäli käyttäjän laitteelle tai laitteistolle ei ole standardeja, niin suositellaan, että sähkökäyttäjä tekee ennakkoon selvityspyynnön sähkölaitteen liittämistä sähköverkkoon verkonhaltijalle. Selvityspyynnön tekeminen on suositeltavaa etenkin, mikäli kytkentävirta on suuri liittymän kokoon nähden, verkkoon kytkeytymisiä tapahtuu usein tai laitteisto aiheuttaa huomattavaa yliaaltovirtaa. Selvityspyynnö tulee tehdä myös, mikäli se aiheuttaa verkonhaltijalle erityistoimenpiteitä. [64]

Verkkopalveluehdoissa on myös mainittu tyypillisimpiä ennakkoselvityksiä vaativia laitteita, joita ovat muun muassa: generaattorit, energialaitokset, maalämpöpumput, kompressorit sekä hitsauslaitteet. Osaa edellä mainituista laitteista käsitellään myöhemmin alaluvussa 4.2. Sähkökäyttäjän on myös huolehdittava siitä, että mikäli hän lisää verkkoonsa suuria käynnistysvirtoja ottavia laitteita, niin virrat eivät saa ylittää liittymän kokoa. Liittymän kokoa suurempia virtoja ottavat laitteet on varustettava virran rajoituksella, jolla virrat saadaan rajoitettua liittymäkseen mukaisiksi. [64]

Mikäli sähkökäyttäjän sähkölaitteet aiheuttavat häiriötä käyttäjälle itselleen ja liittymiskohdan sähkön laadun on todettu täyttävän standardin SFS-EN 50160 vaatimukset, niin ongelman korjaaminen jää kyseisen käyttäjän vastuulle. Verkonhaltija voi häiriötilanteessa kuitenkin esittää arvionsa ja toimenpide-ehdotuksensa sähkökäyttäjälle. Mikäli sähkökäyttäjän laitteet tai laitteistot häiritsevät jakeluverkon toimintaa tai verkon muita käyttäjiä, niin häiriötä aiheuttavan käyttäjän velvollisuus on poistaa häiriö tai verkkoon sopimaton laite käytöstä. Verkonhaltijalla on oikeus vaatia sähkökäyttäjää rajoittamaan laitteen käyttö tietyille määräajoille tai kieltää laitteen käyttö kokonaan, mikäli sen käyttäminen ei ole mahdollista ilman häiriötä verkon muille käyttäjille. [58]

Mikäli jakeluverkkoyhtiön asiakas aiheuttaa yhtiön muille asiakkaille verkkopalveluehdoissa tarkoitetun sähköntoimituksen virheen, niin verkonhaltija on velvollinen korvaamaan virhetilanteen virheen kokeneille asiakkaille. Jakeluverkkoyhtiö ei kuitenkaan ole korvausvelvollinen häiriötä aiheuttaneelle asiakkaalle. Virheen aiheuttanut asiakas voi kuitenkin olla korvausvelvollinen jakeluverkkoyhtiötä kohtaan. Mikäli asiakas todetaan korvausvelvolliseksi, niin hän joutuu korvaamaan ne kulut, joita verkkoyhtiölle tuli virheen kokeneiden asiakkaiden korvausvaatimuksista. [58]

Jakeluverkon haltijalla on oikeus päästä liittyjän tiloissa oleville sähkölaitteistolle, joita ovat muun muassa sähkömittarit. Jakeluverkon haltijalla on myös oltava pääsy laitteistoille, joilla voidaan vaikuttaa jakeluverkon kytkentätilanteeseen. Mikäli laitteisto sijaitsee liittyjän tiloissa, tai liittyjän rajoittamalla alueella, niin liittyjällä on velvollisuus järjestää jakeluverkon haltijalle viivästykseton pääsy edellä mainittujen sähkölaitteistojen luokse. Jakeluverkon haltijalla on myös oikeus suorittaa verkkotoimintaan liittyvää tiedonsiirtoa, jossa siirretään muun muassa mittaustietoa. Tiedonsiirto voi tapahtua joko jakeluverkon haltijan omassa sähköverkossa tai toisen osapuolen sähköverkossa, jos tiedonsiirrosta on sopimuksissa sovittu. Tiedonsiirrosta ei saa aiheutua häiriötä tai kustannuksia liittyjälle. [58][52]

### **2.1.5 Sähkön tuotannon liittymisehdot TLE 2014**

Sähkön tuotannon liittymisehdoissa ei suoraan mainita raja-arvoja sähkön laatuun liittyen. Ehdoissa otetaan kuitenkin kantaa liittyjän ja jakeluverkon haltijan oikeuksiin sekä velvollisuuksiin ja sähkölaitteen ja -laitteiston ominaisuuksiin. Sähkön tuotannon liittymisehtoja sovelletaan tilanteissa, joissa nimellisjännitteeltään alle 24 kilovoltin sähköverkkoon liitetään tuotantolaitoksia, jotka voivat syöttää tuottamaansa sähköä sähköjakeluverkkoon [52].

Ennen laitteiston kytkemistä liittyjän on esitettävä jakeluverkon haltijalle selvitys siitä, että verkkoon liitettävä sähköntuotantolaitteisto täyttää sopimusehdoissa esitetyt tekniset vaatimukset ja ettei kytkemisestä aiheudu vaaraa tai häiriötä. Edellä mainittujen lisäksi liittyjän on myös suoritettava liitettävälle laitteistolle asianmukaiset koestukset sekä käyttöönottotarkastus. Laitteistoa ei saa kytkeä jakeluverkkoon ennen kuin edellä mainitut ja

muut sopimuksissa määritellyt vaiheet on suoritettu ja jakeluverkon haltija on antanut luvan sähköntuotantolaitteiston liittämiseksi. [52]

Jakeluverkonhaltija sekä jakeluverkkoon liittyjä ovat sähköturvallisuuslain nojalla velvollisia pitämään sähköntuotantolaitteistot sekä muut sähkölaitteistot lain edellyttämässä kunnossa. Sähköturvallisuuslain lisäksi liittyjä on velvollinen noudattamaan muita lakeja tai viranomais määräyksiä, joissa voidaan ottaa kantaa esimerkiksi laitteiston rakentamiseen, rakenteeseen, käyttöön tai muihin laitteiston ominaisuuksiin. Mikäli liittyjä ilmoittaa jakeluverkon haltijalle verkon viasta tai häiriöstä, joka kuuluu jakeluverkon haltijan korjausvelvollisuuden piiriin, niin jakeluverkon haltijalla on velvollisuus ryhtyä viipymättä toimiin ongelman poistamiseksi ja tilanteen normalisoimiseksi. Jakeluverkon haltijan puolestaan ilmoittaessa liittyjälle verkon viasta tai häiriöstä, joka kuuluu liittyjän korjausvelvollisuuden piiriin, on jakeluverkkoon liittyjällä velvollisuus ryhtyä viipymättä toimiin ongelman poistamiseksi ja tilanteen normalisoimiseksi. [52]

## 2.2 Jännitteen laatupoikkeamat

Sähkön laatupoikkeamat on jaettu useisiin eri kategorioihin. Kategoriat on määritelty laatupoikkeamiin liittyvien ilmiöiden sähkömagneettisten ominaisuuksien mukaan. Kategorisointi mahdollistaa useiden eri lähestymistapojen hyödyntämisen laatupoikkeaman ratkaisemisessa. Usein laatupoikkeamiin voi olla useita eri ratkaisuja ja samalla poikkeamalla voi olla useita eri aiheuttajia. Myös mittaus tapa valitaan laatupoikkeamien mukaan ja siksi ilmiön mahdollisimman tarkka tunnistaminen ja oikea luokittelu ovat tärkeitä vaiheita laatupoikkeamien selvityksessä. [14]

Tässä alaluvussa käsitellään yleisimpiä jännitteen laadun ominaisuuksia, jotka aiheuttavat pienjännitteiseen jakeluverkkoon laatupoikkeamia. Tässä luvussa esitettyjen standardin SFS-EN 50160 vaatimusten lisäksi laatupoikkeamille ja sähkön laadulle on myös asetettu kansallisia sekä kansainvälisiä vaatimuksia, joista on kerrottu luvussa 2.1. Sähkön laatu poikkeamille asetettujen vaatimusten tarkoituksena on turvata verkon toiminta ja laitteiden turvallinen käyttäminen.

Huomioitavaa on, että tässä alaluvussa ei käsitellä kaikkia standardissa esitettyjä laatu poikkeamia, vaan vain tämän työn osalta oleellisia. Työstä on rajattu pois muun muassa standardissa esitetyt lyhyet ja pitkät sähkönjakelun keskeytykset. Keskeytykset on rajattu pois, koska ne eivät ole oleellisia tämän työn tavoitteiden kannalta. Luvussa ei myöskään käsitellä aliharmonisia jännitteitä, eikä korkeataajuisia harmonisia ja epäharmonisia yliaaltojännitteitä, eli supraharmoisia yliaaltojännitteitä. Luvussa käsitellään harmoniset yliaaltojännitteet sekä väliharmoniset yliaaltojännitteet, joten aliharmonisten jännitteiden ja supraharmoisien yliaaltojännitteiden käsittely ei tuo oleellisilta osin lisä arvoa työn tavoitteiden saavuttamisessa.

## 2.2.1 Välkyntä ja nopeat jännitemuutokset

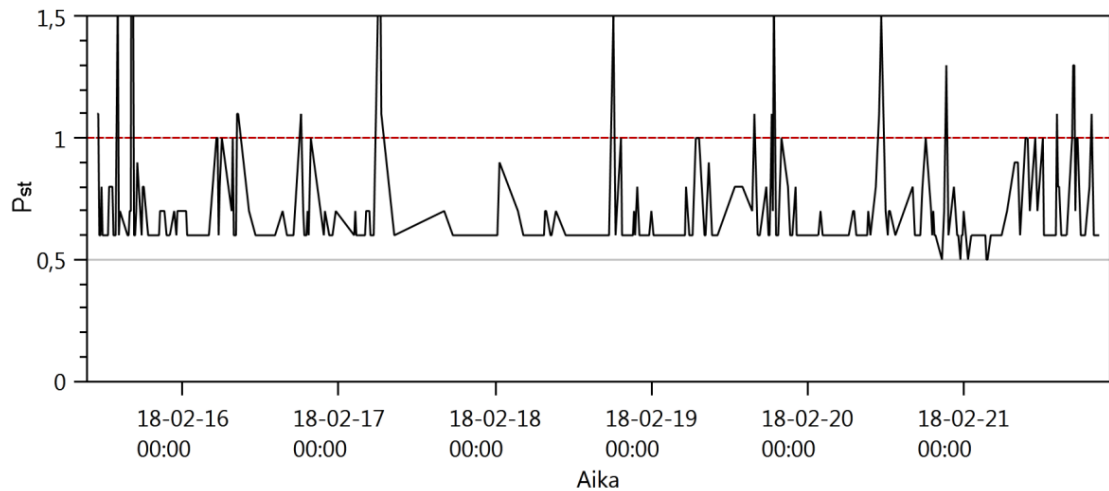
Välkyntällä tarkoitetaan verkossa olevia nopeita jännitemuutoksia ja siihen vaikuttavat jännitevaihtelun suuruus sekä jännitevaihtelun taajuus. Useimmiten välkyntä ilmenee valonlähteen luminanssin muutoksina ja sen tarkastelu suoritetaan mittaamalla lyhytaikaista häiritsevyysindeksiä ( $P_{st}$ ) 10 minuutin jaksoissa [53]. Välkyntää esiintyy niin perinteisillä hehkulamputilla, kuin myös energiansäästölamputilla. Hehkulamputilla välkyntä aiheutuu jännitteen tehollisarvon muutoksista ja energiansäästölamputilla välkyntä aiheutuu jännitteen huippuarvosta riippuvaisen tasajännitteen muutoksista. Välkyntän mittaaminen suoritetaan UIE-IEC mittaomenetelmällä, josta kerrotaan tarkemmin standardissa EN 61000-4-15. Standardin EN 61000-4-15 mittaomenetelmän on havaittu indikoivan melko huonosti energiansäästölamppuihin liittyvää välkyntää, koska energiansäästölamputilla yliaaltojen vaikutus on suuri verrattuna hehkulamputissa esiintyvään välkyntään. [20]

Välkyntä luokitellaan ne nopeat jännitemuutokset, jotka ovat alle 10 %:n muutoksia verkon nimellisjännitteeseen nähden. Mitatun lyhytaikaisen häiritsevyysindeksin arvon avulla lasketaan arvo pitkäaikaiselle häiritsevyysindeksille ( $P_{lt}$ ) [50]. Pitkäaikaisen häiritsevyysindeksin  $P_{lt}$ :n laskennassa käytetään kahtatoista lyhytaikaisen häiritsevyysindeksin  $P_{st}$ :n arvoa, jotka on mitattu kahden tunnin jaksoissa.  $P_{lt}$  arvon laskenta suoritetaan kaavalla

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}, \quad (1)$$

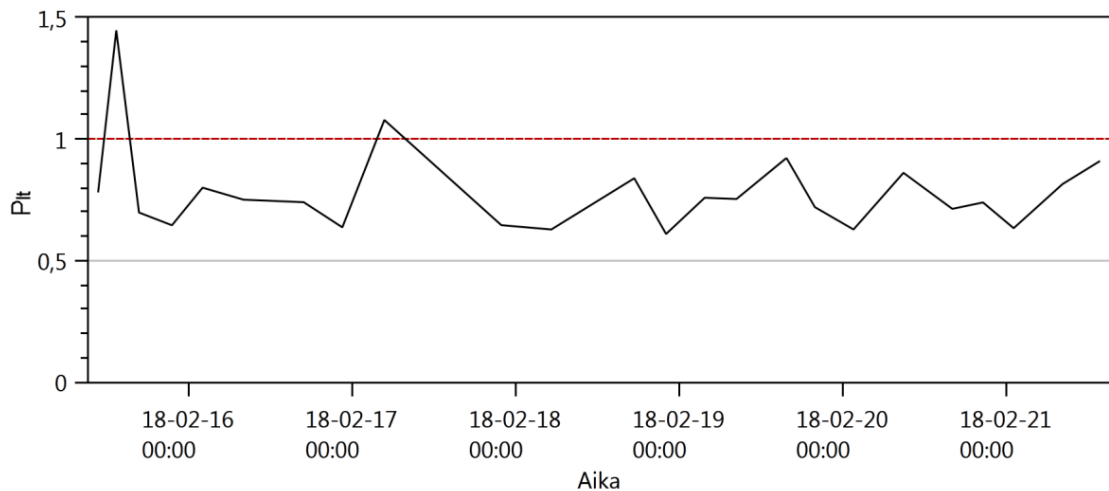
jossa  $P_{st}$ :llä tarkoitetaan kymmenen minuutin mittausjaksoissa mitattuja lyhytaikaisen häiritsevyysindeksin arvoja. Standardissa SFS-EN 50160 on annettu suoritusarvo  $P_{st}$ :n arvoista laskentatuloksena saatavalle  $P_{lt}$ :n arvolla, jonka suositellaan olevan 95 % ajasta pienempi tai yhtä suuri kuin yksi. [41]

Yleisimmin välkyntää aiheuttavat joko sähkökäyttäjien nopeat kuormitusmuutokset tai keskijännitteisen jakeluverkon vikatilanteet. Sähkökäyttäjistä aiheutuvassa välkyntässä suurimmat vaikuttavat tekijät ovat liittymispistettä syöttävän jakeluverkon vahvuus sekä käyttäjän kuormitusmuutosten suuruus. Yleisimpiä suuria ja nopeita kuormitusmuutoksia aiheuttavia laitteita ovat muun muassa oikosulkumottoreiden käynnistys, kompressorikäytöt sekä hitsaaminen [50]. Kuvassa 1 on esitettyä laatumitatun sähkökäyttöpaikan välkyntän lyhytaikaisen häiritsevyysindeksin arvo viikon mittausjakson aikana. Kuvassa näkyvät välkyntäarvon kohoumat aiheutuivat sähkökäyttäjän suurista käynnistysvirtoja ottavasta laitteesta.



**Kuva 1.** Välkynnän lyhytaikainen häiritsevyyssindeksi.

Kuvassa 1 esitetyille välkynnän lyhytaikaisen häiritsevyyssindeksin eli  $P_{st}$ :n arvoille ei ole standardissa SFS-EN 50160 säädettyjä raja-arvoja, vaan niiden pohjalta lasketaan arvo välkynnän pitkäaikaiselle häiritsevyyssindeksille kaavassa 1 esitetyllä tavalla. Kuvassa 2 on esitettyä välkynnän pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin arvot, jotka on laskettu kuvassa 1 esitettyjen arvojen pohjalta.



**Kuva 2.** Välkynnän pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi.

Verkossa esiintyvien nopeiden jännitemuutosten, eli välkynnän yleisimpänä seurauksena on ihmissilmällä havaittavissa oleva muutos valojen luminanssissa. Välkynnän häiritsevyyys on subjektiivista ja siihen vaikuttavat välkynnän kesto sekä aiheuttaja. Muutos valojen luminanssissa voi aiheuttaa ihmiselle jopa migreenioireita. Valaisintyyppistä riippuen runsas valojen välkyntä voi myös vaikuttaa valaisinten elinikään. Muiden sähkölaitteiden- ja laitteistojen kuin valaisimien reagointi välkyntään riippuu suuresti laitteiden välkyntäherkkyydestä. [14]

Standardissa SFS-EN 61000-4-30 on erikseen määritelty myös nopea jännitetason muutos RVC (rapid voltage change). Nopeilla jännitetason muutoksilla tarkoitetaan jännitteen

tehollisarvon nopeaa muutosta, joka tapahtuu kahden vakaan tilan välillä. Nopeissa jännitetason muutoksissa muutoksen suuruus ei kuitenkaan ylitä jännitekuoppien tai jännitteen nousun raja-arvoja. Mittalaiteluokasta riippuen nopeita jännitetason muutoksia arvioidaan 50 Hz:n verkossa joko seuraamalla jännitetasoa sadalta perättäiseltä puolijaksolta tai viideltäkymmeneltä jaksolta ja tämän mittaussarjan keskiarvoa verrataan tuleviin sarjoihin. Muutoksen raja-arvo määritellään seurantakohteen mukaan ja tyypillisesti arvo valitaan 1 – 6 % väliltä. Nopean jännitetason muutoksen arvioinnissa asetetaan myös tyypillisesti hystereesiraja, joka on usein noin 50 % asetetusta raja-arvosta. [42]

## 2.2.2 Jännitekuopat

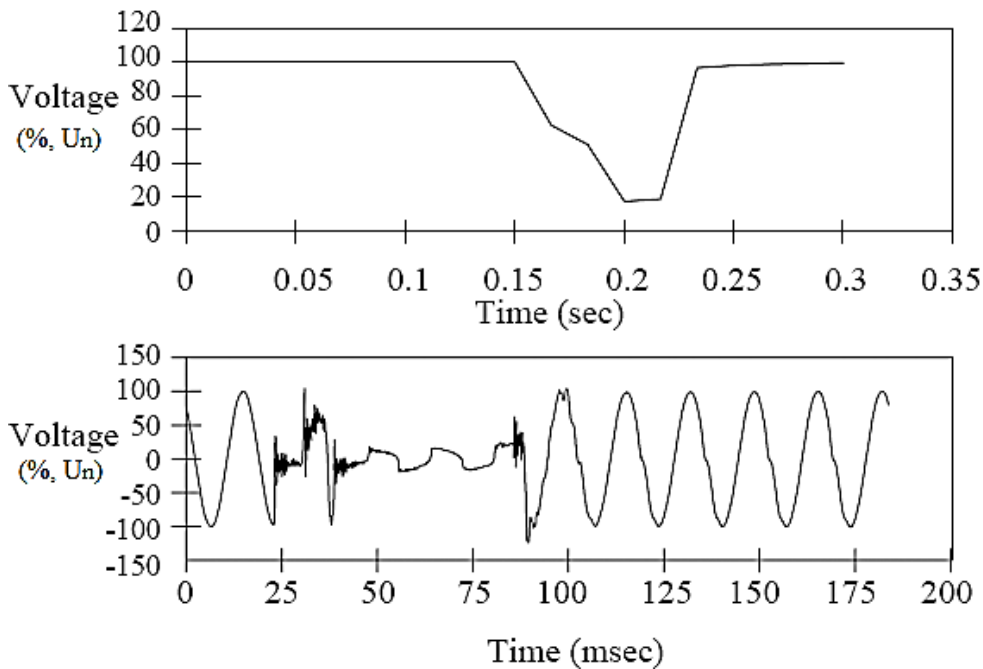
Standardissa SFS-EN 50160 jännitekuopalla tarkoitetaan sähköjakeluverkon jakelujännitteen tehollisarvon hetkellistä putoamista jännitekuopan havahtumisjännitteen alapuolelle. Standardissa havahtumisjännitteen arvoksi on määritelty 90 % jakeluverkon nimellisjännitteestä. Jännitekuopan alkamishetki on, kun vähintään yhden vaiheen jännite putoaa alle havahtumisjännitteen ja loppumishetki on silloin, kun kaikkien vaiheiden jännite nousee takaisin havahtumisjännitteen tasolle. Kuopan kesto voi vaihdella kymmenen millisekunnin ja yhden minuutin välillä. Standardissa SFS-EN 50160 ei ole annettu vaatimuksia pienjänniteverkossa esiintyvien jännitekuoppien määrälle tai suuruudelle. [41]

Yleisimpiä jännitekuoppien aiheuttajia ovat suurten hetkellisten virtojen aiheuttamat jännitehäviöt jakelu- tai siirtoverkoissa sekä jännitehäviöt muuntajien impedansseissa. Tyypillisesti kuopat yhdistetään sähköverkon vikoihin, mutta myös suurten kuormien kytkeminen tai suurten moottoreiden käynnistäminen voi ilmentyä jännitekuoppina [14]. Arvaamattoman luonteensa ja vaihtelevien esiintymispaikkojen sekä aikojen takia jännitekuoppien esiintymisen ennustaminen on erittäin haastavaa. Jännitekuoppien seurantaa parannetaan jatkuvasti, mutta vieläkin täysin kattavaa aineistoa jännitekuoppien esiintymisestä esimerkiksi Euroopan sähköverkoissa ei ole saatavilla. [41]

Myös jännitekuoppien mittauksiin liittyy epävarmuustekijöitä, jotka painottuvat etenkin lyhyisiin jännitehäiriöihin. Mittaustulosten epävarmuustekijöiden osalta tarkempaa tietoa löytyy standardista SFS-EN 61000-4-30 [42]. Jännitekuoppien odottamattoman ja satunnaisen luonteen takia niiden määrille ei ole annettu tarkkoja raja-arvoja. Jännitekuoppien määrän on havaittu vaihtelevan suuresti sähköverkon rakenteen sekä kuormitustilanteen mukaan [41].

Jakeluverkossa yksi yleinen jännitekuoppien aiheuttaja on keskijänniteverkossa tapahtuva maasulku. Kuvassa 3 on esitettyä yksivaiheisen maasulku, joka on poistunut verkosta maasulkusuojauksen toimittua. Kuvan 3 kuvaajissa on esitetty jännitekuopan vaikutus jakeluverkon jännitteeseen. Kuvan 3 alempi kuvaaja esittää hetkellistä jännitettä ja ylempi kuvaaja esittää hetkellisen jännitteen tehollisarvoa. Huomaa myös kuvassa olevien kuvaajien eri aika-asteikot. Tyypillinen maasulkusuojauksen toiminta-aika vaihtelee kolmesta jaksosta 30 jaksoon riippuen maasulusta aiheutuneen vikavirran suuruudesta ja

suojausten tyypistä sekä asettelusta. Kuvassa 3 esitetty jännitekuoppa on tyypillistä jakeluverkossa esiintyvää jännitekuoppaa syvempi, sillä valtaosa jännitekuopista on suuruudeltaan alle 60 % [57].



**Kuva 3.** Jännitekuoppa, joka on aiheutunut yksivaiheisesta maasulusta. Perustuu lähteeseen [14].

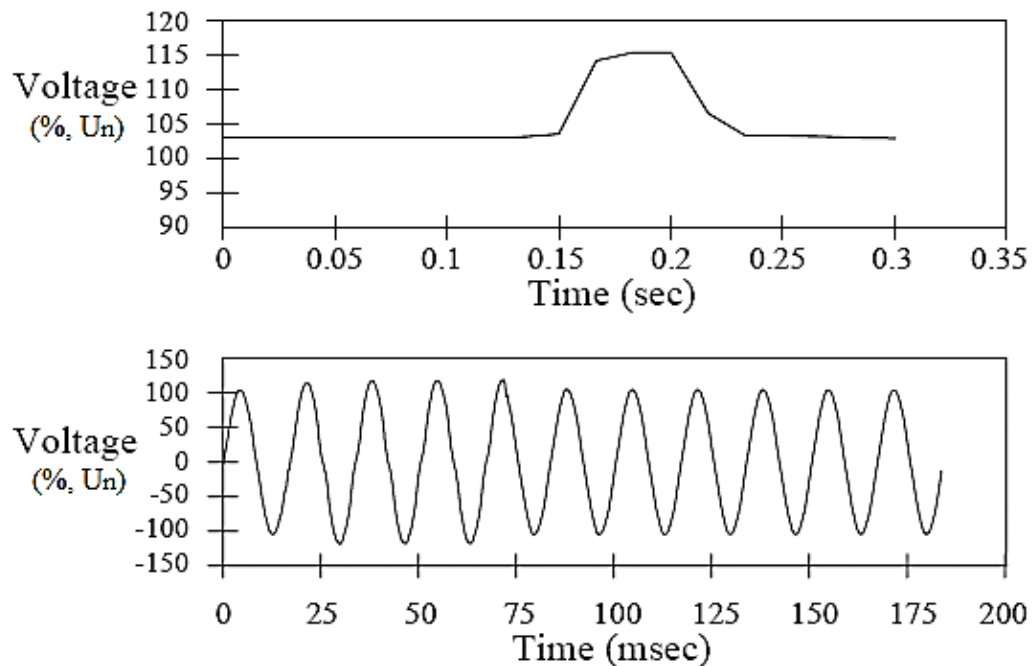
Jännitekuopat aiheuttavat usein ongelmia etenkin teollisuuden prosesseissa, joissa vikasensorit tai hätä-seis virtapiirit havaitsevat ongelman ja alkavat ajaa prosessia alas. Prosessien ongelmaan on kuitenkin kehitetty useita eri ratkaisuja, joista yleisin on akustolla turvatut vikasensorit sekä hätä-seis virtapiirit. Tämä on vähentänyt kuoppien aiheuttamia ongelmia, mutta siitä huolimatta moottorikäytöissä voidaan havaita nopeita nopeuden muutoksia ja näkyvänä ilmiönä voidaan havaita valojen välähtäminen [14]. Myös pienemmät sähkönkäyttöpaikat voivat havaita jännitekuoppien vaikutuksen muun muassa valojen välähtelynä tai herkkien sähkölaitteiden häiriöinä. Sähkökäyttäjät voivat suojata herkkiä sähkölaitteitaan jännitekuoppien aiheuttamilta ongelmilta muun muassa akustoja hyödyntävien UPS-laitteistojen avulla.

### 2.2.3 Jännitteen nousu

Tilapäisellä käyttötaajuisella ylijännitteellä tarkoitetaan jakeluverkon tehollisarvon hetkellistä nousua havahtumisjännitteen yläpuolelle. Standardissa SFS-EN 50160 havahtumisjännitteeksi on määritelty 110 % vertailujännitteestä. Jännitteen nousu voidaan havaita joko jännitteisten vaiheiden välillä tai jännitteisten vaiheiden ja maan välillä. Jännitteen nousu lasketaan alkaneeksi, kun vähintään yhden vaiheen jännitteen tehollisarvo nousee jakeluverkossa yli jännitteen nousun havahtumisjännitteen arvon ja jännitteen

nousu päättyy, kun kaikkien vaiheiden jännitteiden tehollisarvot laskevat takaisin havah-tumisjännitteen arvoon. Standardissa SFS-EN 50160 jännitteen nousun kestoajaksi on määritelty aikaväli kymmenestä millisekunnista yhteen minuuttiin. Standardissa SFS-EN 50160 ei ole määritelty jännitteen nousulle tarkempia vaatimuksia, kuin edellä mainitut jakelujännitteen 10 minuutin keskiarvot. Jännitteen nousulle on kuitenkin esitetty vertai-luarvoja standardissa EN 61000-2-2. [41]

Jännitteen nousu aiheutuu usein sähköverkon vikatilanteista. Jännitteen nousu ei kuiten-kaan ole läheskään niin yleistä, kuin edellä esitettyjen jännitekuoppien esiintyminen. Yleisimpiä jännitteen nousun aiheuttajia ovat yksivaiheiset viat, jotka aiheuttavat jännit-teen nousua vikaantumattomille vaiheille. Muita mahdollisia jännitteen nousun aiheutta-jia ovat muun muassa suuret vinokuormitukset, suurten kuormien irrottaminen verkosta sekä suurten kondensaattorien kytkeminen verkkoon [14]. Kuvassa 4 on esitettyä yksi-vaiheisesta maasulusta aiheutunut jännitteen nousu. Kuvassa 4 alempi kuvaaja esittää het-kellistä jännitettä ja ylempi kuvaaja esittää hetkellisen jännitteen tehollisarvoa. Kuvasta 4 kannattaa huomioida, että kuvaajissa on eri aika-asteikot ja että kuvaajien alkamis- ja päättymisajankohdat eivät täysin vastaa toisiaan.



**Kuva 4.** Yksivaiheisesta maasulusta aiheutunut jännitteen nousu. Perustuu lähteeseen [14].

Sähköverkon laitteet on suunniteltu tietyille jännitetasolle ja jännitteen noustessa kyseisen tason yli laitteen komponenttien toiminta voi heikentyä ja laitteen elinikä saattaa lyhen-tyä. Hetkellinen jännitteiden nousu jakeluverkon suojareleilla voi aiheuttaa suojareleille vikatiljoja, joissa ne eivät toimi toivotulla tavalla. Kondensaattoreille jännitteiden nousu saattaa aiheuttaa kondensaattorien paisumista ja vikaantumista. Valaisintyyppistä riippuen jännitteen nousu voi olla myös havaittavissa valojen kirkastumisena. Jännitteen nousun

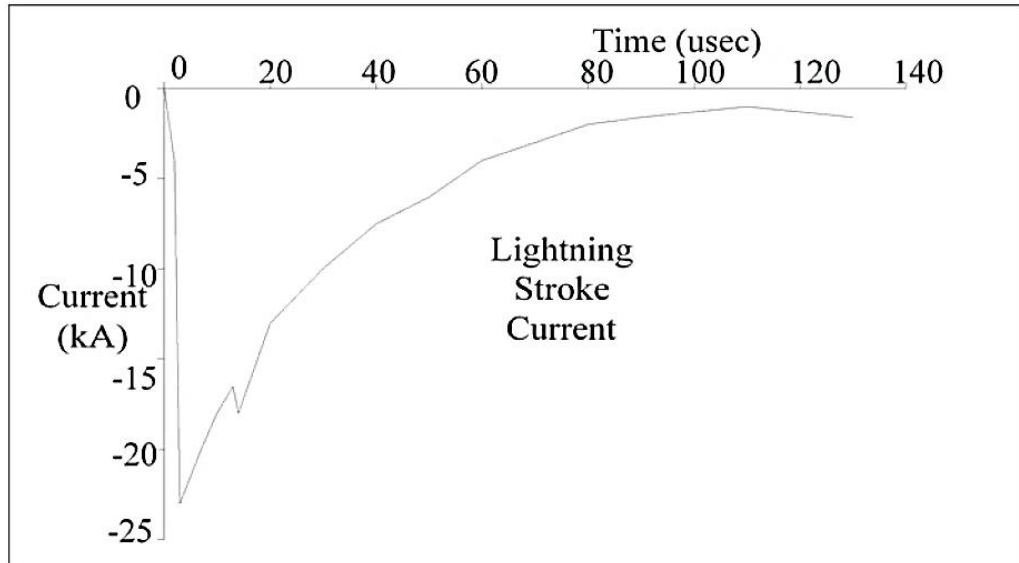


aiheuttamiin seurauksiin vaikuttaa suurelta osalta nousun suuruus, kesto ja nousujen määrä. Jännitteiden noustessa elektroniikkalaitteet ovat usein herkimpiä laitteita rikkoutumaan. Muuntajat, kaapelit ja moottorit eivät ole niin herkkiä jännitteen nousulle, mutta niiden elinikä saattaa lyhentyä jännitteen nousun seurauksena. [14]

## 2.2.4 Transienttiylijännitteet

Tyypillisesti liittymiskohdan transienttiylijännitteet ovat joko indusoituneita ylijännitteitä tai verkossa suoritetuista kytkentätoimenpiteistä aiheutuneita ylijännitteitä. Transienttien nousuaika vaihtelee tapauskohtaisesti alle mikrosekunnista millisekunteihin. Yleisin indusoituneiden ylijännitteiden aiheuttaja on salamointi. Salaman aiheuttamalle transienttiylijännitteelle tyypillistä on suurempi amplitudi sekä pienempi energiasisältö kuin kytkentätoimenpiteistä aiheutuneilla kytkentäylijännitteillä. Kytkentätoimenpiteiden transienttiylijännitteillä on suuri energiasisältö verrattuna salamaan, koska kytkentäjännitteiden kesto-aika on pidempi. Salamoinnin aiheuttama transienttiylijännite myös vaimenee kytkentäylijännitteitä nopeammin, koska muun muassa verkon reaktanssit ja häviöllisyys suurilla taajuuksilla vaikuttaa nopeammin suurilla taajuuksilla sisältäviin transienttiylijännitteisiin. Huomioitavaa on myös se, että suurten amplitudi- ja suurten nousuaikojen yhtäaikaisuus on epätodennäköistä. [41][14]

Mittauksissa transienttiylijännitteet ilmenevät usein jakeluverkon normaalista aallonmuodosta poikkeavina korkeataajuisina pulssimaisina häiriöinä. Kuvassa 5 on esitetty tyypillinen salamasta aiheutuneen transienttivirran vaikutus sähköjakeluverkossa. Indusoituneisiin ylijännitteisiin liittyvän korkean amplitudin seurauksena transienttiylijännitteen muoto voi muuttua nopeasti ja ilmiön ominaisuudet saattavat näkyä usealla eri tavalla mittauspaikan sijainnista riippuen. Tyypillisesti salaman aiheuttamat transienttivirrat eivät etene pitkälle sähköverkossa, vaan ne vaimenevat nopeasti. [14]



**Kuva 5.** Salamann aiheuttama transienttivirta [14].

Transienttiylijännitteet jaotellaan tyypillisesti joko transientin aiheuttajan tai transienttien aallonmuodon mukaan. Transienttien aiheuttajan mukaan tehtävä jaottelu tehdään tyypillisesti kolmella kategorialla, joita ovat salamoinnin aiheuttamat transientit, normaalit kytkentätransientit sekä normaaleista poikkeavat kytkentätransientit. Salamoinnin aiheuttamien transienttien aallonmuodolle on tyypillistä erittäin nopea nousu ja hieman hitaampi lasku. Normaalit kytkentätransientit voivat aiheutua esimerkiksi verkkoon kytkettävistä kondensaattoreista. Normaaleista poikkeavat kytkentätransientit ovat jokseenkin harvinaisia ja ne aiheutuvat tyypillisesti verkkoon varastoituneen energian purkautumisesta. Poikkeavat kytkentätransientit voivat aiheutua esimerkiksi verkkokatkaisijoiden avaamisen yhteydessä tapahtuvista jälleensyttymisistä [3].

Salamoinnin aiheuttamat suuren amplitudin transienttiylijännitteet voivat aiheuttaa sähkölaitteiden eristeiden heikentymistä tai pettämistä. Suuren amplitudin ja nopean nousujan transientit vaikuttavat tyypillisesti muun muassa muuntajiin, kondensaattoreihin ja erilaisiin pyöriviin koneisiin. Mikäli transientit läpäisevät laitteen virtalähteen tai sähköverkon muuntajan, niin myös laitteiden puolijohdepiirit sekä muuntamoiden toisioon kytketyt laitteistot voivat vaurioitua [14]. Pienjänniteverkon puolella transientit aiheuttavat usein ongelmia etenkin tietokoneiden käyttämisessä, sillä transientit voivat muun muassa aiheuttaa tietojen tuhoutumista ja laitteiden vahingoittumista [57].

Standardissa SFS-EN 50160 ei suoraan määritellä transienttiylijännitteille raja-arvoja, mutta standardissa mainitaan, että sähkökäyttäjän sähkölaitteiden tulisi kestää valtaosa transienttiylijännitteistä, kun laitteet ovat suunniteltu standardin EN 60664-1 mukaisiksi. [41]

## 2.2.5 Harmoniset yliaaltojännitteet

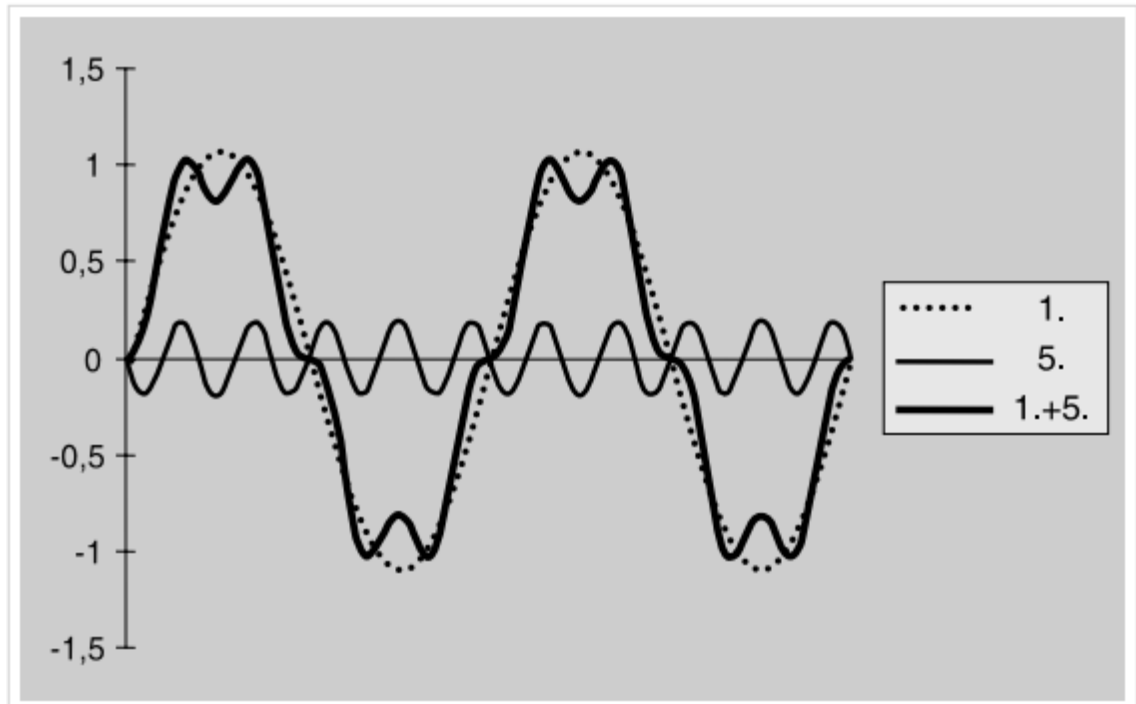
Sähköjako- ja jakeluverkon yliaaltojännitteet voidaan jakaa harmonisiin ja epäharmonisiin yliaaltojännitteisiin. Harmonisilla ylijännitteillä tarkoitetaan sinimuotoisia jännitteitä, joiden taajuu- det ovat jakeluverkon normaalitaajuuden 50 Hz:n kokonaislukukerrannaisia. Harmonisia yliaaltoja kuvataan usein kokonaissärökertoimella, josta käytetään lyhennettä THD (Total Harmonic Distortion). Kokonaissärökertoimessa huomioidaan kaikki harmoniset yliaallot järjestyslukuun 40 asti. [41]

Harmoninen kokonaissärökerroin, eli THD lasketaan kaavalla

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}, \quad (2)$$

jossa  $THD$  on harmoninen kokonaissärö,  $h$  on harmonisen yliaallon järjestysluku ja  $U_h$  on yksittäisen harmonisen yliaallon suhteellinen amplitudi perustaajuiseen jännitteeseen  $u_1$  verrattuna.

