

Hannu-Pekka Hellman

Maalämpökohteiden sähkönkäytön analysointi

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 16.9.2013.

Työn valvoja:

Prof. Matti Lehtonen

Työn ohjaajat:

TkT Markku Hyvärinen

TkT Pirjo Heine

Tekijä: Hannu-Pekka Hellman		
Työn nimi: Maalämpökohteiden sähkönkäytön analysointi		
Päivämäärä: 16.9.2013	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 8+70
Sähkötekniikan laitos		
Professori: Sähköjärjestelmät		Koodi: S-18
Valvoja: Prof. Matti Lehtonen		
Ohjaajat: TkT Markku Hyvärinen, TkT Pirjo Heine		
<p>Sähkönjakeluyhtiöt tekevät alueellisia kuormitusennusteita sähköverkkoinvestointipäätösten tueksi. Alueen uusien rakennusten lisäksi on tärkeää havaita ja ottaa huomioon muutokset sähkönkäytössä. Tämän työn tarkoitus oli analysoida maalämpöpumpullisten erillisten pientalojen sähkönkäyttöä. Tämä tehtiin käyttämällä tunneittain mitattuja sähkönkulutustietoja sekä kiinteistötietoja.</p> <p>Maalämpökohteiden havaitsemiseksi sovellettiin muutoskohdan havaitsemismenetelmää sähkön vuosienergiatietojen avulla. Keskimääräiset vuosienergiamuutokset laskettiin sähkölämmityksestä ja ei-sähkölämmityksestä maalämpölämmitykseen vaihdettaessa. Keskimääräiselle maalämpökohteelle tehtiin regressioanalyysi päiväenergioille ja määritettiin tunneittainen sähkönkulutus. Maalämpökohteita yritettiin luokitella muista asiakasryhmistä käyttämällä pääkomponenttianalyysiä ja K-means -ryhmittelyä tunneittain mitatuille sähkönkulutustiedoille.</p> <p>Vaihdettaessa sähkölämmityksestä ja ei-sähkölämmityksestä maalämpöön, tulosten mukaan vuosienergia vähenee mediaaniltaan 53 % ja kasvaa 150 %. Maalämpökohteen sähkökäyttöprofiili on niin samankaltainen kuin suoralla sähkölämmityksellä, että niitä ei pystytty erottamaan toisistaan näillä matemaattisilla menetelmillä pelkästään tuntimittaustietoja käyttämällä. Lopuksi tehtiin kaksi skenaariota neljälle Helsingin pientalovaltaiselle kaupunginosa-alueelle, jotta voitiin arvioida maalämpöpumppujen lisääntymisen vaikutus alueelliseen sähkönkäyttöön. Tulosten perusteella näillä skenaarioalueilla sähkönkulutus lisääntyisi ja huippu-teho vähenisi hieman ilman maalämpöpumppuja tapahtuvaan kehitykseen verrattuna.</p>		
Avainsanat: maalämpöpumppu, etäluenta, regressio, muutosten tunnistaminen		

Author: Hannu-Pekka Hellman

Title: Electricity Consumption Analysis of Customer Connections with Ground Source Heat Pumps

Date: 16.9.2013

Language: Finnish

Number of pages: 8+70

Department of Electrical Engineering

Professorship: Power Systems

Code: S-18

Supervisor: Prof. Matti Lehtonen

Advisors: D.Sc. (Tech.) Markku Hyvärinen, D.Sc. (Tech.) Pirjo Heine

Spatial load forecasting is done by distribution system operators to assist in power system investment decisions. In addition to the new buildings in the area, it is important to detect and take into account the changes in electricity consumption. The aim of this thesis was to analyse the electricity consumption of detached house customer connections with ground source heat pumps (GSHP). This was done by using hourly measured consumption data and property data.

A break point detection method was applied to annual electricity consumption data to detect GSHP customers. Average changes in annual electricity consumption when switching from electric and non-electric heating to GSHPs were calculated. Regression analysis for daily electricity consumption and plotting of hourly electricity consumption were done for an average GSHP customer. Classification of GSHP customers from other customer types was tried by using principal component analysis (PCA) and K-means clustering for hourly measured electricity consumption data.

When switching to GSHP heating from electric and non-electric heating, the results show that the annual electricity consumption decreases on median by 53 % and increases by 150 %, respectively. The electricity consumption profile of a GSHP customer is so similar to direct electric heating that they could not be differentiated from each other with tested mathematical methods using only hourly measured consumption data. Finally, two scenarios were done in four Helsinki sub-districts with mostly detached houses to see the effect of increased number of GSHPs in spatial loads. In these scenario areas, the annual electricity consumption would increase and the peak power would decrease slightly compared to the scenario without GSHPs.

Keywords: ground source heat pump, AMR, regression, change detection

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Helen Sähköverkko Oy:ssä ja se on osa CLEEN Oy:n hallinnoimaa Älykkäät sähköverkot ja energiamarkkinat -tutkimusohjelmaa.

Suuret kiitokset työn ohjaajille TkT Markku Hyväriselle ja TkT Pirjo Heinelle, jotka ovat asiantuntevalla ohjauksellaan auttaneet työn lopullisen muodon löytymisessä ja käytetyn aineiston hankkimisessa. Kiitos työn valvojalle professori Matti Lehtoselle työn kommentoinnista ja tarkastamisesta sekä kiinnostuksesta viime vuosien tutkimuksiani kohtaan. Erityiskiitokset haluan antaa DI Matti Koivistolle, jolla on ollut suuri merkitys tämän työn matemaattisten osuuksien ideoinnissa ja tarkastamisessa. Kiitokset kuuluvat myös E.ON Kainuun Sähköverkko Oy:lle mahdollisuudesta käyttää työssä heidän laadukasta tuntimittausdataansa vertailuaineistona.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni, jotka ovat olleet tukenani hauskojen opiskeluvuosien ajan.

Helsingissä, 16.9.2013

Hannu-Pekka Hellman

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit, lyhenteet ja käsitteet	vii
1 Johdanto	1
2 Helen Sähköverkko Oy ja SGEM-tutkimusohjelma	3
3 Sähkönkulutuksen etäluenta	5
3.1 Sähkönkulutuksen mittausta	5
3.2 Etäluennan tekniikka	5
3.3 Etäluenta Helen Sähköverkko Oy:ssä	6
3.4 Etäluenta E.ON Kainuun Sähköverkko Oy:ssä	7
3.5 Etäluennan hyödyntäminen	7
4 Sähkönkäytössä tapahtuvia muutoksia	9
4.1 Sähkönkulutukseen vaikuttavia tekijöitä	9
4.2 Muutokset lämmitysjärjestelmissä	13
4.3 Maalämpöpumput	15
4.4 Pientuotanto	17
4.5 Sähköautot	19
5 Sähkönkulutustietojen käyttö muutosten tunnistamisessa	20
5.1 Lineaarinen regressiomalli päiväenergioille	20
5.2 Regressiokertoimien vakioisuus	21
5.3 Pääkomponenttianalyysi ja ryhmittely	24
6 Maalämpökohteiden tunnistaminen ja analysointi	26
6.1 Käytetyt aineistot	26
6.2 Maalämpökohteiksi vaihtaneiden käyttöpaikkojen tunnistaminen vuosienenergioiden perusteella	29
6.3 Maalämpökohteiden tunnistaminen muista kulutusryhmistä tuntisarjojen avulla	32
6.4 Maalämpöasiakkaiden tyyppikäyrät	38
6.5 Maalämpölämmitykseen vaihtaneiden sähkönkäytön muutokset	44
6.6 Maantieteellinen jakautuminen Helsingissä	52
7 Maalämpöpumppujen yleistymisen vaikutus alueelliseen sähkönkäyttöön	53

7.1	Tutkittavat kaupunginosa-alueet	53
7.2	Skenaarion lähtötiedot ja oletukset	55
7.3	Kaupunginosa-alueiden sähkökäytön muutokset	57
7.4	Merkitys sähkömarkkinaosapuolille	59
8	Yhteenveto	61
	Viitteet	64
	Liite A	67
	Liite B	69
	Liite C	70

Symbolit, lyhenteet ja käsitteet

Symbolit

$F(d_1, d_2)$	F-jakauma vapausastein d_1 ja d_2
E	vuosienergia
J	päivän järjestysnumero
L	leveyspiiri asteina
N	havaintomäärän koko
P	teho
Q	ulkoinen indeksi
S	jäännöstermien neliöiden summa
T	lämpötila
c	pääkomponentin pääkomponenttikerroin
k	vapausasteiden lukumäärä
p	auringon korkeus horisontista
q	sisäinen indeksi
s	pääkomponenttipiste
x	havaintoarvo
y	selitettävä muuttuja
α	lämpötilakerroin
β	regressiokerroin
ϵ	regressiomallin jäännöstermi

Lyhenteet

2G/3G	toisen ja kolmannen sukupolven digitaaliset matkapuhelin- teknologiat
AMR	<i>Automatic Meter Reading</i> , mittareiden etäluenta
CLEEN	<i>Cluster for Energy and Environment</i> ,
COP	<i>Coefficient of Performance</i> , lämpöpumpun lämpökerroin
GMM	<i>Gaussian Mixture Models</i> , Gaussin mikstuurimalli
HSV	Helen Sähköverkko Oy
LAN	<i>Local Area Network</i> , paikallisverkko
MLP	maalämpöpumppu
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> , pääkomponenttianalyysi
PLC	<i>Power Line Communication</i> , sähköverkkotiedonsiirto
RS-485	balansoitu sarjaliikenneväylä
SGEM	<i>Smart Grids and Energy Markets</i> , Älykkäät sähköverkot ja energiamarkkinat
SL	sähkölämmitys
SLY	Suomen Sähkölaitosyhdistys ry, nykyisin Sener ry

Käsitteet

Dummy	regressioanalyysissä käytetty muuttujatyyppe, joka voi saada vain kaksi eri arvoa
Kerrosala	rakennuksen pinta-ala pl. kellarit ja ullakot
Kiinteistö	itsenäisen maanomistuksen yksikkö
Käyttöpaikka	sähköasiakkaan mittauspiste
Liittymä	kiinteistön sähköverkon liityntäpiste, joka koostuu käyttöpaikoista
MATLAB	MathWorksin numeeriseen laskentaan kehittämä laskentaohjelma
Ominaiskulutus	vuosienergia kerrosalaa kohden (kWh/m ²)
Spot-hinta	vaihdeettavan hyödykkeen tietyn hetken hinta

1 Johdanto

Sähkön jakelu- ja siirtojärjestelmät ovat olleet pitkään hyvin tärkeä osa kehittyneen yhteiskunnan infrastruktuuria. Sähköä tuotetaan pääsääntöisesti keskitetysti isoissa voimalaitoksissa, joista se siirretään kuluttajille sähköjohtojen ja muiden sähköverkon komponenttien avulla. Sähkönsiirto- ja jakeluverkkojen komponentit mitoitetaan mm. siirrettävän tehon ja jännitteenalenumien mukaan, ja rakennettavien järjestelmien elinkaari suunnitellaan pitkäksi. Tämän vuoksi sähköverkkoyhtiöiden tulee arvioida nykyhetken sähkökulutuksen lisäksi myös tulevaisuuden kulutusta suunnitellessaan sähköverkkoaan.

Sähköverkossa on tärkeää pystyä ennakoimaan sähkökulutuksen vuorokausittaista ja kausittaista vaihtelua. Viime vuosiin saakka sähköverkkoyhtiöillä on pääsääntöisesti ollut mahdollisuus arvioida yksittäisten asiakkaiden sähkökäyttöä vain niiden vuosienergioiden ja keskiarvoisten kulutusryhmien vuorokausikäyttäytymisen avulla. Sähkökulutuksen mittaamisessa on kuitenkin viime vuosina siirrytty valtioneuvoston asetuksen mukaisesti tunneittaiseen mittaukseen, mikä antaa mahdollisuuden jokaisen kuluttajan yksilöllisenkin sähkökäyttömallin muodostamiseen. Tuntimittaustiedot myös paljastavat uusia kulutuskäyttäytymisiä edellisiin malleihin verrattuna. Kotitalouksien sähköntarpeessa tapahtuu muutoksia, mikäli niissä otetaan käyttöön esimerkiksi lämpöpumppuja, sähkön pientuotantoa tai sähköautoja. Tulevaisuuden sähkökäyttöennusteita laadittaessa voidaan hyödyntää tällaisten kohteiden tuntimittaustiedoista muodostettuja uusia malleja.

Suomessa kotitalouksien energiankulutuksesta merkittävä osuus käytetään lämmitykseen. Pientalon sisäilman lämmityksen osuus on usein yli 50 % ja lämpimän käyttöveden osuuskin voi olla jopa 20 % kokonaisenergiankulutuksesta. Mikäli rakennus lämmitetään sähköllä, niin se hallitsee kotitalouden sähkökäyttöä selvästi. Tällöin myös tarvittava sähköteho on huomattavasti suurempi, mikä verkkoyhtiön tulee ottaa suunnittelussa huomioon.

Viime vuosikymmenen aikana kotitalouksissa on yleistynyt lämpöpumpputekniikkaa käyttävät lämmitysjärjestelmät, kuten ilmalämpöpumput ja maalämpöpumput. Näistä maalämpöpumppu on usein rakennuksen päälämmitysjärjestelmä. Niitä ei nykyisin laajasti käytössä olevia kulutusmalleja määritettäessä juurikaan ollut, ja tämän takia niille ei ole tehty omia sähkökäyttömalleja. Hyödyntämällä nykyään saatavilla olevia tuntimittaustuloksia voidaan havaita suuret muutokset asiakkaan sähkökulutuksessa, ja muodostaa näille asiakkaille uudet kulutusryhmät. Sähköasiakkaiden kiinteistö-, vuosienergia- ja tuntimittaustietoja yhdistelemällä voidaan esimerkiksi myös analysoida, millainen kulutusrakenne maalämpölämmittäjillä on ja millä alueilla maalämpöjärjestelmät ovat yleistyneet. Näitä tuloksia voidaan käyttää tulevaisuuden alueellisia kuormitusennusteita tehtäessä.

Tässä diplomityössä esitellään sähkökulutuksen etäluenta ja sen hyödyntämistä tutkimuksessa. Sähkökulutuksessa tapahtuvia mahdollisia muutoksia tutkitaan yksittäisten asiakkaiden sekä suuremman mittakaavan tapauksissa. Sähkökulu-

tuksen muutoksia pyritään havaitsemaan eri menetelmin mm. tuntimittaustieto- ja vuosienergiatietoja käyttämällä. Esimerkkinä sähkönkulutuksen muutoksista käytetään maalämpökohteita, jotka yritetään tunnistaa Helen Sähköverkko Oy:n tuntimittaus- ja vuosienergia-aineistosta. Maalämpökohteiksi muuttuvat yksittäiset käyttöpaikat pyritään tunnistamaan, ja selvitetään, pystyykö maalämpökohteita erottamaan muista kulutusryhmistä. Maalämpökohteiden sähkönkäyttö analysoidaan kiinteistö-, tuntimittaus- ja vuosienergiatietojen avulla sekä selvitetään, kuinka pientalovaltaisten kaupunginosa-alueiden sähkönkäyttö voisi muuttua tulevaisuudessa maalämpöpumppujen yleistymisen seurauksena. Tätä varten maalämpölämmitykseen siirtyneistä käyttöpaikoista analysoidaan aikaisempien lämmitysmuototyyppien jakaumat sekä aikaisempi sähkönkulutus, jotta voidaan arvioida keskimääräisten käyttöpaikkojen vuosienergioiden muutoksia. Helen Sähköverkko Oy:n alueen maalämpökohteiden tuntisarjoista muodostettuja päivärakenteita ja päiväenergioiden lämpötilariippuvuuksia verrataan E.ON Kainuun Sähköverkko Oy:n maalämpökohteiden tuntisarjoista muodostettuihin vastaaviin tuloksiin.

2 Helen Sähköverkko Oy ja SGEM-tutkimusohjelma

Sähkönjakelusta vastaa Helsingin alueella Helen Sähköverkko Oy (HSV) lukuun ottamatta vuonna 2009 Sipoosta Helsinkiin liitettyä Östersundomin aluetta. Sähkölaitteita HSV:llä oli vuonna 2012 noin 31 900 kappaletta, jotka koostuvat noin 360 000 sähkökäyttöpaikasta. Sähkön siirron myynnistä 55,8 % oli 0,4 kV jännitetasolta, 40 % 10 ja 20 kV jännitetasoilta ja 4,2 % 110 kV jännitetasolta. Vuonna 2012 sähkönjakelualan sähkökulutus oli noin 4 650 GWh. [1]

Helen Sähköverkko Oy:n omistaa sen emoyhtiö Helsingin Energia, josta se on eriytetty sähkömarkkinalain mukaisesti. Helen Sähköverkko Oy:llä oli vuonna 2012 pienjännitejohtoja 4 540 km, keskijännitejohtoja 1 578 km sekä 110 kV johtoja 206 km. Kaupunkiympäristössä toimimisessa on omat erityispiirteensä, minkä vuoksi esimerkiksi pien- ja keskijännitejohtojen kaapelointiasteet ovat HSV:llä hyvin korkeat (97,0 % ja 99,7 %).

CLEEN Oy (Cluster for Energy and Environment) on vuonna 2008 perustettu yritys, jonka osakkaina on 28 yritystä ja 17 instituutiota. Sen tarkoituksena on edistää energia- ja ympäristöalalla toimivien yritysten liiketoimintaa palvelevaa tutkimustoimintaa ja tutkimusyhteistyötä. CLEEN Oy:n käynnissä olevat seitsemän tutkimusohjelmaa ovat

- Tulevaisuuden kestävä bioenergiaratkaisut, Sustainable Bioenergy Solutions for Tomorrow (BEST)
- Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi, Carbon Capture and Storage Program (CCSP)
- Hajautetut energiajärjestelmät, Distributed Energy Systems (DESY)
- Energian käytön tehokkuus, Efficient Energy Use (EFEU)
- Tulevaisuuden polttomoottorivoimalaitokset, Future Combustion Engine Power Plants (FCEP)
- Ympäristön mittaus ja monitorointi, Measurement, Monitoring and Environmental Efficiency Assessment (MMEA)
- Älykkäät sähköverkot ja energiamarkkinat, Smart Grids and Energy Markets (SGEM).

Tämä tutkimus on osa Älykkäät sähköverkot ja energiamarkkinat -tutkimusohjelmaa. Tutkimusohjelman tavoitteena on kehittää älykkäiden sähköverkkojen ratkaisuja, joita voidaan demonstroida oikeissa toimintaympäristöissä. SGEM-ohjelma on jaettu työpaketteihin, jotka edelleen on jaettu pienempiin tutkimustehtäviin. Tämä diplomityö on tehty osana työpaketin 6 tutkimustehtävää 6.11, joka tutkii pitkän aikavälin alueellista kuormitusennustamista mm. etäluettavien tuntimittaus tietojen avulla. Tutkimustehtävässä on tavoitteena laatia skenaariotyökalu, jolla voitaisiin mallintaa

tulevaisuuden alueellista sähkökäyttöä ottamalla sähkökäytössä tapahtuvia muutoksia huomioon. Tällaisia muutoksia ovat esimerkiksi uudisrakentaminen, lämmitysjärjestelmien vaihtajat ja pientuotannon lisääntyminen. Helen Sähköverkko Oy:n lisäksi tutkimustehtävässä ovat mukana Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu, Vantaan Energia Sähköverkot Oy, Tekla Oy sekä Elenia Oy. [2]

3 Sähkönkulutuksen etäluenta

3.1 Sähkönkulutuksen mittaus

Perinteisesti Suomessa sähkönkulutusta on mitattu rakennuksiin asennetuilla sähkömittareilla, joiden mittaaman lukeman asiakas on voinut ilmoittaa paikalliselle sähköverkkoyhtiölle. Vaihtoehtoisesti sähköverkkoyhtiön oma tai alihankkijan työntekijä on käynyt kerran vuodessa tarkastamassa lukeman. Asiakkaille sähkölasku on kuitenkin yleensä toimitettu useammin kuin kerran vuodessa, joten lasku on perustunut arvioon koko vuoden sähkönkulutuksesta. Vuoden päätteeksi todellista sähkönkulutusta on verrattu arvioon ja asiakkaalle on lähetetty tasauslasku, mikäli kulutus on ollut arviota suurempi. Kulutuksen oltua arviota pienempi on erotus vähennetty seuraavista laskuista.

Asiakkaan ei ole helppoa arvioida hetkittäistä sähkönkulutustaan ja tehdä energiansäästöön vaikuttavia päätöksiä, kun sähkön laskutus on perustunut arvioon tasaisina laskuina. Valtioneuvoston asetuksessa 66/2009 [3] päätettiin, että kuluttajien tulee saada tietää sähkönkulutuksensa tunnin tarkkuudella viimeistään samaan aikaan, kun verkkoyhtiö on valmis antamaan kulutustiedot sähkömarkkinaosapuolille. Tämä tarkoittaa mittausta seuraavaa päivää. Tällainen onnistuu vain käyttämällä automaattisesti etäluettavia sähkömittareita. Kyseessä on sähköverkkoyhtiöille hyvin merkittävä investointi, mutta etäluettavien sähkömittareiden käyttöönotossa asiakkaalta ei saa suoraan periä siitä maksua. Aikatauluksi asetettiin, että vuoden 2013 loppuun mennessä vähintään 80 % asiakkaista tulee olla etäluettavan tuntimittauksen piirissä.

3.2 Etäluennan tekniikka

Etäluennan yhteydessä kuvataan etäluentaa usein automaattisena mittarinluentana (AMR, Automatic Meter Reading), ja etäluettavista mittareista käytetään usein käsitettä AMR-mittari. Suomeen asennettavien tuntimittaukseen pystyvien etäluettavien mittareiden täytyy kyetä kahdensuuntaiseen tiedonsiirtoon.

Sähkömittareiden etäluenta voidaan toteuttaa usealla eri tiedonsiirtotekniikalla. Järjestelmän peruserä on, että sähköverkon sähkökäyttöpaikoille asennetut mittarit välittävät verkkoyhtiön tiedonluentalaitteistoille kulutustietoja. Usein mittareiden lähettämä tieto ei kuitenkaan siirry suoraan vain yhdellä tiedonsiirtomenetelmällä. Yksittäisen mittarin suoraa tiedonsiirtoyhteyttä verkkoyhtiön tiedonluentajärjestelmän kanssa sanotaan *point-to-point* -yhteydeksi. Tällöin tiedonsiirto tapahtuu useimmiten käyttämällä langattomia 2G- ja 3G-matkapuhelinverkkoja. Mittarit voivat välittää tietoja myös kootusti usealta mittarilta yhden lähellä sijaitsevan keskittimen kautta tiedonluentalaitteistolle. Tällöin mittarit voivat käyttää tietojen siirtämiseen keskittimelle jotakin useista erilaisista tiedonsiirtotekniikoista, kuten paikallisverkkoa (LAN, Local Area Network), sähköverkkoa (PLC, Power Line

Communication), RS-485-sarjaväylätekniikkaa tai radioverkkoa. Keskittimeltä tiedot useimmiten välitetään langattomasti käyttämällä matkapuhelinverkkojen 2G- ja 3G-tiedonsiirtotekniikoita. [4; 5]

Etäluennan tiedonsiirtomenetelmien valintaan vaikuttaa mm. asuintiheys. Keskitetyjä ratkaisuja on järkevää käyttää alueilla, joissa mittareita on tiheästi ja siirtoeitäisyydet ovat lyhyitä. Mittarin ja keruujärjestelmän suora yhteys on usein kannattavampaa harvaan asutuilla seuduilla. Tiedonsiirtotekniikkaan vaikuttavat myös niiden kapasiteetti ja langattomien tekniikoiden kuuluvuus. [5]

Haasteita tuntimittaustietojen keräämiseen verkkoyhtiöille tuovat etäluentapalveluiden toimittajien käyttämät erilaiset ratkaisut. Tämän vuoksi yhdellä verkkoyhtiöllä voi olla alueellaan rinnakkaisia etäluentatiedon luentajärjestelmiä, joista tiedot tuodaan yhteen mittaustietokantaan. Tästä mittaustietokannasta tuntimittaukset lopulta välitetään sitä tarvitseville osapuolille, kuten sähköenergianmyyjälle. Kulutustiedot päivittyvät myös sähkönjakeluuyhtiön omiin asiakas- ja tiedonhallintajärjestelmiin. Eurooppalaiset standardoimisjärjestöt ovat luomassa etäluennalle yhteisen standardin Euroopan komission mandaatilla. [5]

Tuntimittaukseen siirtyminen vaatii myös tietoturvan asettamista korkealle tasolle, sillä yksittäisten asiakkaiden sähkönkulutusta voidaan pitää arkaluonteisena tietona. Aukkaiden oleskeluaikoja asunnolla voidaan päätellä tuntimittaustiedoista ja teollisuusyritysten sähkönkulutuksesta kilpailijat voisivat päätellä esimerkiksi tuotantotasoa. [4]

3.3 Etäluenta Helen Sähköverkko Oy:ssä

Helen Sähköverkko Oy on saanut Helsingin alueen etäluettavien sähkömittareiden asennushankkeen valmiiksi vuoden 2012 lopulla. Helsingissä sähkömittareiden asennuksia oli tehty kantakaupunkiin ja muutamille esikaupunkialueille mm. Pakilaan jo ennen valtioneuvoston asetusta etäluentaan siirtymisestä. Kantakaupungin sähkökäyttöpaikat siirtyivät kokonaisuudessaan etäluennan piiriin vuonna 2010 ja esikaupunkialueet vuoden 2012 loppuun mennessä, jolloin mittareita oli asennettu noin 350 000.

Helsingin kantakaupungin alueella mittarit käyttävät keskitettyä tekniikkaa ja ne välittävät tietoa mesh-radioverkon tai RS-485-sarjaväylän avulla. Keskittimeltä tuntimittaustiedot lähetetään tiedonkeruulaitteistolle GPRS-yhteydellä. Järjestelmän tekniikan on toimittanut Aidon ja mittauksista huolehtii Mitox Oy. Esikaupunkialueen järjestelmän kokonaisuudessaan on toimittanut Landis+Gyr. Esikaupunkialueella mittarit välittävät tietoja keskittimelle vain mesh-radioverkolla ja tiedonkeruulaitteistolle 2G- ja 3G-tekniikoilla. Helen Sähköverkko Oy:n asiakkaat voivat seurata tunnin tarkkuudella sähkönkulutustaan Sävel Plus -internetpalvelusta, johon kulutustiedot päivittyvät seuraavana päivänä. [5]

3.4 Etäluenta E.ON Kainuun Sähköverkko Oy:ssä

E.ON Kainuun Sähköverkko Oy:n sähkönjakelualueeseen kuuluu kaikki Kainuun kunnat, Pohjois-Pohjanmaan Pyhännän kunta ja osa Siikalatvan kunnasta. Verkkoalueella on 57 500 sähkökäyttöpaikkaa. Tämä alue vastaa 7 % Suomen pinta-alasta ja 1,7 % kaikista Suomen sähkökäyttöpaikoista. Sähkökäyttöpaikoista lähes 40 % sijaitsee haja-asutusalueilla. E.ON aloitti etäluettavien sähkömittareiden asennukset vuonna 2002 ja Valtioneuvoston asetuksen mukainen 80 % kattavuus sähkökäyttöpaikoista toteutui vuonna 2008. Vuoden 2011 jälkeen lähes kaikki asiakkaat kuuluivat etäluettavan sähkömittauksen piiriin. Asiakkaat voivat seurata sähkökäyttöään tunnin tarkkuudella Oma energia -internetpalvelusta. [6]

3.5 Etäluennan hyödyntäminen

Etäluentaan siirryttäessä siirryttiin aluksi arviolaskutuksesta todelliseen kulutukseen perustuvaan laskutukseen, mikä oli asiakkaille näkyvin muutos. Tämä vaikutti erityisesti sähkölämmittäjien sähkölaskuihin, jotka ovat talvisin moninkertaisia kesäkuukausiin verrattuna. Sähkömarkkinalakia uudistettaessa vuonna 2013 käytiin keskustelua arviolaskutuksen tarjoamisen pakollisuudesta. Lopulliseen lakiin kirjattiin kuitenkin vain, että sähkön vähittäismyyjien on tarjottava erilaisia maksutapavaihtoehtoja. Sähkökulutuksen seurannan ja laskutuksen reaaliaikaistumisen mahdollistumisen toivotaan kuitenkin lisäävän asiakkaiden tietoisuutta sähkökulutuksestaan. Tunneittaiset sähkökulutustiedot tulevat jakeluverkkoyhtiön internetpalveluun asiakkaan nähtäväksi, jolloin asiakas voi kiinnittää huomiota sähkökulutuksessa yksittäistenkin toimiansa merkitykseen. Tällöin asiakkaan on myös helpompi kohdentaa ajallisesti epätavallisen suuret sähkökulutukset tiettyyn ajankohtaan. Tämä mahdollistaa myös spot-hinnoitellut pörssisähkösopimukset, jolloin asiakkaalta laskutetaan jokaisella tunnilla sen hetkistä hintaa. Tällöin kyseisen sopimustyyppin asiakkaan kannattaa suunnitella paljon sähköenergiaa vievien laitteiden käyttöä ajankohdille, jolloin sähkön hinta ei ole vuorokauden huipussaan.

Verkkoyhtiöille merkittävä hyöty etäluennasta on perinteisten mittareiden lukemisesta johtuneiden kulujen vähentyminen tai kokonaan poistuminen. Toisaalta verkkoyhtiöille tulee uusia kuluja mittareiden asentamisesta sekä tuntimittaus tietojen luennan ja käytön hallintaan erikoistuneiden tietojärjestelmien hankinnasta. Nämä investoinnit ovat keskittyneet erityisesti etäluentaan siirtymisen alkuvaiheeseen. Suuren tuntimittausdatamäärän hallintaan tarvitaan myös työntekijöitä.

Etäluettavien mittareiden kahdensuuntainen tiedonvälitys mahdollistaa myös esimerkiksi käyttöpaikan sähköjen etäkytkennän päälle tai pois, mikä vähentää työvoimakustannuksia ja parantaa asiakaspalvelua. Mittareiden avulla voidaan tehdä kuormanohjauskäskyjä, jolloin suuria sähkökuormia, kuten sähkölämmitystä, voidaan kytkeä sähkön hinnan mukaan, mikä tuo säästöjä myös asiakkaalle. Sähkömittareiden mahdollisuus itsenäiseen kahdensuuntaiseen tuntimittaukseen luo edellytyksiä myös asiakkaiden pientuotannon käsittelyyn. [7] Etäluettavien mittareiden

ohjelmistoja voidaan myös päivittää etänä, mikä voi pidentää niiden käyttöikä. [4] Etäluettavat sähkömittarit seuraavat myös sähkönlaatua tallentamalla tietoa sähkönjakelun keskeytyksistä ja jännitteen tasosta. AMR-mittarin vikaantuminen voidaan myös havaita nopeasti toisin kuin kerran vuodessa manuaalisesti luettava mittari. [8]

Etäluettavista tuntimittaustiedoista tulee myös uusi merkittävä tutkimusaineisto jakeluverkkoyhtiöille ja tutkimuslaitoksille. Verkkoyhtiöt voivat mittaustietojen avulla esimerkiksi tunnistaa käyttöpaikkojen kuluttajatyyppejä ja tehdä entistä tarkempia kulutusmalleja yksittäisille sähkönkäyttöpaikoille. Aikaisemmin tunneittaisten kulutusmallien tekeminen on ollut työlästä, mutta nyt tuntimittausaineistoa tulee jakeluverkkoyhtiöiden saataville kaikista käyttöpaikoista. Tutkimusta näistä aiheista ovat tehneet esimerkiksi SGEM-tutkimusohjelman piirissä Koivisto ym. [9], Rimali [10] ja Larinkari [5]. Myös Mutanen ym. [11] ovat tehneet kulutusryhmäluokittelua tuntimittaustietojen avulla.

