

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
LUT School of Energy Systems  
LUT Sähkötekniikka

Santeri Viljakainen

## **SÄHKÖNKÄYTTÄJIEN LUOKITTELU JA SÄHKÖNKÄYTÖN ENNUSTAMINEN SÄHKÖNKULUTUSTIETOJEN AVULLA**

Diplomityö

Työn tarkastajat: Prof. Jarmo Partanen  
TkT Juha Haakana

# TIIVISTELMÄ

**SANTERI VILJAKAINEN:** Sähkökäyttäjien luokittelu ja sähkökäytön ennustaminen sähkönkulutustietojen avulla

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Diplomityö, 77 sivua, 50 kuvaa ja 16 taulukkoa

Elokuu 2017

School of Energy Systems

Sähkötekniikka

Tarkastajat: Prof. Jarmo Partanen, TkT Juha Haakana

Avainsanat: AMR, sähkökäyttö, K-means, klusterointi, tyyppikäyttäjälukittelu, ilmalämpöpumppu, maalämpöpumppu

Sähkömarkkinalain toimitusvarmuusvaatimukset pakottavat sähköverkkoyhtiöt investoimaan sähkönjakeluverkkoihin huomattavia summia tulevina vuosina. Samaan aikaan sähkökäyttö on murroksessa mm. lämpöpumppujen, sähköautojen ja aurinkosähköjärjestelmien yleistymisen vuoksi. Sähkökäytön muuttumisen seurauksena vanhat kuormituskäyrät, jonka mukaan sähkökäyttöä on mallinnettu mm. sähköverkon suunnittelua varten, eivät enää vastaa todellista sähkökäyttöä. Väestö on myös kaupungistumassa. Kuitenkin toimitusvarmuusvaatimukset koskevat myös harvaan asuttaja alueita.

Tässä diplomityössä tutkitaan sähkökäytön muuttumista sekä sähkökäyttäjien luokittelua sähkönkulutustietojen ja rakennustietojen avulla. Tarkastelu painottuu erityisesti haja-asutusalueille. Työssä käytetään neljän sähkönjakeluverkkoyhtiön haja-asutusalueiden sähköasiakkaiden etäluettavien sähkönkulutusmittareiden mitaustietoja (AMR-data). AMR-datan avulla sähkökäyttäjiä luokitellaan samankaltaisuuden perusteella ryhmiin, jolle simuloidaan sähkökäytön muutoksia. Tässä työssä muutoksista simuloidaan ainoastaan lämpöpumppuja.

Tulosten perusteella sähkökäyttäjien luokittelua tulisi päivittää nykyistä useammin. Mm. lämmitystapamuutosten ja omistusmuutosten seurauksista käyttöpaikkojen sähkökäyttö voi muuttua nopeasti. Lämpöpumppujen mallinnuksen perusteella sähkökäyttö tulee kasvamaan. Etenkin maalämpöpumppujen yleistyminen lisää sähkökäyttöä. Simulointien perusteella lämpöpumppujen yleistyminen ei kuitenkaan vaikuta loppukäyttäjien huipputehoihin merkittävästi.

## ABSTRACT

**SANTERI VILJAKAINEN:** Power customer classification and load forecasting with electricity consumption data

Lappeenranta University of Technology

Master's thesis, 77 pages, 50 figures and 16 tables

August 2017

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Examiner: Prof. Jarmo Partanen, D.Sc. Juha Haakana

Keywords: AMR, electricity usage, K-means, clustering, classification, air source heat pump, ground source heat pump

Electricity distribution system operators (DSOs) have to renovate their electrical networks a lot in the next 15 years due to the service security requirements in Finnish electricity market act. Meanwhile, customers' electricity usage is expected to change because of the increasing number of heat pumps, electrical vehicles and photovoltaic systems. Old load profiles DSOs have been using to model electricity usage, may be less useful in the future when the electricity usage changes. People are also moving more and more to cities from rural areas, but DSOs still need to renovate also rural area networks without oversizing them.

Change of electricity usage and electrical power customer classification with electricity consumption measurements (AMR data) and building information especially from rural areas are studied in this master's thesis. AMR data in this study is from rural areas of four different DSOs. Power customers are clustered to multiple groups and changes of electricity use are simulated accordingly. In this thesis, only heat pumps simulations are made.

According to results, customers' load profiles should be updated more often than they have been updated in the past. Change of heating systems and ownerships of buildings can change electricity usage a lot. Heat pump simulations show an increase in electricity consumption, especially among the rising number of ground source heat pumps. However, according to simulations, maximum powers of customers are not going to increase that much in the process.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkömarkkinalaboratoriolle. Työ liittyy laajempaan Lappeenrannan teknillisen yliopiston, Järvi-Suomen Energian, Savon Voima Verkon, Kymeenlaakson Sähköverkko Oy:n ja PKS Sähkönsiirron tutkimushankkeeseen "Haja-asutusalueiden sähköverkko ja sähköasiakas 2030". Sähkömarkkinalain toimitusvarmuuskriteerien ja sähkönkäytön odotetun muutoksen vuoksi erityisesti haja-asutusalueiden tulevaisuuden sähkönkäytön mallintaminen on ajankohtaista.

Kiitokset mahdollisuudesta tehdä diplomityö menevät työn tarkastajalle professori Jarmo Partaselle sekä verkkoyhtiöiden puolella olleille tutkimusprojektin käynnistäjille. Haluan myös kiittää työn ohjaajia, Juha Haakanaa ja Jukka Lassilaa, avusta työn tekemiseen ja työn ohjauksesta. Kiitokset myös laboratorion tutkimushenkilökunnalle vinkeistä työhön liittyen. Kiitos myös Jennalle oikoluvusta.

Lappeenranta, 2. lokakuuta 2017

Santeri Viljakainen



# SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto . . . . .	2
2. Sähkönkäyttö ja kuormituksen mallintaminen . . . . .	4
2.1 Sähkönkulutuksen mittaus Suomessa . . . . .	4
2.2 Kuormitusprofiilit . . . . .	5
2.3 Älykkäät sähköverkot . . . . .	6
2.4 Klusterointi . . . . .	7
2.5 Tutkimusaiheeseen liittyvä aiemmin tehty tutkimus . . . . .	8
3. Sähkönkäytön muutosten arviointi . . . . .	11
3.1 Lämpöpumput . . . . .	12
3.2 Hajautettu sähköntuontanto . . . . .	13
3.3 Sähköautot . . . . .	15
3.4 Akkuvarastot . . . . .	17
3.5 Kysynnän jousto . . . . .	17
3.6 Siirtohinnoittelun muutokset . . . . .	18
3.7 Energiatehokkuus . . . . .	18
3.8 Yhteenveto . . . . .	19
4. Tutkimusalueen lähtökohdat ja käytetyt aineistot . . . . .	20
4.1 Sähköasiakasaineisto . . . . .	20
4.2 Asiakaskysely . . . . .	23
4.3 Rakennustiedot . . . . .	23
4.4 Lämpöpumppujen kuormituskäyrät . . . . .	27
5. Tyypikäyttäjälukittelu . . . . .	30
5.1 Eri lämmitysmuotojen lämpötilariippuvuudet . . . . .	30
5.2 AMR-datan esiprosessointi . . . . .	32
5.2.1 Lämpötilakorjaus . . . . .	32
5.2.2 Normalisointi . . . . .	34
5.2.3 Pääkomponenttianalyysi ja dimension redusointi . . . . .	35

5.3	Klusterointimenetelmä . . . . .	36
5.4	Klusteroinnin tulokset . . . . .	38
5.5	Indeksisarjojen muodostus . . . . .	46
5.6	Lämpöpumppujen tunnistus . . . . .	48
5.6.1	Ilmalämpöpumppujen tunnistus . . . . .	49
5.6.2	Maalämpöpumppujen tunnistus . . . . .	53
5.7	Johtopäätökset . . . . .	55
6.	Lämpöpumppujen yleistymisen arviointi ja lämpöpumppujen mallintaminen	56
6.1	Skenaario 1, SULPUn ennuste vuodelle 2030 . . . . .	57
6.2	Skenaario 2, kaikille lämpöpumppu . . . . .	62
6.3	Johtopäätökset . . . . .	64
7.	Yhteenveto . . . . .	66
	Lähteet . . . . .	68

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

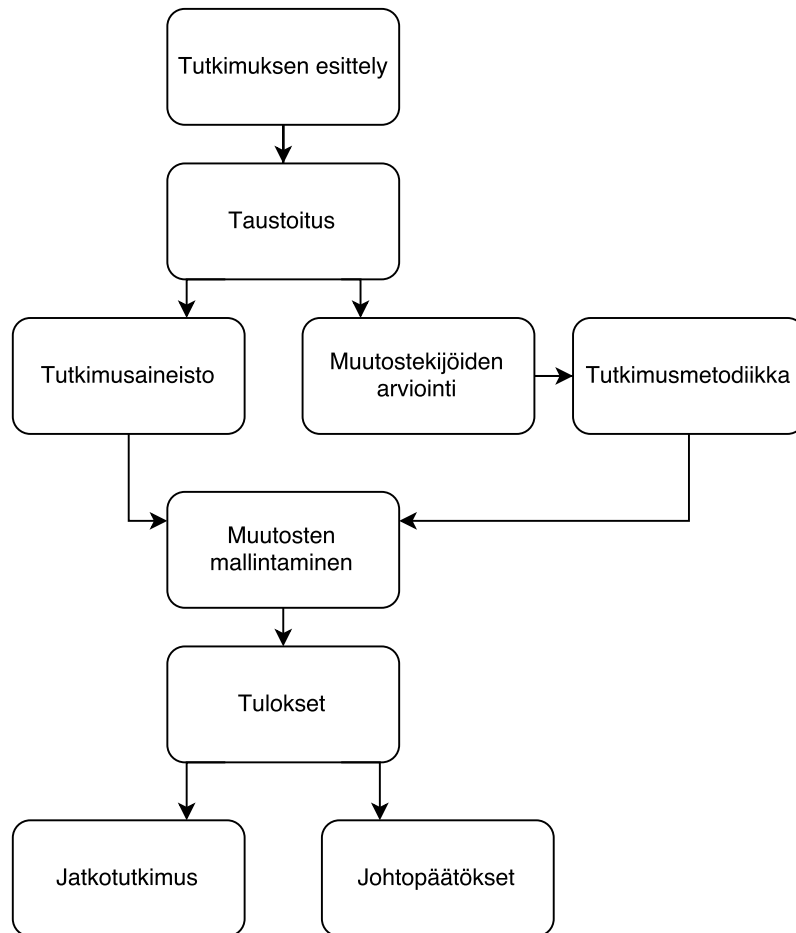
AMR	Automated Meter Reading, automaattinen mittarin luenta
COP	Coefficient of Performance, lämpöpumpun lämpökerroin
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
FCM	Fuzzy C-means
FMI	Finnish Meteorological Institute, Ilmatieteen laitos
IEA	International Energy Agency, Kansainvälinen energiajärjestö
ILP	Ilmalämpöpumppu
JSE	Järvi-Suomen Energia
KSOY-V	Kymeenlaakson Sähköverkko Oy
ka	keskiarvo
lk	lämpötilakorjaus
Md	Mediaani
MLP	Maalämpöpumppu
MML	Maanmittauslaitos
PILP	Poistoilmalämpöpumppu
PKSS	Pohjois-Karjalan Sähkönsiirto Oy
sl	Sähkölämmitys
SLY	Suomen Sähkölaitosyhdistys ry
SULPU	Suomen Lämpöpumppuyhdistys
SVV	Savon Voima Verkko Oy
UVLP	Ulkoilma-vesilämpöpumppu
VRK	Väestörekisterikeskus
<i>E</i>	Energia
<i>f</i>	Mallinnettu datapiste
<i>P</i>	Pätöteho, keskituntiteho
<i>R</i> <sup>2</sup>	Selitysaste
<i>t</i>	Aika
<i>T</i>	Lämpötila
<i>x</i>	Keskiarvo
<i>y</i>	Datapiste
$\alpha$	Lämpötilariippuvuuskerroin

# 1. JOHDANTO

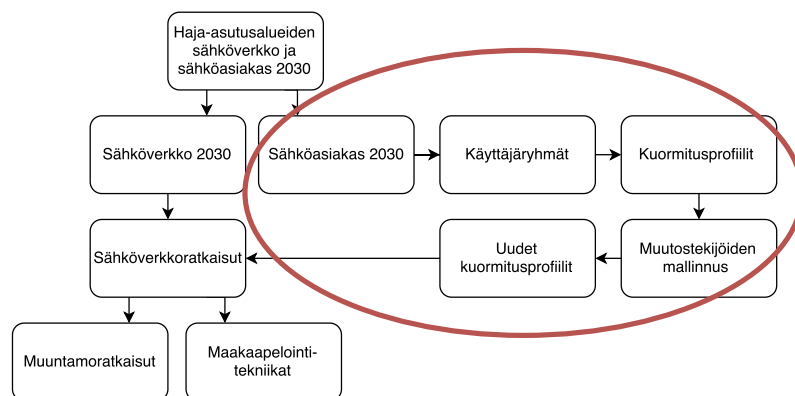
Sähkönkäyttö on murroksessa. Mm. sähköautot, hajautettu sähköntuotanto ja lämpöpumput tulevat vaikuttamaan loppuasiakkaiden sähkönkäyttöön tulevaisuudessa. Samalla väestö on yhä enemmän kaupungistumassa ja maaseudut uhkaavat autioitua. Kuitenkin sähkömarkkinalain toimitusvarmuusvaatimukset pakottavat sähköverkkoyhtiöt saneeraamaan myös haja-asutusalueiden sähköverkot. Sähköverkko-komponenttien pitoajat ovat pitkiä, 30-50 vuotta, joten sähkönkäyttö tulisi pystyä ennustamaan useiden kymmenien vuosien päähän.

Tässä diplomityössä tutkitaan erilaisten ryhmien muodostamista sähkönkäyttäjistä sekä muodostettujen ryhmien sähkönkäytön muuttumista. Tutkimuksen kohteena olivat lähtökohtaisesti haja-asutusalueiden pienasiakkaat. Työssä muodostetaan sähkönkäyttäjistä tyyppikäyttäjiä etäluettavilta sähkönkulutusmittareilta saatavan datan avulla. Tyyppikäyttäjäluokittelu tehtiin MATLAB<sup>®</sup> ohjelmalla K-means klusteroinnilla. Tyyppikäyttäjille mallinnettiin lämpöpumppuja kahdella eri yleistymiskenaariolla. Diplomityön rakennetta ja etenemistä on havainnollistettu kuvassa 1.1.

Diplomityö liittyy Lappeenrannan teknillisen yliopiston, Järvi-Suomen Energian (JSE), Kymeenlaakson Sähköverkko Oy:n (KSOY-V), PKS Sähkönsiirron (PKSS) ja Savon Voima Verkon (SVV) tutkimusprojektiin "Haja-asutusalueiden sähköverkko ja sähköasiakas 2030". Projektissa on tavoitteena selvittää sähkönkäyttöä 2030-luvulle ja sen perusteella muodostaa kustannustehokkaat ratkaisut haja-asutusalueiden sähköverkon saneeraukseen sähkömarkkinalain vaatimusten mukaiseksi. Kuvassa 1.2 on esitetty projektin kulku, missä tämän diplomityön aihealue on ympyröity. Tässä diplomityössä muutostekijöiden vaikutusanalyysit ovat rajattu lämpöpumppujen vaikutuksen analysointiin.



*Kuva 1.1 Diplomityön rakenne.*



*Kuva 1.2 Tutkimusprojekti ja diplomityön kytkeytyminen koko tutkimusprojektiin.*

## 2. SÄHKÖNKÄYTTÖ JA KUORMITUKSEN MALLINTAMINEN

Sähkönjakeluverkkojen pitoajat ovat pitkiä, 30-50 vuotta. Tämän vuoksi verkot pitäisi pystyä suunnittelemaan pitkän aikavälin tarpeisiin. Tulevaisuuden kuormitusta pitäisi pystyä mallintamaan, jotta sähköverkot olisivat käyttökelpoisia vielä kymmenien vuosien päästäkin.

Tässä kappaleessa esitellään tutkimusaiheeseen liittyvät aiemmin tehdyt tutkimukset ja muut taustatiedot tutkimukseen liittyen. Viime vuosina on tehty useita tutkimuksia sähkönkäytön skenaarioinnista tulevaisuudessa sekä sähkönkäytön muuttumisen vaikutuksista sähköverkkoihin. Lisäksi kappaleessa käsitellään sähkönkulutuksen mittarointia Suomessa sekä aiemmin tehtyjen kuormitusprofileiden muodostamista.

### 2.1 Sähkönkulutuksen mittaus Suomessa

Suomessa sähkönjakeluverkonhaltija vastaa sähkönkulutuksen mittauksesta ja ilmoittaa mittaustiedot myös sähkönmyyjälle [8]. Vähintään 80 % verkkoyhtiön asiakkaista tuli olla tuntimitattavan etäluennan piirissä vuoden 2013 loppuun mennessä [42]. Nykyisin lähes jokaisen asiakkaan sähkönkäyttö mitataan vähintään tunneittain ja luetaan etäluennalla. Mittauslukemat luetaan pääosin kerran päivässä. [4]

Tuntimittauksen ansiosta asiakkaiden sähkönkäytöstä saadaan paljon tietoa ja myös asiakkaat voivat itse seurata kulutustaan verkkoyhtiön onlinepalvelusta. Tämä on merkittävä parannus aiempaan, missä mittarin energialukema luettiin vain kerran vuodessa ja näin tiedettiin vain asiakkaiden vuosienenergia. Etäluettavien mittareiden, eli AMR-mittareiden, ansiosta voidaan myös tarjota erilaisia hinnoittelumalleja sekä saadaan paremmin tietoa sähkönjakelun keskeytyksistä ja myös jännitteen laadusta. AMR-mittarit mahdollistavat myös erilaiset kysyntäjoustop eli kuorman ohjaukset. Mittarin avulla on esimerkiksi mahdollista ohjata lämminvesivaraajan päälle ja pois kytkeytymistä. [4]

Valtioneuvoston asetuksen mukaan sähkönkulutus tulee mitata tunneittain. Säh-

könjakeluverkkoyhtiöt ovat kuitenkin alkaneet uusimaan mittareita uudemman sukupolven mittareiksi [3]. Uuden sukupolven AMR-mittarit pystyvät mittaamaan kulutusta 5-15 minuutin tarkkuudella. Tiheämpi resoluutio tuo etuja kysynnänjouston toteutukseen sekä myös kuormitusta pystytään mallintamaan paremmin muodostamalla kuormitusmalleja mittaistiedoista.

## 2.2 Kuormitusprofiilit

Sähkönjakeluverkkojen suunnittelussa on huomioitava sähkönkäytön ja väestön kehittyminen alueella. Tämän vuoksi jakeluverkkojen suunnittelussa on tärkeää pystyä ennustamaan sähkön kysyntää pitkällä aikavälillä.

Sähkönkulutuksen ennustaminen ja kuormituksen mallintaminen ovat tärkeitä sähköverkkoyhtiön suunnittelun kannalta. Sähköverkko on mitoitettava kuormituksen mukaan, ja koska pitoajat ovat pitkiä, tulevaisuuden kuormitus olisi myös pystyttävä ennustamaan.

Suomen Sähkölaitosyhdistys ry (SLY) teki vuosina 1984-1990 laajan sähkönkäytön kuormitustutkimuksen, jossa määritettiin 46 erilaista kuluttajaryhmää. Tutkimuksessa määriteltiin indeksisarjat, joissa vuosi on jaettu 26 kaksiviikkojaksoon. Indeksisarjoilla voidaan mallintaa yksittäisen kuluttajan keskimääräinen teho tuntitasolta koko vuosiprofiiliin. Vuorokauden sisäisten vaihtelujen kuvaamiseksi käytetään sisäisiä indeksejä, joissa arki-, aatto- ja pyhäpäivät ovat jaettu erikseen 24 tunti-indeksiin. Yksittäisen asiakkaan halutun ajankohdan keskituntiteho lasketaan yhtälöllä 2.1, [33],

$$P_{ai} = \frac{E_a}{8736} \cdot \frac{Q_{ri}}{100} \cdot \frac{q_{ri}}{100}, \quad (2.1)$$

missä  $E_a$  on asiakkaan vuosienenergia, 8736 on 52 viikon tunnit,  $Q_{ri}$  on asiakasryhmän 2-viikkoindeksi halutulta ajankohdalta ja  $q_{ri}$  on asiakasryhmän tunti-indeksi halutulta kellonajalta. [33]

Yhtälössä 2.1 vuosienenergian jakajana käytetty luku 8736 aiheutti ihmetystä. SLY:n tutkimuksessa on käytetty koko vuoden energiaa, mutta laskettu keskituntiteho vuosienenergiasta jakamalla se 52 viikon tunneilla (8736), eikä vuoden tunneilla (8760 tai 8784). Tämä antaa keskituntitehoksi todellista suuremman lukeman.

SLY:n kuormitusprofiilit ovat toimineet hyvin kuluttajien sähkönkäytön mallintamisessa ja niitä käytetään nykyäänkin paljon. Ongelmana on kuitenkin kuormituspro-

fileiden ikä. Profiilit ovat muodostettu yli 20 vuotta sitten, jolloin sähkönkäyttö oli erilaista kuin nykyisin. Etenkin lämpöpumput ovat yleistyneet 2000-luvulla rajusti, mikä näkyy sähkökäytössä. Tulevaisuudessa myös etenkin aurinkosähköjärjestelmät ja sähköautot yleistyvät todennäköisesti, mikä muuttaa kuluttajien sähkökäyttöä totaalisesti. Tämän vuoksi kuormituksen ennustamiseen kannattaisi hyödyntää AMR mittauksen avulla muodostettuja kuormitusprofileja. [2]

## 2.3 Älykkäät sähköverkot

Älykkäällä sähköverkolla (smart grid) ei ole yksiselitteistä määritelmää. Siinä yhdistyvät sähkönsiirtotekniikka, tietotekniikka ja automaatio. Tietotekniikka ja automaatio ovat keskeisiä osia älykkäässä sähköverkossa, sillä ne mahdollistavat tiedonsiirron ja ohjaamisen sähköverkossa. Tiedon kulku molempiin suuntiin loppuasiakkaalta verkkoyhtiölle sekä sähkön tuottajille (ja toisinpäin) onkin älykkään sähköverkon keskeisimpiä elementtejä. Myös automaattinen vikojen poiskytkentä on älykkään sähköverkon toiminto. Älykkään ja perinteisen sähköverkon eroja on havainnollistettu taulukossa 2.1.

*Taulukko 2.1 Perinteisen ja älykkään sähköverkon erot Farhangin mukaan [12].*

Perinteinen sähköverkko	Älykäs sähköverkko
Sähkömekaaninen	Digitaalinen
Yhdensuuntainen tiedonsiirto	Tiedonsiirto molempiin suuntiin
Keskitetty sähköntuotanto	Hajautettu tuotanto
Hierarkkinen	Verkostoitunut
Vähän mittauksia	Kaikkea mitataan
Varaukseton	Itsevalvova
Manuaalinen palauttaminen	Itsekorjautuva
Häiriöitä ja katkoja	Mukautuva ja saarekekäyttö
Käsin kytkentä	Kauko-ohjaus
Rajallinen ohjaus	Kokonaisvaltainen ohjaus
Asiakkailla vähän valintoja	Asiakkailla paljon valintoja

Suomessa älykäs sähköverkko sisältää ainakin hajautettua tuotantoa, energiavaroja, kuormia, mittauksia sekä kauko-ohjausta. Verkkoyhtiöt voivat hyödyntää älykäästä sähköverkkoa monella tapaa. Esimerkiksi asiakkaat ovat paremmin yhteyksissä sähköverkkoon, uusiutuva energiantuotanto on paremmin integroitu sähköverkkoon ja sähköverkko-omaisuus on paremmin optimoitu. [40]

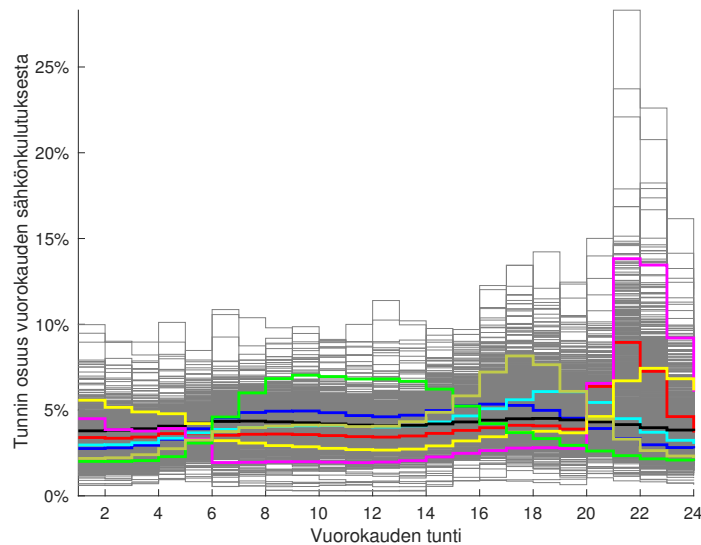
Älykäs sähköverkko tuo paljon etuja. Älykkään sähköverkon ansiosta kuormitusta voidaan mallintaa paremmin. Erilaiset mittaukset tuovat paljon lisätietoa ver-



kon kuormituksesta ja mittauksia voidaan hyödyntää mallinnuksessa. Mittausdatan suuri määrä tuo kuitenkin haasteita tulevaisuudessa ja data-analyysia joudutaan tekemään yhä enemmän.

## 2.4 Klusterointi

Klusteroinnilla (clustering) tarkoitetaan alkioiden tai abstraktien jakamista ryhmiin samankaltaisuuden perusteella [13]. Klusteroitava aineisto voi periaatteessa olla mitä vain dataa, joka sisältää useita arvoja. Aineisto voi olla esimerkiksi kuvia, jotka halutaan luokitella sisällön mukaan, ohjelmakooditiedostoja, jotka klusteroidaan ohjelman rakenteen mukaan, geenien ekspressiodataa, jotka voidaan klusteroida samankaltaisiin geneihin tai tuntimitattua sähkönkulutusdataa, josta sähkönkäyttäjät halutaan klusteroida samantyyppisiin käyttäjiin [38]. Klusterointimenetelmiä on useita, joista tässä esitellään K-means ja Fuzzy C-means klusterointimenetelmät. Kuvassa 2.1 on esimerkki K-means klusteroinnilla muodostetuista ryhmistä sähkönkäyttäjistä.



**Kuva 2.1** 2331 sähkönkäyttäjän vuorokausikeskiarvokuvaajat ja niistä muodostettujen 8 ryhmän keskiarvot eli klustereiden keskipisteet (centroids). X-akselilla on vuorokauden tunti ja y-akselilla tunnin sähkönkäytön osuus koko vuorokauden sähkönkulutuksesta.

K-means on yksi käytetyimmistä klusterointimenetelmistä. Se perustuu kahden pisteen välisen etäisyyden minimoimiseen. Pisteiden välinen etäisyys voidaan määrittää monella tapaa, mutta käytetyin on pisteiden välisen matemaattisen eli euklidisen etäisyyden minimointi. Euklidinen etäisyys pisteiden  $x$  ja  $c$  välillä lasketaan

$$d(x, c) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - c_i)^2}. \quad (2.2)$$

K-means klusteroinnin algoritmi yksinkertaisimmillaan: [38]

1. Valitaan satunnaiset pisteet klustereiden keskipisteiksi (centroids).
2. Sijoitetaan kaikki datapisteet siihen klusteriin, jonka keskipiste on lähimpänä datapistettä.
3. Korvataan klustereiden keskipisteet klusteriin kuuluvien datapisteiden keskiarvovektorilla.
4. Toistetaan kohtia 2 ja 3 kunnes klustereiden keskipisteet eivät enää muutu.