Kuvassa 6 on esitettyä normaalitaajuuden jakelujännitteen (kuvaaja 1.) sekä viidennen harmonisen yliaallon (kuvaaja 5.) aaltomuodot erillisinä kuvaajina ja kuvaaja, jossa niiden aaltomuodot on yhdistetty (kuvaaja 1.+5.). Yhdistetystä kuvaajasta on havaittavissa yliaaltojännitteiden aiheuttamaa normaalitaajuuden jakelujännitteen aallonmuodon vääristymistä. Tätä aaltomuodon vääristymistä kutsutaan siniaallon säröytymiseksi. Valtaosa jakeluverkon harmonisista häiriöistä syntyy sähkölaitteiden epälineaarisista kuormituk- sista [14].



**Kuva 6.** Viidennen harmonisen yliaallon vaikutus perustaajuiseen sinimuotoiseen virtaan [57].

Tehoelektroniikka aiheuttaa valtaosan sähköjakaiverkon harmonisista häiriöistä. Osaa häiriöitä aiheuttavista laitteista voidaan kuvata virtalähteinä, jotka syöttävät verkkoon harmonisia yliaaltovirtoja. Näiden yliaaltovirtojen seurauksena jännitteen aallonmuoto vääristyy, koska virrat aiheuttavat epälineaarisia jännitteenalennuksia järjestelmien impedansseissa. Harmoniset häiriöt ovat kasvava huolenaihe sähköverkoissa, koska tehoelektroniikkalaitteet ja niiden käyttökohteet yleistyvät jatkuvasti. [14]

Sähkökäyttäjien kuormista aiheutuvat harmoniset virrat näkyvät jakeluverkon puolella jännitteiden aallonmuodossa. Jännitteiden sekä virtojen aallonmuodon vääristyminen voi aiheuttaa jakeluverkon muuntajien sekä johtimien ylikuumentumista ja jopa ennen aikaista rikkoutumista. Harmoniset yliaaltojännitteet voivat aiheuttaa laatuongelmia myös muille samaan verkkoon kytketyille sähkökäyttäjille. Harmoniset yliaaltojännitteet aiheuttavat usein tehoelektroniikkalaitteille vikatiloja sekä suojausten reagointia. [14]

Standardissa SFS-EN 50160 määritellään, että normaaleissa käyttöolosuhteissa viikon mittaisen mittausjakson aikana jokaisen harmonisen yliaaltojännitteen kymmenen minuutin tehollisarvon tulee olla 95 % ajasta pienempi tai yhtä suuri, kuin taulukossa 1 annetut raja-arvot. Taulukossa 1 esitetyt raja-arvot on kuvattu prosentteina liittymiskohdan perustaajuisesta jännitteestä. [41]

**Taulukko 1.** Järjestyslukuun 25 asti määritetyt prosentuaaliset raja-arvot liittymiskohdassa esiintyville harmonisille yliaaltojännitteille [41].

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite ( $U_h$ )	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite ( $U_h$ )	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite ( $U_h$ )
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

HUOM. Järjestysluvultaan yli 25 harmonisille ei anneta arvoja, koska ne ovat tavallisesti pieniä ja hyvin arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi.

Edellä mainitun lisäksi standardissa on myös määritelty, että liittymiskohdan jakelujännitteen kokonaissärökertoimen (THD) tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %. Kokonaissärökertoimessa on huomioitu kaikki harmoniset yliaallot aina järjestysluvultaan neljäänkymmeneen asti. [41]

## 2.2.6 Väliharmoniset yliaaltojännitteet

Väliharmoniset yliaaltojännitteet kuuluvat epäharmonisiin yliaaltojännitteisiin. Väliharmoniset eivät ole harmonisten yliaaltojännitteiden tapaan kokonaisluvulla kerrannaisia jakeluverkon normaalitaajuuteen nähden, vaan ne ovat harmonisten yliaaltojen välissä. Väliharmonisten esiintyminen vaihtelee tapauskohtaisesti ja ne voivat ilmetä joko erillisillä taajuuksilla, tai suuremmalla kaistanleveydellä. Väliharmonisten pääasiallisia aiheuttajia ovat muun muassa taajuusmuuttajat, erilaiset invertterikäytöt, virtalähteet, tietokoneet sekä sähköhitsauslaitteet. Väliharmoniset yliaallot aiheuttavat sähköjakeluverkkoon muun muassa välkyntää, induktiolla toimivien sähkökoneiden lämpötilojen nousumista, värähtelyä sähkökoneiden vääntömomenttiin ja muuttuvanopeudellisten moottori-käyttöjen sekä diodisiltasuuntaajien kondensaattorien häviöiden kasvamista. [11, s. 1-6]

Väliharmoniset yliaallot ovat sähköjakeluverkossa yleistynyt ongelma. Väliharmonisten yliaaltojen yleistymiseen vaikuttaa muun muassa se, että tehoelektroniikkalaitteiden valmistuksessa panostetaan laitteiden pienempään fyysiseen kokoon, pienempiin häviöihin sekä alempiin kustannuksiin. Edellä mainittuihin tavoitteisiin pyritään muun muassa käyttämällä korkeaa kytkentätaajuutta, jonka synnyttämiä harmonisia yliaaltoja suodatettaessa syntyy usein väliharmonisia sekä muita epäharmonisia yliaaltoja. [21]

Standardissa SFS-EN 50160 ei suoraan määritellä epäharmonisille yliaaltojännitteille vaatimuksia tai raja-arvoja, mutta niiden aiheuttama välkyntä huomioidaan välkyntän

häiritsevyyssindekseissä [41]. Standardiin SFS-EN 50160 on kuitenkin mahdollisesti tulossa päivitys epäharmonisten yliaaltojen osalta. Päivityksen jälkeen epäharmoniset yliaallot huomioitaisiin kaikille yliaalloille laskettavassa kokonaissärökertoimessa (TD), joka lasketaan 50 harmoniseen yliaaltoon asti [21].

### 2.2.7 Jännitteen epäsymmetria

Jännitteen epäsymmetriaa esiintyy monivaihejärjestelmissä. Normaalitylanteessa jakeluverkon vaihejännitteet ovat yhtä suuria ja niiden väliset kulmat ovat 120 astetta. Jännite-epäsymmetrialla tarkoitetaan tilannetta, jossa perustaajujen vaihejännitteiden tehollisarvot tai niiden väliset kulmat eivät ole yhtä suuret. Jännitteen epäsymmetria ilmoitetaan tyypillisesti verkon nolla- ja vastakomponenttien suhteina myötäkomponenttiin nähden [41][17].

Jännitteen epäsymmetriasta aiheutuu verkkoon usein eroja vaihejännitteissä, vaihekulmien eroavaisuuksia sekä yliaaltojännitteiden epätasaista jakautumista vaihejännitteiden välillä. Jännite-epäsymmetrian suurimpia aiheuttajia ovat käyttöpaikan yksivaiheisten kuormitusten epätasainen jakautuminen vaiheiden välillä. Tyypillisimpiä ongelmakohtia ovat taajamien ulkopuoliset alueet, joilla siirtoyhteydet ovat pitkiä ja verkossa esiintyy suuria hetkellisiä yksivaiheisia kuormituksia [17]. Jännite-epäsymmetriaongelmien perinteisiä aiheuttajia ovat olleet muun muassa rakennevirheet tai ongelmat muuntajissa ja niiden kytkennöissä, epätasaiset kuormitukset verkossa sekä kondensaattorien palaneet etusulakkeet [24].

Jännitteen epäsymmetria voi aiheuttaa laitteille ja sähköverkoille epäsuotuisia ilmiöitä. Epäsymmetrisille verkoille tyypillistä on häviöiden lisääntyminen ja komponenttien lämpeneminen. Symmetrinen verkko pystyy käsittelemään nopeasti muuttuvia kuormituksia paremmin ja tehokkaammin, kuin epäsymmetrinen verkko. Laitteista ja sähkökoneista epäsymmetrialle herkimpiä laitteita ovat muun muassa induktiomootorit sekä tehoelektroniikkaan pohjautuvat muuntimet. Induktio-mootoreilla epäsymmetrian on havaittu aiheuttavan muun muassa lämpenemistä, väännön sekä nopeuden heikkenemistä ja moottorin äänen kasvamista. [17]

Standardissa SFS-EN 50160 annetaan raja-arvoja jakeluverkon jakelujännitteen vastakomponentille. Standardissa määritellään, että normaaleissa käyttöolosuhteissa jokaisen viikon mittaisen mittausjakson aikana jakeluverkon jakelujännitteen perustaajuisen vastakomponentin kymmenen minuutin teholliskeskisarvon tulee olla 95 prosenttia ajasta välillä 0 – 2 prosenttia perustaajuisesta myötäkomponentista. Alueilla, joilla osa liittymistä on yksi- tai kaksivaiheisia, sallitaan jännitteen epäsymmetriaa 3 prosenttiin asti. [41]

### 3. PIENJÄNNITEVERKON SÄHKÖN LAADUN VARMISTUS

Tässä luvussa käsitellään pienjänniteverkon sähkön laadun nykytilaa ja laadun varmistukseen vaikuttavia tekijöitä. Sähkön laadun varmistukseen vaikuttavista tekijöistä luvussa käsitellään verkon rakennetta, sähkömittareita sekä verkkoyhtiöillä käytössä olevia tietojärjestelmiä. Luvussa käsitellään myös sitä, miten sähkökäyttäjien jatkuvasti muuttuva kulutuskäytös ja uudenlaisten sähkölaitteiden ja -laitteistojen yleistyminen vaikuttavat sähkön laadun varmistukseen.

Pienjänniteverkon laadun varmistukselle on useita eri syitä ja syyt vaihtelevat sähkökäyttäjän tarpeiden mukaan. Usein voidaan sanoa, että sähkön pienkäyttäjillä tärkeimpiä syitä laadun varmistukselle ovat hyvinvointiin sekä mukavuuteen liittyvät tekijät. Suuremmilla sähkökäyttäjillä vaikuttavat edellä mainittujen lisäksi myös taloudelliset tekijät. Taloudelliset tekijät ilmenevät siten, että prosessien kokemat laatuongelmat saattavat aiheuttaa viallisia tuotteita, prosessin keskeytymistä, laitteistovikoja tai jopa prosessin turvallisuuden heikentymistä. [14]

Sähkönjakeluverkon laadun varmistuksen kannalta jakeluverkonhaltijan on tärkeää seurata sähkön laatua ja tallentaa verkon toimintaan liittyvät havainnot sekä mittaustulokset mahdollista myöhempää tarkastelua varten. Myös sähkökäyttäjien olisi hyvä pitää mahdollisimman tarkkaa kirjaa kokemistaan ilmiöistä, jotta sähkön laadun varmistus onnistuisi tallenteita vertaamalla [14]. Jakeluverkkoyhtiöt myös panostavat kasvavassa määrin sähkönjakeluverkon automaatioon, asiakastietojärjestelmiin sekä palveluihin, jotka tuottavat asiakaskohtaista tietoa. Pyrkimyksenä on, että tieto olisi mahdollisimman ajantasaista kaikilla osapuolilla aina käyttökeskuksesta sähkön loppukäyttäjälle [8].

#### 3.1 Sähkön laadun nykytila

Suomessa valvontalaissa 590/2013 on määritetty Energiaviraston yleinen valvontatehtävä. Laissa on määritetty, että Energiavirasto valvoo muun muassa sähkömarkkinalain toteutumista. Sähkömarkkinalailla pyritään takaamaan sähkökäyttäjille sähkön kilpailukykyinen hinta sekä sähkön toimitusvarmuus. Vuonna 2013 sähkömarkkinalakia uudistettiin sähkökatkojen keston osalta. Sähkömarkkinalaissa on säädetty, että vuonna 2028 asemakaava-alueella ei saa olla yli kuuden tunnin sähkökatkoja ja että asemakaavan ulkopuolella ei saa olla yli 36 tunnin sähkökatkoja. [49]

Energiaviraston ohella myös Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (TUKES) toimii viranomaistahona osassa sähköverkon sähkön laatuasioista. Turvatekniikan keskuksen vas-

tuulla ovat etenkin sähköverkon yliaalloista aiheutuvat vahingot sekä haitat. Yliaaltotapauksissa TUKES käsittelee tapauksia sähköturvallisuuslain mukaisesti [66]. Energiaviraston tehtävänä on myös hyväksyä muun muassa verkkopalveluehdot, sähköntoimitusehdot sekä olla yhtenä osapuolena määriteltäessä sähköverkkoon liittymisen ehtoja [45]. Viranomaistahojen toiminta riippuu ongelman aiheuttajasta ja vakavuudesta. Viranomaisen voi joko antaa loppuasiakkaalle neuvontaa tai sitten viranomaisen voi ottaa asian käsittelyyn [37].

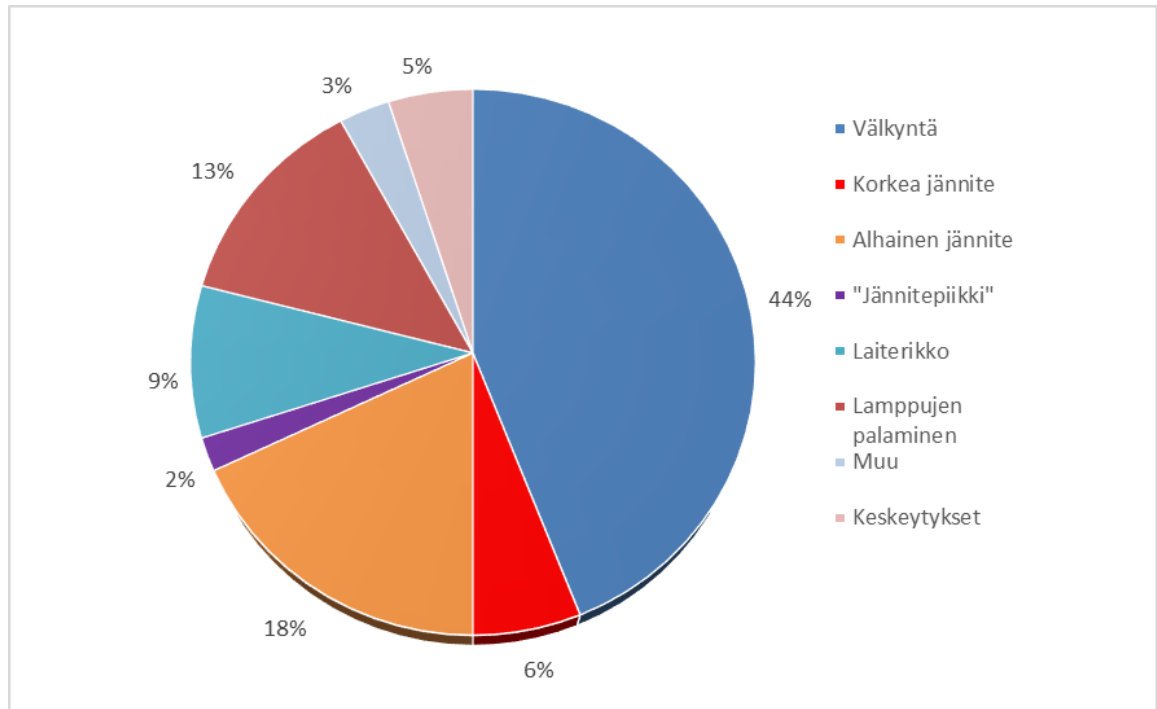
Suomessa sähkön laatu pyritään turvaamaan sähköverkon investointien, kunnossapidon sekä saneerausten avulla. Lisäksi Suomen sähkönjakeluyhtiöt panostavat älykkäisiin sähköverkkoihin verkostoautomaation sekä verkon mittausten avulla. Suuri osa Suomen sähkönjakeluyhtiöistä on viime vuosina panostanut jakeluverkkojensa maakaapelointiin. Jakeluverkkoyhtiöiden panostaminen maakaapelointiin on yleistynyt muun muassa sen takia, että edellä mainittu sähkömarkkinalain muutos tiukensi sähkönjakelun keskeytysten kestoajkojen vaatimuksia. [49]

Maakaapeloinnin on tutkittu pienentävän jakeluverkon vikaherkkyyttä sekä parantavan jakeluverkon sähkön laatua yleisesti. Maakaapeloitu verkko ei ole yhtä herkkää sääilmiöille, kuin perinteinen ilmajohtoverkko, mutta vikaantuessaan maakaapeliverkon keskimääräinen keskeytysaika on ilmajohtoverkkoa pidempi. Maakaapeliverkon vikojen havainnointia kehitetään kuitenkin jatkuvasti useiden eri tahojen toimesta. Yksi edellä mainituista tutkimuksista oli Vaasan yliopiston ja Lappeenrannan teknillisen yliopiston tekemä tutkimus Protect-DG, jossa tutkittiin muun muassa keskijänniteverkon yksivaiheisten maasulkujen vianpaikannusta. Protect-DG:ssä maasulkujen vianpaikannusta analysoitiin simuloimalla vikapaikkoja ja tutkimalla niiden paikannusta muun muassa häiriösignaalien, sensorimittauksien sekä virran vastakomponentin avulla. Tutkimuksessa todettiin, että yksi potentiaalisimmista menetelmistä maasulkujen paikantamiseksi on virran vastakomponenttiin perustuva mittaus. Virran vastakomponenttiin perustuvan mittauksen etuna on muun muassa sen kyky havaita vikapaikat sekä kompensoiduissa että maasta erotetuissa verkoissa ja se ettei se edellytä jännitemittausta [60].

Verkosta saatava tiedon määrä kasvaa jatkuvasti, johon osaltaan vaikuttavat kasvava maakaapeliverkko sekä siihen liittyvät verkostoautomaatoratkaisut. Verkostoautomaatio parantaa sähköverkkojen käytettävyyttä ja sähkön toimitusvarmuutta. Verkostoautomaatio myös mahdollistaa siirtymisen kohti entistä älykkäämpiä sähköverkoja. Verkostoautomaatiolla on havaittu olevan selviä hyötyjä muun muassa verkon vikojen ennakoimisessa, havainnoimisessa sekä tunnistamisessa. Verkostoautomaatiolla suoritettavista ohjauksista sekä mittauksista on hyötyä myös sähkön laadun varmistamisessa. Verkostoautomaation yleistymisellä on suuri vaikutus myös sähköverkon sähkön laadun seurannan kehittämisessä, kun tuotanto siirtyy entistä hajautetummaksi ja mikäli laajaa kysynnän joustoa tarvitsee toteuttaa verkossa. [34]



Sähkönjakeluverkon rakenteesta riippuen jopa 60 % verkossa esiintyvistä sähkön laatu-  
poikkeamista aiheutuu sääilmiöistä sekä odottamattomista tapahtumista [36]. Suomen  
sähkönjakeluverkon sähkön laadun tilanne on pääosin hyvä, sillä valtaosa sähkönjakelu-  
verkkoyhtiöiden saamista sähkön laatuun liittyvistä asiakasilmoituksista koskevat säh-  
könkäyttäjien kokema välkyntää. Sähkönkäyttäjien kokema välkyntä aiheutuu usein  
joko heidän käytössään olevien laitteiden aiheuttamista nopeista kuormitusmuutoksista  
tai keskijänniteverkon vikatilanteista. Kuvassa 7 on esitettyä Kymenlaakson Sähkö-  
verkko Oy:n verkkoalueen asiakkaiden tekemien sähkön laatuselvityspyyntöjen jakauma.



**Kuva 7.** Laatuselvityspyyntöjen yleisimmät syyt Kymenlaakson Sähköverkko Oy:ssä [47].

Välkyntäherkkiä verkkoja ovat etenkin taajamien ulkopuoliset ilmajohtoverkot, joissa  
pienjänniteverkon siirtomatkat voivat olla pitkiä ja verkko on mitoitettu vanhojen vaati-  
musten mukaisiksi. Aiemmat nykyisiä pienemmät jakeluverkon oikosulkuvirroille asetet-  
tut vaatimukset vaikuttavat jakeluverkon vanhojen osien välkyntäherkkyyteen. Esimer-  
kiksi ennen vuotta 1989 sähkölaitoksen jakeluverkolta vaadittiin taulukon 2 mukaisia oi-  
kosulkuvirtoja [54]. Taulukossa 2 kuluttaja-asennuksen oikosulkuvirran arvoilla tarkoi-  
tetaan oikosulkuvirtaa liittymän päävarokkeella. Taulukosta voi esimerkiksi laskea, että  
ennen vuotta 1989 25 A:n päävarokkeilla pienin vaadittu oikosulkuvirran arvo oli  
87,5 A.

**Taulukko 2.** Jakeluverkon ylivirtasuojaus ennen vuotta 1989 [54].

Ylivirtasuojaja		Oikosulkuvirta	
Laatu	Nimellisvirta $I_N$	Jakeluverkossa	Kuluttaja- asennuksessa
Sulake	$\leq 63$ A	$2,5 * I_N$	$3,5 * I_N$
Sulake	$> 63$ A	$3,0 * I_N$	$4,5 * I_N$
Johdonsuoja- katkaisija	kaikki	$2,5 * I_N$	$3,5 * I_N$

Edellä esitetyt vaatimukset eroavat etenkin liittymien päävarokkeiden oikosulkuvirtojen arvojen osalta tällä hetkellä vaadituista arvoista. Tällä hetkellä vaaditut liittymän päävarokeeseen mukaan määräytyvät oikosulkuvirtojen arvot on esitetty taulukossa 3. Sulakeilla toteutettavassa jakeluverkon ylivirtasuojauksessa riittää vielä tänäkin päivänä taulukossa 2 esitetyt arvot. Standardissa SFS 6000-8-801 liittymien oikosulkuvirralla on säädetty, että vähintään 25 A:n päävarokkeilla oikosulkuvirran tulee olla vähintään 250 A. Mikäli 250 A:n oikosulkuvirtaa ei kohtuullisesti saavuteta, niin myös 180 A:n oikosulkuvirta on hyväksyttävä. Mikäli oikosulkuvirta on alle 250 A, niin 250 A vastaava turvallisuustaso on saavutettava muilla toimenpiteillä [40]. Tarvittava turvallisuustaso voidaan saavuttaa esimerkiksi hyödyntämällä vikasuojauksessa vikavirtasuojia. Vikavirtasuojien avulla on mahdollista varmistaa syötön automaattisen poiskytkennän toteutuminen vaaditussa ajassa, vaikka liittymispisteen oikosulkuvirta olisikin alle 250 A tai jopa alle 180 A. Vikavirtasuojien käytössä on kuitenkin huomioitava, että niitä voidaan hyödyntää pääasiassa vain vikojen poiskytkentään ja oikosulkusuojaus on varmistettava erikseen [39].

Nykyinen vaatimus päävarokkeiden oikosulkuvirran minimiarvoksi on annettu, jotta tiettyjen johdonsuojakatkaisijoiden hyödyntäminen olisi mahdollista [40]. Esimerkiksi 250 A:n oikosulkuvirta mahdollistaa mitoitusvirraltaan 16 A:n C-tyyppin johdonsuojakatkaisijoiden hyödyntämisen. Mikäli oikosulkuvirta päävarokkeilla on alle 250 A, niin oikosulkuvirrasta riippuen vaadittavat suojausajat voidaan saavuttaa esimerkiksi gG-sulakeilla tai B-tyyppin johdonsuojakatkaisijoilla.

**Taulukko 3.** Voimassa olevat vaatimukset jakeluverkon liittymien päävarokkeiden oikosulkuvirroille [40].

Pääsulake	Oikosulkuvirta liittymän päävarokkeilla
A	min./ A
3x25	250
2x35	250
3x50	250
3x63	320
3x80	425
3x100	580
3x125	715
3x160	950
3x200	1250
3x250	1650

Pienjännitteisten jakeluverkkojen suunnittelussa arvioidaan käyttöpaikkojen sähkönkulutusta ja kulutuksen kehittymistä. Jakeluverkon suunnittelussa huomioidaan myös käyttöpaikkojen tehojen risteily (kuormitusten ajallinen vaihtelu). Ennen kuin jakeluverkossa ryhdyttiin hyödyntämään nykyistä tunnin mittaista taseselvitysjaksoa ja etäluettavia AMR-mittareita, niin pienjännitteisen jakeluverkon mitoitus pohjautui vahvasti kokemusperäisiin laskentamalleihin ja tehojen risteilyn tasauskertoimiin. Nykyään jakeluverkon mitoituksessa hyödynnetään myös AMR-mittaustietoja sekä laskutustietoja. On siis huomioitava, että jakeluverkon mitoituksessa oletetaan, etteivät kaikki sähkökäyttäjät ota liittymänsä maksimitehoa samalla hetkellä ja tämä saattaa aiheuttaa kulutustottumusten muuttuessa tarvetta jakeluverkon vahvistuksille.

Osaltaan välkynnän yleistymiseen vaikuttavat myös sähkönkäyttöpaikkojen muuttuvat sähkölaitteet ja -laitteistot, joista kerrotaan lisää luvussa 4.2. Sähkön laatuongelmia on usein havaittavissa, kun pienen oikosulkuvirran omaavaan verkkoon lisätään sähkölaitteita, jotka ovat suuritehoisia ja/tai ottavat suuria käynnistysvirtoja.

### 3.2 Loistehon nykytila

Loisteholla tarkoitetaan tehoa, joka syntyy virran ja jännitteen välisestä vaihekulmien eroista. Vaihekulma-erosta riippuen loisteho voi olla joko magneettikenttään varastoitunutta induktiivista energiaa tai sähkökenttään varastoitunutta energiaa. Loisteho ei tee verkossa varsinaista työtä, mutta loistehoa tarvitaan muun muassa induktiomoottoreiden magneettikenttien ylläpitämisessä. Lähiaikoina jakeluverkkoyhtiöiden loistehonhallintaan muutospainetta ovat tuoneet muun muassa seuraavat asiat:

- Kasvaneiden maakaapelointien seurauksena verkossa tapahtuva loistehon anto on kasvanut
- Sähkökäyttäjien kulutustapojen muutokset
- Loistehoa antavien sähkölaitteiden yleistyminen ja loistehoa kuluttavien sähkölaitteiden väheneminen

Jakeluverkon kasvavan loistehon seurauksena myös kantaverkkoyhtiö Fingrid on joutunut uudistamaan kantaverkkosopimuksensa, jossa on määritelty uudet loistehomaksut. Uudet loistehomaksut ovat tulossa käyttöön vaiheittain vuosien 2017 – 2019 aikana. Uudessa kantaverkkosopimuksessa on myös määritelty, että loistehoikkunat tulevat liittymispistekohtaisiksi.

Jakeluverkoilta vaadittavan säävarmuuden saavuttamiseksi verkkojen maakaapelointi kasvaa jatkuvasti ja kuten luvussa 1 todettiin esimerkiksi Elenia Oy:n tavoitteena on maakaapeloida vähintään 75 % jakeluverkostaan vuoteen 2028 mennessä. Jakeluverkossa tapahtuvat maakaapeloinnit lisäävät huomattavasti verkossa siirrettävän kapasitiivisen loistehon määrää. Maakaapeleista aiheutuvan loistehon määrä on suurimmillaan silloin, kun kaapelissa on kevyt kuormitus. Kapasitiivisen loistehon kasvaminen aiheuttaa jakeluverkoissa muun muassa jännitteen nousemista ja kuten edellisessä luvussa todettiin, niin jännitteen nousulla on suora vaikutus sähkön laatuun. Elenian jakeluverkossa loistehon kompensointiin on viime vuosina ryhdytty panostamaan aiempaa enemmän, sillä kaapeloinnin seurauksena loistehon tuotannon on arvioitu kasvavan vuosittain noin 20-30 MVAR [19].

Tällä hetkellä Elenian jakeluverkkoon liittyvillä sähkökäyttäjillä loistehon automaattista seuranta tehdään pääasiassa tehosiirtotuotteita ostaville käyttäjille. Tehosiirtotuotteita on yrityksillä, joiden pääsulakekoko on suurempi kuin 100 A ja sähkönkulutus luokitellaan suureksi. Tehosiirtotuotteiden piirissä oleville sähkökäyttäjille on asetettu myös loistehomaksu, jonka suuruus riippuu sähkökäyttäjän suurimmasta kuukausittain mitatusta 60 minuutin loiskeskitehosta [19]. Nykyisellään loistehon seuranta sähkönjakeluverkossa rajoittuu siis pääasiassa kantaverkon sekä jakeluverkon välisten liittymispisteiden loistehon seurantaan sekä jakeluverkon tehosiirtotuotteita ostaviin sähkökäyttöpaikkoihin.

Loisteholla on vaikutusta myös jakeluverkon muiden sähkökäyttöpaikkojen sähkön laatuun, sillä sähkökäyttäjän verkossa siirrettävä loisteho aiheuttaa häviöiden kasvua. Loisteho saattaa myös aiheuttaa pääsulakkeille suurempaa kuormitusta, joka voi johtaa sulakkeiden palamiseen. [56]

### 3.3 Sähköenergiamittarit

Tässä aluvussa kerrotaan sekä nykyisten että tulevien AMR-mittareiden taustoja ja käsitellään niiden erilaisia käyttötapoja sähkön laadun varmistukseen liittyen. Sähkömittareiden hyödyntäminen sähkön laadun varmistuksessa on alkanut yleistymään etäluettavien AMR-mittareiden myötä. Ennen etäluettavia mittareita kuluttaja-asiakkailta oli käytössä paikallisesti luettavia mittareita, joista osa oli mekaanisesti toimivia mittareita, jotka mittasivat vain käyttöpaikalla kulutettua sähköenergiaa. Sähkönjakeluverkon tehoasiakkailta on kuitenkin ollut käytössään etäluettavia mittareita jo ennen kuin kuluttaja-asiakkaille asennettiin etäluettavia mittareita. Tehoasiakkaiden etäluettavien mittareiden yleistyminen liittyy vuonna 1998 vapautuneeseen sähköenergian kilpailutukseen. Silloisessa tuntimittausvelvoitteessa säädettiin, että sähköenergiaa kilpailuttaakseen yli 63 A:n pääsulakkeilla varustetun sähkönkäyttöpaikan oli hankittava tuntiluettava sähköenergiamittari [38].

Vuoden 2016 lopussa paikallisesti luettavia sähköenergiamittareita oli koko Suomessa vain 12 000 käyttöpaikassa, joten etäluettavien mittareiden hyödyntäminen on jossakin määrin mahdollista koko sähkönjakeluverkossa [1, s.10-11]. Tätä diplomityötä kirjoitettaessa vuonna 2018 Elenian yli 420 000 sähköenergiamittarista vain noin 60 mittaria on paikallisesti luettavia energiamittareita ja siten Elenian AMR-mittarointiaste on reilusti yli 99,9 %. Tällä hetkellä jakeluverkossa vielä käytössä olevat paikallisesti luettavat energiamittarit sijaitsevat pääosin kohteissa, joihin ei ole pääsyä. Liittymisehdoissa sekä verkkopalveluehdoissa on määritetty, että jakeluverkon haltijalla on oikeus päästä liittyjänkin tiloissa sijaitseville energiamittareille, mutta joissakin tapauksissa käyttöpaikan omistajaan ei ole saatu yhteyttä tai omistaja ei syystä tai toisesta ole ollut halukas yhteistyöhön. Paikallisesti luettavat kohteet vähenevät kuitenkin jatkuvasti ja tavoitteena on, että kaikkien käyttöpaikkojen energiamittaus saadaan toteutettua etäluettavien mittareiden avulla mahdollisimman pian.

Verkkopalveluehdoissa [64] on määritelty sähkönkäyttäjän velvollisuuksia ja oikeuksia sähkömittarin kunnossapitoon, luentaan, tietojen käyttöön sekä tiedonsiirtoon liittyen. Verkkopalveluehtojen mukaan sähkönkäyttäjän tulee sallia muun muassa seuraavat asiat:

- Pääsy mittarille ja mittaustietojen lukeminen sekä mittaustietojen siirto
- Määräysten tai alan yleisesti noudatettujen käytäntöjen mukainen mittaustietojen käyttö verkonhaltijan verkon käyttötoimintaa varten
- Verkon käyttötoimintaa varten verkonhaltijan suorittama mittaustietojen tiedonsiirto tai välittäminen. Sähkönkäyttäjälle ei kuitenkaan saa aiheutua kustannuksia tai häiriöitä edellä mainitusta tiedonsiirrosta
- Tuntimittauslaitteiston tilapäisen laitteisto- tai tiedonsiirtohäiriön aikana verkonhaltijalla on oikeus hyödyntää tietoa aiemmasta sähkönkulutuksesta arvioidessaan sähkönkäyttäjän kulutusta

### 3.3.1 Nykyinen AMR-sukupolvi

Sähkökaupan vapautuminen alkoi vuonna 1995 ensiksi yrityksistä ja edeten siitä pienkäyttäjille. Sähkökaupan vapautuminen mahdollisti sen, että vuodesta 1998 lähtien sähkön pienkäyttäjien oli mahdollista hyödyntää vapautuneita sähkömarkkinoita. Vapautuneiden sähkömarkkinoiden hyödyntäminen ei kuitenkaan ollut tehokasta perinteisillä manuaalisesti luettavilla mittareilla, koska kulutuslukemat piti edelleen käydä fyysisesti lukemassa mittarilta ja kulutusta arvioitiin tyyppikuormituskäyrillä. [38, s. 5-6]

VTT teki vuonna 2006 kauppaja- ja teollisuusministeriön tilauksesta tutkimuksen etäluettavien mittareiden yleistymisestä sekä niillä saavutettavista mahdollisuuksista ja hyödyistä. Tutkimuksessa todettiin AMR-järjestelmien mahdollistavan pienkuluttajien kysyntäjoukon toteuttamisen joko kuormia ohjaamalla tai hintajoukon avulla. Lisäksi tutkimuksessa todettiin kehittyneiden AMR-järjestelmien parantavan sähkömarkkinoiden toimivuutta, energian säästöä sekä tuovan verkkoyhtiöille kustannussäästöjä. Laajasti sovellettujen etäluettavien mittareiden havaittiin myös tuovan uusia työkaluja verkon valvontaan sekä asiakaspalveluun [51]. Tutkimuksessa mukana olleilla ja nykyään laajassa käytössä olevilla AMR-järjestelmillä ei kuitenkaan toteutettu edellä mainittua sähkön pienkäyttäjien kysyntäjoukkoa, vaan sen laajempaa toteuttamista suunnitellaan seuraavan sukupolven AMR-mittareille. Seuraavan sukupolven mittareista sekä kysyntäjoukosta kerrotaan lisää seuraavassa alaluvussa.

Valtioneuvosto sääti vuonna 2009 tuntimittausvelvoitteesta, jonka mukaan 80 prosentissa sähkökäyttöpaikoista oli oltava etäluettavat sähkömittarit 1.1.2014 mennessä. Vuoden 2016 lopussa kaikista Suomen noin 3,4 miljoonasta sähkökäyttöpaikasta etäluettavia käyttöpaikkoja oli noin 99,6 prosenttia, joista valtaosaan oli asennettu AMR-mittari vuosien 2009-2013 aikana [1, s.7-11]. Silloin asennettujen ja vielä käytössä olevien nykyisten AMR-mittareiden vähimmäismittausvaatimuksia on esitetty valtioneuvoston asetuksessa sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta (66/2009). Asetuksessa [61] on todettu muun muassa seuraavaa:

- Verkonhaltijan on varmistettava, että mittauslaitteiston sekä mittaustietoa käsittelevän tietojärjestelmän tietosuojat on asianmukaisesti varmistettu
- Mittauslaitteiston rekisteröimien tietojen on oltava luettavissa laitteiston muistista viestintäverkon avulla (etäluentaominaisuus)
- Mittaustiedot ja jännitteettömiä aikoja koskevat tiedot on tallennettava verkonhaltijan mittaustietoa käsittelevään tietojärjestelmään. Tuntikohtaiset mittaustiedot on säilytettävä vähintään kuusi vuotta ja jännitteettömiä aikoja koskevat tiedot vähintään kaksi vuotta
- Mittauslaitteiston on rekisteröitävä yli kolmen minuutin pituisten jännitteettömien hetkien alkamis- ja päättymisajankohdat
- Mittauslaitteistojen on kyettävä vastaanottamaan sekä toteuttamaan tai välittämään eteenpäin viestintäverkosta lähetettäviä kuormanohjauskomentoja

Edellä mainittujen vaatimusten lisäksi osa verkkoyhtiöistä otti käyttöön monia verkon valvontaa sekä laadun seurantaan helpottavia ominaisuuksia, jotka mahdollistivat verkkoyhtiöille muun muassa reaaliaikaisemman verkostolaskennan sekä verkossa esiintyvien vikatilojen havainnoinnin tehostamisen. AMR-mittareiden pakollisten ominaisuuksien lisäksi käytössä olevat ominaisuudet ja sovellutukset vaihtelevat verkkoyhtiöittäin. Nykyisiä ensimmäisen ja toisen sukupolven AMR-mittareita hyödynnetään monella tapaa Elenia Oy:ssä. Sähköverkon tietojärjestelmiin yhdistettyjä älymittareita hyödynnetään pienjänniteverkon valvonnassa muun muassa pienjänniteverkon vaihe- sekä nollavikojen havaitsemisessa ja tietyn käyttöpaikan sähkönjakelun tilan tarkastamisessa. Asiakkaiden käyttöpaikoilla olevien AMR-mittareiden tuntimittaustiedot ovat myös asiakkaiden itsensä tarkasteltavissa internetissä olevasta raportointipalvelusta. AMR-mittarit mahdollistavat myös keskijänniteverkon johdinkatkeamien tarkemman paikannuksen, joka lyhentää verkossa ilmenevien sähkökatkojen pituutta. Muita AMR-mittareilla havaittuja vaikutuksia ovat muun muassa sähköverkon turvallisuuden paraneminen, asiakaspalvelun paraneminen, tarpeettomien asiakaskäyntien väheneminen sekä verkkoyhtiöiden toiminnan kustannustehokkuuden paraneminen [8].