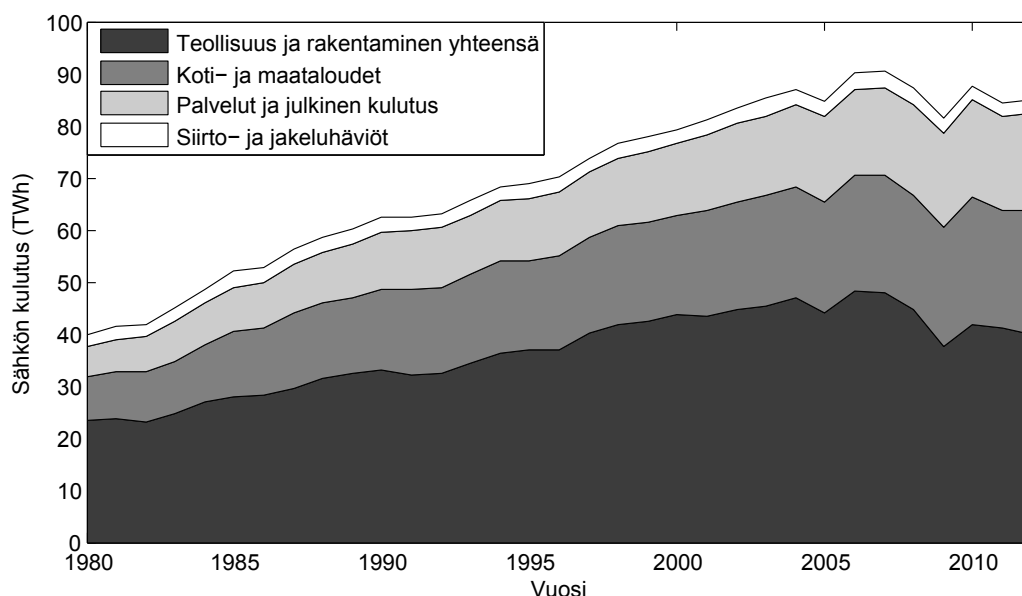
4 Sähkönkäytössä tapahtuvia muutoksia

4.1 Sähkönkulutukseen vaikuttavia tekijöitä

Sähkönkulutus riippuu monista eri tekijöistä ja sen ennustamiseen tehdään malleja niin yksittäisille käyttöpaikoille kuin koko valtionkin kokoiselle alueelle. Tässä luvussa tehdään katsaus yleisimpiin sähkönkulutukseen vaikuttaviin tekijöihin ja erityisesti yksittäisten sähkönkäyttöpaikkojen kulutuksen muutosten syihin.

Suomen sähkönkulutus kasvoi tasaisesti keskimäärin muutamalla prosentilla vuosittain vuoteen 2008 saakka, paitsi poikkeuksena vuonna 2005 sähkönkulutus väheni 2,7 % edellisestä vuodesta Suomen metsäteollisuutta laajasti koskettaneen työsulun takia. Suomen sähkönkulutus vuosina 1980–2012 on esitetty sektoreittain kuvassa 1 [12]. Vuonna 2008 kulutus kääntyi laskuun, koska maailmantaloutta vaivanneet ongelmat heijastuivat myös suomalaisten teollisuusyritysten toimintaan. Tilastokeskuksen [12] mukaan vuonna 2012 Suomen sähkönkulutuksesta teollisuuden ja rakentamisen osuus kulutuksesta oli 47 %. Suomen ja kansainvälisen talouden tila vaikuttaa merkittävästi tämän takia erityisesti teollisuuden kautta Suomen sähkönkulutukseen.

Sähkönkulutukseen vaikuttaa myös sää, joten esimerkiksi sähköä lämmittämiseen käytävien kotitalouksien sähkönkulutuksessa voi olla suuria eroja talvikuukausina lämpötilasta johtuen. Myös lämpimät kesäpäivät kasvattavat sähkönkulutusta entistä enemmän jäähdityslaitteiden lisääntymisen myötä. Monissa kaupungeissa on lisääntynyt kaukojäähdytyksen käyttö suurissa liiketiloissa, mikä vähentää jäähditykseen tarvittavaa sähkönkulutusta käyttökohteessa, mutta toisaalta kaukokylmälaitosten sähköntarve lisääntyy. Myös esimerkiksi ympärivuotisesti jäähdityttävien



Kuva 1: Suomen sähkönkulutuksen kehitys sektoreittain vuosina 1980–2012. [12]

tietokonesalien sähkönkulutusta voidaan vähentää kaukojäähdytyksen avulla.

Erityisesti erilaisten talvilämpötilojen takia sähkönkulutus yleensä korjataan lämpötilojen perusteella johonkin normaalivuoteen, jolloin saadaan vertailukelpoisempia kulutuslukemia niin valtakunnan kuin kotitaloudenkin tasolla. Tällöin eri puolilla Suomea sijaitsevien rakennusten sähkönkulutusta voidaan verrata toisiinsa myös eri vuosina. Sähkölämmitteisen rakennuksen vuosienenergia lämpötilakorjattu vuosienenergia voidaan arvioida yhtälöllä

$$AsKul_{Korj} = (1 - osuus) * AsKul_{Alkup} + osuus * AsKul_{Alkup} * \frac{ttluku_{nvvp}}{ttluku_{tvvp}}, \quad (1)$$

jossa $AsKul_{Korj}$ on lämpötilakorjattu vuosienenergia, $AsKul_{Alkup}$ on alkuperäinen toteutunut vuosienenergia, $osuus$ on lämmityksen osuus vuosienenergiasta, $ttluku_{nvvp}$ on normaalivuoden lämmitystarveluku vertailupaikkakunnalla ja $ttluku_{tvvp}$ on tarkasteluvuoden lämmitystarveluku vertailupaikkakunnalla. [13] Lämmitystarveluvut arvioivat vuorokauden sisä- ja ulkolämpötilojen erotuksen avulla, kuinka paljon lämmitysenergiaa tarvitaan rakennuksen lämmitykseen. Lämmitystarvelukuja laskettaessa käytetään vertailtavan sisäilman lämpötilana yleisesti $+17\text{ °C}$, koska mm. auringonsäteily, ihmisten ja sähkölaitteiden lämmöntuoton oletetaan nostavan sisälämpötilaa muutamalla celsiusasteella. Lämmitystarvelukua ei myöskään oteta huomioon sellaisina päivinä, jolloin vuorokauden keskilämpötila on keväällä yli $+10\text{ °C}$ ja syksyllä yli $+12\text{ °C}$. [14] Lämpiminä päivinä on havaittavissa sähkönkulutuksen kasvua, minkä vuoksi jäähdytystarveluvutkin voitaisiin ottaa huomioon.

Sähkönkulutukselle voidaan tehdä myös kalenterikorjaus, koska arkipäivien, aattojen ja pyhäpäivien sähkönkulutus on eri suuruinen ja toisina vuosina esimerkiksi pyhäpäiviä on enemmän. Tällöin kulutus normalisoidaan vuoteen, jossa on keskimääräinen määrä aatto- ja pyhäpäiviä.

Pienemmässä mittakaavassa sähkönkulutuksessa tapahtuvat muutokset kiinnostavat erityisesti jakeluverkkoyhtiöitä, jotka tekevät verkkovastuualueellensa kuormitusennusteita. Alueellisia kuormitusennusteita tehdään esimerkiksi kaupunginosittain ja tällöin sähkönkulutukseen vaikuttavat merkittävästi alueelle suunniteltavat uudet rakennukset. Tämän vuoksi pitkän tähtäimen suunnittelua tehtäessä tarvitaan mm. kuntien rakentamisennusteita. Kuormitusennusteissa on otettava myös huomioon, että joillain alueilla kulutukset voivat myös pienentyä.

Alueella tapahtuvat sähkökäytön muutokset eroavat toisistaan myös siltä osin, kuinka niitä mallinnetaan ja ennustetaan. Rimali on työssään [10] jaotellut tällä hetkellä merkittäviä tekijöitä, jotka voivat vaikuttaa sähkökäyttöä joko lisäävästi tai vähentävästi. Näitä tekijöitä on esitetty taulukossa 1 hieman muutettuna ja uusia tekijöitä lisättynä. Osa taulukossa olevista tekijöistä vaikuttaa sähkökäyttöön laaja-alaisesti vaiheittain lisääntyen, ja osa on suuria pistemäisiä kuormia. Esimerkiksi sähköautot ja lämpöpumput ovat laaja-alaisesti esiintyviä uudenlaisia kuormia, joista ei tehdä ilmoituksia sähköverkkoyhtiöille. Tällaisten kuormien sähkökäytön määriä ja ajankohtia pitää yrittää ennustaa pitkällä aikavälillä yhdistelemällä monia

arvioita ja tietoja. Suuriin pistemäisiin kuormiinkin varautuminen on usein haastavaa, sillä esimerkiksi uuden tietokonesalin sijaintia ei voida ennustaa samalla tavoin kuin esimerkiksi satamaan tulevia kuormia. Tällaisen tietokonesalin sähkönkäyttö tunnetaan tarkasti vasta, kun siitä on tehty päätös ja ilmoitettu jakeluverkkoyhtiölle.

Taulukko 1: Sähkönkäyttöön lisäävästi tai vähentävästi vaikuttavia tekijöitä. [10]

+	±	-
Ilmastointi	Lämmitysmuodon vaihto	Pientuotanto
Sähköautot	Lämpöpumput	Energiansäästövalaistus
Laivojen satamakaapelointi	Poliittiset rajoitukset ja sanktiot	Matalaenergiarakentaminen
Sähköinen joukkoliikenne	Jäähdytys	
Tietokonesalit	Käyttötarkoituksen muutos	

Perinteisesti uuden sähkönkäyttöpaikan luonnin yhteydessä käyttöpaikalle on merkitty asiakashallintajärjestelmään tieto kulutusryhmästä, jonka perusteella voidaan arvioida, millainen vuorokautinen sähkönkulutus asiakkaalla on. Nämä yleisesti Suomessa käytössä olevat kulutusryhmät on määritetty 1980- ja 1990-luvuilla tehdyssä asiakasryhmien luokitteluhankkeessa, johon osallistui yli 40 sähköyhtiötä [15]. Näitä kulutusryhmiä kutsutaan usein myös SLY-kulutusryhmiksi Suomen Sähkölaitosyhdistys ry:n mukaan.

Jokaiselle SLY-kulutusryhmälle on määritetty tunneittainen sähkönkulutuksen tyypikäyrä, jolla mallinnetaan käyttöpaikan sähkönkulutusta. Mallien käyttö perustuu indeksisarjoihin ja käyttöpaikan vuosienenergiaan. Tuntikeskiteho kulutusryhmälle r ajanhetkenä i lasketaan yhtälöllä

$$P_{ri} = \frac{E_r}{8760} \cdot \frac{Q_{ri}}{100} \cdot \frac{q_{ri}}{100}, \quad (2)$$

jossa E_r on käyttöpaikan vuosienenergia, Q_{ri} on ulkoinen indeksi ja q_{ri} on sisäinen indeksi. Ulkoinen indeksi kuvaa vuodenajan ja lämpötilan vaikutusta tuntitehoon ja jokaiselle vuoden 2-viikkojaksolle on oma indeksinsä. Sisäinen indeksi kuvaa päivä-rakennetta ja jokaiselle tunnille arkipäivänä, aattona ja pyhänä on oma indeksinsä. [5] Kun halutaan ottaa huomioon ulkolämpötilan poikkeama keskilämpötilasta, tehdään ulkoiselle indeksille lämpötilakorjaus. Tällöin ulkoinen indeksi määritetään yhtälöllä

$$Q_{ri}(T_i) = Q_{ri,n} + \alpha(T_i - T_{i,n}), \quad (3)$$

jossa $Q_{ri}(T_i)$ on lämpötilakorjattu ulkoinen indeksi, $Q_{ri,n}$ on normaalilämpötilan ulkoinen indeksi, α on kulutusryhmän lämpötilariippuvuuskerroin, T_i on todellinen tai laskennallinen lämpötila ja $T_{i,n}$ on normaalilämpötila. [5] Yksittäinen käyttöpaikka ei välttämättä toteuta kovin tarkasti kulutusryhmänsä mukaista sähkönkäyttöä,

mutta useita saman kulutusryhmän käyttöpaikkoja summatessa niiden sähkönkäytön hajonta vähenee ja ne keskiarvoistuvat muistuttamaan kulutusryhmäänsä.

Verkkoyhtiöt eivät useinkaan saa tietoa, mikäli käyttöpaikkojen sähkönkulutustyyppit ovat muuttuneet, mikä voi aiheuttaa merkittäviä epätarkkuuksia alueellisiin kuormitusennusteisiin. Erityisen suuri muutos yksittäisellä sähkönkäyttöpaikalla on esimerkiksi lämmitysjärjestelmän muutos tai toimitilan käyttötarkoituksen vaihtuminen liikealasta toiseen. Nämä muutokset voivat usein muuttaa merkittävästi käyttöpaikan vuosienergiaa, huipputehoa ja tunneittaista kulutuksen päivärakennetta. Kotitalouksissa muutoksia voi aiheuttaa myös asukkaiden vaihtuminen sekä korjausrakentamisella parantunut rakennuksen energiatehokkuus.

Suomessa kotitalouksien sähkönkäyttöä on tutkittu vuosina 1993, 2006 ja viimeisimpänä 2011. Vuoden 2011 kotitalouksien sähkönkäyttöä tutkivassa raportissa [16] huomattiin merkittäviä muutoksia vuoden 2006 tutkimukseen verrattuna. Tutkimuksessa havaittiin, että kotitalouksien sähkönkäyttö on kasvanut lähes 2 TWh vuosien 2006–2011 välillä ja lisäys on aiheutunut lämmityssähkönkulutuksesta. Laitesähkönkulutus on sen sijaan laskenut vuoden 2006 46 % osuudesta 41 %:iin vuoteen 2011. Energiamäärinä nämä ovat 8 201 GWh ja 7 935 GWh. Tietokoneiden ja lisälaitteiden sähkönkulutus on ajanjaksolla kaksinkertaistunut nopean yleistymisen vuoksi, mutta vastaavasti televisioiden ja lisälaitteiden sekä sisävalaistuksen kulutus on pienentynyt merkittävästi. Uudet televisiot sisäänrakennettuine digiviritimien noudattavat uutta ekosuunnitteluasetusta, jonka mukaan niiden valmiustilan kulutuksen tulee olla alle 1 W. Vuosien 2007 ja 2010 välillä myytiin yli 1,76 miljoonaa LCD-televisiota, joten niiden tuottama energiansäästö on ollut merkittävä. Myös valaistuksessa tapahtunut siirtyminen hehkulamppuista vähemmän sähköä kuluttaviin pienloiste- eli energiansäästölamppuihin näkyy tutkimuksessa valaistuksen sähkönkulutuksen puolittumisena.

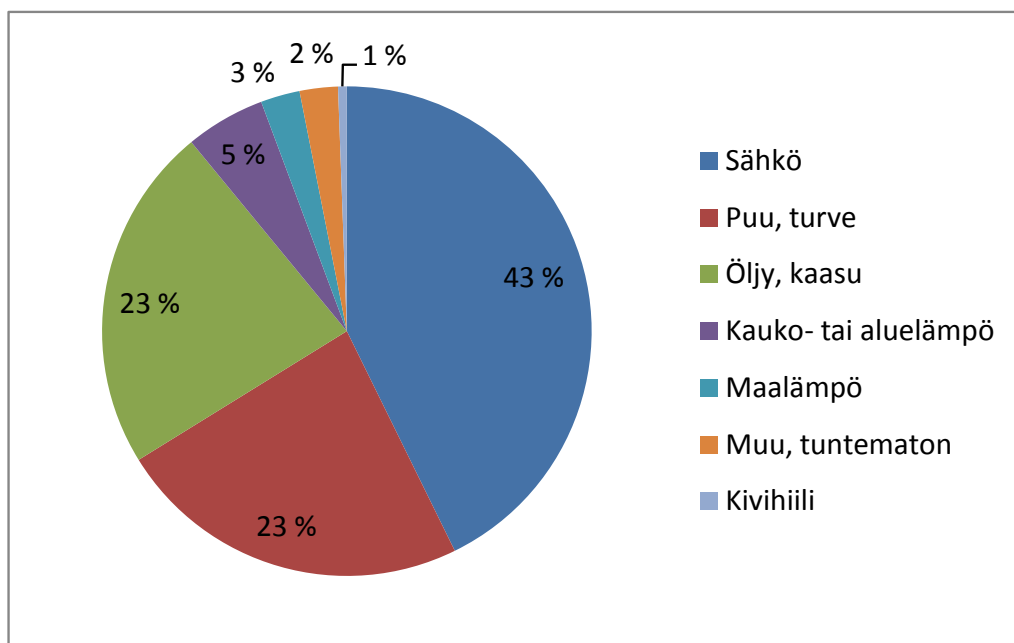
Uusien rakennusten energiamääräykset ovat myös kiristyneet. Uusilta ja uudehkoilta pientaloilta vaaditaan myynti- ja vuokraustilanteissa energiatodistukset, joissa on arvioitu rakennuksen energialuokka. Energialuokka määrätään laskemalla rakennukselle E-luku, johon sisältyy laskennallinen ostoenergian määrä kerrottuna käytetystä energiamuodosta riippuvilla kertoimilla. [17] Tämä voi edistää sitä, että uudet rakennukset rakennetaan kuluttamaan vähemmän energiaa ja suosimaan lämmitysenergiälähteitä, joilla saa paremman luokituksen. Tämä voi näkyä esimerkiksi maalämpölämmityksen lisääntymisenä pientaloissa.

Tulevaisuudessa myös hajautettuun pientuotantoon ja sähköautoihin liittyvät sähkönkulutuksen muutokset voivat vaikuttaa kuormitusennusteisiin, mikäli niiden määristä ja vaikutuksista kulutukseen ei tiedetä tarpeeksi. Tällä hetkellä tosin suurimpia yksittäisiä muutoksia kotitalouksilla ovat lämmitysjärjestelmissä tapahtuvat muutokset, jotka ovat 2000-luvulla usein johtuneet lämpöpumppujen asennuksista kotitalouksiin.

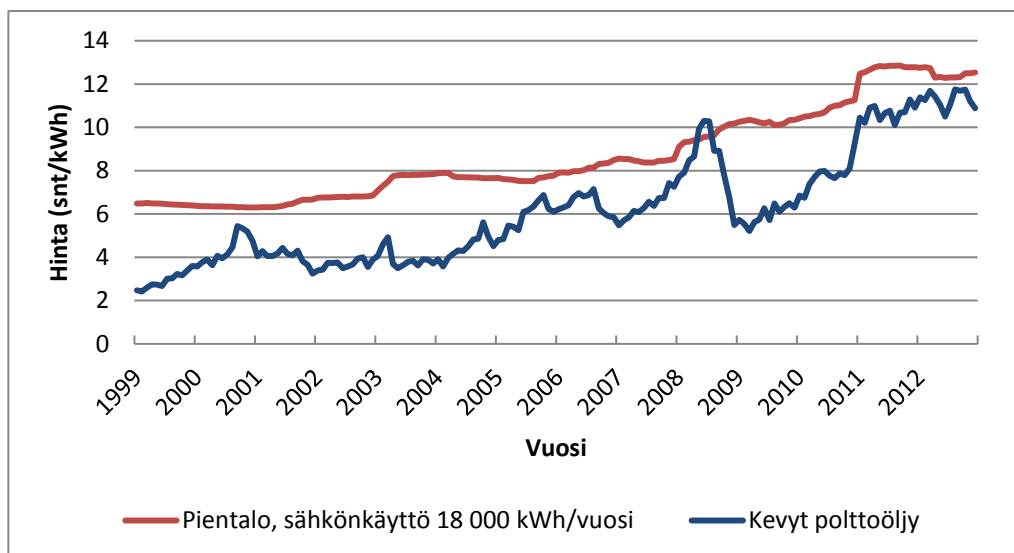
4.2 Muutokset lämmitysjärjestelmissä

Lämmitysenergiajärjestelmän hankinta ja lämmitysenergia ovat suuria kulueriä suomalaisten asumiskustannuksissa, joten niiden valintaan kiinnitetään paljon huomiota rakennusta rakennettaessa sekä siinä jo asuttaessa. Erityisesti pientalojen asukkailla on mahdollisuus valita useista lämmitysenergianlähteistä. Yleisimmät erillisten pientalojen lämmitysenergianlähteet ovat sähkö, puu, öljy ja kaukolämpö. Tilastokeskuksen mukaan vuonna 2012 Suomessa oli 1 122 315 erillistä pientaloa ja lämmitysjärjestelmien jakaantuminen niille on esitetty kuvassa 2 [18]. Lämmönjako on rakennuksissa usein toteutettu vesikiertoisena lattia- tai patterilämmityksenä, mutta sähkölämmitys voidaan toteuttaa myös huonekohtaisena sähköpattereina tai vastuskaapeilla lattialämmityksenä. Huonekohtaisen sähkölämmityksen etuna on pienet asennuskustannukset, joten ne sopivat vähän lämmitysenergiaa tarvitseviin kohteisiin. Jos lämmitysjärjestelmää halutaan vaihtaa, niin tällöin vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä on kohtuullisella vaivalla vaihdettavissa, koska vain lämmitysyksikkö täytyy uusia.

Lämmitysjärjestelmää valittaessa kuluttajat voivat arvostaa esimerkiksi edullisuutta, vaivattomuutta sekä ympäristöystävällisyyttä. Öljylämmitys on edelleen yleinen pientalojen päälämmitysmuoto, mutta nykyisin niitä ei enää juuri uusiin rakennuksiin asenneta. Syynä on erityisesti kevyen polttoöljyn hinnan nousu sekä ympäristönäköt. Sähkölämmitys on yleisin erillisten pientalojen lämmitysmuoto, mutta sähköhinnan nousu on myös kasvattanut sähkölämmityksen käyttökuluja. Kuvassa 3 on esitetty sähkön ja kevyen polttoöljyn verollisen kokonaisnimellishinnan kehi-



Kuva 2: Lämmitysjärjestelmien osuudet erillisissä pientaloissa Suomessa vuonna 2012. [18]

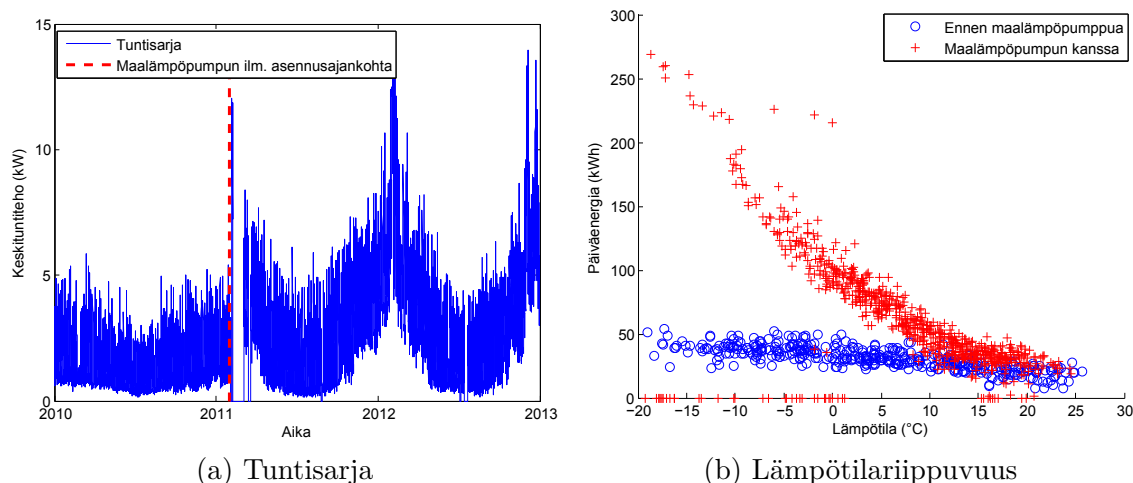


Kuva 3: Sähkön ja kevyen polttoöljyn nimellishinta kuukausittain vuosina 1990–2012. [19]

tys viime vuosina. Vertailun vuoksi elinkustannusindeksi on noussut 24,1 % vuodesta 2000 vuoteen 2012, joten näiden energioiden hintojen nousu on ollut viime vuosina tätä nopeampaa. Kevyen polttoöljyn hinta on laskettu vuoden 2008 joulukuuhun asti kertoimella 11,78 MWh/t ja tämän jälkeen 11,86 MWh/t. Tiheytenä on käytetty arvoa 0,845 kg/dm³. [19] Öljylämmityksessä tulee ottaa myös huomioon, että lämpökattilasta saatava hyötysuhde on heikompi kuin suoran sähkölämmityksen ja kaukolämmön. Energian hintojen nouseminen polttoaineiden kallistumisen ja verotuksen kiristymisen takia tulee todennäköisesti jatkumaan, joten energiaa säästävät menetelmät tulevat varmasti yleistymään.

Lämpöpumput ovat viime vuosina yleistyneet nopeasti pientalojen lisä- ja päälämmitysmuotoina, koska niillä voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä lämmityksen käyttökuluissa. Kotitalouksien sähkönkäyttö 2011 -raportin [16] mukaan noin 40 % huonekohtaisista sähkölämmitteisistä omakotitalouksista käytti lisälämmityslähteenä ilmalämpöpumppua. Myös vesikeskuslämmitteisissä omakotitaloissa tulisijat ja ilmalämpöpumput ovat yleisiä. Raportissa todetaankin, että yhdistelmälämmitys on omakotitaloissa yleisin lämmitysmuoto. Koreneff [20] toteaa, että mikäli ilmalämpöpumpullista sähkölämmitysasiakasta käsitellään vain vuosienenergialtaan pienempänä sähkölämmitteisenä asiakkaana, niin ennusteet eivät mene oikein. Kylmimpien lämpötilojen aikana ilmalämpöpumpun hyöty häviää, joten huipputehoennuste jää liian pieneksi. Kesäkulutus ennustetaan myös liian pieneksi, koska ilmalämpöpumppu ei vähennä sähkönkulutusta kesäisin, vaan saattaa jopa kasvattaa sitä, mikäli sitä käytetään jäähdytykseen.

Lämmitysjärjestelmän muutos vaikuttaa rakennuksen sähkönkäyttöön, mikäli se käyttää hyödykseen sähköenergiaa. Kuvissa 4a ja 4b on esitetty yhden maalämpölämmitykseen siirtyneen käyttöpaikan tuntisarja vuosina 2010–2013 sekä päiväe-



Kuva 4: Esimerkki erään sähkökäyttöpaikan sähkönkulutuksen tuntisarjasta ja päiväenergian lämpötilariippuvuuden muutoksesta lämpöporakaivon ilmoitetun porausajankohdan jälkeen.

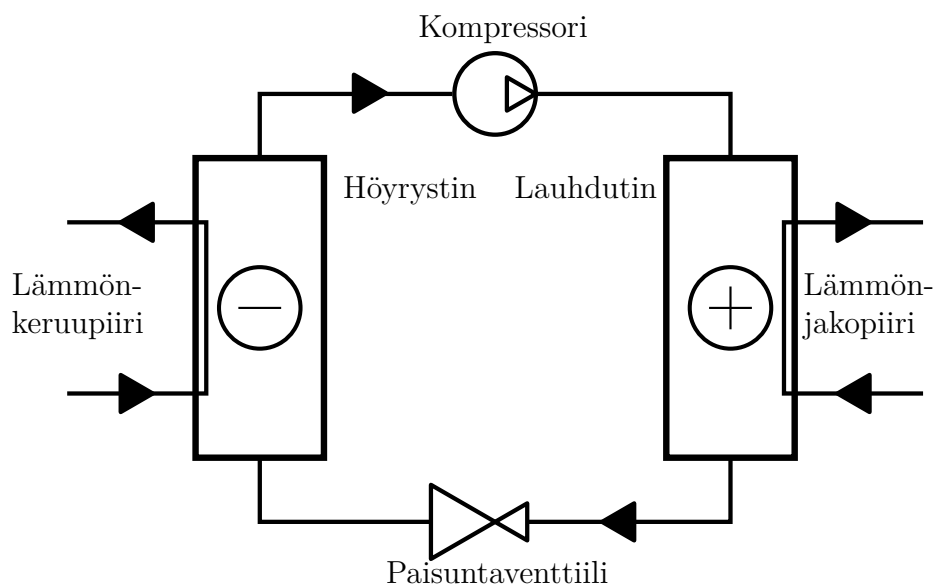
nergioiden lämpötilariippuvuus ennen ja jälkeen muutosajankohdan. Kuvasta 4a voidaan havaita muutosajankohdan jälkeisen tuntisarjan huipputehon kasvu talvikuu-kausina. Kuvasta 4b nähdään erityisen selvästi, kuinka päivän keskiarvolämpötilan aleneminen kasvattaa maalämpölämmitystä käyttävän kotitalouden sähkönkulutusta sähkölämmittäjän kaltaisesti. Ennen maalämpöön siirtymistä sähköenergiankulutus ei ole tällä käyttöpaikalla juurikaan riippunut lämpötilasta.

Lämmitysratkaisuissa kuitenkin pienet energiahinnat toisaalta myös usein merkitsevät suurempaa alkuinvestointia. Jos rakennuksen lämmitysenergiatarve on suuri, niin tällöin säästö energiakustannuksissa voi kattaa alkuinvestoinnin ja olla kannattava vaihtoehto. Tällaisia laskelmia pientaloasukkaat joutuvat pohtimaan lämmitysjärjestelmän hankinnan yhteydessä. Investointiajat ovat usein myös pitkiä, joten esimerkiksi energian hintojen kehitystä on haastavaa arvioida.

4.3 Maalämpöpumput

Lämpöpumppujen määrä on lisääntynyt osana rakennusten lämmitysjärjestelmiä ja erityisesti lisälämmitysjärjestelmäksi hankittujen ilmalämpöpumppujen määrä on kasvanut nopeasti 2000-luvun alusta lähtien. Pääasiallisena lämmitysjärjestelmänä sen sijaan maalämpöpumput ovat kasvattaneet suosiotaan pientaloissa. Vuonna 2011 rakennetuista uusista pientaloista maalämpöpumppujen osuus lämmitysjärjestelmistä oli yli 40 % [21].

Lämpöpumput ovat laitteita, jotka siirtävät lämpöenergiaa kompressorin avulla eri lämpöisten tilojen välillä. Lämpöpumpun toimintaperiaate on melko yksinkertainen ja sen rakenne on esitetty kuvassa 5. Lämpöpiirissä kiertävä kylmäaine sitoo energiaa ympäristöstään ja höyrystyy höyrystimessä. Höyry kulkee sähköllä toimivan



Kuva 5: Lämpöpumpun rakennekaavio. [21]

kompressorin läpi, jolloin sen paine kasvaa ja lämpötila nousee lisää. Lämmin höyry tiivistyy tämän jälkeen lauhduttimessa luovuttaen energiaa ympäristöön. Nestesäiliön tiivistyneen kylmäaineen paine pienenee ja lämpötila laskee, kun se kulkee paisuntaventtiilin läpi höyrystimelle uudelle kierrokselle. [21]

Maalämpöjärjestelmässä höyrystimellä ja lauhduttimella on lämmönvaihtopiirit, joissa lämpöenergia siirtyy toisiin lämpöpiireihin. Maalämpöjärjestelmässä höyrystimeen tuodaan lämpöenergiaa lämmönkeruupiiristä, jossa pumpun kierrättämän jäätyttömän nesteen lämpötila nousee muutaman asteen maahan kaivetuissa putkissa. Maalämpöjärjestelmissä lämmönkeruupiiri voidaan toteuttaa kolmella eri tavalla: porakaivolla, pintamaaputkistolla ja vesistön avulla. Yleisin tekniikka on porata pihamaalle porakaivo, jonka maksimisyvyys on 200–250 m. Porakaivot ovat käytännöllisiä pienillä tonteilla ja saneerauskohteissa niiden tarvitseman vähäisen tilan vuoksi. Pintamaaputkistolla toteutetussa lämmönkeruupiirissä putket on asennettu 1 m syvyyteen vaakatasoon, jolloin putkea tarvitaan 1–2 m rakennuskuutiota kohden. Keruupiiri voidaan asentaa myös vesistöön. Tällöin on huolehdittava erityisesti siitä, että keruupiirin putket eivät jäädy. [21]

Lauhduksen lämmönvaihtopiirissä lämpö siirtyy lämpimään käyttöveden sekä lämmönjakopiiriin, joka on toteutettu vesikiertoisella lattialämmityksellä tai lämmityspattereilla. Lämmityspatteriverkostossa vesi joudutaan lämmittämään huomattavasti lattialämmitysjärjestelmää lämpimämmäksi. Normaalisti lämmityspattereissa kiertävä vesi on noin 40–50 °C, kun taas lattialämmityksessä riittää 30 °C. Maalämpöpumpuissa lämpimän käyttöveden ja lämmönjakopiirin veden lämmitys on voitu tehdä kiinteä- tai vaihtuvalauhdutteisena. Vaihtuvalauhdutteisissa maalämpöpumpuissa lämmitetään kerrallaan vain joko käyttövesivarajaa tai lämmönjakopiirin vettä. Tällöin lämmönjakopiirin vettä lämmitettäessä lauhduksen lämpötila voi olla alhaisempi, jolloin maalämpöpumpun hyötysuhde paranee. [21]

Lämpöpumppujen kykyä tuottaa lämpöä sähkön avulla mitataan lämpökerroinavulla (COP, Coefficient of Performance). Se on tuotetun lämpöenergian ja sen tuottamiseksi kulutetun sähköenergian suhdeluku. Maalämpöpumppulämmitysjärjestelmässä sähköä kuluttavat kompressorin lisäksi maapiirin sekä lämmönjakopiirin kiertovesipumput. Maalämpöpumpun lämpökerroin on vuoden aikana keskimäärin 2,5–3,5, joten se kuluttaa huomattavasti vähemmän sähköenergiaa lämmitykseen kuin vastaavalle lämpöteholle mitoitettu sähkölämmitysjärjestelmä [22]. Maalämpöpumput voidaan mitoittaa rakennuksen lämmitystä varten osa- tai täystehoisiksi. Osatehoinen maalämpöpumppu pystyy kattamaan kovimpina pakkaspäivinä noin 60–85 % lämmitystehosta, ja loput tuotetaan sähkövastuksilla. Tällöin kylminä päivinä maalämpöpumpun lämpökerroin heikkenee voimakkaasti. Vuositasolla maalämmöllä tuotettu lämpöenergia on kuitenkin hyvin suuri, joten osatehoinen ratkaisu voi olla kannattava Suomessa alueilla, joissa lämpötila ei ole usein todella alhainen. Täystehomitoitettu maalämpöpumppu sen sijaan pystyy tuottamaan lämpöä kovillakin pakkasilla, mutta sen hankintahinta on korkeampi. [23] Osatehoinen maalämpöpumppujärjestelmän hyvänä puolena voi olla myös, että käynnissä ollessaan se käy pidempiä jaksoja kerrallaan. Tällöin vältetään maalämpöjärjestelmää rasittavia tiheitä käynnistyskertoja, jotka myös heikentävät lämpökerrointa [24].

