

Joonas Larinkari

Palvelusektorin sähkönkäytön tutkiminen tuntimittaus tietojen avulla

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 27.11.2012.

Työn valvoja:

Prof. Matti Lehtonen

Työn ohjaajat:

TkT Markku Hyvärinen

TkT Pirjo Heine

Tekijä: Joonas Larinkari

Työn nimi: Palvelusektorin sähkönkäytön tutkiminen tuntimittaustietojen avulla

Päivämäärä: 27.11.2012

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 10+89

Sähkötekniikan laitos

Professori: Sähköverkot ja suurjännitetekniikka

Koodi: S-18

Valvoja: Prof. Matti Lehtonen

Ohjaajat: TkT Markku Hyvärinen, TkT Pirjo Heine

Sähköverkon alueellisissa kuormituksen seurannassa ja ennustamisessa on keskeisessä osassa alueen nykyinen ja arvioitu käyttäjäryhmärakenne, rakennuskanta sekä aiempi mitattu sähkönkulutus. Tämän diplomityön tavoite oli selvittää palvelusektorin sähkönkäytön suuruus, ajallinen vaihtelu sekä alueellinen sijoittuminen Helsingissä. Lisäksi työssä tutkittiin etäluentatietojen hyödyntämistä osana alueellista kuormitusanalyysiä.

Palvelukulutuksen muodostumista ja alueellista sijoittumista tutkittiin vuosienenergioiden, rakennuskantatietojen ja nykyisin käytetyn asiakasluokittelun avulla. Tuntimittaustietojen hyödyntämistä tutkittiin kahdella matemaattisella menetelmällä. Ensimmäisen tutkitun menetelmän tavoite oli ryhmitellä liittymät niiden sähkönkäytön ajallisen vaihtelun mukaan. Toinen tutkittu matemaattinen menetelmä pyrki jakamaan sähkönkulutuksen päälaiteryhmiin tuntilukemien ja sähkönkäyttöä selittävien taustatietojen avulla. Ryhmittelyyn käytetty menetelmä perustui pääkomponenttianalyysiin sekä klusterointiin ja laitetason jaotteluun käytetty menetelmä perustui usean selittäjän regressiomallin.

Matemaattisen ryhmittelyn avulla löydettiin kolme sähkölämmitysryhmää, yksi kaukolämmitysryhmä ja yksi palvelukulutusta sisältävä ryhmä. Palvelukulutuksen tarkempi ryhmittely osoittautui haasteelliseksi palvelusektorin monimuotoisuudesta johtuen. Ryhmittelyn tulokset olivat pääpiirteittäin yhteneviä nykyisen asiakasluokittelun kanssa. Menetelmän avulla lasketut profilit ja ominaiskulutukset kuvasivat kaikilla ryhmillä järkevästi ryhmän sähkönkäyttöä. Laitetason jaottelulla saatuja tuloksia ei voida pitää luotettavina. Menetelmä osoittautui kuitenkin mahdolliseksi keinoksi laitteiden kulutusosuuksien arvioinnissa. Molempia tutkittuja menetelmiä täytyy tulevaisuudessa kehittää vastaamaan palvelusektorin heterogeenisyydestä johtuvia vaatimuksia.

Avainsanat: Asiakasluokittelu, Etäluenta, Kuormituskäyrä, Kuormitustutkimus, Palvelusektori

Author: Joonas Larinkari

Title: Electricity Consumption Analysis of Service Sector Using AMR
Measurements

Date: 27.11.2012

Language: Finnish

Number of pages:10+89

Department of Electrical Engineering

Professorship: Power Systems

Code: S-18

Supervisor: Prof. Matti Lehtonen

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

Current and expected customer mix, land use and prior electricity consumption are vital inputs for spatiotemporal load forecasts. The aim of this thesis was to study characteristics of electricity consumption in service sector in the Helsinki city area. Furthermore, the thesis examined applicability of two mathematical methods for deploying automated meter reading data in spatial load analysis.

Spatial city district level analysis were performed utilizing annual electricity consumption data, land use information and present customer classification used in customer information system. The automated meter reading data were deployed in two mathematical methods. The objective of the first method was to classify connection points according to consumption structures using principal component analysis. The second method studied used conditional demand analysis to disaggregate the load into main device groups.

Using mathematical customer classification three electric heated groups, a district heated and a service consumption groups were found. More detailed classification of service sector was challenging due to the diversity of service consumption. Mathematical customer classification results were mainly consistent with present customer classification. Mathematically calculated load profiles and specific consumptions were meaningful and represented each group coherently. The results from load disaggregation can not be considered reliable, but the method proved potential to device level analysis. In the future, both studied methods should be developed to meet the requirements caused by heterogeneity in the service sector.

Keywords: AMR, Customer classification, Load analysis, Load profile, Service sector

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Helen Sähköverkko Oy:ssä osana CLEEN Oy:n koordinoimaa SGEM-tutkimusohjelmaa (Smart Grids and Energy Markets). Kiitos Helen Sähköverkko Oy:lle ja Tekesille työn mahdollistaneesta rahoituksesta.

Haluan kiittää työn valvojaa professori Matti Lehtosta työn tarkistamisesta ja kiinnostuksesta työn aihetta kohtaan. Suuri kiitos kuuluu myös työn ohjajille TkT Markku Hyväriselle ja TkT Pirjo Heinelle asiantuntevasta ohjauksesta ja opastuksesta työn aihepiiriin. Lisäksi haluan kiittää tohtorikoulutettavia Matti Koivistoa sekä Merkebu Degefaa työn kannalta keskeisistä matemaattisista analyyseistä. Eri-tyisesti Matti Koivisto toimi tärkeänä keskustelukumppanina työtä tehdessä ja sain häneltä useita arvokkaita neuvoja ja kommentteja työhön.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni tuesta ja kannustuksesta opintojeni aikana.

Helsingissä, 12.11.2012

Joonas Larinkari

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Yksiköt, käsitteet ja lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
1.1 Työn tavoite ja rakenne	2
2 Helen Sähköverkko Oy ja SGEM-tutkimusohjelma	4
3 Automaattinen etäluenta	6
3.1 Etäluentajärjestelmän rakenne ja ominaisuudet	7
3.2 Etäluennan hyödyt ja haasteet	10
3.2.1 Hyödyt jakeluverkkoyhtiölle	10
3.2.2 Hyödyt asiakkaille	11
3.2.3 Etäluennan haasteet	11
3.3 Etäluenta Helen Sähköverkko Oy:ssä	12
4 Palvelusektorin sähkönkäyttö Suomessa	14
4.1 Suomen sähkönkulutus	14
4.2 Palvelusektorin ominaispiirteitä	16
4.2.1 Yleistä palvelusektorista	16
4.2.2 Palvelurakennuskanta Suomessa	19
4.3 Palvelusektorin osuus sähkönkäytöstä Helsingissä	20
4.4 Toimitalojen kuormatyypit	29
4.4.1 Ilmanvaihto ja jäähdytys	30
4.4.2 Valaistus	31
4.4.3 Toimistolaitteet	31
4.4.4 Muut kohteet	32
4.5 Toimistorakennusten sähkönkulutukseen vaikuttavat tekijät	33
5 Etäluentatietojen hyödyntäminen kuormitusanalyysissä	35
5.1 Liittymien ryhmittely tuntilukemien avulla	35

5.1.1	Kuormituksen mallinnus indeksisarjoilla	35
5.1.2	Automaattisen tunnistuksen hyödyt	38
5.1.3	Ryhmittelyyn käytetyn aineiston kuvaus	39
5.1.4	Pääkomponenttianalyysi ja klusterointi	42
5.2	Sähkönkulutuksen jakautumisen arviointi tilastollisesti	43
5.2.1	Laitetason profiilien hyödyntäminen	43
5.2.2	Käytetyn aineiston kuvaus	45
5.2.3	Laitetason erittelyyn käytetty tilastollinen menetelmä	45
6	Palvelusektorin sähkönkäytön ominaispiirteet	48
6.1	Tyypillisiä palvelusektorin tuntikäyriä	48
6.2	Matemaattinen ryhmittely kantakaupungin AMR-datalla	53
6.2.1	Pääkomponenttianalyysin tulokset	53
6.2.2	Ryhmittelyn vertailu nykyiseen asiakasryhmittelyyn	60
6.2.3	Ryhmiteltyjen liittymien ominaiskulutukset	64
6.3	Palvelusektorin laitetason profiilit	67
7	Yhteenveto ja jatkotutkimusehdotukset	70
7.1	Pohdinta ja jatkotutkimusehdotukset	73
	Viitteet	75
	Liite A	81
	Liite B	81
	Liite C	83
	Liite D	85
	Liite E	86
	Liite F	88