Tällä hetkellä Elenia Oy:ssä nykyisten AMR-mittareiden mittaustiedot luetaan kulutusmittauspalveluun (KMP). Kulutusmittauspalvelusta tiedot siirretään mittaustietojärjestelmään (MTJ), josta tiedot noudetaan asiakastietojärjestelmään (ATJ) laskutusta ja muita tarpeellisia toimia varten. Kulutusmittauspalveluun tallennetaan mittareilta saatavat tuntisarjat sekä usein myös mittareiden mittaamien vaihejännitteiden kymmenen minuutin keskiarvolukemat. Tuntisarjoilla tarkoitetaan tunnin välein tallennettavaa mittaussarjaa. Tunnin mittaisen mittaussarjan käyttö tulee tunnin mittaisesta taseselvitysjaksosta, josta ollaan siirtymässä 15 minuutin mittaiseen taseselvitykseen. Tulevaa taseselvitysjaksoa ja sen taustoja käsitellään luvussa 3.3.2. Edellä mainittuun Elenia Oy:n jakeluverkosta saatavien mittaustietojen käsittelyyn on kuitenkin tulossa uudistuksia, jossa kaikki verkosta saatava data siirretään Elenia data-asset palveluun, joka mahdollistaa tehokkaamman mittaustietojen hyödyntämisen.

Suurta osaa nykyisistä AMR-mittareista voidaan hyödyntää sähkön laadun tarkkailussa, sillä mittareilta on mahdollista saada keskituntitehojen lisäksi myös muun muassa tarkempia jännitetietoja. Nykyisten AMR-mittarien sähkön laatuun liittyvät mittausominaisuudet vaihtelevat mittarityypeittäin. Yksi yleisimmistä Eleniällä käytössä olevista AMR-mittareista on Iskraemecon valmistama kolmivaiheinen energiamittari. Eleniällä käytössä olevat Iskraemecon energiamittarit mittaavat vaihejännitteiden tehollisarvoa 200 ms:n välein ja laskevat näistä mittausravoista 10 minuutin keskiarvoja. Keskiarvolukemat luokitellaan kunkin lukeman jännitetason perusteella taulukon 4 mukaiseen kumulatiiviseen jänniteosumataulukkoon.

**Taulukko 4.** Esimerkki kumulatiivisesta jänniteosumataulukosta.

Jännitetasot	Jännitetasojen raja-arvot	Kumulatiivisia osumia vaiheittain		
		Osumia L1	Osumia L2	Osumia L3
Taso 1	+ 10 % < U			
Taso 2	+ 5 % < U < + 10 %			
Taso 3	0 % < U < + 5 %			
Taso 4	- 5 % < U < 0 %			
Taso 5	- 10 % < U < - 5 %			
Taso 6	- 15 % < U < -10 %			
Taso 7	U < - 15 %			

Iskraemecon AMR-mittareilla on myös mahdollista seurata vaihejännitteiden päivittäisiä maksimi- ja minimiarvoja. Päivittäisissä arvoissa teholliskeskiarvon laskenta-aika on ohjelmoitavissa 1 sekunnin ja 10 minuutin välille. Elenialla oletusasetuksena Iskramecon mittareissa on käytössä päivittäisten maksimi- ja minimiarvojen laskeminen 5 minuutin tarkkuudelle. Päivittäisiä maksimi- ja minimiarvoja ei siirretä mittarilta mittaustietojärjestelmään, vaan päivittäiset arvot on erikseen luettava mittarilta. Mittalaitteiden rajallisen muistikapasiteetin takia päivittäisistä arvoista vain tuoreimmat ovat haettavissa mittarin muistista. [16]

Edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi valtaosa nykyisistä AMR-mittareista mittaa ja seuraa myös muun muassa pätö- sekä loistehon antoa ja ottoa, jännite-epäsymmetriaa, vaihevikoja sekä keskeytyksiä. Verkosta mitattuja loistehoarvoja ei tällä hetkellä tallenneta mittaustietojärjestelmään muilta kuin tehoasiakkailta.

### 3.3.2 AMR-mittareiden seuraava sukupolvi

Energiavirasto on määrittänyt etäluettavien energiamittareiden pitoajaksi 10 - 20 vuotta. VTT:n tutkimuksen mukaan jakeluverkonhaltioiden valitsema AMR-mittareiden pitoaika on keskimäärin 12,7 vuotta ja vuoden 2016 lopussa mittareiden keski-ikä oli 5,5 vuotta. Seuraavan sukupolven AMR-mittareiden täysimääräisten asennusten ennustetaan alkavan seuraavan vuosikymmenen alkupuolella ja jatkuvan aina vuosikymmenen loppuun asti.

Työ- ja elinkeinoministeriön asettama älyverkkotyöryhmä on määritellyt, että seuraavan sukupolven AMR-mittareiden uusia pakollisia ominaisuuksia ovat muun muassa:

- Pikajälleenkytkentöjen pituuden (0,3 s) ja sitä pidempien jännitteettömien keskeytysten alkamis- ja päättymiskohtien rekisteröinti.
- Siirtyminen tunnin mittaisesta taseselvitysjaksosta 15 min taseselvitykseen ja sen seurauksena entistä lyhyempiin mittaussarjoihin



- Verkosta otettuja ja verkkoon syötettyjen pätö- ja loistehojen arvot on rekisteröitävä vaihekohtaisesti ja arvoja ei tule netottaa mittarilla, vaan ne on rekisteröitävä erillisinä
- Virtojen, jännitteiden, loistehojen sekä pätötehojen hetkellisten tehollisarvojen mittaus
- Mittauslaitteiston ohjelmistojen tulee olla etäpäivitettäviä
- Mittauslaitteistossa tulee olla yksisuuntainen paikallinen tiedonsiirtoväylä, joka mahdollistaa reaaliaikaisen mittaustiedon siirtämisen asiakkaan tai valtuutetun kolmannen osapuolen sovellukseen tai laitteistoon
- Kuormanohjausrele, jota palveluntarjoaja voi ohjata mittauslaitteiston avointa rajapintaa hyödyntäen
- Mittarilla tapahtuva sähkönkäyttöpaikan etäkatkaisu- ja kytkentätoiminnallisuus

Edellä mainituilla määrittelyillä on pyritty siihen, että kaikilla AMR-mittareihin liittyvillä toimialoilla olisi mahdollisimman yhtenäinen sekä selkeä näkemys AMR-mittareiden toiminnallisuuksista [1][30]. Muita mittalaitteistoille asetettuja vaatimuksia on esitetty valtioneuvoston asetuksessa (211/2012) sekä mittauslaitelaissa (707/2011).

AMR-mittarit kuuluvat AMI-järjestelmään (Automatic Meter Infrastructure). AMI-järjestelmän osa-alueita ovat AMR-mittarit, tiedonsiirtojärjestelmä sekä tiedonhallintajärjestelmä. AMI-järjestelmän tarkoituksena on mahdollistaa mittaustietojen hyödyntäminen muihinkin käyttötarkoituksiin kuin vain laskutukseen. AMI-järjestelmän hyödynnyskohteita ovat muun muassa aiempaa kehittyneempi verkostolaskenta, sähkön laadun seuranta sekä sähkökatkojen seuranta. [18]

### 3.3.3 Laatumittarit

Laatumittareilla suoritetaan sähkönjakeluverkon sähkön laatuun liittyvät tarkemmat mitaukset. Sähkön laatuun liittyvässä standardissa SFS-EN 50160 ei oteta kantaa laatumittareiden ominaisuuksiin tai menetelmiin, vaan laatumittareiden määrittelyssä käytetään kansainvälistä standardia SFS-EN 61000-4-30 Electromagnetic compatibility: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods [42]. Tyypillisesti liittymispisteissä suoritettavat laatumittaukset suoritetaan standardissa SFS-EN 61000-4-30 määriteltyjen luokkien mittalaitteilla. Standardissa SFS-EN 61000-4-30 on standardoitu seuraavat mittaussuureet:

- Taajuus
- Jakelujännitteen suuruus
- Välkyntä sekä nopeat jännitteenmuutokset
- Harmoniset yliaaltojännitteet sekä viitattu väliharmonisiin yliaaltojännitteisiin
- Jännitekuopat sekä jännitteen nousut
- Jännitteen epäsymmetria

- Katkot
- Signaalijännitteet

Standardissa SFS-EN 61000-4-30 on määritelty kolme eri mittalaiteluokkaa, jotka ovat A, S ja B. Standardissa on määritelty, että luokan A mittalaitteita tulee käyttää, kun vaaditaan tarkkoja ja toisiaan vastaavia mittaustuloksia. Luokan A mittalaitteiden käyttökoh- teita voivat olla esimerkiksi sopimuksen mukaisuuden tai standardien vaatimusten täyt- tymisen varmistaminen. Luokan S mittalaitteita käytetään tilastollisiin sovelluksiin, joita voivat olla esimerkiksi tutkimukset ja yleismuotoinen sähkön laadun arviointi. Luokalla S on samat aikavälit laatusuureiden mittaamiselle kuin luokassa A, mutta tietojen tark- kuus- ja käsittelyvaatimukset ovat paljon pienempiä. Luokan B mittalaitteita ei enää val- misteta, vaan luokkaa B sovelletaan vain vanhoihin olemassa oleviin laitteisiin. Standar- dissa on todettu, että luokan B mittalaitteet tuottavat käyttökelpoista mittaustietoa, mutta tieto ei ole välttämättä vertailukelpoista [42]. Tämän työn kannalta oleellisimpien luo- kalle A määritettyjen mittaussuureiden mittaussaksojen pituuksien sekä tarkkuusvaati- muksien asetetut rajat on esitetty taulukossa 5.

**Taulukko 5.** Standardin SFS-EN 61000-4-30 luokan A tarkkuusvaatimuksia. Perus- tuu lähteeseen [13].

Suure	Mittausmenetelmä	Tarkkuus	Mittausväli
Taajuus	10 s välein	$\pm 10$ mHz	42,5 - 57,5 Hz
Jännitekuopat ja kohouma	Jännitteen tehollisarvo puolijakson välein	Amplitudi $\pm 0,2$ % nimellisestä  Kesto $\pm 1$ jaksonaika	-
Välkyntä	EN 61000-4-15	Vaihtelee erilaisten testien mukaan.  Suurimmillaan $\pm 8$ %	$0,2 P_{st} - 10 P_{st}$
Epäsymmetria	Symmetriset komponentit $U_2$ ja $U_0$	$\pm 0,15$ %	$0,5$ % - $5$ % $u_2$ $0,5$ % - $5$ % $u_0$
Harmoniset jännitteet	10 jaksonajan välein jännitteestä	$\pm 5$ % mitatusta jännitteestä  $\pm 0,05$ % nimellisjännitteestä	$10$ % - $200$ % luokan 3 standardista IEC 61000-2-4
Epäharmoniset jännitteet	10 jaksonajan välein jännitteestä	$\pm 5$ % mitatusta jännitteestä  $\pm 0,05$ % nimellisjännitteestä	$10$ % - $200$ % luokan 3 standardista IEC 61000-2-4
Jännite	10 jaksonajan välein, tehollisarvo	$\pm 0,1$ % nimellisestä	$10$ - $150$ % nimellisestä
Nopeat jännitetason muutokset (RVC)	Jännitteen tehollisarvo	$\pm 0,1$ % nimellisestä	$10$ - $150$ % nimellisestä

Taulukossa 5 on standardin SFS-EN 61000-4-30 vaatimia mittaustarkkuuksia luokan A mittalaitteille. Taulukossa on esitetty mitattava suure, mittaussuure, mittausmenetelmä, mittauksen tarkkuudelta vaadittu vaihteluväli ja mittaussuure, jolla mittauksia suoritetaan.

### 3.4 Tietojärjestelmät

Jakeluverkkoyhtiöillä on tyypillisesti käytössään useita erilaisia tietojärjestelmiä, joista jokaisella on oma tehtävänsä. Verkkoyhtiöissä usein hyödynnettyjä tietojärjestelmiä ovat muun muassa verkkotietojärjestelmä, asiakastietojärjestelmä, käytöntukijärjestelmä, käytönvalvontajärjestelmä sekä mittaustietojärjestelmä. Yksi tietojärjestelmien tavoitteista on mahdollistaa tehokas sähköverkko-omaisuuden hallinta. Verkosta saatavaa mittaustietoa voidaan hyödyntää useissa eri tietojärjestelmissä [23, s. 265-268].

Seuraavaksi tässä luvussa käsitellään hieman tarkemmin tietojärjestelmiä, joissa verkosta saatavaa mittaustietoa hyödynnetään sähköverkon laadun ja luotettavuuden ylläpitämisessä. Tällä hetkellä Elenialla käytössä olevia mittaustiedon hallintajärjestelmiä on käsitelty tarkemmin Pekka Mäkelän vuonna 2011 tekemässä diplomityössä *New business and process development opportunities utilizing meter data management system*. Tässä diplomityössä järjestelmiin ei paneuduta tietojärjestelmiin tämän luvun katsauksia tarkemmin, vaan niistä voi lukea lisätietoa Mäkelän diplomityöstä.

**Verkkotietojärjestelmä / Network Information System (VTJ / NIS).** Verkkotietojärjestelmä on keskitetty tietojärjestelmä, joka mahdollistaa tehokkaan sähköverkon mallintamisen sekä luo pohjan sähköverkko-omaisuuden hallinnalle. Verkkotietojärjestelmien oleellisimpia ominaisuuksia ovat monipuoliset laskenta- ja analysointiominaisuudet, jotka helpottavat sähköverkon investointien suunnittelua sekä sähköverkon luotettavuuden ja sähkön laadun hallintaa. Verkkotietojärjestelmää voidaan myös hyödyntää AMR-mittaustietoja tarkempien laskentatulosten saavuttamiseksi [18]. Verkon investointi- ja/tai kunnossapitokohteiden valinnassa on mahdollista hyödyntää verkkotietojärjestelmän verkostolaskentaa ja mittaustietojärjestelmästä saatavia AMR-mittaustietoja, jolloin voidaan arvioida verkon vahvuutta sekä verkossa kulutettavan sähköenergian määrää [23, s. 258-259].

**Käytöntukijärjestelmä / Distribution Management System (KTJ / DMS).** Käytöntukijärjestelmässä keskitytään sähköverkon käyttötoimintaan. Järjestelmän keskeisiä ominaisuuksia ovat muun muassa verkon keskeytysviestintä, keskeytysten hallitseminen, verkon tilan seuranta sekä -raportointi. Käytöntukijärjestelmä on usein integroitu verkon käytönvalvontajärjestelmään (SCADA) sekä mittaustietojärjestelmään (EDM). Integraatiot mahdollistavat laajan automaattisesti valvotun verkon ja helpottavat vikatilanteista aiheutuvien häiriöiden vaikutusalueen minimoimisen [59][23, s. 153]. Elenia Oy:ssä Trimble DMS:n ja AMR-järjestelmän välisen integraation on havaittu suurentavan automaattisesti valvotun verkon määrää huomattavasti.

**Käytönvalvontajärjestelmä / Supervisory Control And Data Acquisition (KVJ / SCADA).** Käytönvalvontajärjestelmä on sähköjakeluverkon reaaliaikaisessa valvonnassa ja hallinnassa hyödynnettävä tietojärjestelmä. Käytönvalvontajärjestelmän pääasiallinen tehtävä on ylläpitää verkon kytkentätilanne ajantasaisena ja mahdollistaa verkossa tapahtuvien ohjaustoimien hallinta. Käytönvalvontajärjestelmän tärkeimpiä toiminnallisuksia ovat sähköasemien ja jakeluverkon kauko-ohjattavien erottimien kauko-ohjaukset ja sekä niiltä saatavien hälytys- ja tapahtumalokien hallinta. Käytönvalvontajärjestelmä myös tyypillisesti mahdollistaa muun muassa sähköasemien kiskojäännitteiden ja aseman lähtöjen virtatietojen tarkastelun. [28]

**Mittaustiedon hallintajärjestelmä / Metering Data Management System (MTHJ / MDMS).** Mittaustiedon hallintajärjestelmän tarkoituksena on hallita ja käyttää kaikkia sähköverkon älypohjaisia tiedonhankintalaitteita. Tällä hetkellä sähköjakeluyhtiöissä mittaustiedon hallintajärjestelmää hyödynnetään pääasiassa AMI-järjestelmän osana tukemassa AMR-mittareiden hallintaa. AMI-järjestelmässä AMR-mittareiden mittaustiedon hallintaan kuuluvia vaiheita ovat muun muassa mittauksen suorittamisen, tiedonsiirto mittarin sekä toimijoiden välillä ja mittareiden vikailmoitusten hallinta. Mittaustiedon hallintajärjestelmä myös valmistele mittaustiedot sähkömarkkinoiden vaatimusten mukaisiksi EDI-sanomiksi. [18]

**Asiakastietojärjestelmä / Customer Relationship Management (ATJ / CRM).** Nykyaikaisia asiakastietojärjestelmiä hyödynnetään sähköjakeluverkkoyhtiöissä pääasiallisina asiakkuudenhallintajärjestelminä. Jakeluverkkoyhtiöiden asiakkuuksien hallintaan sisältyy laskutuksessa ja asiakaspalvelussa vaadittavien perustietojen lisäksi muun muassa tiedot sopimuksista sekä käyttöpaikkojen sähkönkulutushistoriasta. Asiakastietojärjestelmässä ei säilytetä laskutuksessa käytettäviä mittaussarjoja, vaan siellä käsitellään mittaussarjoista laskettuja sähkönkulutuskukemia. Sähkönkulutuskukemat haetaan mittaustiedon hallintajärjestelmästä. Asiakastietojärjestelmän yksi tärkeimmistä tehtävistä on toimia luotettavana ja tehokkaana tukena jakeluverkkoon liittyvissä asiakaspalvelutehtävissä. [48]

**Kulutusmittauspalvelu (KMP).** Telian kulutusmittauspalvelu toimii joissakin verkko-yhtiöissä rajapintana AMR-mittareiden sekä muiden tietojärjestelmien välillä. Kulutusmittauspalvelun avulla mittaustiedot siirretään mittaustiedon hallintajärjestelmään, josta niitä hyödynnetään muissa tietojärjestelmissä. Kulutusmittauspalvelun sekä käytöntukijärjestelmän välillä on myös rajapinta, joka mahdollistaa AMR-mittareiden tuottamien hälytyksien siirron suoraan käytöntukijärjestelmään. Telian kulutusmittauspalvelu mahdollistaa myös pääsyn suoraan sähkönkäyttöpaikkakohtaisten AMR-mittareiden hetkellisiin mittaustietoihin.

Tietojärjestelmien tulevaisuuteen tulee vaikuttamaan suuresti sähköverkkojen muuttuminen älyverkoiksi. Älyverkoissa sähköverkkojen sensorointi ja automatiikka yleistyvät ja

siitä seuraa verkon mittauspisteiden määrän kasvaminen. Esineiden internet, eli IoT vaikuttaa myös kotitalouksien sähkönkäyttöön ja siihen, että miten sähkönkäyttäjät hyödynävät AMR-mittareiden mittauksia. Sähköverkon tietojärjestelmät ovat muiden järjestelmien kanssa murroksessa, jossa aiemmin hyödynnetty pitkä tuotekehitys vaikuttaa korvautuvan jatkuvilla päivityksillä, joissa tavoitteena on huomioida paremmin asiakkaat ja muut sidosryhmät. [7]

### 3.5 Tietosuoja-asetus

Vuonna 2016 hyväksytty EU:n tietosuoja-asetus (EU 2016/679) tuli voimaan 25.5.2018. Asetuksessa tarkennettiin henkilötietoihin liittyviä tietoturvanäkökulmia. Uusi asetus vaikutti myös sähkönjakeluyhtiöiden tietojärjestelmiin, sillä niissä usein käsitellään asiakastietoja sekä asiakaskohtaisia mittaustietoja. Voimaan tullut tietosuoja-asetus [10] toi muun muassa seuraavia muutoksia:

- Henkilötietojen käsittelijöiden, rekisterinpitäjien sekä rekisterien ylläpidossa avustavien henkilöiden ja toimijoiden sääntöjen selkeytyminen
- Rekisterejä pitävien organisaatioiden pelkkä asetuksen noudattaminen ei ole riittävää, vaan organisaation on kyettävä osoittamaan, että kaikki tietosuoja-säännökset on huomioitu rekisterin pitoon ja käyttöön liittyvässä toiminnassa
- Tietosuojavastaavien asettaminen
- Rekisteriin tallennetulla henkilöllä on oikeus saada kaikki itseään koskevat tiedot koneluettavassa muodossa
- Tieturvaloukkausten ilmoitusvelvollisuus silloin, kun loukkaus on vähäistä suurempi
- Asetuksessa esitettyjen käsitteiden tarkempi määrittely
- Tietosuojaviranomaisten tehtävien, toimivallan sekä yhdenmukaisuuden tarkempi määrittely
- Tietosuojaviranomaisten valtuudet langettaa seuraamuksia asetuksessa tarkemmin määritellyissä tapauksissa. Seuraamuksina langetettavissa sakoissa on kuitenkin huomioitava tapauksiin liittyvät olosuhteet

Lisäksi uusi tietosuoja-asetus määrittelee mitä oikeuksia kansalaisilla on heidän henkilötietoihinsa liittyen. Yritysten tietojen käsittelystä määritellään muun muassa, että henkilötietojen käsittely on suoritettava asianmukaisesti, läpinäkyvästi sekä kaikin puolin lainmukaisesti. Kansalaisten oikeuksia ovat muun muassa oikeus saada tietoa siitä, että miten henkilötietoja käsitellään ja oikeus saada pääsy omiin henkilötietoihin. Tämän työn tietojen kannalta asetuksen yksi merkityksellisimmistä pykälistä on pykälä 26, jossa käsitellään tietojen tunnistettavuutta sekä anonyymisyyttä. Pykälässä 26 [10] määritellään muun muassa seuraavat kohdat:

- Tietosuojaperiaatteita tulee soveltaa kaikkiin henkilötietoihin, jotka koskevat tunnistettavissa olevaa henkilöä
- Tunnistettavissa olevan henkilön määrittelyssä tulee ottaa huomioon kaikki keinot, joita rekisterinpitäjät tai muut henkilöt voivat hyödyntää henkilön tunnistamisessa
- Tietosuoja-periaatteita ei kuitenkaan pidä soveltaa sellaisiin anonyymeihin tietoihin, joista ei ole enää mahdollista tunnistaa rekisteröidyn henkilötietoja.
- Tietosuoja-asetus ei koske anonyymejä tutkimustarkoituksessa tehtyjä tietojen käsittelyä

Tämän työn kannalta tietosuoja-asetus toteutuu tietojen ollessa anonyymejä ja tämän työn tiedoista ei ole mahdollista selvittää asiakkaiden tai käyttöpaikkojen tietoja. Yhteenvedon tietosuoja-asetuksesta voidaan sanoa sen selkeyttävän tietojen käsittelyyn liittyviä oikeuksia sekä vaatimuksia.

## 4. LAATUVAIHTELUIDEN SELVITYS

Tässä luvussa käsitellään laatuvaihteluselvityksen tyypillisiä vaiheita Elenia Oy:ssä. Luvussa käsitellään myös selvityksen haasteita ja tulevaisuutta. Luvussa on esitetty myös jakeluverkossa yleistyviä laitteita, jotka muuttavat jakeluverkossa tapahtuvaa sähkön kulutusta sekä tuotantoa. Luvussa käsiteltävissä sähkölaitteissa on pyritty huomioimaan sellaisia laitteita, jotka joko aiheuttavat tai voivat aiheuttaa laatuvaihteluita sekä laatupoikkeamia pienjänniteverkossa.

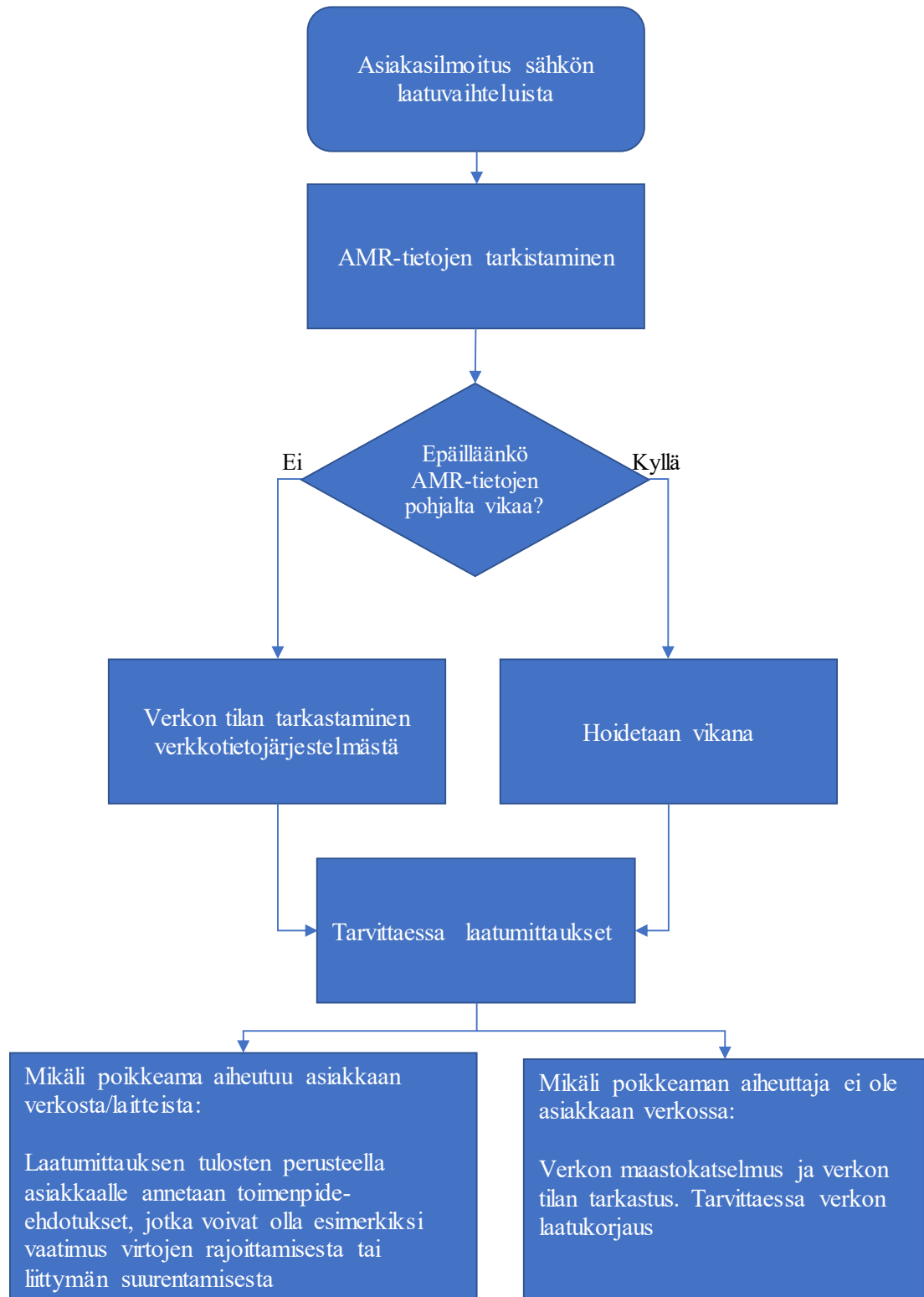
Sähkön laadulle on monia eri vaatimuksia ja suositusarvoja, joita on esitetty luvussa 2. Standardeissa ja määräyksissä säädettyjen sähkön laadun määritelmien lisäksi sähkönkäyttäjillä on tiettyjä odotuksia sähkön laadulle. Sähkön laatu, joka vastaa sille asetettuja vaatimuksia ei aina vastaa sähkönkäyttäjien asiakasodotuksia. Osaltaan asiakasodotusten täyttämiseen vaikuttaa se, kun sähkönkäyttöpaikalle hankitut sähkölaitteet, esimerkiksi klapi-koneet, hitsauslaitteet tai muut vastaavat, eivät joko toimi odotetusti tai häiritsevät muiden sähkölaitteiden normaalia toimintaa. Osalle sähkönkäyttäjistä tulee yllätyksenä, että niin sanotuista kuluttajakaupoista hankitut yksivaiheiset sähkölaitteet eivät toimi käyttöpaikalla odotetusti ja että laitteet eivät sovellu käytettäväksi kyseisessä verkossa. Edellä mainittujen laatuvaihteluiden kaltaisissa tapauksissa asiakasodotusten selvittämiseksi ja täyttämiseksi sähkönkäyttäjälle kerrotaan laatuvaihtelun aiheuttajan taustoja ja annetaan ohjeistusta siitä, kuinka vaihtelun aiheuttajan kanssa kannattaa toimia. Laatuvaihteluiden selvitystyössä ja laatupoikkeamien poistossa pyritään aina kaikkia osapuolia tyydyttävään tulokseen.

Laatuvaihteluiden selvitys vaihtelee laatuvaihtelun tyyppin mukaan. Joistakin pienjänniteverkon vikatilanteista saadaan automaattinen vikailmoitus AMR-järjestelmiltä. Automaattinen vikailmoitus saadaan muun muassa nolla- ja vaihevioista, mutta yleisesti ottaen pienjänniteverkon laatuvaihteluiden selvitys alkaa urakoitsija- tai asiakasilmoituksen perusteella. Sähkönkäyttäjän tekemän laatuselvityspyynnön perusteella päätetään, että mihin toimiin asian suhteen ryhdytään. Sähkönjakeluyhtiöiden tietoon laatuvaihtelut tulevat usein suoraan sähkönkäyttäjältä sitten, kun laatuvaihteluita havaitaan. Sähkönkäyttäjien niin sanottu ilmoitusherkkyys vaihtelee käyttäjän mukaan ja osa sähkönkäyttäjistä ilmoittaa sähkön laadun vaihteluista toisia herkemmin.

Laatuvaihtelun ilmoittajalta pyritään kysymään mahdollisimman tarkasti, että miten ja milloin sähkön laadun vaihtelu ilmenee ja liittyykö vaihtelun havaitseminen esimerkiksi jonkin tietyn sähkölaitteen käyttämiseen. Tyypillisiä toimia asiakasilmoituksen jälkeen on esitetty kuvan 8 kaaviossa. Huomioitavaa on, että laatuvaihteluiden selvitys vaihtelee usein tapauskohtaisesti muun muassa sähkökäyttäjiltä saatavien tietojen seurauksena ja sen takia kuvan 8 kaavio on vain luonnostelma laatuvaihteluiden selvityksestä. Kuvan 8 kohdissa suoritetaan muun muassa seuraat toimet:

1. Ilmoittajan ja tarvittaessa myös läheisten liittymispisteiden AMR-tietojen tarkastamien. Onko mittareilta saatavissa olevissa 5 ja/tai 10 minuutin keskiarvojännitteissä havaittavissa jotakin normaalista poikkeavaa. Tarvittaessa mittareille on mahdollista ohjelmoida myös lyhyempi esimerkiksi minuutin mittainen mittausarja, mutta koska tyypillisen mittalaitteen muisti on rajallinen, niin sitä saadaan talteen vain viimeisimmiltä päiviltä.
2. Verkon tilan tarkastaminen sekä verkostolaskenta verkkotietojärjestelmässä. Siirtoetäisyyksien sekä suurten kulutus- tai tuotantopisteiden huomiointi ja verkon vahvuuden laskenta.
3. Tietojen arviointi ja mahdollisten laatuvaihteluiden aiheuttajien tunnistus. Mikäli selviä aiheuttajia ei tunnisteta, niin usein laatuvaihteluista ilmoittaneelle käyttöpaikalle suoritetaan laatumittaus ja sen mittauksen tulosten perusteella päätetään jatkotoimista.
4. Käyttöpaikkojen ja/tai verkkokomponenttien (esimerkiksi jakokaappien) paikalliset laatumittaukset.
5. Mikäli laatumittauksilla havaitaan, että jokin käyttöpaikka aiheuttaa verkkoon laatupoikkeamia, niin tehdään tarvittavat toimet, että verkon jännite saadaan standardien ja vaatimusten mukaiseksi. Joissakin tapauksissa on mahdollista suorittaa myös sähkönkäyttäjän verkossa laatumittauksia, jotta käyttäjälle saadaan tarkempaa tietoa laatupoikkeaman aiheuttajasta.
6. Mikäli jakeluverkossa havaitaan puutteita, niin suoritetaan puutteiden korjaus, jotta verkko saadaan standardien ja vaatimusten mukaiseksi.





**Kuva 8.** Laatuvahteluiden selvitys asiakasilmoituksen jälkeen.

Kuten työssä aiemmin on todettu, niin tyypillisimmät käyttöpaikat, joista laatuselvityspyynnöitä tulee sijaitsevat pitkien siirtoyhteyksien päässä verkoissa joiden mitoitus ei ole

riittävä nykykulutukselle. Jakeluverkon vanhoista mitoitusvaatimuksista on kerrottu tarkemmin luvussa 3.1. Vanhojen vaatimusten mukaan mitoitettussa verkossa esiintyville välkyntätapauksille on myös mahdollista, että sähkökuluttaja on hankkinut uuden sähkölaitteen tai -laitteiston, jonka ottamat hetkelliset virrat ylittävät liittymäkoon. Jakeluverkko mitoitetaan liittymiskokojen mukaan, joten suuret liittymäkoon ylittävät hetkelliset virrat nostavat välkyntäarvoja herkästi. Jakeluverkkoyhtiö voi vaatia sähkökäyttäjää rajoittamaan liittymispisteen hetkellisetkin virrat liittymäkoon mukaisiksi.

Tällä hetkellä laatuvaihteluiden selvityksessä hyödynnettäviä järjestelmiä ovat pääasiassa luvussa 3 käsitellyt sähköverkon etäluettavat AMR-energiamittarit, verkkotietojärjestelmä, käytöntukijärjestelmä sekä laatumittarit. Tämänhetkisillä laitteistoilla sekä ohjelmistoilla sähkön laatuvaihteluiden selvitys on suhteellisen tehokasta, mutta ei niinkään ennakoivaa.

Sähköverkon laatuvaihteluiden havaitsemista on mahdollista tehostaa ja muuttaa nykyistä ennakoivammaksi lisäämällä jakeluverkkoon laatuominaisuuksiltaan tarkempia ja monipuolisempia mittareita. Tarkempia mittareita voitaisiin hyödyntää esimerkiksi muuntopiiritasolla, jotta niiden kustannukset pysyisivät kohtuullisella tasolla. Muuntopiiritason tarkempien mittareiden mahdollisina haasteina ovat kuitenkin muuntopiirien valitseminen sekä se, että mikäli muuntopiiritasolla esimerkiksi välkyntä häiritsevyysindeksin arvot kasvavat, niin kuinka tunnistaa kasvun aiheuttaja ilman kuvassa 8 esitettyä selvitystä. Muuntopiiritason mittareita on käsitelty lisää luvussa 5.6.2. Uusien laitteistojen lisäksi laatuvaihteluiden selvityksen ennakoitua voidaan myös mahdollisesti toteuttaa hyödyntämällä nykyisiä verkko- ja mittaustietoja aiempaa tehokkaammin. Yhtä tapaa kehittää verkko- ja mittaustietojen käsittelyä tutkitaan tarkemmin luvussa 5.

## 4.1 Laatumittaukset

Sähkön laatumittaukset ovat osa laatuvaihteluiden selvittämisen prosessia. Tyypillisesti laatumittauksia suoritetaan silloin, kun havaituille laatuvaihteluille ei löydy mahdollista aiheuttajaa esimerkiksi keskijänniteverkon tapahtumista tai muusta verkon tilanteesta. Sähkökäyttäjä voi myös vaatia verkkoyhtiötä todistamaan, että hänen liittymispisteessään sähkön laatu täyttää standardissa SFS-EN 50160 asetetut vaatimukset. Sähkön laatumittaukset suoritetaan sähkökäyttäjän ja jakeluverkkoyhtiön välisessä liittymispisteessä. Käytännössä laatumittaus toteutetaan usein joko asentamalla laatumittari sähkömittarin rinnalle tai sitten korvaamalla sähkömittari mittaripaikalle menevällä laatumittarilla. Laatumittaus toteutetaan tyypillisesti seitsemän vuorokauden mittauksina, mutta tarvittaessa myös pidemmät mittaukset ovat mahdollisia. Mikäli laatumittauksilla todetaan, että sähkön laatu ei täytä sille asetettuja vaatimuksia, niin silloin voidaan todeta, että mittauspisteessä on laatupoikkeama.

Laatumittaustarve ilmenee tyypillisesti joko asiakasilmoituksen tai urakoitsijakumppaneiden havaintojen pohjalta. Elenia Oy:llä laatumittaukset suoritetaan tällä hetkellä ulkopuolisen toimijan MX Electrix Oy:n eQL Laatuvahti -mittareilla. Eleniällä tällä hetkellä käytössä olevilla eQL Laatuvahti2 -mittareilla pystytään mittaamaan muun muassa seuraavia jännitesuureita:

- Jännitteen kokonaissärö (THD)
- Jännitteen 3, 5 ja 7 harmoninen yliaalto
- Vaihe- ja pääjännitteet
- Jännitteen tehollisarvojen 100 ms:n maksimi ja minimiarvot asetetun mittausjakson ajalta
- Välkynnän lyhytaikainen häiritsevyysindeksi ( $P_{st}$ )
- Jännitteen epäsymmetria
- Jännitteen tasakomponentti
- Jännitekuopat sekä jännitteen nousu

Laatuvahti -mittarit asennetaan pääasiassa sähkökäyttäjän sähkömittarin paikalle. Elenia Oy hyödyntää MX Electrix Oy:n toimittamaa mittausraporttia mittaustulosten tulkitsemisessa. Laatumittauksen jälkeen Elenian asiantuntija tulkitsee mittausraporttia ja päättää tarvittavista toimista. Mikäli mittaustuloksissa havaitaan joitakin laatupoikkeamia, niin poikkeaman aiheuttaja pyritään selvittämään tutkimalla käytöntukijärjestelmää hyödyntäen jakeluverkon tapahtumia sekä kytkentätilannetta.

Mikäli laatupoikkeaman aiheuttaja ei selviä jakeluverkon tilanteesta tai laatumittausraportissa on havaittavissa laatupoikkeamien yhteydessä liittymiskoon ylittäviä virtoja, niin Elenian asiantuntija ottaa yhteyttä liittymän omistajaan tai haltijaan. Mikäli liittymispisteen laatupoikkeamat aiheutuvat sähkökäyttäjän oikeuksien vastaisista toimista, esimerkiksi liittymäkoon ylittävistä virroista, niin Elenian asiantuntija kertoo mitä asiakkaan tulee tehdä voidakseen jatkaa häiriötä aiheuttaneen laitteen käyttöä.