K-means klusteroinnissa jokainen datapiste voi kuulua vain yhteen klusteriin. Myös klustereiden määrä on valittava ennen klusteroinnin aloittamista. Sähkönkäyttäjien luokittelussa haasteena on oikea klusterimäärän valinta.

Fuzzy C-means (FCM) klusterointimenetelmä on samankaltainen K-means menetelmän kanssa. FCM klusteroinnissa hyödynnetään kuitenkin sumeaa logiikkaa, joka tekee siitä monimutkaisemman. FCM menetelmässä pisteet voivat kuitenkin kuulua useaan klusteriin ja menetelmässä lasketaan todennäköisyydet (membership values) pisteiden kuhunkin klusteriin kuulumiseen. [2]

K-means klusteroinnilla on saatu hyviä tuloksia kuormitusprofiileiden muodostuksessa. FCM menetelmä tuo etuja lähinnä yksittäisten sähkönkäyttäjien kuormitusmuutosten, kuten lämmitystavan muutoksen havaitsemisessa edellä mainittujen todennäköisyyksien avulla. Tässä työssä klusteroinnin tavoitteena oli kuitenkin sähkönkäyttäjien luokittelu ja sen vuoksi työssä päädyttiin käyttämään ainoastaan K-means klusterointia.

## 2.5 Tutkimusaiheeseen liittyvä aiemmin tehty tutkimus

Sähkönkäytön ennustamisesta ja erilaisten käyttäjäryhmien muodostamisesta AMR-datasta on viime vuosina tehty useita tutkimuksia. Erityisesti Antti Mutanen Tampereen teknillisestä yliopistosta on tutkinut aihetta paljon, [26], [27], [28], [29]. Tutkimuksissaan Mutanen on käyttänyt dimension redusointitekniikkana hahmovektoreiden luomista. AMR-data on jaettu hahmovektoreihin niin, että jokaiselle kuukaudelle on laskettu keskimääräinen viikkokuormitus. Viikkokuormitus voidaan laskea

huomioiden jokainen viikonpäivä tai vain arki-, aatto- ja pyhäpäivät. Näin ollen hahmovektorin dimensio on 2016 (12 kuukautta · 7 päivää · 24 tuntia) tai 864 (12 kuukautta · 3 päivää · 24 tuntia) kertaa asiakkaiden lukumäärä, mikä on huomattavasti vähemmän verrattuna koko vuoden tunteihin (8760). Hahmovektoreiden klusteroinnissa Mutanen on käyttänyt K-means klusterointia.

Chen on tutkinut diplomityössään, [2], sähköasiakkaiden kulutustason sekä kulutuskäyttäytymisen muuttumista ja muutoksen havaitsemista AMR-datan avulla. Työssä käytettiin Fuzzy C-means (FCM) ja K-means klusterointimenetelmiä. Kulutustason muutokseen havaitsemiseen Chen on käyttänyt eri vuosien viikkokeskiarvojen vertailua. Kulutuskäyttäytymisen ja esimerkiksi asiakkaiden lämmitystavan muutoksen havaitsemiseen Chen on klusteroinut eri vuosien hahmovektoreita ja tutkinut luokitellaanko käyttäjiä eri klustereihin eri vuosien hahmovektoreiden perusteella. Lisäksi Chen on käyttänyt Fuzzy C-means klusterointia ja vertaillut sen luokittelun todennäköisyyksiä eri vuosilta. Menetelmät toimivat työssä hyvin, ja sähkönkäytön muuttuminen pystyttiin havaitsemaan.

Mm. Koivisto [19] on tutkinut sähkönkäytön ennustamista AMR-datasta muodostettujen regressiomallejen avulla. Selittävinä tekijöinä regressiomalleissa Koivisto on käyttänyt lämpötilaa sekä päivän pituutta. Lisäksi vuosi oli jaettu useaan eri lämpötila-alueeseen ja päivät jaettu arki-, aatto- ja pyhäpäiviin. Tutkimuksessa pienten kotitalousryhmien sähkönkulutuksen ennustaminen onnistui hyvin. Vähemmän lämpötilariippuvaisten kulutus todettiin olevan hankalampaa.

Hellman on diplomityössään, [14], tutkinut maalämpölämmittäjien tunnistamista tuntimitatusta AMR-datasta sekä vuosienergiosta. Työssä määritettiin myös maalämpökäyttöpaikan vuorokausienergioille lineaarinen regressiomalli. Lämmitystavan muutoksen tunnistamiseen käytettiin Chow-testiä ja vuosienergioiden muutosta. Maalämpökäyttöpaikkoja yritettiin erotella suorista sähkölämmittäjistä K-means klusteroinnilla. Klusteroinnilla maalämpölämmittäjiä ei pystytty erottelemaan suorista sähkölämmittäjistä, mutta muutosten tunnistaminen mm. vuosienergioiden avulla onnistui.

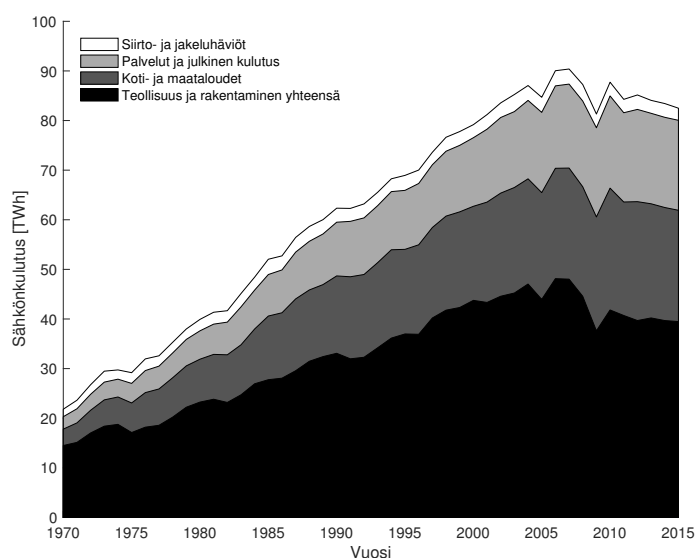
Jussi Tuunanen on väitöskirjassaan, [40], tutkinut sähkönkäytön muuttumista ja sen vaikutusta sähköjakeluun. Työssä on tutkittu mm. energiatehokkuuden, sähkön pientuotannon, sähköautojen, sähkövarastojen ja kysynnänjoustopon lisääntymistä tulevana vuosina sekä niiden vaikutusta sähköjakeluverkkoyhtiöille. Tuunanen mukaan siirrettävät tehot voivat kasvaa merkittävästi, mutta sen sijaan siirrettävä energia voi pienentyä. Tehon kasvun vuoksi verkkoja on vahvistettava. Lisäksi nykyisillä hinnoittelumalleilla sähköjakeluverkkoyhtiöiden tulot pienenevät energianku-

lutuksen vähenemisen seurauksena. Ratkaisuksi ehdotetaan kuormien ohjausta sekä tehopohjaista siirtohinnoittelua.

Tässä työssä keskityttiin haja-asutusalueiden kuormituksen mallintamiseen nyt ja tulevaisuudessa. Sähkömarkkinalain toimitusvarmuusvaatimukset pakottavat investoimaan myös haja-asutusalueiden sähkönjakeluverkkoihin, mutta haja-asutusalueilla sähkönkäyttö on erityisesti muuttumassa. Tietyissä tapauksissa sähköliittymiä voidaan jopa purkaa. Myös maaseudun autioituminen tuo haasteita haja-asutusalueiden kuormituksen ennustamiseen. Verkkojen investointitarpeen vuoksi, haja-asutusalueiden kuormituksen mallintaminen on tarpeellinen.

### 3. SÄHKÖNKÄYTÖN MUUTOSTEN ARVIOINTI

Suomen sähkönkulutus on kasvanut 1970-luvulta lähtien, mutta vuonna 2005 työ- suluista johtuen kulutus laski, (kuva 3.1). Myös vuoden 2008 lama laski kulutusta ja myös vuodesta 2012 lähtien trendi on ollut laskeva.



*Kuva 3.1 Suomen sähkönkulutus sektoreittain vuosina 1970-2015. [35]*

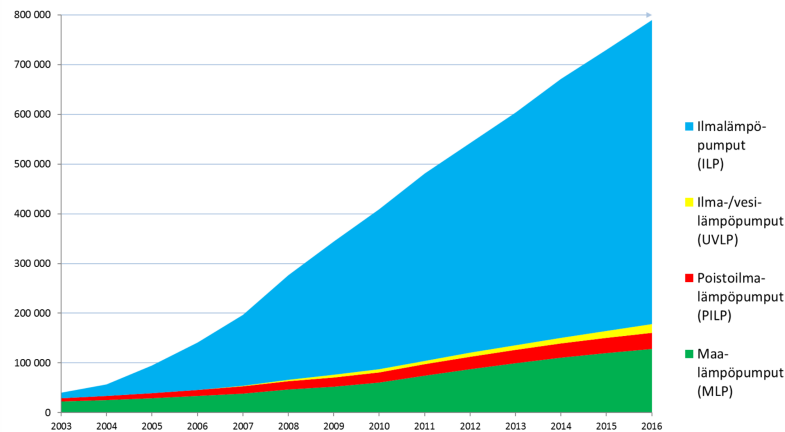
Vaikka kulutus vuoteen 2015 mennessä näyttää olevan laskevassa trendissä, (kuva 3.1), kulutuksen ennustetaan nousevan. Sähkönkulutusta lisäävät mm. sähköautot ja muut lisääntyvät sähkölaitteet. Toisaalta laitteiden energiatehokkuus on parantunut, mikä vähentää niiden sähkönkulutusta, mutta sähkölaitteiden määrä kotitalouksissa on kasvanut.

Kuten kappaleessa 2.4 mainittiin, Jussi Tuunanen on väitöskirjassaan, [40], tutkinut sähkönkäytön muuttumista tulevaisuudessa. Keskeisimpiä vaikuttavia tekijöitä ovat energiatehokkuuden parantuminen, lämpöpumppujen lisääntyminen, asiakkaiden oma sähkön pientuotanto, akkuvarastot ja sähköautojen lataus. Myös kysynnän

jousto eli asiakkaiden kuormituksen ohjaaminen, ja esimerkiksi kuormituksen siirtäminen tehohuipuista muille tunneille, on merkittävä muutostekijä sähkökäytössä [18]. Lisäksi mahdolliset muutoksen sähkön siirtohinnoittelussa voivat vaikuttaa loppuasiakkaiden sähkökäyttöön. Kappaleissa 3.1-3.6 on arvioitu mahdollisia sähkökäytön muutoksia edellä mainittujen tekijöiden vuoksi. Tarkemmat vaikutusanalyysit ovat rajattu lämpöpumppujen vaikutuksiin sähkökäytön kannalta.

### 3.1 Lämpöpumput

Lämpöpumppuja on asennettu etenkin uudisrakennuksiin. Myös vanhemmissa rakennuksissa lämpöpumput lisääntyvät lämmitystapamuutoksien vuoksi. Lämpöpumppujen myyntimäärät vuosina 2003-2016 on esitetty kuvassa 3.2.



**Kuva 3.2** Lämpöpumppujen myyntimäärät Suomessa vuosina 2003-2016. [32]

Kuvasta 3.2 voitiin huomata, että lämpöpumpuista ilmalämpöpumppuja (ILP) on huomattavasti eniten. ILP:a ei yleensä käytetä kiinteistön pääasiallisena lämmitysjärjestelmänä, vaan esimerkiksi sähkölämmityksen rinnalla. ILP:lla saadaan pienentettyä suora sähkölämmitteisen pientalon lämmitysenergiaa keskimäärin 30-40 %, mikä selittää niiden nopean yleistymisen [39]. Ilmalämpöpumppuja ei kuitenkaan ole vielä kaikissa suora sähkölämmitteisissä taloissa, joten niiden määrä tulee todennäköisesti lisääntymään entisestään.

Suomen lämpöpumppuyhdistyksen (SULPU) teettämän selvityksen mukaan maalämpöpumppuja oli noin 10 %:ssa ja ilmalämpöpumppuja noin 44 %:ssa pientaloista vuonna 2016. Ennusteen mukaan vuonna 2030 vastaavasti maalämpöpumppuja olisi 24 %:ssa ja ilmalämpöpumppuja 48 %:ssa pientaloja. Kappalemäärinä maalämpöpumppuja oli vuonna 2016 noin 120 000 ja ilmalämpöpumppuja 500 000. Vastaavasti ennusteen mukaan vuonna 2030 maalämpöpumppuja olisi 300 000 ja ilmalämpöpumppuja 600 000 kappaletta. [25]

Lämpöpumput vaikuttavat sähkönkäyttöön huomattavasti. Lämmitystavan muuttaminen maalämpöön voi joko lisätä tai vähentää sähkönkäyttöä. Vaihdettaessa ei sähkölämmitteisestä järjestelmästä, kuten kauko-, öljy- tai puukeskuslämmitys, maalämpöön, sähkönkäyttö lisääntyy merkittävästi. Jos taas sähkölämmittäjä vaihtaa maalämpöön, sähkönkäyttö todennäköisesti pienenee. Todennäköisimpiä maalämpöön siirtyjiä ovat ne kotitaloudet, joilla lämmönjakotapana on vesikiertoinen lämmitys, kuten vesikiertoinen lattialämmitys tai vesikiertoiset lämmityspatterit.

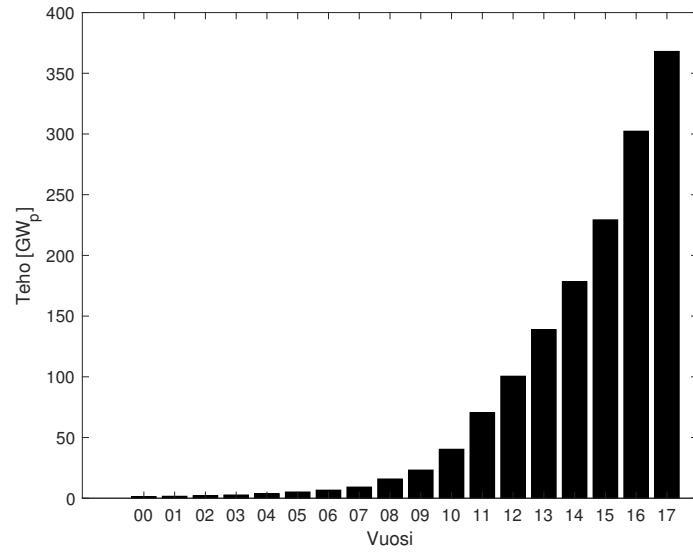
Ilmalämpöpumppu voi myös olla sähkönkäyttöä lisäävä tai vähentävä. Tähän mennessä ILP:ja on asennettu enimmäkseen sähkölämmitteisiin taloihin, jolloin sähkönkäyttö vähenee. Toisaalta ILP:n käyttö viilennyksessä voi lisätä sähkönkäyttöä kesällä. Ilmalämpöpumppuja on asennettu myös esim. kauko- ja öljylämmitteisiin taloihin, jolloin ILP lisää sähkönkäyttöä. Mahdollinen kaukolämmön hinnan nousu todennäköisesti nopeuttaa ilmalämpöpumppujen yleistymistä kaukolämpökohteissa.

On myös huomattava, että ILP ei todennäköisesti pienennä käyttöpaikan huipputehoa, vaikka se voikin vähentää energiankulutusta huomattavasti. Tämä johtuu ILP:n lämpökertoimen (COP) voimakkaasta heikkenemisestä ulkolämpötilan laskiessa.

## 3.2 Hajautettu sähköntuotanto

Hajautetulla sähköntuotannolla tarkoitetaan pieniä sähköntuotantolaitteistoja, jotka voivat sijaita joka puolella sähköverkkoa. Tuotantolaitteistot voivat olla kotitalouksien tai muiden toimijoiden omistamia. Hajautettu sähköntuotanto voi olla minikälaista tuotantoa vain, esimerkiksi tuuli-, bio- tai aurinkovoimalla tuotettua. Tässä työssä hajautetun tuotannon osalta käsitellään ainoastaan aurinkosähköjärjestelmiä.

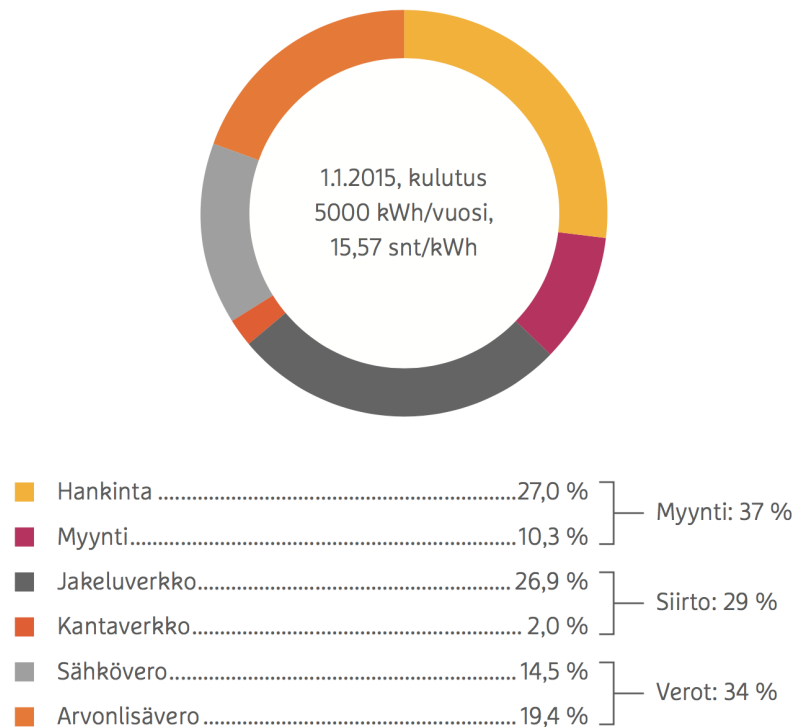
Aurinkosähköjärjestelmät ovat lisääntyneet kotitalouksissa maailmalla runsaasti. Myös Suomessa aurinkosähköjärjestelmät ovat kasvattaneet suosiotaan viime vuosina. Vuoden 2017 alussa maailmassa oli asennettua aurinkosähkökapasiteettia 368 GW<sub>p</sub> (kuva 3.3). Vuoden 2015 loppuun mennessä Suomessa oli aurinkosähkökapasiteettia noin 15 MW<sub>p</sub>.



**Kuva 3.3** Asennettujen aurinkosähköjärjestelmien teho koko maailmassa vuosina 2000-2017. [9], [16]

Suomessa sähkön hinta muodostuu sähkönsiirrosta, sähköenergiasta, sähkö- ja arvolisäveroista sekä huoltovarmuusmaksusta [7]. Eri tekijöiden osuudet sähkön kokonaishinnasta vuonna 2015 on esitetty kuvassa 3.4. Aurinkosähköjärjestelmästä saa parhaan hyödyn, kun kulutusta pystytään kompensoimaan aurinkosähkötuotannolla, jolloin säästetään myös sähkönsiirtomaksu ja verot. Kotitalouksille aurinkosähkön verkkoon tuottaminen ei ole tällä hetkellä kannattavaa. Vaikka aurinkosähköjärjestelmien hinta onkin laskenut reilusti, alhainen sähköenergian hinta on pitänyt verkkoon tuottamisen kannattamattomana. Toisaalta sähkön kokonaishinnan nousminen tekee kulutuksen kompensoinnista entistä kannattavampaa. [43]





*Kuva 3.4 Sähkön hinnan muodostuminen. [6]*

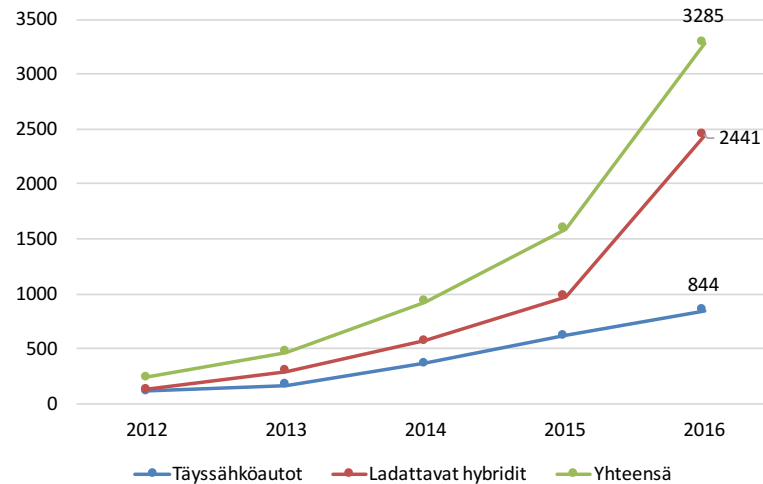
Aurinkosähköjärjestelmien yleistymisen arvioinnissa on huomioitava sähkökäyttäjien kuormituskäyttäytyminen. Jos sähkölle on kysyntää kun aurinko ei paista, voidaan arvioida että aurinkosähköjärjestelmä ei ole sähkökäyttäjälle kannattava investointi. Jos sähkökäyttöä on paljon kesäisin, jolloin aurinkosähkötuotantoa tulee, aurinkosähköjärjestelmä on todennäköisemmin kannattava.

Suomessa sähköverkkojen huipputehot ovat tyypillisesti talvella, joten aurinkosähköjärjestelmät eivät pienennä huipputehoja. Sen sijaan kesällä, kun sähkön kysyntä on pientä ja aurinkosähkön tuotanto suurta, aurinkosähköjärjestelmät voivat aiheuttaa ongelmia esim. muuntajien ylikuormituksessa, jos alueellisesti useita aurinkosähköjärjestelmiä syöttää sähköverkkoa samanaikaisesti.

### 3.3 Sähköautot

Sähköautoiksi luokitellaan täyssähköautot sekä ladattavat hybridit. Ladattavissa hybrideissä on sähkömoottorin lisäksi myös polttomoottori, mitä voidaan käyttää lisäämään tehoa tai kun akkujen varaus on vähissä. Rajallinen toimintasäde onkin ollut sähköautojen ongelma, mikä puolestaan näkyy ladattavien hybrideiden yleistymisenä.

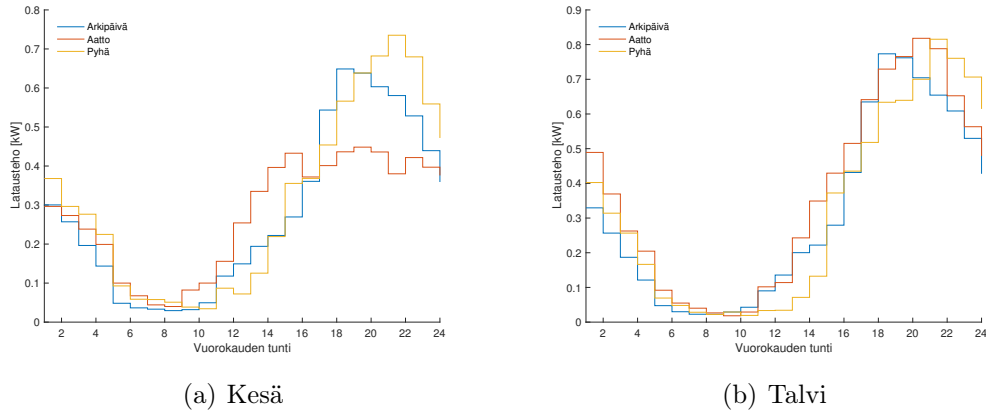
Vuoden 2016 loppuun mennessä Suomessa oli 3 285 sähköautoa, joista 844 oli täyssähköautoja ja 2 441 ladattavaa hybridiä, kuva 3.5 [36], [37]. Osuus koko henkilöautokannasta on vain noin 0.07 %. Sähköautot voivat kuitenkin lisääntyä nopeasti poliittisten päätösten ja esim. erilaisten tukien vuoksi. Esimerkiksi Norjassa oli vuoden 2016 loppuun mennessä jo yhteensä yli 135 000 sähköautoa [11]. Tavoitteen mukaan vuonna 2030 Suomessa olisi 250 000 sähköautoa. VTT:n ennuste puolestaan on noin 120 000 sähköautoa. [23]



**Kuva 3.5** Liikennekäytössä olevat ladattavat hybridit ja täyssähköautot Suomessa vuosina 2012-2016. [36], [37]

Sähköautojen lataus lisää sähkönkäyttöä merkittävästi. Tämänhetkisen määrän sähköautojen lataus ei aiheuta ongelmia sähköverkoille, mutta sähkönjakeluverkot eivät todennäköisesti kestä 250 000 sähköauton latauskuormaa ilman verkkojen saneerausta. Kuorman ohjauksella sähköautojen latauksen verkostovaikutuksia voidaan kuitenkin lieventää [34].

Lataus- sekä akkutyypit vaikuttavat myös sähkönkäytön muuttumiseen sähköautojen seurauksena. Kuvassa 3.6 on esitetty keskimääräisen ladattavan hybridin vuorokausilatausprofiilit 3 kW latausteholla. Lataustehojen risteilyn vuoksi yksittäisen tunnin lataustehot ovat suhteellisen pieniä. Lisää latausprofiileiden muodostuksesta löytyy lähteestä [30].



**Kuva 3.6** Keskimääräisen ladattavan hybridin vuorokausilatausprofiilit 3 kW latausteholla kesä- ja talviajalle. [30]

### 3.4 Akkuvarastot

Energiavarasto voi olla esimerkiksi akku, kondensaattori tai vaikka pato, jolla varastoidaan vettä, mitä voidaan juoksuttaa turbiinien läpi tarvittaessa. Tässä työssä energiavarastojen käsittely on kuitenkin rajattu akkuihin.

Akkuvarastojen sovelluskohteita kotitalouksille ovat esimerkiksi pientuotannon varastointi, varavoima sähkönjakelun keskeytysten varalle sekä sähkölaskun pienentäminen siirtämällä verkosta otettavaa tehoa akun avulla [40]. Tällä hetkellä sähkönkäyttäjät maksavat Suomessa käytännössä ainoastaan sähköenergiasta, joten investointi akkuun ei yleensä ole kannattava ilman aurinkosähköjärjestelmää tai muuta tuotantolaitteistoa. Tämä on yksi syy, että akut energiavarastoina eivät ole yleistyneet kotitalouksissa. Aurinkosähköjärjestelmän yhteydessä akkuvarastoilla voidaan saada hyötyjä varastoimalla aurinkosähkötuotantoa, jolloin sitä voidaan käyttää myös silloin kun aurinko ei paista.

Myös sähköautojen akkuja voidaan käyttää hajautettuina energiavarastoina [22]. Auton akku ei kuitenkaan voi olla silloin täyteen ladattuna koko ajan, koska siitä pitää voida ottaa tehoa tarvittaessa ja ladata taas kun muuta sähkön kysyntää on vähemmän.