Yksiköt, käsitteet ja lyhenteet

Yksiköt

m^2	Neliometri
m^3/s	Kuutiometriä per sekunti
kWh	Kilowattitunti
$kWh/m^2, v$	Kilowattituntia vuodessa per kerrosneliometri
$kW/(m^3/s)$	Kilowattia per kuutiota sekunnissa
$kWh/m^3, v$	Kilowattituntia vuodessa per kuutiometri
MW/km^2	Megawattia per neliökilometri
TWh	Terawattitunti
GWh	Gigawattitunti

Käsitteet

Arvonlisä	Tavaroiden ja palvelujen myyntihintojen ja tuotannon- tekijöiden ostohintojen erotus
Asiakastietojärjestelmä	Sähköverkkoyhtiössä laskutukseen, liittymäsopimukseen ja muuhun asiakaspalveluun käytetty järjestelmä, joka sisältää keskeiset asiakastiedot
Disaggregointi	Tuntisarjan jakaminen laiteryhmiin sähkönkulutuksiin
Etäluenta	Mittaustiedon automaattinen tiedonkeruu ja -siirto mit- taustietokantaan käyttäen tiedonsiirrossa etäluentaa
Indeksisarja	Lukusarja, jolla vuosien energia skaalataan SLY ry:n tyyppikäyrissä, muodostuu ulkoisista ja sisäisistä indekseistä
Kaupungin osa-alue	Kaupungin aluejaon osa, osa-alue tai osa-alueet muodostavat kaupunginosan
Kaupunginosa	Kaupungin aluejaon osa, joka jakaantuu osa-alueisiin, yhdessä kaupunginosat muodostavat kaupungin

Kiinteistö	Maa-alue, joka on merkitty kiinteistörekisteriin, kiinteistö käsittää myös alueella olevat rakennukset, kiinteistöllä on usein sähköliittymä
Kuormitusanalyysi	Verkon kuormituksen muodostumisen, suuruuden ja ajallisen vaihtelun sekä kulutuksessa tapahtuvien muutosten havainnointia; kuormitusanalyysit ovat keskeinen lähtötieto kuormitusennusteelle
Käyttöpaikka	Yksittäisen asiakkaan mittauspiste
Liikevaihtoindeksi	Liikevaihtoindeksi kuvaa palvelualojen (pois lukien kaupan toimialat) yritysten liikevaihdon kehitystä
Liittymä	Sähköverkon liityntäpiste, joka muodostuu käyttöpaikoista ks. Käyttöpaikka
ODYSSEE-tietokanta	Euroopan Unionin jäsenmaiden energiatehokkuusindikaattoreita sisältävä tietokanta
Ominaiskulutus	Energiankulutus pinta-alaa kohden, yksikkö kWh/m ² , v
Palvelusektori	Kansantalouden tuotannonala (tässä myös sähkönkäyttäjryhmä), joka muodostuu julkisen ja yksityisen sektorin palveluista, ei sisällä yhdyskuntahuoltoa
Pääkomponenttianalyysi	Dimension redusointitekniikka, jonka tavoitteena on löytää monidimensioisesta datasta ne komponentit, joiden avulla sen keskeisimmät piirteet voidaan esittää ilman, että merkittävää informaatiota menee hukkaan
Sisäinen indeksi	Kuvaa indeksisarjan ulkoisen indeksin sisäistä vaihtelua
Sähköintensiteetti	Sähkönkulutus suhteessa arvonlisään
Toimitila	Rakennus, jonka pääasiallinen käyttötarkoitus on palveluntuotanto
Tuntisarja	Käyttöpaikan keskituntitehot sisältävä aikasarja
Ulkoinen indeksi	Kuvaa indeksisarjassa vuodenaikavaihtelua

Lyhenteet

2G/3G	Toisen ja kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologia
AMR	(<i>Automated Meter Reading</i>), Automaattinen etäluenta
BKT	Bruttokansantuote
CDA	(<i>Conditional Demand Analysis</i>), Laitetason jaotteluun käytetty usean selittäjän regressiomallia
CLEEN	(<i>Cluster for Energy and Environment</i>), Energia- ja ympäristöalan strategisen huipputoiminnan keskittymä
EK	Elinkeinoelämän keskusliitto EK ry
ET	Energiateollisuus ry
EU	Euroopan Unioni
GMM	(<i>Gaussian Mixture Models</i>), Gaussin mikstuurimalli, pääkomponenttipisteiden ryhmittelyyn käytetty menetelmä
GPRS	(<i>General Packet Radio Service</i>), 2G-verkossa toimiva pakettikytkentäinen tiedonsiirtopalvelu
HSV	Helen Sähköverkko Oy
LAN	(<i>Local Area Network</i>), Rajoitetulla maantieteellisellä alueella toimiva tietoliikenneverkko
MVDB	(<i>Metered Value Database</i>), Tuntisarjojen säilyttämiseen käytetty mittaustietokanta
PCA	(<i>Principal Component Analysis</i>), Pääkomponenttiantalyysi ks. pääkomponenttiantalyysi
PLC	(<i>Power Line Communication</i>), Sähköverkkotiedonsiirto
RS-485	(<i>Recommended Standard 485</i>), Tiedonsiirtoon käytetty sarjaliikenneväylä
SFP	(<i>Specific Fan Power</i>), SFP-luku ilmaisee ilmavaihtojärjestelmän ominaissähkötehon

SGEM	<i>(Smart Grids and Energy Markets)</i> , CLEEN Oy:n koordinoima tutkimusohjelma
SLY	Suomen Sähkölaitosyhdistys ry, nykyisin Sähköenergia-liitto ry Sener
UEC	<i>(Unit Energy Coefficient)</i> , Laitteen sähkönkulutusta kuvaava kerroin

1 Johdanto

Modernissa yhteiskunnassa sähkönjakeluverkoilla on keskeinen ja korvaamattoman tärkeä asema. Hyvinvoinnin ja kansantalouden menestymisen perusedellytyksenä on keskeytyksetön ja luotettava sähköntoimitus. Käynnissä oleva teollisuuden rakenneuudistus tulee kasvattamaan palveluiden merkitystä Suomen taloudelle. Jo nyt palvelusektori on sekä tuotannon arvolla että työllisyydellä mitaten talouden suurin toimiala Suomessa. Perinteisesti sähköyhtiöissä sekä tiedeyhteisessä on tutkittu kotitaloussektorin ja teollisuuden sähkönkulutusta. Palvelusektorin roolia sähkönkäyttäjänä on kuitenkin tutkittu huomattavasti vähemmän.

Tässä diplomityössä tutkitaan palvelusektorin etäluettuja tuntimittaustietoja Helsingin kantakaupungin alueelta. Helsingissä palvelukulutus edustaa yli puolta sähkön kokonaiskulutuksesta, vaikka liittymien lukumäärällä mitattuna palveluala on vaatimaton kotitalouksien rinnalla. Toimisto- ja palvelurakennusten keskittymillä on kuitenkin merkittävä vaikutus sähköverkon alueelliseen kuormitukseen, minkä vuoksi sen kulutuksen ominaispiirteet on tunnettava.

Sähköverkkoliiketoiminta on erittäin pääomavaltaista ja verkkoon tehtävät investoinnit ovat pitkäkestoisia. Tämän vuoksi pitkän aikavälin suunnitelmilla on keskeinen asema verkon kehittämisessä. Verkon kehittämisen tavoitteena on saavuttaa toimintavarma ja tekniset reunaehdot täyttävä verkko, jonka kokonaiskustannukset ovat mahdollisimman pienet. Sähköverkon suunnittelua vaikeuttavat kuorman suuruuden, sijainnin ja ajankohdan vaikea ennustettavuus. Pitkällä aikavälillä kuorman kehityksen ennustamista hankaloittavat uudisrakentamisen epävarmuus ja toimintaympäristössä tapahtuvat muutokset, kuten uudet kuormatyytit (lämpöpumput, sähköautot) sekä hajautettu tuotanto. Lisäksi tulevana vuosina sähkönkulutukseen vaikuttavat Euroopan unionin energiatehokkuustavoitteet, joiden kokonaisvaikutusta sähkönkulutukseen on vaikea arvioida. Tämän vuoksi verkon kuorman ominaispiirteet on tunnettava ja pystyttävä mallintamaan, jotta verkkoa voidaan kehittää vastaamaan tulevaisuuden muuttuvia tarpeita.

Suomessa ollaan siirtymässä valtioneuvoston asetuksen (66/2009) mukaisesti sähkön kulutuksen etäluettuun tuntimittaukseen vuoden 2013 loppuun mennessä. Etäluettavilla mittareilla on tärkeä rooli älykkään sähköverkon kehittämisessä. Helsingissä mittariasennukset valmistuvat vuoden 2012 aikana, jolloin tuntimittauksen piiriin kuuluu noin 350 000 sähkön käyttöpaikkaa. Aiemmin sähkön kulutuksen mallintamisessa on käytetty SLY ry:n laatimia indeksisarjoja sekä tuntimittauksia suurten

jo aiemmin etäluentaan siirtyneiden asiakkaiden osalta. Verkkoyhtiölle etäluentaan siirtyminen tarjoaa laskutuksen ja asiakaspalvelun parantumisen lisäksi käyttöpaikoilta huomattavasti aiempaa enemmän mittaustietoja. Tuntitasoiset mittaustiedot mahdollistavat nykyistä tarkemman alueellisen kuormituksen mallintamisen, mikä osaltaan auttaa kulutuksessa tapahtuvien muutosten havainnoinnissa.