Helsingissä maalämpökaivon poraamiseen on tarvittu 1.5.2011 lähtien rakennusvalvontaviranomaiselta toimenpidelupa. Tällä menettelyllä pyritään estämään porakaivojen poraukset paikoissa, joissa niille on esteitä. Tällaisia esteitä ovat mm. pohjavesialue, maanalainen rakennelma sekä liian lähellä sijaitseva toinen lämpö- tai porakaivo. [25]

Maalämpöpumput voivat olla heikoille sähköverkoille ongelmallisia, koska niiden otama suuri käynnistysvirta voi aiheuttaa jännitteen alenemisia, mikä ilmenee välkyntänä. Maalämpöpumput voivat ajoittain käynnistyä tiheästikin, jolloin välkyntä voi olla häiritsevää. Verkon vahvistaminen voi tulla verkkoyhtiön kannalta tarpeeseen, mikäli öljylämmitysvaltaisella alueella siirrytään suurissa määrin maalämpölämmitykseen. Tällöin erityisesti osatehomoitettujen maalämpöpumppujen kovilla pakkasilla käyttämä huipputeho voi olla myös ongelmallinen. Välkyntäongelmaan ratkaisu on käyttää virranrajoitukseen invertteriä. [26]

4.4 Pientuotanto

Tulevaisuudessa uusiutuvia sähköntuotantomuotoja tullaan todennäköisesti käyttämään enemmän kotitalouksissa myös Suomessa. Pientuulivoimalat sekä aurinkopaneelit ovat todennäköisimmin yleistyvät hajautetut sähköntuotantomuodot. Aurinkopaneelien hinnat ovat viime vuosina laskeneet, mikä kasvattanee niiden lukumäärää niiden hankinnan tullessa kannattavammaksi.

Pientuotanto tekee asiakkaan sähköverkosta tarvitseman tehon ja energian ennustamisesta vaikeampaa. Aurinko- ja tuulivoimaloiden tuottaman tehon ennustaminen on haastavaa, koska niiden tehotuotantoon ei voida vaikuttaa. Aurinkopaneelien

tuottama teho muuttuu todella nopeasti pilvisyyden vaihdellessa samoin kuin tuulivoimaloiden teho tuulisuuden mukaan. Aurinkopaneelien tuottamaa keskimääräistä energiaa on kuitenkin helpompi arvioida kuin tuulivoiman, sillä auringonsäteiden tulokulma aurinkopaneelille voidaan määrittää matemaattisesti. Tällöin saadaan arvoitua teoreettiset suurimmat mahdolliset tehotuotantomäärät tietyille määrille aurinkopaneeleita.

Aurinkopaneelin vastaanottamaa auringonsäteilyenergiaa vähentävää pilvisyyttä voidaan kuvata malleissa pilvisyysindeksin lisäksi mm. auringonpaistetuntiarvoilla. Auringonpaistetunti on suhteellinen osuus siitä ajasta, jonka aurinko on paistanut havaintopisteelle yhden tunnin aikana. Auringonpaistetunti kuvaa havaintopisteen vastaanottaman suoran auringonsäteilyn ajallisen määrän osuutta havaintotunnista. Suoraa auringonsäteilyä saadaan, kun havaintopisteen ja auringon välillä ei ole mitään estettä, kuten pilviä tai rakennuksia. Eri kuukausille saadaan laskettua esimerkiksi päiväsaajan auringonpaistetuntien keskiarvot ja eri arvojen todennäköisyydet. Hellman ym. ovat työssään määrittäneet Helsingin alueen auringonpaistetuntien kuukausittaisia jakaumia ja todenneet, että lähes jokaisen kuukauden vuorokauden valoisan ajan tunteina auringonpaistetuntien arvo on vähintään 50 % todennäköisyydellä joko 0 % tai 100 %. Muut auringonpaistetuntien arvot ovat jakautuneet tasaisesti välille 1–99 %. [27] Tämä merkitsee sitä, että on todennäköisintä, että päiväsaikaan aurinko paistaa esteettömästi tai on pilvien takana koko tunnin. Aurinkopaneelit kuitenkin tuottavat jonkin verran sähköä myös pilvisellä säällä, koska pilvien läpi maan pinnalle pääsee hajasäteilyä.

Aurinkosähköjärjestelmien lisääntyminen näkyisi käyttöpaikoilla erityisesti kesäisin verkosta otetun sähkön vähenemisenä. Tuntimittaustietoja tarkastelemalla voitaisiin havaita, että aurinkoisina päivinä keskipäivän tuntien energiankulutus pienenesi. Suomessa aurinkoenergian heikkous on, että suurimman aurinkosähkötuotannon ajankohta ei ole samaan aikaan talven suuren sähkönkulutuksen kanssa.

Paavola [28] arvioi tutkimuksessaan aurinkosähkön pientuotannon tehon ja energian potentiaalista osuutta Tampereen huipputehoon ja kokonaisenergiaan, mikäli aurinkosähkön pientuotanto yleistyisi laajamittaisesti. Tampereen kiinteistömäärien ja rakennustyyppien mukaan alueen aurinkosähkön maksimaaliseksi kokonaisnimellistehoksi arvioitiin noin 264 MW, kun vältettiin ylivoimattamasta aurinkopaneeleita. Vaikka koko tämä aurinkosähköpotentiaali saataisiin käyttöön, vastaisi sen tuottama huipputeho noin 90 % osuutta Tampereen sähkönsiirron hetkittäisestä huipputehosta kesäisin keskipäivällä auringonsäteilyn ollessa voimakkainta. Verrattaessa Tampereen sähkönsiirron keskitehoon voitaisiin 50 % potentiaalilla keskipäivän verkon keskitehosta tuottaa noin 50 % huhtikuun ja elokuun välillä. Tampereen kokonaiskulutuksesta voitaisiin täydellä potentiaalilla tuottaa aurinkosähköllä 12 %.

4.5 Sähköautot

Verkosta ladattavat sähköautot ovat uudenlainen kuormitustyyppi sähköverkolle. Mikäli niiden määrä lisääntyy merkittävästi tulevaisuudessa, niiden verkkovaikutukset tulevat olemaan suuret. Suuren sähköenergiamäärän lisäksi sähköautojen lataamiselle olisi todennäköisesti tyypillistä hyvin samoihin kellonaikoihin kohdistuva suuri tehontarve eri paikoissa. Oletettavasti lataus tapahtuisi kodeissa illalla työpäivän jälkeen ja työpaikoilla aamuisin töihin saavuttua. Haasteensa tähän tuo se, että näihin aikoihin tehontarve verkossa on muutenkin huipussaan. [29]

Sähköautojen lataamisen ohjausta on tutkittu paljon, jotta voitaisiin hallitusti jakaa lataamisesta aiheutuvaa kuormitusta. Ohjaamalla sähköautojen latausta voitaisiin latauskuormaa siirtää porrastetusti esimerkiksi pienemmän kulutuksen tai halvemmän sähköenergian tunneille. Helsingin Energian tekemän perusskenaarion mukaan Helsingin alueella voisi vuonna 2030 olla noin 70 000 sähköautoa. Tällaisen määrän lataaminen voisi vastata Helsingin kokonaissähkökulutuksesta noin viittä prosenttia ja yöaikaista latausta hyödyntämällä kuorma pystyttäisiin hallitsemaan. [10]

Norjassa verkosta ladattavien sähköautojen määrä väkilukuun nähden on maailman suurin. Norjassa oli myyty yli 10 000 sähköautoa ja lataushybriditä vuoden 2012 loppuun mennessä ja tavoitteeksi on asetettu 200 000 autoa vuoteen 2020 mennessä. Seljeseth ym. [30] ovat tutkineet Norjassa sähköautojen latauksen verkostovaikutuksia ja huomanneet, että eri automerkeillä on erilaiset latausvirtojen profiilit. Kaikkien latausjärjestelmien ottama virta ei ole tasaista vaan saattaa heilahdella hyvinkin tiheään. Tutkimuksessa todetaan, että sähköautojen lataus saattaa tuottaa ongelmia heikoissa verkoissa, mutta vahvoissa verkoissa ei normaalin eikä nopean latauksen pitäisi tuottaa ongelmia.

5 Sähkönkulutustietojen käyttö muutosten tunnistamisessa

5.1 Lineaarinen regressiomalli päiväenergioille

Lineaarinen regressioanalyysi on yleisesti käytetty ja yksinkertainen menetelmä mallintaa selitettävää muuttujaa, kun siihen vaikuttavia selittäviä tekijöitä tunnetaan. Lineaarinen regressiomalli voidaan esittää muodossa

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_{t,1} + \beta_2 x_{t,2} + \cdots + \beta_j x_{t,j} + \cdots + \epsilon_t, \quad (4)$$

jossa $t = 1, 2, \dots, N$, y_t on selitettävä muuttuja havaintohetkellä t , β_0 on vakioselittäjän regressiokerroin, $x_{t,j}$ on selittävän muuttujan j arvo havaintohetkellä t , β_j on selittävän muuttujan j regressiokerroin ja ϵ_t on havaintohetken t jäännöstermi. Usein lineaarisen regressioyhtälön β_j -kertoimet määritetään pienimmän neliösumman menetelmällä eli minimoimalla jäännöstermien neliöiden summa. [31]

Mm. Koivisto ym. [9] on todennut, että sähkönkulutuksen päiväenergia voidaan mallintaa monille lämmitystavoille käyttämällä lineaarista monimuuttujaregressiomallia. Selittävinä tekijöinä käytetään vuorokauden keskilämpötilan kahden päivän liikkuvaa keskiarvoa, päivän pituutta sekä dummy-muuttujia erikoispäiville, kuten aatto- ja pyhäpäiville. Dummy-muuttuja on regressioanalyysissä käytetty muuttujatyyppejä, joka voi saada vain kaksi arvoa, 0 tai 1, jolloin muuttuja joko on tai ei ole aktiivinen tietyllä havaintohetkellä t . Sähkölämmitteisten käyttöpaikkojen päiväenergia ei tosin ole täysin lineaarinen lämpötilan suhteen, koska päivän keskilämpötilan noustessa sisäilman erillinen lämmittämisen tarve lakkaa. Koiviston mallissa tämä on otettu huomioon tekemällä lämpötilan vaikutus paloittain lineaarisena, jolloin regressiomalli pysyy kuitenkin edelleen lineaarisena, vaikka lämpötilan vaikutus muuttuukin jonkin rajalämpötilan kohdalla. Rajalämpötilaksi Koivisto ym. valitsivat 12 °C.

Koiviston ym. käyttämä lineaarinen regressiomalli päiväenergioille voidaan esittää muodossa

$$y = \beta_0 + X_{Temp}\beta_{Temp} + X_{dLen}\beta_{dLen} + X_{dType}\beta_{dType} + \epsilon. \quad (5)$$

Matriisi X_{Temp} koostuu kahdesta sarakkeesta, joista ensimmäisessä on päivän keskilämpötila. Toisessa sarakkeessa on päivän keskilämpötilan ja rajalämpötilan erotus ainoastaan silloin, kun keskilämpötila on korkeampi kuin rajalämpötila. Päivän pituuden ollessa yli 14 tuntia, voidaan myös ajatella, että valaistuksen käyttämä sähkönkulutus ei enää merkittävästi lisäänty kotitalouksissa. Päivän pituuden paloittain lineaarinen vaikutus on myös mallinnettu samalla menetelmällä kuin lämpötila ja niiden arvot ovat matriisissa X_{dLen} . Koiviston ym. tutkimuksessa päivän pituuden nähtiin olevan muissa kuin sähkölämmitteisissä rakennuksissa merkittävämpi sähkönenergiankulutukseen vaikuttava tekijä kuin lämpötila. Tämä selittyy esimerkiksi siten, että pimeämmän vuodenaajan aikana ihmiset oleskelevat enemmän sisätiloissa

ja käyttävät enemmän valaistusta. Aatto- ja pyhäpäivät ovat sähkökäytöltään ja siten myös päiväenergioiltaan usein erilaisia arkipäiviin verrattuna. Tämän takia ne on mallinnettu käyttämällä matriisissa X_{dType} dummy-muuttujia, jotka nostavat tai laskevat aatto- ja pyhäpäivien energiankulutuksen tasoa verrattuna arkipäivään. Aattopäiviksi on lauantai-päivien lisäksi merkitty juhannus- ja jouluaatto. Pyhäpäiviksi on merkitty sunnuntai-päivien lisäksi uudenvuodenpäivä, loppiaainen, pitkäperjantai, toinen pääsiäispäivä, vappupäivä, helatorstai, juhannusaatto, juhannuspäivä, itsenäisyyspäivä, joulupäivä ja tapaninpäivä. Lisäksi omat dummy-muuttujat on tehty sähkökäytöltään huomattavan poikkeaville erikoispäiville, kuten juhannukselle, joululle ja kesälomakaudelle.

Päivän pituus on laskettu yhtälöllä

$$dLen = 24 - \frac{24}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{\sin(\frac{p\pi}{180}) + \sin(\frac{L\pi}{180}) \sin \phi}{\cos(\frac{L\pi}{180}) \cos \phi} \right), \quad (6)$$

jossa

$$\phi = \sin^{-1}(0,39795 \cos \theta), \quad (7)$$

ja jossa

$$\theta = 0,2163108 + 2 \tan^{-1}(0,9671396 \tan(0,00860 * (J - 186))). \quad (8)$$

Edellä olevissa yhtälöissä J on päivän järjestysnumero vuoden alusta alkaen, L on havaintopaikan leveyspiiri asteina ja p määrittelee auringon korkeuden perusteella päivän alun ja lopun asteina. Muuttujan p arvona on tässä käytetty lukua 0. [32]

Regressiomallein voidaan mallintaa myös esimerkiksi vuosi-, kuukausi- tai jopa tuntienergioita. Tällöin tosin tulee arvioida uudelleen käytettävät selittävät muuttujat. Vuosi- ja kuukausienergioita mallinnettaessa lämpötilan ja päivän pituuden sijaan esimerkiksi lämmitystarveluvut voivat olla parempia selittäviä tekijöitä. Tuntienergiomalleissa muuttujien määrä sen sijaan voi kasvaa merkittävästi, sillä jokainen vuorokauden tunti on erilainen.

5.2 Regressiokertoimien vakioisuus

Useimpien säännönmukaisesti käyttäytyvien kotitalouksien päiväenergioita voidaan ennustaa luvun 5.1 lineaarisella regressiomallilla, kun saatavilla on tarpeeksi pitkältä ajalta käyttöpaikan tuntisarjatiedoista muodostettuja päiväenergioita. Käyttöpaikan kulutusryhmästä riippuen osa mallin regressiokertoimista voi olla vähemmän merkityksellisiä tai jopa kokonaan merkityksettömiä, jolloin ne voidaan myös jättää mallin ulkopuolelle. Päiväenergiat, jotka ovat 0 kWh ja tulkittu virheellisiksi mittauksiksi, kannattaa poistaa analyysistä, koska ne vääristävät mallin regressiokertoimia. Kesälomista johtuvien tavanomaista pienempien kesäpäivien päiväenergioiden kohdalla voidaan harkita esimerkiksi dummy-muuttujien käyttämistä tai poistamista mallista. Tällainen regressiomalli tuottaa eri selittäville tekijöille kertoimet, joista erityisesti sähkölämmitteisellä kotitaloudella lämpötilan kerroin on

merkitsevin ja vaikuttaa eniten sähkönkulutukseen. Jos sähkönkulutuksen päiväenergioissa tapahtuu muutoksia käyttöpaikassa tapahtuvien muutosten takia, niin tällöin muutoksen voi havaita seuraamalla tämän regressiomallin kertoimia. Päivän sisällä tapahtuvia tunneittaisen päivärakenteen muutoksia tämä menetelmä ei pysty havaitsemaan. Tunneittaisen päivärakenteen muutosten havainnointi on myös tärkeää, mutta se tulee tehdä muilla menetelmillä.

Hyvän regressiomallin tulisi säilyttää samat muuttujien riippuvuudet koko aineiston osalta. Mikäli selittävien tekijöiden vaikutus selitettävään muuttujaan muuttuu jossain kohdassa, tulisi aineistosta muodostettu regressiomalli jakaa kahteen erilliseen malliin. Tällaisia rakennemuutoksia on tutkittu esimerkiksi taloustieteessä ekonometrian osa-alueella. Aikasarjoista on tutkittu, ovatko riippuvuussuhteet muuttuneet jonakin ajanhetkenä esimerkiksi jonkin poliittisen päätöksen tai talouskriisin takia. Testejä rakenteellisille muutoksille on tehty tilanteisiin, joissa muutoksen ajankohtaa ei ole tiedetty sekä muutosajankohdan arvioimiseksi [33].

Rakenteellisia muutoksia arvioitaessa kiinnitetään huomiota regressiokertoimien pysymiseen vakioina koko aineiston osalta. Eräs tällainen tilastollinen testi on esimerkiksi ns. Chow-testi, joka perustuu F-testiin [34]. Tässä testissä estimoidaan N -kokoisesta havaintomäärästä kolmelle eri havaintojoukolle saman regressiomallin regressiokertoimet. Ensimmäisen regressiomallin havaintomäärä on N_1 , toisen N_2 ja kolmannen $N = N_1 + N_2$. Jokaisella mallilla on mallin mukaisesti k selittävää muuttujaa. Regressiota, jossa on käytetty kaikkia havaintoja, sanotaan rajoitetuksi regressioksi ja havaintojen osajoukosta muodostettua regressiota rajoittamattomaksi regressioksi. Jokaiselle regressiomallille määritetään jäännöstermien neliöiden summa, joita merkitään tässä muuttujilla S , S_1 ja S_2 . Chow-testi vertaa rajoitetun regression jäännöstermien neliöiden summan suuruutta kahden rajoittamattoman regression jäännöstermien neliöiden summien summaan ja arvioi tämän perusteella, mikäli regressioparametrit ovat merkittävästi erilaiset. Tätä arvioidaan testaamalla nollahypoteesia $H_0 : \beta_1 = \beta_2$ F-jakaumaa noudattavalla testimuuttujalla

$$\frac{(S - (S_1 + S_2))(N - 2k)}{(S_1 + S_2)k} \sim F(k, N - 2k), \quad (9)$$

jolloin saman vapausasteisen F-jakauman haluttua merkitsevyystasoa suuremmat arvot johtavat nollahypoteesin hylkäämiseen. Testi olettaa, että molempien otosten varianssit ovat samat. Tämä Chow-testi vaatii arvauksen muutoshetkestä, mikä tosin ei ole toivottavaa tilanteessa, jossa ei tiedetä muutoksen ajankohdasta. [35, s. 180–181]

Äkillisiä rakenteellisia muutoksia aikasarjassa voidaan yrittää myös havainnoida käyttämällä Chow-testistä johdettua erikoistapausta, jolla voidaan testata uusien havaintojen sopivuutta malliin. Tällöin malliin voidaan lisätä aina esimerkiksi yksi uusi havainto kerrallaan ja arvioida, muuttaako uusi arvo regressioparametreja merkittävästi. Tämä menetelmä on käyttökelpoinen esimerkiksi tilanteissa, joissa tutkittava muutoskohta on lähellä aikasarjan alkua tai loppua, jolloin kahta tarpeeksi suuren havaintokoon regressiomallia ei pystytä muodostamaan edellä esitettyä

Chow-testiä varten. Tämän ns. ennustavan Chow-testin F-jakaumaa noudattavan testimuuttujan arvo lasketaan yhtälöllä

$$\frac{(S - S_1)(N_1 - k)}{S_1 N_2} \sim F(N_2, N_1 - k), \quad (10)$$

jossa S on rajoitetun regression jäännöstermien neliöiden summa ja S_1 suuremman rajoittamattoman havaintokoon regression jäännöstermien neliöiden summa. N_2 on pienemmän rajoittamattoman havaintokoon regression havaintomäärä. Pienemmän rajoittamattoman regressiomallin jäännöstermien neliöiden summaa ei tarvita tässä yhtälössä. Muutoksen merkitsevyys testataan F-jakaumasta kuten Chow-testissäkin, mutta vapausasteet poikkeavat toisistaan. [35, s. 182–184] Tätä ennustavaa Chow-testiä voidaan yrittää soveltaa esimerkiksi sähkönkulutuksen muutosten seurantaan, kun sähkönkulutukselle muodostettuun malliin lisätään aina esimerkiksi uudet päivä-, kuukausi- tai vuosienenergiat mallista riippuen.

Aikasarjassa voi olla myös useampia rakenteellisen muutoksen ajankohtia. Bai ja Perron ovat tehneet tällaisten tapausten eteen tutkimusta. Heidän menetelmänsä etsii ensin yhtä muutoskohtaa, ja mikäli sellainen löytyy, etsitään näistä osajoukoista uudelleen muutoskohtia. Tätä jatketaan, kunnes osajoukoista ei löydetä enää uusia muutoskohtia. [33]

Regressiokertoimien muutosta voidaan seurata myös liikkuvan aikaikkunan avulla. Regressiomalliin otetaan kerrallaan esimerkiksi yhden vuoden päiväenergiat, joiden avulla määritetään selittävien tekijöiden regressiokertoimet. Tämän jälkeen siirretään aikaikkunaa yksi kuukausi eteenpäin, jolloin aikaisemman regression ensimmäinen kuukausi jää analyysistä pois ja uusi kuukausi tulee tilalle. Tätä regressioanalyysiä toistetaan ja mikäli päiväenergioissa tapahtuu suurempi muutos, niin muutoskohdan jälkeen todennäköisimmin erityisesti lämpötilan sekä vakiotermin regressiokertoimet muuttuvat. Aikaikkunan tulisi olla vähintäänkin vuoden pituinen, jotta jokainen vuodenaika olisi mallissa edustettuna ja näin välttyttäisiin regressiokertoimien, erityisesti vakiotermin, vuodenaikaisesta tason heilahtelusta. Muutoskohdan jälkeen tulee vielä odottaa uusia havaintoja, koska mallin kertoimet voivat olla sekavia niin kauan kuin malliin on sisällytetty useampaa kulutusryhmää. Menetelmää käytettäessä tulisi myös arvioida, minkä suuruiset kertoimien suhteelliset tai absoluuttiset muutokset ovat merkitseviä.

Mallinnettavien käyttöpaikkojen vuosienenergian suuruus vaikuttaa merkittävästi regressiokertoimien suuruuteen. Samalla ominaiskulutuksella suuremman rakennuksen sähköenergiankulutus kasvaa nopeammin lämpötilan laskiessa kuin pienemmän rakennuksen. Mahdollisia ratkaisuja ovat esimerkiksi muuttujien skaalaaminen normalisoimalla ne ennen regressiokertoimien määrittämistä tai regressiokertoimien välisten suhteiden tarkasteleminen. Tällöin tosin menetetään käyttöpaikan kokoinformaatio, joka voi olla merkityksellinen. Mikäli käyttöpaikan sähkönkulutus vähenee tai kasvaa suhteellisesti saman verran vuoden jokaisena päivänä, niin tällöin sama suhteellinen muutos siirtyy regressiokertoimiinkin ja niiden keskinäiset suhteet säilyvät samoina.

Yksittäisen käyttöpaikan sähkökäyttöä ennustettaessa usein kuitenkin on ongelmia, että yksittäinen asiakas ei pääsääntöisesti ole kovin tarkasti ennustettavissa. Tällöin edellä mainitut erityisesti tilastollisiin testeihin perustuvat testit voivat olla liian herkkiä havaitsemaan muutoksia erityisesti lyhyen aikavälin tarkkuuden ennusteissa. Testien epäilevät muutokset ovat todellisuudessa saattaneet aiheutua vain asiakkaan hieman poikkeavasta sähkökäytöstä tai mittalaitteen mittausvirheestä. Tämän vuoksi regressiomallia päiväenergioille tulisi käyttääkin vain suurien käyttöpaikkamäärien kulutuksen ennustamiseen ja muutosten seurantaan. Jo muutamana kymmenen samankaltaisen käyttöpaikan summa käyttäytyy huomattavasti säännöllisemmin ja pienemmällä hajonnalla kuin yksittäinen asiakas. Tällöin esimerkiksi liikkuvan aikaikkunan menetelmää voitaisiin käyttää regressiokertoimien seuraamiseen ja päivittämiseen. Hyvänä periaatteena voidaan pitää, että kun ennustettavan havainnon ajanjaksoa lyhennetään, tulisi käsiteltävien kohteiden määrää kasvattaa ja toisin päin. Toisaalta äkkinäisten suurien muutosten havainnointi monien käyttöpaikkojen energioiden summasarjasta voi olla hankalaa, koska yhtäaikaisten muutosten tapahtuminen suuressa joukossa on epätodennäköistä. Tällöin esimerkiksi Chow-testi ei välttämättä huomaa muutoskohtia.

5.3 Pääkomponenttianalyysi ja ryhmittely

Pääkomponenttianalyysi (PCA, Principal Component Analysis) on menetelmä, jolla pyritään korvaamaan selittävät muuttujat pienemmällä määrällä uusia muuttujia. Tällaisia tilastollisia menetelmiä kutsutaan yleisesti dimension redusointimenetelmiksi. Pääkomponenttianalyysissä etsitään datasta toisistaan riippumattomia lineaarisia komponentteja, joilla voidaan selittää mahdollisimman suuri osuus alkuperäisen datan varianssista. Nämä komponentit järjestyvät siten, että suurimman varianssin osan selittävä pääkomponentti asettuu ensimmäiseksi ja loput seuraavat suuruusjärjestyksessä. Tällöin viimeiset pääkomponentit usein selittävät hyvin vähän aineiston oleellisesta vaihtelusta, ja analyysissä voidaan keskittyä tarkastelemaan vain ensimmäisiä pääkomponentteja. [5]

Pääkomponenttipiste pääkomponentille j lasketaan tietylle riville (tässä työssä käyttöpaikalle) yhtälöllä

$$s_j = \sum_{i=1}^p (c_{j,i} x_i), \quad (11)$$

jossa p on muuttujien lukumäärä, x_i on muuttujan i arvo ja $c_{j,i}$ on pääkomponenttia j vastaava pääkomponenttikerroin. Pääkomponenttipisteiden arvot kertovat, kuinka hyvin havainnot edustavat kutakin pääkomponenttia. [5]

Pääkomponenttipisteitä on silmämääräisesti vaikeaa ryhmitellä, kun dimensioita on useampia kuin kaksi. Tällöin voidaan matemaattisesti suorittaa ryhmittely käyttämällä esimerkiksi K-means -menetelmää tai Gaussin mikstuurimallia (GMM, Gaussian Mixture Models). K-means -ryhmittelyä voidaan käyttää, kun pisteet muodostavat pallonmuotoisia pistejoukkoja. K-means -menetelmä pyrkii usein muodostamaan suunnilleen samansuuruisia ryhmiä, mikä voi tuottaa hankaluuksia käyt-

töpaikkojen luokittelussa, koska erilaisten kulutusryhmien edustajien lukumäärät eivät usein jakaannu tasaisesti [10].

Sähkönkulutustyyppien luokitteluun pääkomponenttianalyysiä ja matemaattista ryhmittelyä tuntimittausarjoilla ovat käyttäneet mm. Koivisto ym. [9] ja Larinkari [5]. Pääkomponenttianalyysillä on onnistuttu tunnistamaan monille eri kuluttajaryhmille tyypilliset päivärakenteet sekä vuodenaajoista näkyvä lämpötilariippuvuus, ja näin saatu ryhmiteltyä sähköliittymiä. Esimerkiksi Larinkarin diplomityössä löydettiin Helsingin alueen tuntimittaus tietojen avulla sähköliittymille viisi järkevästi tulkittavaa kulutusryhmää, jotka olivat kolme erilaista sähkölämmitysryhmää, yksi kaukolämmitys- ja yksi palvelukulutusryhmä.

Pääkomponenttianalyysiä ja matemaattista ryhmittelyä on ajateltu vaihtoehtona korvaamaan nykyistä käytössä olevaa kulutusryhmittelyä. Tällä menetelmällä jokainen liittymä tai käyttöpaikka luokitellaan johonkin ryhmään, jonka sähkönkäyttöä se muistuttaa. Tämä voi myös tarkoittaa sitä, että esimerkiksi jotkin kaukolämmitykselliset kotitaloudet ryhmittyvät suoriksi sähkölämmittäjiksi, jos niiden sähkönkäyttö muistuttaa jostakin syystä sellaista. Tällöin käyttöpaikkoja mallinnettisiin niiden sähkönkäytön eikä lämmitysmuodon mukaan.

6 Maalämpökohteiden tunnistaminen ja analysointi

6.1 Käytetyt aineistot

Sähkökäytössä tapahtuvia muutoksia havainnoidessa ja tunnistettaessa vaaditaan aineistoa, jossa tapahtuneista muutoksista tiedetään jotakin. 2000-luvulla maalämpöpumppujen asentaminen sekä uusiin että vanhoihin pientaloihin on vaikuttanut näkyvästi yksittäisten pientalojen sähkökäyttöön. Maalämpöpumppujen asentamiskohteista on mahdollista saada tietoa, joten niiden tutkiminen valittiin tämän tutkimuksen kohteeksi. Sähköverkkoyhtiöt eivät saa asiakkailta tietoa lämmitystavan muutoksesta, elleivät asiakkaat itse ilmoita siitä. Mahdollisten maalämpökohteiden selvittämiseksi Helen Sähköverkko Oy pyysi keväällä 2012 Helsingin kaupungin kiinteistövirastolta tiedot Helsingin alueen kiinteistöille poratuista lämpökaivoista. Saatuun aineistoon oli tallennettu tieto lämpökaivon porauspäivämäärästä, joka tosin on luotettava vasta toukokuun 2011 jälkeen porattujen kaivojen osalta. Tätä ajankohtaa ennen olevien päivämäärien tarkkuuteen pitää suhtautua varauksella. Kiinteistötiedoissa on myös tieto kiinteistön rakennusten kerrosalasta, jota voidaan käyttää hyödyksi sähkökulutuksen analyyseissä. Kerrosala on rakennuksen pinta-ala, kun mukaan ei lasketa kellareita ja ullakoita. Rakennuksen kokonaisalaan sen sijaan lasketaan nekin. Useissa tapauksissa tosin on tyypillistä, että kiinteistöllä oleva sähköliittymä voi koostua useasta käyttöpaikasta, jolloin tällaisessa tilanteessa kerrosalaa on käytännössä mahdotonta kohdentaa tietylle käyttöpaikalle. Kiinteistötiedoissa on myös muutamissa kohteissa puutteita rakennusten kerrosalan suhteen. Tällöin pinta-alaksi aineistossa on merkitty 0 m².

Kiinteistövirastolta saadut lämpöporakaivolliset kiinteistötunnukset yhdistettiin sähköliittymiin koordinaatein ja tarkasteluun hyväksyttiin kiinteistöt, joilla oli vain yksi liittymä. Tällaisten kiinteistöjen ja liittymien lukumäärä aineistossa on 674. Jokainen liittymä sisältää yhden tai useamman sähkökäyttöpaikan. HSV:n tuntimittaustietokanta Generiksestä haettiin vuoden 2013 alussa niistä käyttöpaikoista, joissa tuntimittaustietoa oli saatavilla, päätötehon tuntisarjat niiden mittausten alkamisajankohdasta vuoden 2012 loppuun saakka. Liittymiä, joiden ainakin yhdellä käyttöpaikalla on tuntimittaustietoja, oli 657 kappaletta ja ne koostuivat 1 113 käyttöpaikan tuntimittaussarjoista. Näiden tuntimittaustietojen alkuaikajankohda vaihtelee vuodesta 2001 aina vuoden 2012 loppuun, mutta matemaattiseen käsittelyyn valittiin tuntimittaustiedot vain vuodesta 2010 alkaen tietojen käsittelyn helpottamiseksi. Tätä aikaisemmin tuntimitattuja käyttöpaikkoja oli myös aineistossa suhteellisen vähän. Tuntimittaustiedoissa otettiin kesäaika huomioon siten, että aikaleima vastasi aina sen hetkistä kellonaikaa. Tämä on perusteltua, koska yhteiskunta elää kellon mukaan ja tämä näkyy sähkökulutuksen päivärajenteessa. Tuntisarjoissa jouduttiin keväisin kesäaikaan siirtymisen yhteydessä lisäämään yksi mittausarvo ja syksyisin poistamaan yksi arvo, jotta tuntisarja pysyisi yhtenäisenä. Tietyn kellonajan tuntimittaus vastaa aina alkavan tunnin aikana kerättyä mittausta.