### 3.5 Kysynnän jousto

Kysynnän joustolla tarkoitetaan sähköasiakkaiden kuormituksen ohjaamista esim. sähkön hinnan tai verkon kuormituksen mukaan. Älykäs sähköverkko tuo paljon

uusia mahdollisuuksia kysynnän joustoon. Yksinkertaisin esimerkki kysynnän joustosta on lämminvesivaraajan päälle kytketymisen ohjaus sähköenergian pörssihiinan mukaan. Tästä käytetään nimitystä kysynnän hintajousto. Verkkoyhtiö voi myös tehdä asiakkaiden kanssa sopimuksen, että tiettyjä laitteita, kuten lämminvesivaraaja tai pakastin, voidaan kytkeä pois tai päälle korvausta vastaan. Tästä puhutaan myös kuorman ohjauksena.

Suomessa on paljon potentiaalia kysynnän joustolle suuren lämmityskuorman vuoksi [40]. Myös tällä hetkellä käytössä olevat 2-aikatariffit ovat eräänlaista kysynnän joustoa. Potentiaalia on kuitenkin vielä paljon käyttämättä. Esimerkiksi suurin osa maalämpöjärjestelmistä toimii tällä hetkellä ilman minkäänlaista ohjausautomaatiikkaa.

Kysynnän jousto ei yleensä vähennä sähköenergiankulutusta, sillä se pyrkii siirtämään kulutuksen ajankohtaa. Tämän vuoksi sähkökäyttäjien kuormitusprofiilit voivat muuttua huomattavasti, vaikka vuosienenergiankulutus pysyykin samana. Kysynnän jouston mallintaminen on tehtävä jokaiselle sähkökäyttäjälle erikseen, sillä kysynnän joustoon on mahdollisuus vain kunkin sähkökäyttäjän kuormitusprofiilin mukaan.

### 3.6 Siirtohinnoittelun muutokset

Suomessa sähköverkkoyhtiöt laskuttavat sähkönsiirrosta enimmäkseen siirretyn sähköenergian mukaan. Näin ollen verkkoyhtiön tulot riippuvat asiakkaiden kuluttaman energian määrästä, ja esim. leutona talvena tulot jäävät pienemmiksi kuin kylmänä talvena. Myös sähköjakeluverkot tulee mitoittaa huipputehon mukaan, joten energiapohjainen hinnoittelu ei vastaa verkon kustannuksia. [15]

Siirtohinnoittelun muuttaminen tehopohjaiseen hinnoitteluun voi vaikuttaa kotitalouksien sähkökäyttöön huomattavasti. Hinnoittelumuutokset vaikuttavat suoraan myös esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmien kannattavuuteen (kuva 3.4). Myös sähkökäyttäjien halukkuus kysynnän joustoon voi lisääntyä merkittävästi. Akkuvarastojen käyttö piikin leikkauksessa tulee myös todennäköisesti yleistymään tehopohjaisen hinnoittelun myötä.

### 3.7 Energiatehokkuus

EU direktiivit ohjaavat energiatehokkuuden parantamiseen mm. rakentamisessa, valaistuksessa ja kodinkoneissa. Suurin vaikutus sähkönkulutukseen on rakennus-

ten energiatehokkuuden paranemisella. Myös hehkulamppujen vaihtuminen LED-lamppuihin ja esimerkiksi televisioiden energiatehokkuuden paraneminen vähentävät kotitalouksien sähkönkulutusta. Toisaalta elektronisten laitteiden lukumäärä kotitalouksissa todennäköisesti kasvaa, mikä lisää sähkönkulutusta.

### 3.8 Yhteenveto

Sähkönkäyttö on murroksessa. Muutostekijöiden arviointi on hankalaa ja eri tekijät vaikuttavat myös toisiinsa. Tämän vuoksi erilaisia skenaarioita mallinnettaessa tulisikin huomioida kaikki arvioidut muutostekijät.

Suurimpia sähkönkäyttöön vaikuttavia muutostekijöitä ovat lämpöpumput, aurinkosähköjärjestelmät sekä sähköautojen yleistyminen. Myös energiatehokkuus on vaikuttava tekijä etenkin uudisrakennusten sähkönkäytössä. Muutosten arvioinnista tekee erityisen hankalaa mahdolliset laki- ja siirtohinnoittelu muutokset. Myös aurinkosähkön ja sähköautojen tuet vaikuttavat niiden yleistymiseen radikaalisti.

Sähkömarkkinalain toimitusvarmuusvaatimusten vuoksi sähkönjakeluverkkoihin tul- laan investoimaan huomattavasti seuraavan 15 vuoden aikana. Sähkönkäytössä ta- pahtuvat muutokset olisi pystyttävä mallintamaan riittävän tarkasti, jotta vältetään turha verkkojen ylimitoittaminen.

## 4. TUTKIMUSALUEEN LÄHTÖKOHDAT JA KÄYTETYT AINEISTOT

Tutkimukseen kerättiin aineistoa useista eri tietokannoista. Verkkoyhtiöiden verkko-tietojärjestelmistä ja asiakastietokannoista saatiin asiakkaiden sähkönkäyttötiedot. Lämpötilat luettiin Ilmatieteen laitoksen avoin data palvelusta [17]. Lisäksi rakennustietoja haettiin Maanmittauslaitoksen maastotietokannasta sekä väestötietorekisteristä [24], [41]. Lämpöpumppujen vaikutuksien analysoinnissa käytettiin VTT:n SGEM-tutkimusprojektissa simuloituja lämpöpumppujen kuormituskäyriä [21].

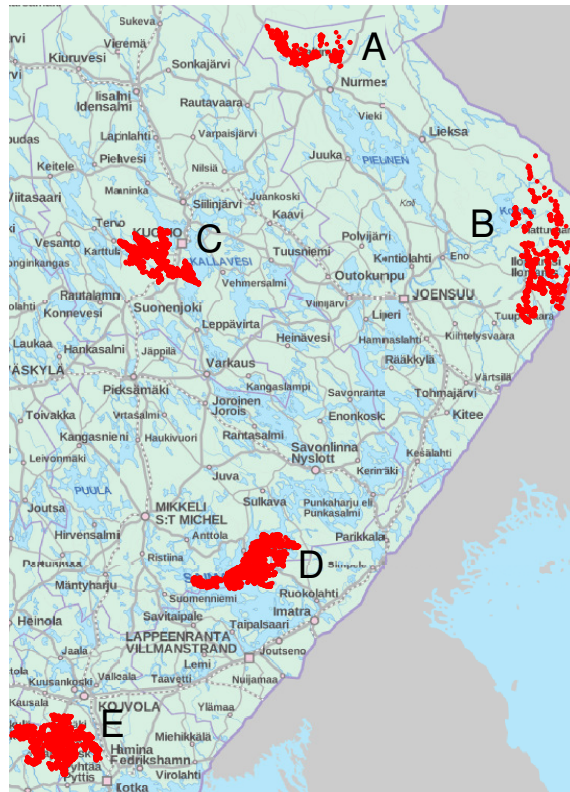
### 4.1 Sähköasiakasaineisto

Tutkimusaineisto oli neljästä eri jakeluverkkoyhtiöstä. Verkkoyhtiöt olivat Järvi-Suomen Energia, Savon Voima Verkko, Pohjois-Karjalan Sähkösiiirto Oy ja Kymenlaakson Sähköverkko Oy. Kaikkien yhtiöiden aineisto oli hieman erilaisilta alueilta, mutta aineisto käsitti pääosin omakotitaloja harvaan asutuilta alueilta. JSE:n aineisto poikkesi tosin muiden yhtiöiden aineistosta, sillä se oli kesämökkialueelta ja suurin osa käyttöpaikoista oli vapaa-ajan asuntoja.

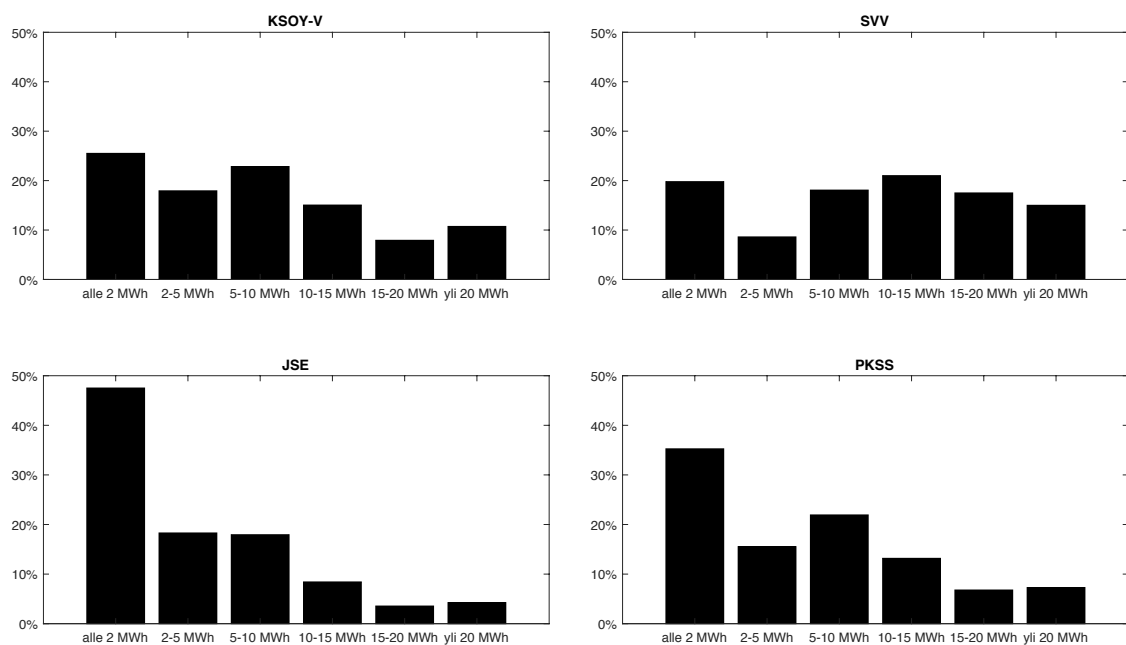
Työssä käytetyn verkkoaineiston tunnuslukuja on esitetty taulukossa 4.1 ja käyttöpaikkojen sijainti kartalla on esitetty kuvassa 4.1. Käyttöpaikkojen vuosienenergiajakaumat yhtiöittäin ovat esitetty kuvassa 4.2.

**Taulukko 4.1** Tutkimusaineisto yhtiöittäin.

	JSE	SVV	KSOY-V	PKSS	Yht./ka.
Asiakkaat [kpl]	1 995	2 799	4 026	1 988	10 808
Keskimääräinen vuosienenergia [MWh]	5.3	12.1	11.7	7.7	9.2
Johtolähdöt [kpl]	3	5	8	5	21
Muuntamot [kpl]	258	277	387	386	1 308

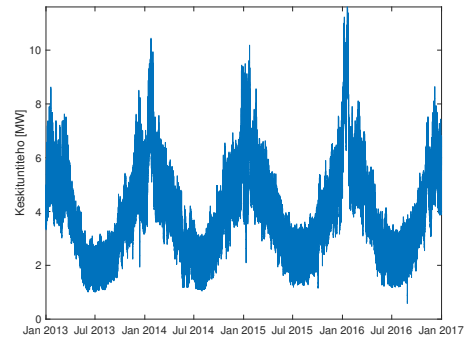
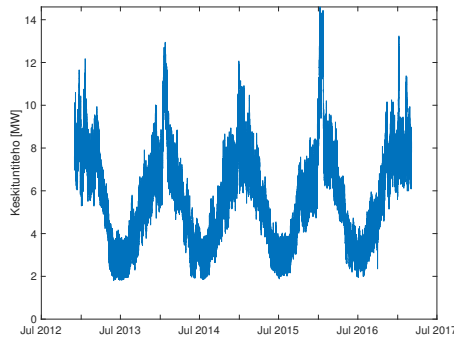


**Kuva 4.1** Alueet joilta tutkimuksessa oli AMR-dattaa, missä A on PKSS Valtimo, B on PKSS Ilomantsi, C on SVV, D on JSE ja E on KSOY-V. Karttakuva: [24].

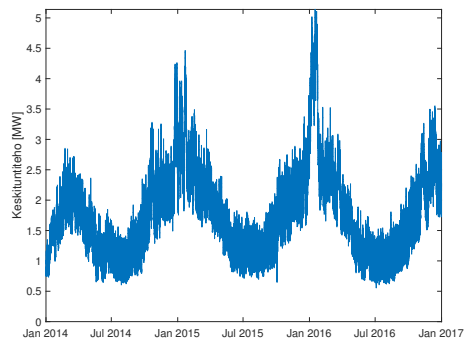
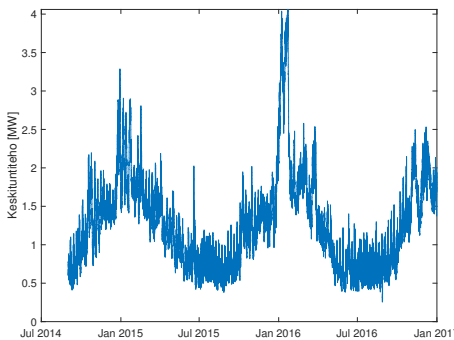


**Kuva 4.2** Käyttöpäikkojen vuosienergiajakaumat yhtiöittäin. Y-akselilla käyttöpäikkojen osuus koko aineistosta.

Kaikkien yhtiöiden AMR-aineistoissa oli huomattavan paljon käyttöpaikkoja, joilla on kulutusta alle 2 000 kWh vuodessa, (kuva 4.2). JSE:n aineistossa pienten kuluttajien osuus oli erityisen suuri, sillä aineisto oli kesämökkialueelta ja suurin osa käyttöpaikoista oli vapaa-ajan asuntoja. Eniten suurempia sähkökäyttäjiä oli KSOY-V:n ja SVV:n aineistoissa. Kuvassa 4.3 on esitetty yhtiökohtaiset AMR-datasta lasketut tunneittaiset summatehot. On syytä huomata, että ajankohdat ja käyttöpaikkojen lukumäärät vaihtelevat yhtiöittäin. Kuvassa 4.4 on kuvattu käyttöpaikkojen huipputuntehojen ja vuosienergioiden jakaantuminen pysyvyyskäyränä. Huipputuntehojen ja vuosienergioiden kuvaajissa käyttöpaikat eivät ole samassa järjestyksessä vaan molemmat on järjestetty suurimmasta pienimpään erikseen. Kuvasta 4.4 nähdään hyvin, että aineisto oli pääosassa kotitalous ja vapaa-ajan käyttöpaikkoja, joilla huipputunteho oli alle 15 kW.



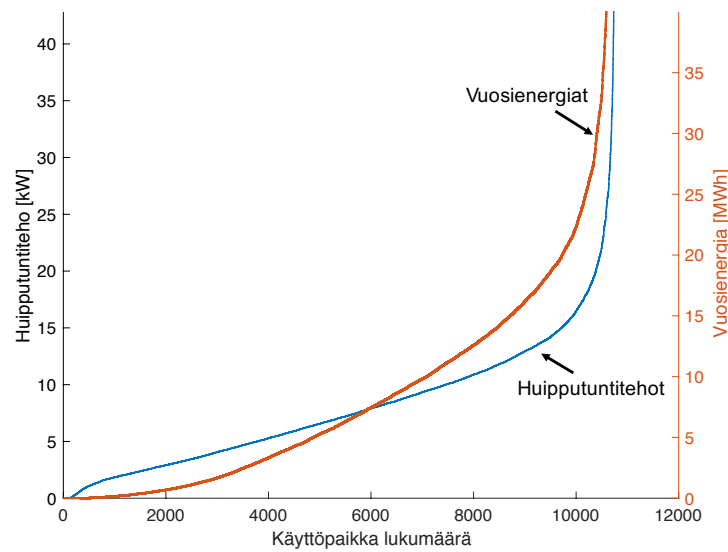
(a) KSOY-V summateho 30.11.2012 - 5.3.2017. (b) SVV summateho 1.1.2013 - 31.12.2016.



(c) JSE summateho 1.9.2014 - 31.12.2016. (d) PKSS summateho 1.1.2014 - 31.12.2016. Aineiston alkuosasta puuttui paljon mittaus-tietoja, minkä vuoksi teho siltä ajalta on pienempi

**Kuva 4.3** AMR-datasta lasketut tunneittaiset summatehot yhtiöittäin.





**Kuva 4.4** Käyttöpaikkojen huipputuntitehojen jakaantuminen ja vuosienergioiden jakaantuminen. Käyttöpaikat eivät ole käyrissä samassa järjestyksessä vaan ne on järjestetty erikseen suurimmasta pienimpään.

AMR-datan lisäksi käytössä oli käyttöpaikkojen nykyiset tyyppiluokitukset ja sijaintitiedot. Sijaintitietoja hyödynnettiin mm. rakennustietojen linkityksiin.

## 4.2 Asiakaskysely

Tutkimusprojektissa toteutettiin 800 sähköasiakkaalle kysely (200 asiakasta/yhtiö), jolla selvitettiin yksityiskohtaisempia tietoja sähkönkäyttöpaikan nykytilasta ja tuleeko sähkönkäyttö mahdollisesti muuttumaan tulevaisuudessa. Diplomityön näkökohdasta kyselyn tuloksien avulla voitiin varmistaa mm. eri lämmitysmuotojen tunnistamisen onnistuneisuutta. Kyselystä saatiin myös hyvin aineistoa ilmalämpöpumpullisista käyttöpaikoista, joista saatavien tietojen avulla voitiin yrittää tunnistaa ILP:a AMR-datan perusteella. Lisäksi saatiin tietoa mahdollisista tulevista lämmitystapamuutoksista.

## 4.3 Rakennustiedot

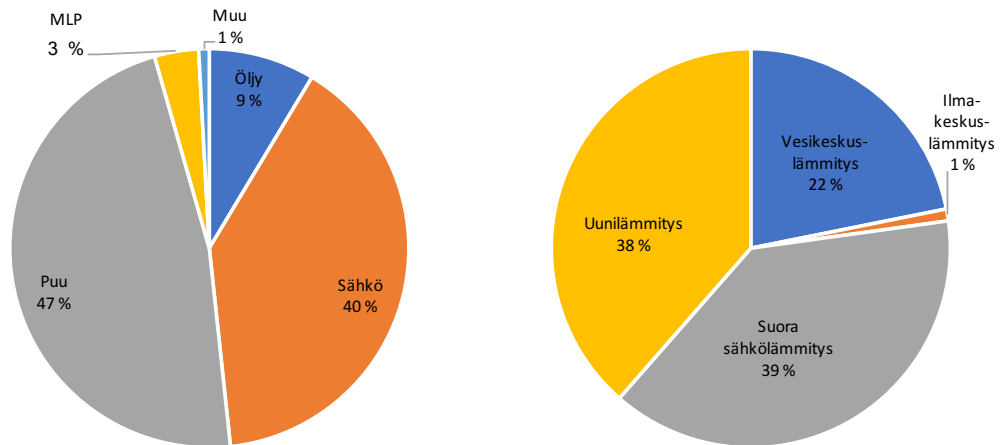
Maanmittauslaitoksen maastotietokanta on maastoa kuvaava aineisto. Aineisto kattaa periaatteessa kaikki kartassa näkyvät kohteet. Aineisto kattaa rakennuksista eri tietoja, kuten kattopinta-alat, kulman, mihin ilmansuuntaan rakennus osoittaa, rakennuksen tyyppin sekä sijainnin koordinaatit. Rakennuksista saatiin tarkemmat

tiedot väestötietorekisteristä, joten tässä työssä maastotietokannasta hyödynnettiin ainoastaan karttakuvia.

Tutkimusprojektin tarpeisiin haettiin väestötietorekisteristä tarkempia tietoja rakennuksista. Haku suoritettiin kaikilta niiltä postinumeroalueilta, joilla sähkönkäyttöpaikkoja sijaitti. Väestötietorekisteri sisältää kattavat tiedot rakennuksista. Aineistosta saatiin mm. rakennuksen valmistumispäivä, kerrosala, tilavuus, käyttötarkoitus, lämmitysmuoto, rakennusmateriaali sekä sijainnin koordinaatit.

Rakennukset linkitettiin käyttöpaikkoihin koordinaattien perusteella. Jokainen rakennus linkitettiin lähimpään käyttöpaikkaan ja varmistettiin, että saman kiinteistötunnuksen rakennuksen olivat liitetty vain yhteen käyttöpaikkaan. Jos saman kiinteistön rakennuksia oli linkitetty usealle käyttöpaikalla, kiinteistön käyttöpaikaksi oletettiin se, johon etäisyys oli lyhin. Kuitenkin jos lyhin etäisyys oli yli 100 m, rakennukselle ei linkitetty mitään käyttöpaikkaa. Rakennustiedot saatiin linkitettyä 9182 käyttöpaikalle, mikä vastaa noin 87 % aineiston käyttöpaikoista, joilla pitäisi olla rakennus. Käyttöpaikkoja jäi linkittämättä rakennuksiin mm. väestötietorekisteristä puuttuvien koordinaattien vuoksi. Myöskään rakennuksiin, joissa voi olla useampia käyttöpaikkoja, kuten rivitalot, ei saatu linkitettyä kaikkia käyttöpaikkoja käytetyllä menetelmällä. Kuitenkin suurimmalle osalle tutkimusaineiston sähkönkäyttöpaikoista saatiin linkitettyä rakennustiedot.

Väestörekerikeskuksen (VRK) aineistosta havaittiin, että puulämmitteisiä käyttöpaikkoja oli eniten. Puulämmitteisiä rakennuksia oli sekä uuni- että vesikeskuslämmityksellä varustettuna. AMR-aineiston ja asiakaskyselyn perusteella puulämmitteiseksi on merkattu myös sellaisia rakennuksia, joissa on puulämmiteinen leivinuuni tai takka sekä lisänä sähkölämmitystä. Myös lämmitystapamuutoksista johtuen VRK:n lämmitystapa luokitus ei pitänyt kaikissa tapauksissa paikkaansa. Mm. maalämpökohteita, joista saatiin tieto asiakaskyselystä, oli merkattu öljy- ja puulämmitteisiksi. Tämä monimutkaisti asiakkaiden luokittelua lämmitystapojen mukaan. Käyttöpaikkojen lämmitysmuotojen ja lämmönjakotapojen jakaumat ovat esitetty kuvassa 4.5.



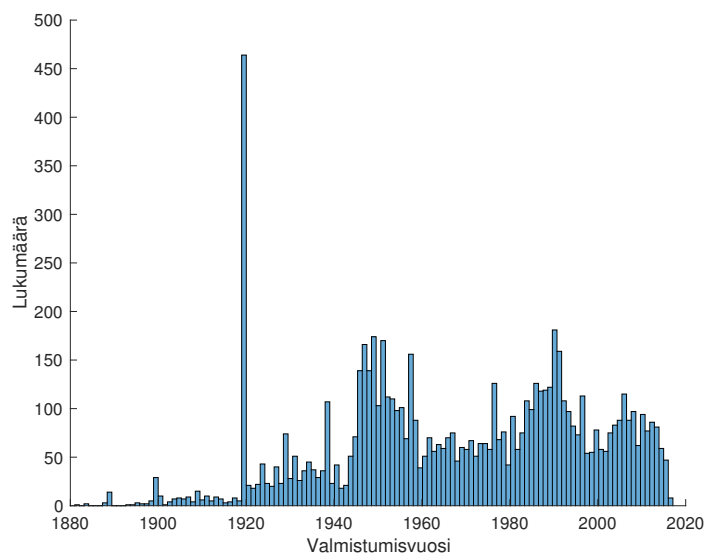
(a) Lämmitysmuotojen jakauma.

(b) Lämmönjakotapojen jakauma.

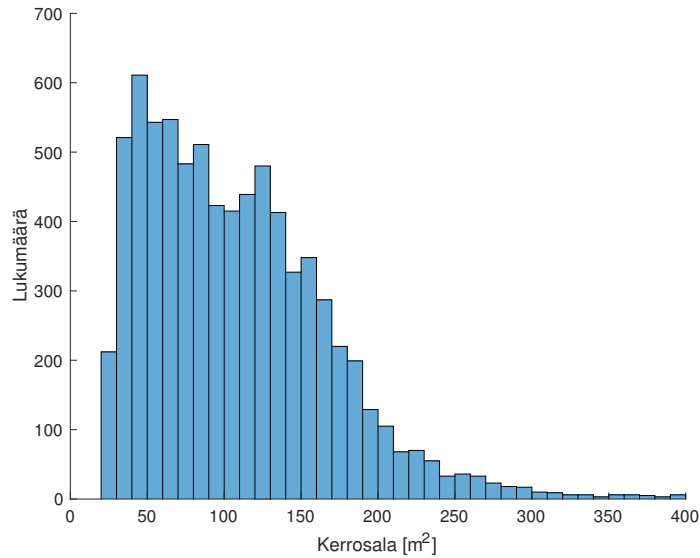
**Kuva 4.5** Käyttöpaikkojen lämmityksien jakaantuminen VRK:n aineiston mukaan.

Toiseksi eniten käyttöpaikoista oli suora sähkölämmitteisiä. Tämä oli helppo havaita jo ennen rakennustietojen saantia AMR-datan perusteella. Maalämpö oli VRK:n aineiston mukaan ainoastaan 273 käyttöpaikassa. Ilmalämpöpumpuista väestötietorekisteristä ei ole tietoa, joten niitä jouduttiin tunnistamaan muilla keinoin.

Rakennusten valmistumisvuodet jakaantuivat melko tasaisesti, lukuun ottamatta suurta piikkiä vuonna 1919, kuva 4.6. 1950-, 1990- ja 2010-luvuilla oli myös havaittavissa suuremmat rakennusten valmistumisvuosikymmenet.

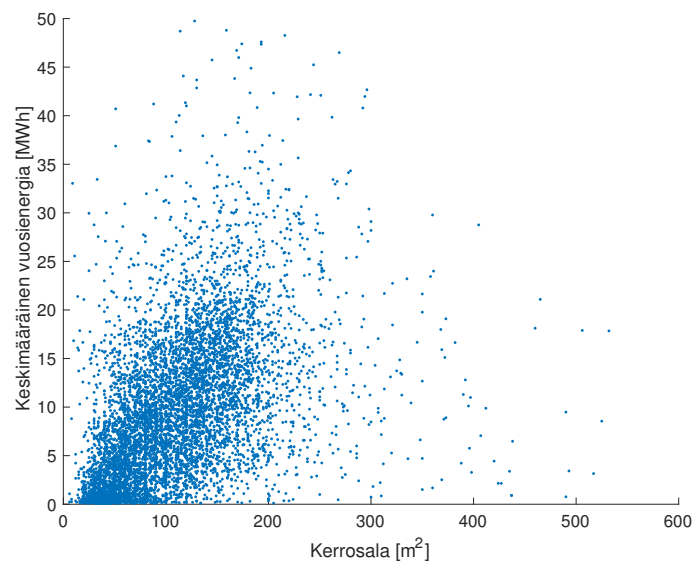
**Kuva 4.6** Histogrammi rakennusten valmistumisvuosista.

Suuresta vapaa-ajan asuntojen määrästä johtuen käyttöpaikoissa oli paljon pieniä rakennuksia. Myös yli 200 m<sup>2</sup> rakennuksia oli jonkun verran, mutta suurin osa oli alle 150 m<sup>2</sup> rakennuksia, kuva 4.7.