1.1 Työn tavoite ja rakenne

Tämän diplomityön tavoite on selvittää palvelusektorin sähkönkäytön ominaispiirteet Helsingissä etäluentujen tuntimittaustietojen avulla. Lisäksi työssä tutkitaan etäluentatietojen hyödyntämistä osana alueellista kuormitusanalyysiä. Kuormitusanalyysillä on keskeinen asema sähköverkon pitkän aikavälin suunnittelussa. Kuormitusanalyysien lähtökohtana on tutkia verkon nykyisen kuormituksen muodostumista, suuruutta sekä ajallista vaihtelua. Kuormitusanalyysillä havainnoidaan myös sähkönkäytössä tapahtuva muutoksia pidemmällä aikajänteellä. Kuormitusanalyysien ja maankäyttösuunnitelmien avulla laaditaan alueellisia kuormitusennusteita, jotka ohjaavat sähköverkon kehittämistä. Tässä mallinnus- ja ennustusprosessissa sähkönkäyttäjien ryhmittelyllä on tärkeä rooli.

Palvelusektori tarkoittaa tässä työssä julkisen ja yksityisen sektorin palveluja, mikä sisältää muun muassa liike-elämän, terveydenhoidon, kulttuurin ja koulutustoimen palvelut. Tarkastelun ulkopuolelle on rajattu asumiseen, yhdyskuntahuoltoon, katuvalaistukseen, teollisuuteen ja rakentamiseen sekä sähköiseen raideliikenteeseen liittyvä kulutus. Palvelusektorin sähkönkäytön ominaispiirteiden selvittämisessä hyödynnetään vuosienergioita ja tuntimittaustietoja sekä rakennusten kerrosaloja. Työn tuloksena saadaan aiempaa tarkempi käsitys palvelusektorin sähkönkäytön suuruudesta, ajallisesta vaihtelusta sekä alueellisesta sijoittumisesta Helsingissä.

Työn tutkimusosissa etäluentatiedoille sovelletaan kahta tilastollista menetelmää. Ensimmäisen menetelmän tavoitteena on ryhmitellä liittymät matemaattisesti etäluentatietojen perusteella. Toinen menetelmä pyrkii jakamaan asiakasryhmän (tässä palveluryhmän) tuntiprofilin laitetasolle yhdistämällä etäluentatiedot asiakkailta kerättyihin sähkönkäyttöä selittäviin taustatietoihin. Työssä esitetyt matemaattiset analyysit suoritettiin Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulussa tohtorikoulutettavien Matti Koiviston ja Merkebu Degefan toimesta.

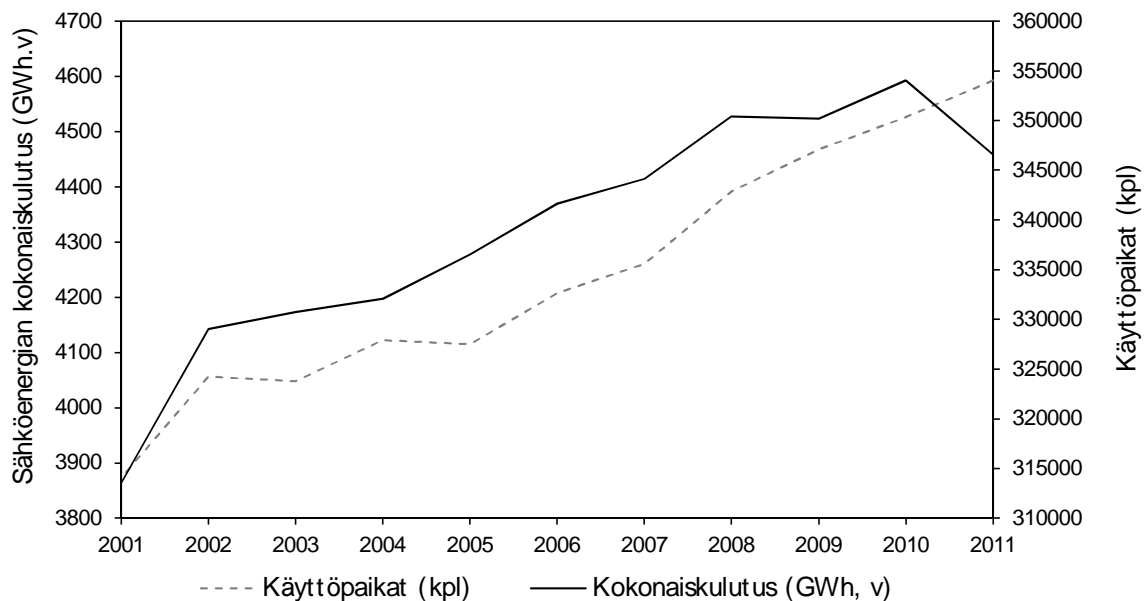
Työ koostuu kirjallisuusselvityksestä ja tutkimusosioista. Kirjallisuusselvitys kattaa luvut 3–4. Luvussa 3 käsitellään yleisellä tasolla etäluenta toteutusvaihtoehtoja se-

kä etäluennasta saatavia hyötyjä ja haasteita verkkoyhtiön sekä asiakkaan näkökulmasta. Luku 4 on katsaus palvelusektorin sähkönkäyttöön Suomessa ja Helsingissä. Pyrkimyksenä luvussa on selvittää, millaisesta kulutuksesta palvelusektori muodostuu nykyisen tiedon valossa ja minne se alueellisesti keskittyy Helsingissä. Luvussa 5 tutkitaan tilastollisia menetelmiä, joilla etäluentatietoja voidaan hyödyntää kuormitusanalyseissä. Näkökulma luvussa on tutkia, mitä etuja tilastollisten menetelmien hyödyntämisestä on valtavan datamäärän kanssa painiville verkkoyhtiöille. Luvussa kuvataan myös tutkimuksissa käytetyt aineistot. Luvussa 6 esitetään matemaattisten analyysien tulokset. Tuloksia verrataan nykyiseen käsitykseen palvelusektorin sähkönkäytöstä. Luvussa esitetään lisäksi kolmelle tyypilliselle palvelukulutusryhmälle sähkönkäytön ajallista vaihtelua kuvaavat tuntiprofililit.

2 Helen Sähköverkko Oy ja SGEM-tutkimusohjelma

Helen Sähköverkko Oy (HSV) vastaa sähkön siirto- ja jakelupalveluista Helsingin alueella lukuun ottamatta Östersundomin liitosaluetta. Yhtiö kuuluu Helen-konserniin ja sen omistaa emoyritys Helsingin Energia. Yhtiön liiketoiminta on sähkömarkkinalain mukaisesti eriytetty konsernin tuotanto- ja myyntitoiminnoista. Helen Sähköverkko Oy:n liikevaihto oli 118,5 M€ vuonna 2011. Työntekijöitä yrityksessä on noin 100. Vuoden 2011 lopussa liittymien kokonaismäärä oli noin 31 000 kappaletta ja sähkökäyttöpaikkoja oli noin 355 000 kappaletta. Yhtiön toimintaympäristön erityispiirteitä kuvaavat vaativa kaupunkiympäristö, jossa on valtakunnallisesti suuri kuormituskeskittymä ja korkea odote sähköntoimitusvarmuudelle. HSV:n verkkoliiketoiminta on jakautunut 110 kV:n alueverkkoon ja 0,4-20 kV:n jakeluverkkoon. Yhteenlaskettu sähköverkoston pituus on noin 6200 km ja jakeluverkon kaapelointiaste on 97 prosenttia. Kantaverkkoliittymät sijaitsevat Fingrid Oyj:n 400 kV sähköasemilla Tammistossa ja Länsisalmessa. Lämpövoimalaitokset ovat liittyneet verkkoon Vuosaarella, Hanasaarella ja Salmisaarella.

Kuva 1 havainnollistaa sähköenergian kokonaiskulutuksen kehitystä Helsingissä vuosina 2001–2011 (ilman häviöitä). Kuvasta nähdään, että viimeisen 10 vuoden aikana sähköenergian kulutus on kasvanut Helsingissä yli 15 prosenttia. Erityisesti kantakaupungin kesäkuorma on noussut lisääntyneen jäähdytyskuorman vuoksi.



Kuva 1: Sähköenergian kokonaiskulutus ja käyttöpaikkojen lukumäärä Helsingissä 2001–2011

Tällä on vaikutusta alueverkon siirtokapasiteetin mitoittamiseen, sillä kesäkuukausina alueen voimalaitokset ovat poissa tuotannosta. Kesälämpötilat lisäksi pienentävät hieman sähköasemien muuntokapasiteettia heikentyneiden jäähdytysolosuhteiden vuoksi. Tulevina vuosina kokonaiskuorman kasvun odotetaan jatkuvan maltillisena koko Helsingin alueella. Kantakaupungin alueella sähkökuorman odotetaan kasvavan täydennys- tiivistämiskäytännön johtuen.