Koska käyttöpaikkoja on useampia kuin liittymiä, voidaan jo etukäteen epäillä, että jokainen käyttöpaikka ei ole vaihtanut maalämpölämmitykseen. Liittymään voi kuulua esimerkiksi useita pientalokäyttöpaikkoja, joista vain yksi on siirtynyt maalämpölämmitykseen. Liittymä voi myös olla rivitalo, jonka lämmitys- ja muut rakennukseen liittyvät yhteiset sähkönkulutukset mitataan yhdellä käyttöpaikalla. Tällöin huoneistokohtaiset käyttöpaikkojen sähkömittarit mittaavat vain käyttösähköön kuuluvaa sähköenergiaa. Kiinteistölle on voitu myös porata lämpökaivo, jota ei vielä ole otettu vuoden 2012 aikana käyttöön. Käyttöpaikkojen vuosienergiat on haettu asiakashallintajärjestelmä Forumista vuosilta 2002–2012.

Jokaiselle käyttöpaikalle on tallennettu verkkotietojärjestelmiin myös muita tietoja, joita käytetään mm. kuormitusmallinnuksissa. Tällaisia ovat esimerkiksi SLY-ryhmittelyn mukainen kulutusryhmä ja aluetieto. Kulutusryhmään sisältyy tärkeää tietoa käyttöpaikan rakennustyyppistä, käyttötarkoituksesta sekä lämmitysmuodosta. Kulutusryhmä voi esimerkiksi kertoa käyttöpaikan olevan ei-sähkölämmitetty omakotitalo sähkökiukaalla tai suoralla sähkölämmityksellä lämmitetty omakotitalo varustettuna käyttövesivaraajalla. Kulutusryhmät tosin on määritetty tietokantaan usein jo liittymän luonnin yhteydessä, joten ne eivät välttämättä pidä enää paikkaansa. Aluetiedosta selviää, millä kaupunginosa-alueella käyttöpaikka sijaitsee. Käytetyn aineiston käyttöpaikkojen osuudet yksinkertaistetuin kulutusryhmin on esitetty taulukossa 2. Suurin osa käyttöpaikoista on verkkotietojärjestelmän mukaan omakotitaloja ja toinen suuri ryhmä on rivi- ja kerrostalohuoneistot. Rivi- ja kerrostalohuoneistojen käyttöpaikoille on hyvin tyypillistä, että niitä kuuluu useampia samaan liittymään, ja liittymälle kuuluu myös jokin kiinteistö- tai yhteismittausryhmän käyttöpaikka. Tällaiset kiinteistö- ja yhteismittausryhmäkäyttöpaikat sisältävät usein kiinteistön yhteisten sähkölaitteiden, kuten ulkovalaistuksen tai hissien kulutusta.

Taulukko 2: Aineiston käyttöpaikkojen kulutusryhmien määrät.

Kulutusryhmä	Määrä
Okt, suora sähkölämmitys	174
Okt, osittain varaava sähkölämmitys	101
Okt, varaava sähkölämmitys	53
Okt, ei-sähkölämmitys	427
Rivi- ja kerrost., ei-sähkölämmitys	250
Kerrostalo, kiinteistö- ja yhteismittaus	71
Vesihuolto	1
Liike-/teollisuuskiinteistö	1
Työmaa	4
Metalliteollisuus	1
Julkinen palvelu	1
Yksityinen palvelu	29
Yhteensä	1 113

Tuntimittauslukemat, käyttöpaikkatunnus, liittymätunnus, kulutusryhmä, aluetieto, järjestelmään tallennettu lämpökaivon porauspäivämäärä, kiinteistötunnus sekä käyttöpaikan vuosienergiat siirrettiin MathWorksin MATLAB-laskentaohjelmaan, jolla analyysit suoritettiin. Helsingin alueen käyttöpaikkojen sähkönkäytön analysointia varten käytettiin myös Ilmatieteen laitoksen tuottamia Kaisaniemen havaintoaseman lämpötilan vuorokausikeskiarvoja. Kaisaniemen lämpötiloja voidaan käyttää hyvin näissä analyyseissä, sillä Helsingin alueen lämpötilaerot eivät ole kovin suuria.

Tuntimittauslukemissa ilmeni myös joitain epäselvyyksiä, jotka johtuvat todennäköisesti pääasiassa tuntimittausten käyttöönoton alkuvaiheesta. Käyttöpaikkojen tuntimittaus tiedoissa saattaa olla esimerkiksi yksittäisiä epärealistisen suuria tehopiikkejä tai puuttuvia arvoja. Korkeat tehopiikit usein selittyvät sillä, että etäluettava mittari ei ole kyennyt lähettämään tuntimittauslukemia, jolloin ne on lähetetty kerralla ja rekisteröityneet kaikki yhden tunnin kohdalle. Puuttuvia tunti-arvoja sen sijaan on sekä yksittäin että päivien kestoisia aikoja. Merkittävin huomio oli, että Helsingin pohjoisen suurpiirin alueella, jossa etäluentaa on tehty jo pidemmän aikaa, ilmeni vuoden 2011 lähes koko helmikuun ja maaliskuun alun tuntimittaus tietojen puuttuminen. Tällöin on tapahtunut ilmeisesti jokin niin pitkäkestoinen palvelimen ongelma, että tuntimittaus tietoja ei ole saatu enää myöhemmin etäluettavilta mittareilta kerättyä. Esimerkki tällaisesta arvojen puuttumisesta havaitaan kuvasta 4a vuoden 2011 alkupuolen kohdalla. Aina nollakulutukseksi merkitty arvo tosin ei ole virheellinen puuttuva arvo. Esimerkiksi kesäloma-aikaan asukas voi kytkeä rakennuksen pääkatkaisijasta sähköt pois päältä lähtiessään pidemmäksi aikaa pois.

Energiatehokkuuden kehittäminen energiayhtiöiden toimin -projektissa (ENETE) on aiemmin tehty kotitalouksille Kajaanissa, Savossa ja Vantaalla kysely, jossa karsoitettiin mm. kotitalouksien rakennustietoja, lämmitysmuotoja ja sähkönkulutustapoja. Tämän aineiston perusteella mm. Degefa [36] on analysoinut kotitalouksien energiatehokkuutta. Degefa analysoi myös aineistossaan päälämmitysmuodokseen maalämpöpumpun ilmoittaneiden käyttöpaikkojen sähkönkäyttöä ja vertasi näitä suorien sähkölämmittäjien kanssa. Näistä 25 maalämpökohteesta pyydettiin tätä työtä varten E.ON Kainuun Sähköverkko Oy:ltä tuntimittaus tietoja vertailtavaksi HSV:n aineistoon. Lähes kaikilta käyttöpaikoilta tuntisarjat olivat saatavilla vuodesta 2009 vuoteen 2012. Neljällä käyttöpaikalla mittaukset alkoivat viimeistään vuoden 2011 alkupuolella. Kainuun alueen sähkönkäyttöanalyysijä varten haettiin Kajaanin lentoaseman säähavaintoaseman vuorokauden keskilämpötiladataa Ilmatieteen laitoksen Avoin data -palvelusta väliltä 1.1.2009–31.12.2012 [37]. Lämpötila-aineistossa ilmeni kaksi kertaa tapaus, jossa kahtena peräkkäisenä päivänä ei ollut lämpötilaa. Nämä korvattiin puuttuvien päivien edeltävän ja seuraavan päivän keskiarvoilla.

Taulukossa 3 on selvennyksen vuoksi ristiintaulukoitu eri aineistot sekä menetelmät, joihin niitä on tässä työssä käytetty. Lämpötiloja ei suoranaisesti käytetä kulutusryhmien erottamiseen, vaan sen tulosten tulkintaan. Muutosten tunnistamisessa lämpötilaa voidaan käyttää lämpötiloista johdettujen lämmitystarvelukujen

avulla. Taulukossa on myös jaoteltu aineistojen alkuperiä, mistä voidaan huomata kulutusanalyysien haasteellisuus, kun tietoja on monissa eri järjestelmissä tai organisaatioissa.

Taulukko 3: Tässä työssä käytetyt menetelmät ja niihin käytetyt aineistot alkuperineen.

		Muutosten tunnistus	Erottuminen muista	Päiväprofiili ja regressiomalli
HSV MLP	Tuntisarja ¹		X	X
	Vuosienergia ²	X		
	Porauspvm ³	X		
	Kulutusryhmä ⁴	X		
HSV Pakila	Tuntisarja ¹		X	
	Kulutusryhmä ⁴		X	
E.ON Kainuu MLP	Tuntisarja ⁵			X
Ilmatieteen laitos	Lämpötila ⁶	X	X	X

¹Mittaustietokanta Generis

²Asiakastietojärjestelmä Forum

³Kiinteistövirasto

⁴Verkkotietojärjestelmä Tekla NIS

⁵E.ON Kainuun Sähköverkko Oy

⁶Ilmatieteen laitos

6.2 Maalämpökohteiksi vaihtaneiden käyttöpaikkojen tunnistaminen vuosienergioiden perusteella

Luvussa 6.1 esitellystä maalämpökohteita sisältävästä aineistosta voidaan tietoja yhdistelemällä havaita todennäköisimmin maalämpöjärjestelmiä käyttävät käyttöpaikat sekä mahdolliset muutosajankohdat. Tunnistamisessa hyödyksi ovat vuosienergiatiedot, ilmoitettu lämpökaivon porausajankohta sekä tuntisarja. Monista käyttöpaikoista ei välttämättä ole tuntisarjaa saatavilla kovin pitkältä ajalta, joten vuosienergiatiedot osoittautuivat luotettavammiksi muutosten ajankohdan selvittämiseen. Selvimpiä tapauksia ovat sellaiset käyttöpaikat, jotka ovat liittymänsä ainoita käyttöpaikkoja ja SLY-kulutusryhmittelyn mukaan pientaloja. Tällöin voidaan olla lähes varmoja, että käyttöpaikka on maalämpölämmittäjä, mutta muutosajankohdasta ei välttämättä aineistosta näe, mikäli maalämpöpumppu on asennettu ennen ensimmäistä vuosienergiatietoa tai vasta myöhään vuonna 2012.

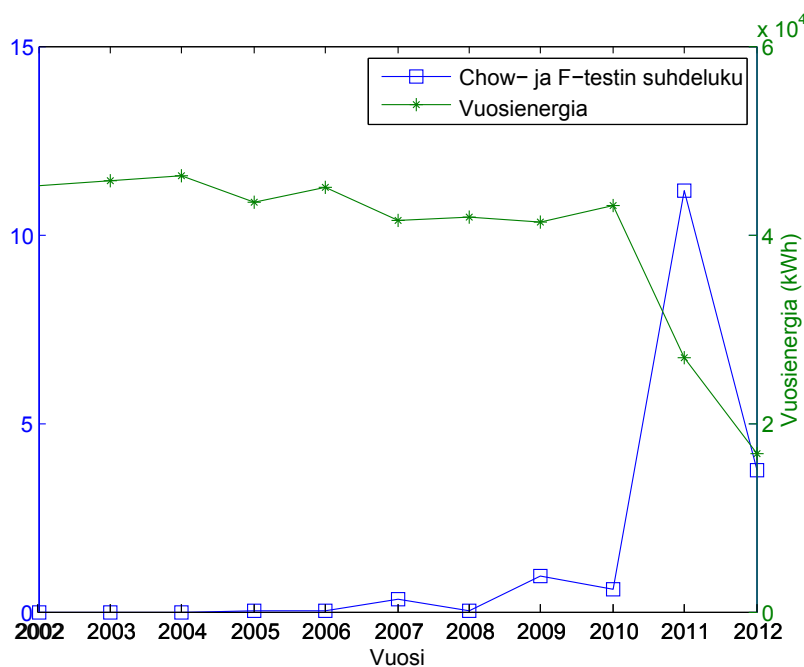
Sähkönkulutuksiin perehtynyt henkilö pystyy silmämääräisesti hyvin päättelemään saatavilla olevan aineiston perusteella, onko kyseessä maalämpöön vaihtanut asiakas.

Suuren käyttöpaikkamäärän läpikäynti on kuitenkin työlästä ja aikaavievää, joten selkeimpien maalämpölämmittäjien ja niiden vaihtamisajankohtien etsintä suoritettiin tietokoneavusteisesti algoritmein ja jäljelle jääneet epäselvät tapaukset tarkasteltiin käsin. Toinen hyvin yksinkertainen tapa arvioida muutosvuodet olisi luottaa suoraan aineistossa olevaan ilmoitettuun porausvuoteen. Koska porausajankohdaksi toukokuuta 2011 aikaisemmaksi ilmoitetut päivämäärät voivat olla epäluotettavia, on muutosajankohdan etsintään syytä käyttää myös muita menetelmiä. Vaikka porauspäivämäärä olisikin tarkka, niin maalämpöpumppua ei välttämättä kuitenkaan ole otettu käyttöön saman vuoden aikana. Ilmoitettua porauspäivämäärää voidaan kuitenkin verrata matemaattisen menetelmän tuloksiin, sillä pääsääntöisesti porausvuosi vaikuttaa olevan melko tarkka.

Muutosvuosien etsintää varten käytettiin vuosienenergiaa vuosilta 2002–2012. Vuosienenergioille muodostettiin hyvin yksinkertainen regressiomalli, jonka ainoana selittävänä tekijänä vakiotermin lisäksi on vuoden lämmitystarveluku Helsingin Kaisaniemestä mitattuna. Lämmitystarveluvun pääteltiin olevan järkevä selittävä tekijä sähkölämmitteisten pientalojen sähköenergiankulutukselle. Muille kuin sähkölämmitteisille pientaloille lämmitystarveluvun ei tosin pitäisi olla merkitsevä selittävä tekijä, mutta tarkoituksena onkin löytää regressiokertoimien merkitseviä muutoksia. Ei-sähkölämmitteisten rakennusten vuosienenergian kulutus vaihtelee lähinnä regressiomallin vakioparametrin hajonnan perusteella ja testi huomaa, mikäli uusi arvo poikkeaa merkittävästi aikaisemmista.

Regressiokertoimien vakioisuutta testattiin luvussa 5.2 käsitellyllä ennustavalla Chow-testillä. Jokainen pientaloksi SLY-ryhmittelyn mukaan ilmoitettu käyttöpaikka käytiin yksitellen läpi. Regressiomalliin otettavat vuosienenergiat karsittiin aluksi siten, että malliin sisällytettiin vasta ensimmäinen vuosienenergia, jonka vuosienenergia oli yhtäsuuri tai suurempi kuin 1 000 kWh. Tämä tehtiin, koska aineistossa on käyttöpaikkoja, jotka on perustettu vasta vuoden 2002 jälkeen, ja näin puuttuvat vuosienkulutukset tai ensimmäisen kulutusvuoden selvästi liian alhainen vuosienenergia eivät vaikuta mallin estimointiin. Havaintovuosia kuitenkin piti jäädä yli neljä kappaletta, jotta testi voisi muutoksia vielä tunnistaa. Käyttöpaikan vuosienenergioille tehtiin vuosi kerrallaan regressiomalli alkaen k :sta havainnosta ja jäännöstermien neliöiden summa tallennettiin muistiin. k :lla on tässä tapauksessa arvo kaksi mallin selittävien muuttujien lukumäärän mukaisesti. Ennustavan Chow-testin arvot suhteessa F-jakauman arvoihin 95 % luotettavuusrajalla määritettiin $k + 2$:sta havainnosta alkaen. Muutosvuodeksi valittiin yli arvon yksi saaneiden vuosien joukosta korkeimman arvon saanut. Poikkeuksena on tilanne, jossa käyttöpaikka on ainoa liittymällä ja ensimmäinen yli arvon yksi saanut vuosi on sama kuin ilmoitettu porausvuosi. Tällöin muutosvuodeksi valittiin kyseinen vuosi. Toinen poikkeus on, mikäli ilmoitettu porauspäivämäärä on toukokuun 2011 jälkeen. Tällöin muutosvuodeksi valittiin vuosi 2011 tai 2012, mikäli tällöin oli tapahtunut merkitsevä muutos ja porausvuosi on aikaisempi tai sama vuosi kuin muutosvuosi.

Kuvassa 6 on esitetty testin tulos yhdelle käyttöpaikalle, jolle testi toimii erityisen hyvin. Kuvassa näkyvien käyttöpaikan vuosienenergioiden perusteella voidaan jo



Kuva 6: Esimerkki muutosten etsintään käytetyn menetelmän tuloksesta, kun sähkölämmitys vaihdetaan maalämpölämmitykseen.

etukäteen päätellä, että vuoden 2011 aikana on tapahtunut merkittävä sähkönkäytön vähentyminen, mikä voisi viitata sähkölämmityksestä maalämpöön siirtymiseen. Kuvassa on esitetty ennustavan Chow-testin ja F-testin suhdeluku 95 % luotettavuusrajalla jokaiselle vuodelle. Suhdeluvun arvoksi tulee vuonna 2011 yli 10, kun merkitsevän muutoksen raja on 1. Kuvasta voidaan huomata myös, että vuonna 2009 suhdeluvun arvo on ollut lähellä merkitsevää, mutta todellisen muutoskohdan arvo on kuitenkin huomattavan selkeä. Monilla käyttöpaikoilla saattaakin olla suhdearvon merkitsevyyden ylitys tapahtunut useammin, mutta yleensä suuri muutos, kuten lämmitysjärjestelmän vaihtaminen, erottuu selvästi muista suurempana arvona.

Käyttöpaikkojen, joille löytyi muutosvuosi, järkevyys maalämpöasiakkaaksi täytyi tarkastaa. Muutoksen etsintään tarkoitettu menetelmä luonnollisesti löytää mistäkin syistä johtuvia muutoksia vuosienergioissa kuin vain maalämpöön siirtymisestä. Esimerkiksi öljylämmitteisessä pientalossa asukkaiden vaihtuminen voi vaikuttaa merkittävästi sähkönkulutukseen. Sopivuutta maalämpölämmitykseen siirtymisestä kokeiltiin laskemalla ennen ja jälkeen muutosvuotta oleville vuosienergioille keskiarvot jättäen muutosvuosi huomioimatta. Vuosienergioille ei ole tässä tapauksessa tehty lämpötila- tai kalenterikorjausta, koska maalämpölämmityksellisille rakennuksille ei ole löytynyt kirjallisuudesta yleisesti käytettyä lämmityksen osuuden tietoa. Ei-sähkölämmityksille ei lämpötilakorjausta tarvitse tehdä, ja sähkölämmityksille voidaan käyttää esimerkiksi Rouhaisen Sähkönmyyjän raportti asiakkaan energiankäyttö -julkaisussa [13] esitettyjä arvoja. Mikäli muutoksen jälkeisen ja edeltävän lämpötilakorjaamattoman vuosienergian keskiarvojen suhde oli suu-

remppi kuin 1,3, niin käyttöpaikan pääteltiin siirtyneen maalämpölämmitykseen ei-sähkölämmitteisestä lämmityksestä, kuten öljylämmityksestä. Mikäli suhde oli pienempi kuin 0,8, niin muutoksen pääteltiin tapahtuneen sähkölämmityksestä. Molemmissa tapauksissa muutoksen jälkeisen vuosien keskiarvon tuli olla yli 8 000 kWh, jotta pienten ei-sähkölämmitteisten käyttöpaikkojen vuosien keskiarvojen suuretkin suhteelliset muutokset eivät valikoituisi maalämpöasiakkaiksi. Mikäli muutosvuodeksi oli valikoitunut vuosi 2012 eli muutoksen jälkeistä vuosien keskiarvoa ei voitu määrittää, niin tällöin vuoden 2012 muutosvuoden vuosien keskiarvoa verrattiin edeltävien vuosien keskiarvoon ja muutossuunnasta pääteltiin, mistä lämmitysmuodosta muutos on todennäköisimmin tapahtunut.

Aineistossa on myös kesken tarkastelujakson perustettuja käyttöpaikkoja, joilla on ollut alusta alkaen maalämpölämmitys ja näin ollen muutosvuotta ei löydy ennustavalla Chow-testillä. Tällaiset käyttöpaikat lisättiin erikseen siten, että mikäli käyttöpaikka on pientalo ja ainoa liittymällään, ja vuoden 2002 vuosien keskiarvoa ei ole, niin muutosvuodeksi määritettiin ensimmäinen vuosi, jolla vuosien keskiarvoa on. Tässä tehtiin oletus, että ilmoitettu porausvuosi pitää uudiskohteissa paikkansa.

Edellä mainitulla menetelmällä löydettiin 506 maalämpökäyttöpaikkaa, joista 87 olisi uudiskohteita, 204 sähkölämmityksestä siirtyneitä ja 215 muista lämmitysmuodoista siirtyneitä. Vertailun vuoksi, mikäli aineiston pientaloille merkittiin muutosvuodeksi suoraan ilmoitettu porausvuosi ja tehtiin täsmälleen sama virhetarkastelu ja uudiskohteiden lisäys, niin käyttöpaikkoja löytyi 563. Näistä 64 olisi uudiskohteita, 229 sähkölämmityksestä siirtyneitä ja 270 muista lämmitysmuodoista siirtyneitä. Kun ei oteta huomioon uudiskohteita, niin matemaattisen menetelmän löytämistä maalämpökohteista 221:lla on sama muutosvuosi kuin ilmoitettu porausvuosi ja 108:lla yksi vuosi tämän jälkeen. On ymmärrettävää, että matemaattinen menetelmä löytää muutoksen vasta porausvuotta seuraavana vuonna tilanteissa, joissa kesken vuotta asennettu maalämpölämmitys ei ole vielä vaikuttanut niin paljon vuosien keskiarvoon kuin seuraava kokonainen vuosi. Tämän perusteella voidaan päätellä, että ilmoitettujen porauspäivämäärien vuodet pitänevät melko hyvin paikkansa ja matemaattinen muutosvuosien etsintämenetelmä on onnistunut kohtalaisen hyvin paikallistamaan oikeat muutosvuodet.

6.3 Maalämpökohteiden tunnistaminen muista kulutusryhmistä tuntisarjojen avulla

Pääkomponenttianalyysi yhdistettynä klusterointiin on osoittautunut mm. Koiviston ym. [9] tutkimuksissa hyväksi menetelmäksi erottaa päivä rakenteen sekä lämpötilariippuvuuden avulla kulutusryhmiä toisistaan. Tämän vuoksi on kiinnostavaa, erottuisivatko maalämpölämmittäjät omana ryhmänään. Pääkomponenttianalyysillä ja matemaattisella ryhmittelyllä on pystytty liittymätasolla erottamaan suorat sähkölämmittäjät, erilaisia varaavia sähkölämmittäjiä, toimistoja sekä muilla tavoin kuin sähköllä lämmittäviä käyttöpaikkoja toisistaan. Aikaisemmin ei ole ollut tietoa, mitkä analyysin liittymistä olisivat olleet maalämpölämmityksiä. Tällöin on

ollut haastavaa arvioida, olisiko jokin matemaattisen ryhmittelyn ehdottama ryhmä muodostunut maalämpölämmityksistä vai ei.

Pääkomponenttianalyysiin valittiin satunnaisesti 847 kappaletta Helsingin Pakilan alueella sijaitsevien käyttöpaikkojen tuntisarjoja ajalta 1.1.–31.12.2012. Pakila valikoitui tarkasteltavaksi alueeksi, koska siellä on paljon ei-sähkö- ja sähkölämmitteisiä pientaloja, joista maalämpökohteiden erottuminen on erityisen kiinnostavaa ja haastavaa. Toinen syy oli, että Pakilan alueelta oli varmimmin tuntisarjoja saatavilla jo vuoden 2012 alusta. Tuntisarjoista tarkastettiin, ettei niissä ollut liikaa puuttuvia tehoarvoja tai epärealistisen suuria tehopiikkejä. Puuttuvien tuntimittauslukemien ylärajaksi asetettiin 5 %. Mikäli tuntisarjan suurin teholumema oli yli 35 kertaa suurempi kuin tuntisarjan keskiarvo, käyttöpaikka poistettiin analyysistä. Aineistoon lisättiin luvun 6.2 löydettyjen maalämpökohteiden tuntisarjat niiltä osin, joissa muutos oli tapahtunut ennen vuotta 2012 ja puuttuvien tuntilukemien määrä ei ollut yli 5 %. Tällaisia maalämpökohteita oli 261 kappaletta.

Merkittävässä osassa tuntisarjoja ilmeni muutamana heinäkuun päivänä puuttuvia arvoja. Koska tällaisia käyttöpaikkoja oli monta, niin näiden puuttuvien päivien tunti-arvot korvattiin edellisen viikon vastaavien viikonpäivien tunti-arvoilla. Tämän ei pitäisi muuttaa tuloksia merkittävästi, koska esimerkiksi lämpötilalla ei juuri ole kesällä merkitystä pientalojen sähkönkulutukseen. Tuntisarjamatriisi on muotoa

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,p} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,p} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

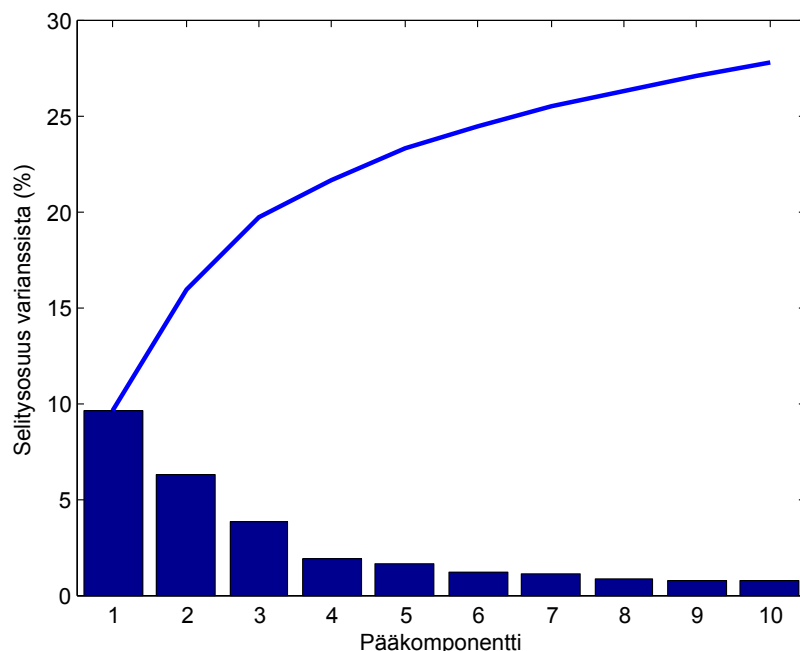
jossa $x_{i,j}$ on käyttöpaikan i tuntimittauslukema j . Käyttöpaikkojen lukumäärä n on 1108 ja tuntimittauslukemien lukumäärä p on 8784, koska vuosi 2012 oli karkausvuosi.

Pääkomponenttianalyysissä tuntisarjamatriisille tehtiin sekä koko- että muuttujaskaalaus. Kokoskaalaus tehtiin siten, että jokaisen käyttöpaikan tuntisarjan eli yhtälön (12) matriisin rivin keskiarvoksi tuli yksi. Tämän jälkeen jokainen tuntisarjamatriisin sarake muuttujaskaalattiin käyttämällä MATLAB-ohjelman *zscore*-funktioita. Tällaisten kokoinformaation poistamisen syitä on esitelty tarkemmin Koiviston ym. [9] tutkimuksessa. Pääkomponenttianalyysin tuloksissa kokoinformaatio olisi liian hallitseva eikä sen kanssa pystyisi käytännössä erottamaan tuloksista mitään muuta vuosienenergian suuruuden lisäksi. Muuttujaskaalaus sen sijaan antaa saman painoarvon jokaiselle muuttujalle. Normalisoiduista tuntisarjoista voidaan etsiä eroja ryhmien välillä päivä rakenteiden ja lämpötilariippuvuuksien avulla. Normalisoidulle tuntisarjamatriisille tehtiin pääkomponenttianalyysi MATLAB-ohjelman *princomp*-funktioilla. Tuloksena saaduille kuudelle ensimmäiselle pääkomponentille tehtiin rotaatio. Ortogonaaliset rotaatiot eivät vaikuta mitenkään matemaattisen ryhmittelyn tuloksiin, vaan ainoastaan selkeyttävät pääkomponenttien tulkintaa [9]. Rotaatio tehtiin Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulun tutkijan Matti Koiviston suosittelemalla ja toimittamalla SOBI-algoritmin MATLAB-ohjelmalle tehdyllä

funktiolla. Ortogonaalinen SOBI-rotaatio minimoi pääkomponenttikertoimien ristikorrelaatiot, jolloin aikasarja-aineiston pääkomponenttien tulkinta selkeytyy.

Kuuden ensimmäisen pääkomponentin pääkomponenttikertoimia tarkastelemalla voitiin kahdelle ensimmäiselle pääkomponentille päätellä selkeät tulkinnat. Ensimmäisen pääkomponentin nähtiin kuvaavan yöaikaan tapahtuvaa kulutusta ja toisen pääkomponentin tehon lämpötilariippuvuutta negatiivisella etumerkillä. On hyvä huomata, että pääkomponenttianalyysillä ei ole mitään tietoa lämpötiloista, mutta se löytää vuodenajan mukaan vaihtuvat päiväenergian muutokset. Neljännen pääkomponentin tulkittiin kuvaavan kesken vuotta tapahtuvaa sähkönkulutuksen rakenteellista muutosta, mikä on tämän analyysin kannalta epäolennainen ryhmittelyperuste. Kuudelle merkitsevimmälle pääkomponentille, lukuun ottamatta neljättä pääkomponenttia, tehtiin matemaattinen ryhmittely käyttäen K-means -menetelmää funktiolla *kmeans*. Funktiolle annettiin ryhmiteltävien ryhmien määräksi neljä. On hyvä huomata, että tässä analyysissä kuusi ensimmäistä pääkomponenttia selittää 24,4 % aineiston vaihtelusta, vaikka se on vain noin 0,5 % muuttujista. Ryhmittelyyn käytettyjen viiden komponentin selitysosuus on hieman pienempi. Kuvassa 7 on esitetty kymmenen ensimmäisen pääkomponentin selitysosuudet varianssista sekä niiden kumulatiivinen selitysosuus. Tämän aineiston pääkomponenttianalyysin ensimmäisten pääkomponenttien selityssasteet ovat melko paljon pienempiä kuin esimerkiksi Lärinkarin [5] liittymille tehdyille aineistolle. Tämä voi johtua esimerkiksi liittymien sijaan käyttöpaikkojen käytöstä analyysissä tai tässä analyysissä olevasta pienestä määrästä palvelukulutusta, joka ei erotu ja tuo vaihtelua analyysiin.