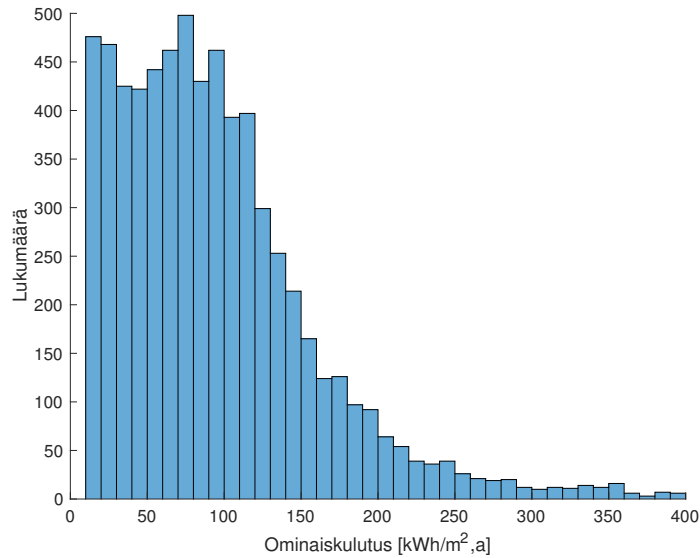
*Kuva 4.7* Histogrammi rakennusten kerrosaloista.

Kuvassa 4.8 on esitetty käyttöpaikkojen keskimääräinen vuosienenergia kerrosalan funktiona. Kuvasta oli nähtävissä, että vuosienenergia kasvaa kerrosalan mukaan jossain määrin lineaarisesti. Hajonta on kuitenkin aika suurta ja tämän perusteella ei tehty tarkempia analyysejä.



*Kuva 4.8* Käyttöpaikkojen keskimääräinen vuosienenergia kerrosalan funktiona.

Kuvassa 4.9 on esitetty keskimääräisten vuosienergioiden ja kerrosalojen mukaan laskettujen ominaiskulutusten histogrammi. Myös ominaiskulutuksista oli havaittavissa vapaa-ajan asuntojen suuri määrä.

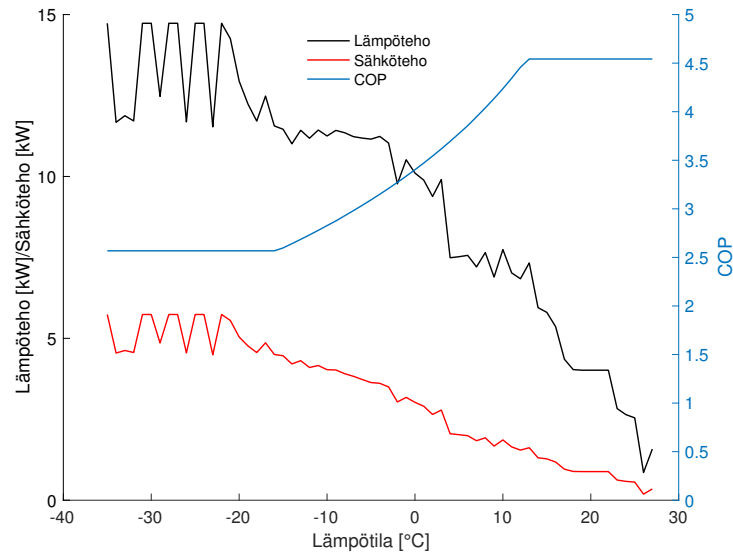


*Kuva 4.9 Histogrammi käyttöpaikkojen ominaiskulutuksista.*

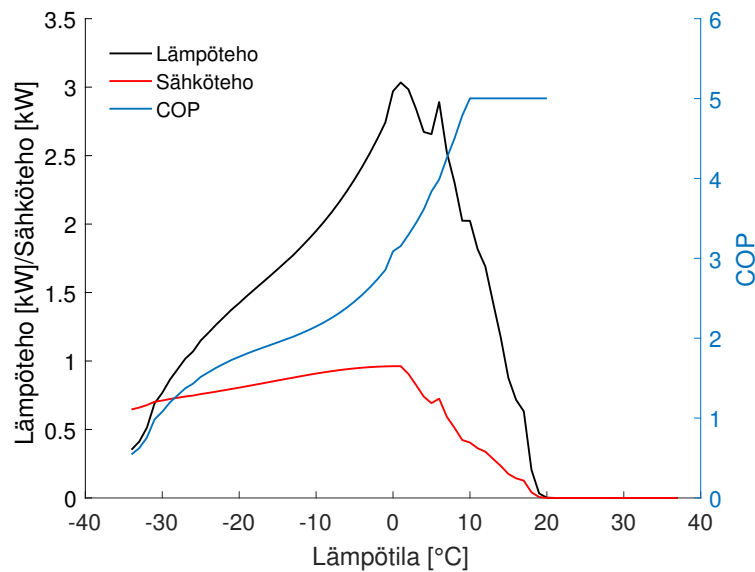
## 4.4 Lämpöpumppujen kuormituskäyrät

Lämpöpumppujen vaikutusten mallintamiseen käytettiin VTT:n lämpöpumpuille simuloimia sähkönkulutusmalleja [21]. Työssä käytettiin täystehomitoitetun maalämpöpumpun simuloiteja. Maalämpömalleja VTT:llä oli 1970- ja 2000-luvun taloille sekä passiivitaloille. 1990 ja sitä uudemmille taloille käytettiin 2000-luvun mallia ja 2010 uudemmille passiivitalon mallia. Vuotta 1990 vanhemmille taloille sovellettiin 1970-luvun talon malleja. Käyttöpaikoille, joista ei ollut rakennusvuositietoa, käytettiin sen ryhmän keskiarvorakennusvuotta. Simuloinnit olivat 142 m<sup>2</sup> yksikerroksiselle talolle (ns. RET-pientalo). Mallinuksissa VTT:n malli skaalattiin kuitenkin aineiston todellisten kerrosalojen mukaan jokaiselle käyttöpaikalle erikseen.

Kuvissa 4.10 ja 4.11 on esitetty VTT:n simuloimien lämpöpumppujen lämpö- ja sähkötehot sekä lämpökerroin (COP) lämpötilan funktiona. Kuvan 4.10 MLP malli on 1970-luvun talolle. Kuvasta 4.10 on havaittavissa, että maalämpöpumpun sähkönkulutus on voimakkaasti lämpötilariippuvainen. Simulaatiossa lämpimän käyttöveden tarve oli suurella painoarvolla, mikä voidaan havaita myös kuvan 4.10 lämpötehon vaihtelusta kylmillä lämpötiloilla.



**Kuva 4.10** VTT:n mallintama maalämpöpumpun antolämpöteho, ottosähköteho ja COP lämpötilan funktiona. Kuvan malli on 1970-luvun talolle simuloitu. [21]



**Kuva 4.11** VTT:n mallintaman ilmalämpöpumpun antolämpöteho, ottosähköteho ja COP lämpötilan funktiona. [21]

Ilmalämpöpumpun COP laskee voimakkaasti lämpötilan laskiessa alle  $-25^{\circ}\text{C}$ . Toisaalta jo  $-20^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa COP on lähes 2, eli yhdellä kWh:lla sähköä voidaan tuottaa 2 kWh lämpöä. Kuvasta 4.11 voitiin nähdä, että simuloitun ilmalämpöpumpun COP laskee erittäin kylmillä lämpötiloilla alle yhden. Tämä on linjassaan aiempien testien kanssa. Tämän työn mallinuksissa oletettiin, että ILP:a ei käytetä erittäin kylmillä ilmoilla, joten alle yhden COP-luvuilla ei ollut vaikutusta.

VTT:n maalämpö simulointien vuotuiset lämmitysenergiat eri talotyypeille ovat esitetty taulukossa 4.2. On huomattava, että taulukossa esitetyt energiat ovat simuloitu Jyväskylän vuoden 1979 lämpötiloilla. Taulukossa on esitetty myös lämmitystarveluvuilla korjatut lämmitysenergiat. Tässä työssä tehdyissä mallinuksissa VTT:n malleista muodostettiin regressiomallit lämpötilan mukaan ja mallinnukset tehtiin jokaiselle käyttöpaikalle sen hetkisillä alueellisilla lämpötiloilla.

**Taulukko 4.2** VTT:n simuloimien maalämpötalojen vuotuiset lämmitysenergiat.

<b>Energia [MWh/a]</b>	<b>1970-luvun talo</b>	<b>2000-luvun talo</b>	<b>Passiivitalo</b>
Antolämpöenergia	36.7	19.4	8.2
Ottosähköenergia	11.6	6.0	2.5
Antolämpöenergia normeerattu	35.5	18.8	8.0
Ottosähköenergia normeerattu	11.2	5.8	2.5

## 5. TYYPPIKÄYTTÄJÄLUOKITTELU

Sähkökäyttäjiä luokiteltiin AMR-mittausten sekä rakennustietojen avulla. AMR-datan klusterointi tehtiin MATLAB<sup>®</sup> ohjelmalla K-means klusteroinnilla. Seuraavissa kappaleissa on kuvattu tyyppikäyttäjälukitteluun käytetyt menetelmät sekä tyyppikäyttäjälukittelun tulokset.

### 5.1 Eri lämmitysmuotojen lämpötilariippuvuudet

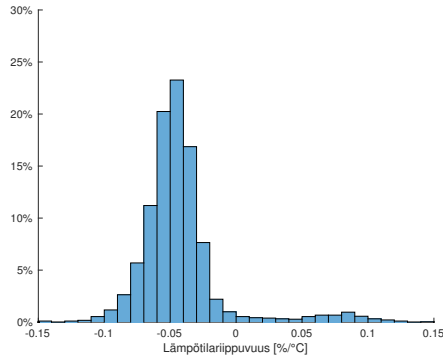
Väestötietorekisterin lämmitysmuotoluokitusten mukaan eri lämmitysmuodoille laskettiin lämpötilariippuvuuksia. Laskennalla voitiin arvioida lämmitystapatietojen ajantasaisuutta sekä saatiin parametreja esiluokitteluun lämmitysmuotojen mukaan. Eri lämmitysmuodoille laskettujen lämpötilariippuvuuskertoimien suhteelliset histogrammit ovat esitetty kuvassa 5.1. Kuvassa negatiivisella kertoimella sähkökulutus kasvaa lämpötilan laskiessa.

Kuvasta 5.1 voidaan selvästi nähdä, että osa lämmitystapatiedoista ei ole ajan tasalla. Etenkin öljylämmitteisiksi merkatuissa käyttöpaikoissa suuri osa lämpötilariippuvuuksista on maalämmön ja sähkölämmityksen lämpötilariippuvuuksien tasolla. Öljylämmityksen histogrammissa näkyy myös huomattavan paljon positiivisia lämpötilariippuvuuksia, mikä viittaa rakennuksien käyttötarkoituksen muuttumiseen ympärivuotisesta käytöstä kesäajan käyttöön, sillä suurin osa rakennuksista oli kuitenkin merkattu asuinrakennuksiksi. Myös puukeskuslämmityksessä näkyy jyrkkiä lämpötilariippuvuuksia. Todennäköisesti myös näissä kohteissa on tehty lämmitystavanmuutos esim. maalämpöön. Toisaalta voimakkaampi lämpötilariippuvuus voi olla seurausta myös puukattilan sähkövastusten käytöstä.

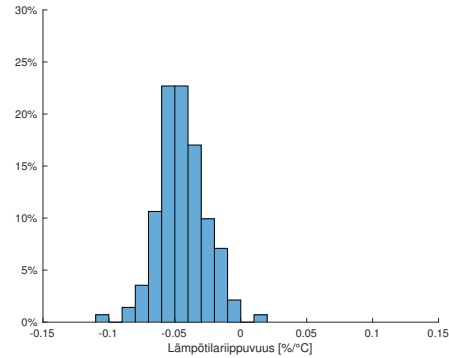
Maalämpökohteiden lämpötilariippuvuudet olivat huomattavan jyrkät verrattuna sähkölämmityskohteisiin. Maalämmön ja sähkölämmityksen lämpötilariippuvuuksien havaittiin olevan lähes samansuuruisia. Todennäköisesti sähkölämmitteisissä kohteissa poltetaan enemmän puuta, mikä loiventaa sähkölämmityksen lämpötilariippuvuutta. Myös sisälämpötilat voivat olla maalämpötaloissa korkeammat kuin sähkölämmitteisissä taloissa.



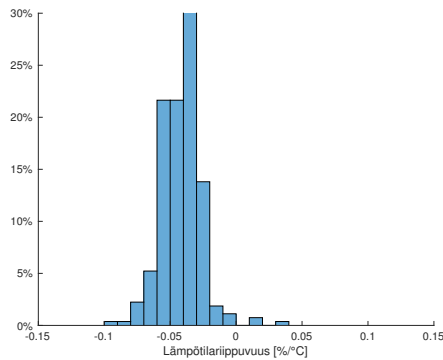
Uunilämmityksen histogrammista oli selvästi nähtävissä, että lisälämmityksenä käytetään myös sähköä. Todennäköisesti asuinkäytössä olevissa kohteissa on myös sähköpatterit uunien lisäksi. Uunilämmitteisissä käyttöpaikoissa oli myös huomattavasti vapaa-ajan asuntoja, mikä näkyy positiivisina lämpötilariippuvuuksina.



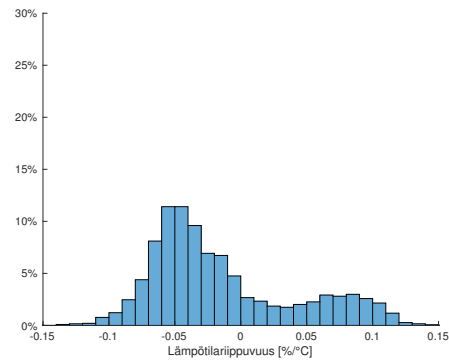
(a) Suora sähkölämmitys



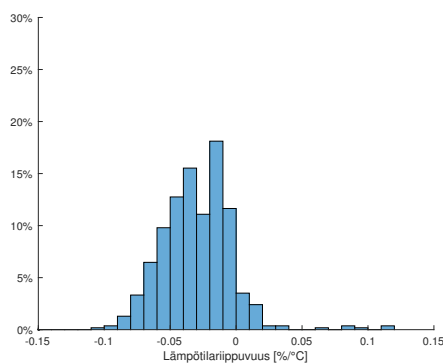
(b) Vesikiertoinen sähkölämmitys



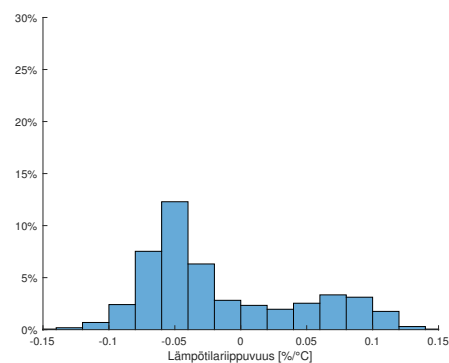
(c) Maalämpö



(d) Öljylämmitys



(e) Puukeskuslämmitys



(f) Uunilämmitys

**Kuva 5.1** Väestörekisterikeskuksen lämmitysmuototietojen mukaan eri lämmitysmuodoille laskettujen lämpötilariippuvuuksien histogrammit.

Lämpötilariippuvuuksien vertailusta voitiin tehdä johtopäätös, että kaikki väestötie-

torekisterin lämmitysmuototiedot eivät ole ajan tasalla. Havaittiin myös, että uuni-lämmitykseksi on todennäköisesti merkattu sähköpattereita varustettuja taloja. Lämpötilariippuvuuksista selvisi myös, että maalämmön lämpötilariippuvuus on lähellä sähkölämmityksen lämpötilariippuvuutta. Tämä vaikeuttaa maalämpökohteiden erottamisesta sähkölämmityskohteista.

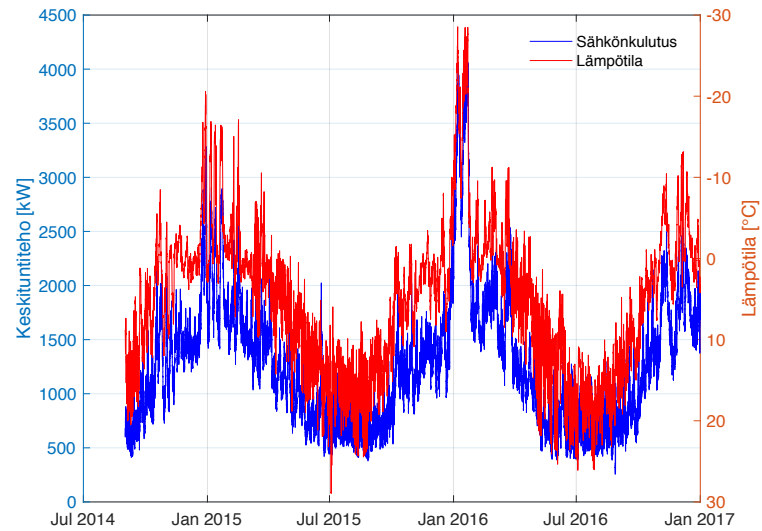
## 5.2 AMR-datan esiprosessointi

Ennen tuntisarjojen klusterointia, dataa on esiprosessoitava. Suomessa sähkönkulutus on voimakkaasti riippuvainen lämpötilasta, joten eri vuosien sähkönkulutus voi vaihdella eri vuosien lämpötilaerojen vuoksi. Myös esimerkiksi samanlaisten sähkökäyttäjien asuntojen koot vaihtelevat paljon, jonka vuoksi sähkökäyttäjien tunti-tehoissa on suuria eroja.

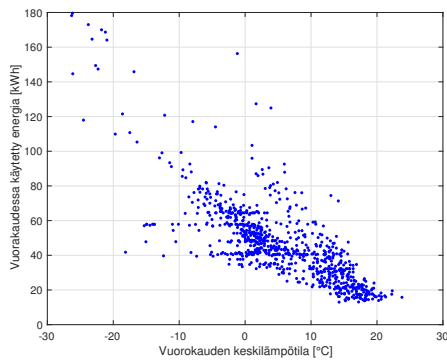
### 5.2.1 Lämpötilakorjaus

Suomessa suuri osa sähköstä kuluu asuntojen lämmitykseen. Näin ollen useilla sähkökäyttäjillä eri vuosien sähkön kulutus vaihtelee vuosien lämpötilaerojen vuoksi. Jotta eri vuosien data saadaan paremmin vertailukelpoiseksi, kulutukselle tehtiin lämpötilakorjaus.

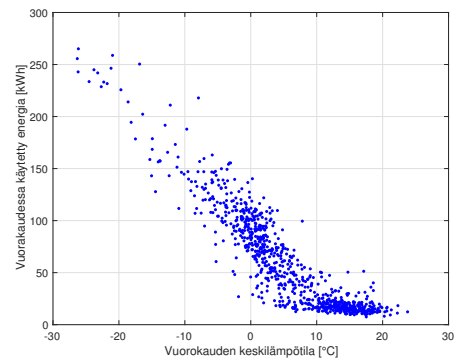
Kuvassa 5.2 on esitetty JSE:n aineiston kaikkien asiakkaiden sähkönkulutus summattuna ja lämpötila käännettynä toisinpäin. Kuvasta 5.2 voidaan havaita, että sähkönkulutus seuraa lämpötilaa tietyn tyyppisillä sähkökäyttäjillä. Sähkönkulutuksen lämpötilariippuvuus ei kuitenkaan aina ole lineaarinen, mikä tekee lämpötilakorjauksesta haastavan. Kuvassa 5.3 on esitetty vuorokaudessa kulutettu sähköenergia vuorokauden keskilämpötilan funktiona. Kuvassa 5.3(b) näkyy sähkökäyttäjä, jolla lämpötilariippuvuus on suuri. Kuvassa 5.3(d) esitetyllä sähkökäyttäjällä kulutus ei riipu juurikaan lämpötilasta.



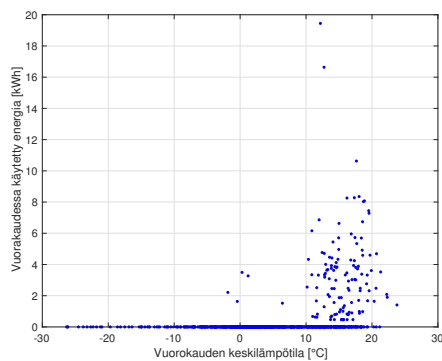
**Kuva 5.2** JSE kaikkien asiakkaiden summattu kulutus ja lämpötila.



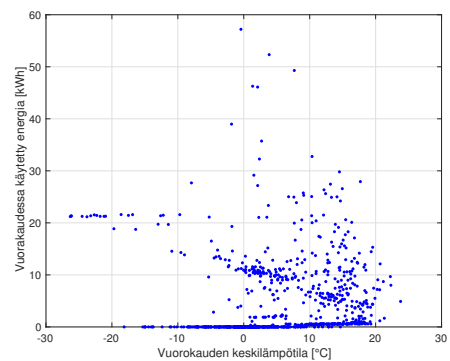
(a) Negatiivinen lämpötilariippuvuus



(b) Negatiivinen lämpötilariippuvuus



(c) Positiivinen lämpötilariippuvuus



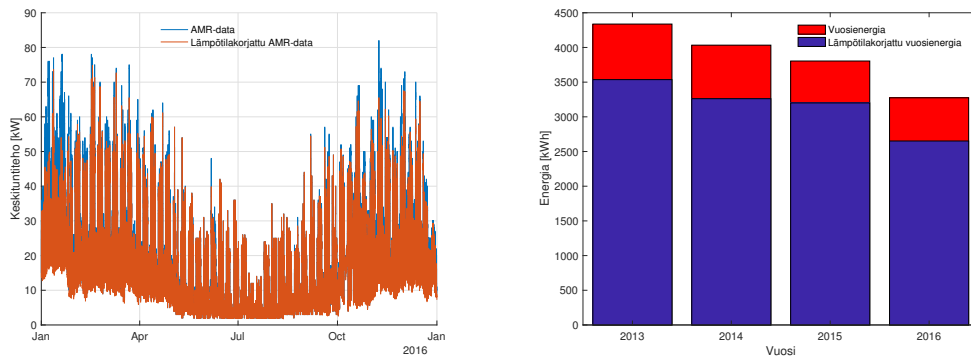
(d) Positiivinen lämpötilariippuvuus

**Kuva 5.3** Esimerkkejä sähkönkulutuksen lämpötilariippuvuudesta.

AMR-datalle tehtiin lämpötilakorjaus yhtälöllä 5.1, [2],

$$P_{\text{k}}(t) = \frac{P(t)}{1 + \alpha(T_{\text{ka,päivä}} - T_{\text{ka,kk}})}, \quad (5.1)$$

missä  $P(t)$  on lämpötilakorjattu sähkönkulutus ajan hetkellä  $t$ ,  $\alpha$  on lämpötilariippuvuus kerroin,  $T_{\text{ka,päivä}}$  on lämpötilan vuorokausikeskiarvo hetkellä  $t$  ja  $T_{\text{ka,kk}}$  on pitkän aikavälin lämpötilan kuukausikeskiarvo. Lämpötilakorjaus tehtiin vain tunneille, jolloin ulkolämpötila oli alle  $+10^{\circ}\text{C}$ . Tässä oli pohjana oletus, että yli  $+10^{\circ}\text{C}$  lämpötiloilla ei ole lämmitystarvetta. Belonogova ym. [1] on käyttänyt tutkimukseensa samaa oletusta ja myös tämän tutkimuksen aineistolla oletus pitää kohtalaisen hyvin paikkansa (kuva 5.3(b)). Kuvassa 5.4(a) on esimerkki yhdelle sähkönkäyttäjälle tehdystä lämpötilakorjauksesta vuoden AMR-datasta. Kuvassa 5.4(b) on esitetty lämpötilakorjauksen vaikutus vuosienenergiaoihin. Kuvan 5.4 esimerkissä lämpötilakorjaus vähentää energiaa, sillä mittaus ajankohdan lämpötilat ovat olleet korkeampia kuin kuukauden keskiarvolämpötilat.



(a) Erään asiakkaan vuoden AMR-data ilman lämpötilakorjausta ja lämpötilakorjauksen kanssa. (b) Vuosienenergiat eräältä asiakkaalta ilman lämpötilakorjausta ja lämpötilakorjauksen kanssa.

**Kuva 5.4** Esimerkki lämpötilakorjauksesta AMR-datalle.

## 5.2.2 Normalisointi

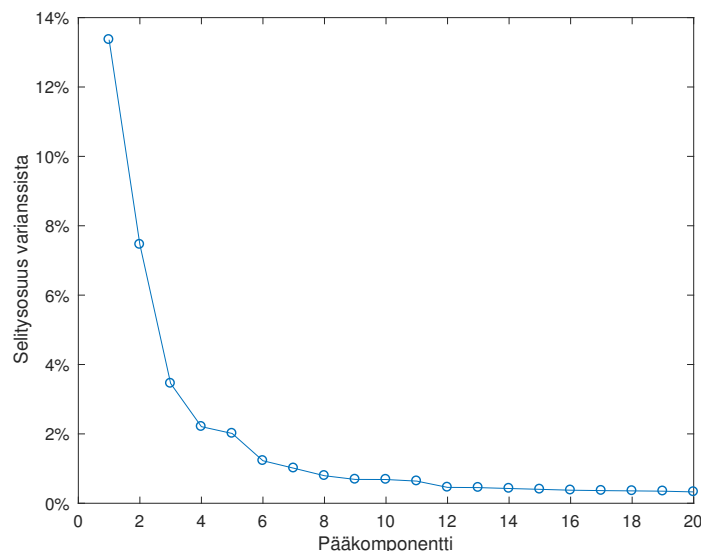
Asiakkaiden välisten kokoerojen vuoksi tuntitehosarjoja normalisoitiin. Kuitenkin paljon toisistaan eroavien sähkönkäyttäjien sekoittumisen välttämiseksi, asiakkaat luokiteltiin jo ennen normalisointia isoihin sähkönkäyttäjiin, sähkölämmittäjiin, ei sähkölämmittäjiin ja vapaa-ajan asuntoihin. Normalisointi tehtiin jokaiselle asiakkaalle erikseen yhtälöllä

$$z_i = \frac{x_i - \text{keskiarvo}_i}{\text{keskihajonta}_i}, \quad (5.2)$$

missä  $x_i$  on asiakkaan  $i$  AMR-data ja  $z_i$  on asiakkaan  $i$  normalisoitu AMR-data. Yhtälöllä 5.2 jokaisen asiakkaan keskihajonnaksi tulee 1. Normalisointiin kokeiltiin myös jokaisen asiakkaan tuntisarjan jakamista sen keskiarvolla, jolloin jokaisen keskiarvoksi tulee 1. Lopullinen normalisointi tehtiin kuitenkin yhtälöllä 5.2 keskihajonnan mukaan, sillä normalisoinnin jälkeen tehdyn pääkomponenttianalyysin tuloksista saatiin parempia näin.

### 5.2.3 Pääkomponenttianalyysi ja dimension redusointi

Pääkomponenttianalyysi (PCA, Principal Component Analysis) on dimension redusointimenetelmä, jossa suuri määrä muuttujia pyritään korvaamaan pienemmällä määrällä muuttujia, jolla voidaan selittää mahdollisimman suuri osa alkuperäisten muuttujien varianssista [20]. Tuntikohtaiselle AMR-datalle tehtiin pääkomponenttianalyysi, jolloin datan klusterointi oli huomattavasti kevyempää. Kuvassa 5.5 on esitetty SVV:n neljän vuoden AMR-datalle tehdystä pääkomponenttianalyysistä 20 ensimmäisen pääkomponentin varianssin selityssasteet. Kuvasta havaitaan, että jo pienellä määrällä pääkomponentteja pystytään selittämään AMR-datan varianssista huomattava osuus. Neljännessä pääkomponentissa havaittiin olevan taitepiste. Käyttämällä enemmän kuin neljää pääkomponenttia, varianssin selitysosuutta ei saataisi kasvatettua enää merkittävästi.