Nykyiset Elenian käytössä olevat laatumittarit ovat mittausominaisuuksiltaan riittäviä standardin SFS-EN 50160 keskeisten vaatimusten seuraamiseen sekä jakeluverkossa esiintyvien laatupoikkeamien havaitsemiseen ja poikkeamien aiheuttajien arviointiin. Tulevissa laatumittareissa näytteenottotaajuutta olisi kuitenkin hyvä parantaa, jotta jännitteiden tehollisarvoja olisi mahdollista seurata nykyistä 100 millisekunnin arvoa nopeammin. Suuremman näytteenottotaajuuden avulla olisi mahdollista havaita myös erittäin nopeita muutoksia verkossa ja se voisi mahdollisesti helpottaa aiheuttajien tunnistamista entisestään.

Seuraavien sukupolvien AMR-mittareiden sähkön laadun mittausominaisuudet vaikuttavat luultavasti myös tulevaisuuden laatumittaustarpeisiin. Etenkin tulevien energiamittareiden kyky havaita verkossa tapahtuvaa välkyntää tulee vaikuttamaan laatumittausten määrän kehittymiseen. Välkynnän mittausominaisuudet vaikuttavat, koska välkyntä on

yksi yleisimmistä sähkön laatuun liittyvistä asiakasilmoituksista (katso kuva 7 s. 25). Välyntäindeksien ohella myös tulevien AMR-mittareiden kyky mitata sähkökäyttöpaikkojen virtojen hetkellisiä arvoja on erittäin oleellinen tulevien laatumittausten kannalta. Hetkellisten virtojen havaitseminen on tärkeää, koska useat sähkön laatuvaihtelut aiheutuvat nopeista muutoksista hetkellisissä virta-arvoissa ja osassa tapauksissa sähkökäyttäjien kokemat laatupoikkeamat aiheutuvat liittymäkokoja suuremmista hetkellisistä virroista.

Haasteena AMR-mittareiden hyödyntämiselle myös tarkempien laatumittauksien mittaamisessa on hinta. AMR-mittarit asennetaan massa-asennuksina jokaiselle jakeluverkon sähkökäyttöpaikalle, joten mittareiden yksikkökustannuksien tulee pysyä kohtuullisella tasolla. Tällä hetkellä välkyntään, väliharmonisiin sekä transientteihin liittyvät mittausominaisuudet lisäävät AMR-mittareiden hintaa suhteellisen paljon ja sen takia kyseisiä ominaisuuksia ei vielä tällä hetkellä ole saatavana massa-asennuksissa käytettäviin energimittareihin. Tulevilla AMR-mittareilla on kuitenkin mahdollista toteuttaa minuuttitaso virta- ja jännitetietojen mittaaminen kohtuullisin kustannuksin. Niiden hyödyntäminen saattaa tulevaisuudessa vaikuttaa tarkemmilla siirrettävillä laatumittareilla tehtävien laatumittausten määrään.

## 4.2 Sähköverkossa yleistyvät laitteet ja niiden vaikutus sähkön laatuun

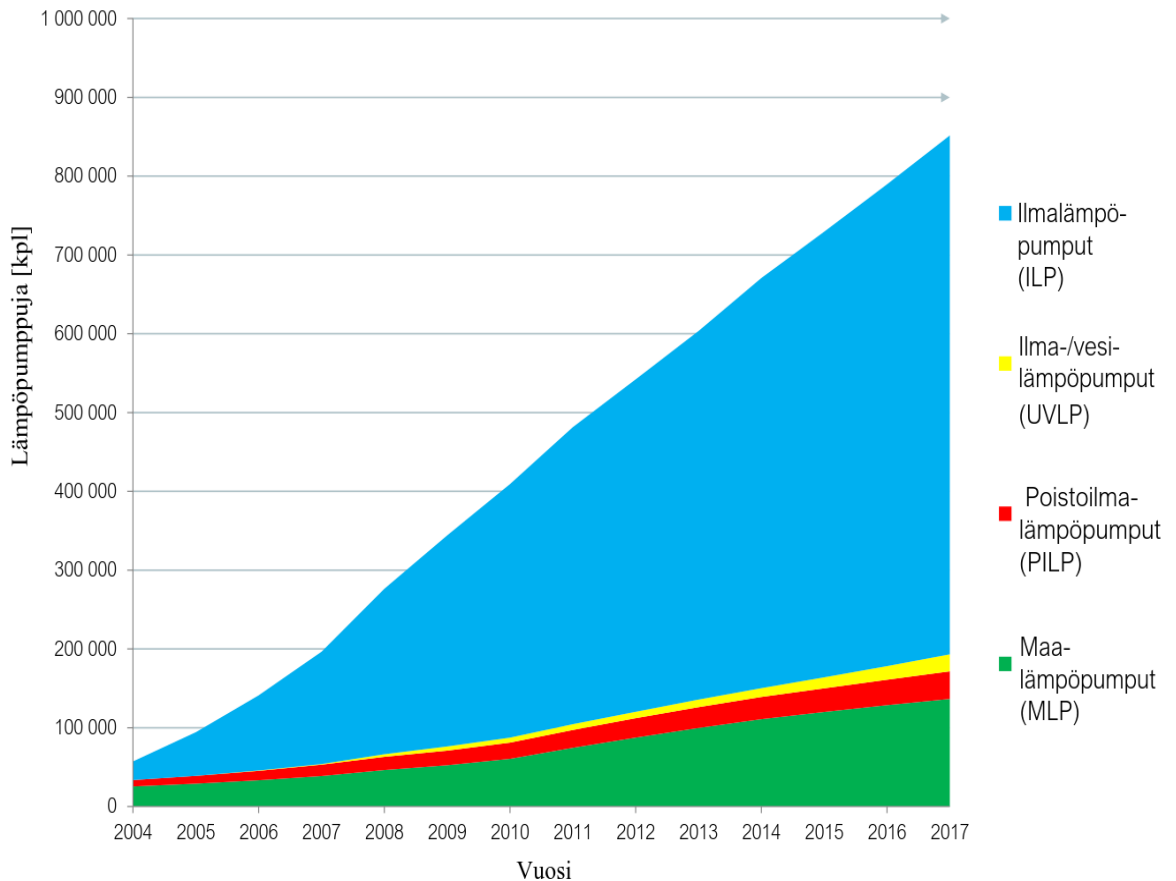
Sähköverkossa tapahtuva sähköenergiankulutus on muuttunut viimeisimpinä vuosikymmeninä huomattavasti. Perinteisessä sähkönjakeluverkossa pienjänniteverkon sähkön laadun valvonta on ollut suhteellisen vähäistä ja sähkön laadun arviot ovat pohjautuneet keski- ja suurjänniteverkkojen tilaan. Muun muassa hajautetun tuotannon yleistyminen sekä kiristyvät sähkön laatustandardit kasvattavat pienjänniteverkossa tapahtuvan valvonnan tärkeyttä ja vaativat pienjänniteverkon laadun valvonnalta entistä enemmän [26]. Tällä hetkellä suurimpia muutoksia pienjänniteverkossa tapahtuvaan sähkön kulutukseen tuovat muun muassa seuraavat asiat:

- Sähkön hajautetun tuotannon yleistyminen – etenkin säästä riippuvaisen uusiutuvan sähköenergian määrän kasvaminen
- Liikenteen siirtyminen fossiilisista polttoaineista muun muassa ladattaviin hybridi- ja sähkökäyttöihin
- Sähkön vaihtelevan tuotannon seurauksena myös sähköenergian varastointi yleistyy
- Sähkönjakeluverkon automaation määrä kasvaa ja kysyntäjousto tulee yleistymään
- Kiinteistöjen lämmitysmuotojen vaihtuminen perinteisistä energialähteistä esimerkiksi maalämpöön

Muun muassa jakeluverkkoon kytkettyjen tuotantokohteiden, sähköajoneuvojen sekä lämpöpumppujen määrän kasvamisen on havaittu voivan aiheuttaa sähkön laatuongelmia pienjännitteiseen sähköjakeluverkkoon. Ongelmia on havaittu etenkin järjestelmissä, joissa tuotanto tai kulutus eivät jakaudu tasaisesti jokaiselle vaiheelle. Sähköverkon epätasainen kuormitus voi aiheuttaa laatupoikkeamien lisäksi myös muun muassa rajoitteita sähkön pientuotannolle ja sähköautojen latureiden toiminnalle [63]. Uusiutuviin ja päästöttömiin energiamuotoihin panostaminen on tuonut muutoksia myös kiinteistöjen lämmitysratkaisuihin. Etenkin lämpöpumppujen asentaminen on jatkuvasti yleistymässä. Lämpöpumppujen yleistymistä käsitellään tarkemmin seuraavassa alaluvussa 4.2.1.

### **4.2.1 Lämpöpumppujen yleistyminen**

Sähköjakeluverkkoon kytkettyjen lämpöpumppujen määrä on kasvanut viime vuosina voimakkaasti ja kasvu näyttää jatkuvan voimakkaana myös tulevaisuudessa. Suomeen asennettujen erilaisten lämpöpumppujen määrä on esitetty kuvassa 9. Kuvasta voi nähdä, että ilma- ja maalämpöpumput ovat tällä hetkellä yleisimpiä lämpöpumppuja. Lämpöpumppujen on havaittu vaikuttavan sähkönkäyttäjien sähkön kulutusprofiileihin. Lämpöpumppujen vaikutus kulutusprofiiliin riippuu suuresti kiinteistön edellisestä lämmitysmuodosta. Silloin, kun lämpöpumpuilla korvataan kiinteistön sähkölämmitys, niin sähkönkulutuksen on havaittu alenevan. Korvattaessa muita lämmitysmuotoja, esimerkiksi öljy- tai puulämmitys, niin sähkönkulutuksen on havaittu kasvavan [12].



**Kuva 9.** Suomeen myytyjen lämpöpumppujen kumulatiivinen taulukko [43].

Kiinteistöihin asennettavat lämpöpumput mitoitetaan joko osatehoisiksi tai täysitehoisiksi. Osatehomitoituksella tarkoitetaan tilannetta, jossa kovimman lämmitystarpeen aikana lämpöpumppu ei pysty tuottamaan kaikkea tarvittavaa lämmitystehoa ja tarvittava lisäteho tuotetaan sähkövastuksilla. Täysitehomitoitettu lämpöpumppu on mitoitettu siten, että se kykenee tuottamaan kaiken tarvittavan lämmitystehon ilman sähkövastuksia. [12]

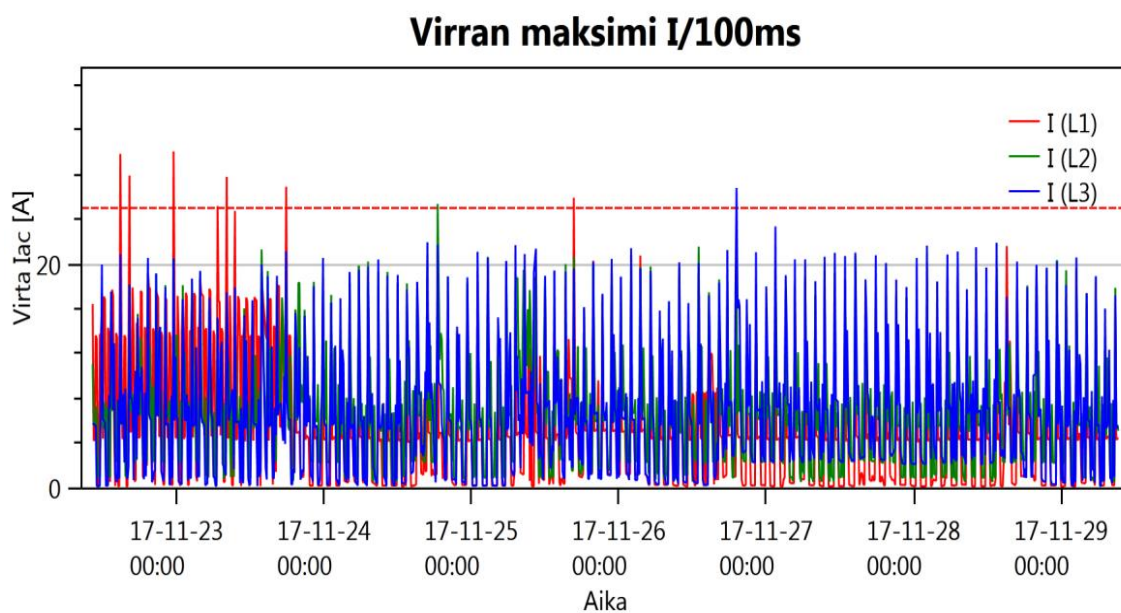
Sähkön laadun kannalta on huomioitava, onko lämpöpumppu osa- vai täysitehomitoitettu ja mikä on lämpöpumpun kompressorin käynnistystapa. Lämpöpumppujen kompressorien käynnistysmäärä vaihtelee lämmitystarpeen mukaan ja kompressorin käynnistyshetkellä hetkelliset virrat voivat olla jopa 8 - 12 kertaisia laitteen nimellisvirtaan nähden. Yleisimpiä lämpöpumppujen käynnistystapoja ovat suoraikäynnistyksen, käynnistyksen pehmoikäynnistimellä, käynnistyksen taajuusmuuttajalla sekä invertteriohjattu käynnistyksen.

Edellä mainituista käynnistystavoista suoraikäynnistyksen on havaittu aiheuttavan eniten laatueroja, sillä se ei rajoita virtoja ollenkaan. Myös pehmoikäynnistimiä hyödyntävät lämpöpumput saattavat aiheuttaa laatueroja, sillä pehmoikäynnistin ei rajoita kaikkia käynnistyksen aikaisia virtapiikkejä kovin tehokkaasti ja sen rajoituskyky riippuu suuresti asettelusta. Taajuusmuuttajien ja invertterien avulla käytettävät lämpöpumput eivät tyypillisesti aiheuta virtapiikkeihin liittyviä laatuongelmia, mutta niiden hyödyntäminen

tehoelektronikka voi aiheuttaa omanlaisiaan ongelmia. Tehoelektronikan aiheuttamista laatueroista lisää alaluvussa 4.2.4.

Kuvassa 10 on esitettyä erään jakeluverkkoon liitetyn käyttöpaikan maksimivirtoja. Kuvassa esitetyn liittymän pääsulakekoko on 25 A ja käyttöpaikan 10 minuutin mittausjaksojen keskiteho oli noin 2 kW sekä suurin hetkittäinen 10 minuutin vaiheteho oli noin 3,9 kW. Kuvan käyttöpaikan suurin 10 minuutin mittausjaksoilla mitattu virta-arvo oli 17 A ja 24.11 jälkeen suurin 10 minuutin virta-arvo oli noin 13,5 A.

Kuvasta 10 voidaan havaita käyttöpaikalla olevan käynnistysvirran rajoituksella varustetun maalämpöpumpun laitteiston ottamia hetkellisiä virtoja ja esimerkin siitä, että miten käynnistysvirrat voivat ilmetä mittaustuloksissa. Virtojen rajoittamisesta huolimatta laatumittauksen aikana havaittiin muutama liittymän pääsulakekoon ylitys. Mikäli kuvan 10 maalämpöpumpun käynnistysvirtoja ei olisi rajoitettu, niin on mahdollista, että esitetyt virta-arvot ylittäisivät liittymän pääsulakekoon useammin. Liittymän pääsulakekoko on esitetty kuvassa punaisella katkoviivalla. Virtojen muutokset ovat melko nopeita, koska 100 millisekunnin virta-arvojen maksimit olivat noin 8 A suurempia kuin suurimmat 10 minuutin mittausjaksojen virta-arvot.



**Kuva 10.** Virranrajoituksella varustetun maalämpöpumpun käynnistysvirtoja.

Verkkopalveluehdoissa maalämpöpumppu on mainittu yhtenä laitteista, joista sähkönkäyttäjän on tyypillisesti pyydettävä ennakkoselvitys jakeluverkonhaltijalta. Jakeluverkonhaltija selvittää, voiko lämpöpumpun kytkeä nykyiseen sähköverkkoon. Kytkentälu-paa selvittäessä voidaan hyödyntää verkostosuositusta YA9:13, jossa käsitellään mikro-tuotannon liittämistä sähköjakeluverkkoon [65]. Verkostosuosituksessa on määritelty, että tuotantolaitos ei saa aiheuttaa yli 4 % jännitteen muutosta liittymiskohtaan, jotta stan-dardin SFS-EN 50160 vaatimuksen täytyvät. Tuota liittymiskohdan 4 %:n jännitteen

muutoksen rajaa voidaan hyödyntää myös lämpöpumpun kytkennöissä, sillä liittymispisteen välkyntään ei vaikuta, että onko kyseessä tuotannon vai kulutuksen aiheuttamat muutokset [46].

## 4.2.2 Sähköautot

Tässä työssä sähköautolla tarkoitetaan sekä täyssähköautoja että ladattavia hybridiautoja. Täyssähköautoissa voimalähteenä on ainoastaan sähkömoottori, joka ottaa tarvitsemansa sähköenergian akustosta. Täyssähköautojen haasteena on tyypillisesti ollut toimintasäteen riittävyys etenkin talviolosuhteissa. Toimintasäde vaihtelee autotyyppin ja ajo olosuhteiden mukana noin 100 – 400 kilometrin välillä. Yleisimmät polttomoottorikäyttöiset autot kulkevat yhdellä tankillisella sadoista kilometreistä aina noin tuhanteen kilometriin [27, s.1-3].

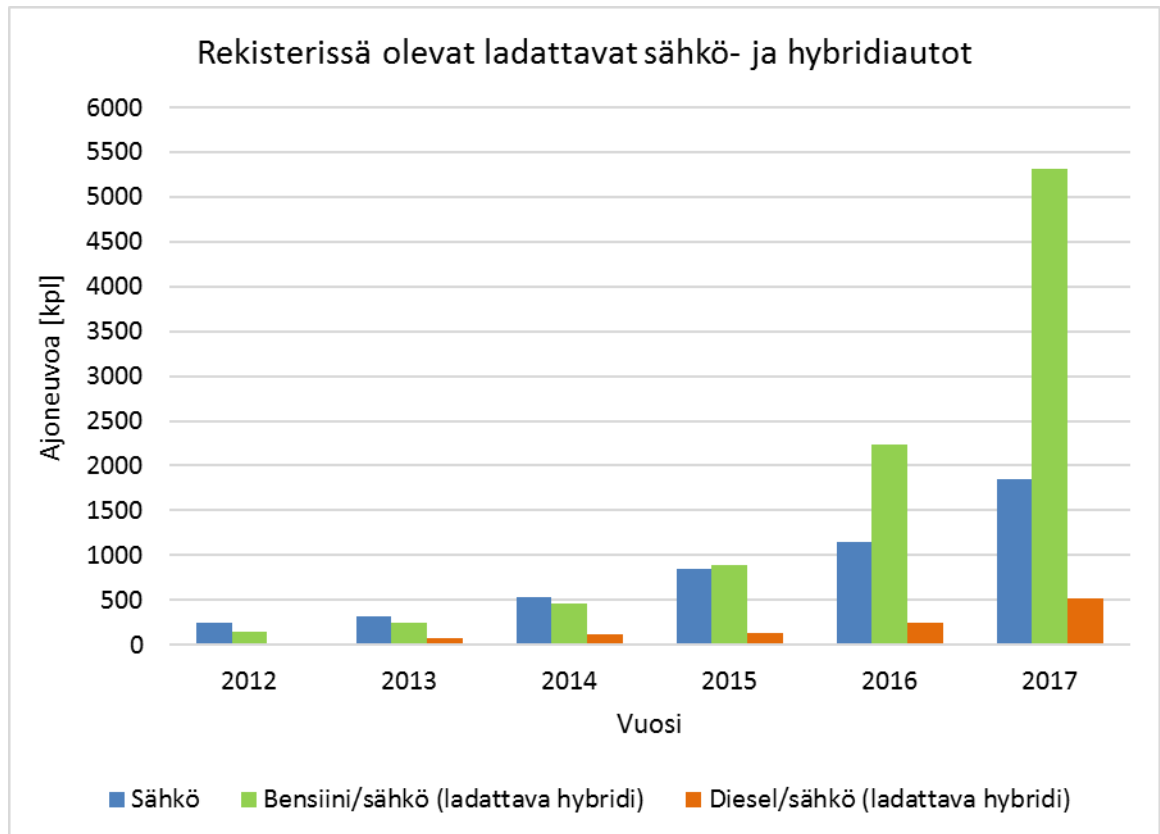
Ladattavat hybridiautot on varustettu sähkömoottorin lisäksi myös polttomoottorilla, joka tyypillisesti kuluttaa joko bensiiniä tai dieseliä. Hybridiautojen tavoitteena on käyttää akustoihin varastoitua sähköenergiaa aina kun sitä on käytettävissä ja fossiilisiin polttoaineisiin siirrytään vasta kun sähköenergiaa ei ole käytössä. Osa hybridiautoista on mitoitettu siten, että sähköllä ajettaessa polttomoottori ei ole käytössä missään vaiheessa ja osa on mitoitettu siten, että polttomoottoria käytetään ajon aikana energiankulutuksen noustessa suureksi esimerkiksi ajettaessa suuria nopeuksia tai kovissa kiihdytyksissä. [27, s.31-38]

Euroopan ilmastonmuutoksen vastaisen toiminnan ansiosta sähköautojen hankkimista tuetaan usein eri keinoin, joista yhtenä merkitsevä on tällä hetkellä sähköauton 2000 euron hankintatuki sekä edut muun muassa autoverossa sekä ajoneuvoverossa. Sähköauton hankintatuessa on huomioitava tuen saamisen edellytykset, joita ovat muun muassa:

- Auton tulee olla täyssähköinen henkilöauto
- Auton kokonaishinnan tulee olla alle 50000 euroa
- Auton hankkijan tulee olla yksityishenkilö

Sähköautojen ja ladattavien hybridiautojen lukumäärän kehitys Suomessa on esitettyinä kuvassa 11. Kuvasta on huomattavissa sähköä hyödyntävien autojen määrän nopea kasvu ja kasvun ennustetaan jatkuvan vähintäänkin samalla tasolla. Sähköautojen yleistymistä edesauttaa muun muassa akustojen energiatihedden kehittyminen sekä hinnan laskeminen.





**Kuva 11.** Rekisterissä olevien sähköautojen ja ladattavien hybridautojen määrä Suomessa. Perustuu lähteeseen [44].

Sähköautojen vaikutus sähköjakeluverkon sähkön laatuun liittyy sähköautojen akustojen lataamiseen sähköverkosta. Usein tehokkain tapa ladata sähköauto on suorittaa lataus kolmivaiheisesti, mutta tyypillisesti sähköauton kolmivaihelaturi on vain paikassa, jossa sähköautoa pääsääntöisesti ladataan. Sähköautoissa laatu poikkeamien on havaittu liittyvän usein yksivaiheisiin kuormituksiin, joita sähköauton yksivaiheinen lataaminen on todettu voivan aiheuttavan [22]. Laatu poikkeamia on havaittu etenkin silloin, kun sähköautoa ladataan taajaman ulkopuolisella sähkönkäyttöpaikalla, jossa normaalikulutus on pientä ja verkko on mitoitettu vanhojen vaatimusten mukaiseksi. Edellä mainittu tilanne on mahdollinen esimerkiksi silloin, kun sähköautolla ajetaan haja-asutusalueella sijaitsevalle mökille.

Sähköautojen laturit voivat aiheuttaa verkkoon samoja sähkön laatu poikkeamia, joita aiheutuu yleisimmin epälinearisesta kuormituksesta. Laturit toimivat tehomuuntimien tapaan ja niiden pääasiallinen tehtävä on tasasuunnata jakeluverkosta saatava vaihtosähkö akustolle sopivaksi. Laturit sisältävät usein myös suotimia sekä tehokertoimen korjauksessa tarvittavia komponentteja. Suotimien on tarkoitus suodattaa tasasuunnauksesta aiheutuvia laatu vaihteluita ja siten parantaa sähkön laatua. Latureiden käytöstä aiheutuva epälineaarinen kuormitus saattaa vääristää jakelujännitteen aaltomuotoa. Aallonmuoto vääristyy latureiden ottaessa epäsinimuotoisia virtoja, jotka aiheuttavat verkon jännitteen vääristymistä sekä kokonaissärön kasvamista. Jännitteen säröytymistä suurempi ongelma

on kuitenkin energiankulutuksen kasvaminen ja siitä aiheutuva jakeluverkon kokonaiskuormituksen kasvaminen. [22]

Sähköautoilla voi kuitenkin olla myös positiivisia vaikutuksia sähkön laatuun. Edellä kuvattu jännitteen särön kasvamisen on havaittu vähenevän, jos verkkoon on kytketty useita erityyppisiä sähköautojen latureita [22]. Vaikka sähköautot lisäävät verkon kuormitusta, niin sähköautojen akustoilla on myös potentiaalia tukea verkkoa energiavarastojen tapaan silloin, kun sähkönkysyntä on suurinta. Sähköautojen älykkäällä lataamisella on myös mahdollista tasata verkon kuormitusta lataamalla silloin, kun sähkö on edullisinta ja verkossa on vähiten kuormitusta.

### 4.2.3 Pien- ja mikrotuotanto sekä energiavarastot

Pientuotannolla tarkoitetaan tyypillisesti alle 2 MVA:n sähköntuotantoa, joka on liitetty pien- tai keskijänniteverkkoon ja jossa sähköntuotanto tapahtuu käyttökohteiden lähellä. Mikrotuotanto on osa pientuotannosta ja mikrotuotannolla tarkoitetaan tyypillisesti alle 50 kVA:n pienjänniteverkkoon kytkettyä tuotantolaitosta [29]. Pien ja mikrotuotannon määritelmät pohjautuvat tyypillisesti joko voimalan nimellis- tai maksimitheoon. Tyypillisten pien- ja mikrotuotantokohteiden nimellistehot vaihtelevat muutamasta kilowatista satoihin kilowatteihin.

Sähkömarkkina-alaissa pientuotannoksi on määritelty alle 2 MVA:n laitteistot, mutta mikrotuotannon raja vaihtelee hieman lähteittäin. Valtion kestävän kehityksen yhtiö Motiva Oy määrittelee mikrotuotannoksi kaikki alle 50 kVA:n laitteistot [29]. Standardissa SFS-EN 50438 pienjänniteverkon mikrogeneraattoreiksi on määritelty tuotantolaitteet, jotka on kytketty sähkönjakeluverkkoon korkeintaan 3x16 A sulakkeilla. Jakeluverkkoyhtiöissä mikrotuotannon rajana käytetään kuitenkin usein Energiategollisuus ry:n verkostosuosituksessa YA9:13 määriteltyä 100 kVA:n nimellistehoa [65].

Valtaosa uusista pien- ja mikrotuotantolaitteistoista on aurinko- ja tuulivoimaloita, mutta myös muun muassa biokaasua, pienvesivoimaa, dieselvoimaa sekä pien-CHP:tä hyödynnetään tuotannossa. Jakeluverkkoon liitettävän pien- ja mikrotuotannon määrä kasvaa jatkuvasti. Verkkoon liitettävälle tuotannolle on useita eri syitä, joita ovat muun muassa sähkön siirto- ja energiamaksuissa säästäminen, jatkuvan sähkön saannin turvaaminen sekä ilmastonmuutoksen ehkäisy käyttämällä uusiutuvia energialähteitä. Jakeluverkkoon liitetyistä tuotantomuodoista etenkin uusiutuviin energialähteisiin perustuva pien- ja mikrotuotanto on yleistynyt voimakkaasti. Kaikkein yleisin ja nopeimmin yleistyvä tuotantomuoto on aurinkovoima. Taulukossa 6 on esitettyä sähköverkkoon liitetyn pientuotannon nimellistehon määrä tuotantomuodoittain. Taulukon 6 tiedoissa on huomioitu kaikki vuoden 2016 lopussa jakeluverkkoon kytketyt pien- ja mikrotuotantokohteet, joiden yksikkökoot ovat nimellisteholtaan alle 1 MW [68].

**Taulukko 6.** Pientuotannon määrä tuotantomuodoittain vuoden 2016 lopussa [68].

Tuotantomuoto	Nimellisteho [MW]
Aurinko	27,0
Tuuli	19,0
Bio	13,7
Vesi	34,2
Diesel	59,3
Muu	2,8
<b>Yhteensä</b>	<b>156,0</b>

Elenia Oy:n verkossa yleisin ja nopeimmin yleistyvä tuotantomuoto on aurinkovoima. Elenian verkossa alle 1 MW:n aurinkosähköjärjestelmiä oli vuoden 2018 elokuussa jo yli 2100 kappaletta. Aurinkosähköjärjestelmien määrän kasvu on ollut erittäin runsasta, sillä vuoden 2017 aikana Elenian verkkoon asennettujen järjestelmien määrä ylitti 1000:n kappaleen rajan. Elenialla pien- ja mikrotuotannon liittämiseksi sähköverkkoon on huomioitava muun muassa seuraavat asiat [31]:

- Jakeluverkkoyhtiö antaa laitokselle kytkentäluvan ja tuotantolaitoksen jännitteen sekä taajuuden tulee olla verkkoyhtiön kanssa sovittujen raja-arvojen sisällä
- Tuotantolaitos ei saa aiheuttaa häiriötä jakeluverkkoon, eikä tuotantolaitos saa syöttää jakeluverkkoa silloin, kun jakeluverkossa on käynnissä keskeytys
- Mikäli tuotantolaitos tai tuotantolaitoksen tuottama sähkö eivät ole vaatimusten mukaisia, niin tuotantolaitoksen haltijan vastuulla ovat tuotantolaitoksen aiheuttamat vahingot muille verkon käyttäjille sekä jakeluverkonhaltijalle
- Jakeluverkonhaltija voi tarvittaessa puuttua tuotantolaitoksen toimintaan, mikäli tuotantolaitos aiheuttaa häiriötä jakeluverkkoon. Mikäli muut toimet eivät ole auttaneet, niin verkonhaltijalla on myös oikeus poistaa laite sähköverkosta
- Aurinkosähköjärjestelmien ja muiden pientuotantokohteiden suunnittelun yhteydessä on hyvä varmistaa jakeluverkkoyhtiöltä, että verkon oikosulkuvirta on riittävä ilman verkon vahvistusta. Varmistus tulisi tehdä kaikille yli 6,9 kVA:n tuotannolle

Verkostosuosituksessa YA9:13 *Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon* käsitellään tuotantolaitteiston jakeluverkkoon aiheuttamaa jännitemuutosta, jonka suurimmaksi sallituksi arvoksi on määritelty 4 % liittämiskohdan nimellisjännitteestä [65]. Jännitteenmuutoksen huomiointi on tärkeää, jottei koko muuntopiirin niin sanottua välkyntäreserviä kulutettaisi yhdellä käyttöpaikalla.

Aurinkokennot perustuvat puolijohdetekniikkaan, jossa valon energia muutetaan tasavirraksi. Koska aurinkokennoista koostetut paneelit tuottavat tasavirtaa, niin aurinkopaneelien kytkeminen sähköjakeluverkkoon tapahtuu tehoelektroniikkaan pohjautuvien inverttereiden välityksellä. Pien- ja mikrotuotannossa hyödynnettävät tuotantojärjestelmät kytketään pääasiassa pienjännitteiseen jakeluverkkoon. Uusiutuvien pientuotantomuotojen sääriippuvuuden seurauksena niiden vaikutukset jakeluverkkoon vaihtelevat kulloisenkin säätilanteen mukaisesti ja sen seurauksena myös verkkoon siirtyvien laatupoikkeamien ennakointi on haastavaa [2]. Tuotantokohteista jakeluverkkoon voi aiheutua muun muassa seuraavia sähkön laadullisia haasteita:

- Tuotantotason ollessa korkealla järjestelmät saattavat aiheuttaa verkkoon jännitteen nousua
- Jännitteen epäsymmetriaa etenkin silloin, kun verkkoon liitetään yksivaiheista tuotantoa
- Jännitetason vaihtelua sekä nousua välkyntäarvoissa

Aurinkosähköjärjestelmien sekä tuulivoimaloiden on myös havaittu aiheuttavan jakeluverkkoon harmonisia yliaaltojännitteitä sekä resonanssi-ilmiöitä. Yleisimmin edellä mainittujen järjestelmien verkkoon syöttämät yliaallot liitetään järjestelmissä käytettäviin inverttereihin [33].

Energiavarastojen hyödyntäminen verkossa on yleistymässä, jotta sähkön saatavuus ja sähkön laatu saadaan turvattuun myös muuttuvan sähkökulutuksen ja sääriippuvaisen tuotannon yleistyessä. Energiavarastoja voidaan toteuttaa useilla eri teknologioilla, joita ovat muun muassa akustot, lämminvesivaraajat, vauhtipyörät sekä pumppuvesivoimalat. Tällä hetkellä Suomessa sähkön pientuotantoon liittyvä energian varastointi toteutetaan yleisimmin joko litiumpohjaisten akustojen tai lämminvesivaraajien avulla. Nopeimmin yleistyvä energiavarastoissa hyödynnettävä varastointiteknologia on akustot. Akustojen käyttö on yleistynyt viime vuosina nopeasti, koska sähköautojen yleistyessä akustojen kustannukset ovat pudonneet huomattavasti ja niiden toiminta tunnetaan hyvin. Myös sähköautojen akustojen hyödyntämistä energiavarastoina tutkitaan ja parhaimmassa tapauksessa sähköautojen akustojen avulla voidaan hallita sähköjakeluverkoissa esiintyviä nopeita tehonvaihteluita.

Energiavarastoja hyödynnetään useissa käyttökohteissa, joita ovat esimerkiksi mikroverkot, jakeluverkon tehotasapainon ylläpito sekä uusiutuvan energiantuotannon tukeminen. Energiavarastojen tavoitteena on muun muassa:

- Tasoittaa uusiutuvien energialähteiden luomia sähköntuotannon sekä laadun vaihteluita
- Tasoittaa kulutus- sekä tuotantopiikkejä ja tukea sähköntuotantoa
- Vähentää verkon komponenttien rasitusta suurimpien kulutuspiikkien aikana

- Sähköverkon tukeminen, kun sähköautot yleistyvät ja sähkön kokonaiskulutus jatkaa tulevaisuudessa kasvuaan

Energiavarastoja on tutkittu sähköverkon kuormitusvaihtelujen tasoittamisessa sekä sähkön laatuvaihteluiden ehkäisemisessä. Etenkin suuren kapasiteetin omaavien energiavarastojen on havaittu toimivan edellä mainittujen tukena ja sen lisäksi on havaittu, että akustot eivät tarvitse paljoa huoltoa verrattuna esimerkiksi varavoimalaitoksiin. Energiavarastot tukevat myös hajautettua energiantuotantoa tasoittaessaan tuotantoa sekä kulu- tusta ja vähentäessään asiakkaiden kokemien sähkökatkojen kestoajoja. [25]

#### 4.2.4 Tehoelektroniikka

Suuritehoisten virtapiirien ohjaamisessa ja säädössä hyödynnettävää elektroniikkaa kutsutaan tehoelektroniikaksi. Nykypäivänä tehoelektroniikkaa hyödynnetään lähes jokaisessa sähköenergiaa hyödyntävässä laitteessa ja esimerkiksi tässä luvussa 4 käsiteltävät sähkölaitteet (lämpöpumput, sähköautot, pien- ja mikrotuotanto sekä energiavarastot) pohjautuvat kaikki tehoelektroniikkaan. Tyypillinen tehoelektroniikan käyttökohde on konvertteri, jolla muokataan sähköjärjestelmien jännitetasoja tai taajuuksia. Tehoelektroniikan sovellutukset mahdollistavat muun muassa tasasähkölaitteiden hyödyntämisen vaihtojännitteisessä sähköjakeluverkossa. [15, s.17-18]

Sähköjakeluverkkoon asennettavan tehoelektroniikan määrä kasvaa jatkuvasti. Tehoelektroniikan yleistymisen on havaittu aiheuttavan verkossa esiintyvien yliaaltojännitteiden määrän kasvamista. Yliaaltojen vaikutuksia on käsitelty tarkemmin luvuissa 2.2.5 ja 2.2.6. Tehoelektroniikka yleistyy muun muassa seuraavista syistä [67]:

- Tulevaisuuden sähköverkkojen on hyödynnettävä tehoelektroniikkaa, jotta sähköjakelu saadaan turvattu
- Uusiutuvan tuotannon kytkeminen verkkoon vaatii tehoelektroniikkaa
- Moottoriohjaukset toteutetaan pääosin tehoelektroniikkaa hyödyntäen ja ohjaukset kehittyvät jatkuvasti
- Liikenteen siirtyminen sähköä hyödyntäviin ajoneuvoihin tarvitsee toimiakseen älykästä tehoelektroniikkaa
- Yleistyvät valaistuslähteet esimerkiksi LED-valaistukset vaativat toimiakseen tehoelektroniikkaa

Tehoelektroniikkaan pohjautuvien laitteiden on havaittu aiheuttavan verkkoon sekä harmonisia että väliharmonisia yliaaltojännitteitä [21][57]. Yleisimpiä tehoelektroniikan komponentteja, jotka aiheuttavat laatupoikkeamia ovat tyypillisesti säätölaitteita, joihin kuuluvat muun muassa ylikuormassa olevat muuntajat, hakkuriteholähteet, tyristorikäytöt, taajuusmuuttajat sekä invertterit. Taajuusmuuttajakäytöillä on usein myös verkon välkyntää pienentävä vaikutus verrattuna siihen, jos taajuusmuuttajakäytöllä oleva laite olisi kytketty verkkoon esimerkiksi suoraikäynnistyksellä [57].

Tehoelektroniikka on yleistynyt sähköverkossa niin kovassa tahdissa, että lainsäädäntö sekä vaatimukset eivät huomioi kaikkia tehoelektroniikan aiheuttamia ilmiöitä. Tästä hyvänä esimerkkinä ovat puutteelliset vaatimukset epä- ja väliharmonisille yliaaltojännitteille. Kyseisten ilmiöiden aiheuttamat ongelmat ovat kuitenkin tiedossa ja oletettavissa on, että vaatimukset ovat tulossa lähitulevaisuudessa.

Pienjänniteverkon sähkön laadulle haasteita ovat tuoneet myös yleistyvien pientuotantokohteiden yhteydessä lisääntyvät invertterit. Joissakin jakeluverkkoyhtiöissä on esimerkiksi löydetty tapauksia, joissa verkon oikosulkuvirta ja invertterien säädöt ovat rajoittaneet tuotantokohteen tuotannon määrää [45]. Tutkimuksessa [45] on invertterien säätöjä parantamalla saatu nostettua tuotantotehoa noin 35 %. Tutkimuksessa on yritetty löytää kohteeseen parhaita säätöjä invertterille ja pohdittu, että laitetoimittajan olisi hyvä asentaa laitteisiinsa hyvät perusasetukset jo ennen kuin laite toimitetaan asiakkaalle. Tässä on kuitenkin hyvä huomioda, että edellä mainitut ongelmat ovat melko harvinaisia, mutta kuitenkin mahdollisia, jos verkkoon lisättävää aurinkosähköjärjestelmää ei mitoiteta riittävän tarkasti.