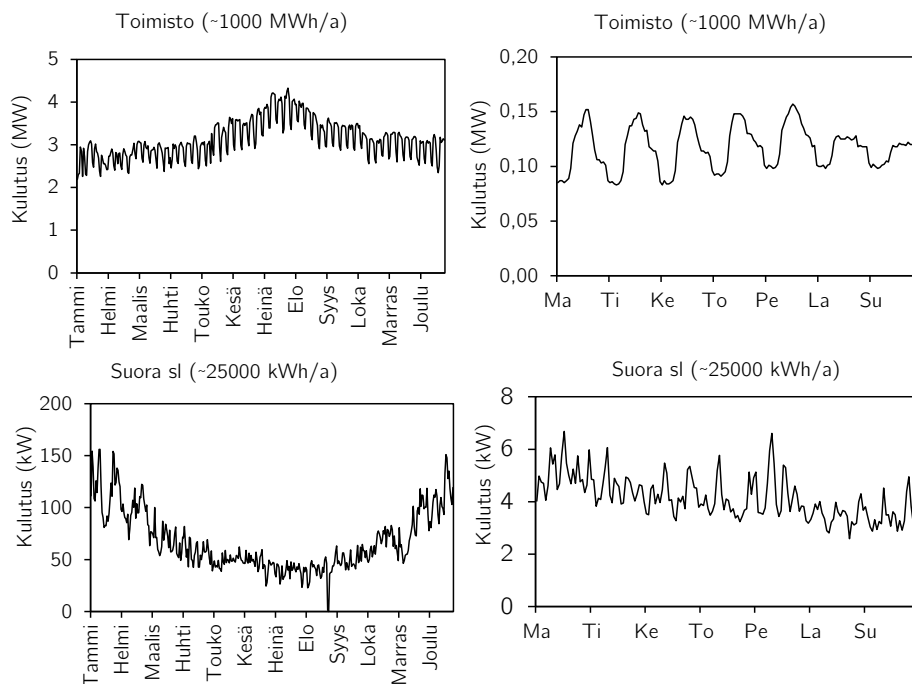
Smart Grids and Energy Markets -tutkimusohjelman (SGEM) tavoitteena on kehittää ja demonstroida uusia ratkaisuja, tuotteita ja palveluita älykkäitä sähköverkkoja varten. Tutkimusohjelma on osa vuonna 2008 perustetun energia- ja ympäristöalan strategisen huippuosaamisen keskittymän CLEEN Oy:n (Cluster for Energy and Environment) toimintaa. CLEEN Oy yhtiö muodostuu 44 osakkaasta, joista 28 on yrityksiä ja 16 tutkimusorganisaatioita. CLEEN Oy pyrkii edistämään yrityslähtöistä tutkimustoimintaa ja avointa tutkimusyhteistyötä energia- ja ympäristöalalla. Lisäksi CLEEN Oy:n kautta koordinoidaan tutkimusohjelmiin liittyvää julkista tutkimusrahoitusta. Tällä hetkellä CLEEN Oy:llä on käynnissä viisi tutkimusohjelmaa:

- Energian käytön tehokkuus (Efficient Energy Use, EFEU)
- Hajautetut energiajärjestelmät (Distributed Energy Systems, DESY)
- Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (Carbon Capture and Storage Program, CCSP)
- 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 diplomityö on osa SGEM-tutkimusohjelman tutkimustehtävää 6.11, jonka päätavoitteena on kehittää pitkän aikavälin alueellinen kuormitusennustetyökalu. Tehtävässä ovat mukana Helen Sähköverkko Oy, Vantaan Energia Sähköverkot Oy, Elenia Verkko Oy, Tekla Oyj sekä Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu.

3 Automaattinen etäluenta

Suomessa ollaan siirtymässä valtioneuvoston asetuksen (66/2009) mukaisesti sähkönkulutuksen etäluentaan vuoden 2013 loppuun mennessä, jolloin vähintään 80 prosenttia käyttöpaikoista tulee olla etäluettuja. Kyseessä on suurin koko maan kattava investointihanke jakeluverkoissa sitten maaseudun sähköistämiskauden. Etäluenta tavoitteena on edistää sähkömarkkinoiden toimintaa ja vähittäismarkkinoiden kilpailua. Samalla uudistus pyrkii parantamaan energiatehokkuutta sekä sähköjärjestelmän toimintavarmuutta ja kustannustehokkuutta. Verkkoyhtiölle etäluenta siirtyminen merkitsee aiempaa tarkempia mittaustietoja käyttöpaikoilta, mikä tarjoaa uusia sovellusmahdollisuuksia. Etäluentaan siirtymisen myötä asiakkaalta saadaan kulutuslukema jokaiselta vuoden tunnilta aikaisemman yhden vuosienergiatiedon sijaan. Kuvassa 2 on esitetty esimerkkejä toimisto- ja sähkölämmitysasiakkaan päivätehoista vuoden aikana ja yhden talviviikon keskimääräisistä tuntitehoista. Toisaalta mittaustietojen massiivinen määrä edellyttää datan tehokasta käsittelyä. Tässä luvussa käsitellään automaattiseen etäluentaan liittyviä mittausjärjestelmiä ja toiminnallisuuksia. Lisäksi luvussa tarkastellaan etäluentaan liittyviä haasteita ja mahdollisuuksia sekä kuvataan etäluenta nykytilannetta Helen Sähköverkko Oy:ssä. [2]



Kuva 2: Esimerkkejä toimisto- ja sähkölämmitysasiakkaan päivätehoista vuoden aikana (vasemmalla) ja talviviikon tuntitehoista (oikealla)

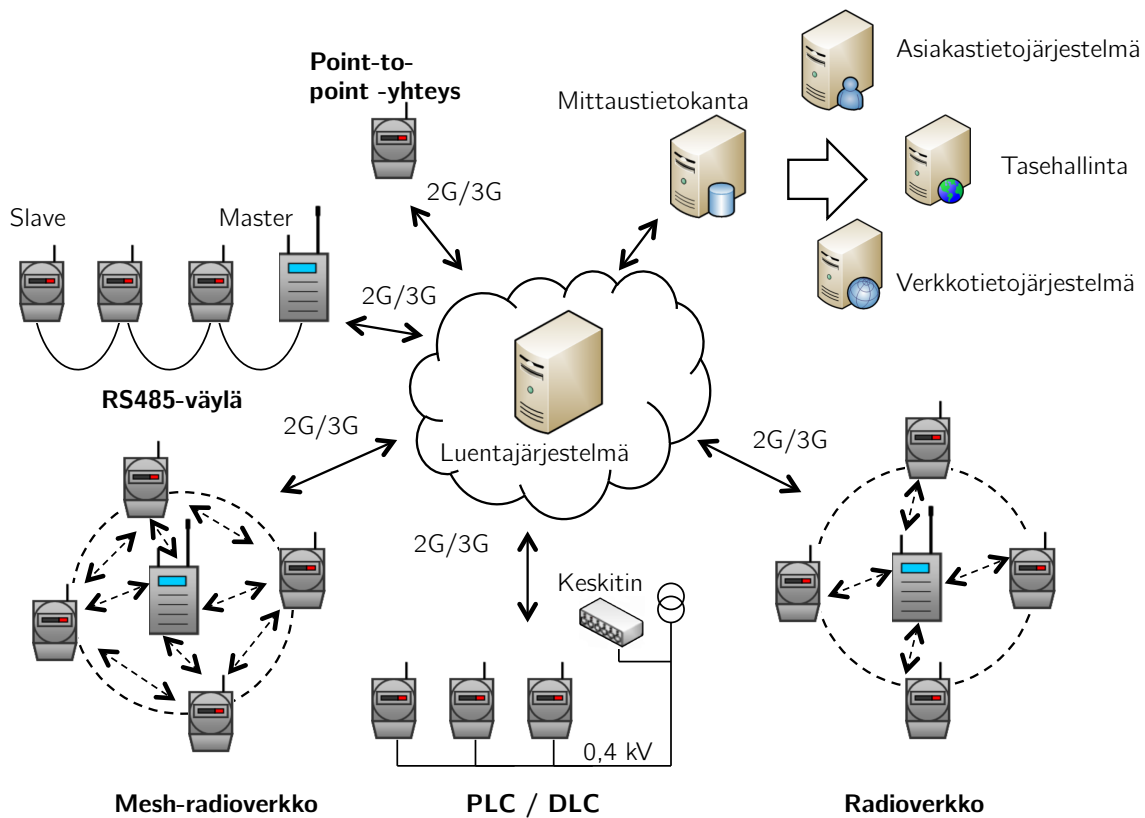
3.1 Etäluentajärjestelmän rakenne ja ominaisuudet