**Kuva 5.5** 20 ensimmäisen pääkomponentin varianssin selityssasteet SVV:n AMR-datalle tehdystä pääkomponenttianalyysistä.

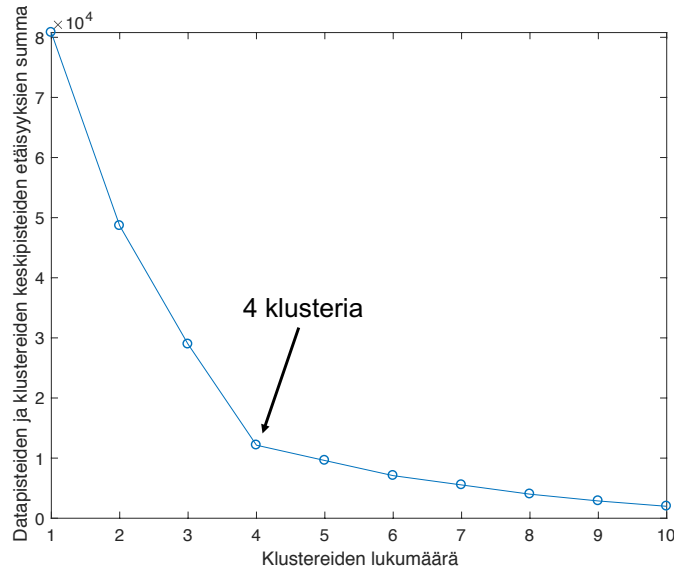
Pääkomponenttianalyysi on todettu hyväksi menetelmäksi mm. Rimalin [31] ja Hellmanin [14] diplomitoissa. Tässä työssä kokeiltiin dimension redusointia myös Mu-

tasen mm. lähteissä [29] ja [28] käyttämällä hahmovektoreilla. Pääkomponenttianaalyyysin huonona puolena on sen raskaus, mutta koska AMR-datan dimensio saadaan pienennettyä pieneen osaan (4-10 pääkomponenttia), K-means klusteroinnista tulee huomattavasti kevyempää. Viikkokeskiarvot sisältävien hahmovektoreiden laskenta taas on yksinkertaisempaa ja kevyempää, mutta niiden suuremman dimension (2016 tai 864) vuoksi K-means klusterointi on huomattavasti raskaampaa. Hahmovektoreiden etuna on parempi informaation, kuten vuodenaikakohtaisten erojen säilyttäminen. Tässä työssä dimension redusointiin päädyttiin kuitenkin käyttämään pääkomponenttianaalyyssia. K-means klusteroinnissa käytettiin neljää ensimmäistä pääkomponenttia.

### 5.3 Klusterointimenetelmä

Kuten edellä mainittiin, klusterointimenetelmänä käytettiin K-means klusterointia. Klusterointi tehtiin MATLAB<sup>®</sup> ohjelmalla. K-means klusteroinnilla klusterointiin AMR-datasta muodostettujen pääkomponenttien neljää ensimmäistä pääkomponenttia.

Klusterimäärän valinnassa käytettiin ns. taitepisteen (knee point) etsimismenetelmää (kuva 5.6). Kun klustereiden määrää lisätään, pisteiden etäisyydet klustereiden keskipisteisiin pienenevät. Kun etäisyyksien summa ei pienene enää merkittävästi, voidaan klusterimäärän sanoa olevan riittävä. Työssä havaittiin optimaalisen klusterimäärän valinnan olevan kuitenkin haastavaa. Ei voida varmuudella sanoa mikä on juuri optimaalisin klusterimäärä, vaan usein joudutaan tyytymään kompromissiin.



**Kuva 5.6** Esimerkki yhdelle aineistolle tehdystä *K*-means klusteroinnista 1-10 klusterimäärällä. *Y*-akselilla datapisteiden ja klustereiden keskipisteiden välisen etäisyyksien summa ja *x*-akselilla klustereiden lukumäärä. Lopulliset klusterimäärät valittiin sen perusteella, kun etäisyyksien summa ei pienene enää merkittävästi klustereiden lisäämisellä.

Ennen *K*-means klusterointia sähkökäyttäjät luokiteltiin väestörekisteristä saatavien tietojen perusteella sähkölämmittäjiin (sähkölämmitys tai maalämpö), ei sähkölämmittäjiin ja vapaa-ajan asuntoihin. Koska kaikista käyttöpaikoista ei saatu rakennustietoja väestötietorekisteristä, osa sähkökäyttäjistä luokiteltiin muiden tunnuslukujen perusteella. Luokitteluparametreina käytettiin lämpötilariippuvuuksia sekä tuntihiipputehoja. Esiluokittelun parametrit ovat esitetty taulukossa 5.1. Esiluokittelu katsottiin tarpeelliseksi tehdä, sillä AMR-data normalisoitiin (kappale 5.2.2), jolloin kokoerojen merkitys poistuu. Jatkotarpeena tyyppikäyttäjille on kuitenkin tarkoitus tehdä analyseja tulevaisuuden kuormituksen suhteen, joten esimerkiksi tehtaat ja kotitaloudet eivät saaneet sekoittua. Lisäksi sähkölämmittäjät ja ei sähkölämmittäjät tuli saada eri ryhmiin, jotta lämpöpumppujen vaikutukset voitiin mallintaa paremmin.

**Taulukko 5.1** Sähkönkäyttäjien esiluokittelu ennen klusterointia, missä  $P_h$  on huipputuntiteho ja  $\alpha$  on lämpötilariippuvuuskerroin ja  $sl$  on sähkölämmitys. Negatiivisella lämpötilariippuvuuskerroimella sähkökäyttö kasvaa lämpötilan laskeessa. Sähkölämmittäjiin, ei sähkölämmittäjiin ja vapaa-ajan asuntoihin luokiteltiin käyttöpaikkoja myös väetörekisterikeskuksen luokituksen mukaan.

Ryhmä	Valintakriteeri	Käyttöpaikkojen lukumäärä
Isot käyttäjät	$P_h \geq 25$ kW	204
Kotitaloudet, sl	$\alpha \leq -2$ %/°C	3 709
Kotitaloudet, ei sl	$0 \geq \alpha > -2$ %/°C	4 473
Vapaa-ajan asunnot	$\alpha > 0$ %/°C	2 184
		yht. 10 570

Alkuperäisessä aineistossa käyttöpaikkoja oli 10 808. Tievalojen, rakennustyömaiden sekä muiden poikkeavien käyttöpaikkojen poistamisen jälkeen käyttöpaikkoja jäi jäljelle 10 570. Klusterointi suoritettiin näiden käyttöpaikkojen AMR-datalla.

Myös paljon poikkeavia sähkönkäyttäjiä (outliers) suodatettiin pois ennen lopullista K-means klusterointia. Suodatus toteutettiin suorittamalla klusterointi kaksi kertaa. Ensimmäisen klusterointi kerran jälkeen suodatettiin pois ne sähkönkäyttäjät, joiden etäisyys klusterin keskipisteeseen oli enemmän kuin kaksi kertaa keskimääräinen etäisyys. Tämän jälkeen suoritettiin toinen klusterointi jäljelle jääneellä aineistolla. Klustereiden lukumäärän valinta tehtiin molemmille kierroksille erikseen yllä kuvatulla taitepistemenetelmällä. Poikkeavia sähkönkäyttäjiä suodattui pois 1 170. Lopullinen klusterointi suoritettiin siis 9 400 sähkönkäyttäjän datalla.

K-means klusterointia kokeiltiin yhtiöittäin sekä koko aineistolla. Yhtiöittäin klusteroinnilla havaittiin, että klustereiden lukumäärä kasvaa suureksi ja yhtiöiden välillä on hyvin samankaltaisia klustereita. Toisaalta yhtiöittäin klusteroinnissa etuna oli, että mahdolliset erilaiset 2-aikatariffit yhtiöiden välillä eivät sekoittuneet. Lopullinen klusterointi suoritettiin koko aineistolla kerralla, jolloin klusterimäärä saatiin pienemmäksi.

## 5.4 Klusteroinnin tulokset

Klusterimäärät valittiin edellä esitetyllä taitepistemenetelmällä kaikille neljälle esiluokittelu ryhmälle erikseen. Lopulliset klusterimäärät ovat esitetty taulukossa 5.2.



**Taulukko 5.2** Lopulliset klustereiden lukumäärät

Ryhmä	Klustereiden lukumäärä
Isot käyttäjät	3
Kotitaloudet, sl	2
Kotitaloudet, ei sl	2
Vapaa-ajan asunnot	2
	yht. 9

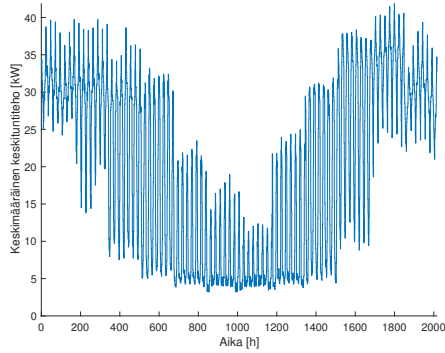
Klustereista muodostetut tyyppikäyttäjäprofiilit ovat esitetty kuvissa 5.7-5.13. Kuvissa on esitetty klusterin vuosiprofiili kuvattuna keskimääräisillä viikkoprofileilla, missä joka kuukaudelle on laskettu keskimääräinen viikko maanantaista sunnuntaihin (kappale 2.5), sekä klusterin vuorokausiprofiilit arki-, aatto- ja pyhäpäiville. Muodostettujen klustereiden koot sekä niiden tunnuslukuja on esitetty taulukossa 5.3. Taulukon luvut ovat laskettu vuoden 2016 AMR-datan ja siitä kullekin klusterille muodostettujen summakäyrien perusteella.

**Taulukko 5.3** Klustereiden koot sekä niiden summakäyrien vuosienenergiat ja huipputuntitehot sekä klusterin mediaani vuosienenergiat ja mediaani huipputuntitehot.

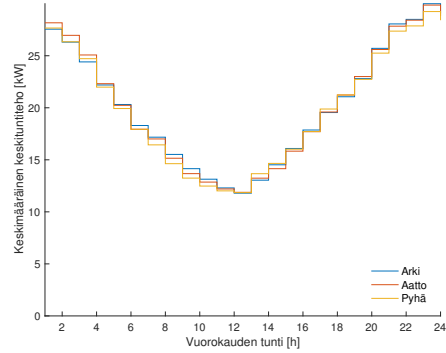
Esiluokitteluryhmä	Klusteri	Koko	Md $E_a$ [MWh]	Md $P_h$ [kW]	Yht. $E_a$ [GWh]	Yht. $P_h$ [MW]
Isot	1	22	36.8	27.0	5.0	1.2
	2	64	57.4	27.7	4.2	1.4
	3	98	48.9	30.3	7.7	1.8
Sl	1	753	14.0	9.2	11.4	4.8
	2	2 566	11.5	8.7	32.0	11.2
Ei sl	1	2 474	1.1	3.0	7.8	1.9
	2	1 486	9.9	7.4	17.3	5.9
Vapaa-ajan asunnot	1	1 089	0.5	2.9	1.3	0.4
	2	848	8.0	7.2	8.0	3.2
Yht.		9 400			94.7	29.1

Tuntihuipputeholtaan yli 25 kW käyttöpaikoista muodostettuihin klustereihin luokiteltiin mm. maatalouden, valmistavan teollisuuden, julkisen hallinnon ja liike-elämän käyttöpaikkoja. Kuvasta 5.7 nähdään, että klustereiden profiilit ovat kaikki selvästi erilaisia. Verkkoyhtiöiden luokitusten perusteella klusterissa 1 oli maatalouden käyttöpaikkoja sekä liike- ja hallintorakennuksia. Klusterissa 2 käyttöpaikkoja oli taas luokiteltu palveluiksi, opetus- ja toimistorakennuksiksi, liike-elämäksi ja navetoiksi sekä sikaloiksi. Klusterissa 3 sen sijaan oli valmistavan teollisuuden ja yhdyskuntahuollon käyttöpaikkoja sekä maataloustuotantoa ja toimistorakennuksia. Karttatarkastelun ja AMR-käyrien perusteella luokitukset pitivät kutakuinkin paikkansa ja klustereissa 1 ja 3 oli paljon maatalouden sekä muun teollisuuden käyttöpaikkoja. Klusterissa 3 havaittiin olevan myös viljakuivureiden käyttöpaikkoja. On kuitenkin huomattava, että näissä klustereissa hajonnat olivat suuria ja klustereiden koot kohtalaisen pieniä.

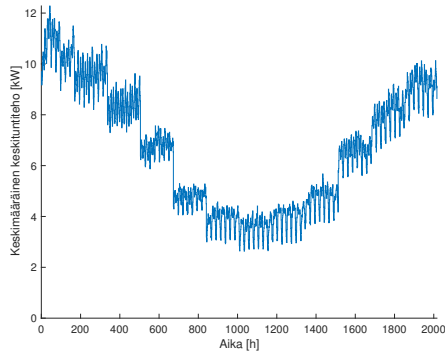
Klustereiden huipputuntitehojen ja vuosienergioiden jakaantuminen on esitetty kuvassa 5.8. Vuosienergioiden ja huipputuntitehojen käyrissä käyttöpaikat eivät ole samassa järjestyksessä, vaan ne on järjestetty suurimmasta pienimpään erikseen.



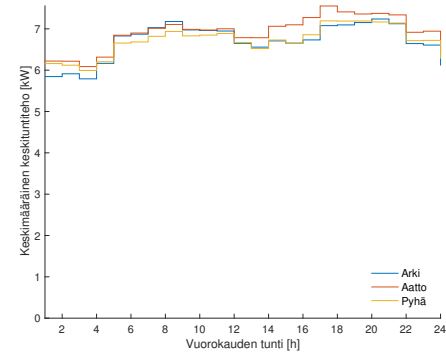
(a) Vuosiprofiili, klusteri 1



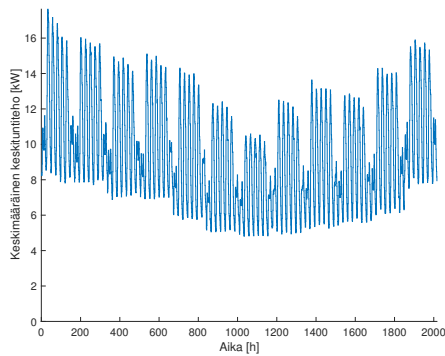
(b) Vuorokausiprofiilit, klusteri 1



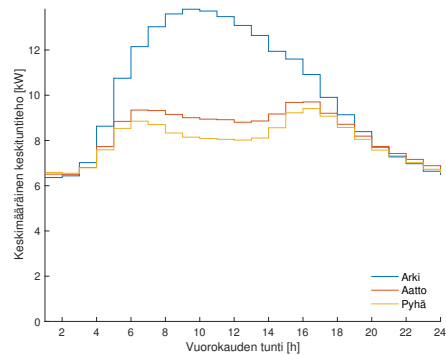
(c) Vuosiprofiili, klusteri 2



(d) Vuorokausiprofiilit, klusteri 2

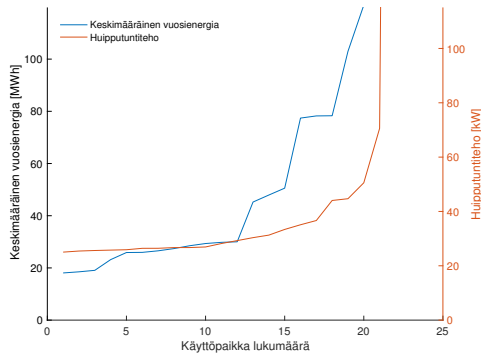


(e) Vuosiprofiili, klusteri 3

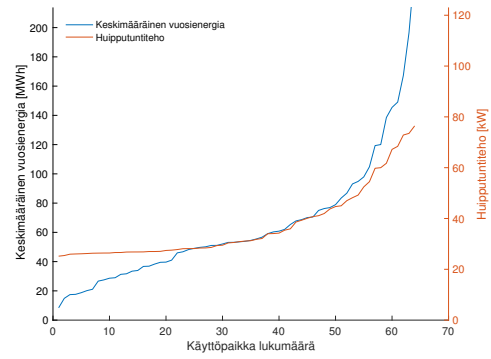


(f) Vuorokausiprofiilit, klusteri 3

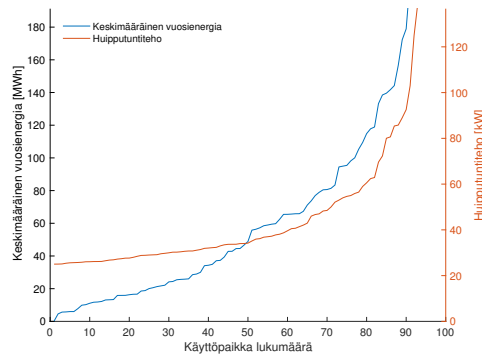
**Kuva 5.7** Tuntihuipputehoiltaan yli 25 kW käyttöpaikoista muodostetut klusterit. Vuosiprofiili kuvattu joka kuukaudelle lasketuilla keskimääräisillä viikkoprofileilla maanantaista sunnuntaihin ( $12 \times 168 \text{ h} = 2016 \text{ h}$ ).



(a) Klusteri 1



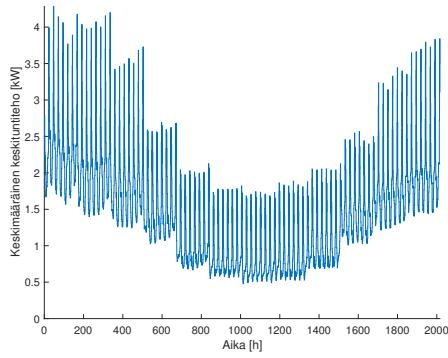
(b) Klusteri 2



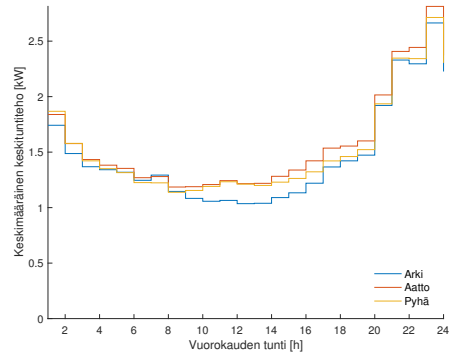
(c) Klusteri 3

**Kuva 5.8** Isojen sähkökäyttäjien klustereiden huipputuntehot ja keskimääräiset vuosienenergiat pysyvyysskäyränä. Teho- ja energiakuvaajissa käyttöpaikat eivät ole samassa järjestyksessä vaan ne on järjestetty erikseen.

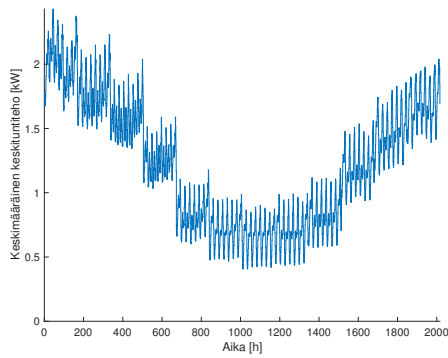
Sähkölämmitteisistä käyttöpaikoista muodostui varaavan (kuvat 5.9(a), 5.9(b)) sekä suoran sähkölämmityksen (kuvat 5.9(c), 5.9(d)) ryhmät. Varaavien sähkölämmittäjien ryhmässä, kuvassa 5.9(b), näkyvä 2-aikatariffin piikin alkaminen jo klo. 21 johtuu siitä, että Savon Voima Verkolla yöaika on aikaisemmin alkanut klo. 21 (nykyisin klo. 22). Toisaalta SVV:llä myös kausisähkössä muu aika alkaa klo. 21. Klustereiden huipputuntehojen ja vuosienenergioiden jakaantuminen on esitetty kuvassa 5.10.



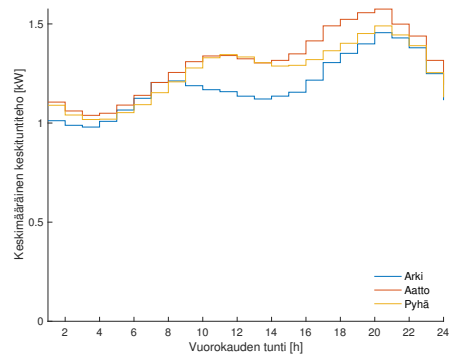
(a) Vuosiprofiili, klusteri 1. Varaava sähköläm-



(b) Vuorokausiprofiilit, klusteri 1. Varaava sähkölämmitys.

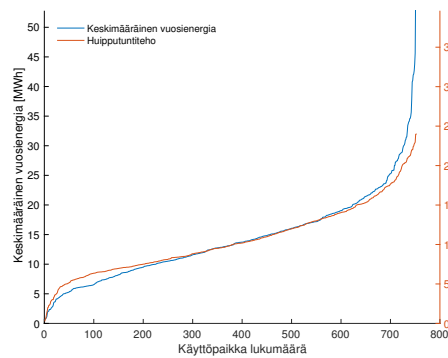


(c) Vuosiprofiilit, klusteri 2. Suora sähköläm-

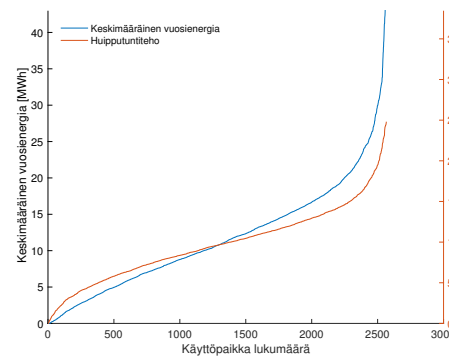


(d) Vuorokausiprofiilit, klusteri 2. Suora sähkölämmitys.

**Kuva 5.9** Sähkölämmitteisistä (tai mlp) käyttöpaikoista muodostetut klusterit. Vuosiprofiili kuvattu joka kuukaudelle lasketuilla keskimääräisillä viikoprofiileilla maanantaista sunnuntaihin ( $12 \times 168 \text{ h} = 2016 \text{ h}$ ).



(a) Klusteri 1



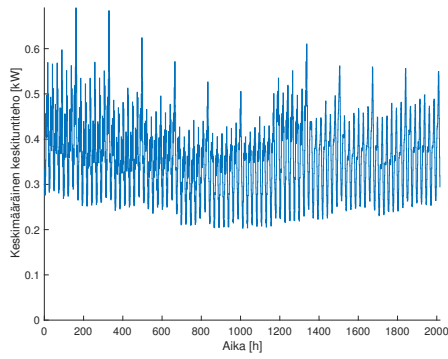
(b) Klusteri 2

**Kuva 5.10** Sähkölämmittäjä klustereiden huipputuntitehot ja keskimääräiset vuosienergiat pysyvyyssä. Teho- ja energiakuvaajissa käyttöpaikat eivät ole samaa järjestyksessä vaan ne on järjestetty erikseen.

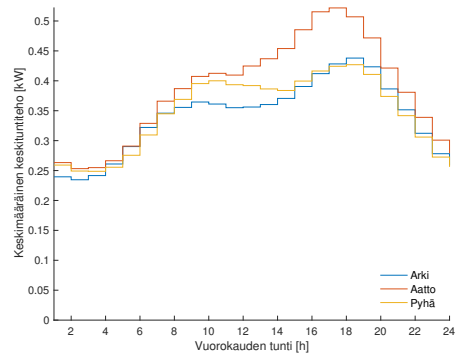
Kuvista 5.11(a) ja 5.11(b) on nähtävissä, että myös ei sähkölämmitteisissä käyttöpaikoissa on pieni lämpötilariippuvuus. Toisaalta Suomessa myös päivän pituus on huomattavasti lyhyempi talvella, jolloin valaistukseen käytetään sähköä. Kuvissa esitetyistä kuormitusprofiileista on kuitenkin syytä huomata y-akselin asteikot, joista voi nähdä, että sähkölämmitteisissä klustereissa kulutuksen vaihtelu lämpötilan mukaan on huomattavasti suurempaa. Klustereiden huipputuntehojen ja vuosiergioiden jakaantuminen on esitetty kuvassa 5.12.

Ei sähkölämmitteisten klusteri 2 (kuvat 5.11(c), 5.11(d)) ja sähkölämmitteisten klusteri 2 (kuvat 5.9(c), 5.9(d)) olivat huomattavan samankaltaisia. Näitä klustereita voidaan pitää suora sähkölämmitys klustereina, vaikka toinen klusteri olikin luokiteltu ensin ei sähkölämmitteiseksi. Tästä voidaan päätellä, että väestötietorekisteriin merkitty lämmitysmuoto ei ollut ajan tasalla kaikille käyttöpaikoille. Suurimmalle osalle ei sähkölämmitteisten klusteriin 2 luokitelluista käyttöpaikoista lämmitysmuodoksi on merkattu uunilämmitys puulla väestötietorekisterikeskuksen tietokannassa. Tästä voidaan päätellä, että todellisuudessa näissä käyttöpaikoissa käytetään lämmitysmuotona sähköä puunpolton rinnalla. Usein myös käyttöveden lämmitykseen käytetään sähköä muuten uunilämmitteisissä kohteissa.

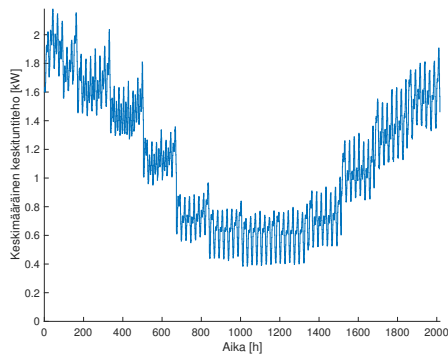
Myös asiakaskyselyyn osallistuneiden käyttöpaikkojen vastauksia lämmitystavasta verrattiin väestötietorekisterin tietoon. Kyselyssä 33 käyttöpaikassa lämmitysmuotona oli maalämpö, joista 17 käyttöpaikassa oli merkattu maalämpö myös väestötietorekisteriin. 16 käyttöpaikkaan, jossa kyselyn mukaan oli maalämpö, oli väestötietorekisteriin merkitty öljy-, sähkö- tai puulämmitys. Kyselyn perusteella maalämpökohteista olisi siis tieto väestötietorekisterissä vain noin 52 %:ssa. Toisaalta kyselyn otos oli pieni.



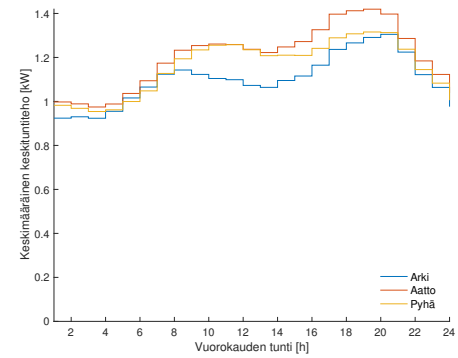
(a) Vuosiprofiili, klusteri 1



(b) Vuorokausiprofiilit, klusteri 1

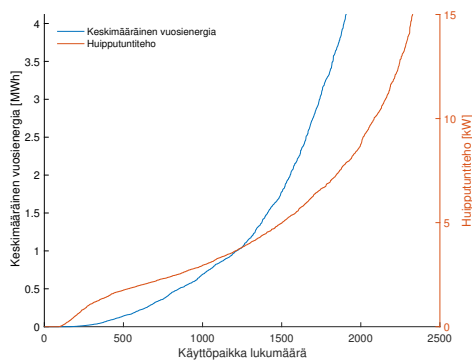


(c) Vuosiprofiili, klusteri 2

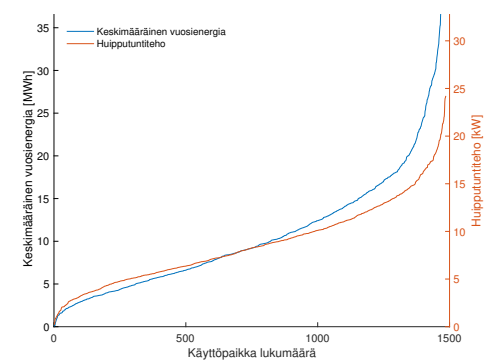


(d) Vuorokausiprofiilit, klusteri 2

**Kuva 5.11** Ei sähkölämmitteisistä käyttöpaikoista muodostetut klusterit. Vuosiprofiili kuvattu joka kuukaudelle lasketuilla keskimääräisillä viikoprofileilla maanantaista sunnuntaihin ( $12 \times 168 \text{ h} = 2016 \text{ h}$ ).