### 4.3 Nykyisen selvitysmallin haasteet

Nykyisen laatuvaihteluihin liittyvän selvitystyön suurimpana haasteena on se, että jakeluverkonhaltijoille tieto verkon laatuvaihteluista tulee usein vasta sitten, kun sähkönkäyttäjä tekee ilmoituksen havaitsemistaan vaihteluista sähkön laadussa. Perinteinen ratkaisu pienjänniteverkon laatuvaihteluihin on ollut verkostolaskennan perusteella tehtävät vahvistukset ja saneeraukset sekä vikojen ennaltaehkäisyyn liittyvät jakeluverkon kunnossapitotyöt. Tyypillisesti laatuvaihteluiden mahdollinen tutkinta tapahtuu siis asiakasilmotusten pohjalta.

Nykyisen selvitysmallin runko on esitetty tämän luvun alussa (kuva 8, sivu 41). Osassa sähkön laatuvaihteluihin liittyvistä tapauksista vaihtelun aiheuttajan selvittäminen voi olla haastavaa, jos laatuvaihteluun yhdistetyn käyttöpaikan sähkönkulutus poikkeaa huomattavasti laatumittauksen aikana verrattuna käyttöpaikan normaalikulutukseen. Normaalikulutuksella laatumitattu käyttöpaikka voi aiheuttaa verkkoon laatupoikkeamia, mutta poikkeavalla kulutuksella poikkeamat eivät ilmene ja tarvittavien toimien kartoittaminen vaikeutuu.

Asiakasilmoituksiin vaikuttaa myös se, että sähkönkäyttäjien sähkölaitteet ovat erilaisia ja käyttäjien ilmoituserkkyys vaihtelee suuresti. Verkossa suoritettujen laatumittausten perusteella on havaittu käyttöpaikkoja, joista on ilmoitettu sähkön laatuvaihteluista, vaikka standardien vaatimukset täyttyvät erittäin hyvin ja myös sellaisia käyttöpaikkoja, joista ei ole tullut ilmoitusta, vaikka verkossa on esiintynyt reilusti laatupoikkeamia, esimerkiksi välkyntää.

## 4.4 Tavoitteet selvitykselle tulevaisuudessa

Tulevaisuudessa sähkön laatuun vaikuttavat hajautetun tuotannon lisääntyminen sekä siihen liittyvät toimet, joita ovat muun muassa entistä laajempi kysyntäjousto sekä energian varastointi. Muita jo havaittavissa olevia paineita sähkön laatuvaihteluiden selvittämiseksi tuovat sähkönkäyttäjien kulutustottumusten muutokset sekä yleinen teknologioiden kehittyminen. Sähkönkäyttäjien sähkönkulutus on muuttunut ihmisten tullessa entistä tietoisemmiksi omasta sähkönkulutuksestaan ja esimerkiksi asumisen energiatehokkuus on usein valtamedioissa esillä. Omalta osaltaan ihmisten sähkön kulutustottumuksiin vaikuttaa varmasti myös halu vaikuttaa ilmastonmuutokseen.

Sääriippuvien ja hajautettujen sähköntuotantomuotojen yleistyessä sähkön tasaisen saatavuuden turvaaminen tulee muuttamaan sähköverkon rakennetta. Sääriippuvien uusiutuvien energianlähteiden yleistyminen tulee aiheuttamaan kasvavaa tarvetta sähköenergian varastoinnille. Jakeluverkon muutostila tuo painetta myös laatuvaihteluiden selvittämiseksi. Tulevaisuudessa sähkön laatuvaihteluiden selvityksessä panostetaan laatuvaihteluiden havainnointiin ja laatupoikkeamien ennakkointiin jo ennen asiakasilmoituksia. Laatuongelmien ennakkointia edesauttaa muun muassa sähkönjakeluverkkojen muuttuminen älyverkoiksi sekä mittauskomponenttien kehittyminen.

Tulevaisuuden laatupoikkeamat tulevat luultavasti liittymään aiempaa enemmän edellä mainitun sähkön tuotannon vaihtelevuuteen sekä siihen liittyvään tehoelektroniikkaan. Toisaalta jakeluverkon maakaapelointi tulee vähentämään sään aiheuttamia laatupoikkeamia ja vanhaa verkkoa saneerattaessa on myös odotettavaa, että verkon oikosulkuvirta kasvaa. Oikosulkuvirran kasvun seurauksena on mahdollista, että sähkönkäyttäjän sähkölaitteiden aiheuttamien sähköisten ilmiöiden aikaansaamat laatuvaihtelut tulevat jäämään entistä paikallisemmiksi.

Laatuvaihteluiden selvittämistä tulevaisuudessa tulevat helpottamaan mittalaitteiden jatkuva kehittyminen ja uudet tavat hyödyntää verkosta saatavaa mittaus tietoa. Tavoitteena on, että sähkön laatuvaihteluiden selvitystyö sekä laatupoikkeamien toteaminen tulee tulevaisuudessa muuttumaan entistä ennakoivammaksi ja selvitysprosessia saadaan yhtenäistettyä siten, että tapausten käsittely olisi mahdollisimman johdonmukaista. Seuraavaksi tässä diplomityössä tutkitaan yhtä mahdollista tapaa, jolla sähkön laatuvaihteluiden selvitystä pyritään toteuttamaan ennakoivammin.

## 5. KULUTUSMALLIN LUOMINEN

Kulutusmallilla tarkoitetaan tässä työssä mallia, jonka avulla voidaan mallintaa sähkönkäyttöpaikossa tapahtuvia kulutusmuutoksia. Työssä mallinnettavia kulutusmuutoksia ovat lämmitykseen liittyvät kulutusmuutokset (muun muassa lämpöpumput) sekä sähköautojen lataamiseen liittyvät kulutusmuutokset. Työssä aiemmin käsitellyjä pien- ja mikrotuotantokohteita ei pyritä tässä työssä havaitsemaan, koska jos verrataan esimerkiksi lämpöpumppuja ja pientuotantokohteita, niin pientuotantokohteista ilmoitetaan aina jakeluverkkoyhtiöille. Pientuotantokohteista ilmoittamiseen vaikuttaa varmastikin se, että verkkoon syötettyä tuotantoa ei huomioida laskutuksessa, jos AMR-mittaria ei ole ohjelmoitu tuotannolle. Tässä diplomityössä kulutusmallin määrittelyssä hyödynnetään pääosin nykyisen sukupolven AMR-mittareita sekä tuntisarjoja, mutta määrittelyissä pyritään myös huomioimaan seuraavan sukupolven AMR-mittarit ja niin sanotut varttisarjat. Tässä luvussa käydään läpi, että millä kriteereillä ja rajauksilla kulutusmallissa hyödynnettyjä kulutusmuutoksia lähdettiin rajaamaan ja että millä toimilla mallia pyrittiin tarkentamaan.

Kulutusmallin selvityksen ohella tässä luvussa käsitellään myös loistehon huomioimista sähkönkuluttajien käyttöpaikoilla. Loistehon osalta käsitellään sellaisten käyttöpaikkojen huomiointia, jotka ottavat suuria loistehoja suhteessa pätötehoon. Luvussa käsitellään myös muita toimia, joilla sähkönkäyttöpaikkojen kulutusmuutoksista voitaisiin saada paremmin tietoa sähköverkkoyhtiöille. Lisäksi luvussa otetaan kantaa tuleviin AMR-mittareihin sekä seuraavan sukupolven mittareissa hyödynnettävien mittaussarjojen pituuteen.

Kulutusmallin luomisessa huomioidaan verkkotietojärjestelmän verkostolaskennalla saatava sähköverkon laskennallinen vahvuus, AMR-mittareilta saatavat mittaustiedot sekä ulkoinen lämpötila. Kulutusmallissa hyödynnetään myös verkossa tehtyjä laatumittauksia niiltä osin, missä laatumittauksissa havaittujen laatuerojen aiheuttajat ovat tiedossa. Kulutusmallin määrittelyn jälkeen mallia testattiin suurempaan käyttöpaikkamäärään. Kulutusmallin testauksessa käyttöpaikkoina päätettiin käyttää verkkotietojärjestelmän massalaskennan avulla saatavia pienehkön oikosulkuvirran omaavia käyttöpaikkoja. Tässä työssä pienen oikosulkuvirran verkolla tarkoitetaan vanhojen vaatimusten mukaisia käyttöpaikkoja, joiden laskennallinen oikosulkuvirta on alle 180 A. Verkolta vaaditut oikosulkuvirran arvot riippuvat verkon rakentamisvuodesta ja esimerkiksi ennen vuotta 1989 25 A:n päävarokkeilla pienin vaadittu oikosulkuvirran arvo oli 87,5 A. Oikosulkuvirran arvon lisäksi kulutusmallissa testaamisessa huomioituilla käyttöpaikoilla sähköenergiankulutus on yli 8 MWh vuodessa. Testauksessa malli ilmoitti käyttöpaikoista, joissa mallin mukaan oli kulutusmuutoksia. Kyseisiin mallin ilmoittamiin käyttöpaikkoihin tehtiin asiakaskysely, jotta kulutusmallin toimivuutta voitaisiin todentaa ja mallia saataisiin tarkennettua.



## 5.1 Kulutusmallin määrittely AMR-datan pohjalta

Tässä diplomityössä kulutusmuutosten arvioimisessa keskitytään pääasiassa verkon osiin, joissa kulutusmuutokset aiheuttavat suurimpia muutoksia sähkön laatuun. Työssä laatuvaihteluiden tutkiminen päädyttiin rajaamaan sähkönkäyttöpaikkoihin, joissa laskennallinen oikosulkuvirta on alle 180 A ja käyttöpaikan liittymispisteen pääsulakeko on 25 tai 35 ampeeria. Rajaamiseen oikosulkuvirran perusteella päädyttiin siksi, että oikosulkuvirraltaan vahvoissa verkoissa kulutusmuutosten aiheuttamat mahdolliset laatuongelmat jäävät usein paikallisiksi aiheuttaen laatuongelmia vain liittymispisteen jälkeiselle asiakkaan omalle verkolle. Rajaamiseen liittymiskoon perusteella päädyttiin siksi, että käyttöpaikkojen tutkimista yhtenäistää se, kun kulutusmuutokset ovat samaa kokoluokkaa. Malliin valitut liittymiskoot ovat myös sähkönjakeluverkon yleisimpiä.

Kulutusmallin kannalta tutkittavia käyttöpaikkoja lähdettiin rajaamaan käyttöpaikoista, jotka ovat laatumitattu ja joissa laatupoikkeaminen aiheuttaja on tiedossa. Kulutusmalliin otettiin kuitenkin myös sellaisia käyttöpaikkoja, joita ei ollut laatumitattu, mutta joissa laatuvaihtelun aiheuttaja oli tiedossa. Seuraavaksi kohteita rajattiin aiemmin mainitun verkon laskennallisen oikosulkuvirran avulla. Rajaamisen avulla työssä päädyttiin käsittelemään 29 käyttöpaikan mittaustietoja. Jokaiselle kulutusmallin käyttöpaikalle haettiin useamman vuoden tuntisarjat sekä lämpötilatiedot. Se kuinka monelta vuodelta tuntisarjoja hyödynnettiin, määräytyi sen mukaan, oliko käyttöpaikan kulutusmuutoksen aiheuttajan käyttöönottoajankohta tiedossa. Mikäli ajankohta oli tiedossa, niin tuntisarjoja haettiin vähintään laitteen käyttöönottovuodelta sekä sitä edeltäneeltä ja seuranneelta vuodelta. Laatupoikkeamia aiheuttaneista käyttöpaikoista 21 oli varustettu lämpöpumpulla, 5 sähköautolla ja 4 käyttöpaikkaa käytti muita laatupoikkeamia mahdollisesti aiheuttavia laitteita, joita olivat muun muassa erinäiset moottorikäytöt sekä suuritehoiset pumput. Yhdellä käyttöpaikalla oli sekä maalämpöpumppu että sähköauto, joten 29:llä käyttöpaikalla tutkittavia aiheuttajia oli 30.

Osalle kulutusmalliin valittujen sähkönkäyttöpaikkojen omistajista suoritettiin puhelinhaastattelu. Puhelinhaastatteluissa pyrittiin selvittämään muun muassa mahdollisimman tarkka tieto, milloin kulutusmallissa tutkittavana olevan kulutusmuutoksen aiheuttama laite on lisätty sähköverkkoon. Mikäli kulutusmuutoksen epäiltiin aiheutuvan lämmitysmuodon muutoksesta, niin sähkönkäyttöpaikkojen omistajille suoritettun puhelinhaastattelun haastattelurunko koostui seuraavista kysymyksistä:

1. Mikäli käyttöpaikallanne on lämpöpumppu, niin milloin kyseinen lämpöpumppu on asennettu? (kk/vvvv)
2. Liitetyn laitteen nimellistehon suuruus?
3. Mikä oli käyttöpaikkanne lämmitysmuoto ennen laitteen / laitteiston asentamista? (esimerkiksi sähkölämmitys, puulämmitys, öljylämmitys, tms.)
4. Mikä on käyttöpaikkanne nykyinen lämmitysmuoto?

5. Onko käyttöpaikallenne lisätty muita suuritehoisia sähkölaitteita? (pumppuja, pientuotantoa, kompressoreja, sähköauton latauspiste tms.)
6. Jos suuritehoisia laitteita on lisätty, niin milloin kyseiset laitteet on asennettu? (kk/vvvv)

Kulutusmallissa on pyritty huomioimaan lämpötilojen vaikutus kulutusmuutoksiin hyödyntämällä ilmatieteenlaitokselta saatavissa olevia lämpötilatietoja. Lämpötilatiedot on haettu kutakin kulutusmallin käyttöpaikkaa lähinnä olevalta säähavaintoasemalta. Lämpötilatiedot on haettu samalta ajanjaksolta kuin kulutustiedot ja myös lämpötilat ovat tuntisarjona. Lämpötilojen huomiointi on tärkeää, sillä tutkittavista kohteista valtaosa on omakotitaloja ja omakotitalojen vuotuisesta energiantarpeesta suuri osa tulee talojen lämmityksestä.

### **5.1.1 Lämmitysmuodon muutoksesta aiheutuvan kulutusmuutoksen mallintaminen**

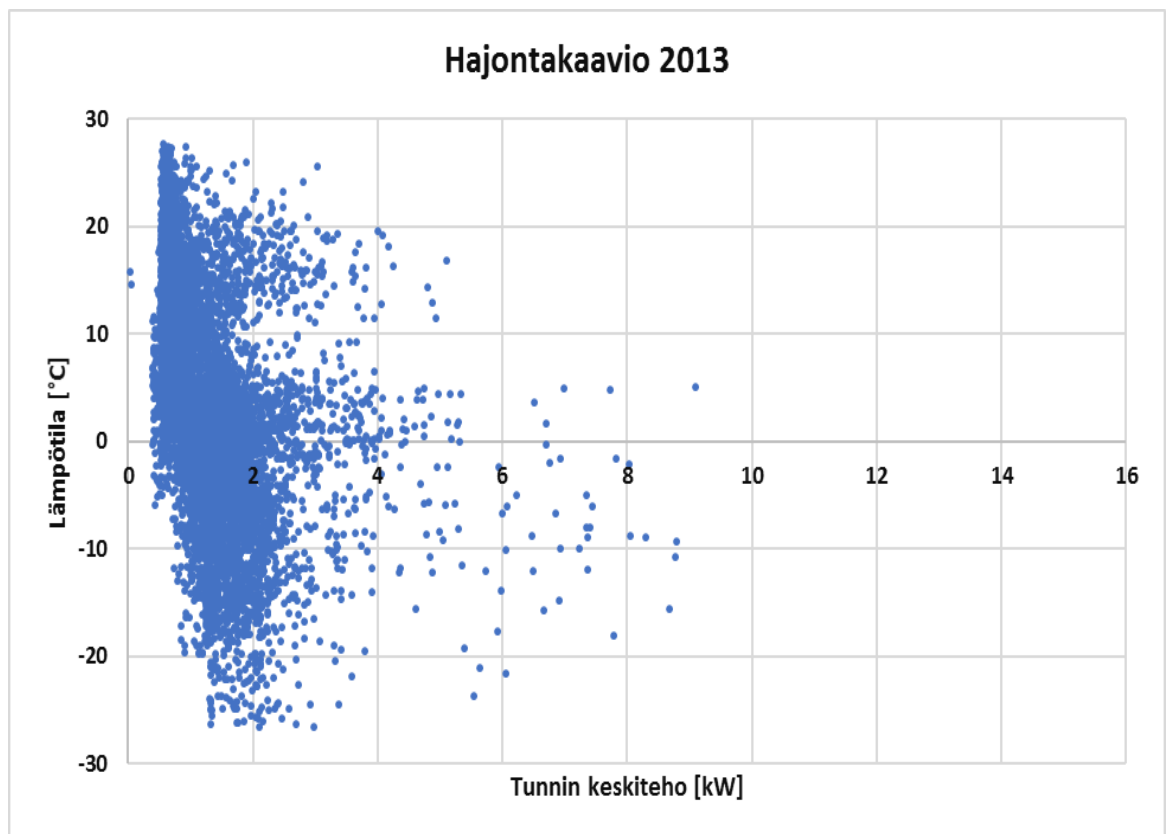
Tässä luvussa keskitytään kulutusmuutoksiin, jotka ovat aiheutuneet, kun käyttöpaikka on vaihtanut lämmitysmuotoaan. Lämmitysmuodon muutoksissa keskitytään etenkin käyttöpaikkoihin, joissa on siirrytty hyödyntämään lämpöpumppuja. Mikäli kulutusmallin käyttöpaikassa on siirrytty esimerkiksi sähkölämmityksestä maalämpöön, niin sähkön kokonaiskulutuksen voidaan olettaa pienentyneen ja jos käyttöpaikka on siirtynyt muusta kuin sähkölämmityksestä (kaukolämpö, puu, öljy, jne.) maalämpöön, niin sähkön kokonaiskulutuksen voidaan olettaa kasvaneen.

Valtaosassa tämän luvun kuvista (kuvat 12 – 18) ja taulukoista (taulukot 7, 8, 9 ja 12) käytetään esimerkkinä samaa sähkönkäyttöpaikkaa. Käyttöpaikan sähkönkulutuksen kuukausittaiset summa-arvot on esitetty taulukossa 7 sivulla 66. Esimerkkinä käytettävän sähkönkäyttöpaikan liittymän koko on 25 A ja käyttöpaikalla on siirrytty vuoden 2014 syyskuussa pellettilämmityksestä maalämpöön. Käyttöpaikalla esiintyi ongelmia sähkölaitteiden toiminnassa ja sähkönkäyttäjällä epäily ongelmien aiheutuvan Elenian jakeluverkon sähkön laadusta. Myöhemmin selvitysten ja laatumittauksen jälkeen selvisi, että ongelmat aiheutuivat sähkönkäyttäjän omasta maalämpöpumpusta, joka otti verkosta jopa yli 50 A:n hetkellisiä virtoja.

Kulutusmuutoksen mallintamisen alussa käyttöpaikoilta mitattuja keskitehoja sekä lämpötilatietoja tutkittiin luomalla niiden tuntisarjojen avulla erilaisia kuvaajia ja kaavioita. Työ aloitettiin luomalla tuntisarjojen pohjalta kuvan 12 mukaisia hajontakaavioita sekä kuvan 13 mukaisia viivakaavioita. Kuvissa 12 - 17 esitetään sähkökäyttöpaikan tunnitaisen keskitehon sekä ilman lämpötilan vuosittaisien tuntisarjojen avulla tehtyjä kuvaajia. Hajontakaaviot (kuvat 12, 14 ja 16) kuvaavat ilman lämpötilojen ja keskitehojen välistä riippuvuutta ja viivakaaviot (kuvat 13, 15 ja 17) kuvaavat vuosien sähkönkulutusta sekä ympäristön lämpötilaa. Kuvissa käytettävät tuntien keskitehot on haettu mittaustiedon

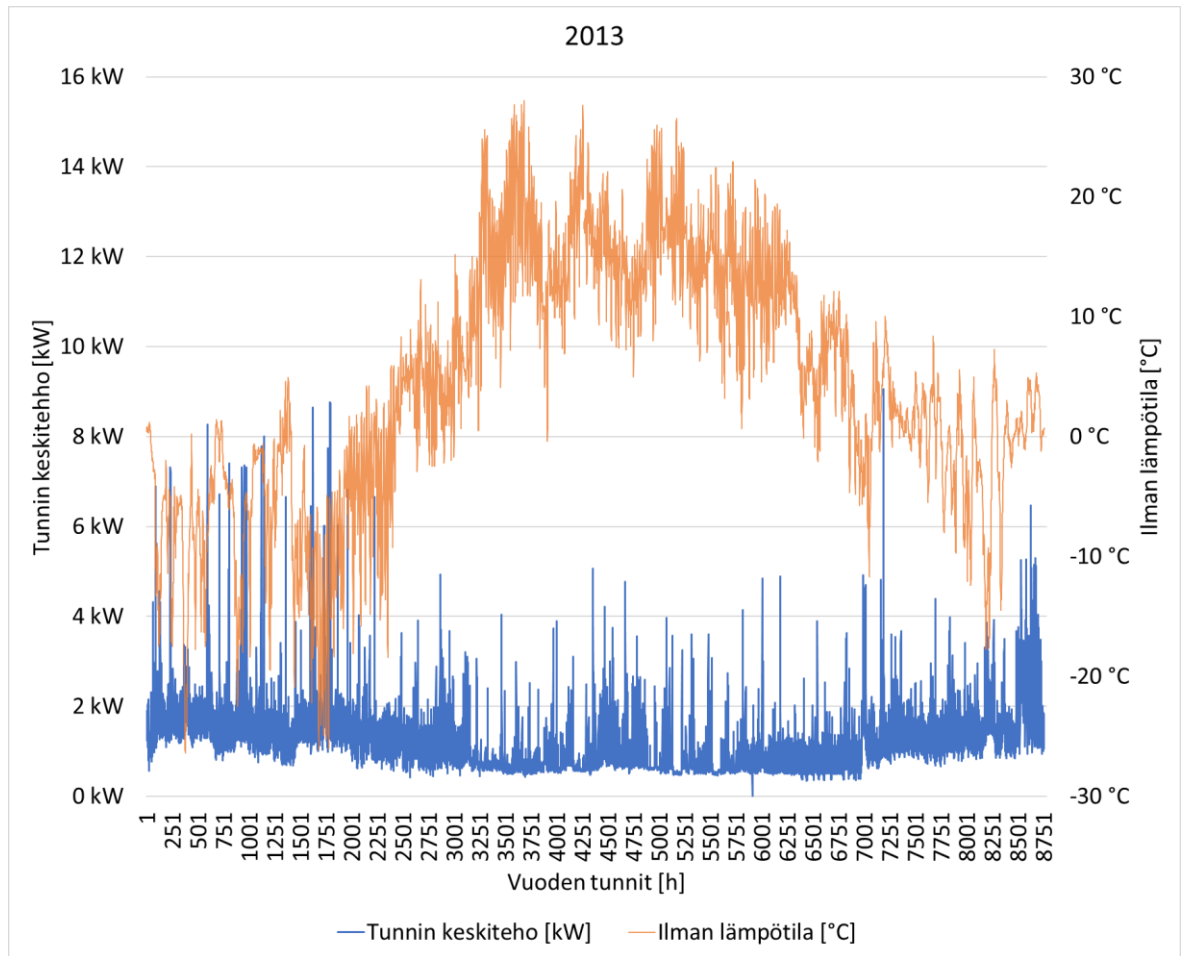
hallintajärjestelmästä ja lämpötilat on haettu käyttöpaikkaa lähimmältä Ilmatieteenlaitoksen sääasemalta.

Kuvassa 12 on esitettynä käyttöpaikan tunnittaisten sähkönkulutusten ja tunnittaisten lämpötilojen välinen hajontakaavio vuodelta 2013. Kuvasta voi nähdä käyttöpaikan niin sanotun normaalikulutuksen ennen vuonna 2014 tapahtuvaa kulutusmuutosta. Kuvasta on mahdollista havaita, että käyttöpaikan sähkönkulutuksen tunnittaiset keskitehot pysyvät koko vuoden ajan melko tasaisesti välillä 0,5 – 4 kW. Kuvasta on myös havaittavissa, että kovimpien pakkasten aikana tuntien keskitehot muuttuvat hieman suuremmiksi ja pienempiä keskitehoja ei esiinny kovien pakkasten aikana.



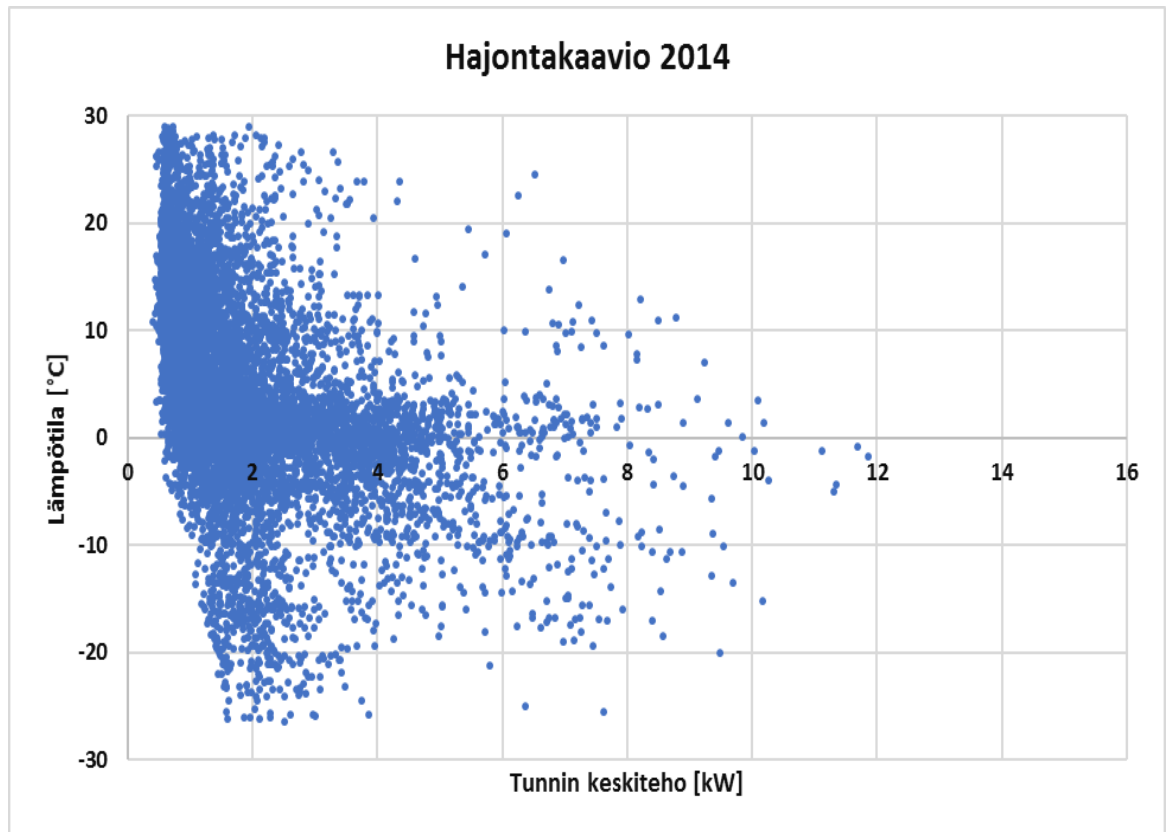
**Kuva 12.** Sähkönkäyttöpaikan hajontakaavio vuodelta 2013.

Hajontakaavioiden lisäksi käyttöpaikoille luotiin myös kuvan 13 kaltaisia viivakaavioita. Kuvassa 13 on esitettynä sähkönkäyttöpaikan vuoden 2013 tuntikohtainen sähkönkulutus sekä vuoden 2013 lämpötilan tuntisarja. Kuvasta on mahdollista havaita, että käyttöpaikan pohjakuorma on noin 1,5 – 2 kW ja että pohjakuorman lisäksi käyttöpaikalla esiintyy lähestulkoon päivittäin suurempia kulutuspiikkejä, joiden aikana tehot ovat välillä 6 – 9 kW. Kesäisin pohjakuorma sekä kulutuspiikit pienenevät jonkin verran, mutta pääosiltaan koko vuosi näyttää samankaltaiselta.



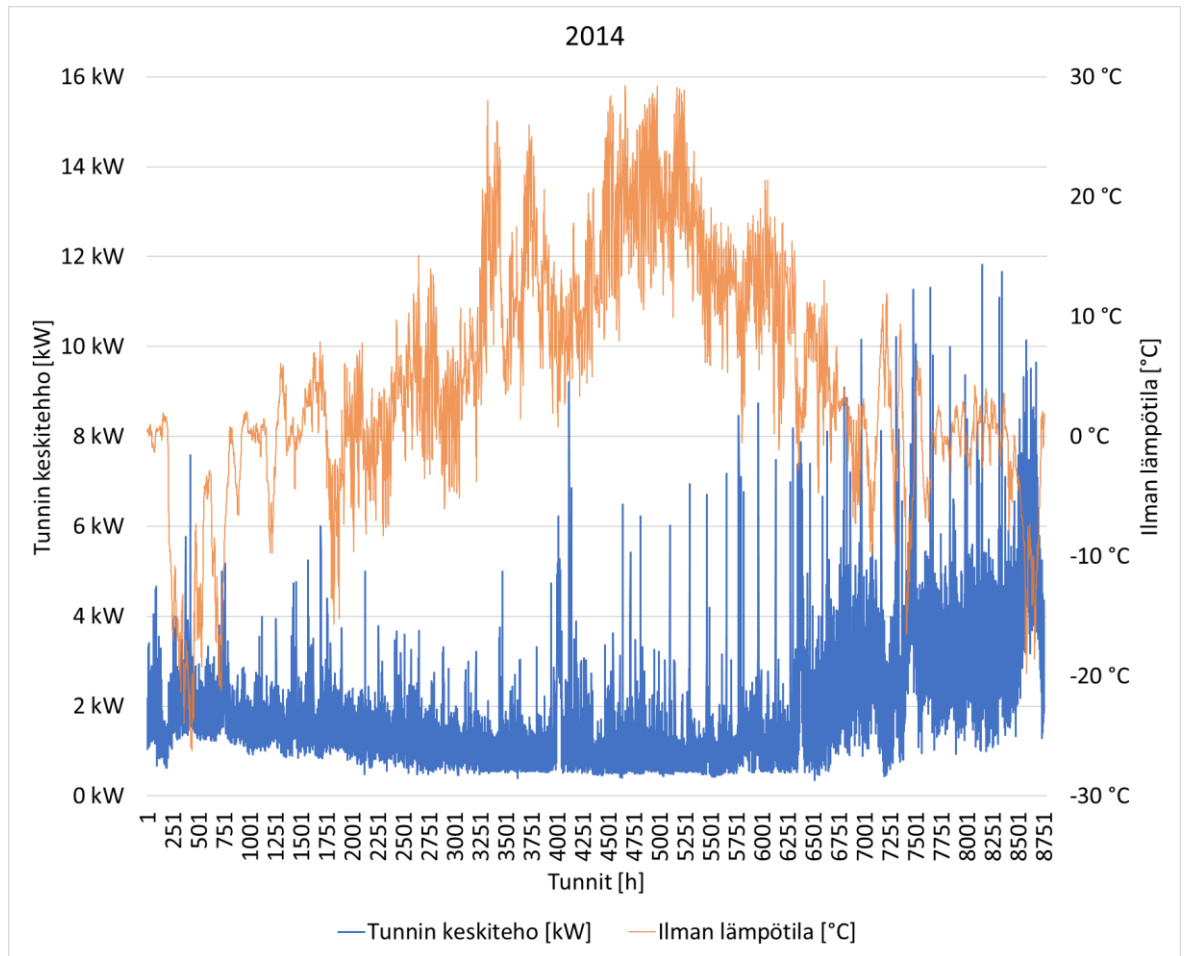
**Kuva 13.** Sähkönkäyttöpaikan sähkönkulutus ennen muutosta.

Kuvassa 14 esitetystä hajontakaaviosta on havaittavissa, että vuoden 2014 aikana käyttöpaikan sähkönkulutus on kasvanut jonkin verran ja vuoden aikana on esiintynyt edellisvuotta suurempia keskitehoja. Kuvasta on mahdollista nähdä myös, että vuoden 2014 aikana keskitehot ovat hajaantuneet edellisvuotta tasaisemmin välille 2 - 8 kW ja nyt suurimmat kulutuspiikit ovat olleet välillä 10 – 12 kW. Koska käyttöpaikan kulutusmuutos tapahtuu kuitenkin vuoden 2014 loppupuolella, niin tämän kaltaisesta hajontakaaviosta muutos ei vielä ole selkeästi havaittavissa.



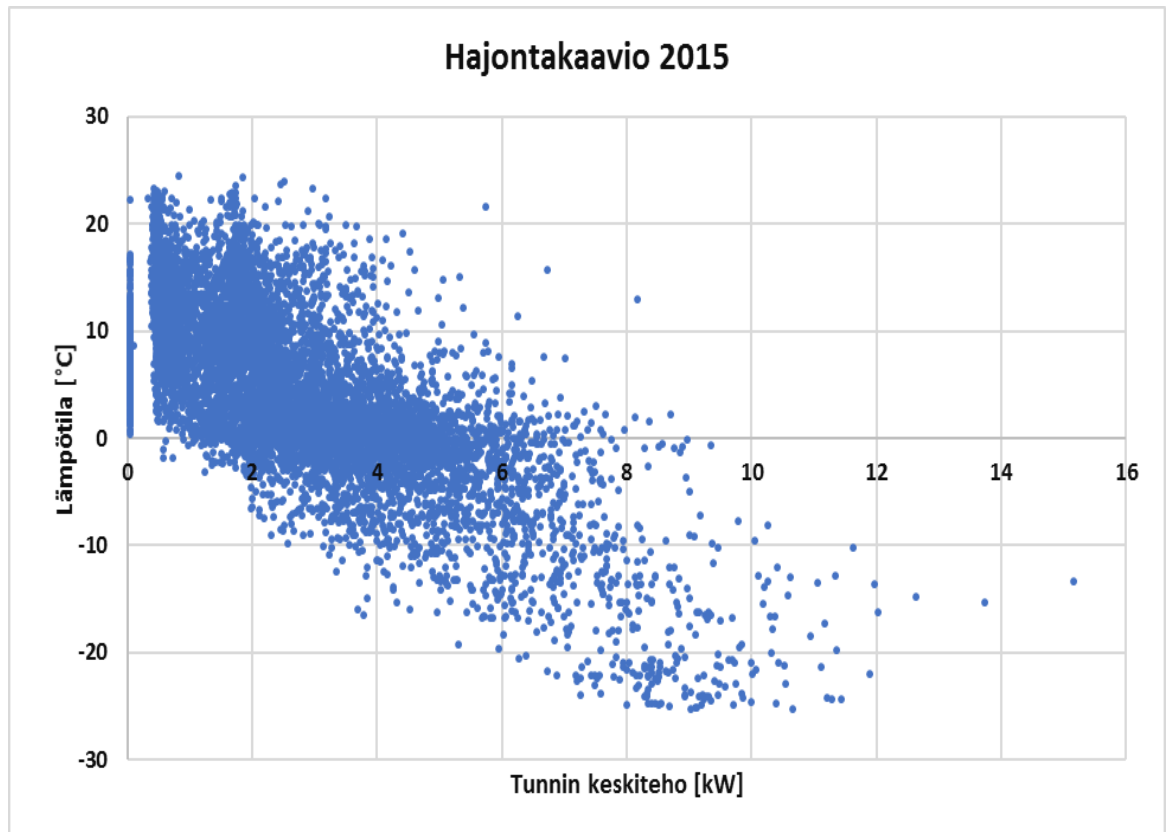
*Kuva 14. Sähkönkäyttöpaikan hajontakaavio vuodelta 2014.*

Kuvasta 15 on havaittavissa sähkönkäyttöpaikalla ilmenevä kulutusmuutos, joka tapahtuu noin tunnin 6300 kohdalla. Muuttunut kulutus jatkuu koko loppuvuoden ajan. Kulutusmuutoksen jälkeen käyttöpaikan sähkönkulutus kasvaa selkeästi ja valtaosa tuntien keskitehoista on yli 2 kW. Kuvasta on mahdollista nähdä myös suurimpien keskitehojen lukumäärän sekä koon kasvaminen. Kulutusmuutos ei selity lämpötilan muutoksella, koska loppuvuosi on jopa lämpimämpi kuin alkuvuosi.



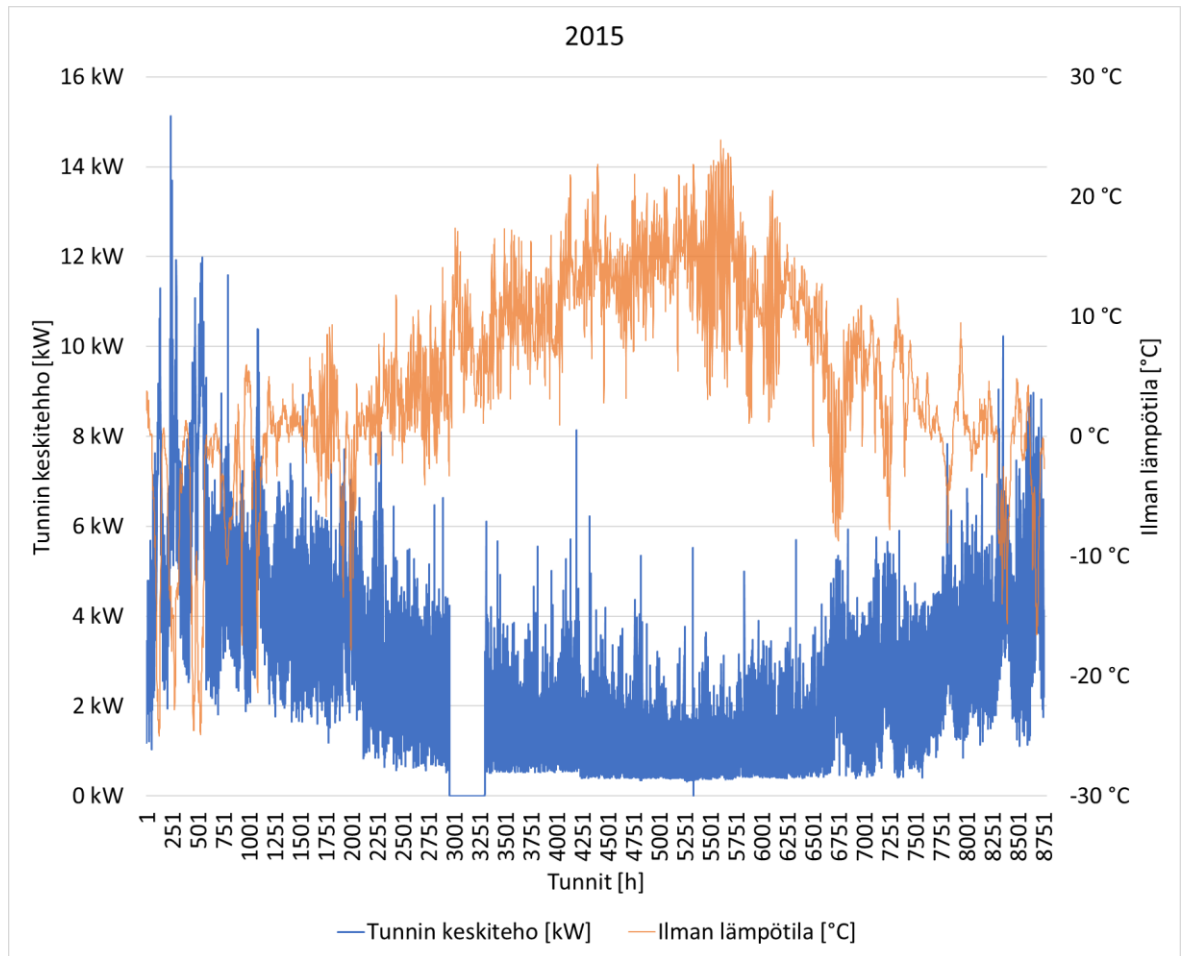
**Kuva 15.** Sähkönkäyttöpaikan kulutusmuutos vuodelta 2014.