Automaattinen etäluenta, AMR (Automated Meter Reading), tarkoittaa sähkönkäyttöpaikan kulutuslukemien automaattista tiedonkeruuta ja -siirtoa mittaustietokantaan käyttäen tiedonsiirrossa apuna etäluenta. Suomessa keskeisin mittausta käsittelevä säädös on sähkömarkkinalain nojalla annettu valtioneuvoston asetus sähköntoimituksen selvityksestä ja mittauksesta (mittausasetus), joka määrittelee minimaatimukset mittausjärjestelmän toiminnallisuuksille ja verkkoyhtiön toiminnalle. Asetuksen mukaan sähkökäyttöpaikkaan asennettavan tuntimittauslaitteiston ja verkonhaltijan mittaustietoja käsittelevän tietojärjestelmän tulee sisältää vähintään seuraavat ominaisuudet:

- 1) mittauslaitteiston rekisteröimä tieto tulee voida lukea laitteiston muistista viestintäverkon kautta (etäluentaominaisuus);
- 2) mittauslaitteiston tulee rekisteröidä yli kolmen minuutin pituisen jännitteetön ajan alkamis- ja päättymisajankohta;
- 3) mittauslaitteiston tulee kyetä vastaanottamaan ja panemaan täytäntöön tai välittämään eteenpäin viestintäverkon kautta lähetettäviä kuormanohjauskomentoja;
- 4) mittaustieto sekä jännitteetöntä aikaa koskeva tieto tulee tallentaa verkonhaltijan mittaustietoa käsittelevään tietojärjestelmään, jossa tuntikohtainen mittaustieto tulee säilyttää vähintään kuusi vuotta ja jännitteetöntä aikaa koskeva tieto vähintään kaksi vuotta;
- 5) mittauslaitteiston ja verkonhaltijan mittaustietoa käsittelevän tietojärjestelmän tietosuojan tulee olla asianmukaisesti varmistettu.

[3]

Kuvassa 3 on esitetty etäluentajärjestelmän ja kulutuslukemien tiedonsiirron periaatteita. Etäluentajärjestelmä muodostuu käyttöpaikalle asennetusta mittarista ja mittaustietojen keruujärjestelmästä sekä näiden välisestä tiedonsiirtoverkosta. Tiedonkeruujärjestelmään kuuluvat mittareiden luentajärjestelmä sekä mittaustietokanta. Mittarin ja luentajärjestelmän välisessä tiedonsiirrossa voidaan käyttää erilaisia tekniikoita ja arkkitehtuureja riippuen mittarikannan tiheydestä ja luentaetäisyyksistä sekä tiedonsiirtoverkkojen kantoalueista.



Kuva 3: Etäluentajärjestelmän rakenne ja yleisimmät tiedonsiirtoteknologiat [4, 5]

Tärkein etäluettavan mittarin ominaisuus on mitata ja tallentaa sähkönkulutuksen (tai tuotannon) keskiteho tietyin väliajoin. Suomessa käytetty mittausväli on yksi tunti. Lisäksi älykkäät sähkömittarit kykenevät sähkönlaatusuureiden seurantaan sekä itsediagnostiikkaan. Mittalaitteet tukevat myös kaksisuuntaista tiedonsiirtoa, mikä mahdollistaa ohjaus- ja vikatietojen välittämisen sekä laiteohjelmiston päivittämisen etäyhteyden avulla. Näin ollen mittarin laitteiston ominaisuudet ratkaisevat sen, mitä palveluja seuraavan 10–20 vuoden aikana voidaan tarjota, koska mittarin elinkaari on näiden ohjelmistojen pidempi. Yleisesti mittareissa käytetään muistipiirejä, joissa tiedot säilyvät myös jännitteen syötön keskeydyttyä, jolloin mittari kykenee jännitteen palaututtua jatkamaan toimintaansa katkosta edeltäneestä tilasta. [6]

Valtioneuvoston mittausasetuksen mukaan sähkönkäyttöpaikan tuntimittauslaitteisto tulee lukea vähintään kerran vuorokaudessa. Mittaroinnin järjestäminen ja huolehtiminen ovat jakeluverkkoyhtiön vastuulla, mutta verkkoyhtiö voi halutessaan ulkoistaa mittauspalvelun. Luentaa varten mitatut kulutuslukemat prosessoidaan mittarilla sellaiseen muotoon, jossa ne voidaan tallentaa ja siirtää tehokkaasti eteenpäin.

Tyypillisesti mittarilta luetaan kumulatiivisia mittaussarjoja. Käyttöpaikalla sijaitsevan mittarin ja luentajärjestelmän välisen tietoliikenneyhteyden rakenne valitaan tapauskohtaisesti. Tiedonsiirtotekniikalla on tärkeä asema etäluentajärjestelmän toiminnassa, sillä tietoliikenneyhteyksien viat ovat yksi yleisemmistä etäluennan virhelähteistä. Eniten tietoliikenneyhteyden valintaan vaikuttaa mittarikannan tiheys. Yleisesti voidaan sanoa, että kun luentaetäisyydet ovat lyhyet ja mittarikanta tiheä, kannattaa tiedonsiirrossa käyttää keskittimeen perustuvaa arkkitehtuuria. Harvaan asutuilla alueilla, missä luentaetäisyydet ovat pitkät, on hajautettu arkkitehtuuri usein kustannustehokkaampi ratkaisu. Keskittimeen perustuvassa tiedonkeruussa mittarit kommunikoivat keskittimen eli *master*-mittarin kanssa, joka kerää tiedot *slave*-mittareilta ja lähettää tiedot ne eteenpäin luentajärjestelmään. Hajautettua tiedonsiirtoa kuvaa *point-to-point* kommunikointi, missä yksittäiset mittarit kommunikoivat suoraan luentajärjestelmän kanssa. [4, 7]

Etäluentajärjestelmän toimintojen aikakriittisyys ja mittaustiedon määrä asettavat minimivaatimukset käytetylle tiedonsiirtotekniikalle. Esimerkiksi tiedonsiirtokapasiteetin tulee olla riittävä kaupunkialueen tiheään mittarikannan lukemiseen. Yleisimmät tiedonsiirtomenetelmät yksittäisen mittarin ja luentajärjestelmän välillä ovat matkaviestiverkkojen 2G- ja 3G-yhteydet. Alueilla, joissa matkapuhelinverkon kuuluvuus on huono, joudutaan käyttämään paikallisverkkoa (LAN, Local Area Network), sähköverkon tiedonsiirtoa (PLC, Power Line Communication) tai radioverkkoa. Keskitetyssä ratkaisussa keskittimen ja mittareiden välisessä kommunikoinnissa ylivoimaisesti suosituin tiedonsiirtotekniikka on sähköverkkotiedonsiirto eli PLC (Power Line Communication). PLC:n lisäksi käytössä on myös väylätekniikoja, joista RS485-väyläkaapelointi on selkeästi yleisin. Keskittimen ja luentajärjestelmän välillä käytetään pääasiassa GPRS-tiedonsiirtoa. [4, 8]

Mittarinluentajärjestelmät ovat usein valmistajakohtaisia. Tämän vuoksi verkkoyhtiössä tai mittauspalvelua tarjoavassa yrityksessä joudutaan käyttämään useita rinnakkaisia mittarinluentajärjestelmiä ja keräämään luetut tiedot yhteiseen mittaustietokantaan (MVDB, Meter Value Data Base). Mittaustietokannan tehtävänä on toimia myös rajapintana muille tiedoista tarvitseville osapuolille sekä verkkoyhtiön omille tietojärjestelmille. Muita mittaustietoja tarvitsevia osapuolia ovat sähkön vähittäismyyjät, tasevastaavat, kantaverkkoyhtiö sekä sähkön loppukäyttäjät ja heitä palvelevat energiapalveluyritykset. Mittauksesta vastaava verkkoyhtiö hyödyntää mittaustietoja esimerkiksi laskutuksessa ja verkoston suunnittelussa. Mittaustiedon omistaa verkkoyhtiö, mutta myös asiakkaalla on oikeus omaa sähkönkulutustaan

koskevaan tietoon mittausasetukseen perustuen. [3, 6]

3.2 Etäluennan hyödyt ja haasteet

Etäluentaan siirtyminen merkitsee uudenlaisen interaktiivisen tietoväylän syntymistä sähkön kulutuksen, verkkoyhtiön ja asiakkaan välillä. Perinteisesti pienasiakkaiden mittareiden luku on tapahtunut käyttöpaikalla joko verkkoyhtiön toimesta tai asiakkaan ilmoituksesta kerran vuodessa. Aiempaan mittauskäytäntöön verrattuna tuntiluenta tarjoaa huomattavasti enemmän mittaustietoa: Esimerkiksi Helsingissä etäluettavia käyttöpaikkoja on noin 355 000 vuonna 2012, mikä tarkoittaa yli 8,5 miljoonaa tuntilukemaa vuorokaudessa. Tämän valtavan datamäärän käsittelyn tulisi olla mahdollisimman tehokasta ja luotettavaa, jotta tuntimittausten potentiaali saataisiin hyödynnettyä. Etäluenta mahdollistaa myös uusia ratkaisuja ja toimintamalleja, kuten markkinaperusteisen kysyntäjouaston. Lisäksi tuntimittaustiedot luovat pohjan sähköautojen lataukseen ja hajautetun tuotannon verkkoon syöttöön vaaditulle mittaukselle. Tulevaisuudessa etäluettujen mittaustietojen ympärille voi syntyä uusia palvelutuotteita ja ne voivat olla entistä selkeämmin osa liiketoimintaa. Seuraavassa tarkastellaan lähemmin verkkoyhtiölle ja asiakkaalle etäluennasta syntyviä hyötyjä. [9, 10]