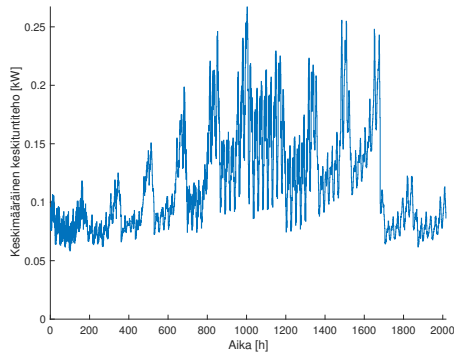
(a) Klusteri 1



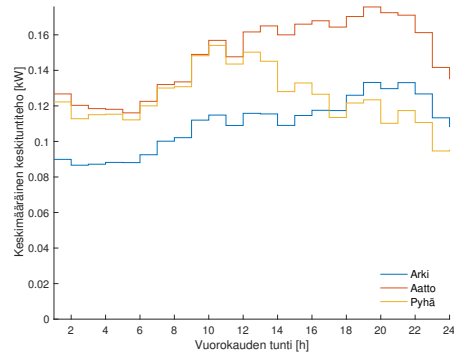
(b) Klusteri 2

**Kuva 5.12** Ei sähkölämmitys klustereiden huipputuntitehot ja keskimääräiset vuosienergiat pysyvyysskäyränä. Teho- ja energiakuvaajissa käyttöpaikat eivät ole samassa järjestyksessä vaan ne on järjestetty erikseen.

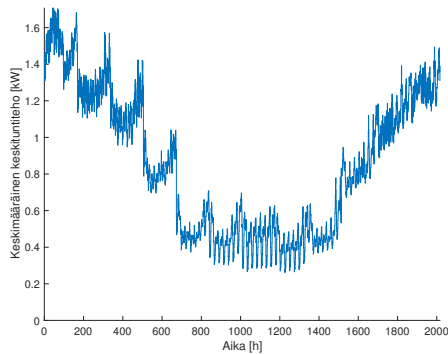
Vapaa-ajan asuntojen klustereista nähtiin, että osa asunnoista on ympärivuotisessa käytössä ja osa enimmäkseen kesäajan käytössä. Työssä havaittiin myös, että vapaa-ajan asuntojen sähkönkäytössä on erittäin suuria vaihteluja käyttöpaikkojen välillä. Tästä johtuen kuvassa 5.13 esitetyissä klustereissa hajonta on suurta ja sähkönkäytön mallintaminen näillä kuormitusprofileilla ei ole kovinkaan tarkkaa. Toisaalta suurimmassa osassa vapaa-ajan asuntoja sähkönkäyttö on erittäin vähäistä, joten koko verkon näkökulmasta tällä ei ole niin suurta vaikutusta. Klustereiden huippu-tuntitehojen ja vuosienenergioiden jakaantuminen on esitetty kuvassa 5.14.



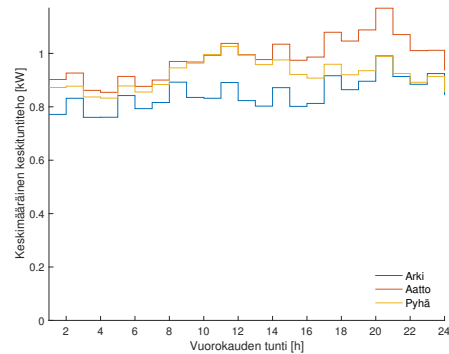
(a) Vuosiprofiili, klusteri 1



(b) Vuorokausiprofiilit, klusteri 1

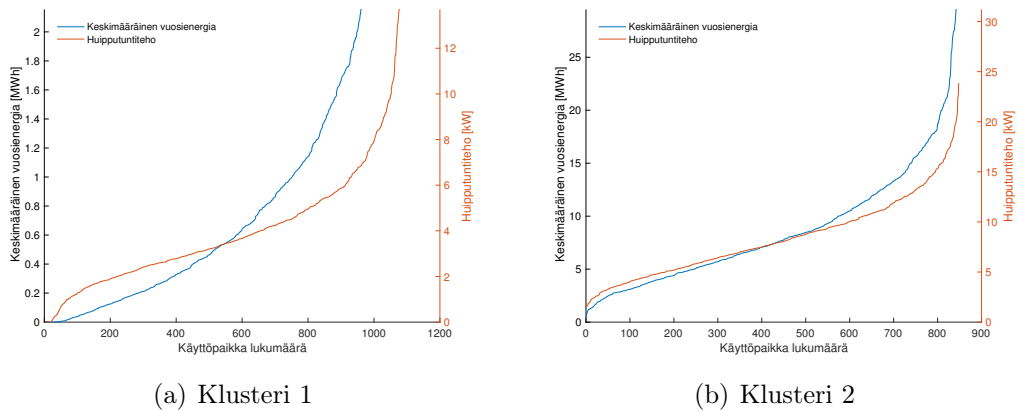


(c) Vuosiprofiili, klusteri 2



(d) Vuorokausiprofiilit, klusteri 2

**Kuva 5.13** Vapaa-ajan asuntojen käyttöpaikoista muodostetut klusterit. Vuosiprofiili kuvattu joka kuukaudelle lasketuilla keskimääräisillä viikkoprofileilla maanantaista sunnuntaihin ( $12 \times 168 \text{ h} = 2016 \text{ h}$ ).



**Kuva 5.14** Vapaa-ajan asunto klustereiden huipputuntitehot ja keskimääräiset vuosienergiat pysyvyysskäyränä. Teho- ja energiakuvaajissa käyttöpaikat eivät ole samassa järjestyksessä vaan ne on järjestetty erikseen.

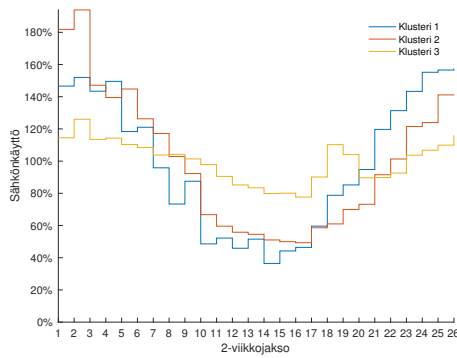
Väestötietorekisterin väerien lämmitysmuototietojen vuoksi klusterointia kokeiltiin uudestaan ilman kotitalouksien esiluokittelua sähkö- ja ei sähkölämmitteisiin. Tällöin K-means klusteroinnissa sähkölämmitys klusteri 2 ja ei sähkölämmitys klusteri 2 yhdistyivät ja näin klustereita muodostui yksi vähemmän. Yhdistyneissä klustereissa oli kuitenkin pieniä eroja ja sähkökäyttäjiä suodattui pois enemmän. Tämän vuoksi työssä päädyttiin yllä kuvattuun klusterointimenetelmään. Ei sähkölämmitteisiksi käyttöpaikoiksi luokitelluista klustereista muodostettua klusteria 2 käsitellään kuitenkin sähkölämmitys klusterina.

## 5.5 Indeksisarjojen muodostus

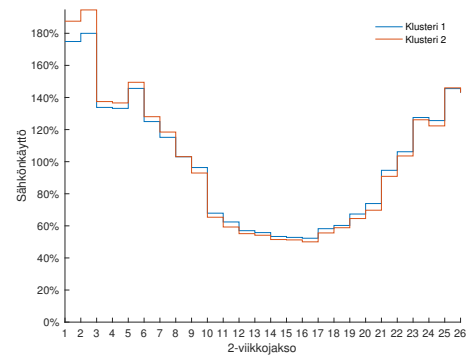
Klusteroiduista tyyppikäyttäjäryhmistä muodostettiin SLY kuormitusprofiileiden kaltaiset indeksisarjat (kappale 2.2), jotta tyyppikäyttäjä kuormitusprofiileilla voitiin mallintaa yksittäisiä sähkökäyttäjiä. Jokaiselle klusterille (kuormitusprofiilille) laskettiin 2-viikkoindeksit ja jokaiselle 2-viikkoindeksille tunti-indeksit arki-, aatto- ja pyhäpäiville.

2-viikkoindeksit muodostettiin laskemalla kunkin 2-viikkojakson osuus vuoden sähkökäytöstä. 2-viikkoindeksijä muodostui 26. 2-viikkojaksojen suhteelliset keskitehot klustereille ovat esitetty kuvassa 5.15.

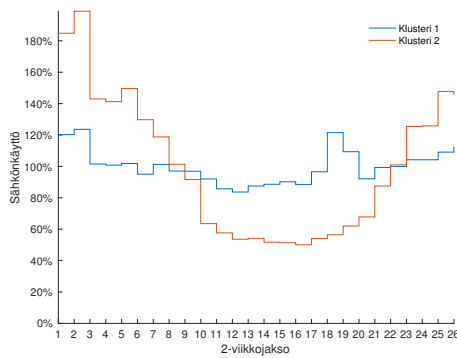




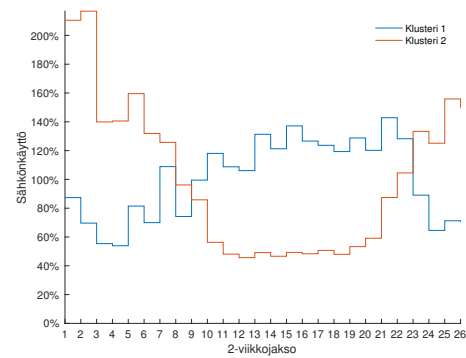
(a) Isot sähkökäyttäjät



(b) Sähkölämmitys



(c) Ei sähkölämmitys

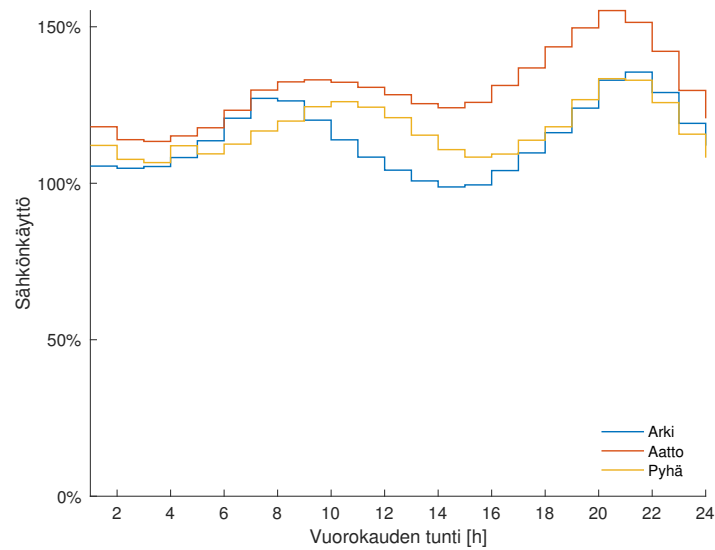


(d) Vapaa-ajan asunnot

**Kuva 5.15** Klustereiden 2-viikkojaksojen suhteelliset keskitehot.

Kuvasta 5.15 voitiin nähdä, että sähkölämmitys klustereiden 2-viikkoindeksit ovat hyvin lähellä toisiaan. Toisaalta näiden klustereiden erot ovatkin lähes pelkästään lämmönjakotavassa.

Tunti-indeksit muodostettiin laskemalla jokaisen vuorokauden tunnin osuus 2-viikkojakson sähkökäytöstä. Tunti-indeksit laskettiin erikseen arki-, aatto- ja pyhäpäiville. Arkipäiviksi laskettiin viikonpäivät maanantaista perjantaihin, jos viikolla ei ollut arkipyhä. Aattopäiviksi taas lauantait, sekä muita pyhiä edeltävät päivät. Pyhäpäiviksi katsottiin sunnuntait sekä muut pyhäpäivät. Jokaisen klusterin jokaiselle 2-viikkoindeksille muodostettiin 3 x 24 tunti-indeksiä, eli 24 tunti-indeksiä arki-, aatto- ja pyhäpäiville. Kuvassa 5.16 on esitetty sähkölämmitys klusterin 1, 7. 2-viikkojakson tunti-indeksit esimerkkinä.



**Kuva 5.16** Sähkölämmitys klusterin 1, 7. 2-viikkojakson tunti-indeksit.

Lasketuilla 2-viikko- ja tunti-indeksillä voidaan mallintaa klustereihin kuuluvia yksittäisiä sähkökäyttäjiä. Klustereiden sisällä hajonnat ovat kuitenkin suuria, joten mallinuksissa on syytä huomioida myös klusterin hajonta. Klustereille määritettiin hajontaindeksit samalla periaatteella kuin 2-viikko- ja tunti-indeksit. Yksittäisen sähkökäyttäjän arvioitu tuntiteho saadaan kertomalla sähkökäyttäjän vuoden keskituntiteho halutun ajankohdan 2-viikkoindeksillä ja sen 2-viikkojakson arki-, aatto- tai pyhäpäivän halutun vuorokauden ajan tunti-indeksillä.

## 5.6 Lämpöpumppujen tunnistus

K-means klusteroinnilla ei voitu erottaa lämpöpumpullisia käyttöpaikkoja omaksi ryhmäkseen, joten niitä yritettiin tunnistaa muilla tavoin. Väestötietorekisteriin merkittyjen maalämpökohteiden havaittiin olevan luokiteltu sähkölämmitys klusteriin 2. Osa asiakaskyselystä varmennetuista maalämpökohteista oli luokiteltu myös ei sähkölämmitys klusteriin 2. Toisaalta tämä on hyvin perusteltua, sillä suurempien maalämpökohteiden sähkönkäyttö voi muistuttaa pienempien sähkölämmityskohteiden sähkönkäyttöä. Lisäksi aineistossa oli kohtalaisen vähän maalämpökohteita ja klusterien määrä jäi myös vähäiseksi. Myös maalämmön lämpötilariippuvuuden havaittiin olevan lähellä sähkölämmitystä, kuva 5.1. Asiakaskyselyn ja väestötietorekisterin perusteella varmaksi tiedetyistä maalämpökohteista sähkönkäyttöä tutkittiin kuitenkin tarkemmin ja etsittiin tekijöitä maalämpöpumppujen tunnistamiseen sähkönkulutusdatasta. Seuraavissa kappaleissa on kuvattu tässä työssä käytetyt ilma- ja maalämpöpumppujen tunnistusmenetelmät.

### 5.6.1 Ilmalämpöpumppujen tunnistus

Ilmalämpöpumppulämmittäjiä yritettiin erotella sähkölämmittäjistä vertaamalla lämpötilariippuvuuksia. Koska ILP:n COP laskee voimakkaasti ulkolämpötilan laskiessa (kuva 4.11), hypotesina oli, että ILP:n omaavan sähkönkäyttäjän lämpötilariippuvuus on eksponentiaalinen. Lämpötilariippuvuuksille muodostettiin lineaarisia sekä eksponentiaalisia sovitteita, joille laskettiin  $R^2$ -selityksasteita.  $R^2$ -arvo kuvaa soviteen hyvyttä ja sen perusteella voitiin arvioida onko lämpötilariippuvuus enemmän eksponentiaalinen kuin lineaarinen.  $R^2$ -arvot laskettiin yhtälöillä 5.3, 5.4, 5.5, [44]:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{res}}}{SS_{\text{tot}}} \quad (5.3)$$

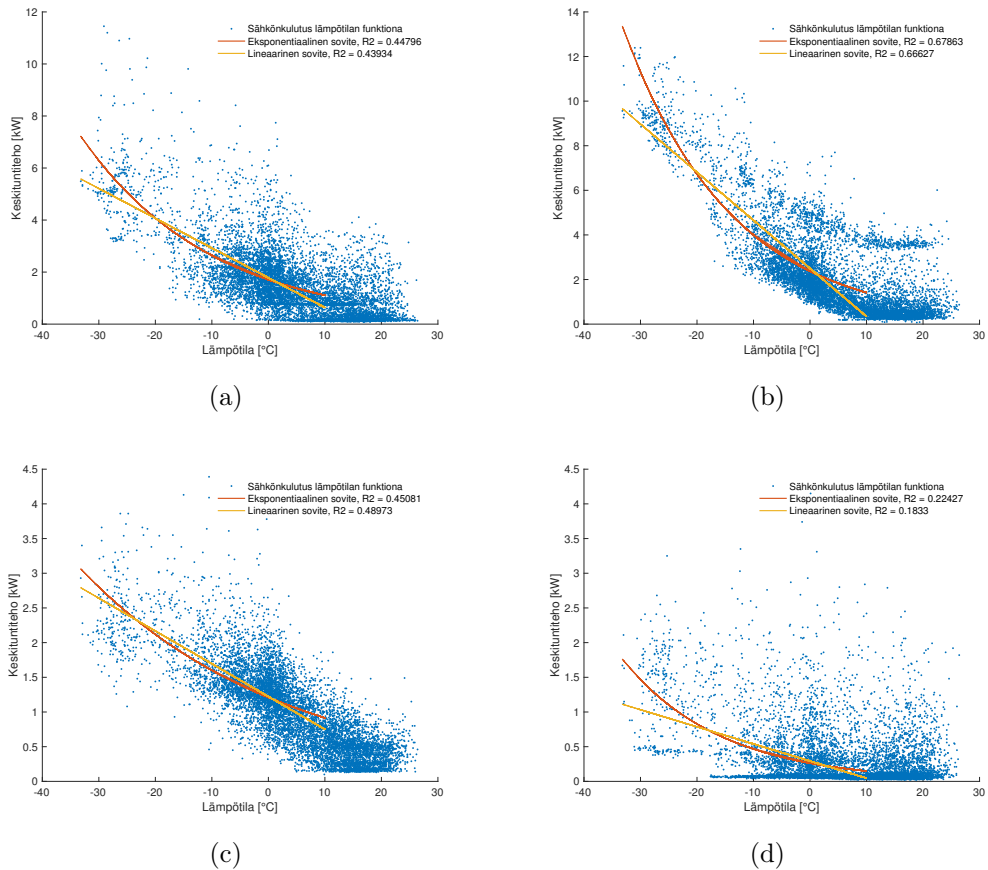
$$SS_{\text{res}} = \sum (y_i - f_i)^2 \quad (5.4)$$

$$SS_{\text{res}} = \sum (y_i - \bar{y}_i)^2, \quad (5.5)$$

missä  $y_i$  on  $i$ :s datapiste,  $f_i$  on  $i$ :s mallinnettu datapiste ja  $\bar{y}_i$  on  $y_i$ :n keskiarvo.

Tutkimusprojektissa toteutetun asiakaskyselyn (kappale 4) perusteella saatiin varmistuksia ilmalämpöpumpullisista käyttöpaikoista. Asiakaskyselystä saatiin lisätietoja 800 käyttöpaikasta. Ilmalämpöpumppujen tunnistuksen tarkistukseen otettiin kuitenkin vain vakituksessa asuinkäytössä olevat kotitaloudet, joita oli 354. Ilmalämpöpumppuja näistä käyttöpaikoista oli 58:ssä.

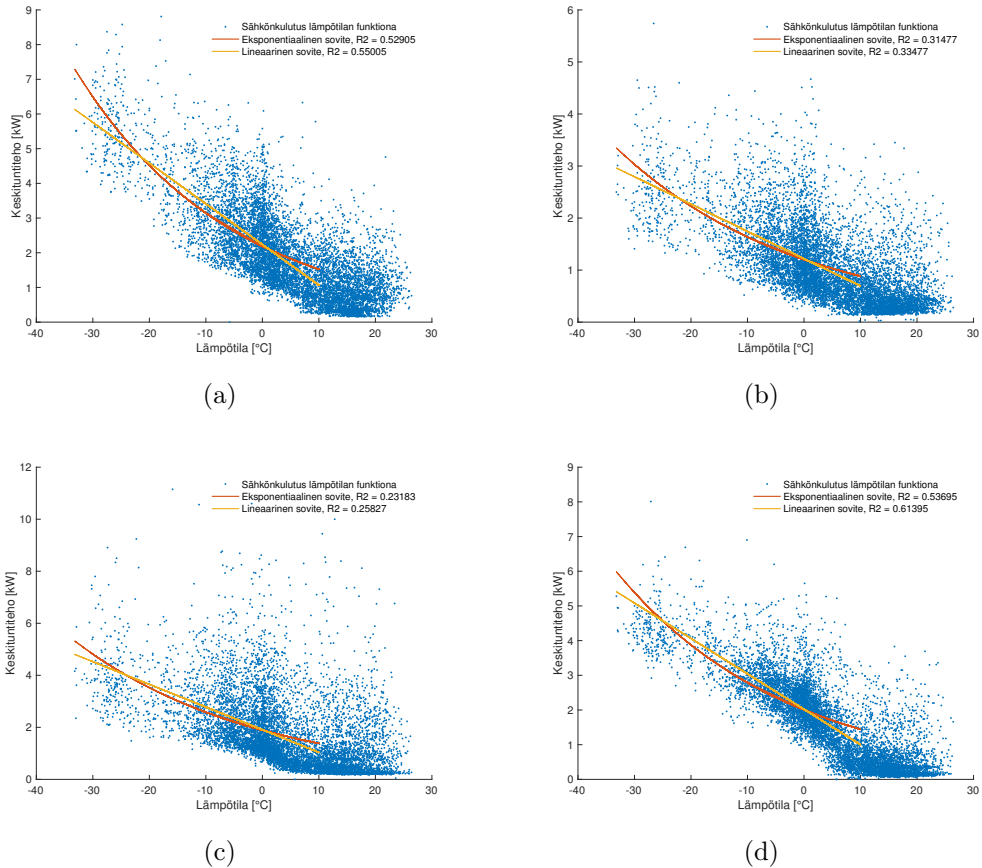
Kuvassa 5.17 on esitetty neljän sähkölämmitteisen ja ILP:n omaavan käyttöpaikan lämpötilariippuvuus sekä niille muodostetut lineaariset ja eksponentiaaliset sovitteet. Sovitteet muodostettiin käyttäen vain tunteja, jolloin ulkolämpötila oli  $+10$  °C tai alle. Tällä otettiin huomioon vain tunnit, jolloin lämmitys on käytössä.



**Kuva 5.17** Sähkölämmitys ilmalämpöpumpulla lämpötilariippuvuus.

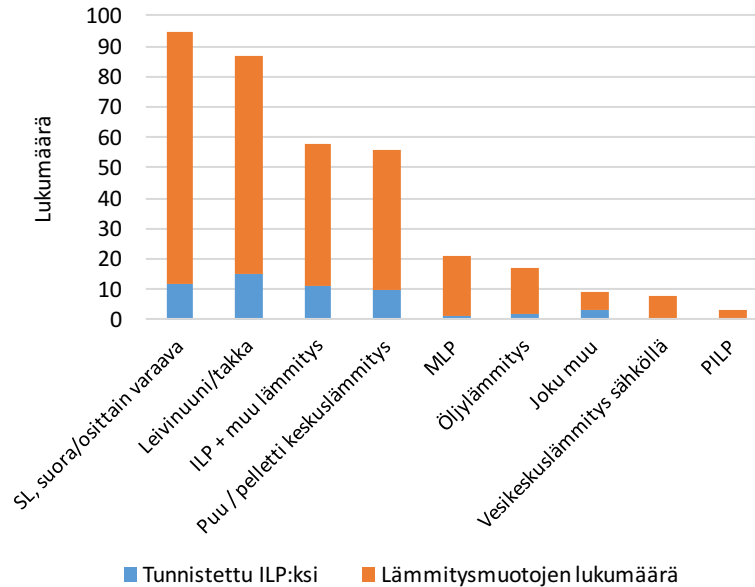
Kuvasta 5.17 voitiin huomata, että osalla ilmalämpöpumpullisista käyttöpaikoista lämpötilariippuvuus on voimakkaasti eksponentiaalinen, kun taas osalla lämpötilariippuvuus on täysin lineaarinen. Tätä voi selittää esimerkiksi ilmalämpöpumppujen kehittyminen, nykyaikaisissa ilmalämpöpumpuissa COP ei laske yhtä voimakkaasti ulkolämpötilan laskiessa. Myös puunpoltto talvella vaikuttaa sähkökäytön lämpötilariippuvuuteen. Esim. ILP:n sammuttaminen ja puulämmityksen lisääminen kylmillä lämpötiloilla leikkaa lämpötilariippuvuuden jyrkkenemisen pois.

Kuvassa 5.18 on esitetty vertailuna neljän sähkölämmitys käyttöpaikan lämpötilariippuvuus. Kuvasta 5.18 voitiin havaita, että myös perinteisillä sähkölämmittäjillä lämpötilariippuvuus voi olla eksponentiaalinen. Myös tämä voi johtua puunpoltosta ja sen muuttumisesta ulkolämpötilan mukaan. On mahdollista, että puunpolttoa lisätään kylmillä ilmoilla, mutta erittäin kylmillä lämpötiloilla puunpolttoa vähennetään. Tämän työn osalta ei kuitenkaan ollut mahdollista varmistaa, mistä sähkölämmittäjien lämpötilariippuvuuksien eksponentiaalisuus tarkalleen johtuu.



**Kuva 5.18** Sähkölämmitys lämpötilariippuvuus.

Analyysien perusteella havaittiin, että ilmalämpöpumppujen tunnistus AMR-datasta vertaamalla sähkönkäytön lämpötilariippuvuuksia on haastavaa. Tietyllä sovitteen lämpötilavälillä ilmalämpöpumput saatiin tunnistettua kohtalaisen hyvin, mutta niitä tunnistettiin väärin huomattavasti suurempi määrä. Esimerkiksi puunpoltto leivinuunissa ja takassa vaikuttaa sähkönkulutuksen lämpötilariippuvuuteen merkittävästi. Tämän vuoksi ILP:lla ja takalla varustettujen suorien sähkölämmitys käyttöpaikkojen lämpötilariippuvuus ei jyrkkene lämpötilan laskiessa oletuksen mukaan. Ilmalämpöpumppu myös todennäköisesti kytketään pois päältä erittäin kylmillä ilmoilla. Kuvassa 5.19 on esitetty diagrammi tunnistuksen tuloksista. Kuvassa vaakakselilla on kyselyn perusteella varmistettu käyttöpaikan todellinen lämmitysmuoto ja pystyakselilla lämmitysmuotojen lukumäärä sekä lukumäärä, jotka kustakin lämmitysmuodosta luokiteltiin yllä kuvatulla menetelmällä ilmalämpöpumpullisiksi. Täysin onnistuneella tunnistuksella vain "ILP + muu lämmitys" kohdassa tulisi olla tunnistettuja käyttöpaikkoja.