Kuvassa 16 on esitetty sähkökäyttöpaikan sähkönkulutuksen sekä lämpötilan välinen hajontakaavio vuodelta 2015. Tämä hajontakaavio eroaa selkeästi edeltävistä hajontakaavioista (kuvat 14 ja 12). Tästä hajontakaaviosta on nähtävissä selkeä riippuvuus tunnin keskitehojen sekä lämpötilojen välillä. Vuonna 2015 käyttöpaikan sähkönkulutus on kasvanut edellisistä vuosista selkeästi ja myös suurimmat tuntien keskitehot ovat jatkaneet kasvuaan. Lämpötilan laskiessa tuntien keskitehot nousevat. Kuvassa näkyvä hetkellinen nollakulutus johtuu käyttöpaikalla suoritetusta laatumittauksesta, joka mitattiin välillä 4.5 – 18.5.2015.



**Kuva 16.** Sähkönkäyttöpaikan hajontakaavio vuodelta 2015.

Kuvasta 17 on mahdollista havaita, että vuonna 2014 tapahtunut kulutusmuutos on pysynyt myös koko vuoden 2015 ajan. Kovimmat kulutuspiikit ovat tapahtuneet samaan aikaan, kun ulkolämpötila on romahtanut ja muinakin aikoina kulutus seurailee melko tarkasti lämpötilaa. Verrattaessa vuoden 2015 (kuva 17) ja vuoden 2013 (kuva 13) tuntisarjojen kuvaajia on havaittavissa, että tuntien välinen keskitehon vaihtelu on kasvanut selkeästi. Myös kuvasta 17 on nähtävissä sähkön laatumittauksen ajankohta 4.5 – 18.5.2015. Koska Elenialla laatumittari asennetaan AMR-mittarin paikalle, niin laatumittauksen ollessa käynnissä mittarilta saatavaa mittaussarjaa ei ole käytössä ja mittaustiedonhallintajärjestelmä arvioi laatumittauksen aikaisen sähkönkulutuksen mittaushistorian perusteella.

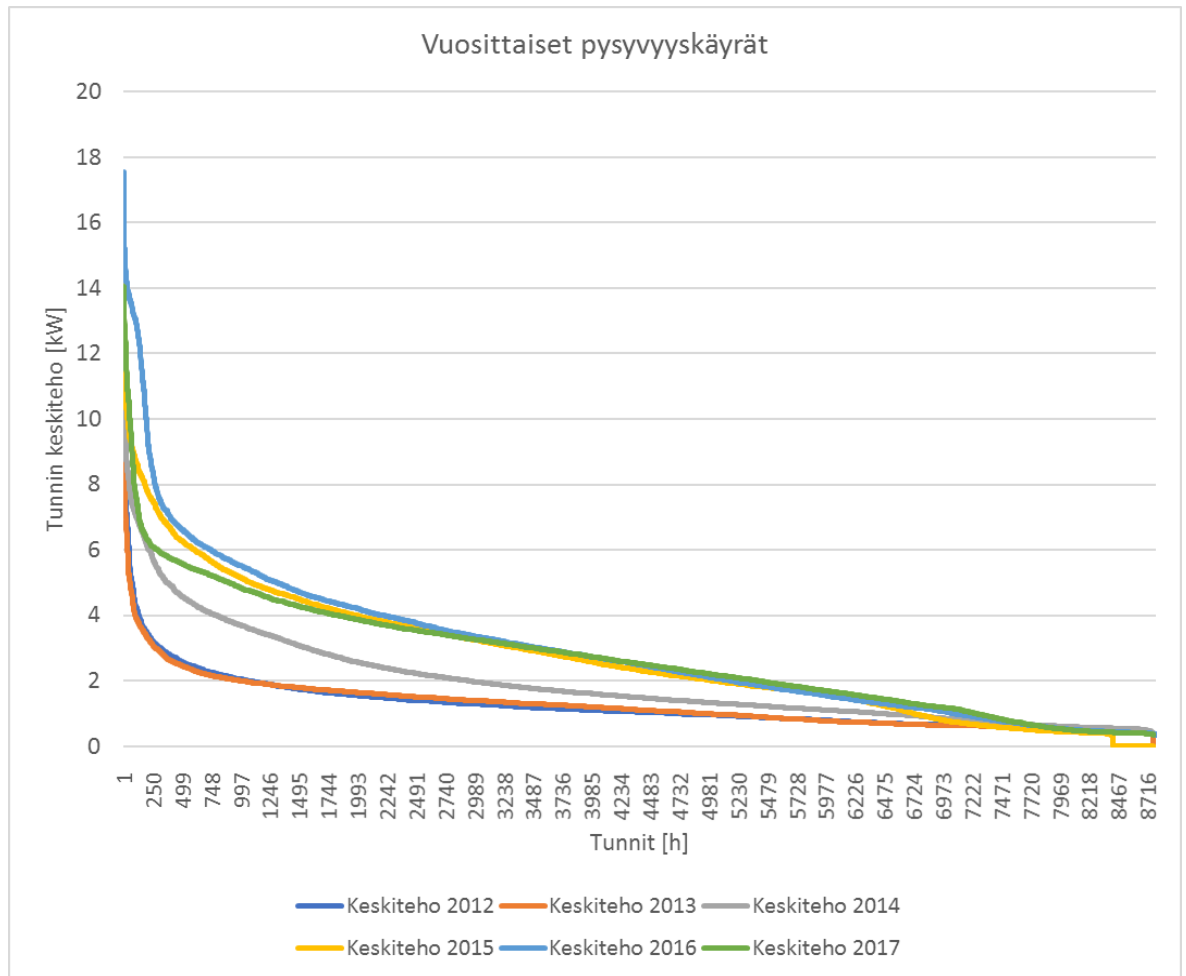


**Kuva 17.** Sähkökäyttöpaikan sähkönkulutus muutoksen jälkeen.

Mikäli kulutusmuutoksia tutkittaisiin vuositasolla, niin edellisten kuvien mukaisia kuvaajia analysoimalla muutoksen tunnistaminen olisi mahdollista. Mikäli kuvaajien avulla haluttaisiin tutkia kulutusmuutoksia pienemmiltä aikaväleiltä, niin sekin voisi onnistua esimerkiksi kuukausittaisen hajontakaavioiden avulla. Kuukausittaisille hajontakaavioille pitäisi muodostaa esimerkiksi lineaarinen kuvaaja ja kuukausien välistä kulmakerrointa tai poikkeamaa tutkimalla muutos voisi olla havaittavissa. Tässä työssä ei kuitenkaan päädytty tutkimaan hajontakaavioiden hyödyntämistä tämän enempää, vaan tunti- ja lämpötilasarjojen suhdetta tutkittiin tarkemmin muilla menetelmillä, joista kerrotaan tarkemmin myöhemmin tässä luvussa.

Kulutusmuutosten havaitsemista tutkittiin kulutusmallissa myös pysyvyyskäyrien avulla ja kuten kuvassa 18 on esitetty, niin osassa tapauksista muutoksen havaitseminen onnistui myös pysyvyyskäyriä hyödyntämällä. Kuvan 18 pysyvyyskäyrän tuntisarjat ovat otettu samalta käyttöpaikalta, kuin kuvat 12 – 17. Kyseisellä käyttöpaikalla kulutusmuutos on tapahtunut loppuvuodesta 2014 ja sen seurauksena vuoden 2014 pysyvyyskäyrä on sitä edeltävien ja sitä seuraavien vuosien välimaastossa. Edellä mainituissa kuvissa olevan käyttöpaikan kulutusmuutos on aiheutunut siitä, kun pellettilämmityksestä on siirrytty maalämpöön.





**Kuva 18.** Sähkönkäyttöpaikan pysyvyyskäyrät vuosilta 2012-2017.

Pysyvyyskäyrät ovat varsin hyvä työväline vuositason kulutusmuutosten havaitsemisessa, mutta lyhyemmälle aikavälille niiden hyödyntäminen voi olla haastavaa. Pysyvyyskäyrien huonona puolena on etenkin se, että niissä ei ole suoraan huomioitu lämpötilojen vaikutusta. Lämpötilojen huomiointi olisi tehtävä esimerkiksi suhteuttamalla tuntisarjoja sekä lämpötilatietoja ja määrittelemällä raja-arvot, milloin muutos on tapahtunut. Tässä työssä pysyvyyskäyrät määriteltiin jokaiselle mallissa mukana olleelle kulutusmuutoksen kokeneelle käyttöpaikalle ja osassa käyrien välinen vaihtelu oli niin suurta, ettei lyhyempien ajanjaksojen mallinnus olisi toiminut niillä luotettavasti.

Taulukossa 7 on esitettyä edellä käsitellyn sähkönkäyttöpaikan kuukausittainen sähkönkulutus kunakin vuotena. Taulukosta näkee, että sähkönkulutuksessa tapahtuu jonkin verran muutoksia vuosien 2012 – 2017 aikana. Suurimmat muutokset tapahtuvat vuosien 2014 ja 2015 aikana ja sen jälkeen sähkönkulutus pysyy melko vakiona.

**Taulukko 7.** *Kuukausittainen sähkönkulutus kilowattitunteina.*

Sähkönkulutus [kWh]	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Tammikuu	1322	1310	1480	4352	5715	3542
Helmikuu	1215	1075	1131	3161	3035	3117
Maaliskuu	920	1316	1206	2924	2981	2805
Huhtikuu	761	1029	941	1923	1807	2211
Toukokuu	645	731	825	761	1159	1632
Kesäkuu	730	566	1011	1202	1005	973
Heinäkuu	661	768	733	911	820	905
Elokuu	767	569	784	749	819	799
Syyskuu	641	578	1260	958	993	1061
Lokakuu	726	805	2026	1814	1732	1744
Marraskuu	947	1009	2504	1969	2733	2243
Joulukuu	1665	1353	3072	3007	3185	2872

Taulukossa 8 on esitetty vuosien 2012 – 2017 jokaisen kuukauden tuntien mittausarvojen varianssilukemat. Tästä taulukosta on jo mahdollista huomata kulutuksen varianssien muutos vuoden 2014 aikana. Varianssiarvoissa on kuitenkin nähtävissä myös yksittäisten kuukausien muutoksia, jotka johtuvat muun muassa ympäristön lämpötilojen vaihtelusta. Vuosien 2013 ja 2014 kesien varianssien välinen muutos selittyy pitkälti sillä, että vuoden 2014 kesällä oli jonkin verran kylmempää jaksoja, joina lämpötila putosi reilusti alle 10 asteen.

**Taulukko 8.** *Kuukausittaisten keskituntitehojen varianssit.*

Tuntien keskittehojen varianssi	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Tammikuu	1,03	0,62	0,52	5,25	12,39	5,37
Helmikuu	0,74	0,86	0,30	2,18	1,45	2,52
Maaliskuu	0,26	0,99	0,47	1,64	1,64	1,64
Huhtikuu	0,27	0,30	0,30	1,39	1,05	1,23
Toukokuu	0,17	0,27	0,29	1,45	0,74	1,06
Kesäkuu	0,44	0,16	1,19	1,03	0,99	0,77
Heinäkuu	0,29	0,43	0,43	0,71	0,45	0,74
Elokuu	0,46	0,21	0,77	0,51	0,46	0,46
Syyskuu	0,42	0,24	2,25	0,69	0,60	0,66
Lokakuu	0,18	0,64	1,85	1,38	0,87	1,16
Marraskuu	0,64	0,27	2,33	1,43	1,64	1,20
Joulukuu	1,48	0,73	2,97	2,26	2,16	1,50

Taulukossa 9 on esitetty erään käyttöpaikan kuukausittaisen varianssianalyysin tuloksia. Taulukon ensimmäisellä rivillä on esitetty laskennassa mukana olleet vuodet ja taulukon ensimmäisessä sarakkeessa on esitetty jokaisen mittausvuoden kuukaudet. Vertailussa on laskettu jokaisen vuoden jokaisen kuukauden keskituntitehojen varianssi ja sitä varianssia on verrattu edeltävän vuoden saman kuukauden arvoihin. Taulukossa 9

varianssivertailun tulokset on esitetty prosentteina vertailukuukaudesta. Taulukon 9 käyttöpaikalla otettiin vuoden 2014 syyskuussa käyttöön maalämpöpumppu. Käyttöpaikan edeltävä lämmitysmuoto oli pellettilämmitys, joten maalämpöpumpun hankkimisen yhteydessä sähkönkulutus sekä kulutuksen varianssi kasvoivat.

**Taulukko 9.** Kasvava kuukausittainen varianssianalyysi. Punaisella kuvataan varianssin kasvua yli 250 %:iin edeltävän vuoden samasta kuukaudesta.

Muutos %	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Tammikuu	0	60,3	83,5	1014,5	236,1	43,4
Helmikuu	0	117,3	35,1	721,0	66,5	173,4
Maaliskuu	0	383,0	47,1	351,0	99,9	100,3
Huhtikuu	0	110,9	98,6	465,6	75,6	116,6
Toukokuu	0	159,4	106,6	500,4	51,4	142,7
Kesäkuu	0	35,6	753,0	86,7	95,9	78,1
Heinäkuu	0	145,3	100,1	165,1	63,2	165,3
Elokuu	0	45,5	369,4	65,7	90,5	99,4
Syyskuu	0	59,0	918,5	30,5	87,5	110,7
Lokakuu	0	350,9	290,3	74,6	63,3	132,5
Marraskuu	0	41,4	876,5	61,5	114,3	73,5
Joulukuu	0	49,6	404,5	76,1	95,4	69,5

Taulukko 10 on taulukon 9 kaltainen varianssianalyysiin liittyvä vertailutaulukko, mutta se on tehty eri käyttöpaikan mittausarvojen avulla ja kyseisellä käyttöpaikalla maalämpöpumppua edeltävä lämmitysmuoto on ollut sähkö- ja puulämmitys, jonka seurauksena vuosien välinen vaihtelu on ollut hieman taulukkoa 9 suurempaa. Taulukon 10 käyttöpaikalle maalämpöpumppu on asennettu vuoden 2015 heinäkuussa. Taulukossa esitetyssä varianssianalyysistä on havaittavissa, että maalämpöpumpun käyttöönoton jälkeen sähkönkulutuksen varianssi on pienentynyt huomattavasti.

**Taulukko 10.** *Pienenevä kuukausittainen varianssianalyysi. Punaisella kuvataan varianssin kasvua yli 250 %:iin ja vihreällä kuvataan varianssin laskua alle 30 %:iin edeltävän vuoden samasta kuukaudesta.*

Muutos %	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Tammikuu	0	125,98	92,85	75,25	72,73	84,49	6,93
Helmikuu	0	82,32	75,13	102,81	49,83	10,51	73,62
Maaliskuu	0	87,10	178,42	42,26	123,48	4,87	214,91
Huhtikuu	0	136,44	116,81	82,93	25,81	15,74	89,65
Toukokuu	0	306,91	170,61	33,49	117,09	15,57	125,15
Kesäkuu	0	204,99	112,39	36,08	233,16	4,20	143,90
Heinäkuu	0	151,82	92,86	83,73	3,84	86,45	151,73
Elokuu	0	94,84	112,18	74,67	3,90	127,86	98,76
Syyskuu	0	139,42	83,44	39,67	5,63	322,49	61,07
Lokakuu	0	190,95	15,59	123,22	11,67	429,33	24,58
Marraskuu	0	298,90	14,50	149,31	6,36	277,24	53,76
Joulukuu	0	221,06	38,71	107,01	6,15	75,25	139,71

Kulutusmuutosten aktiiviseen seurantaan varainssianalyysin havaittiin olevan melko tehokas työväline. Varianssianalyysin huomattiin toimivan myös sellaisilla käyttöpaikoilla, joissa pelkkää tunneittaista keskitehoa vertailemalla kulutusmuutosta ei olisi ollut varmuudella havaittavissa. Edellä esitetyn varianssianalyysin tarkkuutta parantaa vertailujakson pituuden määrittely, eli toisin sanoen se, kuinka monelta perättäiseltä kuukaudesta kulutusmuutoksia on havaittavissa. Tässä työssä varianssianalyysin kulutusmuutosten havaitsemiskynnyksen suuruudeksi määritettiin alustavasti vähintään 250 % kasvua ja/tai laskua alle 30 %:n arvoon vuoden takaisesta. Tässä vaiheessa varianssianalyysin havaitsemiskynnyksien arvot olivat vain suuntaa antavia, koska tarkoituksena oli vain testata analyysin toimivuutta. Havaitsemiskynnyksen arvoja tarkennetaan myöhemmin tässä luvussa, kun suoritetaan kulutusmuutosten havaitsemista varianssien sekä lämmitystarvelukujen avulla. Varianssianalyysille määriteltiin myös, että kun kyseisiä havaitsemiskynnyksen ylityksiä on tullut vähintään kolmelta perättäiseltä kuukaudesta, niin käyttöpaikan keskituntitehon voidaan olettaa muuttuneen. Kolmeen perättäiseen kuukauteen päädyttiin analysoimalla malliin valitut käyttöpaikat ja tutkimalla, että montako perättäistä havaintoa voi tulla ilman, että käyttöpaikan lämmitysmuoto olisi muuttunut.

Kaikissa tapauksissa edeltävien taulukoiden mukaiset varianssianalyysit eivät kuitenkaan näytä yhtä helposti tunnistettavissa olevia kulutusmuutoksia ja osassa kohteista kulutusmuutos on tapahtunut jo jonkin verran ennen havaittavissa olevaa kulutusmuutosta. Taulukossa 11 on esitettyä varianssianalyysi käyttöpaikalle, jossa kulutusmuutos on puhe- linhaastattelun perusteella tapahtunut vuoden 2014 elokuussa, mutta havaitsemiskynnyksen ylittävät arvot on havaittu vasta vuoden 2016 ensimmäisellä neljänneksellä. Taulukon arvoissa on havaittavissa kasvua jo ennen havaitsemiskynnyksen ylittymistä, mutta koska

muutokset ovat pienempiä kuin asetettu 250 %:n raja, niin malli ei indikoi muutosta. Taulukon 11 käyttöpaikalla kulutusmuutos on tapahtunut siirryttäessä kaukolämmöstä maalämpöön.

**Taulukko 11.** *Varianssianalyysi käyttöpaikasta, johon maalämpöpumppu on tullut elokuussa 2014. Punaisella kuvataan varianssin kasvua yli 250 %:iin ja vihreällä kuvataan varianssin laskua alle 30 %:iin edeltävän vuoden samasta kuukaudesta.*

Muutos %	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Tammikuu	0	74,0	102,4	106,1	63,4	215,1	134,6
Helmikuu	0	47,9	288,2	78,4	50,7	252,7	121,4
Maaliskuu	0	105,3	198,5	16,5	234,6	427,7	34,8
Huhtikuu	0	189,7	94,8	44,6	79,3	305,9	113,1
Toukokuu	0	114,2	58,6	95,7	182,6	70,1	152,0
Kesäkuu	0	304,7	29,1	179,8	132,5	79,2	107,7
Heinäkuu	0	92,5	46,2	96,7	242,8	22,8	360,8
Elokuu	0	97,2	14,7	235,2	247,3	63,8	201,1
Syyskuu	0	144,1	27,4	253,0	142,8	78,6	175,8
Lokakuu	0	82,3	61,4	239,9	212,2	78,1	189,2
Marraskuu	0	40,7	377,0	64,5	208,8	155,8	94,1
Joulukuu	0	98,0	222,3	63,8	245,6	98,8	111,0

Kaiken kaikkiaan työssä tutkittiin hajontakaavioiden, viivakaavioiden, pysyvyysskäyrien ja varianssianalyysien lisäksi myös muita menetelmiä kulutusmuutosten havaitsemiseksi, mutta edellä mainitut olivat lupaavimpia kulutusmuutosten havaitsemisessa. Tässä työssä päädyttiin kuitenkin tutkimaan tarkemmin varianssianalyysien hyödyntämistä kulutusmuutosten havainnoimisessa. Varianssianalyysiin päädyttiin, koska niiden ympärille olisi suhteellisen yksinkertaista kehittää myöhemmin mallin käsittelyyn vaadittava IT-ominaisuus. Varianssianalyysien etuna on myös sen niin sanottu yleispätevyys kaikille mallintamisessa hyödynnetyille kulutusmuutoskäyttöpaikoille, joissa muutos oli tapahtunut lämmitysmuodon vaihdon seurauksena.

Jotta mallissa saatiin huomioitua myös vuosittainen lämpötilojen vaihtelu, niin kulutusmuutosten mallintamista tehtiin myös mitattujen keskituntitehojen sekä laskettujen lämmitystarvelukujen avulla. Mallissa lämmitystarvelukujen laskeminen suoritettiin hyödyntämällä Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasemilta saatavissa olevia tuntisarjoja. Tuntisarjoihin perustuvien lämmitystarvelukujen havaittiin vastaavan melko hyvin Ilmatieteen laitokselta suoraan saatavissa olevia lämmitystarvelukuja, vaikka valmiiden lukujen ja käyttöpaikan välinen etäisyys voi kasvaa melko suureksi. Keskituntitehoja ja lämmitystarvelukua hyödyntämällä kulutusmuutos voidaan havaita jo vuoden 2015 aikana myös taulukossa 11 esitetyllä käyttöpaikalla.

Taulukossa 12 havaitsemiskynnyksen arvoja on tarkennettu siten, että arvojen on kasvetava vähintään 190 prosenttiin tai laskettava alle 40 prosenttiin edeltävän vuoden arvosta. Havaitsemiskynnyksen ylärajan arvo on saatu selvittämällä kullekin kulutusmallin käyttöpaikalle suurin arvo, jolla malli ilmoittaa kulutusmuutoksesta sekä pienin arvo, jolla malli ei ilmoita vääristä havainnoista. Ylärajaksi määritelty 190 % on näiden kahden lasketun arvon välillä. Havaitsemiskynnyksen alaraja on saatu ylärajaan verrattuna käänteisellä tavalla, eli selvitetty pienin arvo, jonka avulla saadaan ilmoitus kulutusmuutoksesta sekä suurin arvo, joka ei vielä ilmoita vääristä havainnoista.

Taulukossa 12 on esitettyä käyttöpaikan kuukausittaisten keskituntitehojen varianssien ja lämmitystarvelukujen välisen suhteen muutos prosentteina edellisen vuoden arvoista. Taulukot 9 ja 12 on luotu saman käyttöpaikan mittaustiedoista ja taulukossa 12 on havaittavissa, että lämmitystarvelukuja hyödyntämällä analysistä on poistunut sellaisia kuukausia, joissa havainto kulutusmuutoksista oli johtunut lämpötilojen vaihtelemisesta. On kuitenkin huomioitava, että havaitsemiskynnyksen arvot ovat taulukoissa erilaiset.

**Taulukko 12.** *Kuukausittaisen varianssin sekä lämmitystarveluvun suhteen muutos verrattuna edeltävään vuoteen. Punaisella kuvataan seurattavan suhdeluvun kasvua yli 190 %:iin edeltävän vuoden samasta kuukaudesta.*

Muutos %	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Tammikuu	0	64,3	75,2	1121,8	189,3	59,8
Helmikuu	0	149,7	43,4	688,4	61,8	150,7
Maaliskuu	0	278,6	73,2	352,1	92,1	94,4
Huhtikuu	0	114,9	109,6	479,7	75,1	93,2
Toukokuu	0	255,3	67,5	553,5	84,3	53,0
Kesäkuu	0	169,6	111,5	103,0	129,2	60,1
Heinäkuu	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elokuu	0	100,9	104,4	0,0	0,0	67,6
Syyskuu	0	101,6	622,3	58,0	48,6	72,0
Lokakuu	0	371,0	249,4	86,2	59,5	129,1
Marraskuu	0	41,0	828,8	75,8	81,5	85,6
Joulukuu	0	78,9	377,9	79,5	87,8	71,7

Kulutusmuutoksen havainnoinnissa testattiin myös varianssien sekä lämmitystarvelukujen vertaamista useamman edellisen vuoden arvojen keskiarvoon. Tässä huonona puolena oli se, että kulutusmuutos näkyi myös muutosta seuraavina vuosina aiheuttaen useita perättäisiä kolmen kuukauden havaintoja niin kauan kunnes keskiarvo lopulta tasoittui. Ylimääräisistä havainnoista johtuen käyttöpaikat, joissa kulutusmuutos tapahtui olisi pitänyt käsitellä muista poikkeavalla tavalla, jotteivat ylimääräiset havainnot työllistäisi havaintojen käsittelijöitä.

### 5.1.2 Sähköautojen lataamiseen liittyvän kulutusmuutoksen mallintaminen

Tässä työssä tarkasteltiin lähemmin kulutustietoja viideltä käyttöpaikalta, joissa kolmella oli käytössä Teslan valmistamat täyssähköautot ja kahdella oli muiden valmistajien valmistamat ladattavat hybridautot. Sähköautojen latauksen aiheuttamien kulutusmuutosten havaitseminen aiemmin käytetyllä kuukauden havaitsemisjaksolla ei tuottanut täysin luotettavia tuloksia, joten työssä kokeiltiin myös lyhyempien ajanjaksojen hyödyntämistä. Sähköautojen aiheuttamien kulutusmuutosten havaitsemista vaikeutti etenkin lataustehojen vaihtelu. Lataustehot vaihtelevat automerkkien sekä mallien mukaan ja esimerkiksi Teslan mukana toimitetaan yksivaiheiseen lataamiseen vaadittava Schuko-kaapeli, joka lataa 3 kW:n teholla sekä kolmivaihekaapeli, jolla lataaminen onnistuu 11 kW:n teholla. Maksimissaan Teslaa voidaan kotioloissa ladata erikseen ostettavan latausaseman avulla, jossa latausteho voi olla jopa 16,5 kW. Tuntisarjojen ja asiakkailta saatujen tietojen perusteella yhdellä kulutusmalliin valitulla sähköautolla käytävällä käyttöpaikalla on ollut käytössä suuriteholaturi ja yhdellä keskitehoinen kolmivaihelaturi. Muilla käyttöpaikalla oli käytössä pienempitehoisia latausmenetelmiä, jotka eivät olleet ympärivuotisessa käytössä.

Kun sähköautoa ladataan vanhojen vaatimusten mukaisesti rakennetusta sähköverkosta, niin sähkön laadun kannalta todennäköisimmin sähkön laatuvaihteluita ja laatupoikkeamia aiheuttavat sähköautojen suurempitehoiset laturit, mutta pienen oikosulkuvirran omaavassa verkossa myös yksivaiheisen lataamisen aiheuttama epälineaarisuus voi aiheuttaa laatuvaihtelua. Sähköautojen latauksen havaitseminen oli haastavaa, koska autoja ei ladattu käyttöpaikoilla päivittäin ja latausajat vaihtelivat usein. Käyttöpaikan sähkönkulutuksen ollessa vähäistä oli sähköauton aiheuttama energiankulutuksen hetkellinen kasvu havaittavissa. Vaikka sähköauton lataamisesta seurannut energiakulutuksen kasvu olikin havaittavissa, niin luotettavan mallin luominen muutoksen ympärille osoittautui haastavaksi.

Sähköautojen lataamisesta aiheutuneiden kulutusmuutosten mallintaminen oli haastavaa koska lataustehoja on useita erilaisia ja latausaika määräytyy aina sen hetkisen akuston varaustason mukaan. Pienempien (noin 3 kW) lataustehojen mallintaminen oli erityisen haastavaa, koska hetkelliset 3 kW:n tehomuutokset sekoittuvat helposti muun vaihtelevan sähkönkulutuksen sekaan. Tällä pienellä sähköautomäärällä havaittiin, että säännölliset keskikokoiset ja sitä suuremmat (noin 10 kW:sta ylöspäin) lataustehot näkyvät tuloksissa lähestulkoon samalla tapaa, kuin lämmitysmuodon muutokset.

Osalle käyttöpaikoista sähköauton hankintavuoden havaitseminen oli haastavaa, koska sähköauton yhteydessä oli uusittu käyttöpaikan sähköt kokonaisuudessaan ja samalla myös vaihdettu lämmitysmuotoa esimerkiksi maalämpöön. Näiden muutosten seurauksena käyttöpaikan energiankulutus on muuttunut kokonaisuudessaan. Sähköautojen hankintavuotta pyrittiin selvittämään asiakaskyselyin, mutta vastauksia tuli niukasti.

Kuukausittaisten analyysien avulla yhdeltä käyttöpaikalta oli mahdollista havaita selkeitä sähköauton lataussyklejä. Kyseisellä käyttöpaikalla oli kolmivaiheinen laturi, joten kulutusmuutokset olivat sen verran suuria, että muutos ilmeni samoilla kriteereillä ja kynnyсарvoilla, joita hyödynnettiin myös lämmitysmuotojen muutosten havaitsemisessa. Myös toisella kolmivaiheista laturia hyödyntävällä sähkökäyttöpaikalla sähköauton lataussyklit olivat luultavasti havaittavissa, mutta koska käyttöpaikalle oli tullut samoihin aikoihin myös maalämpöpumppu, niin havaitun kulutusmuutoksen aiheuttajasta ei saatu varmuutta.

Lataussyklien havaitsemisen yhteydessä kokeiltiin myös tarkastelujaksojen pituuden lyhentämistä kuukaudesta kahteen viikkoon. Kuukausiarvoista siirryttäessä kahden viikon arvoihin kulutusmuutoksia oli nopeampaa havaita tapahtuneen muutoksen jälkeen ja kuukausiarvoihin verrattaessa kulutusmuutoksia näkyi tuloksissa aiempaa enemmän. Lyhyempien havaitsemisjaksojen hyödyntäminen sähköautojen lataamisesta aiheutuvien kulutusmuutosten havaitsemisessa oli kuitenkin haasteellista, koska sähköautojen lataaminen oli usein hetkellistä ja kulutuksen kasvun aiheuttajan varmistaminen oli haastavaa. Tässä korostui epäsäännöllisen ajomatkan ja latausajan tuoma epävarmuus. Yleispäteviä usealle käyttöpaikalle toimivien raja- ja kynnyсарvojen määrittäminen luotettavasti ei onnistunut näillä kulutusmallin käyttöpaikoilla. Auton käyttö on yksilöllistä ja sähköauton lataamisen sykli sekä kesto vaihtelee usein. Sähköautojen lataamisen vaihtelevuuden seurauksena perättäisten havaitsemisjaksojen esiintyminen vaihtelee käyttöpaikkakohtaisesti.

Kaiken kaikkiaan sähköautoista aiheutuvien kulutusmuutosten mallintaminen oli haasteellista, mutta suurempien kolmivaiheisten latureiden aiheuttamat kulutusmuutokset näkyvät varianssianalyyseissä ja sitä kautta ainakin osa niistä on havaittavissa lämmitysmuotojen muutosten tavoin. Yksivaiheisten sähkölatureiden tunnistaminen ei osoittautunut tehokkaaksi edes havaitsemisjaksojen aikaa muuttamalla tai kuvaajia käsittelemällä ja siksi niiden lataussykliä havaitsemiseksi on luultavasti kehitettävä muita keinoja. Yhtä mahdollista yksivaiheisten lataussykliä tunnistustapaa on käsitelty luvussa 5.6.2, jossa käsitellään muun muassa muuntopiiritalle asennettavia laatuominaisuuksiltaan tarkempia AMR-mittareita. Toinen tulevaisuuden vaihtoehto yksivaiheisten lataussykliä tunnistamiselle on vaihekohtaisten tuntitehojen mittaaminen ja vaihekohtaisen tiedon hyödyntäminen kulutusmallissa. Vaihekohtaisia mittauksia on käsitelty luvussa 5.6.

## 5.2 AMR-datan ja verkkotietojen yhdistäminen

Kulutusmallin määrittelyn kannalta jakeluverkon oikosulkuvirran suuruudella ei niinkään ole merkitystä, sillä muutoksia havainnoidaan AMR-kulutusmittausten pohjalta. Jakeluverkon oikosulkuvirran arvolla on kuitenkin suuri merkitys, kun pohditaan kulutusmuutosten aikaansaamia laatupoikkeamia. Kuten työssä on jo aiemmin todettu, niin oikosulkukestoisuudeltaan vahvassa verkossa vaaditaan suhteessa suurempia kulutusmuutoksia, kuin pienemmän oikosulkukestoisuuden omaavassa verkossa.



Kulutusmallissa AMR-mittaustietojen ja verkkotietojärjestelmästä saatavien oikosulkuvirta-arvojen yhdistäminen ja kulutusmuutosten vaikutusten arvioiminen suoritettiin Microsoft Excel -ohjelmalla. Suuremman tietomäärän käsittelyssä kyseinen ohjelma ei ole optimaalinen, mutta mallin luomisessa se oli tehokas apuväline. Luodun mallin testaamisessa haettiin yli kolmen viimeisimmän vuoden tuntisarjat noin 2900 käyttöpaikalta, joten kyseisen tietomäärän käsitteleminen olisi ollut Excelille mahdotonta. Tiedoille suoritettiin kulutusmallissa ennalta määritellyt laskentavaiheet Perl -ohjelmointikieltä hyödyntäen. Tulevaisuudessa kulutusmallia hyödynnettäessä tietojärjestelmien yhdistämisen on suunniteltu tapahtuvan uudella IT-toiminnallisuudella, joka hyödyntää tulevaa Elenia data-asettia.

Käytännössä tietojen yhdistäminen toteutettiin hakemalla Elenian verkkotietojärjestelmästä kaikki kohteet, jotka täyttivät kulutusmuutoksen mallintamisessa asetetut vaatimukset, eli liittymispisteen laskennallinen oikosulkuvirta on alle 180 A, liittymän pääsulakekoko on 25 A tai 35 A ja jossa energiankulutus on yli 8 MWh vuodessa. Edellä mainittuja tietoja suodattamalla päädyttiin käyttöpaikkalistaan, jossa olevien käyttöpaikkojen voidaan olettaa olevan herkkiä sähkön laatuvahteluille.

### 5.3 Kulutusmallin toiminnan tarkastelu

Kulutusmallin toiminnan tarkastelussa tutkittiin lämmitysmuotoon ja sähköautojen suuritehoisiin latureihin liittyvien kulutusmuutosten havaitsemista. Testaamisessa keskityttiin edellä mainittuihin, koska niihin liittyvien kulutusmuutosten havaitsemisessa kulutusmalli vaikutti toimivan tarkemmin, kuin esimerkiksi sähköautojen pienempitehoisiin latureihin liittyvän kulutusmallin.

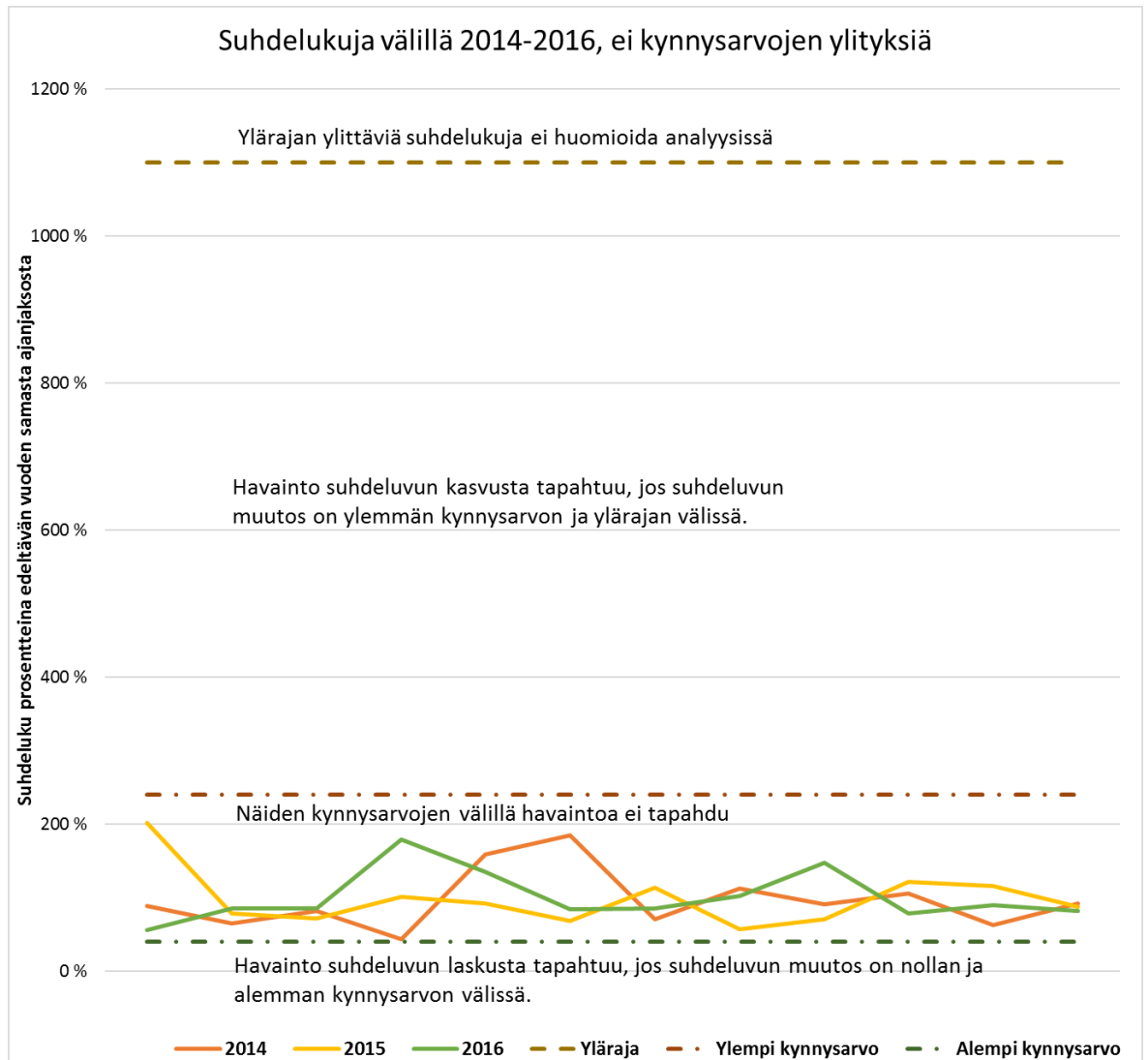
Kulutusmallin toimintaa tarkasteltiin hakemalla käyttöpaikkojen tuntitiedot ja yhdistämällä ne käyttöpaikkojen lämmitystarvelukujen kanssa. Jokaiselta testiin valitulta noin 2900 käyttöpaikalta haettiin tuntisarjat vuodesta 2015 vuoden 2018 kesäkuuhun asti. Kulutusmallin testaukseen valituille käyttöpaikoille laskettiin myös lämmitystarveluvut. Käyttöpaikkakohtaisten lämmitystarvelukujen laskemisessa hyödynnettiin käyttöpaikkojen kuntatietoa, Ilmatieteenlaitoksen tarjoamia valmiiksi laskettuja vertailupaikkakuntien lämmitystarvelukuja sekä kuntakohtaisia korjauskertoimia. Kuntakohtaisilla korjauskertoimilla lämmitystarveluku suhteutettiin lähimpään vertailupaikkakuntaan, jossa lämmitystarveluvut oli laskettu.