Kuvassa 8 on esitetty pääkomponenttianalyysin ensimmäisten ja toisten pääkom-



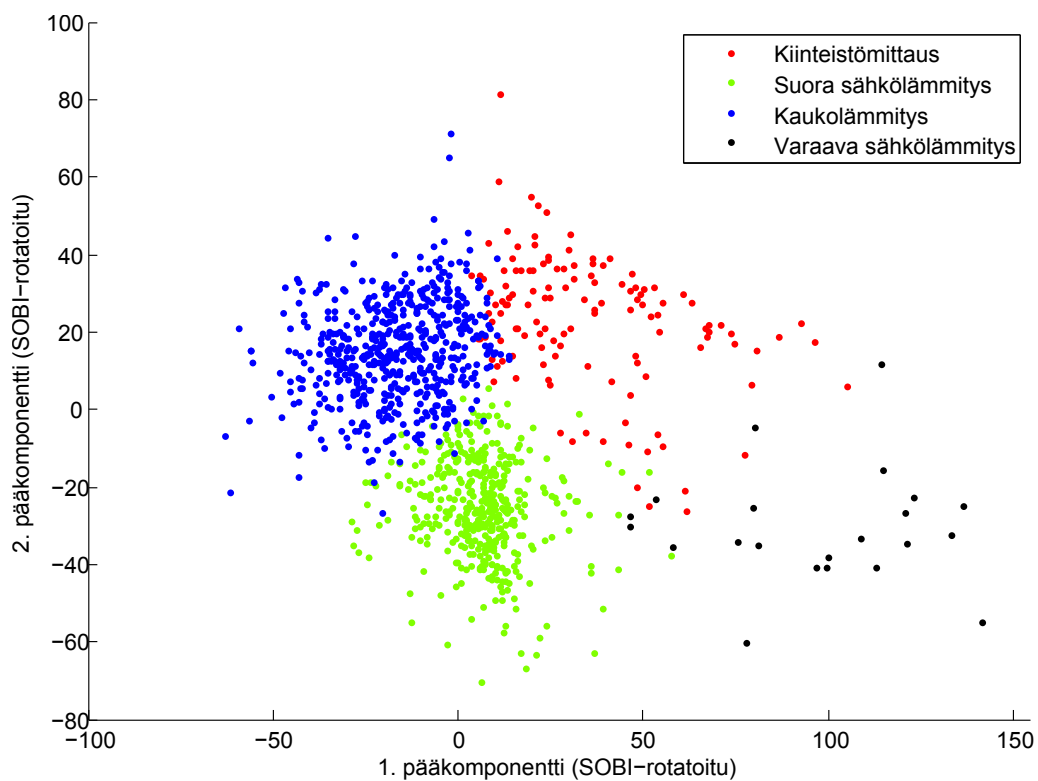
Kuva 7: Kymmenen ensimmäisen pääkomponentin yksittäiset selitysosuudet sekä kumulatiivinen selitysosuus aineiston varianssista.

ponenttien arvot ja niiden K-means -ryhmittelyn mukaiset tulokset. Kuvassa pääkomponenttiarvot ovat jakautuneet vaaka-akselilla yöaikana tapahtuvan kulutuksen ja pystyakselilla lämpötilariippuvuuden mukaan. Paljon yöaikaan kuluttavat käyttöpäivät saavat siis suuria ensimmäisen pääkomponentin arvoja. Lämpötilariippuvuus mallintui toiseen pääkomponenttiin etumerkiltään negatiivisena, joten paljon lämpötilasta riippuvat käyttöpäivät saavat pieniä toisen pääkomponentin pisteiden arvoja.

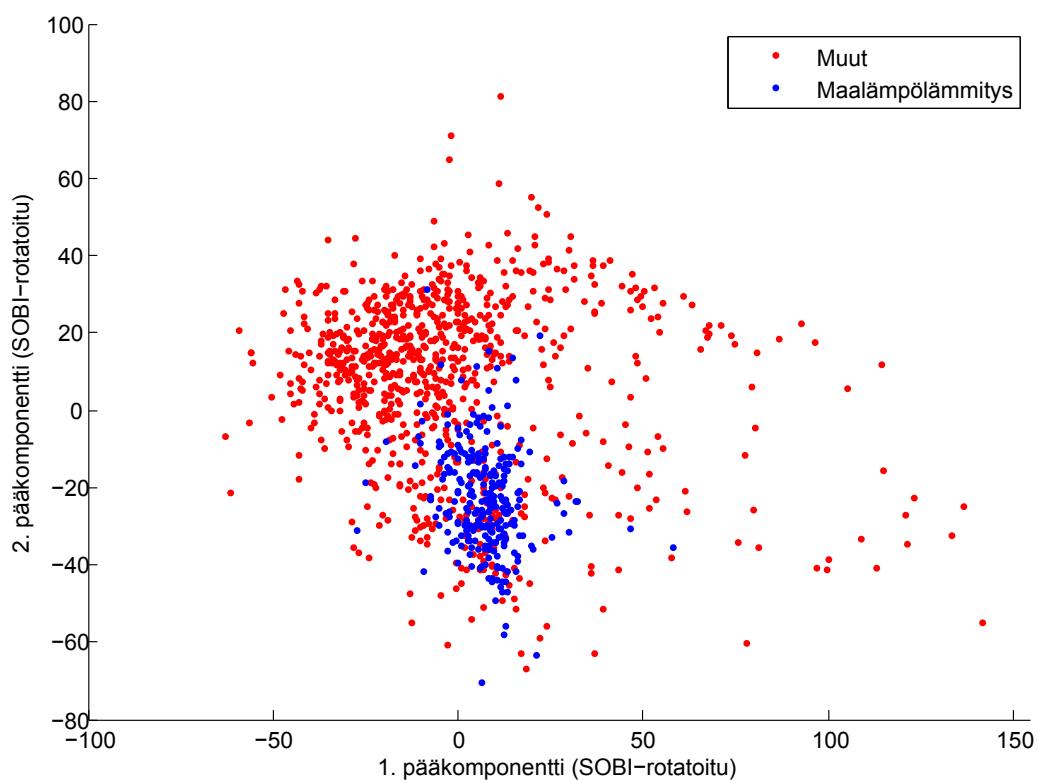
Tarkastelemalla K-means -ryhmittelyn tuloksena saatujen neljän eri ryhmän keskiarvoja, voidaan kaikki tulokset järjestyksessä kulutusryhmiiksi. Liitteessä A on esitetty K-means -ryhmittelyn tuloksena löydettyjen ryhmien keskiarvoista määritetyt päivärakenteet skaalatuille tuntitehoille, ja kuvassa 10 ryhmien skaalattujen tuntisarjojen keskiarvoista määritetyt päiväenergiat ajan suhteen. Nämä ryhmät tulkittiin kuvastavan kaukolämmittäjiä, suoria sähkölämmittäjiä, varaavia sähkölämmittäjiä ja erinäköisiä kiinteistömittauksia. Kaukolämmitysryhmällä tarkoitetaan tässä kaikkia muitakin ei-sähkölämmittäjiä lämmitysmuotoja, kuten öljy- ja puulämmitystä. Kaukolämmitysryhmälle on ominaista vuodenaikasta hyvin vähän riippuva sähkönkulutus, joka koostuu lähinnä valaistuksesta ja laitesähköstä. Tämän vuoksi kulutus on tyypillisesti suurempaa iltaisin ja viikonloppuisin. Sähkölämmittäjien sähkönkulutus on hyvin paljon suurempaa talvisin kuin kesäisin ulkolämpötilasta johtuen ja varaavilla sähkölämmittäjillä kulutus painottuu hyvin voimakkaasti yöajalle. Sähkölämmittäjien päiväenergiat seuraavat myös hyvin tarkasti vuorokauden keskilämpötiloja. Kiinteistömittaukset ovat usein esimerkiksi taloyhtiöiden yhteisten tilojen ja sähkölaitteiden, kuten ulkovalaistuksen mittauksia. Kiinteistömittausryhmässäkin voidaan havaita kaukolämmitysryhmän kanssa kuitenkin pientä vuodenaikavaihtelua, mutta lämpötilariippuvuuden lisäksi sen voidaan tulkita johtuvaksi päivän pituuden vaihtelusta. Tällöin valaistusta käytetään enemmän talviaikaan, kun on pimeämpää. Kiinteistömittausryhmän löytyminen on myös mielenkiintoista, sillä tällaista ryhmää ei ole esimerkiksi Larinkarin [5] tutkimuksessa havaittu, koska siinä on käsitelty käyttöpäikkojen sijaan liittymien tuntisarjoja, jolloin kiinteistömittaukset on summattu liittymään kuuluvien taloyhtiön huoneistojen tuntisarjoihin. Toisaalta myös kiinteistömittausryhmän kulutuksen voisi olettaa olevan melko vaihtelevaa, koska se voi sisältää hyvin erilaisia kulutuksia. Valaistuksen ja hissien sähkönkulutuksen lisäksi se voi myös mitata esimerkiksi taloyhtiön huoneistojen sähkölämmityksestä aiheutuvaa sähkönkäyttöä.

Matemaattisen ryhmittelyn onnistumista voidaan arvioida myös vertaamalla ryhmiteltyjen käyttöpäikkojen ryhmiä verkkotietojärjestelmässä ilmoitettuihin kulutusryhmiin. Erityisen kiinnostavaa on tarkastaa, kuinka kiinteistömittausryhmän käyttöpäivät ovat jakaantuneet matemaattisessa ryhmittelyssä. K-means -ryhmittelyn tulosten perusteella ryhmiteltyjen käyttöpäikkojen jakautuminen verkkotietojärjestelmän mukaisiin SLY-kulutusryhmiin on esitetty taulukossa 4. Taulukossa on jätetty huomioimatta analyysiin sisällytetyt maalämpökohteet, koska niistä tiedetään, etteivät ne edusta enää verkkotietojärjestelmän mukaista kulutusryhmää.

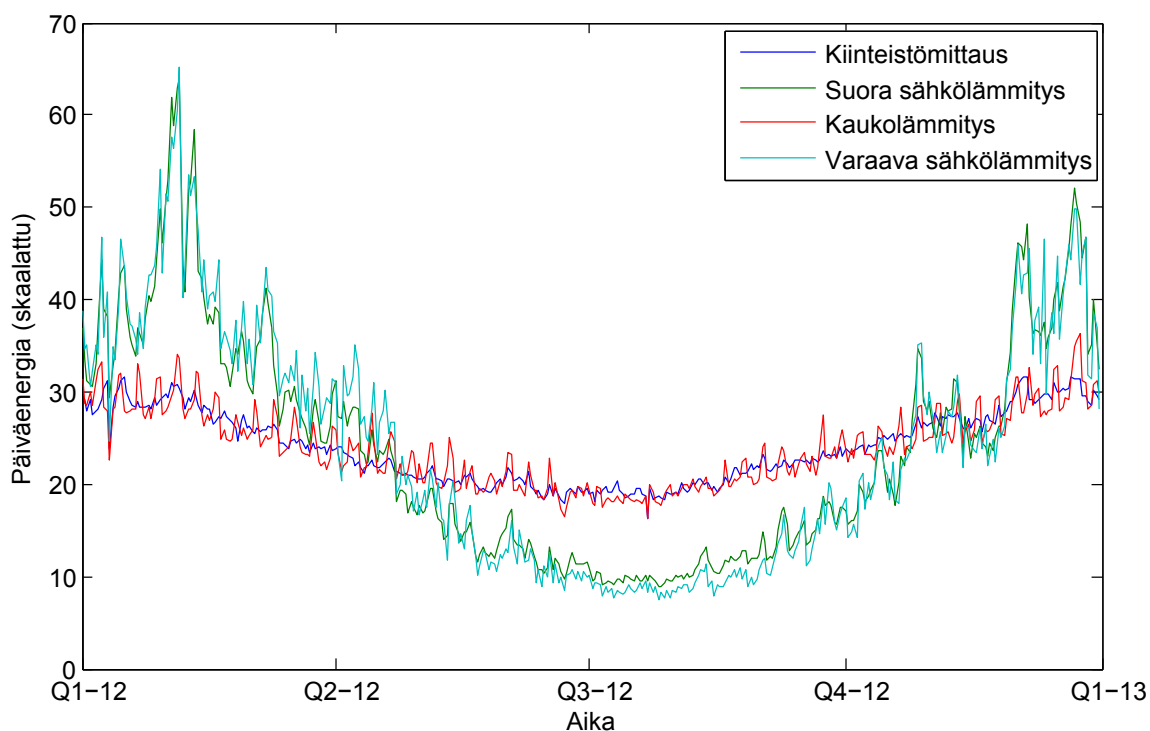
Taulukosta 4 voidaan havaita matemaattisen ryhmittelyn täsmäävän pääsääntöi-



Kuva 8: Ensimmäisen ja toisen SOBI-rotatoidun pääkomponentin pisteet ryhmiteltyinä K-means -ryhmittelyn perusteella.



Kuva 9: Ensimmäisen ja toisen SOBI-rotatoidun pääkomponentin pisteet maalämpökohteet erotettuna.



Kuva 10: K-means -ryhmittelyn tuloksena saatujen ryhmien skaalattujen tuntisarjojen keskiarvoista muodostetut päiväenergiat ajan suhteen.

Taulukko 4: Matemaattisen ryhmittelyn tulosten vertailu verkkotietojärjestelmän kulutusryhmiin ilman maalämpökäyttöpaikkoja. Vaakariveillä on K-means -ryhmittelyn tuloksena saadut ryhmät ja sarakkeilla verkkotietojärjestelmän mukaiset SLY-kulutusryhmät.

	SLY suora SL	SLY varaava SL	SLY ei-SL	SLY kiinteistö- mittaus	SLY toimisto	Yhteensä
Suora SL	17	53	85	11	0	166
Varaava SL	1	19	0	0	0	20
Kaukol.	2	1	518	5	9	535
Kiint.mit.	0	1	45	79	1	126
Yhteensä	20	74	648	95	10	847

sesti SLY-kulutusryhmien kanssa. Selvästi parhaiten on tunnistunut kaukolämmitysryhmä, jossa selvästi suurin osa kuuluu vastaavaan ei-sähkölämmitteiseen SLY-ryhmään. Myös suurin osa kiinteistömittauksista vaikuttaisi olevan oikeassa ryhmässä. SLY-kiinteistömittausryhmään sisällytetään SLY-ryhmittelyn mukaiset yhteismittaus- sekä kiinteistömittausryhmät. Sähkölämmityksissä eroavaisuuksia tulee SLY-kulutusryhmältään osittain varaavista sähkölämmityksistä. Taulukossa 4 on sijoitettu 48 osittain varaavaa sähkölämmityskäyttöpaikkaa SLY:n varaaviin sähkölämmittäjiin, mutta matemaattinen ryhmittely sijoittaa ne suoriksi sähkölämmittä-

jiksi tulkittuun ryhmään. SLY-kulutusryhmältään toimistoja ja palvelukulutusta oli aineistossa hyvin vähän, joten ne eivät muodostaneet matemaattisessa ryhmittelyssä omaa ryhmäänsä. K-means -ryhmittely sijoittaa jokaisen käyttöpaikan johonkin ryhmään. Tällöin myös erityisesti ryhmien rajapinnoissa olevat kahta eri ryhmää sähkökäytöltään muistuttavat käyttöpaikat voivat mennä väärin. Tätä toisaalta tapahtuu kumpaankin suuntaan, joten erot tasoittuvat.

Maalämpökohteiden ryhmittymistä voidaan tarkastella, koska tiedetään aineiston maalämpökohteet. Huomataan, että 241 kappaletta 261 maalämpölämmityskohteesta on ryhmittynyt samaan ryhmään suorien sähkölämmittäjien kanssa. Maalämpölämmitysten pääkomponenttipisteiden sijoittuminen ensimmäisen ja toisen pääkomponentin suhteen on esitetty kuvassa 9. Normalisoitujen maalämpölämmittäjien päivä rakenteen muoto ja lämpötilariippuvuus ovat niin samankaltaisia suorien sähkölämmittäjien kanssa, että ne eivät erotu toisistaan näin helposti. Kasvattamalla K-means -ryhmittelyssä etsittävien ryhmien määrää, menetelmä vaikuttaa vain jakavan kaukolämmitysryhmää pienempiin osiin eikä löytävän suorien sähkölämmittäjien ryhmästä eroavaisuuksia. Maalämpö- ja suorien sähkölämmitysten päivä rakenteita ja lämpötilariippuvuuksia on vertailtu enemmän luvussa 6.4. Kuitenkin voimme olettaa, että maalämpölämmittäjät ovat sähkökäytöltään pienempiä kuin vastaavan kokoiset suorat sähkölämmittäjät. Tätä sähkökulutuksen suuruuden eroa ei tosin voida havaita tässä tehdystä pääkomponenttianalyysistä, koska sitä varten kaikki tuntisarjat on standardoitu keskiarvoltaan samansuuruisiksi. Pelkän todellisen vuosienergiatiedon sisällyttäminen ryhmittelyyn ei todennäköisesti myöskään helpottaisi ryhmittelyä, koska olisi haastavaa tietää, mitkä kohteet ovat vain esimerkiksi pieniä sähkölämmityskohteita eivätkä suuria maalämpökohteita. Kiinteistön rakennuksen kerrosalan ja käyttöpaikan vuosienergian käyttäminen yhdessä ryhmittelyssä voisi olla mahdollinen keino erottaa karkeasti suorat sähkölämmitykset maalämpölämmityksistä. Tätä tietoa ei tosin ole saatavilla kuin niille käyttöpaikoille, jotka ovat ainoita liittymällään ja kiinteistöllään.

Pääkomponenttianalyysiä ja matemaattista ryhmittelyä yritettiin myös tehdä pelkille suoriksi sähkölämmittäjiksi ryhmitellyille käyttöpaikoille, joihin sisältyivät myös maalämpölämmitykset. Tällä kokeiltiin, löytyisikö tuntisarjoista helpommin sellaisia eroja, jotka erottaisivat maalämpölämmitykset ja suorat sähkölämmitykset toisistaan. K-means -ryhmittelyllä muodostettiin kaksi ryhmää, mutta maalämpölämmitykset ja suorat sähkölämmitykset vaikuttivat jakaantuvan melko tasaisesti molempiin ryhmiin tällä aineistolla. Sähkölämmitys- ja maalämpölämmityskäyttöpaikkojen tuntisarjojen saatavuuden parantuessa analyysi kannattaa suorittaa uudelleen suuremmalla käyttöpaikkamäärällä ja käyttäen vuosienergia- ja kerrosalatieta ja ryhmittelyyn.

6.4 Maalämpöasiakkaiden tyypikäyrät

Maalämpökohteiden keskimääräistä sähkökulutusta tunneittain ja päivittäin tutkittiin tuntisarjoista niiltä maalämpökäyttöpaikoilta, joiden muutosvuodeksi oli tun-

nistettu vuosi 2011 tai aiempi. Tällöin analyysissä voitiin käyttää vuoden 2012 mittauksia ja saada mahdollisimman moni maalämpökäyttöpaikka sisällytettyä tarkasteluun. Maalämpökäyttöpaikoista tarkasteluun huolittiin lisäksi vain ne, joissa tuntimittaukset olivat alkaneet ennen vuotta 2012 ja vuoden 2012 tuntimittauksista puuttui korkeintaan 5 % mittausarvoista. Jälkimmäisen ehdon perusteella aineistosta jäi pois yhdeksän käyttöpaikkaa ja lopulliseksi määräksi analyysin saatiin 261 käyttöpaikan tuntisarjat.

Tuntisarjoista muodostettiin yksi keskiarvoinen tuntisarja, josta laskettiin päiväenergiat regressiomallia varten. Aineistoa tarkastelemalla huomattiin, että Pakilan seudun tuntisarja-aineistosta puuttui heinäkuussa viideltä päivältä tuntimittaustiedot, kuten luvussa 6.3 pääkomponenttianalyysiä tehtäessä oli huomattu. Tästä johtuen regressiomallin parametrit määritettiin ilman näitä päiviä. Näin voidaan tehdä, koska regressiomalli on staattinen eikä siis tarvitse tietoa edellisen vuorokauden päiväenergiasta. Luvussa 5.1 esitettyä lineaarista regressiomallia käytettiin pohjana maalämpölämmitykselle muodostettavaa mallia varten. Seuraavissa kappaleissa esitetään uuden mallin muuttujat.

Päivän pituus määritettiin käyttämällä Helsingin leveyspiirin arvoa $60,17^\circ$. Päivän pituudelle käytettiin vain yhtä muuttujaa, koska kokeiltu päivän pituuden epälineaarisuutta kuvaava regressiokerroin yli 14 tunnin pituisille päiville ei ollut regressiomallissa merkitsevä maalämpölämmityksille.

Lämpötilamuuttujana käytettiin Helsingin Kaisaniemen vuoden 2012 vuorokauden keskilämpötiloja, joista oli laskettu kahden päivän liikkuva keskiarvo, koska sisäilman lämpötila ei reagoi ulkoilman lämpötilan muutokseen välittömästi. Lämpimien päivien epälineaarisuuden lisäksi huomattiin kylmimpinä päivinä mallin antavan liian pieniä arvoja mitattuihin arvoihin verrattuna. Tämä näyttää viittaavan siihen, että moni maalämpöpumppu on mitoitettu osateholle ja käyttää kylminä päivinä sähkövastuksia lisälämmittiminä aiheuttaen epälineaarisuutta päiväenergioiden lämpötilariippuvuuteen. Tämän vuoksi malliin lisättiin uusi lämpötilaan vaikuttava muuttuja $\beta_{Temp,BlwMin5}$, joka alkaa vaikuttaa vain alle -5°C keskilämpötiloissa. Tämä muuttuja tehtiin samalla menetelmällä kuin lämpimienkin päivien lämpötilamuuttuja eli se saa arvokseen keskilämpötilan ja rajalämpötilan erotuksen, mikäli keskilämpötila on rajalämpötilaa alempi. Esimerkki näille kolmelle lämpötilamuuttujalle β_{Temp} , $\beta_{Temp,Abv12}$ ja $\beta_{Temp,BlwMin5}$ annettavien arvojen muodostamisesta on esitetty taulukossa 5. Tämä kylmien lämpötilojen erilaisen lämpötilariippuvuuden huomioon ottaminen paransi huomattavasti jäännöstermien jakaumaa lämpötilan suhteen, minkä voi nähdä liitteen B kuvista B.1 ja B.2. Parannellun regressiomallin kylmien päivien jäännöstermit jakaantuvat tasaisemmin nollan molemmin puolin. Kuvista huomataan myös, että kylmien päivien päiväenergioissa mallin tulosten hajonta on myös selvästi suurempaa kuin lämpiminä päivinä, joten niiden ennustamisessa on enemmän epävarmuutta.

Regressiomalliin sisällytettiin myös dummy-muuttujat aatto- ja pyhäpäiville, jollaisiksi luokiteltiin myös arkipäiviksi osuneet juhlapäivät. Kesälomakaudelle tai erityisen poikkeaville juhlapäiville, kuten joululle ja juhannukselle, ei tehty omia muut-

Taulukko 5: Esimerkki lämpötilamuuttujien arvojen muodostumisesta.

Lämpötila	x_{Temp}	$x_{Temp,Abv12}$	$x_{Temp,BlwMin5}$
-6 °C	-6	0	-1
5 °C	5	0	0
14 °C	14	2	0

tujia. Regressiomalli on näin ollen muotoa

$$y = \beta_0 + \beta_{Temp}x_{Temp} + \beta_{Temp,Abv12}x_{Temp,Abv12} + \beta_{Temp,BlwMin5}x_{Temp,BlwMin5} + \beta_{dLen}x_{dLen} + \beta_{Eve}x_{Eve} + \beta_{HoliD}x_{HoliD}. \quad (13)$$

Tämän regressiomallin kertoimet on esitetty taulukossa 6. Regressiomallin sovitetun summaenergiaksi tulee 18 322 kWh, mitä voidaan käyttää harkiten skaalatessa arvioita eri kokoisille maalämpökohteille. Vertailun vuoksi regressiomalli tehtiin myös standardoiduille muuttujille ja päiväenergioille. Standardoiduista kertoimista huomataan, että lämpötila on odotetusti selvästi merkitsevin muuttuja. Regressiomallin selitysasteeksi saatiin 98,8 %.

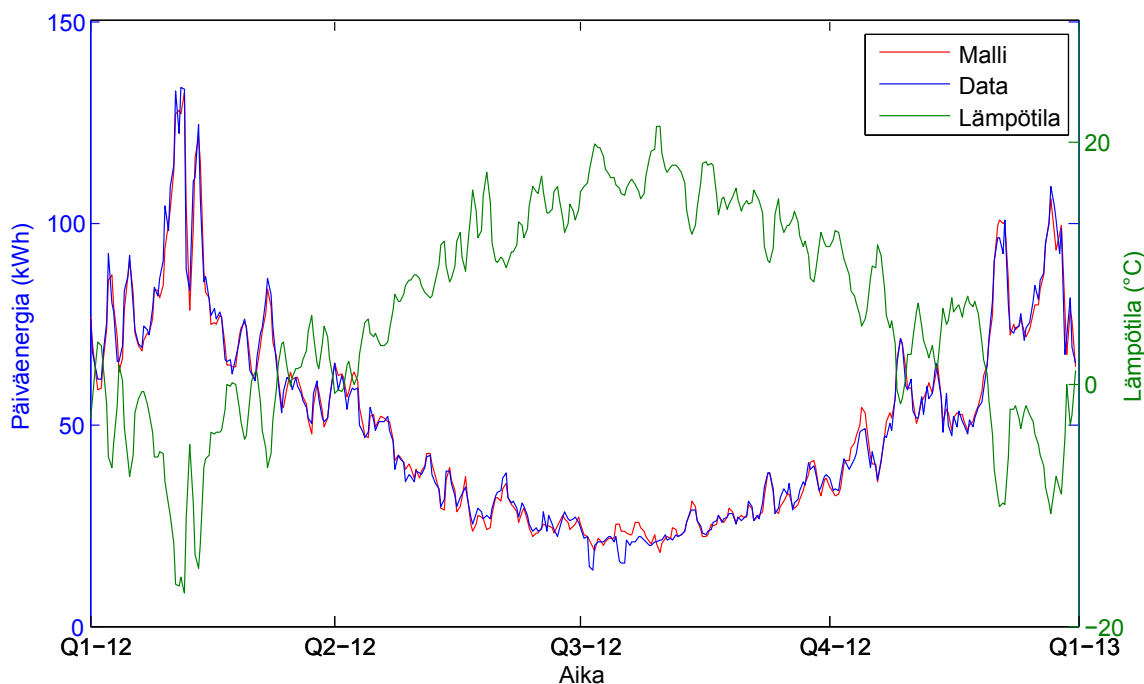
Taulukko 6: Helsingin alueen keskimääräisen maalämpölämmittäjän päiväenergian regressiomallin muuttujien kertoimet todellisina ja standardoituina arvoina.

Muuttuja	Kerroin	Kerroin (standardoitu)
β_0	73,94	0
β_{Temp}	-2,48	-0,87
$\beta_{Temp,Abv12}$	1,43	0,12
$\beta_{Temp,BlwMin5}$	-1,74	-0,13
β_{dLen}	-1,00	-0,15
β_{Eve}	2,58	0,04
β_{HoliD}	2,27	0,03

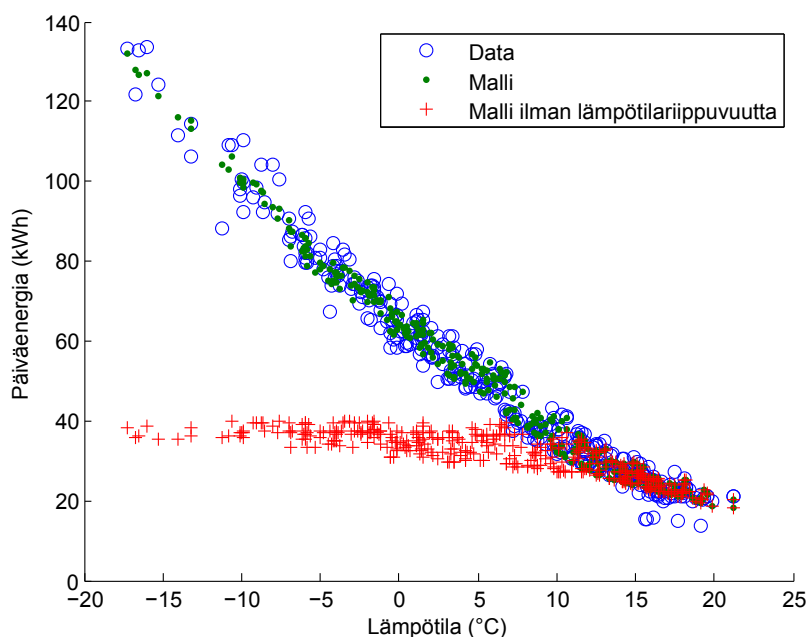
Vuoden 2012 vuorokausilämpötilojen kahden päivän liikkuva keskiarvo, keskimääräisen maalämpölämmityksen päiväenergiat ja niihin sovitettun mallin antamat päiväenergiat on esitetty kuvassa 11, josta huomataan selkeästi lämpötilan tason mukana vaihtelevat päiväenergioiden arvot. Tämä voidaan nähdä myös kuvasta 12, jossa päiväenergiat on esitetty lämpötilamuuttujan arvojen suhteen. Kuvista 11 ja 12 voidaan myös huomata keskikesällä muutamana päivänä päiväenergian liian pienet arvot malliin nähden. Kuvassa 13 on esitetty mallin jäännöstermien auto- ja osittaisautokorrelaatioiden arvot kymmenelle päivälle. Regressiomallista oli poistettu kesältä yksi kahden peräkkäisen päivän ja yksi kolmen peräkkäisen päivän havainnot, joten tämä voi tuoda epävarmuutta auto- ja osittaisautokorrelaatioarvoihin. Autokorrelaatioarvojen perusteella mallissa ei näyttäisi olevan juurikaan riippuvuutta edellisiin päiviin. Kuudennen viiveen kohdalla oleva autokorrelaation arvo

voisi viitata sähkönkulutuksen viikkorytmiikkaan, jolloin päivän energia muistuttaa viikon takaista päivää. Autokorrelaation ensimmäisten viiveiden korrelaatioita on saatu pienennettyä käyttämällä lämpötilamuuttujassa liikkuvaa keskiarvoa. Näin myös osittaisautokorrelaation ensimmäisen viiveen arvo on pienentynyt merkittävästi. Auto- ja osittaisautokorrelaatioiden vähäisyys on hieman yllättävää, sillä luvussa 6.3 löydetystä suorista sähkölämmittäjistä tehdyn mallin ensimmäisten viiveiden arvot ovat huomattavasti suuremmat. Samoin Koiviston ym. [9] tutkimuksessa sähkölämmitysluokkien regressiomallin jäännöstermien auto- ja osittaiskorrelaatiot olivat suurempia.

Kuvassa 14a on esitetty keskiarvoisen maalämpölämmittäjän päivä rakenne. Keskiarvoisen suoran sähkölämmittäjän päivä rakenne on esitetty kuvassa 14b. Suoran sähkölämmittäjän keskimääräinen päivä rakenne on muodostettu luvun 6.3 pääkomponenttianalyysin ja K-means -ryhmittelyn suorien sähkölämmittäjien ryhmästä, josta on poistettu maalämpölämmitykset. Ryhmään jäi tällöin 146 suoraksi sähkölämmittäjäksi ryhmitettyä käyttöpaikkaa. Päiväprofileista huomataan maalämpö- ja suorien sähkölämmitysten muotojen olevan varsinkin aatto- ja pyhäpäivinä hyvin samankaltaiset, mutta arkipäivissä on eroavaisuuksia. Suorille sähkölämmittäjille tyypillinen iltaan ajoittuva tehopiikki leikkautuu kokonaan pois maalämpölämmittäjillä. Tämä kulutuspiikki johtuu edullisemman yö sähkötariffin tulosta voimaan, jolloin lämminvesivaraajien lämmitysvastukset kytkeytyvät päälle. Maalämpöpumppujärjestelmissä lämmintä käyttöä lämmitetään tasaisesti päivän aikana. Maalämpölämmityksissä huipputehon tarve näyttäisi siis pienenevän sähkölämmityksiin ver-



Kuva 11: Vuoden 2012 datasta muodostetut maalämpölämmityksen keskiarvoiset päiväenergiat, sille sovitettu regressiomalli sekä vuorokauden keskilämpötilan kahden päivän liikkuva keskiarvo.

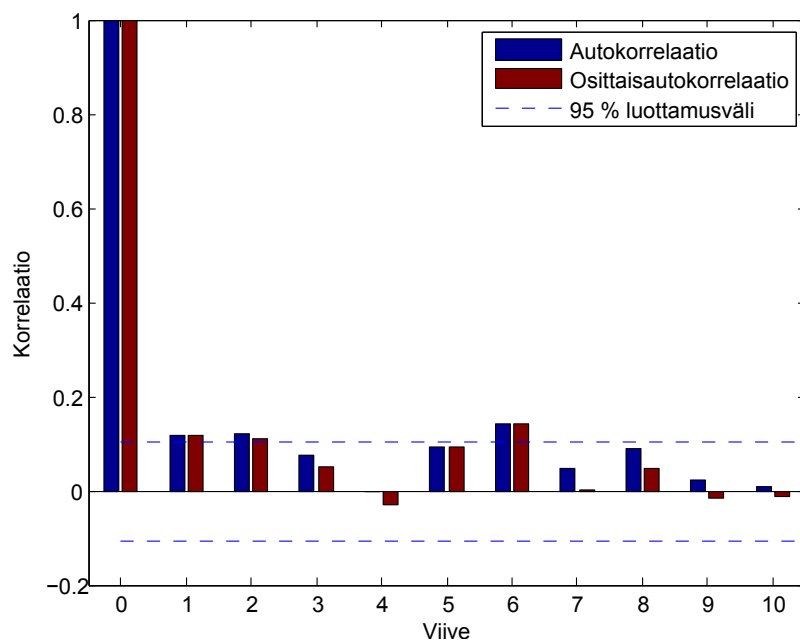


Kuva 12: Vuoden 2012 datasta muodostetut keskiarvoiset päiväenergiat ja sovitetun regressiomallin päiväenergiat vuorokauden keskilämpötilan kahden päivän liikkuvan keskiarvon suhteen sekä sovitettu malli ilman lämmitystä.

rattuna. Huipputeho tosin riippuu maalämpöpumpun mitoituksesta, joten vaikka osateholle mitoitettu maalämpöpumppu pienentääkin sähköenergiankulutusta, niin kylmien päivien tarvitsema lämmitysteho ei pienene samassa suhteessa. Kuvista voisi myös tehdä virhepäätelmän, että keskiarvoinen sähkölämmitys kuluttaisi vähemmän sähköä kuin maalämpölämmitys. Tässä täytyy huomioida, että keskimääräiset maalämpölämmityskohteet ovat kerrosalaltaan keskimäärin suurempia kuin suorat sähkölämmitteiset rakennukset. Tämä suorien sähkölämmittäjien satunnaisotos on melko pieni ja ei ota kantaa kiinteistöllä sijaitsevien rakennusten kokoon.