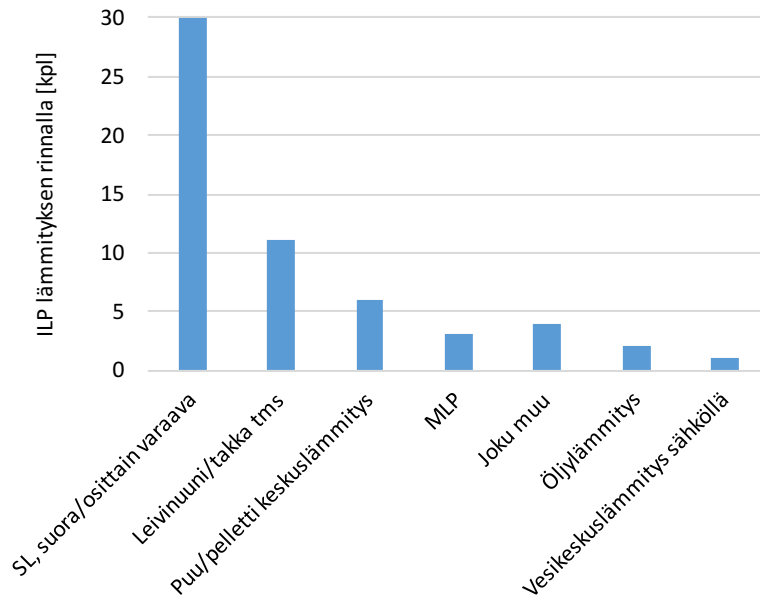


**Kuva 5.19** Eri lämmitysmuotojen lukumäärät asiakaskyselyssä sekä lämpötilariippuvuuksien mukaan ilmalämpöpumpullisiksi luokiteltujen lukumäärät. ILP + muu lämmitys palkin päälämmitysmuotojen osuudet nähtävissä kuvassa 5.20.

Kuvasta 5.19 voitiin nähdä, että virheellisiä tunnistuksia tuli huomattavasti enemmän kuin oikein tunnistettuja. Eniten ilmalämpöpumpullisiksi tunnistettiin virheellisesti puulämmitteisellä leivinuunilla tai takalla varustettuja käyttöpaikkoja. Tätä skenaarioitiin jo yllä, ja tulos vahvistaa ennestään oletusta puunpolton vähenemistä erittäin kylmillä lämpötiloilla. Taulukossa 5.4 on esitetty yhteenveto ilmalämpöpumppujen tunnistuksesta ja tarkistuksesta kyselyn perusteella. Kuvan 5.19 "ILP + muu lämmitys" palkin päälämmitysmuotojen lukumäärät ovat esitetty kuvassa 5.20, kuvaajana lämmitysmuodoista, minkä rinnalla ILP:ja oli kyselyn kotitalouksilla.

**Taulukko 5.4** Yhteenveto ilmalämpöpumppujen tunnistuksesta.

Käyttöpaikkoja [kpl]	354
Ilmalämpöpumpullisia käyttöpaikkoja [kpl]	58
Ilmalämpöpumpullisiksi tunnistettuja käyttöpaikkoja [kpl]	54
Tunnistetuista oikeasti ilmalämpöpumpullisia [kpl]	11

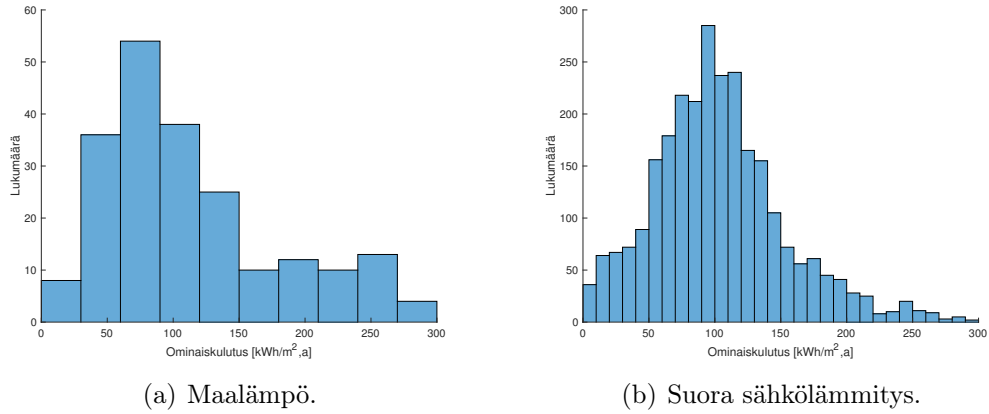


*Kuva 5.20 Ilmalämpöpumput eri lämmitysmuotojen rinnalla.*

## 5.6.2 Maalämpöpumppujen tunnistus

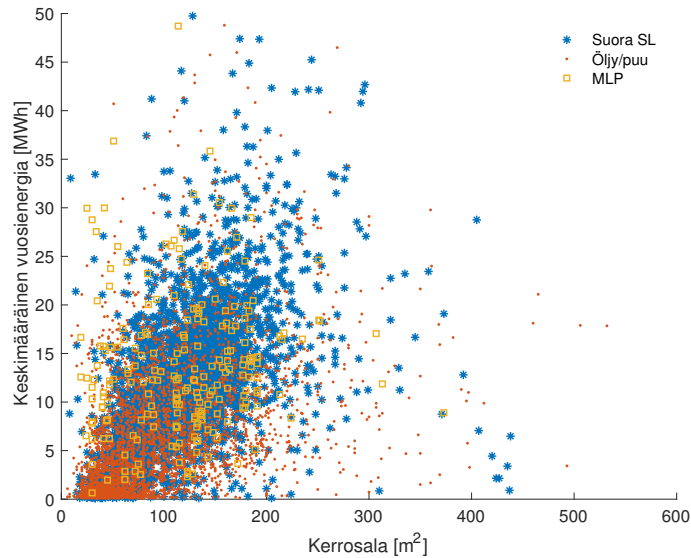
Maalämpöjärjestelmä kerää lämpöä maasta kiertoveteen, joten ulkolämpötila ei vaikuta maalämpöpumpun COP-kertoimeen yhtä voimakkaasti kuin ILP:n. Maalämpöpumpun COP-kertoimeen vaikuttaa kiertoveden meno- ja paluulämpötilan erotus [10]. Menolämpötila pysyy käytännössä vakiona talvellakin, sillä maalämpöpumpun keruuputki sijoitetaan yleensä kallioperään. Paluulämpötila riippuu kuitenkin lämmönjakopiirin lämpötilasta, joka voi olla huomattavan korkea vesikiertoisilla patteilla varustetuissa taloissa. Tästä johtuen myös MLP:n COP vaihtelee jonkin verran ulkolämpötilan funktiona.

Ilmalämpöpumppuihin verrattuna vähemmän muuttuvan COP-kertoimen sekä ilmalämpöpumppujen tunnistuksen ongelmien vuoksi MLP:ja ei yritetty tunnistaa lämpötilariippuvuuksista. Väestökisterikeskuksesta saadun aineiston perusteella tiedettiin varmaksi 276 maalämpökohdetta. Näille käyttöpaikoille laskettiin ominaiskulutuksia kerrosalan ja keskimääräisen vuosienergian perusteella. Kuvassa 5.21 on esitetty maalämpölämmitteisten sekä suora sähkölämmitteisten käyttöpaikkojen ominaiskulutusten histogrammit.



**Kuva 5.21** Maalämpölämmitteisten ja suora sähkölämmitteisten käyttöpaikkojen ominaiskulutusten histogrammit.

Kuvasta 5.21 voitiin nähdä, että maalämmön ominaiskulutus on jonkin verran suoran sähkölämmityksen ominaiskulutusta pienempi. Maalämmössä suurin osuus oli alle  $100 \text{ kWh/m}^2, \text{a}$  ominaiskulutuksia. Ominaiskulutuksilla maalämmölle ja sähkölämmityksille ei kuitenkaan saatu riittävän selvää eroa, jotta voitaisiin tunnistaa maalämpö käyttöpaikkoja niiden perusteella. Kuvassa 5.22 on esitetty maalämpö, suora sähkölämmitys sekä öljy- ja puukeskuslämmitteisten käyttöpaikkojen keskimääräinen vuosienenergia kerrosalan funktiona.



**Kuva 5.22** Maalämpölämmitteisten, suora sähkölämmitteisten ja öljy- tai puulämmitteisten käyttöpaikkojen keskimääräinen vuosienenergia kerrosalan funktiona.



## 5.7 Johtopäätökset

Kuormitusprofiileiden päivitys osoittautui tarpeelliseksi. Sähkönkäyttö on murroksessa, joten uusia kuormitusprofiileita tullaan tarvitsemaan sekä kuormitusprofiileita tulisi päivittää aika ajoin. AMR-mittareiden ansiosta saatavilla on runsaasti dataa, jota voidaan käyttää kuormitusprofiileiden muodostuksessa. Klusterointi on kätevä keino luokitella sähkönkäyttäjiä, mutta se vaatii datan esiprosessointia.

Myös kuormitusprofiileiden määrää on hyvä päivittää välillä. Tässä työssä käytetty taitepistemenetelmä antoi käytetyllä aineistolla vain 9 klusteria, kun taas SLY:n kuormitusprofiileita on 46. Toisaalta pienestä kuormitusprofiili määrästä on sekä hyviä, että huonoja puolia. Pienellä määrällä mallintaminen on helpompaa, mutta mallinnukset eivät ole yhtä tarkkoja kuin suuremmalla kuormitusprofiilimäärällä.

Tyypikäyttäjälukittelun perusteella väestötietorekisterin lämmitysmuototiedot eivät olleet ajan tasalla kaikista kohteista. Tämä on helppo huomata ei sähkölämmitys klusterista 2, kuva 5.11. Jos lämmitystapaa ei päivitetä rekisteriin rakennuksen rakentamisen jälkeen, lämmitystapamuutokset aiheuttavat vääriä tietoja rekisteriin.

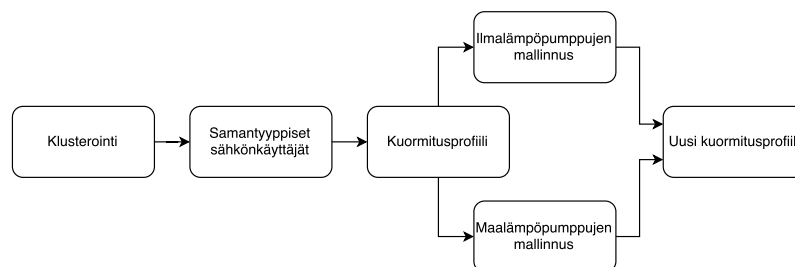
Lämpöpumppujen tunnistus vaatisi lisätutkimuksia. Lämpöpumppujen tunnistus ainoastaan sähkönkulutustietojen ja lämpötilatietojen avulla osoittautui haastavaksi. Suomessa etenkin puun pienpoltto vaikeuttaa lämpöpumppujen tunnistamista AMR-datasta. Etenkin ilmalämpöpumppujen tunnistusta AMR-datasta olisi hyvä tutkia, sillä ilmalämpöpumput ovat lisääntyneet nopeasti ja ne vaikuttavat sähkönkäyttöön huomattavasti. Maalämpö on myös merkittävä muutos sähkönkäytössä, mutta siitä on yleensä mahdollista saada tieto myös muuta kautta, kuin sähkönkulutustiedoista.

Tutkimusaineiston maalämpökohteiden sähkönkäytön havaittiin olevan lähellä sähkölämmitteisten käyttöpaikkojen sähkönkäyttöä. Maalämpökohteiden tunnistamista helpottavien parametrien löytäminen tutkimusaineiston maalämpökohteista vaikeutti maalämpökohteiden vähäinen määrä ja puutteelliset tiedot kohteista. Väestötietorekisterissä ei esimerkiksi ollut tietoa onko maalämpöpumppu osa- vai täys-tehomitoitu. Toisaalta tämä voidaan joissain tapauksissa päätellä AMR-datan ja rakennuksen kerrosalan perusteella.

## 6. LÄMPÖPUMPPUJEN YLEISTYMISEN ARVIOINTI JA LÄMPÖPUMPPUJEN MALLINTAMINEN

Sähkö- ja ei sähkölämmitteisistä käyttöpaikoista muodostetuille klustereille mallinnettiin lämpöpumppuja kahdella erilaisella skenaariolla. Ensimmäisessä skenaariossa käytettiin SULPUn teettämän selvityksen, [25], ennustamia arvoja ja toisessa skenaariossa ILP mallinnettiin kaikkiin suora sähkölämmitteisiin kohteisiin ja MLP kaikkiin ei sähkölämmitteisiin sekä varaaviin sähkölämmitteisiin.

Lämpöpumppuja mallinnettiin muodostetun klusterin kuormitusprofiilin pohjalta. Mallinnuksen periaate on kuvattu kuvassa 6.1. Tässä työssä ei suoritettu uutta klusterointia muutosten mallinnusten jälkeen.



*Kuva 6.1 Periaate käytetystä menetelmästä kuormitusprofiilien muodostamiseen sekä kuormitusprofiilin muuttumisen mallinuksesta.*

Simuloitu ilmalämpöpumppu mallinnettiin sähkökäyttäjille vähentämällä jokaisen tunnin lämmitykseen käytetystä energiasta ILP:n sen tunnin lämpötilan maksimi antotehon ja ottotehon erotus. Eli ILP vähentää lämmityssähköä sen hetkisen COP-kertoimen mukaan. Mahdollista ILP:lla jäädyttämistä ei otettu huomioon. Lämmitykseen käytetty sähköenergia arvioitiin yhtälöllä 6.1, [1],

$$P_{\text{lämmitys}} = P(T = +10^{\circ}\text{C}) - \alpha \cdot T, \quad (6.1)$$

missä  $P(T = +10^{\circ}\text{C})$  on keskimääräinen keskituntiteho lämpötilalla  $+10^{\circ}\text{C}$ ,  $T$  on

lämpötila ja  $\alpha$  on lämpötilariippuvuuskerroin kW/°C.

Ei sähkölämmitteisiin käyttöpaikkoihin, kuten öljy- ja puukeskuslämmityksellä varustettuihin taloihin, simuloitu maalämpöpumppu voitiin mallintaa yksinkertaisesti lisäämällä maalämpöpumpun sähköteho nykyiseen sähkönkulutukseen. Ennen lisäystä VTT:n maalämpö mallit skaalattiin kerrosalan mukaan jokaiselle käyttöpaikalle erikseen. 1990 ja sitä uudemmmille käyttöpaikoille käytettiin VTT:n 2000-luvun talon mallia, 2010 ja sitä uudemmmille passiivitalon mallia ja muille 1970-luvun talon mallia. Väestörekisteritietoihin linkittämättä jääneille käyttöpaikoille käytettiin kunkin ryhmän keskiarvo kerrosalaa ja rakennusvuotta.

Varaavasta sähkölämmityksestä maalämpöön lämmitystapamuutoksen mallintaminen on huomattavasti monimutkaisempaa. Jos varaavien sähkölämmittäjien sähkönkäyttö kellonajoilta 20:00 - 04:00 ylitti kunkin asiakkaan 24 tunnin keskitetyn yli 1.5 kertaisesti, niiden sähkökäyttäjien kulutusdatasta näiltä tunneilta vähennettiin 24 tunnin keskitetyn ylittävä osuus. Tällä saatiin poistettua aikaohjauksessa olevien lämminvesivaraajien vaikutus. Käytetyssä menetelmässä oli kuitenkin riski, että myös sähkösaunan kulutus poistetaan, mikäli saunominen tapahtuu klo. 20:00 jälkeen. Lisäksi kulutuksesta laskettiin muu arvioitu lämmityssähkö yhtälöllä 6.1. Laskettua lämmityssähköä vähennettiin kunkin tunnin lämpötilaa vastaavan maalämpöpumpun COP-kertoimen mukaisesti. Mallinnukset tehtiin jokaiselle klusterin käyttöpaikalle erikseen.

## 6.1 Skenaario 1, SULPUn ennuste vuodelle 2030

Ensimmäisessä skenaariossa käytettiin edellä mainitun SULPUn selvityksen ennustamia arvoja. Ensimmäisen skenaarion ennusteet lämpöpumppujen yleistymisestä vuodelle 2030 ovat esitetty taulukoissa 6.1 ja 6.2.

**Taulukko 6.1** Maalämpöpumppujen lisääntyminen Gaian arvion mukaan. Eri lämmitysmuotojen lukumäärät 2016 vuonna ja arvioitu määrä maalämpöön vaihtaneita 2030 vuonna. [25]

Lämmitysmuoto	2016 [kpl]	2030 [kpl]	Muutos [kpl]	Muutos-%
Kaukolämpö	62 983	62 983	0	0 %
Öljy	184 985	76 985	-108 000	-58 %
Kaasu	22 638	13 638	-9 000	-40 %
Puu	235 079	226 079	-9 000	-4 %
Suora sl	387 255	378 255	-9 000	-2 %
Varaava sl	90 048	45 048	-45 000	-50 %
<b>MLP</b>	<b>120 000</b>	<b>300 000</b>	<b>180 000</b>	<b>150 %</b>

**Taulukko 6.2** Ilmalämpöpumppujen lisääntyminen Gaian arvion mukaan. Ilmalämpöpumppujen lukumäärät eri lämmitysmuotojen rinnalla 2016 ja 2030 vuosina. [25]

Lämmitysmuoto	2016 [kpl]	2016 [%]	2030 [kpl]	2030 [%]
Kaukolämpö	0	0 %	0	0 %
Öljy	3 5000	19 %	40 000	22 %
Kaasu	5 000	22 %	10 000	44 %
Puu	160 000	68 %	175 000	74 %
Suora sl	270 000	70 %	340 000	88 %
Varaava sl	30 000	33 %	3 5000	39 %
MLP	0	0 %	0	0 %
<b>ILP</b>	<b>500 000</b>	<b>51 %</b>	<b>600 000</b>	<b>61 %</b>

Gaian arvion mukaan kaukolämmöstä ei vaihdeta ollenkaan maalämpöön, eikä myöskään kauko- tai maalämpölämmitteisiin kohteisiin tule yhtään ilmalämpöpumppua vuoteen 2030 mennessä. Arvio vaikuttaa epärealistiselta, sillä kaukolämmön keskihinta on lähes kaksinkertaistunut 2000-luvun alusta vuoteen 2017 mennessä [5]. Kaukolämmön hinnan noustessa ILP on kannattava myös kaukolämmitteisissä taloissa. Lisäksi ilmalämpöpumppuja voidaan asentaa myös pelkästään jäähdytystä varten.

Koska ilmalämpöpumppuja ei saatu tunnistettua AMR-datan perusteella, jouduttiin oletamaan, että klustereissa on lämpöpumppuja tällä hetkellä samassa suhteessa kuin muissa pientaloissa, taulukon 6.2 mukaisesti. Käyttöpaikat, joihin lämpöpumppujen mallinnukset tehtiin, valittiin satunnaisesti.

Kuvassa 6.2 on esitetty alkuperäiset sähkölämmitys klusterit sekä niiden pohjalle mallinnetut lämpöpumput. Varaavan sähkölämmitys klusterin käyttöpaikoille 50 % mallinnettiin maalämpö ja ilmalämpöpumppujen määrää lisättiin 6 prosenttiyksikköä. Suora sähkölämmitys klusteriin ILP:ja lisättiin 18 prosenttiyksikköä. Mallin-

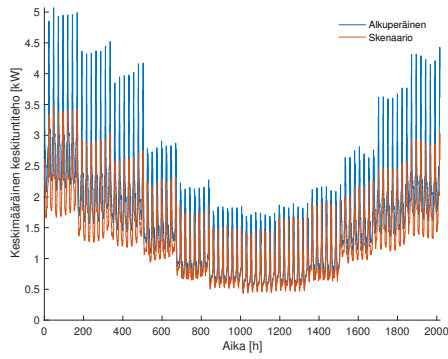
nuksien vaikutus klustereiden mediaani vuosienenergiaan ja mediaani huipputuntitehoihin on nähtävissä taulukossa 6.4. Vaikutus koko klusterointiaineiston summakäyrän vuosienenergiaan ja huipputuntitehoon on esitetty taulukossa 6.3.

**Taulukko 6.3** Koko klusterointiaineiston summakäyrän vuosienenergian ja huipputuntitehon muutokset skenaariossa.

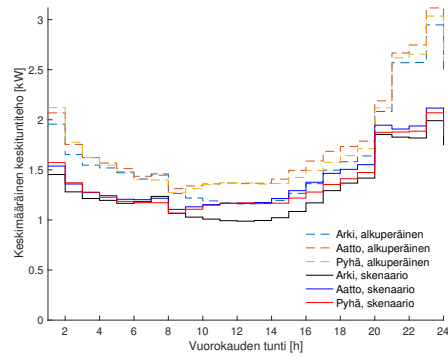
	Vuosienenergia [GWh]	Huipputuntiteho [MW]
<b>Alkuperäinen</b>	94.7	29.1
<b>Skenaario</b>	92.8	28.9

**Taulukko 6.4** Klustereiden vuosienenergioiden ja huipputuntitehojen muutokset, missä yht.  $E_a$  on klusterin summakäyrän vuosienenergia ja yht.  $P_h$  on klusterin summakäyrän huipputuntiteho.

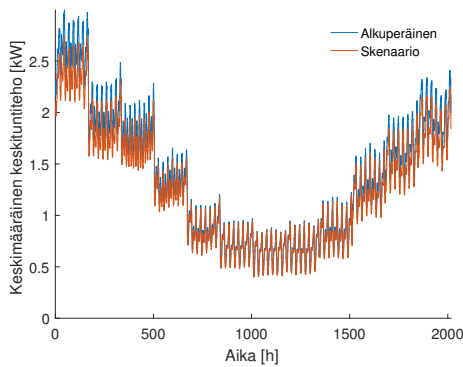
Esiluokitteluryhmä	Klusteri	Koko	Md $E_a$ [MWh]	Md $P_h$ [kW]	Yht. $E_a$ [GWh]	Yht. $P_h$ [MW]
Sl, alkuperäiset	1	753	14.0	9.2	11.4	4.8
	2	2 566	11.5	8.7	32.0	11.2
Sl, skenaario	1	753	10.8	8.1	9.1	3.4
	2	2 566	10.4	8.5	29.9	10.4
Ei sl, alkuperäiset	1	2 474	1.1	3.0	7.8	1.9
	2	1486	9.9	7.4	17.3	5.9
Ei sl, skenaario	1	2 474	1.9	3.6	11.7	3.4
	2	1 486	9.1	7.1	16.1	5.4



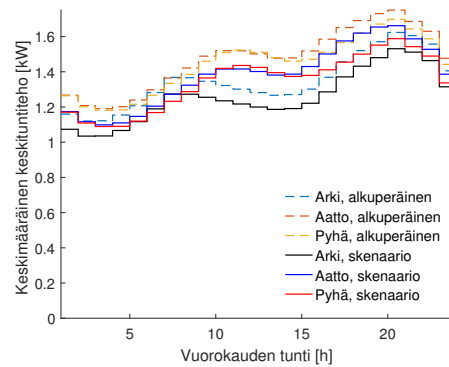
(a) Vuosiprofiili, klusteri 1. Varaava sähkölämmitys.



(b) Vuorokausiprofiilit, klusteri 1. Varaava sähkölämmitys.



(c) Vuosiprofiili, klusteri 2. Suora sähkölämmitys.



(d) Vuorokausiprofiilit, klusteri 2. Suora sähkölämmitys.

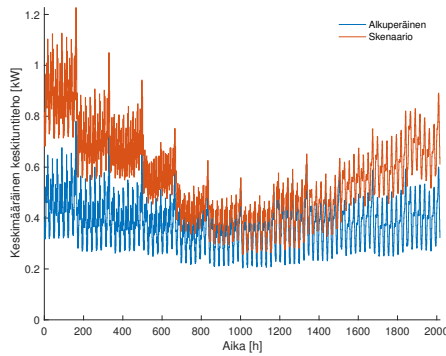
**Kuva 6.2** Sähkölämmitys klusterit ja niihin mallinnetut lämpöpumpput taulukkojen 6.1 ja 6.2 arvoilla. Vuosiprofiili kuvattu joka kuukaudelle lasketuilla keskimääräisillä viikkoprofiileilla maanantaista sunnuntaihin ( $12 \times 168 \text{ h} = 2016 \text{ h}$ ).

Taulukosta 6.3 nähtiin, että SULPUn skenaariolla tutkimusalueen sähköenergiankulutus vähenisi 1.9 GWh. Myös huipputeho pienentyisi 200 kW. Tässä skenaariossa lämpöpumpput vähentävät kaikkien klustereiden sähköenergiankulutusta, lukuun ottamatta ei sähkölämmitys klusteria 1.

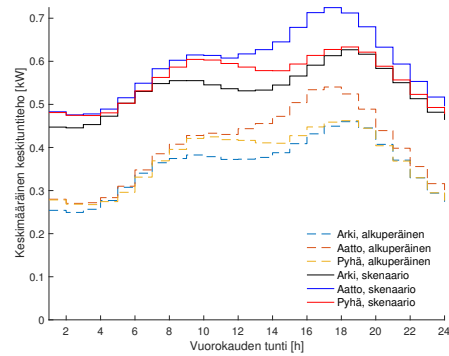
Kuvasta 6.2 voitiin havaita, että varaavan sähkölämmitys ryhmän sähkönkäyttö muuttuu merkittävästi. Tehtäessä uusi klusterointi, MLP:lla varustetut käyttöpaikat luokiteltaisiin todennäköisesti suora sähkölämmitys klusteriin tai niistä muodostuisi oma klusteri. Taulukosta 6.4 ja kuvasta 6.2(a) voitiin myös nähdä, että varaavan sähkölämmitys klusterin energiankulutus sekä huipputehot pienenevät. Huipputehon pienentyminen oli odotettavissa, koska kuormituksista poistettiin yöajan piikki. Myös energiankulutus pienenee, sillä maalämpö on sähkölämmitystä energiatehokkaampi lämmitysmuoto ja lämmityssähköä vähennettiin sen mukaisesti.

Suora sähkölämmitys klusterin kuormitusprofiili ei juuri muuttunut. Tähän on syytä oletus, että ilmalämpöpumppuja oli jo 70 % käyttöpaikkoja. 800 käyttöpaikalle tehdyn asiakaskyselyn perusteella ilmalämpöpumppuja oli 16 % kotitalouksia ja 22 % vapaa-ajan asuntoja. Kyselyn perusteella tutkimusalueella olisi tällä hetkellä siis huomattavasti vähemmän ilmalämpöpumppuja kuin Suomessa keskimäärin. Kyselyn otos oli kuitenkin pieni, joten siitä laskettuja osuuksia ei voida pitää kovin luotettavina.

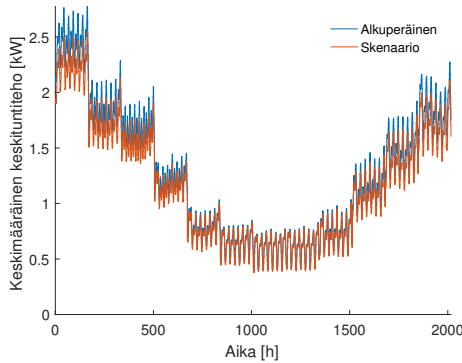
Ei sähkölämmitys klustereihin tehdyt mallinnukset ovat esitetty kuvassa 6.3. Ei sähkölämmitys klusterin 1 käyttöpaikoista 28 % mallinnettiin maalämpö. Ilmalämpöpumppua tähän klusteriin ei mallinnettu. Klusteriin 2 ilmalämpöpumppuja lisättiin 6 prosenttiyksikköä.