Näiden tuntisarjojen sekä lämmitystarvelukujen suhteen laskeminen ja suhdelukujen muutoksen seuraaminen toteutettiin Perl -ohjelmointikielen avulla SQL-tietokantaa hyödyntäen. Muutosta seurattiin vertaamalla suhdelukua edeltävän vuoden saman kuukauden suhdelukuun. Malli ilmoitti käyttöpaikan muuttuneesta sähkönkulutuksesta sitten kun käyttöpaikan varianssin ja lämmitystarveluvun suhteen muutos ylitti tai alitti asetetut kynnyksarvot kolmena perättäisenä kuukautena.

Kulutusmallin toiminnan tarkastelussa päädyttiin käyttämään samoja havaitsemiskynnyksen arvoja, joita hyödynnettiin kulutusmallin määrittelyssä käytetyssä kuukausittaisen varianssien sekä lämmöntarvelukujen suhdetta seurattaessa. Tarkastelun alussa malli siis ilmoitti kulutusmuutoksesta, mikäli suhdeluku oli kolmena perättäisenä kuukautena suurempi kuin 190 % tai pienempi kuin 40 % edellisen vuoden arvoista.

Tarkastelun aluksi havaintoja kulutusmuutoksista saatiin noin 990 käyttöpaikalta. Havaintomäärä oli suhteellisen suuri, koska osalla käyttöpaikoista oli ollut nollakulutuksellisia kuukausia, jotka aiheuttivat suuria muutoksia seurattavaan suhdelukuun. Alun perin suuremmalle kynnyksisarvolle ei ollut säädetty ylärajaa, koska nollakulutukselliset käyttöpaikat pyrittiin rajaamaan pois kulutusmallista vuosienenergiakulutuksen avulla. Tämä vuosienenergiakulutuksella tehty rajausta ei kuitenkaan toiminut oletetulla tavalla, joten alkuperäisiä käyttöpaikkoja tutkimalla päädyttiin säätämään ylärajaksi 1100 %. Edellä mainittuun ylärajaan päädyttiin tutkimalla kulutusmallin määrittelyssä käytettyjä käyttöpaikkoja ja huomaamalla, että käyttöpaikoilla, joissa havainto kulutusmuutoksesta ei liittynyt nollakulutukseen, suurimmat todelliset muutosarvot olivat noin 1000 %. Lisäksi kulutusmallin rajaukseen lisättiin kohta, jonka avulla havainnoista rajattiin pois sellaiset käyttöpaikat, joiden kulutusmuutoksesta malli oli ilmoittanut 18 kuukauden sisällä. Perättäisten havaintojen havaintoaikaa säätämällä saatiin rajattua pois käyttöpaikat, joissa oli useasta havainnosta huolimatta tapahtunut oikeasti vain yksi kulutusmuutos.

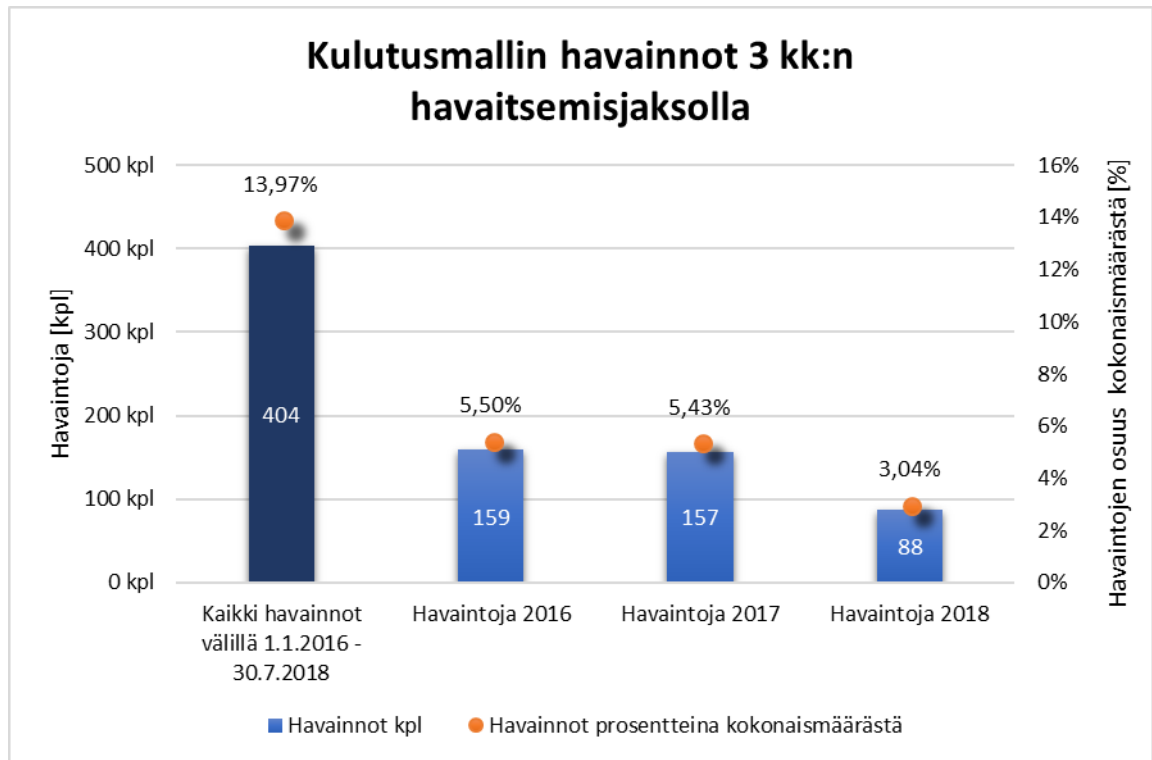
Kulutusmallin havaitsemisarvojen ylärajan lisäyksen yhteydessä myös alkuperäistä 190 %:n kynnyksisarvoa nostettiin aiemmin tehdyn kynnyksisarvojen analyysin ylärajalle, joka oli 240 %. Kynnyksisarvon nostamisen avulla karsittiin sellaisia käyttöpaikkoja, joissa todellista kulutusmuutosta ei ollut tapahtunut. Kuvassa 19 on esitetty erään käyttöpaikan tietojen avulla laskettuja suhdelukuja väliltä 2014 – 2016. Kuvan 19 käyttöpaikalla kulutusmuutosta ei ole tapahtunut, mutta 190 %:n kynnyksisarvoa käytettäessä tältäkin käyttöpaikalta olisi saatu yksi turha kynnyksisarvon ylitys. Kuvassa on esitetty kaikki määritellyt kynnyksisarvot sekä ylärajat, joilla kulutusmuutosten analysointia toteutettiin edellä mainittujen tarkennusten jälkeen.



**Kuva 19.** Esimerkki kulutusmalliin määriteltyjen suhdelukujen seurannasta.

Havaitsemiskynnyksen ylärajan lisäämisellä ja havaintoaikaa sekä ylempää kynnsarvoa säätämällä käyttöpaikkamäärä saatiin laskettua noin 480 käyttöpaikkaan. Vuosittain kulutusmuutoksia oli noin 190 käyttöpaikalla, joka tarkoitti, että kulutusmuutos olisi tapahtunut noin 6,6 %:lla käyttöpaikoista. Saatua käyttöpaikkalista tutkimalla havaittiin, että käyttöpaikoista noin 80 oli GSM- tai radiotukiasemia. Tukiasemat rajattiin pois, koska niissä ei ole tapahtunut tässä malissa tutkittavia kulutusmuutoksia.

Lopputuloksena kulutusmallissa päädyttiin 404 käyttöpaikkaan ja vuosittaiset kulutusmuutosarvot olivat nyt noin 5,5 % testin käyttöpaikoista. Kun kaikki edellä mainitut rajaukset oli suoritettu testin tuloksille, niin saavutettiin kuvassa 20 on esitetyt tulokset. Kuvassa palkeilla on kuvattu havaintojen määriä koko testin ajalta sekä havainnot jaetuna testissä mukana olleille vuosille. Kuvassa 20 oranssilla viivalla on kuvattu kulutusmallin ilmoittamien havaintojen määrää prosentteina testissä mukana olleista käyttöpaikoista.



**Kuva 20.** Kulutusmallin testauksessa saadut havainnot kappaleina sekä prosentteina testin käyttöpaikkojen kokonaismäärästä.

Kulutusmallin testauksessa saavutettuja käyttöpaikkoja arvioitaessa on huomioitava alkuperäiset määritelmät, joiden perusteella mallin käyttöpaikkoja rajattiin. Näitä olivat liittymän pääsulakekoko, verkon oikosulkuvirta sekä vuosienenergiankulutus. Näiden rajausten jälkeen testissä mukana olleet käyttöpaikat olivat pääasiassa haja-asutusalueella ja esimerkiksi kerrostalokohteita ei ollut testissä mukana ollenkaan.

Kuten edellä mainittiin, niin kulutusmalliin tehtyjen tarkennusten avulla kulutusmallin toiminnan testaamisessa ilmoituksia kulutusmuutoksista saatiin 404 käyttöpaikalta, joihin kaikkiin päätettiin suorittaa asiakaskysely kulutusmuutoksista. Kyselyn avulla pyrittiin selvittämään, että onko havaittu kulutusmuutos tapahtunut ja mikä laite havaitun kulutusmuutoksen on aiheuttanut. Toteutettu asiakaskysely on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä A. Liitteenä olevassa asiakaskyselyssä on huomioitava, että kaikki vastaajat näkevät pääkysymykset 1 – 4, mutta kysymysten alakohdat (a, b, c, jne.) näkyvät vain, jos vastaaja on vastannut tietyllä tavalla. Asiakaskyselyssä kysyttiin muun muassa seuraavia asioita:

- Onko käyttöpaikanne lämmitysmuoto vaihtunut ja/tai oletteko ottaneet käyttöön uuden suuritehoinen sähkölaitteen viimeisen kolmen vuoden aikana (pumppuja, pientuotantoa, kompressoreja, sähköauton latauspiste tms.)
- Milloin uusi lämmitysmuoto tai sähkölaite on otettu käyttöön
- Jos lämmitysmuoto on vaihtunut, niin mikä oli käyttöpaikanne edellinen lämmitysmuoto ja mikä se on nykyään

Asiakaskysely oli tarkoitus suorittaa 404 käyttöpaikalle, mutta koska kaikille asiakkaille ei löytynyt joko sähköpostiosoitetta tai matkapuhelinnumeroa ja osalla asiakkaista oli voimassa suoramarkkinointikielto, niin lopulta kysely lähetettiin 335 käyttöpaikalle. Asiakaskyselyyn saatiin vastaus 74 käyttöpaikalta, joten vastausprosentti oli noin 22 %. Asiakaskyselyn tulosten perusteella lämmitysmuoto oli muuttunut 15 käyttöpaikalla ja suuritehoisia sähkölaitteita oli asennettu 9 käyttöpaikalle. Suuritehoiset sähkölaitteet näkyivät tuloksissa seurattavan suhdeluvun kasvuna.

Edellä mainituista 15 käyttöpaikasta 8 siirtyi joko kokonaan tai osittain sähköä käyttämättömästä lämmitystavasta sähköä kuluttavaan lämmitystapaan. Tämän lisäksi 2 käyttöpaikkaa ilmoitti lisänneensä sähköllä lämmitettävien tilojen määrää, joten kaiken kaikkiaan 10 käyttöpaikkaa lisäsi sähkönkulutustaan lämmitysmuodon muutoksen kautta ja analyysissä muutos näkyi suhdeluvun kasvuna. Loput 5 käyttöpaikkaa siirtyivät sähkölämmityksestä joko kokonaan tai osittain erilaisiin lämpöpumppuihin tai puupohjaisiin lämmitysmuotoihin, joten heidän kulutusmuutoksensa suunta näkyi analyysissä laskevana.

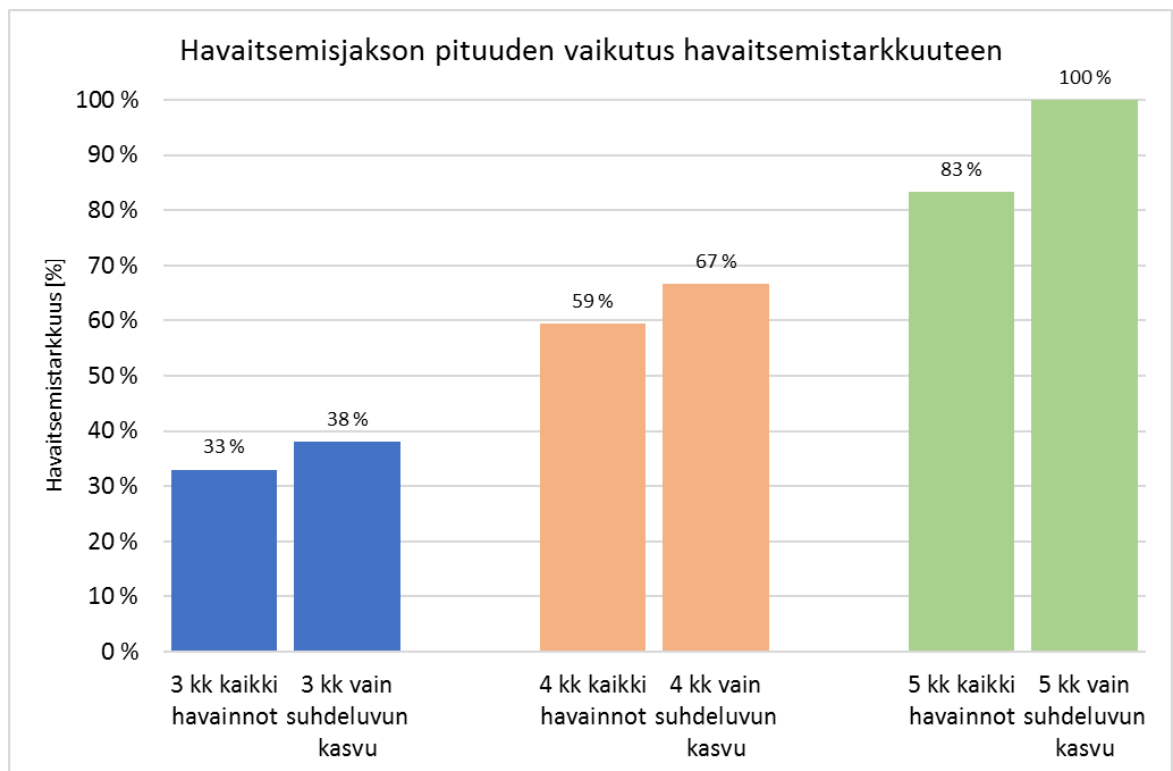
Asiakaskyselyn perusteella kulutusmallin havaitsemistarkkuus 3 kuukauden havaitsemisjaksolla oli siis noin 33 %. Tässä työssä havaitsemistarkkuudella tarkoitetaan asiakaskyselyn perusteella oikeaksi osoittautuneiden havaintojen osuutta kulutusmallin antamista havainnoista. Kulutusmallin antamat virhetulokset johtuivat osittain turhista havainnoista, jotka aiheutuivat suhdeluvun pienenemiseen liittyvistä kulutusmuutoksista. Pienevien suhdelukujen analysoinnissa onnistuttiin kyllä havaitsemaan sellaisia käyttöpaikkoja, joissa kulutusmuutos oli tapahtunut, mutta havaintoja tuli myös käyttöpaikoilta, joissa asiakaskyselyn perusteella kulutusmuutosta ei ollut tapahtunut. Kun havainnoista poistettiin pienevien suhdelukujen analysointi ja suoritettiin vain kasvavien suhdelukujen analysointia, niin 3 kuukauden havaitsemisjakson havaitsemistarkkuus kasvoi noin 38 %:iin.

Koska kolmen kuukauden havaitsemisjakson havaitsemistarkkuus jäi suhteellisen pieneksi, niin kulutusmallin tarkkuutta tutkittiin myös neljän ja viiden kuukauden havaitsemisjaksoa hyödyntäen. Siirryttäessä kolmesta kuukaudesta neljän kuukauden jaksoon havaintojen määrä putosi 404:stä 161:een ja vuosittaiset havainnot putosivat noin 2 – 3 %:iin testissä mukana olleista käyttöpaikoista. Suoritetun asiakaskyselyn tulosten perusteella kulutusmallin tarkkuus neljän kuukauden havaitsemisjaksolla oli noin 59 %, eli selvästi parempi, kuin kolmen kuukauden havaitsemisjaksoilla. Kun kulutusmallin ilmoittamista havainnoista analysointiin vain kasvavia suhdelukuja, niin havaitsemistarkkuus nousi jo 67 %:iin.

Viiden kuukauden havaitsemisjaksolla asiakaskyselyssä mukana olleiden käyttöpaikkojen määrä putosi 80:een ja sen seurauksena otoskoko on melko pieni luotettavaan arviointiin (katso taulukko 13, s. 79). Otoskoon pienenemisestä huolimatta analysointia suoritettiin, jotta myös viiden kuukauden havaitsemisjaksojen hyödyntämisestä saataisiin

edes suuntaa antavia tuloksia. Suoritetun analysoinnin perusteella viiden kuukauden havaitsemisjaksoa hyödyntämällä tulosten havaitsemistarkkuus kasvoi 83 %:iin ja kun analyysissä huomioitiin vain kasvavat suhdeluvut, niin havaitsemistarkkuus kasvoi jo 100 %:iin.

Kuvassa 21 on esitettyä edellä käsiteltyjen havaitsemisjaksojen vaikutus työssä määritellyn kulutusmallin havaitsemistarkkuuteen. Kuvasta on havaittavissa havaitsemisjakson pituuden selkeä vaikutus kulutusmallin tarkkuuteen. Näiden testien pohjalta paras havaitsemistarkkuus on viisi kuukautta ja erityisen tarkasti se toimii silloin, jos analyysissä huomioidaan vain käyttöpaikat, joissa suhdeluku on kasvanut.



**Kuva 21.** Asiakaskyselyn perusteella oikeaksi osoittautuneiden havaintojen määrä prosentteina kunkin havaitsemisjakson kokonaishavaintomäärästä.

Taulukossa 13 on esitetty kunkin tutkitun havaitsemisjakson saamat tulokset hyödyntäen kulutusmallin ilmoittamia havaintoja sekä asiakaskyselyn tuloksia. Taulukon ensimmäisessä sarakkeessa on esitetty kaikki havaitsemisjaksot, joilla kulutusmallin tarkkuutta tutkittiin. Toisessa sarakkeessa on esitetty, että kuinka monesta käyttöpaikasta kulutusmalli teki havainnon kullakin havaintojaksolla. Kolmannessa sarakkeessa on esitetty asiakaskyselyn tulokset siten, että kussakin kohdassa on huomioitu vain vastaukset, jotka kohdistuivat kulutusmallin havaintoihin kullakin havaitsemisjaksolla. Neljännessä ja viidennessä sarakkeessa on esitetty asiakaskyselyssä vahvistuneiden kulutusmuutosten määrä ja kuten edellisessä kohdassa, niin tässäkin vastauksista on huomioitu vain kuhun-

kin havaitsemisjaksoon liittyvät vastaukset. Kuudennessa sarakkeessa on esitetty kulutusmallin havaitsemistarkkuudet, eli siinä on tutkittu asiakaskyselyssä vahvistuneiden kulutusmuutosten ja asiakaskyselyyn vastanneiden suhdetta havaitsemisjaksoittain.

**Taulukko 13.** *Kulutusmallin ja asiakaskyselyn tulokset jaoteltuna kullekin tutkitulle havaitsemisjaksolle.*

Asiakaskyselyn tulokset havaitsemisjaksoittain	Kulutusmallin havaitsemia kulutusmuutoksia [kpl]	Havaitsemisjaksoa koskevat asiakaskyselyn vastaukset [kpl]	Asiakaskyselyssä vahvistuneita lämmitysmuodon muutoksia [kpl]	Asiakaskyselyssä vahvistuneita suuritehoisia sähkölaitteita [kpl]	Kulutusmallin havaitsemistarkkuus [%]
3 kk kaikki havainnot	404	74	15	9	33
3 kk vain suhdeluvun kasvu	235	45	10	7	38
4 kk kaikki havainnot	161	32	13	6	59
4 kk vain suhdeluvun kasvu	114	24	10	6	67
5 kk kaikki havainnot	80	12	7	3	83
5 kk vain suhdeluvun kasvu	56	9	6	3	100

Näiden testien pohjalta kolmen kuukauden havaitsemisjakso osoittautui liian epätarkaksi verrattuna pidempiin havaitsemisjaksoihin. Neljän kuukauden havaitsemisjakso havaitsi kuitenkin noin 87 % kaikista varmistuneista lämmitykseen liittyvistä kulutusmuutoksista ja sen havaitsemistarkkuus oli melkein kaksinkertainen, joten turhia havaintoja tuli huomattavasti vähemmän. Viiden kuukauden havaitsemisjakso havaitsi noin 47 % varmistuneista lämmitysmuodon muutoksista ja tällä havaitsemisjaksolla turhia havaintoja oli erittäin vähän verrattuna kolmen kuukauden jaksoon.

Myöhemmin hyödynnettävä havaitsemisjakson pituus tulee määritellä käyttökohteen mukaan. Mikäli tavoitteena on kulutusmuutosten tunnistaminen mahdollisimman luotettavasti, niin käytetään viiden kuukauden havaitsemisjaksoa. Mikäli verkosta halutaan havaita mahdollisimman usea kulutusmuutos tai saada suuntaa antava arvo verkon kulutusmuutoksista, niin havainnointia kannattaa suorittaa hyödyntämällä neljän kuukauden havaitsemisjaksoa.

Alkuperäisenä suunnitelmana oli suorittaa osalle kulutusmallin ilmoittamista käyttöpaikoista myös käyttöpaikkakohtaisia sähkön laatumittauksia, mutta koska diplomityön aikataulu oli rajallinen ja asiakaskyselyillä saatiin hyväksi todettuja tuloksia, niin laatumittauksia ei yritetty mahduttaa tähän tutkimukseen. Myöhemmin, kun kulutusmallia sovelletaan laatuvahteluiden selvittämisessä, niin laatumittaukset tulevat olemaan aiheellisia sähkön laadun varmistamisessa. Liittymispisteen laatumittauksilla voidaan todeta, onko kulutusmuutoksesta aiheutunut sähkönkulutuksen muutos nostanut myös virrankulutuksen liittymäkokoja suuremmaksi.

## 5.4 Kulutusmallin määrittelyjen tarkennus

Tässä luvussa kerrataan edellisessä luvussa kulutusmallin määrittelyihin tehdyt muutokset sekä kerrotaan muista testissä havaituista kehityskohteista, jotka tulee huomioida myöhemmin, kun kulutusmallin käsittelylle määritellään IT-ominaisuutta. Kuten edellisessä luvussa todettiin, niin kulutusmallille piti tehdä seuraavia muutoksia:

- Ylärajan asettaminen 1100 %:iin, jotta nollakulutuksista aiheutuneet niin sanotut turhat havainnot saatiin rajattua pois
- Ylemmän kynnsarvon muuttaminen 240 %:iin, jotta kulutusmallilla havaitaan varmemmin todellisia kulutusmuutoksia
- GSM- ja radiotukiasemien rajaaminen pois tuloksista. Rajaus tehtiin, koska kyseisillä käyttöpaikoilla ei ole sellaisia kulutusmuutoksia, joita mallissa pyrittiin havaitsemaan.
- Siirtyminen 3 kuukauden havaitsemisjaksoista 4 tai 5 kuukauden havaitsemisjaksoihin
- Kulutusmuutosten analysointia suoritettiin kaikkien käyttöpaikkojen lisäksi myös pelkästään sellaisilla käyttöpaikoilla, joissa suhdeluku kasvoi

Edellä mainittujen lisäksi kulutusmallin ilmoittamien tulosten arvioinnissa havaittiin, että osassa käyttöpaikoista oli havaittavissa kynnsarvojen ylittymistä vielä yli vuosi tapahtuneen kulutusmuutoksen jälkeen. Tämän pääteltiin johtuvan siitä, että kun uutta laitetta otetaan käyttöön, niin sitä ei käytetä vielä optimaalisesti ensimmäisten kuukausien aikana ja tästä syystä havaittu kulutusmuutos saattaa jatkua pidempään, kuin vuoden. Turhien havaintojen välttämiseksi kulutusmalliin on myöhemmin lisättävä raja-arvo, joka säätelee, kuinka nopeasti kulutusmalli ilmoittaa samasta käyttöpaikasta uudelleen. Kulutusmallin ilmoittamista havainnoista voitaisiin esimerkiksi poistaa käyttöpaikat, jotka ilmoittavat kulutusmuutoksesta toisen kerran puolentoista tai kahden vuoden sisällä ensimmäisestä ilmoituksesta.

## 5.5 Kulutusmallin käsittelyyn tarvittavat IT-ominaisuudet

Tässä diplomityössä eniten hyödynnetty kulutusmalli pohjautuu sähkönkäyttöpaikkojen tuntisarjojen ja lämmitystarvelukujen välisen suhteen muutoksen seuraamiseen. Tässä työssä lämmitystavan muutoksen havainnointia tutkittiin pääosin kuukausitasolla, joten tulevaisuudessa käyttöpaikkojen kuukausittainen käsittely tuottaisi diplomityön mukaisia tuloksia. Sähköautojen ja muiden hetkellisempien kuormitusten havaitsemisessa olisi hyvä hyödyntää lyhyempiä tarkastelujaksoja. Tässä työssä sähköautojen lataamisen aikaansaamia kulutusmuutoksia pyrittiin havaitsemaan kuukausittaisen analyysin lisäksi kahden viikon aikaisten kulutusmuutosten arvioinnilla, josta on kerrottu lisää luvussa 5.1.2.



Jakeluverkon jokaisen käyttöpaikan tuntisarjojen ja lämmitystarvelukujen käsittely kuukausittain ei kuitenkaan ole tarpeellista, vaan automaattisen tarkastelun rajausta kannattaa tehdä verkon oikosulkuvirran mukaan. Kuukausittainen käsittely olisi hyvä suorittaa etenkin käyttöpaikoille, joissa laskennallinen oikosulkuvirta on alle 180 A. Vuosittaisten havaintojen määrästä riippuen rajauksessa käytettävää oikosulkuvirtaa voisi myös nostaa esimerkiksi 200 A tasolle. Kulutusmallin käsitteleminen vaatii IT-ominaisuudelta kyvyn hakea verkon kohteet, joissa laskennallinen oikosulkuvirta on alle asetetun raja-arvon. Haetuille sähkökäyttöpaikoille tulee laskea tarkastelujakson mittainen varianssi sekä lämmitystarveluku. Lämmitystarvelukua varten käyttöpaikan tuntisarja on yhdistettävä kuntatietoon, jotta ilmatieteenlaitokselta haettavissa olevat vertailupaikkojen korjauskeruimet ovat hyödynnettävissä. Uudessa sovelluksessa tai toiminnossa olisi oltava ainakin seuraavat ominaisuudet:

- Automaattinen seuranta määritellylle verkolle ja ilmoitus käyttöpaikasta, mikäli kulutusmuutos havaitaan
- Kulutusmallin käsittelyalue on oltava valittavissa ainakin oikosulkuvirran sekä käyttäjän tekemien määrittelyjen mukaan
- Kulutusmuutoksen havaitsemiseen vaadittavan havaitsemisjakson vaihtaminen (nyt lämmitystapojen muutosten havaitsemisessa 4 – 5 kuukautta)
- Kyky ajaa kulutusmalli erikseen määritellylle alueelle, esimerkiksi muuntopiirille ja mahdollisuus ajaa kulutusmalli myös aiemmille vuosille
- Mahdollisuus valita, kuinka pitkä aika havainnosta pitää kulua ennen kuin kulutusmalli voi ilmoittaa seuraavasta muutoksesta
- Mahdollisuus valita, seurataanko myös suhdeluvun pienenemistä vai pelkästään suhdeluvun kasvamista (katso kuva 21 s.78)
- Muita hyviä ominaisuuksia voisivat olla esimerkiksi kyky vaihtaa kulutusmallin käsittelyaikaa esimerkiksi kuukauden ja kahden viikon välillä

Varianssien ja lämmitystarvelukujen avulla mallin tulee pystyä laskemaan suhdeluvut siten, että muutosta voidaan havaita useammalta perättäiseltä kuukaudesta ja suhdelukuja tulee verrata käyttöpaikan edeltävän vuoden saman ajankohdan suhdelukuun. Tässä diplomityössä kulutusmuutosten havaitsemisessa päädyttiin 4 – 5 perättäiseen kuukauteen, mutta IT-ominaisuudessa myös havaitsemisen aikaväliä tulisi pystyä vaihtamaan. Havaitsemisjakson pituus pitää määritellä kulutusmallin käyttökohteen mukaan, jos halutaan tunnistaa muutokset mahdollisimman luotettavasti, niin käytetään viiden kuukauden havaitsemisjaksoa. Mikäli verkosta halutaan havaita mahdollisimman usea kulutusmuutos ja mahdolliset virrehavainnot eivät ole suuri ongelma, niin havainnointia kannattaa suorittaa hyödyntämällä neljän kuukauden havaitsemisjaksoa.

Työssä määritellyn kulutusmallin käsittelytiheys riippuu siitä, halutaanko mallilla tutkia kulutusmuutoksia kuukausitasolla vai tiheimmin/harvemmin. Tässä työssä tehdyssä tes-

tissä kulutusmallia käsiteltiin kuukausitasolla ja mikäli halutaan kuukausittaisia havain-  
toja, niin kuukausittainen käsittelyaika on riittävä. Kulutusmallin käsittely tapahtuu las-  
kemalla seurattavat suhdeluvut ja mikäli yhden kuukauden kynnyсарvo ylittyy, niin kä-  
sittelyssä käytettävän ohjelman tulee tallentaa käyttöpaikkatieto. Seuraavia kuukausia  
verrattaessa huomioidaan edeltävinä kuukausina tallennetut käyttöpaikkatiedot ja sitten,  
kun käyttöpaikalla on tapahtunut asetetut neljä tai viisi perättäistä kynnyсарvon ylitystä,  
niin ohjelman tulee ilmoittaa kulutusmuutosepäilystä.

## 5.6 Vaatimukset seuraavan sukupolven AMR-mittareille

Tässä luvussa käsitellään tulevien sukupolvien AMR-mittareiden sähkön laatuun ja laa-  
tuvaihteluiden selvittämiseen liittyviä ominaisuuksia. Mittausominaisuuksia käsitellään  
laatuvaihteluiden kautta, mutta esimerkiksi tarkempiin mittareiden komponenttivaati-  
muksiin ei tässä työssä paneuduta. Lisäksi tässä luvussa käsitellään loistehon seurannan  
hyötyjä laatupoikkeamia aiheuttavien sähkölaitteiden tunnistamisessa. Tässä työssä mää-  
ritellyn kulutusmallin kannalta tulevien AMR-mittareiden yksi oleellisin ominaisuus on  
mittareilta haettavan mittaussarjan pituus ja sitä käsitellään erikseen luvussa 5.6.1.

Seuraavien sukupolvien AMR-mittareille olisi hyvä saada ominaisuuksia lyhytaikaisen  
välkyntäindeksin mittaamiselle. Vaikka mittarit eivät täysin täyttäisikään standardeissa  
määriteltyjä välkyntämittausominaisuuksia, niin indikaatiivisillakin arvoilla laatuvaih-  
teluiden havainnointi olisi tarkempaa. Myöhemmin jatkokehityskohteena voisikin olla,  
että indikaatiiviset välkyntäarvot haettaisiin automaattisesti niille käyttöpaikoille, joista  
kulutusmalli antaa ilmoituksen. Välkyntäindikoinnin yleistymiselle hidasteena on vielä  
tällä hetkellä kyseisten mittaussominaisuuksien vaikutus mittalaitteiden hankintahintaan.

Sähkökäyttäjien kulutustottumusten muuttuessa ja tehoelektroniikka sisältävien sähkö-  
laitteiden yleistyessä seuraavan sukupolven AMR-mittareissa olisi hyvä lisätä mittaussominaisuuksia yliaaltojen mittaamiseksi. Harmonisten yliaaltojen lisäksi myös välihar-  
monisia yliaaltoja olisi hyvä pystyä havaitsemaan liittymäpisteissä. Kytkeäntäajuuksien  
kasvaessa myös väliharmonisia yliaaltoja esiintyy verkossa entistä enemmän ja ne voivat  
aiheuttaa sähkön laatupoikkeamia. Harmonisista sekä väliharmonisista yliaaltojännit-  
teistä sekä niille asetetuista vaatimuksista on kerrottu tarkemmin luvuissa 2.2.5 ja 2.2.6.

Nykyisen laatuvaihtelutapausten selvittämistä voisi helpottaa, mikäli loistehon määrää  
suhteessa pätötehoon seurattaisiin automaattisesti valtaosassa sähkönkäyttöpaikoista.  
Seurattavan loistehon olisi hyvä olla esimerkiksi Fryzen loistehoa, jotta myös verkossa  
esiintyvät yliaallot huomioitaisiin suhdeluvussa. Fryzen loisteho huomioi perustajuisen  
loistehon lisäksi myös muun muassa yliaaltojen vaikutuksen loistehoon ja lisää niiden  
vaikutuksen loisteholukemaan [6]. Loistehon suhteen seurannalla voisi olla mahdollista  
huomata, kun käyttöpaikalle asennetaan loistehoa kuluttavia laitteita, kuten esimerkiksi  
oikosulkumoottoreita. Luvussa 4.2.1 on kerrottu lisää oikosulkumoottoria hyödyntävien

kompressorien käynnistysvirroista ja niiden vaikutuksesta sähkön laatuun. Loistehon seurannan toteutuessa ja loistehon määrän kasvaessa käyttöpaikalla voisi sähkökäyttäjälle esimerkiksi lähettää yleistietoja suurista käynnistysvirroista ottavista moottoreista sekä virtojen vaikutuksesta muun muassa välkyntään. Loistehon seurannalla voisi myös tutkia halutessaan muuntopiirin käyttöpaikkojen loistehojen suhteita ja sieltä voisi saada apua mahdollisen laatupoikkeaman aiheuttajan tunnistamiseen [32].

Tulevien sukupolvien AMR-mittareille on näillä näkymin tulossa kyky mitata vaihevirtoja sekä vaihekohtaista sähkönkulutusta. Kun vaihekohtaiset mittaukset yhdistetään kulutusmallin analyysiin, niin mallin avulla toteutettava sähkön laatuvahteluiden havaitseminen tulee luultavasti toimimaan entistä tarkemmin. Vaihekohtainen mittaaminen mahdollistaa muun muassa säännöllisessä käytössä olevien 1-vaiheisten sähkölaitteiden paremman tunnistamisen ja niiden sähkön laadullisten vaikutusten paremman arvioinnin. Vaihekohtaisten mittausten hyödyntämismahdollisuuksia tulee tutkia tarkemmin etenkin sähköautojen yksivaiheisten laatureiden tunnistamisessa ja niiden sähkön laadullisten vaikutusten arvioinnissa.

### 5.6.1 Mittausjaksojen pituus

Tässä luvussa käsitellään tulevien AMR-mittareiden mittausjaksojen pituutta. Kuten työssä on aiemmin todettu, niin nykyisestä tunnin mittaisesta taseselvitysjaksoista tullaan siirtymään 15 minuutin mittaiseen taseselvitysjaksoon. Lyhyempään taseselvitysjaksoon siirtyminen tulee olemaan yksi suurimmista muutoksista AMR-mittareiden seuraavassa sukupolvessa. Nykyinen tavoite on, että uuteen taseselvitysjaksoon siirrytään vuosien 2020 – 2025 aikana [1]. Sähkömarkkinoiden muuttuessa entistä reaaliaikaisemmaksi myös jakeluverkosta saatavan tiedon määrä tulee kasvamaan ja se tulee mahdollistamaan entistä tarkemman kulutusmallinnuksen. Reaaliaikaisempi sähkömarkkina mahdollistaa myös sähkökäyttäjille oman sähkönkulutuksensa tehokkaamman seuraamisen ja hallitsemisen.

Tässä diplomityössä määritetyn kulutusmallin kannalta 15 minuutin mittausarjojen voidaan olettaa lisäävän määritellyn mallin tarkkuutta. Kulutusmallin tarkkuuden voidaan olettaa paranevan, koska lyhyemmissä mittausarjoissa sähkönkulutuksen hetkelliset vaihtelut erottuvat nykyistä helpommin. Mikäli AMR-järjestelmissä siirrytään 15 minuutin mittausarjoista käyttämään lyhyempiä esimerkiksi 1, 3 tai 5 minuutin mittausarjoja ja myös kulutusmallissa halutaan hyödyntää lyhyempiä mittausarjoja, niin lyhyemmät sarjat tulee joko muuttaa pidemmiksi sarjoiksi laskemalla tai sitten kulutusmallin havaitsemiskynnyksiä pitää säätää sopivammiksi lyhyemmille sarjoille. Aiempaa lyhyemmät mittausjaksot tuovat lisää käsiteltävää tietoa käyttöpaikoilta tehden käsittelystä nykyistä raskaamman, mutta toisaalta ne luultavasti mahdollistavat myös kulutusmuutoksen nopeamman havaitsemisen. Käyttöpaikoilta saatavan datamäärän kasvaminenkaan ei välttä-

mättä ole tulevaisuudessa ongelma, sillä Elenia on suunnitellut, että sähköverkosta saatavien mittaustietojen käsittely siirtyy tulevaisuudessa uuteen pilvipohjaiseen data-asset palveluun, joka mahdollistaa nykyistä suurempien datamäärien käsittelyn.