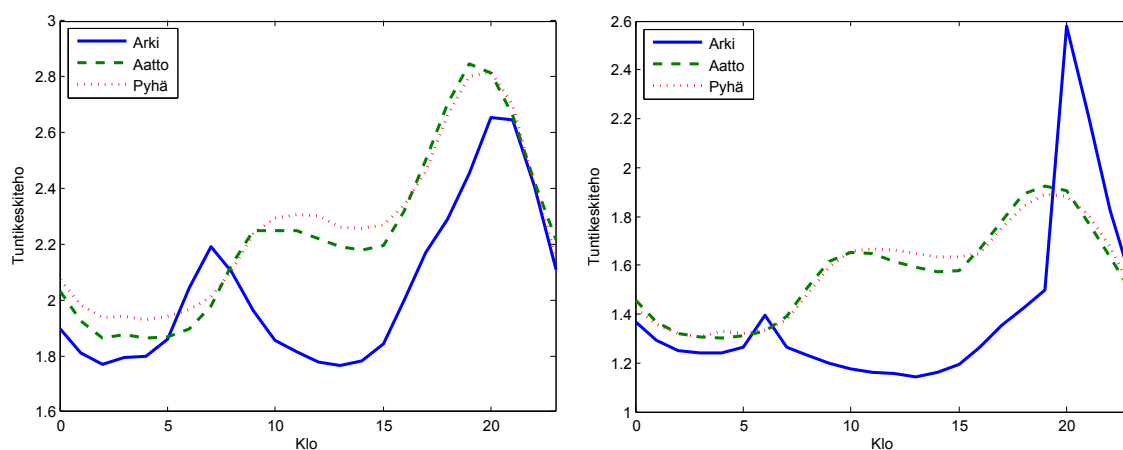
Suurille sähkölämmityksille sovitettiin myös sama regressiomalli kuin maalämpölämmitykselle. Tämän aineiston perusteella suorilla sähkölämmityksillä ei ilmene kylminä päivinä epälineaarisuutta sähkökulutuksessa. Regressiomallille annetun kylmien lämpötilojen kerroin on p-arvonsa mukaisesti merkityksetön ja voidaan jättää mallista pois. Tämä on linjassa esimerkiksi Koiviston ym. [9] saamien suorien sähkölämmitysluokkien regressiomallien kanssa.

Sähköä lämmitykseen käyttäviä kohteita analysoitaessa on kiinnostavaa tietää, mikä on lämmityksen osuus sähkökulutuksesta. Maalämpöön siirryttäessä luonnollisesti lämmityssähköenergian osuuden tulisi pienentyä, kun oletetaan laitesähkön kulutuksen pysyvän ennallaan. Yksi menetelmä lämmityksen osuuden arviointiin on käyttää saatua regressiomallia ja muokata lämpötila-arvoja siten, että asetetaan esimerkiksi kaikki alle 12 °C arvot 12 °C -arvoiksi. Mikäli tätä lämpötilaa pidetään sellaisena lämpötilana, jonka yläpuolella lämmitystä ei tarvita, niin malli antaa päiväenergiatulokset ilman lämmitystä. Nämä keskiarvoisen käyttöpaikan päiväenergiat lämpötilan funktiona ilman lämpötilariippuvuutta näkyvät myös kuvassa 12. Tätä



Kuva 13: Vuoden 2012 datasta muodostettujen maalämpölämmityksen keskiarvoisten päiväenergioiden jäännöstermien auto- ja osittaiskorrelaatiot.

lämpötilarajaa käyttämällä saataisiin maalämpölämmitysasiakkaan vuosienergian lämmityssähkön osuudeksi 37,1 %. Verrattaessa esimerkiksi sähkölämmitykseen on hyvä huomata maalämpöpumpun vähentävän sähkönkäyttöä myös lämpiminä päivinä, koska lämpimän käyttöveden lämmitykseen kuluva sähköenergia vähenee. Toisaalta ei-sähkölämmityksestä maalämpöön vaihtavien kotitalouksien sähkönkulutus kasvaa kesäisin, koska maalämpöjärjestelmän pumput ja kompressorit tarvitsevat sähköä käyttöveden lämmittämiseen.



(a) Keskiarvoisen maalämpölämmityskäyttöpaikan päivärakenne vuonna 2012.

(b) Keskiarvoisen suoran sähkölämmityskäyttöpaikan päivärakenne vuonna 2012.

Kuva 14: Keskimääräisten maalämpö- ja suorien sähkölämmittäjien päivärakenteet keskiarvoisille tuntitehoille Helen Sähköverkko Oy:n aineistosta.

E.ON Kainuun Sähköverkko Oy:n verkkoalueen 25 maalämpökäyttöpaikan aineistosta muodostettiin yksi keskiarvoinen tuntisarja. Tälle tehtiin myös samanlainen regressiomalli päiväenergioille kuin HSV:n keskiarvoiselle maalämpökohteelle. Mallille annettiin muuttujina tässä tapauksessa Kajaanin lentoaseman vuorokauden keskiarvolämpötiloja kahden päivän liikkuvalla keskiarvolla ja päivän pituuden arvot laskettiin käyttämällä Kajaanin leveyspiiriä $64,23^\circ$. Tuntisarjat olivat vuosilta 2009–2012, joten havaintoja kylmille päiville saatiin huomattavasti enemmän kuin HSV:n vain vuoden 2012 tuntisarjoilla tehdyllä aineistolla. Kainuun maalämpölämmittäjien aineistosta voidaan myös huomata pieni Helsingin aineiston kaltainen lämpötilan vaikutuksen epälineaarisuus kylminä päivinä. Malli selvästi paranee, kun siihen lisätään alle -5°C lämpötilan kerroin, kuten yhtälössä (13). Tämän keskiarvoisen maalämpölämmittäjän päiväenergioiden regressiomallin muuttujien todelliset sekä standardoidut kertoimet on esitetty taulukossa 7. Mallin selitysaste on 97,6 %. Standardoidut kertoimet ovat vertailukelpoisia Helsingin alueen kertoimien (taulukko 6) kanssa ja niistä nähdäänkin, että ne ovat melko lähellä toisiaan. Aineiston perusteella myös maalämpölämmittäjien päivä rakenne on hyvin samankaltainen kuin Helsingissä. Liitteessä C on esitetty Kainuun aineiston analyysin tuloksista muodostetut kuvat. Kuvassa C.1 on esitetty keskimääräiset päivä rakenteet ja kuvassa C.2 päiväenergiat lämpötilan suhteen vuosien 2009–2012 ajalta.

Taulukko 7: E.ON Kainuun Sähköverkko Oy:n aineiston keskimääräisen maalämpölämmittäjän päiväenergian regressiomallin muuttujien kertoimet todellisina ja standardoituina arvoina.

Muuttuja	Kerroin	Kerroin (standardoitu)
β_0	46,76	0
β_{Temp}	-1,39	-0,82
$\beta_{Temp,Abv12}$	1,12	0,13
$\beta_{Temp,BlwMin5}$	-0,58	-0,15
β_{dLen}	-0,64	-0,15
β_{Eve}	2,49	0,04
β_{HoliD}	0,85	0,02

6.5 Maalämpölämmitykseen vaihtaneiden sähkönkäytön muutokset

Maalämpölämmitysjärjestelmiin vaihtaneiden käyttöpaikkojen aikaisemmat lämmitysmuodot on kiinnostava tieto erityisesti sähkönkäytön ennusteita tehdessä. Pientalovaltaisilla kaupunginosa-alueilla täytyy arvioida uudiskohteiden lisäksi myös käyttöpaikkojen sähkönkulutuksen muutoksia, joita ovat esimerkiksi lämmitysjärjestelmien vaihtajat. Tarkastelemalla käyttöpaikkojen päiväenergiakulutuksia voidaan jakaa käyttöpaikat karkeasti sähkölämmittäjiin ja ei-sähkölämmittäjiin. Tuntirakennetasolla sähkölämmittäjissä on eroja riippuen, ovatko ne suoria, osittain varaavia

vai täysin varaavia sähkölämmittäjiä.

Luvussa 6.2 maalämpökohteiksi tunnistetuista pientalokohteista, jotka eivät ole uudiskohteita, huomataan aikaisempien lämmitysmuotojen jakaantuvan melko tasan. Sähkölämmitys on tulkittu 204 kohteelle aikaisemmaksi lämmitysmuodoksi ja ei-sähkölämmitys 215 kohteelle. Taulukoissa 8 ja 9 on verrattu näiden käyttöpaikkojen tunnistettuja lämmitysmuotoja verkkotietojärjestelmässä oleviin kulutusryhmiin. Taulukoista huomataan, että SLY-kulutusryhmät eivät täysin vastaa tässä aineistossa olevien käyttöpaikkojen lämmitysmuotoja.

Taulukko 8: Löydettyjen 204 sähkölämmityksestä vaihtaneiden SLY-kulutusryhmät.

SLY-kulutusryhmä	Osuus
Suora sähkölämmitys	39,7 %
Osittain varaava	17,6 %
Täysin varaava	17,2 %
Ei-sähkölämmitys	25,5 %

Taulukko 9: Löydettyjen 215 ei-sähkölämmityksestä vaihtaneiden SLY-kulutusryhmät.

SLY-kulutusryhmä	Osuus
Suora sähkölämmitys	11,6 %
Osittain varaava	3,7 %
Täysin varaava	0,5 %
Ei-sähkölämmitys	84,2 %

Käyttöpaikkojen muutosvuotta edeltävien keskiarvoisten vuosienergioiden avulla pystyttiin arvioimaan vuosienergioiden, ominaiskulutusten ja vuosienergioiden muutosten suuruutta eri lämmitysmuodoilla. Ominaiskulutukset on määritetty vuosienergioiden ja kiinteistön rakennusten kerrosalojen avulla niille käyttöpaikoille, jotka ovat ainoita liittymällään ja joiden rakennusten yhteenlaskettu kerrosala on vähintään 50 m² ja enintään 400 m². Tämä pinta-alarajaus päätettiin tehdä, koska tätä pienemmät pinta-alat eivät pientaloissa välttämättä olleet realistisia arvoja ja antoivat ominaiskulutukseltaan todella suuria arvoja. Pinta-alaltaan tätä suuremmat rakennukset vaikuttivat olevan myös poikkeavia sähkönkäyttäjiä. Pinta-alojen perusteella ominaiskulutuslaskennan ulkopuolelle jäi seitsemän käyttöpaikkaa. Epävarmuutta ominaiskulutuslaskentaan aiheuttaa, mikäli kiinteistöllä on asuinrakennuksen lisäksi muitakin kerrosalallisia rakennuksia, kuten autotalli. Tässä työssä ominaiskulutuksen laskentaan käytetty pinta-ala on kiinteistön rakennusten kerrosalojen summa.

Todellisen kulutuksen keskiarvojen lisäksi päätettiin vertailun vuoksi arvioida vuosienergioita ja niiden muutoksia lämpötilakorjatuilla vuosienergioilla käyttämällä

lämpötilakorjaukseen yhtälöä (1). Luvussa 6.4 saatiin aineiston maalämpölämmitykselle lämmityksen osuuden arvioksi noin 37,1 %, ja sähkölämmitykselle saadaan arvio lämmityksen osuudeksi 68 % Rouhaisen [13] tutkimuksesta. Helsingissä normaalivuoden lämmitystarvelukuna käytettiin arvoa 3989. Keskiarvot ja mediaanit sähkölämmitysten, ei-sähkölämmitysten ja maalämpölämmitysten vuosienenergioille ja ominaiskulutuksille sekä toteutuneista että lämpötilakorjatuista vuosienenergioista laskettuina on esitetty taulukossa 10. Uusien ja vanhojen vuosienenergioiden suhteiden jakaumasta on myös määritetty keskiarvot sekä mediaanit ja ne on esitetty taulukossa 11. Mediaaniltaan vuosienenergia sähkölämmityksestä maalämpölämmitykseen siirryttäessä vähenee 53 % ja ei-sähkölämmityksestä siirryttäessä kasvaa 150 %.

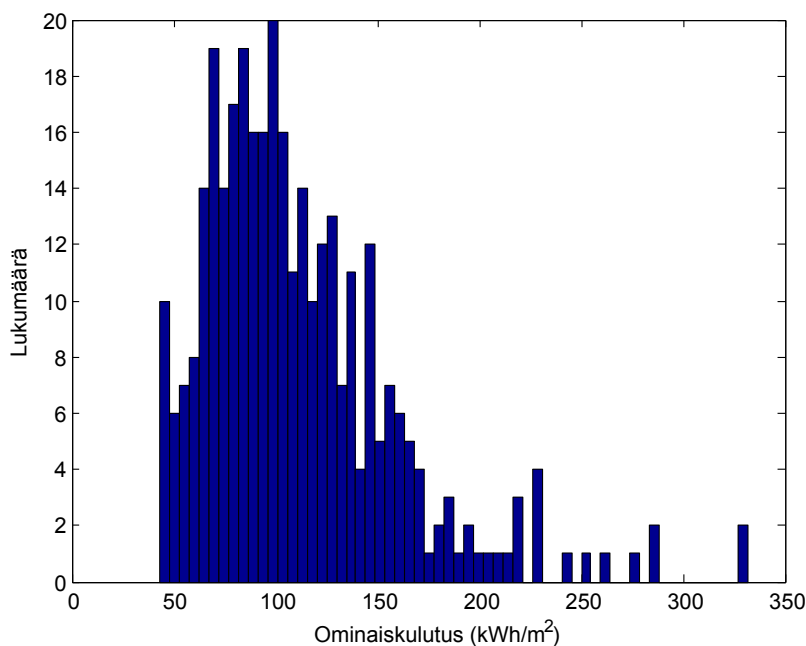
Taulukko 10: Maalämpökohteiden muutosvuotta edeltävien ja lämmitysmuodon vaihtumisen jälkeisten vuosien vuosienenergioiden ja ominaiskulutusten keskiarvoja ja mediaaneja lämmitystyypeittäin.

	Lämmitysmuoto		
	Ei-SL	SL	MLP
$E_{\text{keskiarvo}}$ (kWh)	7 860	37 350	18 550
E_{mediaani} (kWh)	6 455	34 800	16 010
om.kulutus keskiarvo (kWh/m ²)	46,6	239,4	111,5
om.kulutus mediaani (kWh/m ²)	38,5	221,5	100,7
$E_{\text{keskiarvo}}$ (lt-korj.) (kWh)	7 860	35 830	18 260
E_{mediaani} (lt-korj.) (kWh)	6 455	33 190	15 720
om.kulutus keskiarvo (lt-korj.) (kWh/m ²)	46,6	229,6	109,7
om.kulutus mediaani (lt-korj.) (kWh/m ²)	38,5	213,3	99,4

Taulukko 11: Maalämpölämmityksen aikaisen ja aikaisemman lämmitysmuodon vuosienenergioiden suhteiden keskiarvoja ja mediaaneja.

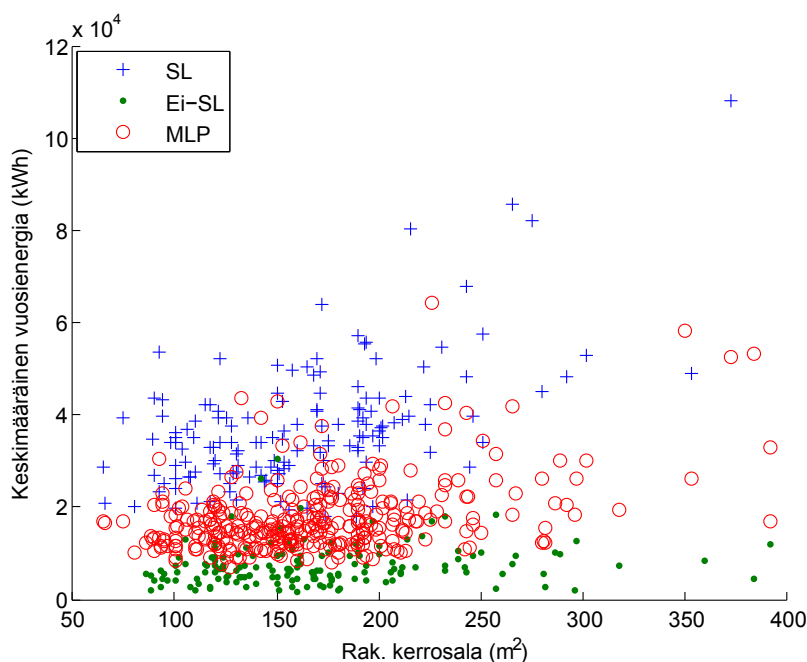
	Keskiarvo	Mediaani
E_{muutos} Ei-SL→MLP	3,1	2,5
E_{muutos} SL→MLP	0,48	0,47
E_{muutos} Ei-SL→MLP (lt-korj.)	3,0	2,5
E_{muutos} SL→MLP (lt-korj.)	0,49	0,48

Lämpötilakorjaus on taulukoiden 10 ja 11 perusteella vaikuttanut jonkin verran laskevasti sähkö- ja maalämpölämmitysten vuosienenergioihin ja ominaiskulutuksiin, mutta ei juurikaan laskettuihin muutosten suuruuksiin. Tulosten keskiarvot ja mediaanit sen sijaan poikkeavat toisistaan erityisesti, koska jakaumat eivät ole normaalijakautuneita. Jakaumien mahdolliset arvot ovat myös alhaalta rajoitettuja, koska rakennusten pinta-alat eivät voi olla negatiivisia. Kuvassa 15 on esitetty maalämpölämmityskäyttöpaikkojen ominaiskulutusten jakauma, josta nähdään edellä mainitut jakauman piirteet.



Kuva 15: Maalämpölämmitysten toteutuneiden vuosien energioiden keskiarvojen perusteella määritettyjen ominaiskulutusten jakauma.

Taulukossa 10 esitetyistä sähkölämmitysten vuosien energioiden keskiarvoista ja ominaiskulutuksista voidaan huomata, että ne vaikuttaisivat olevan merkittävästi suurempia kuin muissa tutkimuksissa saadut keskimääräiset tulokset. Esimerkiksi Rimali [10] on tutkimuksessaan saanut sähkölämmittäjiksi ryhmittäytyneille liittymille ominaiskulutukseksi $153,3 \text{ kWh/m}^2$ ja Rouhiainen Kotitalouksien sähkönkäyttö 2011 -tutkimuksessa [16] huonekohtaisille sähkölämmityksille eri menetelmin myös noin 150 kWh/m^2 . Kotitalouksien sähkönkäyttö 2011 -tutkimuksesta on hyvä huomata, että siinä havaittiin vesikeskuslämmityksellisten kotitalouksien ominaiskulutusten olevan keskimäärin hieman suurempia kuin huonekohtaisten sähkölämmitysasiakkaiden. Myös ennen 1970-lukua rakennettujen sähkölämmitteisten rakennusten ominaiskulutukset olivat suurempia kuin uudempien. Huonekohtaista sähkölämmitystä käyttävissä talouksissa todettiin poltettavan enemmän puuta, minkä arveltiin selittävän eroa. Maalämpöön siirtyvien kotitalouksien voidaan olettaa suurella todennäköisyydellä olleen aikaisemmin vesikiertoisia sähkölämmityksiä, mikä voi osaltaan selittää saatua keskimääräistä suurempaa ominaiskulutusta. Tuloksesta voidaan myös päätellä, että paljon sähköenergiaa lämmitykseen kuluttavat pientaloasiakkaat ovat ymmärrettävästi kiinnostuneempia pienentämään lämmityksen käyttökuluja esimerkiksi vaihtamalla maalämpöpumppulämmitykseen. Maalämpölämmitykseen siirtyneet käyttöpaikat eivät tällöin myöskään edusta kovin hyvin tyypillistä sähkölämmittäjää. Maalämpölämmitykseen siirtyneiden sähkölämmittäjien aikaisempien vuosien toteutuneiden vuosien energioiden keskiarvot rakennuksen kerrosalan suhteen on esitetty kuvassa 16. Kuvasta voidaan havaita, että sähkölämmitteisten rakennusten vuosien energia luonnollisesti kasvaa rakennuksen koon kasvaessa ja että aineiston sähkölämmitysten vuosien energiat ja ominaiskulutukset ovat melko suuria. Kuvassa 17 on



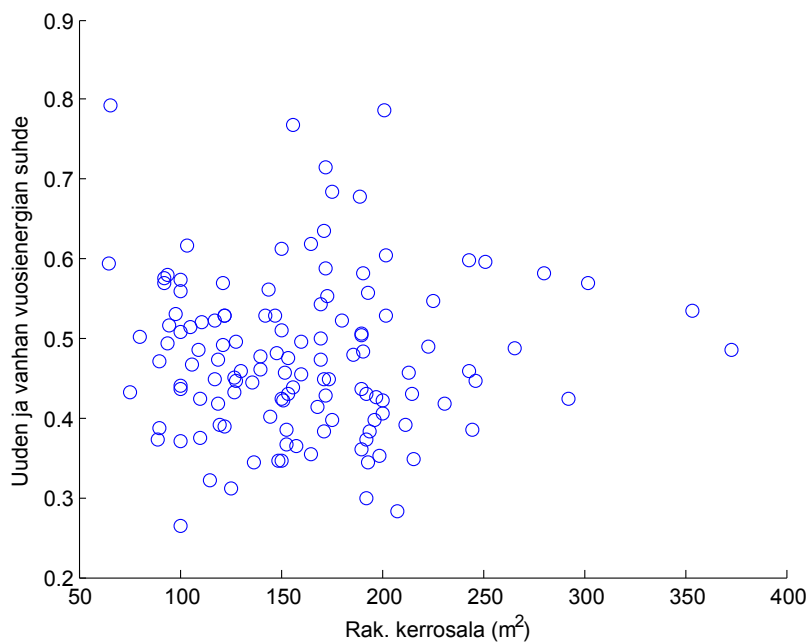
Kuva 16: Sähkölämmitysten, ei-sähkölämmitysten ja maalämpölämmitysten toteutuneiden vuosienenergioiden keskiarvot rakennuksen kerrosalan suhteen.

esitetty toteutuneiden uusien ja aikaisempien vuosienenergioiden keskiarvojen suhde rakennuksen kerrosalan suhteen. Tulosten perusteella näyttäisi myös siltä, että rakennuksen koosta riippumatta vuosienenergia on keskimäärin noin puolittunut niillä asiakkailta, jotka ovat vaihtaneet sähkölämmityksestä maalämpöön.

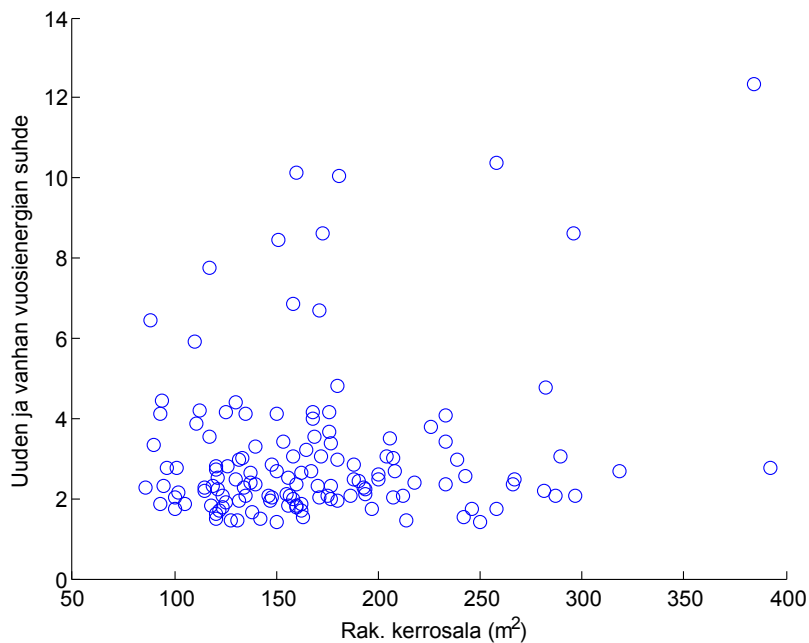
Muulla kuin sähköllä lämmittävien asiakkaiden ominaiskulutukset ja vuosienenergiat vaikuttavat melko tyypillisiltä. Keskiarvoon vaikuttaa tosin melko paljon muuttamat huomattavan pienet vuosienenergiat rakennuksen kokoon nähden. Tällöin myös maalämpöön siirryttäessä vuosienenergia on kasvanut muutamilla käyttöpaikoilla yli kahdeksankertaiseksi, mikä voidaan nähdä kuvasta 18. Kuvasta voidaan myös todeta, että myöskään ei-sähkölämmityksestä siirtyneillä käyttöpaikoilla ei vaikuttaisi olevan korrelaatiota sähkönkulutuksen lisääntymisen ja rakennuksen kerrosalan välillä.

Maalämpöasiakkaille saadut ominaiskulutukset vaikuttavat olevan lähellä muista lähteistä saatuja arvoja. Kotitalouksien sähkönkäyttö 2011 -tutkimuksessa [16] maalämpölämmitteiselle kotitaloudelle saatiin ominaiskulutukseksi rakennusvuodesta riippuen keskimäärin hieman yli 100 kWh/m^2 ja Kaartion [38] tutkimuksissa 2000–2004 rakennetuille pientaloille noin 100 kWh/m^2 ja 2005–2009 rakennetuille hieman alle 90 kWh/m^2 . Kuvasta 16 voidaan todeta odotettu tulos, että maalämpölämmitysten vuosienenergiat rakennuksen kerrosalan suhteen sijoittuvat sähkölämmitysten ja ei-sähkölämmitysten väliin.

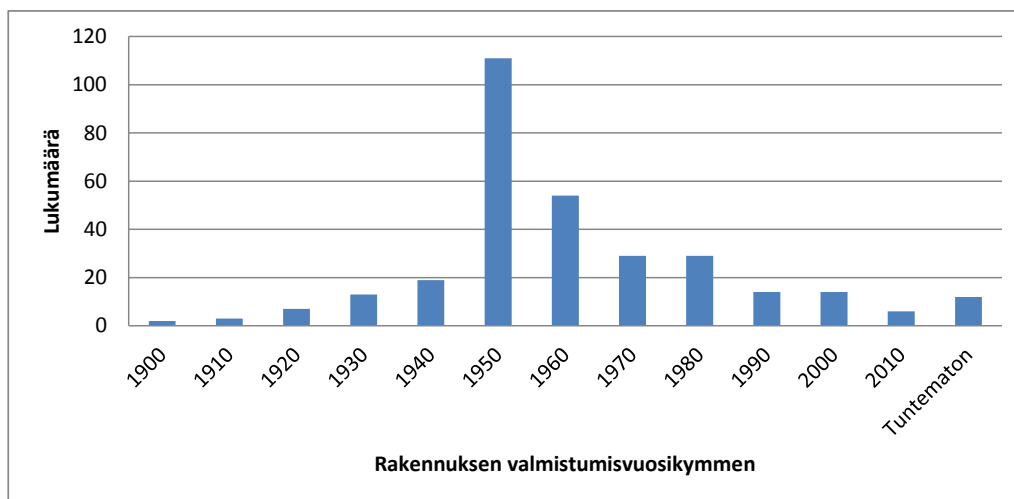
Maalämpöön muusta lämmitysmuodosta vaihtaneista käyttöpaikoista, jotka ovat ainoita liittymällään, tutkittiin Kiinteistöviraston vuoden 2012 aineistosta raken-



Kuva 17: Sähkölämmityksestä maalämpölämmitykseen vaihtaneiden käyttöpaikkojen toteutuneiden uusien ja vanhojen vuosienenergioiden keskiarvojen suhde rakennuksen kerrosalan suhteen.



Kuva 18: Ei-sähkölämmityksestä maalämpölämmitykseen vaihtaneiden käyttöpaikkojen toteutuneiden uusien ja vanhojen vuosienenergioiden keskiarvojen suhde rakennuksen kerrosalan suhteen.



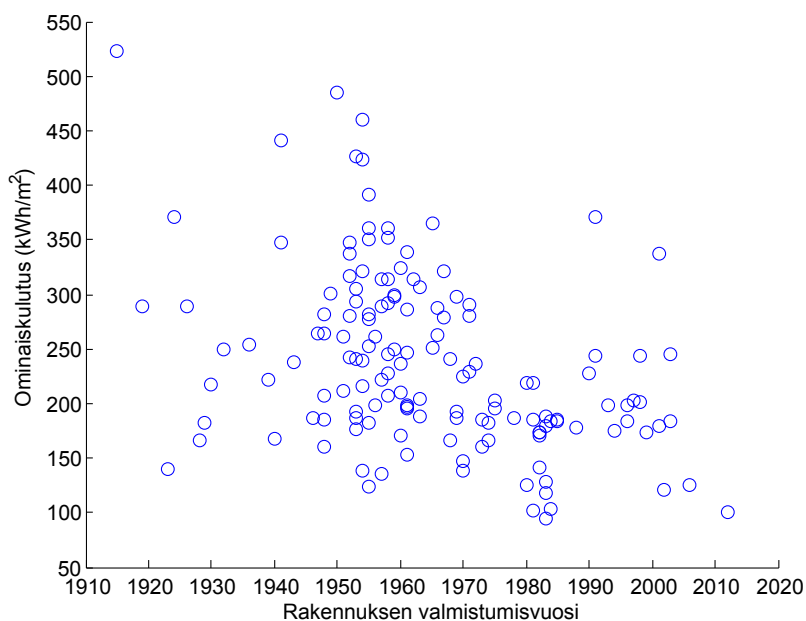
Kuva 19: Maalämpölämmitykseen vaihtaneiden kiinteistöjen, joiden liittymällä on vain yksi käyttöpaikka, rakennusten lukumäärät isoimman rakennuksen valmistumisvuoden mukaan vuosikymmenittäin. Kiinteistöjä yhteensä 313 kappaletta.

nusten valmistumisvuositietoja. Mikäli kiinteistöllä oli useampia rakennuksia, niin kerrosalaltaan suurimman rakennuksen rakennusvuosi valittiin analyysiin, koska se on usein asuinrakennus. Valmistumisvuosien jakauma on esitetty vuosikymmenen tarkkuudella kuvassa 19. Kuvasta havaitaan, että lähes puolet maalämpöön vaihtaneista rakennuksista on otettu käyttöön 1950- ja 1960-luvuilla. Mikäli näihin rakennuksiin ei ole tehty suurempia peruskorjauksia ennen maalämpöön siirtymistä, niin rakennusten korkea ikä voi olla myös yksi syy sähkölämmitysten suuriin ominaiskulutuksiin.