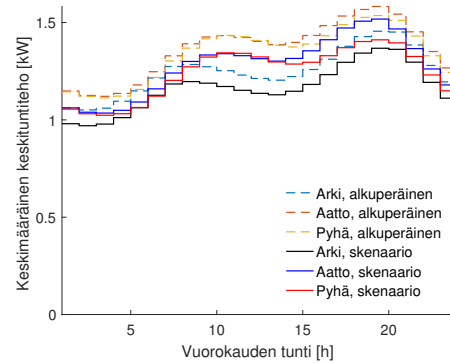
(a) Vuosiprofiili, klusteri 1



(b) Vuorokausiprofiilit, klusteri 1



(c) Vuosiprofiili, klusteri 2



(d) Vuorokausiprofiilit, klusteri 2

**Kuva 6.3** Ei sähkölämmitys klusterit ja niihin mallinnetut lämpöpumput. Vuosiprofiili kuvattu joka kuukaudelle lasketuilla keskimääräisillä viikkoprofiileilla maanantaista sunnuntaihin ( $12 \times 168 \text{ h} = 2016 \text{ h}$ ).

Kuvasta 6.3 nähtiin, että maalämpö lisää ei sähkölämmitys klusterin 1 sähkökäyttöä huomattavasti. Myös nämä maalämpö käyttöpaikat vaihtaisivat klusteria tehtäessä uusi luokittelu. Taulukosta 6.4 voitiin nähdä, että maalämpö nostaa myös

ryhmän huipputehoa merkittävästi.

Ei sähkölämmitys klusterin 2 profiilit pysyvät lähes samana. Tulos on samanlainen kuin sähkölämmitys klusterin 2 tapauksessa. Tämä onkin perusteltua, sillä nämä klusterit ovat hyvin samankaltaisia.

## 6.2 Skenaario 2, kaikille lämpöpumppu

Toisessa skenaariossa maalämpö mallinnettiin kaikille varaavan sähkölämmitys klusterin ja ei sähkölämmitys klusterin 1 käyttöpaikoille. Ilmalämpöpumput mallinnettiin kaikille suora sähkölämmitys klusterin käyttöpaikoilla ja myös ei sähkölämmitys klusterin 2 käyttöpaikoille. Mahdollisia jo asennettuja ilmalämpöpumppuja ei otettu huomioon. Mallinnuksien vaikutus klustereiden mediaani vuosienenergiaan ja mediaani huipputuntitehoihin on nähtävissä taulukossa 6.6. Vaikutus koko klusterointiaineiston summakäyrän vuosienenergiaan ja huipputuntitehoon on esitetty taulukossa 6.5.

**Taulukko 6.5** Koko klusterointiaineiston summakäyrän vuosienenergian ja huipputuntitehon muutokset skenaariossa.

	Vuosienenergia [GWh]	Huipputuntiteho [MW]
<b>Alkuperäinen</b>	94.7	29.1
<b>Skenaario</b>	86.1	28.5

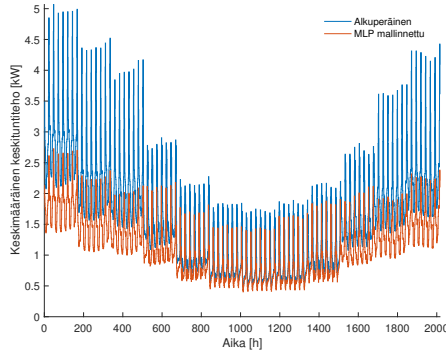
**Taulukko 6.6** Klustereiden vuosienenergioiden ja huipputuntitehojen muutokset, missä yht.  $E_a$  on klusterin summakäyrän vuosienenergia ja yht.  $P_h$  on klusterin summakäyrän huipputuntiteho.

Esiluokitteluryhmä	Klusteri	Koko	Md $E_a$ [MWh]	Md $P_h$ [kW]	Yht. $E_a$ [GWh]	Yht. $P_h$ [MW]
Sl, alkuperäiset	1	753	14.0	9.2	11.4	4.8
	2	2 566	11.5	8.7	32.0	11.2
Sl, skenaario	1	753	9.4	7.2	7.7	2.8
	2	2 566	7.3	7.5	20.0	7.9
Ei sl, alkuperäiset	1	2 474	1.1	3.0	7.8	1.9
	2	1 486	9.9	7.4	17.3	5.9
Ei sl, skenaario	1	2 474	7.5	4.4	21.4	7.5
	2	1 486	6.2	6.2	10.9	3.7

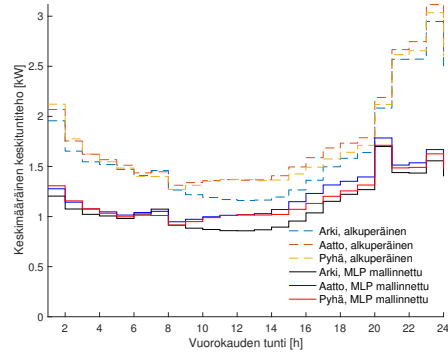
Taulukosta 6.5 voitiin havaita, että tämä skenaario vähentää koko aineiston energiankulutusta merkittävästi. Energiankulutus vähenee 8.6 GWh. Tästä voitiin hyvin havaita lämpöpumpuilla olevan merkittävä vaikutus lämmitysenergiankulutukseen. Huipputuntiteho pienenee myös 600 kW kun lämminvesivaraajien aiheuttama yöajan piikki poistuu. Tässä työssä tehtyjen mallinnuksien perusteella lämpöpumput



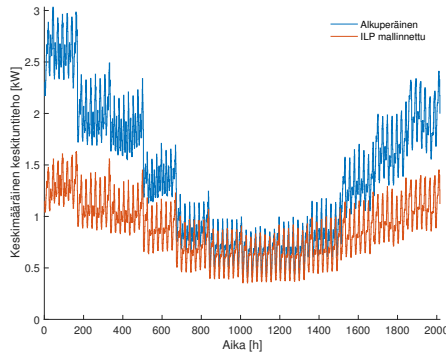
eivät nosta sähköverkkoyhtiöiden huipputehoja. Paikallisesti huipputehot eivät kuitenkaan pienene näin merkittävästi. Muutokset sähkölämmitys klustereiden vuosija tuntiprofileihin ovat esitetty kuvassa 6.4 ja ei sähkölämmitys klustereiden muutokset kuvassa 6.5.



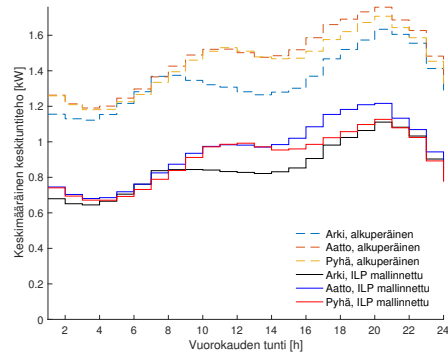
(a) Vuosiprofiili, klusteri 1. Varaava sähkölämmitys.



(b) Vuorokausiprofiilit, klusteri 1. Varaava sähkölämmitys.



(c) Vuosiprofiili, klusteri 2. Suora sähkölämmitys.



(d) Vuorokausiprofiilit, klusteri 2. Suora sähkölämmitys.

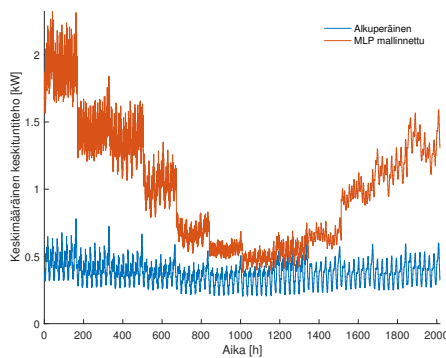
**Kuva 6.4** Sähkölämmitys klusterit ja niihin mallinnetut lämpöpumput. Vuosiprofiili kuvattu joka vuorokaudelle lasketuilla keskimääräisillä viikkoprofileilla maanantaista sunnuntaihin ( $12 \times 168 \text{ h} = 2016 \text{ h}$ ).

Kuvia 6.4 ja 6.2 vertailemalla nähtiin, että skenaario 2 vaikuttaa sähkölämmitys kuormitusprofileihin huomattavasti enemmän. Varaavasta sähkölämmitys profiilista häviää lämminvesivaraajan yöpiikki kokonaan ja siitä muodostuu maalämpö profiili. Varaavan sähkölämmitys klusterin vuosienenergia ja huipputuntiteho pienenevät merkittävästi.

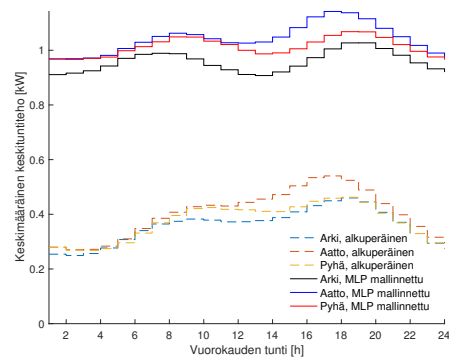
Ilmalämpöpumput vähentävät suora sähkölämmitys ryhmän sähköenergiankäytön talvella lähes puoleen alkuperäisestä. Todellisuudessa tämä on ylioptimistinen arvio, sillä todennäköisesti ilmalämpöpumppuja on jo osassa käyttöpaikoista, eikä toisella ilmalämpöpumpulla saataisi enää niin paljon hyötyä.

Maalämpö lisää ei sähkölämmitys klusterin 1 sähkökäyttöä huomattavasti. Talvela klusterin keskiteho nousee yli kolminkertaiseksi. Ryhmän uudesta vuosiprofilista muodostuu lähes alkuperäisen suora sähkölämmitys klusterin vuosiprofilin mukainen. Vuorokausiprofiilit säilyttävät saman muodon, mutta keskimääräinen tuntiteho nousee.

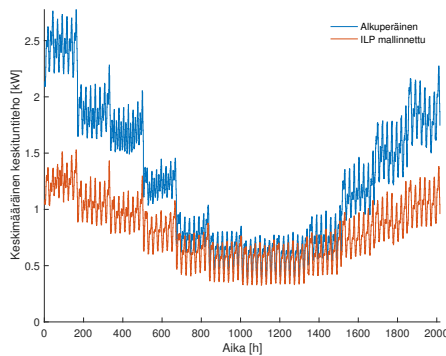
Ei sähkölämmitys klusterin 2 profiiliin ILP vaikuttaa samalla tavalla kuin suora sähkölämmitys klusteriin. Toisaalta myös tämän ryhmän käyttöpaikoilla on todennäköisesti jo ilmalämpöpumppuja, joten sähkökäyttö ei vähenisi niin paljoa.



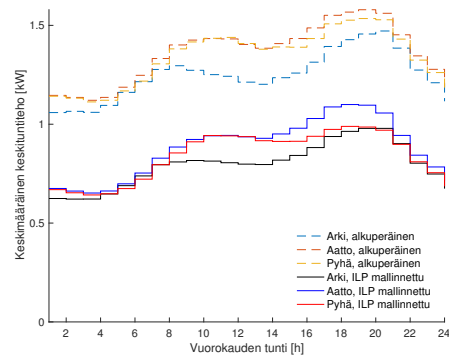
(a) Vuosiprofiili, klusteri 1



(b) Vuorokausiprofiilit, klusteri 1



(c) Vuosiprofiili, klusteri 2



(d) Vuorokausiprofiilit, klusteri 2

**Kuva 6.5** Ei sähkölämmitys klusterit ja niihin mallinnetut lämpöpumput. Vuosiprofiili kuvattu joka kuukaudelle lasketuilla keskimääräisillä viikkoprofileilla maanantaista sunnuntaihin ( $12 \times 168 \text{ h} = 2016 \text{ h}$ ).

## 6.3 Johtopäätökset

Lämpöpumppujen yleistymisen muuttama sähkökäyttöä merkittävästi. Maalämmön korvauksessa kauko-, öljy-, ja puulämmitystä alueellinen sähkökäyttö voi kasvaa rei-

lusti. Ilmalämpöpumput pienentävät sähkölämmitteisten rakennusten energiankulutusta huomattavasti ja mallinnusten mukaan ne myös laskevat huipputehoja. On syytä kuitenkin huomata, että tässä työssä tehtyjen mallinnusten aineistot olivat maantieteellisesti viideltä eri alueelta ja työssä käytettiin jokaiselle alueelle alueellisia lämpötilatietoja. Tämän vuoksi aineiston kohteilla oli eroja saman ajankohdan lämpötiloissa, eivätkä kaikkein kylmimmät lämpötilat olleet aivan samoilla tunneilla eri sijainneissa. Kun otetaan huomioon, että ilmalämpöpumpun COP on alle  $-20^{\circ}\text{C}$  lämpötiloissa lähellä yhtä (kuva 4.11), alueellisen huipputuntitehon ollessa tunnilla, jolla lämpötila on alle  $-20^{\circ}\text{C}$ , huipputuntiteho ei voi pienentyä merkittävästi.

Mallinnusten perusteella maalämpökohteilla on voimakas sähkönkäytön lämpötilariippuvuus. Varaavaan sähkölämmitys klusteriin maalämpö mallinnettiin eri tavalla kuin ei sähkölämmitys klusteriin, joten näiden maalämpöprofileissa on eroja. VTT:n maalämpö simuloinneissa lämpimän käyttöveden tarve oli suuri, mikä lisää maalämmön sähkökäyttöä. Ei sähkölämmitys klustereihin mallinnettaessa maalämpömallit skaalattiin käyttöpaikkojen kerrosalojen mukaan, joten myös lämpimän käyttöveden kulutus skaalautui samalla. Todennäköisesti maalämpömallia olisi saatu paremmaksi skaalaamalla myös lämpimän veden kulutus. Käyttöpaikoista ei kuitenkaan tiedetty asukasmäärää, joten tätä ei voitu tehdä tarkasti. Myös etenkin VTT:n simuloinnissa 1970-luvun talolle lämmitysenergian tarve oli huomattavan suuri. Tutkimusalueen käyttöpaikoista suuri osa oli ennen vuotta 1980 rakennettuja, joten 1970-luvun talon simulointia käytettiin paljon.

Arvioitaessa lämpöpumppujen yleistymistä alueellisesti tulisi tietää jo käytössä olevat lämpöpumput. Ilman tietoa nykyisistä lämpöpumpuista, alueellisista ennusteista tulee todennäköisesti virheellisiä, sillä lämpöpumppuja ei hankita todennäköisesti enempää kuin yksi yhteen kotitalouteen. Lämpöpumppujen yleistymisessä tulisi huomioida myös uudisrakentaminen. Toisaalta tässä työssä tutkimusalueet olivat haja-asutusalueilta, jossa uudisrakentamista ei juurikaan ole.

## 7. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä tutkittiin kuormitusprofiilien muodostamista AMR-datasta sekä profiilien muuttumista lämpöpumppujen yleistymisen seurauksena. Työ liittyy laajempaan tutkimushankkeeseen "Haja-asutusalueiden sähköverkko ja sähköasias 2030". Haja-asutusalueiden kuormituksen mallintaminen on tarpeen, sillä sähköverkkoyhtiöt joutuvat saneeraamaan haja-asutusalueiden sähköverkkoja runsaasti tulevana vuosina ja sähkönkäytön muuttuessa vanhat kuormitusprofiilit eivät enää vastaa todellista sähkönkäyttöä.

Työssä analysoitiin useita eri sähkönkäyttöön liittyviä tulevaisuuden muutostekijöitä. Tämä diplomityö rajattiin kuitenkin lämpöpumppujen mallintamiseen.

Kuormitusprofiileiden muodostamiseen ja sähkönkäyttäjien luokitteluun käytettiin K-means klusterointia ja väestötietorekisteristä saatuja rakennustietoja. Tutkimusprojektissa toteutettiin lisäksi kysely pienelle joukolle asiakkaita, josta saatiin lisätietoja alueen sähkönkäytöstä. K-means klusteroinnilla muodostettiin yhteensä 9 klusteria 9 400 käyttöpaikasta. Ennen klusterointia käyttöpaikat jaettiin sähkölämmittäjiin, ei sähkölämmittäjiin, isoihin sähkönkäyttäjiin ja vapaa-ajan asuntoihin mm. väestötietorekisterin tietojen perusteella. Klusteroinnin jälkeen havaittiin, että väestötietorekisterin lämmitystapa tiedot eivät olleet ajan tasalla kaikista kohteista. Mm. puu-, ja öljylämmitteisiksi merkattuja kohteita oli muutetta maalämpöön. Asiakaskyselyyn osallistuneista käyttöpaikoista 33:ssa oli maalämpö, joista väestötietorekisterissä oli merkattu lämmitystavaksi maalämpö 17 käyttöpaikkaan. Tämän mukaan väestötietorekisterissä olisi tiedot vain 52 % maalämpökohteista.

Klusteroinnilla ei voitu erottaa ilma- ja maalämpöpumpullisia käyttöpaikkoja omiksi ryhmiksi, joten tutkittiin lämpöpumppujen tunnistusta AMR-datan avulla muilla keinoin. Ilmalämpöpumpun lämpökertoimen vahvasta ulkolämpötilariippuvuudesta johtuen oli oletus, että ilmalämpöpumpullisten käyttöpaikkojen lämpötilariippuvuus jyrkkenee kylmillä ulkolämpötiloilla, joten se on eksponentiaalinen. Työssä havaittiin kuitenkin oletuksen olleen jossain määrin väärä. Lämpötilariippuvuuksien vertailulla ilmalämpöpumppuja ei saatu tunnistettua kovin luotettavasti. Työssä havaittiin, että etenkin puun pienpoltto vaikeuttaa ilmalämpöpumppujen tunnistus-

ta AMR-datasta. Maalämpökohteiden sähkönkäytön havaittiin olevan hyvin lähellä sähkölämmitteisten käyttöpaikkojen sähkönkäyttöä.

Lämpöpumppumallinnusten perusteella lämpöpumppujen yleistymisen muuttua sähkönkäyttöä merkittävästi. Erityisesti ei sähkölämmittäjien, kuten puu- ja öljykeskuslämmityksellä varustettujen rakennusten sähkönkäyttö kasvaa merkittävästi niiden siirtyessä maalämpöön. Maalämpöpumput laskevat huipputehoja, jos maalämmöllä korvataan sähkölämmitys. Mallinuksissa ilmalämpöpumppujen havaittiin myös laskevan koko aineiston huipputehoja. Huipputehojen pientymiseen vaikutti kuitenkin se, että tutkimusaineistoa oli eri alueilta, jolloin myös lämpötilat erosivat.

## LÄHTEET

- [1] Belonogova, Nadezda, Petri Valtonen, Jussi Tuunanen, Samuli Honkapuro ja Jarmo Partanen: *Impact of market-based residential load control on the distribution network business*. 2013.
- [2] Chen, Tao: *Customer Behavior Change Detection Based on AMR Measurements*. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, 2014.
- [3] Elenia: *Elenia rakentaa ratkaisua sähkömarkkinoiden kysyntäjouoston edistämiseksi*, 2017. <https://www.epressi.com/tiedotteet/energia/elenia-rakentaa-ratkaisua-sahkomarkkinoiden-kysyntajouoston-edistamiseksi.html>, vierailtu 11.5.2017 .
- [4] Energiateollisuus: *Tuntimittausta ja etäluenta*, 2016. [http://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/asiakkaat/sahkoasiakkuus/sahkonmittaus](http://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/asiakkaat/sahkoasiakkuus/sahkonmittaus), vierailtu 11.5.2017 .
- [5] Energiateollisuus: *Kaukolämmön hintatilasto*, 2017. [https://energia.fi/ajankohtaista\\_ja\\_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolammon\\_hintatilasto.html#material-view](https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolammon_hintatilasto.html#material-view), vierailtu 20.07.2017 .
- [6] Energiavirasto: *Vuosikertomus 2014*, 2015. <https://www.energiavirasto.fi/julkaisut>, vierailtu 11.5.2017 .
- [7] Energiavirasto: *Sähköhinnan osatekijät*, 2017. <https://www.energiavirasto.fi/sahkonhinnan-osatekijat>, vierailtu 15.5.2017 .
- [8] Energiavirasto: *Sähkön kulutuksen mittaus*, 2017. <https://www.energiavirasto.fi/sahkon-kulutuksen-mittaus>, vierailtu 11.5.2017 .
- [9] EPIA: *Global market outlook for photovoltaics 2014-2018*. European Photovoltaic Industry Association, Brussels, Belgium, 60, 2014.
- [10] Eskola, Lari, Juha Jokisalo ja Kai Sirén: *Lämpöpumppujen energialaskentaopas*. Suomen rakennusmääräyskokoelma, 14, 2012. <http://www.ym.fi/download/noname/%7B10A732A6-EA2F-45F9-869C-6F909138CB26%7D/30757>, vierailtu 25.07.2017 .
- [11] European Alternative Fuels Observatory: *PEV market share in Norway*, 2017. <http://www.eafo.eu/content/norway>, vierailtu 26.7.2017 .

- [12] Farhangi, Hassan: *The path of the smart grid*. IEEE power and energy magazine, 8(1), 2010.
- [13] Han, Jiawei, Jian Pei ja Micheline Kamber: *Data mining: concepts and techniques*. Elsevier, 2011.
- [14] Hellman, Hannu Pekka: *Maalämpökohteiden sähkönkäytön analysointi*. Diplomityö. Aalto-yliopisto, 2013.
- [15] Honkapuro, Samuli, Jouni Haapaniemi, Juha Haakana, Jukka Lassila, Jarmo Partanen, Kimmo Lummi, Antti Rautiainen, Antti Supponen, Juha Koskela, Pertti Järventausta et al.: *Jakeluverkon tariffirakenteen kehitysmahdollisuudet ja vaikutukset*. LUT Scientific and Expertise Publications/Tutkimusraportit–Research Reports, 2017.
- [16] IEA: *Snapshot of Global PV 1992-2014. Photovoltaic Power Systems Programme*. International Energy Agency, 2015.
- [17] Ilmatieteen laitos: *Ilmatieteen laitoksen avoin data ja lähdekoodi*, 2017. <https://ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data>, vierailtu 3.4.2017 .
- [18] Järventausta, P, S Repo, P Trygg, A Rautiainen, A Mutanen, K Lummi, A Supponen, J Heljo, J Sorri ja P Harsia: *Kysynnän jousto–Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille*. Loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto, 2015.
- [19] Koivisto, Matti: *Tuntimittausdatan käyttö sähkökuorman ennustamisessa*. Diplomityö. Aalto-yliopisto, 2010.
- [20] Koivisto, Matti: *Finding Value in Big Data-Statistical Analysis of Large Data Sets with Applications in Electric Power Systems*. 2015.
- [21] Laitinen, Ari, Maija Ruska ja Göran Koreneff: *Impacts of large penetration of heat pumps on the electricity use*. SGEM project report VTT-R-03174-11, 2011.
- [22] Lassila, Jukka, Juha Haakana, Ville Tikka ja Jarmo Partanen: *Methodology to analyze the economic effects of electric cars as energy storages*. IEEE Transactions on smart grid, 3(1):506–516, 2012.
- [23] Liikenne- ja viestintäministeriö: *Työryhmän ehdotus liikenteen vaihtoehtoisten käyttövoimien jakeluverkon suunnitelmaksi*. Raportit ja selvitykset 1/2016, 2016. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-487-6>.

- [24] Maanmittauslaitos: *Maastotietokanta*, 2017. [http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/maastotietokanta,vierailtu 3.4.2017](http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/maastotietokanta,vierailtu%203.4.2017).
- [25] Markku Hagström, Aki Pesola: *Lämpöpumppujen vaikutukset sähkötehon tarpeeseen*. Gaia, Loppuraportti, 2017. <http://www.sulpu.fi/documents/184029/0/Lämpöpumppujen%20vaikutukset%20sähkötehon%20tarpeeseen%20-%20Loppuraportti%20FINAL%204-2017%20%28ID%2029764%29.pdf>.
- [26] Mutanen, Antti, Pertti Jarventausta, Matti Karenlampi ja Pentti Juuti: *Improving distribution network analysis with new AMR-based load profiles*. 2013.
- [27] Mutanen, Antti, Harri Niska ja P Jarventausta: *Mining smart meter data-case Finland*. 2016.
- [28] Mutanen, Antti, Sami Repo ja Pertti Järventausta: *Customer classification and load profiling based on amr measurements*. Teoksessa *Proceedings of the 21st International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2011), Frankfurt, Germany, paper, nide 277*, 2010.
- [29] Mutanen, Antti, Maija Ruska, Sami Repo ja Pertti Jarventausta: *Customer classification and load profiling method for distribution systems*. IEEE Transactions on Power Delivery, 26(3):1755–1763, 2011.
- [30] Rautiainen, Antti, Sami Repo, P Jarventausta, Antti Mutanen, K Vuorilehto ja K Jalkanen: *Statistical charging load modeling of PHEVs in electricity distribution networks using national travel survey data*. IEEE Transactions on smart grid, 3(4):1650–1659, 2012.
- [31] Rimali, Ville: *Etäluettavan energiamittaustiedon hyödyntäminen alueellisissa kuormitusennusteissa*. Diplomityö. Aalto-yliopisto, 2011.
- [32] Suomen lämpöpumppuyhdistys: *Myydyt lämpöpumput 2016*, 2016. <http://www.sulpu.fi/documents/184029/208772/Myydyt%20lämpöpumput%202016%2C%20kaaviot%2C%20f.pdf>, vierailtu 25.4.2017.
- [33] Suomen sähkölaitosyhdistys: *Sähkön käytön kuormitustutkimus*. Helsinki, 1992.
- [34] Tikka, Ville Tapani: *Sähköautojen pikalatauksen verkkovaikutukset*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2010.
- [35] Tilastokeskus: *Energian hankinta ja kulutus*, 2016. [http://www.stat.fi/til/ehk/2016/03/ehk\\_2016\\_03\\_2016-12-21\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehk/2016/03/ehk_2016_03_2016-12-21_tie_001_fi.html), vierailtu 15.3.2017.



- [36] Trafi, Liikenteen turvallisuusvirasto: *Hybridikäyttöisten henkilöautojen aikasarja*, 2017. [https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan\\_kayttovoimatilastot/hybridikayttoiset\\_henkiloautot](https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan_kayttovoimatilastot/hybridikayttoiset_henkiloautot), vierailtu 26.7.2017 .
- [37] Trafi, Liikenteen turvallisuusvirasto: *Liikennekäytössä olevat sähköautot*, 2017. [https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan\\_kayttovoimatilastot/sahkokayttoiset\\_autot](https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan_kayttovoimatilastot/sahkokayttoiset_autot), vierailtu 26.7.2017 .
- [38] Tuononen, Marko: *Paikallishaku klusterointimenetelmänä*. Pro Gradu -työ. Joensuun yliopisto, 2006.
- [39] Tuunanen, Jussi: *Lämpöpumppujen vaikutukset sähköverkko liiketoiminnan kannalta*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2009.
- [40] Tuunanen, Jussi: *Modelling of changes in electricity end-use and their impacts on electricity distribution*. väitöskirja, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2015.
- [41] Väestökisterikeskus: *Rakennustiedot*, 2017. <http://vrk.fi/rakennustiedot>, vierailtu 3.4.2017 .
- [42] Valtioneuvosto: *Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta*. 2009. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090066>.
- [43] Viljakainen, Santeri: *Kerrostalon kiinteistösähkönkulutuksen kompensointi aurinkosähköjärjestelmällä*. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2015.
- [44] Wikipedia: *Coefficient of determination*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient\\_of\\_determination](https://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_determination), vierailtu 18.5.2017 .