3.2.1 Hyödyt jakeluverkkoyhtiölle

Verkkoyhtiössä etäluentaan siirtyminen vaikuttaa useisiin verkonhaltijan prosesseihin. Automaattisesti asiakastietojärjestelmään siirtyvät kulutuslukemat parantavat ja tehostavat asiakaspalvelua, kun laskutuksessa voidaan siirtyä arvio- ja tasauslaskuista toteutuneen käytön mukaiseen lukemalaskutukseen. Aiemmin käyttöpaikalla tapahtuneiden mittarinluentakäyntien poistumisen lisäksi myös kytkentä- ja katkaisutoimenpiteet voidaan toteuttaa etäpalveluna, mikä tuottaa merkittäviä kustannussäästöjä ja nopeuttaa asiakaspalvelua esimerkiksi sopimuksen muuttuessa. Mittareiden etäohjattavat kytkimet lisäävät mahdollisuuksia hintajousto- ja kuormanohjaukseen, millä pystytään tasoittamaan verkon kuormitushuippuja. Asiakaspalvelua parantaa myös mittareiden kyky rekisteröidä sähkönlaatusuureita ja sähkökatkoja. [11]

Mittareilta saatavan monipuolisen mittaustiedon avulla verkon suunnittelu ja kuormituksen mallinnus tehostuvat. Perinteisesti kuormituksen mallinnuksessa lähtö-

kohtana on käytetty vuosienergioita ja Suomen Sähkölaitosyhdistys ry:n vuonna 1992 laatimia käyttäjäryhmäkohtaisia tyyppikuormituskäyriä. Käyttöpaikkakohtainen tuntimittaus mahdollistaa sähkönkulutuksen mallintamisen todellisten asiakas-kohtaisten tuntisarjojen avulla. Tällä tavoin verkkoyhtiö voi laatia omia alueellisia ja käyttäjäryhmäkohtaisia tyyppikäyriä eripituisilta aikajaksoilta. Tämä auttaa mallintamaan tulevaa alueellista kuormankehitystä, kun näin saatuja kulutusprofiileja yhdistetään muihin alueen kulutukseen vaikuttaviin tekijöihin (esim. tuleva rakentaminen, odotetut sähkön käytön muutokset). Lisäksi tilastollisten menetelmien avulla liittymä tai käyttöpaikka pystytään ryhmittelemään automaattisesti tuntisarjojen perusteella joukkoihin, joissa sähkön kulutus käyttäytyy yhtenevästi. Asiakastyyp-
pien matemaattista tunnistusta käsitellään tarkemmin luvussa 5.1. [12, 13]

3.2.2 Hyödyt asiakkaille

Asiakkaalle merkittävimmät hyödyt etäluennasta ovat arvio- ja tasauslaskutuksen poistuminen sekä asiakaspalvelun parantuminen. Etäluenta mahdollistaa asiakkaalle myös aiempaa tarkemman sähkönkulutuksen seurannan ja raportoinnin, mikä kannustaa energiansäästöön. Kulutusraportoinnin ja -vertailun on havaittu olevan huomattavan tehokas keino kannustettaessa asiakasta kulutuksen tarkkailuun ja virheellisten kulutustottumusten korjaamiseen. Mittareiden etäohjattava kytkinlaite tarjoaa mahdollisuuden markkinahintaperusteiseen kuormanohjaukseen, mikä osaltaan auttaa asiakasta säästämään sähkölaskussa. Tulevaisuudessa mittareiden kaksisuuntainen mittaussominaisuus mahdollistaa lisäksi asiakkaan pientuotannon huomioi-
nin. [11, 14]

3.2.3 Etäluennan haasteet

Etäluennan esteenä on yhteisten toiminnallisuusvaatimusten puute. Tämä hidastaa etäluennan ja mittaustietoja hyödyntävien palveluiden kustannustehokkuuden kehittymistä. Tällä hetkellä etäluentapalvelujen markkina-alue on liian hajanainen, sillä etäluentajärjestelmien arkkitehtuurit vaihtelevat yhtiöittäin. Yhteisten toimintatapojen luomiseksi Euroopan komissio antoi vuonna 2009 mandaatin (M/441) eurooppalaisille standardointijärjestöille määritellä sähkö- ja kaasumittareille yhteinen standardin, jonka pohjalle etäluentajärjestelmät rakentuisivat tulevaisuudessa. [15, 16]

Mittaustietojen määrän kasvu monituhatkertaiseksi luo haasteita myös tietojärjestelmille, joilla mittaustietoa käsitellään. Eri mittarinlukujärjestelmien tuntilukemien aikaleimat tulee olla synkronissa, jotta lukemien vertailu on mielekästä. Kulutustiedoissa ei saa myöskään olla luentavirheistä johtuvia virhearvoja, jotka lisäävät tarvetta aikasarjojen jälkikäsitteilylle. Etäluentainvestointi ja mittaroinnin ylläpito ovat jakeluverkkoyhtiön vastuulla, mutta etäluennasta saatavat hyödyt jakautuvat useille osapuolille. Todellisten kustannusten ja saatavien hyötyjen korjaamiseksi on esitetty, että tulisi kehittää toimintamalleja ja pelisääntöjä, joissa verkkoyhtiö hyötyy siitä, että se palvelee hyvin muita mittauksia hyödyntäviä osapuolia. [15]

Tunneittain mitattuja kulutustietoja käsiteltäessä on erittäin tärkeää huomioida sähkönkäyttäjän yksityisyydensuoja. Mittauslukemista voidaan tulkita käyttäjän kannalta arkaluontoista tietoa esimerkiksi, siitä miten ja milloin kiinteistössä oleillaan. Teollisuus- ja palvelualoilla tuntilukemista pystytään suoraan päättämään yrityksen tuotantotasoa ja aktiivisuus, mikä antaa kilpailijalle mahdollisuuden laitoman hyödyn tavoitteluun. Tästä syystä tietojenkäyttöoikeudet ja tietoturva on pidettävä tarkasti kontrolloituina, jotta mittaustietojen väärinkäytöt voidaan estää. [17]

3.3 Etäluenta Helen Sähköverkko Oy:ssä

Helsingissä koko kaupungin kattava etäluentahanke toteutettiin kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa uusittiin kantakaupungin 120 000 mittaria etäluettaviin. Kantakaupungin mittariasennukset valmistuivat vuonna 2010. Toisessa vaiheessa mittariasennukset laajennettiin esikaupunkialueelle. Esikaupunkialueen etäluentasennusten valmistuivat syksyllä 2012.

Kantakaupungissa etäluentatekniikan toimittaja on Aidon ja mittauspalvelusta vastaa Mitox Oy. Tiedonsiirtotekniikkana kantakaupungissa käytetään mittarin ja keruulaitteen välillä RS-485 väylää tai mesh-topologiaan perustuvaa radioverkkoa. Keruulaitteelta tuntilukemat siirretään kerran päivässä luentajärjestelmään GPRS-yhteyttä käyttäen. Esikaupunkialueella projektin kokonaistoimittaja on Landis+Gyr, joka vastaa myös luentajärjestelmän hallinnasta. Mittarien välisessä kommunikoinnissa käytetään esikaupunkialueella ainoastaan mesh-radioverkkoa. Keruulaitteen ja luentajärjestelmän välinen tiedonsiirto tapahtuu 2G- tai 3G-yhteydellä.

Valmistajakohtaisista luentajärjestelmistä tuntisarjat siirretään Process Vision Oy:n Generis-mittaustietokantaan, joka toimii rajapintana kaikille tuntisarjoja tarvitse-

ville osapuolille. Etäluettavien mittareiden tunti lukemat on tuotu myös kuluttajien ulottuville Sävel Plus -palvelun avulla. Sävel Plus tarjoaa kuluttajalle ajantasaisien kulutustiedon lisäksi vertailu- ja historiatietoa energiankäytöstä, minkä toivotaan ohjaavan energiansäästöön.