Työssä määritelty kulutusmalli toimii nykyisilläkin tuntisarjoilla melko hyvin ja ne mahdollistavat lämmitysmuotojen muutoksen havaitsemisen melko tehokkaasti. Sähköautojen ja muiden sähkön laatuun mahdollisesti vaikuttavien sähkölaitteiden havaitsemisessa lyhyemmistä mittaussarjoista voi olla hyötyä, mutta niiden hyödyntäminen kulutusmallissa vaatii kuitenkin lisäselvitystä. Lyhemmät mittaussarjat saattavat myös aiheuttaa sen, että käyttöpaikkojen yksittäisten laitteiden aiheuttamien kulutusmuutosten tunnistaminen vaikeutuu, koska pohjakuormitus voi vaihdella esimerkiksi minuutin mittaussarjoissa huomattavasti tuntisarjoja enemmän.

## 5.6.2 Tarkempien AMR-mittareiden hyödyntäminen kulutusmallissa

Tässä tapauksessa tarkemmilla AMR-mittareilla tarkoitetaan mittareita, joiden laatuominaisuudet ovat mittaustarkkuudeltaan parempia ja jotka mittaavat useampia laatusuureita, kuin nykyiset käyttöpaikkakohtaiset AMR-mittarit. Tarkemmat AMR-mittarit eivät kuitenkaan ole tarkkuudeltaan tai ominaisuuksiltaan yhtä hyviä, kuin varsinaiset laatumittarit. Tarkempia AMR-mittareita voitaisiin hyödyntää esimerkiksi muuntopiiriasolla ja ne tarkkailisivat koko muutonpiirin laatusuureita. Muita mahdollisia sijoituspaikkoja tarkemmille mittareille voisivat olla esimerkiksi suuremmat pientuotantokohteet, kuten suuret aurinkosähköjärjestelmät. Oikein sijoitettujen tarkempien AMR-mittareiden hyötynä olisi muun muassa kyky havaita sähkön laatuun liittyviä ilmiöitä sellaisissa muuntopiireissä, joissa sähkönkäyttöpaikkojen kokemat laatuvaihtelut ovat todennäköisiä. Tarkempien mittareiden avulla saataisiin parempaa tietoa myös kysyntäjoustossa toteutettavien kuormien ohjausten vaikutuksesta sähkön laatuun. Uusiutuvien energianlähteiden sekä kulutustottumusten muutosten myötä alueelliset erot sähkön laadussa ovat entistä todennäköisempiä ja tarkemmat mittarit mahdollistaisivat myös paikallisen sähkön laadun seuraamisen tarkemmin.

Tarkempien AMR-mittareiden haasteena on muun muassa mittareiden sijoituspaikan määrittäminen. Mikäli mittareita asennetaan suuria määriä verkkoon, niin silloin kustannuskysymysten merkitys kasvavaa ja siksi mittareiden optimaaliset asennuspaikat olisi määriteltävä tarkemmin. Tarkempien AMR-mittareiden hyödynnettävyyttä olisi tutkittava asentamalla mittareita erilaisilla kriteereillä määriteltyihin paikkoihin ja analysoimalla saatuja tuloksia. Edellä mainittu testaaminen onnistuu myös siedettävillä kustannuksilla ja testistä mahdollisesti saatavat tiedot voisivat avata laatuvaihteluiden esiintymispaikkoja entistä tarkemmin. Mittareiden sijoituspaikan määrittelyssä olisi tutkittava minkäläisten laatuvaihteluiden havaitsemiseen tarkemmat AMR-mittarit ovat tehokkaimpia ja minkä tyyppisissä verkoissa kyseiset ongelmat useimmin ilmenevät.

Haasteena on myös havaitun laatuvaihtelun aiheuttajan selvitys etenkin, jos muuntopiirissä on useita käyttöpaikkoja ja potentiaalisia aiheuttajia ei ole havaittavissa verkostolaskennalla tai käyttöpaikkakohtaisilta AMR-mittareilta. Laatuvaihteluiden aiheuttajien selvitys saattaa helpottua tässä diplomityössä määritellyn kulutusmallin sekä IT-ominaisuuden tullessa käyttöön. Tarkempien AMR-mittareiden ilmoittaessa laatuvaihtelusta muuntopiirille ajettu kulutusmalli saattaa havaita vaihtelun aiheuttajan, vaikkei sitä suoraan sähkökulutuksesta olisikaan havaittavissa.

Luvussa 5.6 mainittujen seuraavien sukupolvien AMR-mittareiden vaihekohtaisten mitausten lisäksi sähköautojen yksivaiheisten latureiden havaitseminen ja niiden sähkön laadun valvominen voi onnistua myös muuntopiiritasolle asennettavien tarkempien AMR-mittareiden avulla. Muuntopiiritasolla yksivaiheisten sähköautojen tunnistaminen voisi tapahtua esimerkiksi muuntamon lähtöjen virtoja ja epäsymmetriaa seuraamalla. Joissakin tapauksissa usean sähköauton lataaminen samalla muuntamolähdöllä ja samalla vaiheella voi aiheuttaa sähkön laatua heikentävää epäsymmetriaa. Vaikka epäsymmetriaa ei esiintyisikään, niin sähköautojen lataamisen aiheuttamat vaihevirtojen muutokset ja yliaallot voivat silti olla havaittavissa muuntopiiritason tarkemmista AMR-mittareista. Edellä mainittujen hyötyjen arviointia tulee kuitenkin suorittaa esimerkiksi pilotoimalla muuntopiiritason mittareita ja arvioimalla niiden tuomia hyötyjä.

Muita hyötyjä muuntopiiritason tarkemmille AMR-mittareille voivat olla muun muassa sähkövarkauksien tunnistaminen vertaamalla sähkökulutusta käyttöpaikoilla ja muuntamalla. Lisäksi muuntopiiritason mittareita voidaan ehkä hyödyntää myös jakeluverkon pienjännitteisten maakaapeleiden vikaantumisten tunnistamisessa. Maakaapelivikojen selvittämistä tutkitaan jatkuvasti ja niiden havaitseminen vaatii vielä lisätutkimuksia.

## 6. UUDEN TOIMINTAMALLIN MÄÄRITTELY

Tässä luvussa käsitellään laatuvaihtelu- sekä laatupoikkeamatapausten toimintamallia ja sitä, miten toimintamallia voidaan kehittää tässä työssä luodun kulutusmallin avulla. Uuden toimintamallin aikaansaamiseksi kulutusmallille tullaan tarvitsemaan kulutusmallin käsittelyyn tarkoitettu IT-toiminnallisuus, jonka ominaisuuksista on kerrottu luvussa 5.5. Kulutusmallin käsittelyyn tarkoitettava IT-toiminnallisuus on luultavasti toteutettavissa, kun uusi mittaustiedon käsittelyyn tarkoitettu alusta otetaan käyttöön Elenialla. Sitten kun kulutusmallin käsittelyssä vaadittava IT-toiminnallisuus on käytössä ja se ilmoittaa käyttöpaikasta, jossa kulutusmuutoksen epäillään tapahtuneen, niin määriteltäviä toimia ovat:

1. Asiakaskontaktoinnin tekeminen (onko käyttöpaikalle tullut uusia sähkölaitteita)
2. Mikäli kulutusmalli on havainnut laatuvaihtelua alueella, josta oli jo ilmoitettu laatuvaihtelusta, niin laatumittauksen kohdistaminen
3. Mallin hyödyntäminen tapauksissa, joissa havainto laatuvaihtelusta tulee asiakkaalta, mutta ongelman aiheuttajaa vaikea havaita
4. Kulutusmallin ilmoittamien kohteiden hyödyntäminen verkkoinvestointien kohteiden päättämisessä

Kohdassa 1 esitetyssä asiakaskontaktoinnissa vaihtoehtoina ovat suora puhelintiedustelu ja kirjeen lähettäminen asiakkaalle, jossa on yleistietoa aiheeseen liittyen. Asiakkaalle lähetettävässä kirjeessä voisi olla muun muassa tiivistelmä verkkopalveluehdoista sekä tietoa erilaisten laitteiden käynnistysvirroista ja liittymäkoon ylittävien virtojen vaikutuksista. Myös puhelintiedustelun jälkeen osassa tapauksissa voi olla hyvä lähettää kirje asiaan liittyen, jotta sähkökäyttäjät voi myös myöhemmin palata käydyn keskustelun sisältöön. Tiedustelujen tärkeimpänä tavoitteena on määritellä minkälaisesta kulutusmuutoksesta on kyse ja voisiko se aiheuttaa verkkoon laatupoikkeamia.

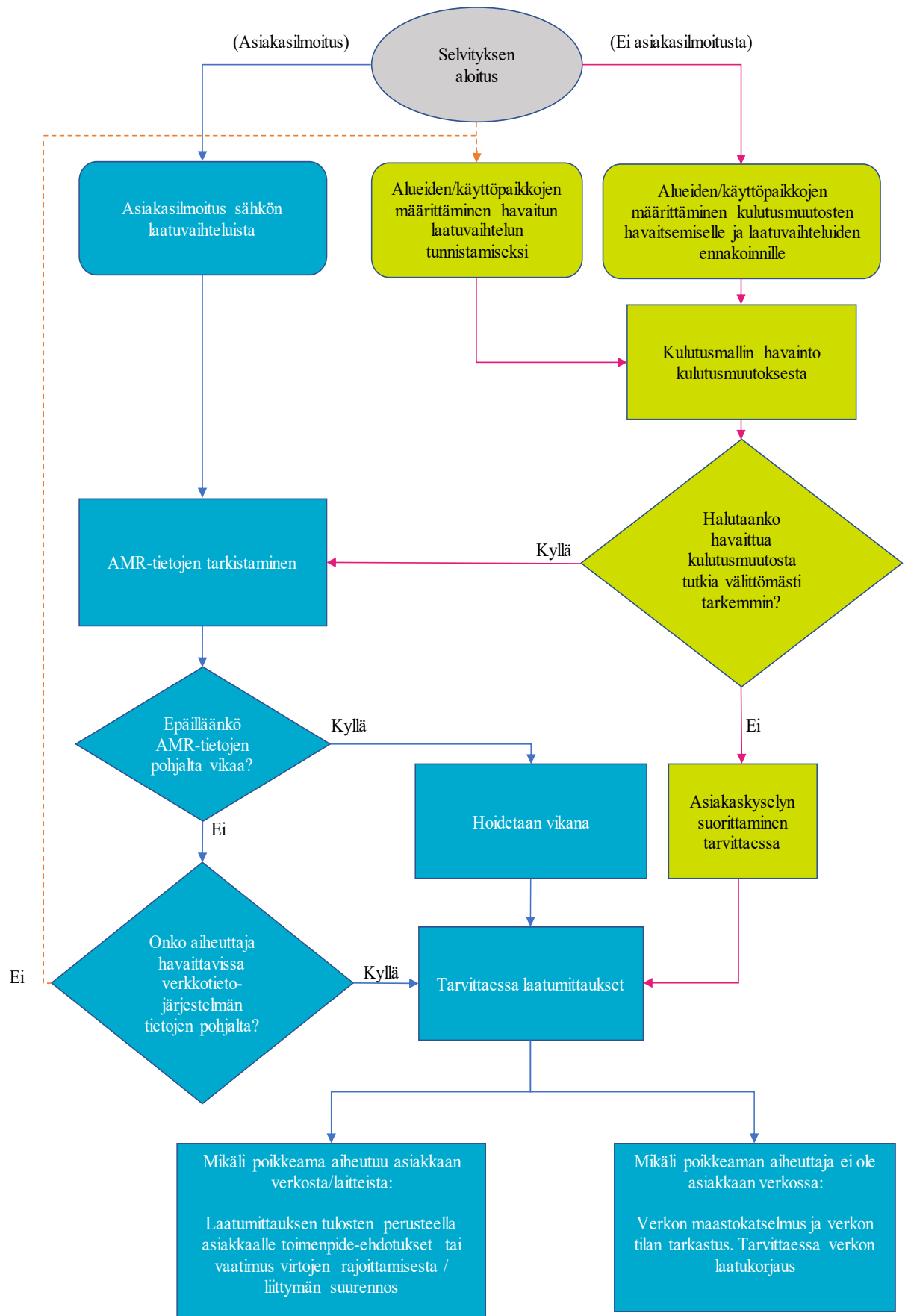
Kohdassa 2 mainituilla alueilla havaituilla laatuongelmilla tarkoitetaan tilannetta, jossa kulutusmalli ilmoittaa käyttöpaikasta, joka liittyy sellaiseen muuntopiiriin, josta on jo aiemmin ilmoitettu sähkön laatuvaihtelusta. Mikäli muuntopiiriin ei vielä ole tilattu laatumittauksia, niin sitten tehdään asiakaskontaktointi puhelimitse ja tarvittaessa tilataan laatumittaus kulutusmallin ilmoittamalle käyttöpaikalle. Joissakin tapauksissa voidaan toteuttaa niin sanottu tuplamittaus, jossa mitataan samanaikaisesti laatuvaihteluista ilmoittanut käyttöpaikka sekä kulutusmallin ilmoittama käyttöpaikka.

Kohdan 3 tapauksilla tarkoitetaan tilanteita, joissa ilmoitus sähkön laatuvaihtelusta tulee asiakkaalta ja laatuvaihtelun aiheuttaja ei ole havaittavissa vanhan toimintamallin (katso kuva 22 s. 88 siniset ruudut) mukaisilla toimilla. Mikäli laatuvaihtelun aiheuttaja ei selviä perinteisillä menetelmillä, eli verkostolaskennan ja AMR tietojen avulla, niin suoritetaan kulutusmallin ajaminen tutkittavan laatuvaihtelun muuntopiirille esimerkiksi kolmelta

viimeiseltä vuodelta. Mikäli kulutusmalli ilmoittaa käyttöpaikasta, niin suoritetaan laatumittaus kyseiselle käyttöpaikalle. Laatumittauksen jälkeen suoritetaan samat toimet, jotka suoritetaan kaikkien laatumittauksien jälkeen, eli arvioidaan poikkeamien aiheuttaja ja toimitaan havaintojen mukaan.

Kohdassa 4 tarkoitetaan tilannetta, jossa kulutusmalli ilmoittaa yhdestä tai useammasta käyttöpaikasta saman muuntopiirin alueella ja muuntopiiriä tutkittaessa selviää, että muuntopiirille olisi hyvä tehdä laajempi saneeraus. Tyypillisesti laatukorjaukset vaihtelevat tapauskohtaisesti ja usein ongelma ratkeaa purkamalla jokin pullonkaula esimerkiksi vahvistamalla olemassa olevaa verkkoa. Kulutusmallin avulla myös verkossa suoritettavien laatukorjausten kohdistamiseen ja toteuttamiseen on mahdollista saada ennakoitua. Laatukorjauksia voisi toteuttaa esimerkiksi hyödyntämällä kulutusmallissa tehtyä oikosulkuvirran sekä vuotuisen energiankulutuksen mukaan tehtyä käyttöpaikkarajausta ja toteuttaa laatukorjauksia ennaltaehkäisevästi sellaisille muuntopiireille, joissa on useita käyttöpaikkoja, jotka kuuluvat riskiryhmään. Tässä tapauksessa riskiryhmällä tarkoitetaan käyttöpaikkoja alueella, jossa jakeluverkko on rakennettu vanhojen vaatimusten mukaiseksi ja alueella sijaitsee useita ympärivuotisessa käytössä olevia käyttöpaikkoja, joiden laskennallinen oikosulkuvirta on esimerkiksi alle 180 A.

Kuvassa 22 on esitetty kaavio siitä, miten laatuvarusteluiden ja kulutusmuutosten käsittely voi edetä, jos kulutusmalli otetaan laajamittaisempaan käyttöön. Kulutusmallin on siis tarkoitus tukea ja tuoda uusia työkaluja pienjänniteverkon laatuvarusteluiden selvittämiseen sekä tuoda ennakoitua laatuvarusteluiden havainnointiin. Kaavion ylätasolla on kaksi eri skenaariota, joita ovat asiakasilmoitukset sekä kulutusmallilta saadut ilmoitukset. Kuten kuvasta selviää, niin kulutusmalli ei niinkään sulje pois perinteistä selvitysmenetelmää, vaan se tuo sen selvittämisen rinnalle toisen tavan havaita laatuvarusteluita – tavan, joka ei vaadi asiakasilmoituksia.



**Kuva 22.** Kaavio uuden toimintamallin mukaisesta laatuvahtelun selvityksestä.



Kuvassa 22 esitetyssä kaaviossa vihertävällä pohjalla on kuvattu määritellyn kulutusmallin myötä toimintamalliin lisätyt kohdat ja sinisellä pohjalla on kuvattu kohtia, jotka ovat jo nykyään osa laatuvaihteluiden selvitysprosessia. Kuvan 22 kaaviota voidaan lähtökohteisesti hyödyntää kaikkien sähkön laatuvaihteluiden selvityksessä. Teoriassa laatuvaihtelut voivat ilmetä myös muiden tarkastelujen yhteydessä, mutta vaikka laatuvaihteluiden selvitys aloitettaisiinkin esimerkiksi AMR-tietojen pohjalta, niin määritelty toimintamalli toimii siinäkin selvitystyössä hyvänä runkona.

Työssä määritellyn kulutusmallin käyttöönoton aikatauluun tulee vahvasti vaikuttamaan Elenian käyttöön tulevan pilvipalveluihin pohjautuvan data-asset palvelun käyttöönotto. Data-asset tulee mahdollistamaan suurempien datamäärien tehokkaan käsittelyn nykyistä nopeammin. Data-assetin tullessa käyttöön kulutusmallia voidaan hyödyntää entistä suuremmille käyttöpaikkamäärille ja silloin pitää myös määrittää, että ajetaanko kulutusmalli automaattisesti kuukausittain. Kuukausittaisen käsittelyn etuna on nykyisten määrittelyjen toimiminen ja kulutusmuutoksen havaitseminen suhteellisen luotettavasti neljän tai viiden perättäisen kynnsarvon ylityksen jälkeen.

## 7. YHTEENVETO

Diplomityössä tavoitteena oli selvittää AMR-mittareilta saatavien tuntisarjojen sekä jännitetietojen hyödyntämisen mahdollisuuksia sähkön kulutusmuutosten havainnoinnissa ja sähkön laadun varmistamisessa. Työssä tutkittiin kulutusmallia, joka hyödyntää jakeluverkon verkkotietoja sekä AMR-mittareilta saatavissa olevia mittaustietoja. Diplomityössä määriteltävän kulutusmallin tavoitteena oli selvittää ja tutkia pienjännitteisen jakeluverkon sähkön laatuvaihteluita jo ennen vaihteluihin liittyviä asiakasilmoituksia. Diplomityöhön sisältyi myös määritellyn kulutusmallin testaaminen ja kulutusmallin toimivuuden varmistaminen asiakaskyselyin.

Laatuvaihteluiden selvitystyön taustaksi tehtiin tutkimus pienjänniteverkon sähkön laadusta ja sille asetetuista vaatimuksista sekä siitä, miten jännitteen laatu poikkeamat ilmenevät pienjännitteisessä jakeluverkossa. Myös pienjänniteverkon sähkön laadun ja energiamittareiden nykytilaa käsiteltiin, jotta työssä onnistuttaisiin määrittelemään tulevaisuuden tarpeita pienjänniteverkon sähkön laadun varmistamisessa. Tutkimuksessa tunnistettiin sähköverkossa yleistäviä laitteita, jotka tuovat haasteita pienjännitteisen jakeluverkon sähkön laadulle. Tutkimuksessa tunnistettiin myös verkon nykyisten laatuvaihteluiden selvityksen haasteita sekä tavoitteita tulevaisuuden selvitystyölle.

Tutkimuksen perusteella päätettiin selvittää erilaisia tapoja verkossa esiintyvien kulutusmuutosten havaitsemiseksi. Työssä päädyttiin luomaan kulutusmalli, joka hyödyntää AMR-mittareilta saatavia mittaussarjoja, verkkotietoja sekä lämmitystarvelukuja. Kulutusmallin määrittelyssä hyödynnettiin noin 30 käyttöpaikan verkko- ja mittaustietoja. Kulutusmalliin valituilla käyttöpaikoilla oli todettu laatumittausten perusteella esiintyvän laatu poikkeamia, jotka aiheutuivat työssä aiemmin määritellyistä laitteista. Työssä keskityttiin sähköautojen latauksesta sekä lämmitystavan muutoksista aiheutuvien kulutusmuutosten havaitsemiseen.

Määriteltyä kulutusmallia testattiin noin 2900 käyttöpaikan tuntisarjoja sekä lämmitystarvelukuja hyödyntämällä. Lämmitysmuodon muutokseen liittyvien kulutusmuutosten havaitsemisessa määritelty kulutusmalli osoittautui suhteellisen hyväksi työkaluksi. Työssä haasteita aiheuttivat sähköautojen lataamisten aiheuttamien kulutusmuutosten mallintaminen. Haasteena sähköautojen lataamisesta aiheutuneiden kulutusmuutosten havaitsemisessa oli sähköautojen lataamisen hetkellisyys ja kulutusmuutoksen aiheuttajan varmistaminen. Sähköautojen käyttö ja lataaminen on yksilöllistä ja sen seurauksena sähköauton lataamisen sykli sekä kesto vaihtelee usein. Sähköautojen lataamisen vaihtelevuuden seurauksena perättäisten havaitsemisjaksojen esiintyminen vaihtelee käyttöpaikka kohtaisesti. Testien perusteella kulutusmalli mahdollistaa kuitenkin sähköautojen kolmi-

vaihelatureiden lataamisesta aiheutuneen kulutusmuutoksen havaitsemisen. Kolmivaihteisten latureiden havaitseminen onnistui etenkin tapauksissa, joissa lataussyklit olivat säännöllisiä.

Kulutusmallin määrittelyn ja testaamisen lisäksi diplomityössä määriteltiin myös uusi toimintamalli laatuvaihteluiden selvittämiseen ja laatupoikkeamien ennakointiin liittyen. Uudessa toimintamallissa on huomioitu työssä määritelty kulutusmalli ja sen käyttöönoton jälkeinen hyödyntäminen laatuvaihteluiden selvittämisessä. Kulutusmallin käyttöönottamiseksi työssä määriteltiin myös kulutusmallin hyödyntämisessä tarvittavan IT-toiminnallisuuden ominaisuudet. IT-toiminnallisuuden vaatimissa määrittelyissä pyrittiin huomioimaan kaikki kulutusmallin mahdolliset käyttökohteet ja tekemään kulutusmallista mahdollisimman joustava työkalu sähkön laadun varmistamisessa.

Tämä diplomityö eroaa aiemmista aihepiiriin liittyvistä tutkimuksista, kuten esimerkiksi tutkimuksesta [4][5] siltä osin, että tavoitteena oli luoda verkko- ja kulutustietojen avulla kulutusmalli, jonka havaitsemiskynnyksen arvot asetettiin siten, että niiden ylityksellä/alituksella voitiin olettaa olevan vaikutusta kyseisten käyttöpaikkojen ja mahdollisesti myös muiden muuntopiirin asiakkaiden sähkön laatuun. Lisäksi tässä työssä kulutusmallissa käytettäville mittausarjoille suoritettiin muun muassa varianssianalyysyjä, jotta kulutusmuutos havaittaisiin, vaikka tuntien keskitehoissa ei esiintyisikään suuria muutoksia. Tässä työssä käyttöpaikkoja ei jaettu kategorioihin kulutusprofiilien mukaan, vaan laatupoikkeamille herkät käyttöpaikat pyrittiin tunnistamaan verkkotietojen, laatumittaushistorian sekä kulutustietojen perusteella. Tässä diplomityössä tarkoituksena oli luoda verkkoyhtiöille suhteellisen helposti käyttöönotettava työkalu, jota voidaan hyödyntää kulutusmuutosten havaitsemisessa ja jakeluverkon sähkön laadun turvaamisessa sekä laatupoikkeamien ennakoinnissa.

Tulevaisuudessa diplomityön pohjalta tulee tehdä kulutusmallin käsittelemiseksi vaadittava IT-toiminnallisuus. Myöhemmin voidaan tutkia, että olisiko diplomityössä määritellyn kulutusmallin tueksi mahdollista liittää seuraavien sukupolvien AMR-mittareiden tarkentuneita mittausominaisuuksia. Jatkotutkimus voisi esimerkiksi liittyä kulutusmallin hyödyntämiseen siten, että siihen integroitaisiin yhden minuutin keskiarvojännitteiden hyödyntäminen sekä pätö- ja loistehojen suhteen seuranta.

## LÄHTEET

- [1] AMR 2.0 loppuraportti, TEM Älyverkkotyöryhmä / Pöyry, 2017.
- [2] M. A. Awadallah, B. Venkatesh, B.N. Singh, Impact of Solar Panels on Power Quality of Distribution Networks and Transformers, Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 38, Iss. 1, pp. 45-51, 2015.
- [3] M. H. J. Bollen, I. Gu, Signal Processing of Power Quality Disturbances, Wiley IEEE Press, 849 s, 2006.
- [4] T. Chen, A. Mutanen, P. Järventausta & H. Koivisto, Change detection of electric customer behavior based on AMR measurements, IEEE Conference Publication, 2015.
- [5] T. Chen, Customer behavior change detection based on AMR measurements, M.Sc. Thesis, Tampere University of Technology, 2014, 61 p.
- [6] L. S. Czarnecki, Budeanu and fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents, Electrical Engineering, Vol. 80, Iss. 6, pp. 359-367, 1997.
- [7] H. Dahlberg, J. Öberg, M. Glaumann, A. Gjelstrup, G. Berntsson, J. Meesenburg & N. Rundbom, Connected Things, Telia, 2016. Saatavissa: [www.teliacompany.com/globalassets/telia-company/documents/about-telia-company/connected\\_things\\_2016\\_edition.pdf](http://www.teliacompany.com/globalassets/telia-company/documents/about-telia-company/connected_things_2016_edition.pdf)
- [8] Elenia Oy, Säävarman verkon kehitys, verkkosivu, 2016. Saatavissa: <http://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/Älykkään%20säävarman%20sähköverkon%20kehitys.pdf>
- [9] Elenia-konsernin vuosikertomus 2017, Elenia, 2017. Saatavilla: <http://www.elenia.com/fi/vuosikertomukset>.
- [10] Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2016/679, 2016.
- [11] E. Fuchs, M.A.S. Masoum, Power quality in power systems and electrical machines, Academic Press, 631 p, 2011.
- [12] M. Hagström, A. Pesola, Lämpöpumppujen vaikutukset sähkötehon tarpeeseen, Loppuraportti, Gaia Consulting Oy, 2017.

- [13] O. Härmä, Sähkön laadun mittaus ja valvonta kantaverkossa, Diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2017.
- [14] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality 1159-2009, IEEE Standard, 2009.
- [15] A. Ioinovici, H. Chung, Power Electronics and Energy Conversion Systems, Fundamentals and Hard-switching Converters, Wiley, Somerset, 2013.
- [16] Iskraemeco, ME371, MT371, ME372, MT372, Technical description EAD 020.611.325, 2008.
- [17] A. von Jouanne, B. Banerjee, Assessment of voltage unbalance, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, Iss. 4, pp. 782-790, 2001.
- [18] M. Kauppinen, J. Pylvänäinen, J. Karjalainen, V. Sihvola, Experiences of using AMI system for DSO's business operation, CIRED, 2017
- [19] A. Kenttälä, Jakeluverkon loistehohallinnan suunnitelma, Diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2016.
- [20] P. Koponen, Väliharmoniset ja energiansäästölamppujen välkyntä, Esityskalvot, Sähkön laadun hallinta –asiantuntijaseminaari, Luosto, 2015.
- [21] P. Koponen, Välkynnästä ja väliharmonisista, Esityskalvot, Sähkön laadun hallinta asiantuntijaseminaari, Luosto, 2018.
- [22] L. Kutt, E. Saarijarvi, M. Lehtonen, H. Molder, J. Niitsoo, Harmonic distortions of multiple power factor compensated EV chargers, 16th European Conference on Power Electronics and Applications, IEEE, 7 s., 2014.
- [23] E. Lakervi, J. Partanen, Sähkönjakelutekniikka, 3. p., Otatieto, 285 s, 2008.
- [24] C. Y. Lee, Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor, IEEE Trans. Energy Conversion vol. 14 no. 2, pp. 202–208, 1999.
- [25] M. Lei, Z. Yang, Y. Wang, H. Xu, L. Meng, J.C. Vasquez & J.M. Guerrero, Design of energy storage control strategy to improve the PV system power quality, IEEE Conference Publication, 2016.
- [26] A. Löf, S. Repo, M. Pikkarainen, S. Lu & T. Pöhö, Low voltage network monitoring in RTDS environment, 4th IEEE/PES, 2013.
- [27] C. Mi, M.A. Masrur & D. Gao, Hybrid Electric Vehicles, John Wiley & Sons, 468 p, 2011.

- [28] MicroSCADA Pro Network control and distribution management, Tuote-esite, ABB Oy, 2017. Saatavissa: [www.new.abb.com/network-management/network-management/microscada-pro](http://www.new.abb.com/network-management/network-management/microscada-pro)
- [29] Motiva, Sähkön pientuotanto, Verkkosivu, 2017. Saatavissa: [www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/sahkon\\_pientuotanto](http://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/sahkon_pientuotanto)
- [30] T. Pahkala, Energiamurros sähkömarkkinoilla: Älyverkkotyöryhmä ja EU-lainsäädäntö, Esityskalvot, Elenia Oy:n verkon käytön ja kehityksen yksikköpäivä, Tampere, 2018.
- [31] Pientuotannon liittäminen Elenian verkkoon, Elenian sisäinen lähde, 2017.
- [32] H. Pihala, Non-intrusive appliance load monitoring system based on a modern kWh-meter, VTT Publications 356, 68 p., 1998.
- [33] C. Ruester, S. Hoppert, J. Blum, Power quality and stability issues in modern distribution grids: identification and mitigation, CIRED, 2014.
- [34] M. Salin, Verkkoremontti fiksusti, ABB Oy -asiakaslehti, 2015. Saatavissa: [www.abb.com/cawp/seitp202/d4c323172da0d234c1257dd400395224.aspx](http://www.abb.com/cawp/seitp202/d4c323172da0d234c1257dd400395224.aspx)
- [35] C. Sankaran, Power Quality, 1st ed., CRC Press, 2017.
- [36] S. Santoso, M.F. McGranaghan, R.C. Dugan & H.W. Beaty, Electrical Power Systems Quality 3rd ed., McGraw-Hill, 2012.
- [37] J. Seppälä, Sähkön laatuun liittyvät tutkintapyynnöt, Esityskalvot, Laatutietojen hyödyntämisen kehitysryhmä, 2017.
- [38] A. Seppälä, Tuntimittausvelvoitteen laajentamisen vaikutus sähkömarkkinoihin ja tyyppikäyrämenettelyyn, Enease Oy, 2004.
- [39] SFS 6000 – 6002 standardimuutokset, Esityskalvot, Sähköinfo Oy, Elenia Oy:n koulutuspäivä, 2018.
- [40] SFS 6000-8-801, Pienjännitesähköasennukset: Täydentävät vaatimukset, Suomen standardisoimisliitto SFS ry, 21 s, 2017.
- [41] SFS-EN 50160, Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet, Suomen standardisoimisliitto SFS ry, 63 s, 2011.
- [42] SFS-EN 61000-4-30, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30, (IEC 61000-4-30:2015), Suomen standardisoimisliitto SFS ry, 70 s, 2015.

- [43] Suomen lämpöpumpputilatot, Suomen Lämpöpumppuyhdistys ry, 2018. Saatavissa: <https://www.sulpu.fi/tilastot>
- [44] Suomen virallinen tilasto (SVT): Moottoriajoneuvokanta, Autot käyttövoiman mukaan 31.12.1990 – 2017, Tilastokeskus, Helsinki, 2018. Saatavissa: [http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_lii\\_\\_mkan/](http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__lii__mkan/)
- [45] S. Suurinkeroinen, Asiakkaiden vastuu sähkön laadusta ja aurinkovoiman tuunaus, Esityskalvot, Laatutietojen hyödyntämisen kehitysryhmä, 2017.
- [46] S. Suurinkeroinen, Kahden maalämpöpumpun tuottama välkyntä ja virranrajoitusmenetelmät, Esityskalvot, Sähkön laadun hallinta asiantuntijaseminaari, Luosto 2017.
- [47] S. Suurinkeroinen, Laatureklamaatiot ja niiden jakauma, Esityskalvot, Sähkön laadun hallinta asiantuntijaseminaari, Luosto, 2009.
- [48] T. Suvela, Sähköverkkoyhtiön käyttökustoiminnan kehittäminen, Diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2016.
- [49] Sähkömarkkinalaki 588/2013, 2013.
- [50] Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta.State of art -selvitys, in: VTT Working Papers 52, VTT, 2006.
- [51] Sähkön pienkuluttajien etäluettavan mittaroinnin tila ja luomat mahdollisuudet, VTT, 2006. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2006/VTT-R-09048-06.pdf>
- [52] Sähkön tuotannon liittymisehdot - TLE 2014, Energiateollisuus, 2014.
- [53] Sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje, Energiateollisuus, 2014.
- [54] Sähkötarkastuslaitoksen julkaisu A 1-74, Sähköturvallisuusmääräykset, 1974.
- [55] Sähköturvallisuuslaki 1135/2016, 2016.
- [56] Sähköverkon häiriöt ja sähkön laatu, Opintomoniste TTY, 2017
- [57] Teknisiä tietoja ja taulukoita, 10. p., Suomalaiset ABB-yhtiöt, Vaasa, 626 s, 2000.
- [58] Tietoa asiakaslaitteiden liittämisestä sekä taustatietoa laitteiden vika- ja häiriötilanteiden selvittämiseksi, Energiateollisuus, 2006.

- [59] Trimble, Distribution Management System (DMS), Verkkosivu, 2016. Saatavissa: <http://utilities.trimble.fi/trimble-dms.html>
- [60] Vaasan yliopisto & Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Protect-DG loppuraportti, 2017.
- [61] Valtioneuvoston asetus sähkötoimitusten selvityksestä ja mittauksesta 66/2009.
- [62] J. Varis, Case tuulipuisto, Esityskalvot, Laatutietojen hyödyntämisen kehitysryhmä, 2017.
- [63] S. Weckx, J. Driesen, Load Balancing With EV Chargers and PV Inverters in Unbalanced Distribution Grids, IEEE Journals & Magazine, 2015.
- [64] Verkkopalveluehdot – VPE 2014, Energiateollisuus, 2014.
- [65] Verkostosuositus YA9:13 - Mikrotuotannon liittäminen sähköjakeluverkkoon, Energiateollisuus, 2016.
- [66] Viestintävirasto, Sähkömagneettisia radiotaajuisia häiriöitä sekä sähkön toimituksen laatua koskevat valitukset, verkkosivu, 2008. Saatavissa: [www.viestintavirasto.fi/ohjausjavalvonta/ohjeetjajulkaisut/ohjeidentulkintojensuositusstenjaselvitystenasiakirjat.html](http://www.viestintavirasto.fi/ohjausjavalvonta/ohjeetjajulkaisut/ohjeidentulkintojensuositusstenjaselvitystenasiakirjat.html)
- [67] J. D. van Wyk, F. C. Lee, On a Future for Power Electronics, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 1, no. 2, pp. 59-72, 2013.
- [68] V. Väre, Sähköverkkoon kytketty aurinkosähkökapasiteetti yli kolminkertaistui vuodessa, Energiavirasto, 2017. Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/-/sahkoverkkoon-kytketty-aurinkosahkokapasiteetti-yli-kolminkertaistui-vuodessa>



## LIITE A: ASIAKASKYSELY KULUTUSMALLIN ILMOITTAMILLE KÄYTTÖPAIKOILLE



---

### Sähkönkulutuksen muutokset

Tämä kysely liittyy kiinteistösi sähkönkulutukseen. Kyselyyn vastaaminen vie noin 5 minuuttia. Kyselyyn vastaaminen on täysin vapaaehtoista ja kyselyn tuloksia käytetään vain tässä tutkimuksessa. Kaikille kyselyyn vastanneille annetaan palkinnoksi suklaakoodi, jolla voi noutaa R-kioskilta itselleen veloituksetta Fazerin Kismet suklaavohvelin.

Vastausten avulla on tarkoitus hahmottaa pienjänniteverkossa tapahtuvia kulutusmuutoksia ja arvioida niiden vaikutuksia pienjänniteverkon sähkön laatuun. Keräämme vastauksia 7.10.2018 asti.

---



---

## Sähkönkulutuksen muutokset

1. Onko kiinteistösi lämmitysmuoto muuttunut välillä 1.1.2015 – 30.7.2018?\*

- Kyllä
- Ei
- En tiedä

2. Onko kiinteistöllesi lisätty säännöllisessä käytössä olevia suuritehoisia sähkölaitteita välillä 1.1.2015-30.7.2018?\*

Ilmoita sähkölaitteen käyttöönotto muodossa kk/vvvv

- Pumppu
- Pientuotantoa
- Kompressori
- Sähköauton latauspiste / Sähköautoa ladataan säännöllisesti
- Jokin muu, mikä?
- Ei ole

3. Mikäli kiinteistösi lämmitysmuoto on muuttunut tai kiinteistölle on lisätty aiemmin mainittuja sähkölaitteita, niin oletko havainnut niiden vaikuttavan kokemaasi sähkön laatuun?\*

Kyllä

Ei

4. Miten arvioit kiinteistösi sähkön laadun nykytilaa asteikolla 1-10?\*

1  2  3  4  5  6  7  8  9  10

---



1a. Milloin kiinteistösi lämmitysmuodon muutos on tapahtunut?\*

Ilmoita muodossa kk/vvvv

---

---

---

---

1b. Mikä oli kiinteistösi edellinen lämmitysmuoto?\*

- Sähkölämmitys
- Kaukolämmitys
- Maalämmitys
- Ilmalämmitys
- Hake- / Pilke- / Puulämmitys
- Öljylämmitys
- Jokin muu, mikä

1c. Mikä on kiinteistösi nykyinen lämmitysmuoto?\*

- Sähkölämmitys
- Kaukolämmitys
- Maalämmitys
- Ilmalämmitys
- Hake- / Pilke- / Puulämmitys
- Öljylämmitys
- Jokin muu, mikä
- En tiedä

1d. Onko kiinteistölläsi käytössä lämpöpumppu?\*

- Maalämpöpumppu
- Ilmalämpöpumppu
- Jokin muu, mikä
- Ei ole

1e. Milloin lämpöpumppu on asennettu?\*

Ilmoita muodossa kk/vvvv

---

---

---

---

---



2a. Mikä on lisätyn suuritehoisen sähkölaitteen nimellisteho kilowatteina?\*

- Pumppu
  - Pientuotanto
  - Kompressori
  - Sähköauton laturi
  - Muu lisätty laite
- 



3a. Minkälaisia muutoksia sähkön laadussa olet havainnut?

---

---

---

---