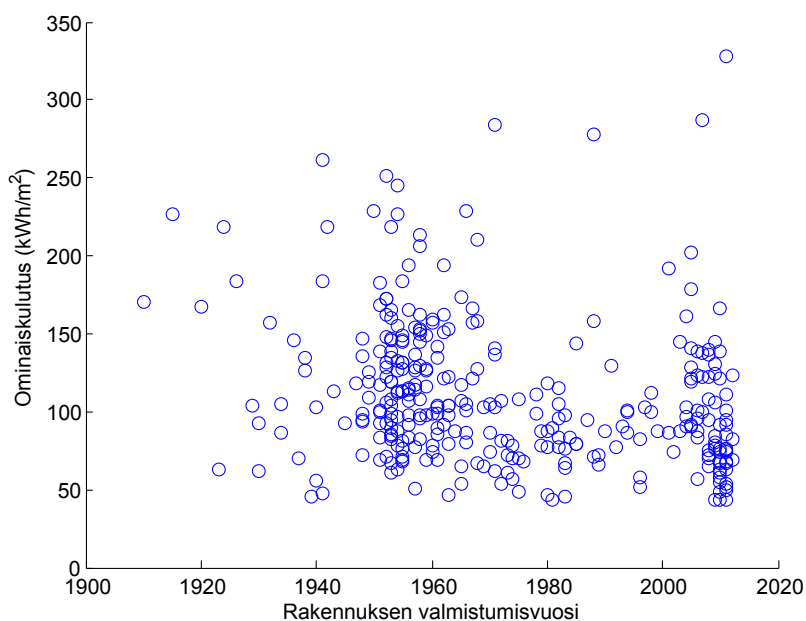
Tarkastelemalla sähkölämmityksestä maalämpöön vaihtaneiden käyttöpaikkojen sähkölämmityksen aikaisia ominaiskulutuksia rakennusvuoden perusteella, voidaankin aineiston vanhemmilla rakennuksilla havaita merkittävästi suurempia ominaiskulutuksia kuin uudemmilla. Tällaisten käyttöpaikkojen sähkölämmityksen aikaiset ominaiskulutukset rakennusvuoden suhteen on esitetty kuvassa 20. Käyttöpaikkojen, joiden rakennus on otettu käyttöön vuosien 1950–1969 välillä, ominaiskulutus on keskiarvoltaan ennen sähkölämmityksestä maalämpöön vaihtamista noin 268 kWh/m². Sen sijaan vuonna 1970 tai sen jälkeen käyttöön otettujen rakennusten sähkölämmityksen ajan ominaiskulutuksen keskiarvo on noin 188 kWh/m². Kotitalouksien sähkönkäyttö 2011 -tutkimuksessakin [16] saatiin ennen 1970-lukua rakennetuille vesikiertoisille sähkölämmityksille suurempia ominaiskulutuksen arvoja kuin myöhemmin rakennetuille. Kiinteistöviraston aineiston mukaan vesikiertoisen lämmitysjakotavan osuus tämän aineiston sähkölämmityksestä maalämpöön siirtyneiden käyttöpaikkojen rakennuksissa on noin 90 %, joten tuloksia voidaan pitää samansuuntaisina. Maalämpökäyttöpaikkojen ominaiskulutukset rakennusvuoden suhteen on esitetty kuvassa 21. Kuvasta voidaan myös havaita, että vanhemmilla rakennuksilla ominaiskulutus on keskimäärin hieman suurempi kuin uudemmilla. Vuosien 1950–1969 välillä rakennetuilla rakennuksilla ominaiskulutus on keskimäärin

121,9 kWh/m² ja vuonna 1970 ja sen jälkeen rakennetuilla 97,5 kWh/m².

Aineiston sähkö- ja maalämpölämmitteisten pientalojen melko suuria vuosienergioita selittänee myös niiden suuret kerrosalat. Keskiarvoinen rakennusten kerrosala maalämpölämmitteisillä ja ei-sähkölämmitteisillä käyttöpaikoilla oli noin 170 m² ja sähkölämmitteisillä noin 163 m². Mediaanipinta-alat olivat noin 160 m².



Kuva 20: Sähkölämmityksestä maalämpöön vaihtaneiden käyttöpaikkojen sähkölämmityksen aikaiset ominaiskulutukset rakennuksen käyttöönottovuoden mukaan.

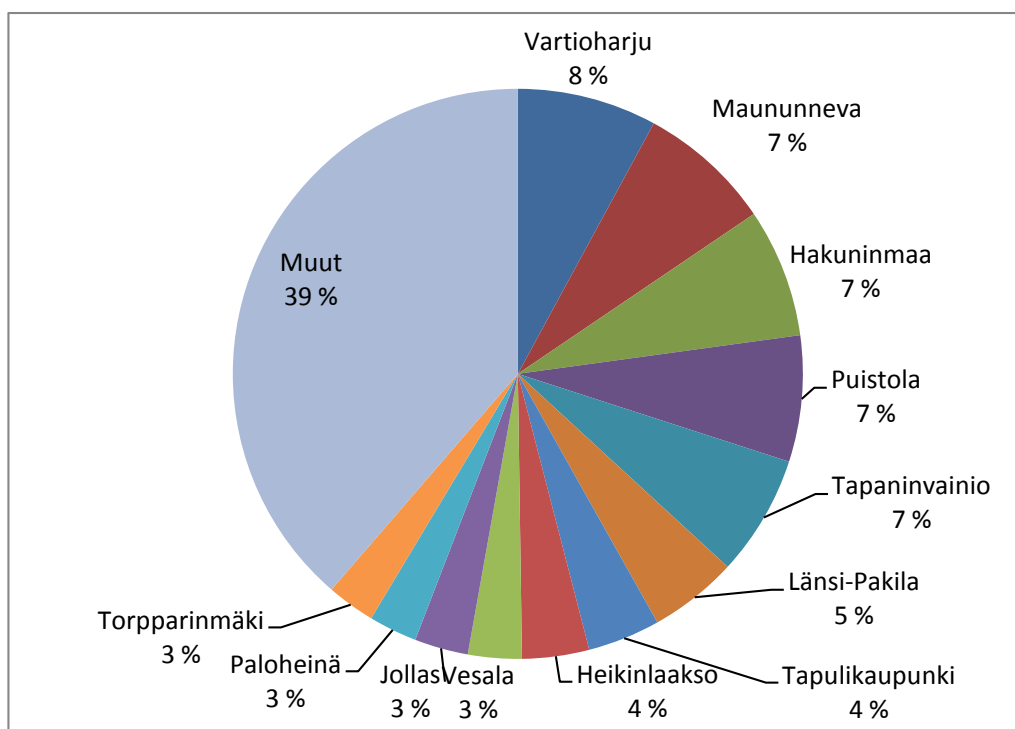


Kuva 21: Maalämpölämmityksellisten käyttöpaikkojen ominaiskulutukset rakennuksen käyttöönottovuoden mukaan.

6.6 Maantieteellinen jakautuminen Helsingissä

Maalämpöpumppujen jakautuminen kaupunginosittain on oleellinen tieto, kun otetaan maalämpöpumput huomioon pitkän aikavälin kuormitusennusteita tehtäessä. Maalämpöpumppukohteet sijoittuvat Helsingissä odotetusti pientalovaltaisille esikaupunkialueille, joissa on paljon muuta kuin kaukolämmitettyjä kerrostaloja. Kaikki ne maalämpökaivolliset alkuperäisen aineiston kiinteistöt, joilla oli yksi liittymä, ovat jakautuneet Helsingin kaupunginosa-alueisiin kuvan 22 kaltaisesti. Maalämpökaivot vaikuttavat jakautuneen hyvin hajanaisesti ja on paljon kaupunginosa-alueita, joilla on vain yksi lämpökaivollinen kiinteistö.

Suurin osa kuvan 22 liittymistä sisältää erillisiksi pientaloiksi luokiteltavia käyttöpaikkoja, joita tässä työssä on tutkittu. Analyysien perusteella maalämpökohteiksi valikoitujen käyttöpaikkojen alueiden jakauma on hyvin samankaltainen. Tämä johtuu luonnollisesti siitä, että suurin osa lämpökaivoista oli pientalovaltaisilla alueilla.



Kuva 22: Maalämpökaivojen jakautuminen kaupunginosa-alueittain. Yhteismäärä 657 kappaletta.

7 Maalämpöpumppujen yleistymisen vaikutus alueelliseen sähkönkäyttöön

Alueellisen sähkönkulutuksen ennusteita tehdessä pitäisi ottaa lukuisia muuttujia huomioon. Erilaisia skenaarioita tehtäessä usein joudutaankin ottamaan jokin tietty sähkönkäyttöön vaikuttava tekijä pääosaan ja tarkastelemaan vain sen vaikutuksia. Tässä luvussa tehdään neljälle Helsingin kaupunginosa-alueelle skenaariot, miten maalämpöpumppujen merkittävä yleistyminen vaikuttaisi pientalovaltaisten kaupunginosa-alueiden sähkönkäyttöön.

Lämpöpumppujen vaikutuksesta sähkönkäyttöön on tehty aikaisemminkin tutkimuksia. VTT on tehnyt laajan tutkimuksen SGEM-tutkimusohjelmaan lämpöpumppujen verkostovaikutuksista Suomessa vuonna 2030 [22]. Tutkimuksessa tehtiin skenaario, jossa otettiin huomioon mm. lämpöpumppujen myynnin kehitys ja uudet energiatehokkaammat rakennusmääräykset. Suomen asuntokannan sähköenergian kulutuksen uskotaan vähenevän ja tehontarpeen kasvavan lämpöpumppujen lisääntymisen seurauksena.

Helsingissä oli vuoden 2012 lopussa Tilastokeskuksen mukaan erillisiä pientaloja 19 898 kappaletta. Näistä 9 593 rakennusta käytti lämmitykseen sähköä, 4 825 öljyä tai kaasua, 4 016 kaukolämpöä, 459 maalämpöä ja loput kivihiiiltä, puuta, turvetta tai muita. [18] Uusia erillisiä pientaloja on valmistunut Helsingissä viime vuosina noin 200–300 vuosittain [39]. On ennustettu, että erityisesti öljylämmitykselliset pientalot tulevat vaihtamaan Suomessa maalämpöön. Kiinteistöviraston tietojen perusteella Helsingin sähkölämmitetyistä erillisistä pientaloista on sekä lukumäärältään että kerrosalaltaan noin 20 % vesikiertoisia sähkölämmityksiä. Vesikiertoisista öljy- ja sähkölämmityksistä vaihtavat rakennukset voivat siis kasvattaa maalämpölämmitettyjen erillisten pientalojen määrää Helsingissäkin merkittävästi. Tätä tukee esimerkiksi VTT:n tutkimuksen [22] arvio, jossa ennustetaan erillisten pientalojen lämmitysjärjestelmien jakaumaa vuonna 2030. Merkittävimmät muutokset kuvassa 2 esitettyyn nykyhetkeen ovat öljylämmityksen osuuden väheneminen arvoon 5 %, sähkölämmityksen 21 % ja maalämpöpumppujen osuuden kasvu arvoon 36 %. Erillispientaloja määrän ennustetaan kasvavan Suomessa noin 180 000 kappaleella vuosien 2010–2030 aikana, kun niitä oli vuoden 2010 lopulla 1 101 707 kappaletta. Uusissa erillispientaloissa maalämpöpumput hallitsevat markkinoita.

7.1 Tutkittavat kaupunginosa-alueet

Tämän työn skenaarioalueiksi valikoitiin neljä luvun 6.6 perusteella eniten pientalomaalämpökohteita sisältävää kaupunginosa-aluetta. Nämä alueet ovat Puistola, Maununneva, Hakuninmaa ja Vartioharju. Näistä kaupunginosa-alueista haettiin verkkotietokannasta kaikkien kyseisellä alueella sijaitsevien käyttöpaikkojen kuluksiryhmät sekä verkostolaskennassa käytetyt vuosienergiat.

Verkkotietojärjestelmän mukaan skenaarioalueilla erillisiksi pientaloiksi luokiteltujen käyttöpaikkojen lukumääriä ja vuosienenergioiden osuuksia suhteessa kaikkiin alueen käyttöpaikkoihin on esitetty taulukossa 12. Taulukosta huomataan, että pientalovaltaisina alueina jokaisen osa-alueen erillisten pientalojen osuus käyttöpaikoista on hyvin suuri. Alueiden vuosienenergiostakin valtaosa koostuu näistä käyttöpaikoista, paitsi Hakuninmaalla, jossa yksi käyttöpaikka on alueellaan hyvin hallitseva sähkönkäytön suuruudeltaan.

Taulukko 12: Skenaariossa käytettyjen kaupunginosa-alueiden sähkö- ja ei-sähkölämmitteisten pientalokäyttöpaikkojen määrien ja vuosienenergioiden osuudet kaikista alueen käyttöpaikoista.

	Maununneva	Hakuninmaa	Puistola	Vartioharju
Käyttöpaikkoja yht.	1 126	1 127	2 976	2 985
SL osuus	46,2 %	41,4 %	49,5 %	29,3 %
Ei-SL osuus	28,9 %	21,5 %	13,0 %	18,1 %
Vuosienenergia yht.	15,3 GWh	41,2 GWh	36,4 GWh	31,2 GWh
SL vuosienenergiaosuus	70,5 %	23,5 %	71,3 %	58,7 %
Ei-SL vuosienenergiaosuus	11,8 %	4,0 %	6,5 %	11,4 %

Maalämpölämmitykseen vaihtavien kohteiden määrää arvioitaessa tulee sähkö- ja ei-sähkölämmityksistä huomioida ainakin kaukolämmitetyt ja suorat sähkölämmitetyt käyttöpaikat, joita voidaan pitää epätodennäköisempinä maalämpölämmitykseen vaihtajina kuin muita. Suora sähkölämmitys on yleensä toteutettu sähköpatereihin tai lattialämmityksenä kaapeleilla, jolloin investointikustannukset vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään vaihdettaessa olisivat suuremmat. Huonekohtaiset sähkölämmitteiset rakennukset voivat olla myös hieman pienempiä, jolloin niiden lämmityksen käyttökulut eivät ole kovin suuret. Verkkotietojärjestelmän ja kiinteistöviraston tietojen perusteella näiden skenaarioalueiden sähkölämmitteisten käyttöpaikkojen määrästä noin 80 % on suoria sähkölämmityksiä tai osittain varaavia sähkölämmityksiä. Vesikiertoisia sähkölämmityksiä olisi näin ollen noin 20 %. Nämä vesikiertoiset sähkölämmitykset vastaavat myös noin 20 % sähkölämmitettyjen käyttöpaikkojen sähkönkulutuksesta.

Nykyisen rakennuskannan lisäksi pitkän aikavälin kuormitusennusteita tehtäessä on otettava huomioon uudet rakennukset. Kunnat tekevät rakentamisennusteita, joita esimerkiksi sähkönjakeluyhtiöt käyttävät hyödykseen. Tulevaisuuden rakennuskannan ennustamisessa tuo haasteensa myös sähkönkäytössä tapahtuvat muutokset. Nykyhetken kerrosalakohtainen ominaiskulutus ei välttämättä päde 20 vuoden päästä, mikäli alueen uusi rakennuskanta käyttääkin esimerkiksi paljon vähemmän sähköenergiaa lämmitykseen.

Tässä alue-ennusteessa päätettiin tehdä skenaariot normaalille ja nopealle maalämpölämmitysten lisääntymiselle. Vaikka nopea skenaario olisikin liian positiivinen ennuste, niin siinä voidaan helpoiten havaita, millaiseen suuntaan sähkönkäyttö mah-

dollisesti muuttuisi. Alueen kokonaisvuosienergioita tarkastellaan verkkotietojärjestelmästä saatujen vuosienergiatietojen avulla, ja niitä muokataan luvun 6.5 tulosten perusteella. Sähkönkulutuksen vuorokausirakenteen muutoksia tarkastellaan muodostamalla verkkotietojärjestelmän tietojen mukaiset SLY-kulutusmallit ja yhdistämällä siihen luvussa 6.4 määritetty keskimääräisen maalämpölämmityksen päivä rakenne. SLY-kuormitusmallinnus on esitelty luvussa 4.1. Koska maalämpökohteiden keskimääräinen tyyppikäyrä on muodostettu vuoden 2012 kalenterin ja lämpötilan mukaan, niin SLY-mallitkin muodostetaan lämpötilakorjauksin samalle vuodelle yhtälöillä (2) ja (3).

7.2 Skenaarion lähtötiedot ja oletukset

Skenaariossa tarvittavaa tietoa tulevasta rakentamisesta arvioitiin Helsingin kaupungin Kaupunkisuunnitteluviraston vuonna 2011 sisäiseen käyttöön tekemien rakentamisennusteiden pohjalta [40]. Rakentamisennuste on annettu myös Helen Sähköverkko Oy:n sisäiseen käyttöön. Vuodesta 2011 vuoteen 2030 saakka tehdyissä ennusteissa on arvioitu rakennettavat asuintalo- ja toimitilakerrosalat kaupunginosa-alueittain. Ennuste on tehty useita tietolähteitä käyttäen, mutta se ei ole toteuttamissuunnitelma ja ennusteen epävarmuus kasvaa luonnollisesti loppua kohden. Myös toimitilaennusteissa on paljon epävarmuutta. Nykytilanteena pidettävän vuoden 2010 asuntojen ja toimitilojen kerrosneliöt saatiin Helsingin aluesarjoista [39]. Toimitilojen määrän lisääntymistä ei odotettu merkittävästi kuin Maununnevan alueella. Toimitilojen sähkönkäytön rakenne voi olla vaihtelevaa, joten sen kohdentaminen tietyille kulutusryhmille on hankalaa. Ilman lisätietoa uudet toimitilat kohdennettiin tyypilliselle toimistoa kuvaavalle kulutusryhmälle, jolla kulutus keskittyy arkipäiviin. Taulukossa 13 on esitetty alueiden vuoden 2010 ja suunnitellut tulevat asuintalo- ja toimitilakerrosalat.

Taulukko 13: Tutkittavien kaupunginosa-alueiden vuoden 2010 lopun sekä vuosien 2011–2030 aikana suunnitellut kerrosneliöt jaoteltuna asuntoihin ja toimitiloihin. [39; 40]

	2010 lopussa		Uusia 2011–2030	
	Asunnot (m ²)	Toimitilat (m ²)	Asunnot (m ²)	Toimitilat (m ²)
Maununneva	115 093	14 774	34 900	7 400
Hakuninmaa	123 860	13 797	26 600	0
Puistola	296 256	32 570	13 300	0
Vartioharju	276 426	56 399	34 100	400

Skenaariossa uusien asuintalojen kerrosalat jaettiin pientaloihin sekä rivi- ja kerrostaloihin nykyisen rakennuskannan mukaan. Kohdentamisosuudet on esitetty taulukossa 14. Uusien rivi- ja kerrostalojen oletettiin käyttävän lämmitykseen kaukolämpöä. Uudet pientalot jaettiin skenaarion riippuen eri kerrostalojen suhteessa maalämpö-, sähkö-, ja kaukolämmityksiin. Kaukolämmityksellä tarkoitetaan tässä

yhteydessä kaikkia lämmitysmuotoja, jotka eivät käytä sähköä lämmitykseen. Eri skenaarioiden uusien pientalojen osuudet eri lämmitystyypeille on esitetty taulukossa 15. Sähkölämmityksille kohdistetut uudet pientalot jaettiin tasasuhteessa neljälle eri sähkölämmityskulutusryhmälle. Kaukolämmitykselle kohdistetun osuuden voidaan todeta olevan hieman positiivinen nykyisiin alueiden kaukolämmitysmääriin, sillä niiden osuudet vaihtelevat nykyisin näillä alueilla noin 4–17 % välillä. Uudisrakennusten vuosienergioita arvioitaessa käytettiin Larinkarin [5] ryhmittelyn tulosten perusteella saatuja tyypillisiä arvioita Helsingin kulutusryhmien ominaiskulutuksista: kaukolämmitykselle 48 kWh/m², sähkölämmitykselle 152 kWh/m² ja toimitiloille 128 kWh/m². Maalämpölämmitykselle käytettiin luvussa 6.5 esitettyjen ominaiskulutusten perusteella arvoa 100 kWh/m².

Taulukko 14: Tutkittavien kaupunginosa-alueiden asumiskäyttöön tarkoitettujen kerrosalojen jakaantuminen pien- ja rivi- sekä kerrostaloihin vuoden 2010 lopussa. [39]

Alue	Pientalot	Rivi- ja kerrostalot
Maununneva	86,2 %	13,8 %
Hakuninmaa	78,8 %	21,2 %
Puistola	62,0 %	38,0 %
Vartioharju	65,8 %	34,2 %

Taulukko 15: Normaalissa ja nopeassa skenaariossa oletetut uusien pientalojen kerrosalojen jakaantuminen eri lämmitysmuodoille.

Lämmitysmuoto	Normaali	Nopea
Maalämpö	50 %	80 %
Sähkölämmitys	25 %	10 %
Kaukolämpö	25 %	10 %

Nykyisen rakennuskannan pientalojen siirtymiseen maalämpöön tehtiin myös arviot eri skenaarioille. Sähkölämmityksistä siirtyvistä tehtiin oletus, että vain varaavat eli pääsääntöisesti vesikiertoiset sähkölämmityskäyttöpaikat vaihtaisivat maalämpöön. Luvun 6.5 mukaan lähes puolet aineiston perusteella maalämpöön siirtyneistä sähkölämmityksistä olisi verkkotietojärjestelmän mukaan ollut huonekohtaisia suoria sähkölämmityksiä. Näistä ei voida varmasti sanoa, onko kulutusryhmä ollut merkitty oikein verkkotietojärjestelmässä vai onko lämmityksenjakotapa muutettu vesikiertoiseksi esimerkiksi rakennuksen kunnostuksen yhteydessä. Skenaarioiden lämmitysmuotojen maalämpöön siirtyvien vuosienergioiden osuudet on esitetty taulukossa 16. Nykyisten rakennusten vuosienergioiden muutoksissa maalämpöön käytettiin luvussa 6.5 saatuja mediaanituloksia. Sähkölämmityksestä vaihtavien osuuden vuosienergiat kerrottiin 0,47:lla ja kaukolämmityksestä vaihtavien 2,5:lla.

Skenaariossa ei siis huomioitu huonekohtaisten sähkölämmitysten vaihtamista maalämpöön. Ilmalämpöpumput sen sijaan ovat lisääntyneet merkittävästi erityises-

Taulukko 16: Nykyisen pientalojen vuosienergioiden osuuden siirtyminen maalämpöön normaalissa ja nopeassa skenaariossa eri lämmitysmuodoilla.

Lämmitysmuoto	Normaali	Nopea
Sähkölämmitys (varaavat)	40 %	80 %
Kaukolämpö	40 %	80 %

ti huonekohtaisesti sähkölämmitetyissä pientaloissa, missä voi olla tulevaisuudessa merkittävää sähkönsäästöpotentiaalia. Näitä ei kuitenkaan otettu skenaariossa huomioon, vaan keskityttiin maalämpöpumppujen vaikutuksen arviointiin.

7.3 Kaupunginosa-alueiden sähkönkäytön muutokset

Skenaarioalueiden verkkotietojärjestelmän mukaisten kulutusryhmien ja vuosienergioiden perusteella tehtiin sähkönkäyttöennusteet eri maalämpöpumppujen määrillä. Skenaariossa käytettiin vuoden 2012 kalenteria ja kyseisen vuoden vuorokauden keskilämpötilojen kahden vuorokauden liikkuvaa keskiarvoa. Tietojen avulla laskettiin SLY-indeksisarjoilla yhtälöillä (2) ja (3) tunneittainen lämpötilakorjattu sähkönkulutus, johon yhdistettiin keskimääräisen maalämpökohteen tuntisarja skaalatuna skenaariota vastaavalla vuosienergialla. Jokaiselle kulutusryhmälle ominainen lämpötilakerroin on haettu verkkotietojärjestelmästä. Lämpötilakorjaus tehtiin jokaiselle vuoden tunnille, vaikkakaan sähkönkulutuksen lämpötilariippuvuus ei ole lineaarinen kaikilla lämpötila-alueilla jokaisella kulutusryhmällä. Yhtälössä (2) käytettiin vuoden tuntien määrän 8760 sijaan arvoa 8784 karkausvuoden takia. Vertailun vuoksi normaalin ja nopean maalämpöpumppujen lisääntymisskenaariota lisäksi tehtiin myös laskelma tilanteesta, jossa maalämpölämmitystä ei tulisi ollenkaan. Tällöin kaikki uudet rakennusneliöt jakaantuisivat nykyiselle rakennuskannalle. Uudet asuinkerrosalat kasvattaisivat asumiseen liittyvien kulutusryhmien vuosienergioita ja toimitilat nykyisten muiden kulutusryhmien vuosienergioita eri kulutusryhmien vuosienergioiden suhteessa.

Skenaarioalueiden sähköenergiankulutuksen ja mallinnetun huipputehon muutokset verrattuna nykytilanteeseen on esitetty taulukossa 17. Tutkittavilla alueilla huomataan, että sähkönkulutus ja pääsääntöisesti huipputeho kasvavat, mikä on ymmärrettävää uuden rakentamisen vuoksi. Vartioharjun alueen nykytilanteen, normaalin ja nopean skenaariota päiväenergiat on esitetty kuvassa 23, josta voidaan havaita sähkönkulutuksen kasvu skenaarioissa.

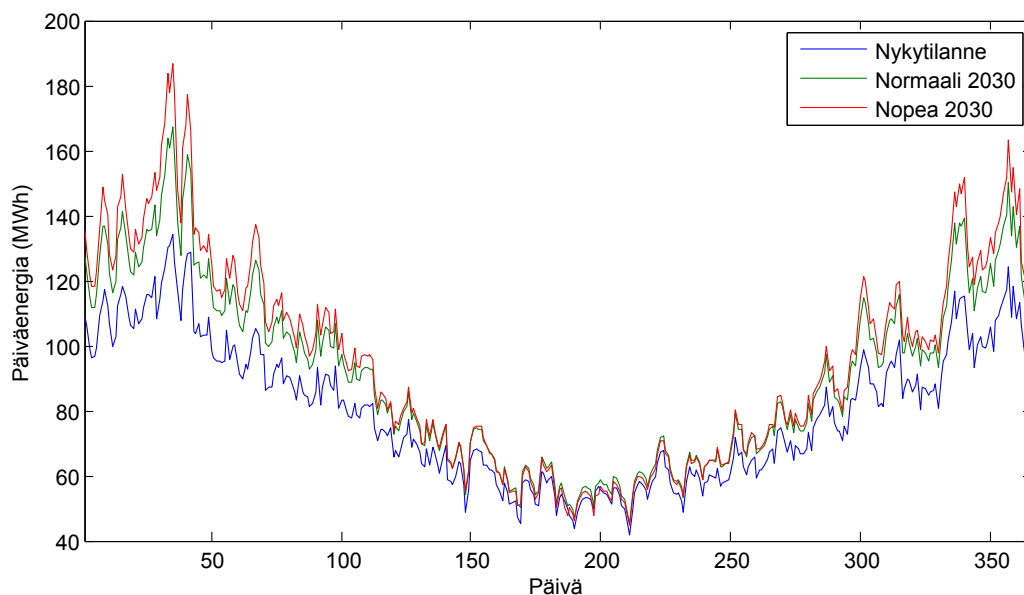
Huipputehon voidaan huomata pienenevän maalämpöskenaarioissa verrattuna tilanteeseen, jossa maalämpöä ei ole. Pientalovaltaisilla alueilla, joilla on merkittävästi yöaikaan varaavaa sähkölämmitystä, kulutus siirtyy yöltä tasaisemmin koko vuorokaudelle. Tällöin huipputehokin pienenee, kunnes huipputehon ajankohta on siirtynyt uudelle tunnille. Päiväsaikaisen kulutuksen tasaantuminen nähdään esimerkiksi Vartioharjun alueella kuvista 24a ja 24b, joissa on kuvattu päiväprofiilit

Taulukko 17: Tutkittavien alueiden sähköenergioiden ja huipputehojen muutokset eri skenaarioissa.

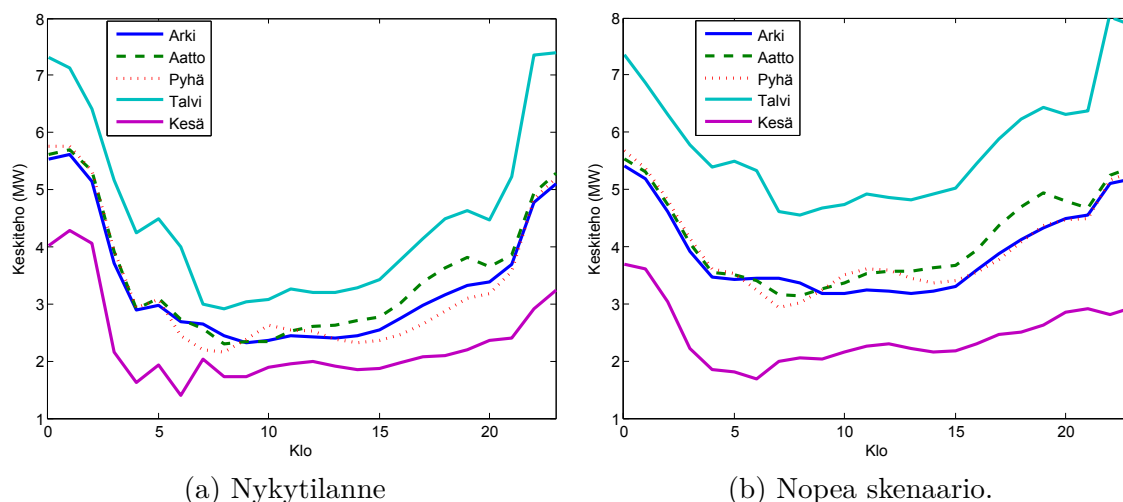
		Nykytilanne	Ilman MLP	Normaali	Nopea
Maununneva	Sähköenergia	14,3 GWh	133 %	133 %	137 %
	Huipputeho	5,1 MW	131 %	120 %	120 %
Hakuninmaa	Sähköenergia	39,9 GWh	107 %	107 %	109 %
	Huipputeho	7,5 MW	112 %	108 %	112 %
Puistola	Sähköenergia	33,9 GWh	104 %	104 %	105 %
	Huipputeho	12,2 MW	104 %	100 %	98 %
Vartioharju	Sähköenergia	29,3 GWh	111 %	114 %	119 %
	Huipputeho	9,1 MW	112 %	109 %	113 %

nykytilanteelle ja nopealle maalämpöskenaariolle. Erityisesti talvipäivien päiväprofiileista huomataan, kuinka päiväsaikainen sähkönkulutus kasvaa ja vuorokauden huippu- ja minimikulutusten välinen ero pienenee. Tutkittavien alueiden sähkö- ja kaukolämmityksen osuudet vaikuttavat melko paljon sähkönkäytön muuttumiseen maalämpöskenaarioissa.

Kun tutkittavien alueiden sähkönkäytön muutoksia tarkastellaan ilman uudisrakentamista, saadaan yksi uusi näkökulma maalämmön vaikutukselle alueellisessa sähkönkäytössä. Ilman uudisrakennuksia normaalin ja nopean skenaarion tapauksessa vaikuttaisi sähköenergian kulutus kasvavan maltillisesti. Indeksisarjan mukaan huipputeho vaikuttaisi pienevän vähän normaalissa skenaariossa ja kasvavan nopeassa



Kuva 23: Vartioharjun alueen päiväenergiat nykytilanteessa sekä normaalissa ja nopeassa skenaariossa.



Kuva 24: Vartioharjun alueen päiväprofiilit keskimääräiselle arki-, aatto-, pyhä-, kesä- ja talvipäivälle nykytilanteessa ja nopeassa skenaariossa.

skenaariossa hieman normaalista. Puistolassa nopealla skenaariolla ilman uudisrakennuksia huipputeho laskee edelleen, kuten tapahtui uudisrakennusten kanssa.

Skenaarioiden tuloksia arvioitaessa on huomioitava tiettyjä epätarkkuuksia ja epävarmuustekijöitä. Skenaario ilman maalämpöä ei ole täysin vertailukelpoinen muiden kanssa, koska ominaiskulutukset ja kohdentukset kulutusryhmille on tehty eri tavoin kuin maalämpöskenaarioissa. Maununnevan toimitilaneliöiden kohdentaminen on myös epävarmaa, sillä niiden ryhmää ei voitu tietää. Maununnevalle on myös suunniteltu rakennettavaksi jäähalli, joka olisi merkittävän suuri pistemäinen sähkökuorma. Tätä jäähallia ei otettu näissä skenaarioissa erikseen huomioon. Ei ole myöskään varmaa, onko kyseinen jäähalli jo laskettu suunniteltujen toimitilaneliöiden määrään. Indeksisarjoilla tehty tunneittainen mallinnus voi myös poiketa todellisesta sähkökäytöstä, sillä kaikkien käyttöpaikkojen kulutusryhmät eivät enää välttämättä vastaa esimerkiksi nykyistä lämmitystyyppiä. Myöskään SLY-kulutusryhmien indeksisarjojen päiväprofiilit ja lämpötilariippuvuudet eivät kaikilla kulutusryhmillä enää ole nykyistä sähkökäyttöryhmää vastaavia. Skenaario on tehty myös vuoden 2012 eikä normaalivuoden lämpötilojen avulla, mikä osaltaan vaikuttaa tulosten arviointiin.

7.4 Merkitys sähkömarkkinaosapuolille

Maalämpölämmitysten lisääntymiseen varautuminen riippuu paljon tarkasteltavan alueen kulusrakenteesta. Maalämpölämmityksiä tulee näillä näkymin ottaa huomioon lähinnä pientalovaltaisilla alueilla, mutta kuten tutkittavista alueistakin huomattiin, myös pientaloalueiden skenaarioiden tulokset poikkeavat jonkin verran toisistaan. Paljon merkitystä sähkökäyttöön on toteutuvalla uudisrakentamisen määrällä suhteessa nykyiseen rakennusmäärään. Normaalissa skenaariossa sähköenergian kokonaiskulutuksessa ei näyttäisi olevan kovin merkittäviä eroavaisuuksia verrat-

tuna ilman maalämpöpumppuja tehtyyn skenaarioon. Huipputeho näyttäisi jäävän hieman pienemmäksi kuin ilman maalämpöpumppuja tehdyssä skenaariossa. Sähköenergian kulutus todennäköisesti vähenisi, mikäli suorat sähkölämmittäjät ottaisivat ilmalämpöpumppuja lisääntyvissä määrin käyttöön lähinnä lämmitystä varten.