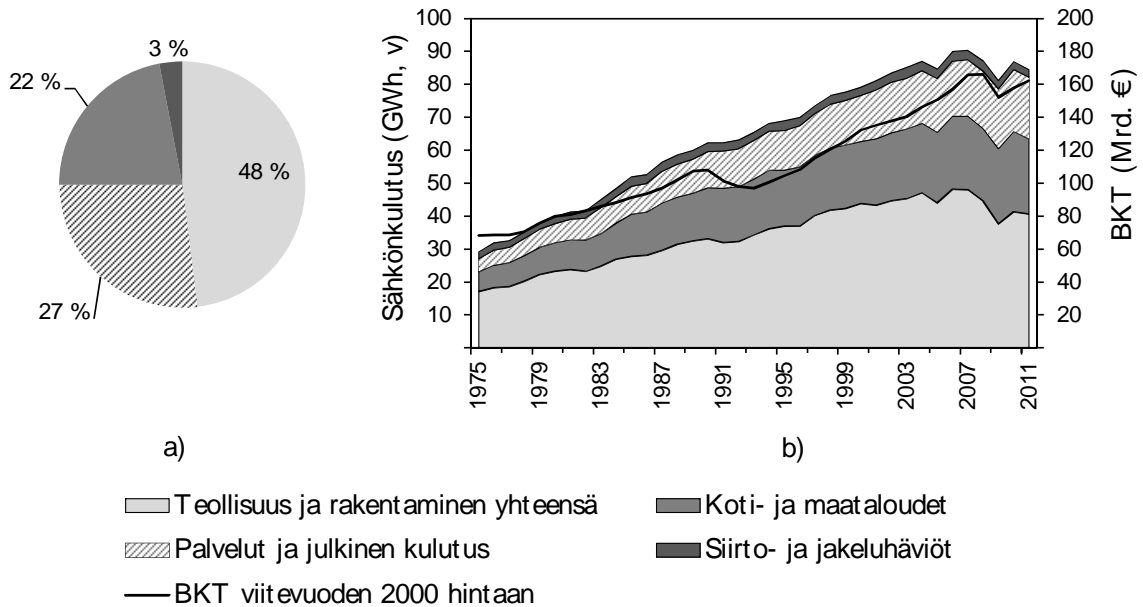
4 Palvelusektorin sähkökäyttö Suomessa

Palvelusektori koostuu liike-elämän palveluista, rahoitussektorista, tukku- ja vähittäiskaupasta sekä majoitus- ja ravitsemuspalveluista. Suomessa palveluiden osuus sähkökulutuksesta on hieman yli viidennes. Tulevaisuudessa palvelualan sähkökulutuksen odotetaan kasvavan. Toisaalta palvelusektorilla uskotaan piilevän huomattava energiansäästöpotentiaali. Perinteisesti sähkökäytön tutkimuskohteena on ollut teollisuus sekä kotitaloudet, mutta palvelualan sähkökäyttö on jäänyt vähemmälle huomiolle. Helsingissä palvelukulutus edustaa yli puolta kokonaiskulutuksesta ja siinä tapahtuvilla muutoksilla on merkittävä vaikutus alueelliseen sähköverkon kehittämiseen. Lisäksi kuorman ennustamisen kannalta on tärkeää erotella toimitilat ja asuinrakennukset, koska maankäyttösuunnitelmissa tuleva rakentaminen on jaoteltu asumis- ja toimitilarakentamiseen.

Aluksi tässä luvussa tarkastellaan palvelusektorin sähkökulutusta yleisellä tasolla ja tutustutaan asiantuntijoiden esittämiin arvioihin palvelusektorin sähkökäytön kehityksestä. Tämän jälkeen siirrytään käsittelemään palvelukulutusta Helsingissä. Tavoitteena on selvittää, mihin toimialoihin palvelukulutus jakautuu ja minne se alueellisesti sijoittuu. Luvun antama näkemys toimii vertailupohjana tilastollisin menetelmin saatuihin tuloksiin.

4.1 Suomen sähkökulutus

Sähkön kysyntä on kasvanut Suomessa 1970-luvulta lähtien melko tasaisesti lukuun ottamatta muutamia talouden taantumavuosia (kuva 4). 1990-luvulta lähtien sähkökulutuksen vuosikasvu on hieman laantunut; jaksolla 1970–1990 kokonaiskulutus kasvoi keskimäärin 5,5 prosenttia vuodessa ja vuosina 1990–2011 kasvuvauhti oli keskimäärin 1,6 prosenttia vuodessa. Vuonna 2011 sähkön kokonaiskulutus oli noin 84,4 TWh, mikä oli 3,8 prosenttia vähemmän kuin vuotta aiemmin. Sähkökulutusta vähensivät teollisuuden alentunut tuotanto sekä lämmin loppuvuosi. Teollisuuden osuus kokonaiskulutuksesta oli 48 prosenttia, maatalouden ja asumisen 27 prosenttia ja palveluiden sekä julkisen kulutuksen 22 prosenttia. Siirto- ja jakeluhäviöt olivat 3 prosenttia. Suomessa teollisuuden osuus sähkön kokonaiskulutuksesta on ollut tyypillisesti yli 50 prosenttia. Pitkän aikavälin trendeistä on havaittavissa, että teollisuuden suhteellinen osuus on viime vuosina pienentynyt ja kotitalouksien sekä palveluiden osuudet ovat kasvaneet teollisuuden rakennemuutoksen seuraukse-



Kuva 4: a) Sähkönkulutus sektoreittain vuonna 2011, b) sähkön kysynnän ja bruttokansantuotteen kehitys 1975–2011 [18]

na. [18]

Elinkeinoelämän keskusliiton (EK) ja Energiateollisuuden (ET) yhteisessä ennusteessa vuodelta 2009 arvioidaan sähkönkysynnän olevan vuonna 2030 100–111 TWh. Kysynnän kasvuvauhdin oletetaan hidastuvan vuoden 2008 taantumaa edeltäneistä vuosista sähkönkäytön tehostumisen ja teollisuuden pienentyneen kulutuksen vuoksi. Eniten kasvua ennustetaan palvelualan ja liikenteen sähkönkulutukseen, jonka arvioidaan kasvavan nykyisestä noin 18 TWh:sta 24–26 TWh:iin vuoteen 2030 mennessä. Ennusteessa huomautetaan kuitenkin, että siihen liittyy suurta epävarmuutta nykyisestä taloustilanteesta sekä tulevista EU:n ilmasto- ja energiapoliittisista linjauksista johtuen. Lisäksi energiatehokkuustoimien vaikutusta sähkönkysyntään tulevaisuudessa on vaikea arvioida. [19]

Kuormituksen suuruus ja sen sijainti vaikuttavat merkittävästi sähköverkon rakenteeseen. Sähköverkon suunnittelun kannalta vuosienenergiat eivät anna riittävästi tietoa kuormituksen jakautumisesta verkossa. Verkon suunnittelun kannalta keskeisin suure on huipputeho. Tunnettujen vuosienenergioiden avulla voidaan muodostaa huipputehoja esimerkiksi tyyppikäyrien ja muiden verkostolaskentamenetelmien avulla.