Tutkittavien alueiden päiväprofileissa merkittävin muutos näkyy nimenomaan yöaikaisen sähkönkulutuksen siirtymisenä myös päiväajalle. Tästä seuraa erityisesti talvisin vuorokauden huippu- ja minimitehon erotuksen pienenemistä, jolloin kulutus on vuorokauden aikana tasaisempaa. Asiakkaalla varaavasta sähkölämmityksestä maalämpöön vaihtaminen saattaa myös tarkoittaa yleensä kaksiaikahintaisesta sähkösovimuksesta luopumista. Maalämpölämmitys käyttää sähköenergiaa tasaisesti koko vuorokauden aikana, joten yö sähkösovimuksen hinta ei välttämättä ole enää merkittävästi edullisempi, kun sähköenergiankulutus laskee maalämpöön siirtyäessä. Sähköasematasolla nämä muutokset eivät välttämättä kuitenkaan vielä näy, mikäli sähköaseman syöttämiin alueisiin kuuluu hyvin paljon suurta palvelukulutusta. Tämä on tyypillistä esimerkiksi kaupungeissa, joissa pientaloalueiden lähellä on palvelukeskittymä.

Älykkäiden sähköverkkojen tutkimuksessa on myös ollut kiinnostusta sähkökuormien kysynnänjoustoon. Tämän tarkoituksena olisi, että joitakin kuormatyyppisiä voitaisiin siirtää halvemman hinnan tai sähköverkon kevyemmän käyttötilanteen ajalle. Yöaikaan varaavien sähkölämmitystä käyttävien käyttöpaikkojen lämmitystä pystytään hyvin etäohjaamaan. Tällaiset joustavat kuormat tosin vähenevät, mikäli varaavat sähkölämmitykset vaihtuvat maalämpölämmityksiin.

8 Yhteenveto

Sähkönkulutuksen pitkän aikavälin ennustamista varten tarvitaan tietoja mahdollisesti lisääntyvistä uusista kuormista ja niiden sähkökäytöstä. Pientuotannon ja sähköautojen lisäksi lämpöpumppujen odotetaan yleistyvän nopeasti osana kotitalouksien lämmitysjärjestelmiä, joten niiden sähkökäyttö tulee tuntea kuormituksia mallinnettaessa. Lämpöpumpuista erityisesti maalämpöpumput vaikuttavat paljon niitä käyttävien kotitalouksien sähköenergian ja -tehon tarpeeseen.

Etäluettavat tunneittaiset sähkönkulutustiedot antavat mahdollisuuden seurata yksittäisten asiakkaiden sekä esimerkiksi kaupunginosa-alueen sähkökäyttöä. Näiden tietojen avulla olisi hyvä myös pystyä havainnoimaan sähkökäytössä tapahtuvia muutoksia, koska esimerkiksi lämmitystavan muutoksesta tai sähköauton hankkimisesta ei tule ilmoitusta sähköverkkoyhtiölle. Tällöin sähkökäytön mallinnusta saateetaan jatkaa virheellisillä malleilla, jotka eivät enää vastaa käyttöpaikkojen nykyistä sähkökäyttöä.

Tässä työssä etsittiin Helen Sähköverkko Oy:n verkkovastuualueen sähkökäyttöpaikoista maalämpölämmitystä käyttäviä erillisiä pientaloja. Kiinteistövirastolta saadut lämpöporakaivolliset kiinteistöt yhdistettiin sähköliittymiin, joihin kuuluvien käyttöpaikkojen tuntisarjat, vuosienergiat ja muut käyttöpaikalle tallennetut tiedot haettiin asiakas- ja verkkotietojärjestelmistä.

Työssä kartoitettiin muutoksen tunnistamiseen käyviä menetelmiä, joita pystyi käyttämään lineaarisiin regressiomalleihin. Ns. ennustavaa Chow-testiä käytettiin käyttöpaikkojen vuosienergioille muodostettuun lineaariseen regressiomalliin, jonka selittävänä tekijänä oli vuoden lämmitystarveluku. Testin tarkoituksena oli löytää maalämpökaivollisten kiinteistöjen käyttöpaikkojen sähkön vuosienergian ja lämmitystarpeen suhteesta merkittäviä muutoksia. Havaittujen käyttöpaikkojen muutosa-jankohdan ja kohteiden järkevyyttä maalämpökohteiksi arvioitiin ilmoitettujen porauspäivämäärien ja vuosienergioiden suuruuden perusteella. Menetelmällä saatiin aineistoksi 506 maalämpökäyttöpaikkaa, joista 204 olisi vaihtanut sähkölämmityksestä ja 215 ei-sähkölämmityksestä. Jäljelle jääneet luokiteltiin uudisrakennuksiksi.

Maalämpölämmityksellisiä käyttöpaikkoja yritettiin erottaa muista kulutusryhmistä käyttämällä pääkomponenttianalyysiä ja K-means -ryhmittelyä käyttöpaikkojen tuntisarjoille. Aineistona käytettiin aikaisemmin löydettyjen maalämpökohteiden lisäksi 847 satunnaisesti valitun Pakilan alueen käyttöpaikan vuoden 2012 tuntisarjoja. Analyysit suoritettiin tuntisarjoille, joista oli poistettu kulutuksen kokoinformaatio. Ryhmittelyn tuloksena löydettiin ryhmät kaukolämmityksille, kiinteistömittauksille, suorille sähkölämmityksille ja varaaville sähkölämmityksille. Tällä aineistolla ja menetelmällä matemaattinen ryhmittely ei pystynyt erottamaan suoria sähkölämmityksiä ja maalämpölämmityksiä toisistaan, vaan luokitteli ne samaan ryhmään. Suoria sähkölämmityksiä ja maalämpölämmityksiä yritettiin myös ryhmitellä tekemällä pääkomponenttianalyysi ja K-means -ryhmittely ainoastaan niille. Muodostuneista kahdesta ryhmästä kumpikaan ei osoittautunut selkeästi maalämpölämmi-

tysryhmäksi.

Keskiarvoisen maalämpökäyttöpaikan päiväenergioille muodostettiin lineaarinen regressiomalli, jonka selittävinä tekijöinä käytettiin vuorokauden keskilämpötilan kahden vuorokauden liikkuvaa keskiarvoa, päivän pituutta ja päivän tyyppiä. Muodostetusta mallista havaittiin kylmimpien päivien energiankulutuksen kasvavan epälineaarisesti, mikä viittaisi aineistossa esiintyvän osatehoisia maalämpöpumppuja. Lämpötilan kylmimpien ja lämpimimpien lämpötilojen epälineaarinen vaikutus päiväenergioihin otettiin mallissa huomioon tekemällä lämpötilan vaikutus paloittain lineaarisina, jolloin malli säilyi lineaarisena. Helsingin maalämpökohteista muodostetun mallin kertoimien standardoituja arvoja verrattiin E.ON Kainuun Sähköverkko Oy:n 25 maalämpökohteesta muodostetun samanlaisen mallin kertoimiin, ja todettiin mallien kertoimien arvot lähes samansuuruisiksi. HSV:n aineiston regressiomallin avulla arvioitiin maalämpökäyttöpaikan lämmitykseen vaadittavan sähköenergian osuuden olevan noin 37,1 % vuosienergiasta.

Maalämpöön vaihtaneita käyttöpaikkoja analysoitaessa havaittiin, että muusta kuin sähkölämmityksestä maalämpöön siirtyneen vuosienergia muuttuu keskiarvolta 3,1-kertaiseksi ja mediaanilta 2,5-kertaiseksi. Sähkölämmityksestä siirtyneen vuosienergia muuttuu keskiarvolta 0,48-kertaiseksi ja mediaanilta 0,47-kertaiseksi. Muutosten suuruudella ei havaittu juurikaan olevan korrelaatiota käyttöpaikalle kuuluvien rakennusten kerrosalan kanssa. Keskiarvoisiksi ominaiskulutuksiksi saatiin ei-sähkölämmitykselle 47 kWh/m², sähkölämmitykselle 239 kWh/m² ja maalämpölämmitykselle 112 kWh/m². Mediaanit olivat 39 kWh/m², 222 kWh/m² ja 101 kWh/m². Muiden kuin sähkölämmityksen ominaiskulutukset ovat samansuuruisia kuin muisakin tutkimuksissa saadut tulokset. Aineiston sähkölämmitysten tavanomaista suurempien ominaiskulutuksien syyksi voidaan epäillä vanhaa rakennuskantaa ja vesikiertoista lämmitysjärjestelmää. Suuren sähkönkulutuksen vuoksi nämä sähkölämmittäjät ovat todennäköisesti osaltaan päättäneet vaihtaa maalämpölämmitykseen. Tämän takia aineiston sähkölämmittäjät eivät välttämättä edusta keskimääräistä sähkölämmitysasiakasta.

Maalämpölämmitykset ovat Helsingissä yleistyneet lähinnä pientalovaltaisilla alueilla. Tässä työssä arvioitiin neljän pientalovaltaisen kaupunginosa-alueen tulevaisuuden sähkönkäyttöä erilaisilla maalämpöpumppujen yleistymisnopeuksilla. Skenaarioissa otettiin huomioon suunniteltu asuin- ja toimitilarakentaminen alueille ja tehtiin oletuksia uusien asuinrakennusten lämmitysmuodoista ja vanhojen rakennusten maalämpölämmitykseen vaihtamisista. Alueiden tunneittaista sähkönkäyttöä arvioitiin nykyisten käyttöpaikkojen kulutusryhmien ja vuosienergioiden avulla käyttämällä SLY-indeksisarjoja vuoden 2012 kalenterin ja lämpötilan mukaan.

Alueiden sähkönkäytön muutokset riippuvat paljon tulevasta rakentamisesta ja nykyisestä käyttöpaikkojen kulutusryhmien rakenteesta. Maalämpölämmityksen lisääntyminen vaikuttaisi näissä skenaarioissa pääsääntöisesti kasvattavan hieman kaupunginosa-alueiden sähköenergian kulutusta verrattuna tilanteeseen, jossa maalämpölämmitys ei yleistyisi. Huipputeho sen sijaan näyttäisi maalämpölämmitysten yleistyessä pienentyvän vastaavaan tilanteeseen verrattuna.

Pitkän tähtäimen alueellisia kuormitusennusteita tehtäessä arvioidaan uudisrakentamisen sähkönkulutusta ja lämmitystavan vaihtajien sähkönkäytön muutoksia. Tämän työn tulosten pohjalta voidaan arvioida maalämpöön vaihtavien käyttöpaikkojen vuosienergioiden muutoksia, käyttää maalämpölämmittäjille tyypillisiä ominaiskulutuksia ja arvioida maalämpölämmitysten päiväenergioiden suuruuksia eri lämpötiloissa. Helsingin alueella aineistoa oli kuitenkin vielä liian vähän maalämpöpumppujen vuosittaisen lisääntymisnopeuden arvioimiseen.

Tuntimittausten ajallisesti suhteellisen vähäisen määrän ja tuntisarjoissa ilmenneiden puuttuvien arvojen vuoksi ei sähkönkäytön muutoksia pystytty luotettavasti havainnoimaan päiväenergioilla. Tuntisarjojen avulla voitaisiin tulevaisuudessa myös yrittää laatia tuntikeskitetun regressiomalleja käyttöpaikoille ja korvata nykyisiä mallinnuksissa käytettyjä indeksisarjoja.

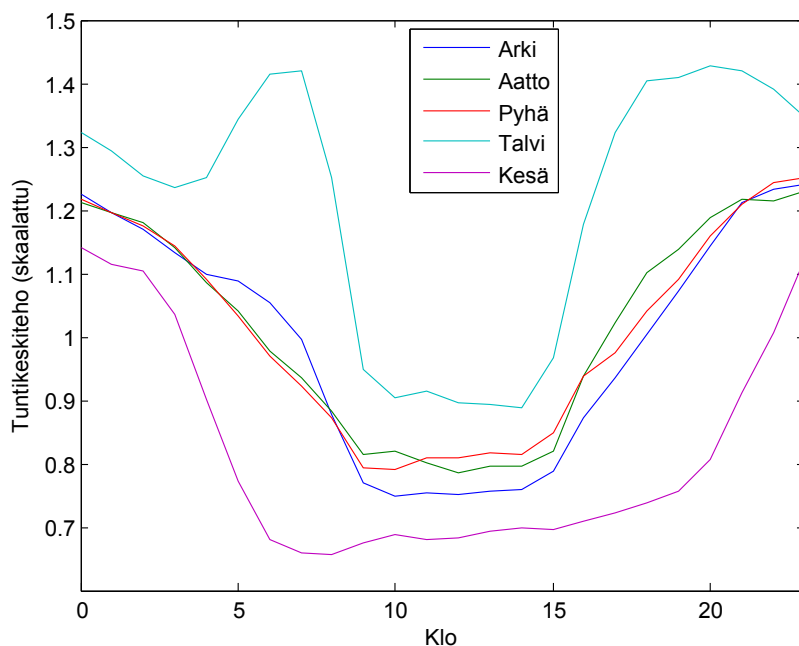
Viitteet

- [1] Helsingin Energia. Vuosikertomus 2012. [Viitattu 5.8.2013]. Saatavissa: http://www.helen.fi/pdf/Vuosikertomus_2012.pdf.
- [2] CLEEN Oy. Yrityksen verkkosivut. [Viitattu 18.7.2013]. Saatavissa: <http://www.cleen.fi/fi>.
- [3] Valtioneuvosto. Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta (66/2009). [Viitattu 26.8.2013]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090066>.
- [4] Anni Sarvaranta. Älykkäät sähköverkot ja niiden kehitys Euroopan unionissa ja Suomessa. Selvitystyö, Aalto-yliopisto, Energiatekniikan laitos, 2010. 68+8 s. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/alykkaat_sahkoverkot_2010_diplomityo_anni_sarvaranta.pdf.
- [5] Joonas Larinkari. Palvelusektorin sähkönkäytön tutkiminen tuntimittaustietojen avulla. Diplomityö, Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos, Espoo, 2012. 10+89 s.
- [6] E.ON Kainuun Sähköverkko Oy. E.ON uutiset - sähköverkkotoiminta 2012. [Viitattu 5.8.2013]. Saatavissa: <http://www.eon.fi/SiteCollectionDocuments/E.ON-uutiset-Sahkoverkkotoiminta-2012.pdf>.
- [7] Helsingin Energia. Yrityksen verkkosivut. [Viitattu 9.8.2013]. Saatavissa: <http://www.helen.fi>.
- [8] Milla Kallonen. Etäluennan tuntimittausten hyödyntäminen sähköjakeluverkon suunnittelussa. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos, Espoo, 2009. 77 s.
- [9] Matti Koivisto, Pirjo Heine, Ilkka Mellin, ja Matti Lehtonen. Clustering of connection points and load modeling in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(2):1255–1265, 2013. ISSN 0885-8950. doi: 10.1109/TPWRS.2012.2223240.
- [10] Ville Rimali. Etäluettavan energiamittaustiedon hyödyntäminen alueellisissa kuormitusennusteissa. Diplomityö, Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos, Espoo, 2011. 11+103 s.
- [11] Antti Mutanen, 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. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2011.2142198.
- [12] Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus. 4. vuosineljännes 2012. [Viitattu 25.3.2013]. Saatavissa: http://www.tilastokeskus.fi/til/ehk/2012/04/ehk_2012_04_2013-03-22_tie_001_fi.html.

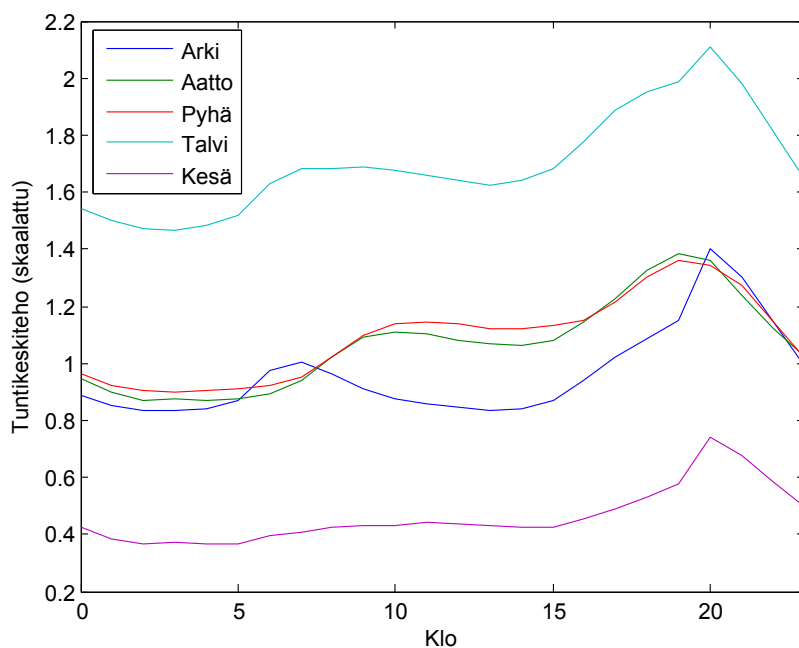
- [13] Virve Rouhiainen. Sähkönmyyjän raportti asiakkaan energiankäytöstä. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/sahkon_kayttoraportti_loppuraportti_liitteineen_20100609.pdf, 2010.
- [14] Motiva. Mitä ovat lämmitystarveluvut? [Viitattu 18.7.2013]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/julkinen_sektori/energiankayton_tehostaminen/kiinteistojen_energianhallinta/kulutuksen_normitus/mita_ovat_lammitystarveluvut.
- [15] Anssi Seppälä. *Load research and load estimation in electricity distribution*. Väitöskirja, Technical Research Centre of Finland, Espoo, 1996. 118+19 s. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1996/P289.pdf>.
- [16] Adato Energia. Kotitalouksien sähkönkäyttö 2011. Saatavissa: https://www.tem.fi/files/35856/Kotitalouksien_sahkonkaytto_2011_raportti.pdf, 2013.
- [17] Motiva. Energiatodistus. [Viitattu 18.7.2013]. Saatavissa: <http://energiatodistus.motiva.fi/>.
- [18] Suomen virallinen tilasto (SVT): Rakennukset ja kesämökkit. [Viitattu 14.6.2013]. Saatavissa: <http://www.tilastokeskus.fi/til/rakke/index.html>.
- [19] Tilastokeskus: Energian hinnat 4. vuosineljännes 2012. [Viitattu 6.5.2013]. Saatavissa: http://www.tilastokeskus.fi/til/ehi/2012/04/ehi_2012_04_2013-03-20_tie_001_fi.html.
- [20] Göran Koreneff. Kuormituskäyrien hyödyntäminen tulevaisuudessa. Tutkimusraportti, VTT, 2010.
- [21] Motiva. Lämpöä omasta maasta. [Viitattu 7.2.2013]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/6058/Lampoa_omasta_maasta.pdf.
- [22] Ari Laitinen, Maija Ruska, ja Göran Koreneff. Impacts of large penetration of heat pumps on the electricity use. Tutkimusraportti, VTT, 2011.
- [23] Suomen ympäristökeskus. Ympäristöopas - lämpökaivo. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=108367>, 2009.
- [24] Jussi Tuunanen. Lämpöpumppujen vaikutukset sähköverkkoliiketoiminnan kannalta. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta, 2009. 122+1 s.
- [25] Helsingin kaupungin Rakennusvalvontavirasto. Lämpökaivon poraamiseen tarvitaan toimenpidelupa. [Viitattu 19.8.2013]. Saatavissa: http://www.hel.fi/hki/rakvv/fi/uutiset/rakvv_lampokaivon_poraamiseen_tarvitaan_toimenpidelupa.
- [26] Sähköinfo Oy. Sähköala 1–2 2013.

- [27] Hannu-Pekka Hellman, Matti Koivisto, ja Matti Lehtonen. Photovoltaic power generation modeling. In *NORDAC 2012, Tenth Nordic Conference on Electricity Distribution System Management and Development*, 2012.
- [28] Minna Paavola. Verkkoon kytkettyjen aurinkosähköjärjestelmien potentiaali Tampereella. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2013. 94 s.
- [29] Antti Alahäivälä. Sähköautojen lataaminen ja sen vaikutus kaupunkialueen jakelumuuntajiin. Diplomityö, Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos, Espoo, 2012. 8+93 s.
- [30] Helge Seljeseth, Henning Taxt, ja Tarjei Solvang. Measurements of network impact from electric vehicles during slow and fast charging. In *22nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm, 10–13 June 2013*, 2013.
- [31] Ilkka Mellin. Tilastolliset menetelmät: Lineaarinen regressioanalyysi. [Viitattu 22.8.2013]. Saatavissa: <http://math.aalto.fi/opetus/sovtoda/oppikirja/Regranal.pdf>. Opetusmoniste.
- [32] William C. Forsythe, Edward J. Rykiel Jr., Randal S. Stahl, Hsin-i Wu, ja Robert M. Schoolfield. A model comparison for daylength as a function of latitude and day of year. *Ecological Modelling*, 80(1):87–95, 1995.
- [33] Bruce E. Hansen. The new econometrics of structural change: Dating breaks in U.S. labor productivity. *Journal of Economic Perspectives*, 15(4):117–128, 2001.
- [34] Gregory C. Chow. Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions. *Econometrica*, 28(3):591–605, 1960.
- [35] Chris Brooks. *Introductory Econometrics for Finance*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2nd edition, 2008. ISBN 978-0-521-69468-1.
- [36] Merkebu Degefa. Energy efficiency analysis of residential electric end-uses: Based on statistical survey and hourly metered data. Diplomityö, Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos, Espoo, 2010. 7+74 s.
- [37] Ilmatieteen laitos. Säähavaintotietoja. Haettu: 19.6.2013.
- [38] Timo Kaartio. Alueellisen sähkökuorman ennustamisen kehittäminen. Diplomityö, Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos, Espoo, 2010. 8+107 s.
- [39] Helsingin seudun aluesarjat tilastokanta, Tilastokeskus, ja Rakennusvalvontavirasto. [Viitattu 19.8.2013]. Saatavissa: <http://www.aluesarjat.fi>.
- [40] Helsingin kaupungin Kaupunkisuunnitteluvirasto. Jussi Mäkinen ja Ilkka Oikarinen. Rakentamisennuste osa-alueittain 2011–2030. Sisäinen raportti, 2011.

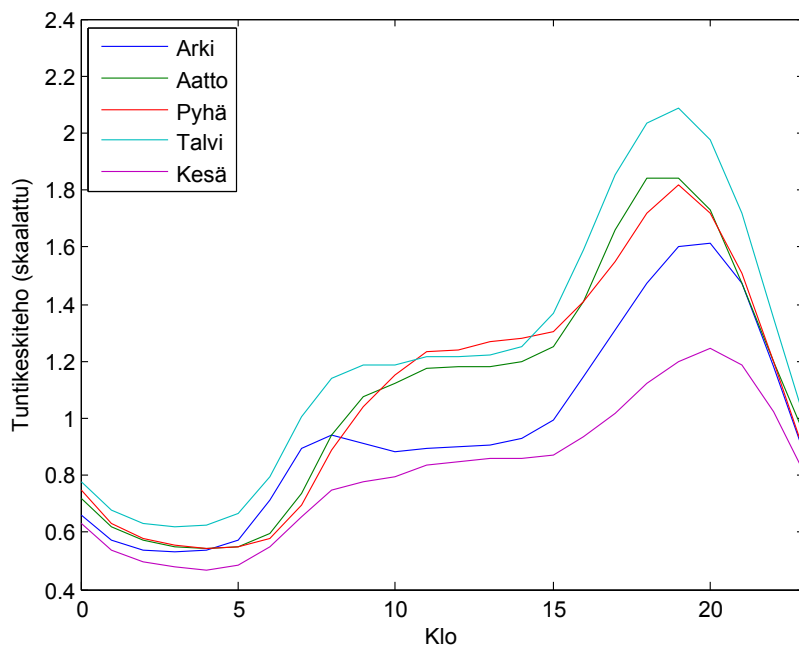
Liite A: Matemaattisen ryhmittelyn tuloksena saatujen ryhmien keskimääräiset päivärakenteet



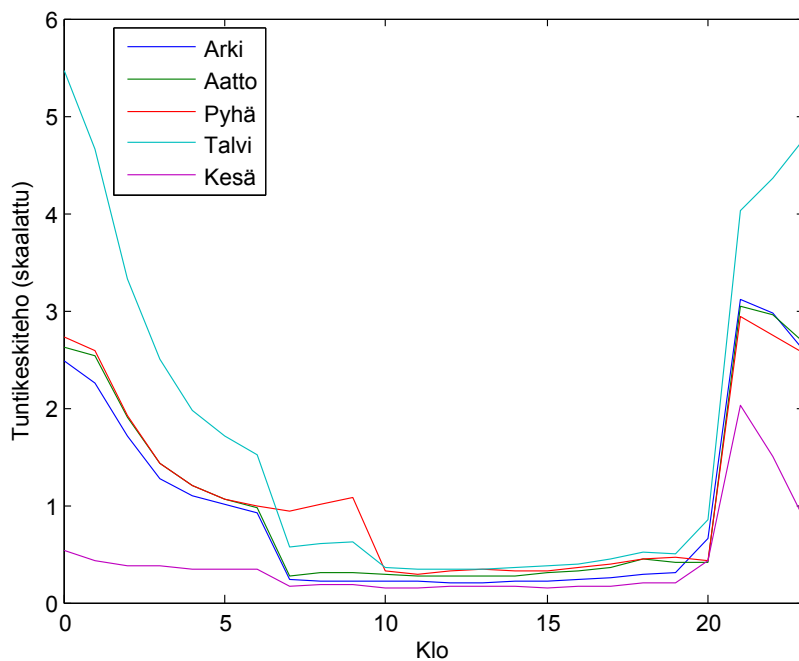
Kuva A.1: Kiinteistömittaus-ryhmän päivärakenteet.



Kuva A.2: Suora sähkölämmitys -ryhmän päivärakenteet.

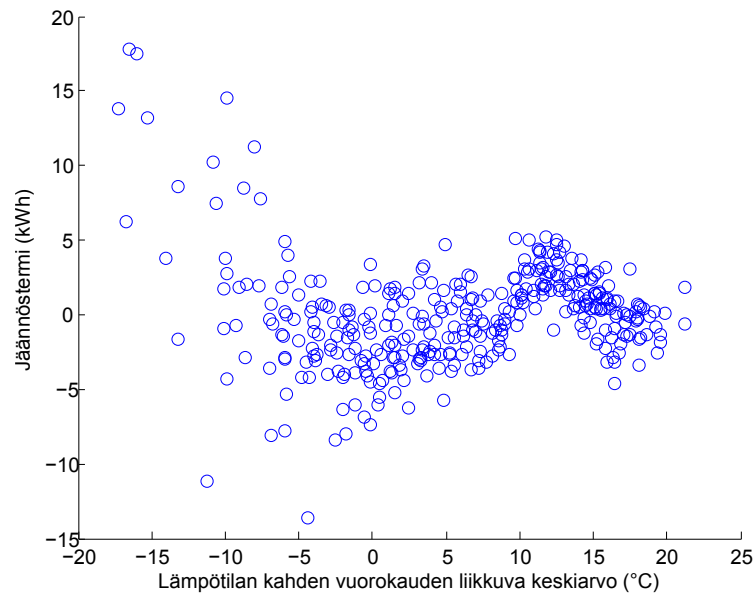


Kuva A.3: Kaukolämmitys-ryhmän päivärakenteet.

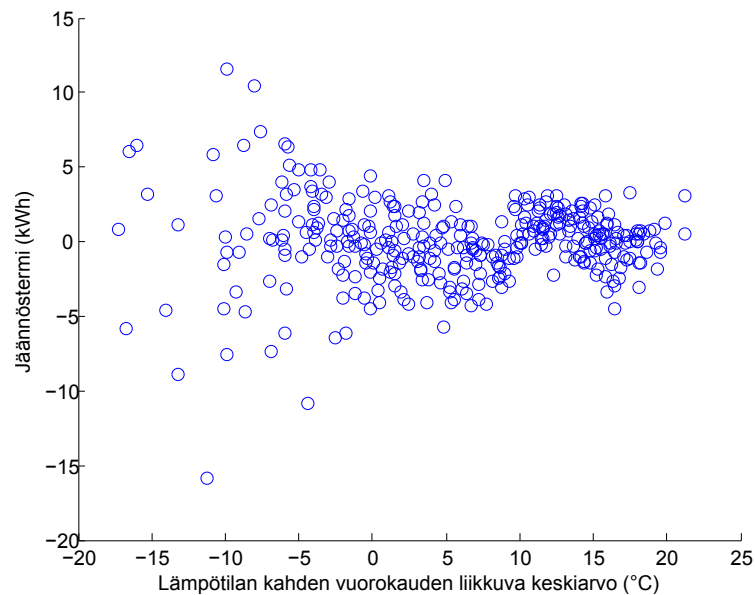


Kuva A.4: Varaava sähkölämmitys -ryhmän päivärakenteet.

Liite B: Maalämpölämmityksen päiväenergian jäännöstermit lämpötilan suhteen

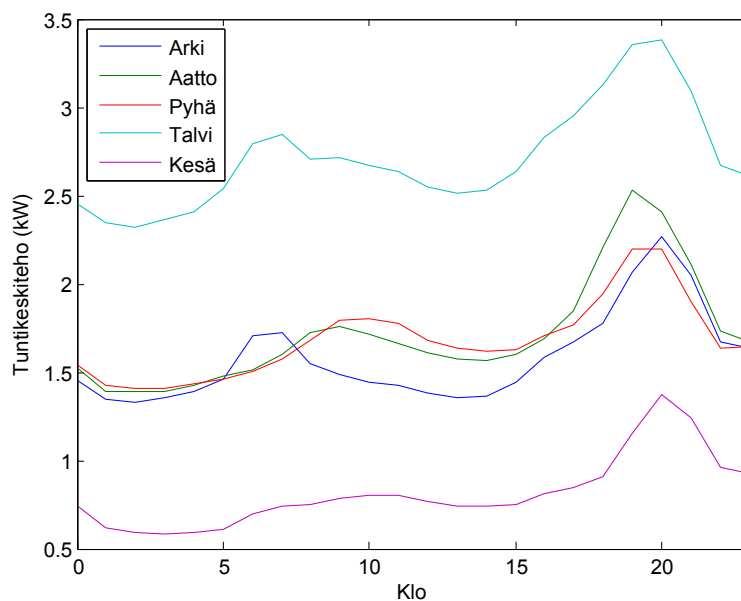


Kuva B.1: HSV:n aineiston keskiarvoisen maalämpölämmityksen päiväenergian jäännöstermit lämpötilan suhteen, kun regressiomallissa ei ole kylmän lämpötilan epälineaarisuutta.

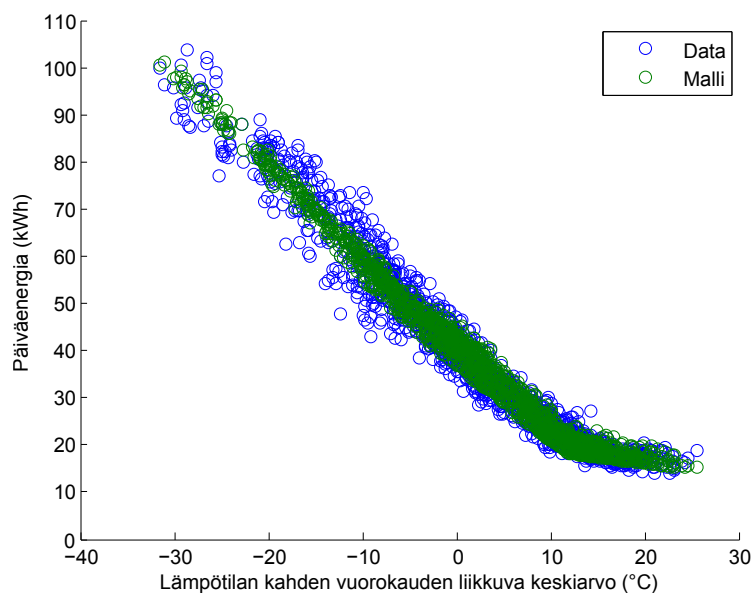


Kuva B.2: HSV:n aineiston keskiarvoisen maalämpölämmityksen päiväenergian jäännöstermit lämpötilan suhteen, kun regressiomallissa otetaan kylmän lämpötilan epälineaarisuus huomioon -5 °C kohdalla.

Liite C: Kainuun maalämpökohteiden kuvia



Kuva C.1: Keskiarvoisen maalämpölämmityksen päivärakenteet Kainuun aineistossa.



Kuva C.2: Keskiarvoisen maalämpölämmityksen päiväenergiat lämpötilan suhteen Kainuun aineistossa, kun mallissa on kylmien päivien epälineaarisuus.