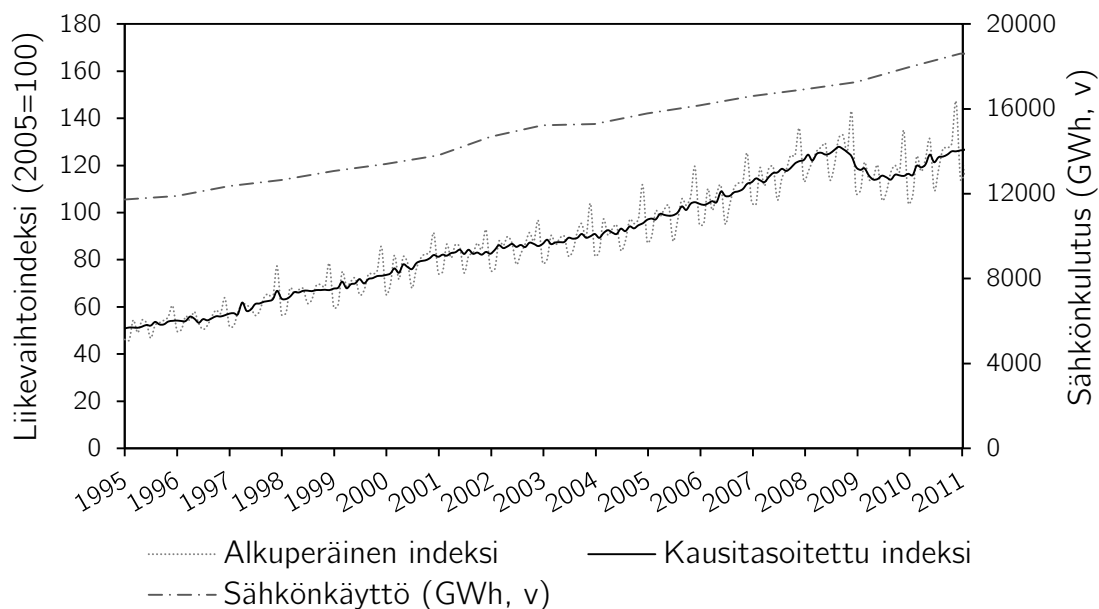
4.2 Palvelusektorin ominaispiirteitä

4.2.1 Yleistä palvelusektorista

Sähkökäyttäjryhmänä palvelusektori on hyvin heterogeeninen. Se jakautuu useisiin eri alaryhmiin kuten, toimistoihin, hotelleihin, ravintoloihin, kauppoihin, kouluihin, liikuntatiloihin, sairaaloihin ja lukuisiin muihin palveluihin. Myös palvelurakennusten koko, rakennusvuosi ja tekninen varustelu vaihtelevat suuresti, mitkä vaikuttavat rakennusten energiankulutukseen. Monimuotoisuudesta johtuen palvelusektorin sähkökäytön tutkiminen on haasteellista. Usealla palvelusektorin toimialalla sähkönkulutukseen liittyviä kustannuksia ei ole perinteisesti mielletty oleelliseksi tuotannontekijäksi yrityksen toiminnassa. Sähkökäytön tehostamiseen liittyvät toimenpiteet eivät useinkaan ole keskeisesti mukana päätöksenteossa, esimerkiksi toimitilaratkaisuja tai palveluprosessia suunniteltaessa. Suomessa yksityiskohtaisia kulutustietoja eri palvelualojen energiankäytöstä ei tilastoida, joten kattavaa tilastoaineistoa ei ole saatavilla. Palveluyritysten käyttämän sähköenergian tilastoinnissa olisikin kansallisella tasolla huomattavasti parannettavaa. Tässä työssä esitetyt koko Suomea koskevat kulutus- ja rakennustiedot ovat peräisin tilastokeskuksen StatFin-tietokannasta. [20]

Palveluala on sekä tuotannon arvolla että työllisyydellä mitaten suurin talouden toimiala kaikissa kehittyneissä maissa. Suomessa yksityisten palveluiden osuus bruttokansantuotteesta oli 49,4 prosenttia ja julkisten palveluiden osuus 19,2 prosenttia vuonna 2010. Samaan aikaan alkutuotannon ja jalostuksen yhteenlaskettu osuus oli 31,4 prosenttia. Tulevaisuudessa palvelusektorin roolin ennustetaan korostuvan. Maailmantalouden muutosten seurauksena yritykset hajauttavat toimintonsa sinne, missä kunkin toiminnon tuottaminen on edullisinta. Valmistuksen siirtyessä halvemmän palkkatason maihin arvellaan Suomeen jäävän suunnittelu, tutkimus ja kehitystyö sekä muut vaativat asiantuntijatehtävät. Monet perinteisistä suomalaisista teollisuusyrityksistä ovatkin muuttuneet kasvavissa määrin palveluyrityksiksi. Raja teollisen toiminnan ja palveluiden välillä on hämärtynyt, koska merkittävä osa tuotetta ovat suunnittelu, huolto- ja ylläpitopalvelut. On arvioitu, että perinteisen teollisuuden ympärille kasvava osaamis pohjainen palveluvienti tulee olemaan merkittävä talouden tukipilari tulevaisuudessa. Palvelualan kysyntää lisäävät myös kotimaassa tapahtuvat muutokset, kuten väestön ikääntyminen ja vaurastuminen. Jotta palvelualan kasvun vaikutusta sähkönkulutukseen voidaan arvioida, on tärkeää ymmärtää palvelualojen sähkönkulutukseen vaikuttavat tekijät.[21, 22]

Kuva 5 esittää palvelualojen liikevaihdon kehitystä vuosina 1995–2011. Arvoindeksin perusvuosi on 2005 (2005=100). Palvelusektorin liikevaihto on kasvanut 1990-luvun puolivälistä keskimäärin 6 prosenttia vuodessa, mikä on ollut selvästi bruttokansantuotteen kasvua nopeampaa. Sähkönkulutus on kasvanut samalla ajanjaksolla noin 3 prosenttia vuodessa. Tarkastelujaksolle on sattunut talouden nousukausi vuosina 1995–2007, jolloin Suomen talous kasvoi 40 prosenttia nopeammin kuin pitkän aikavälin (1975–2007) keskiarvo; 2,7 prosenttia vuodessa. Talouden taantumavuonna 2008–2009 BKT laski yli 8 prosenttia, mikä näkyi myös sähkönkulutuksen pienenemisenä noin 7 prosentilla edellisvuoteen verrattuna.



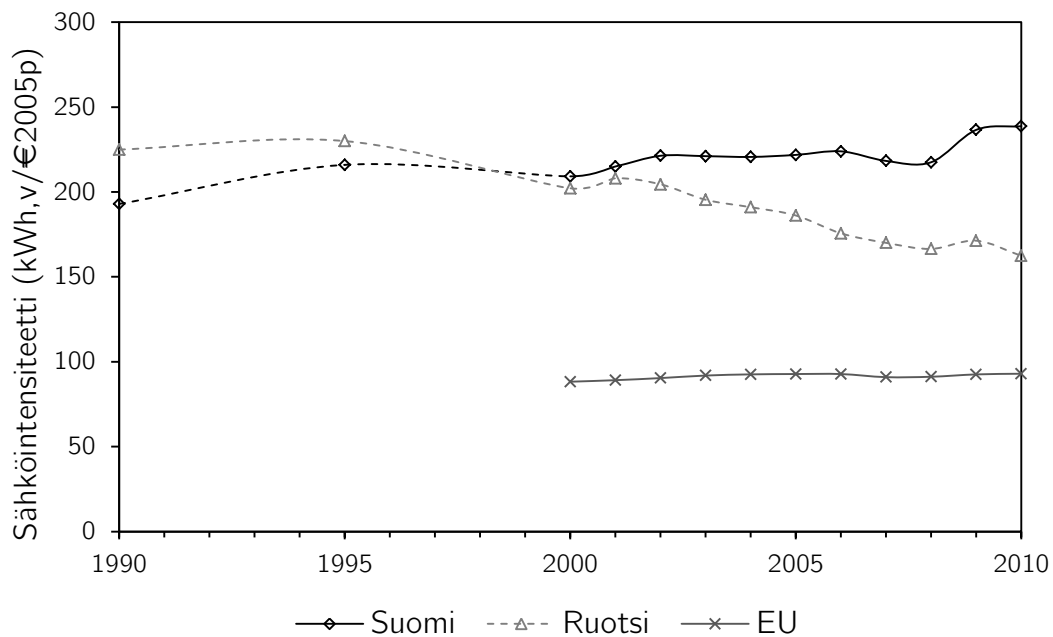
Kuva 5: Palvelualojen sähkönkulutus ja liikevaihtoindeksi Suomessa 1995–2010 [21]

EK:n ja ET:n ennusteissa oletetaan myös palvelusektorin sähkönkäytön kasvaneen nousukautena 40 prosenttia nopeammin kuin talouden normaalikehityksessä. Tällä oletuksella palvelusektorin normaalin talouskehityksen mukaiseksi vuosikasvuksi saadaan 2,1 prosenttia vuodessa. Palvelualojen odotetaan kasvavan tulevaisuudessa, joten ala voi kasvaa bruttokansantuotetta nopeammin myös tulevina vuosia. Tällöin EK ja ET arvioivat palvelualojen sähkönkäytön vuotuisen kasvun jatkuvan taantuma edeltäneessä 3 prosentissa. Raportissa todetaan lisäksi palvelusektorin sähkönkäytön tehostamispotentiaaliksi 18 prosenttia, joten todellinen kasvu voi olla edellä esitettyä hitaampaa. Tarkempaa tietoa kasvun kohdentumisesta toimialoittain ei ole saatavilla, mikä lisää ennusteeseen epävarmuutta. [19, 21]

Palvelusektorin sähkönkäytön tehokkuutta voidaan mitata sähköintensiteetillä, jo-

ka lasketaan vertaamalla sähkönkulutusta palvelualan tuottamaa arvonlisää kohden. Arvonlisällä tarkoitetaan tuotoksen ja välituotekäytön eroa eli tuotannon tekijöiden aikaansaamaa lisäarvoa. Kuva 6 esittää palvelusektorin sähköintensiteetin kehitystä vuosina 1990–2010 perusvuoden 2005 hinnoin. Sähköintensiteetti kasvoi 1990-luvun lamavuosina, jolloin palveluiden kysyntä pienentyi selkeästi. Laman jälkeen palveluiden tuottama lisäarvo alkoi jälleen kasvaa ja intensiteetti pienentyi. 2000-luvulle tultaessa sähköintensiteetti kääntyi loivaan nousuun lisääntyneen ilmanvaihto-, jäähdytys- ja valaistuskannan sekä toimitilojen laitekannan kasvun seurauksena.

Vuonna 2008 alkaneen taantuman vaikutus näkyy selvänä kasvuna sähköintensiteetissä. Taantuman alettua palveluiden sähkönkulutus jatkoi kasvua, vaikka heikentynyt kysyntä pienensi arvonlisää, kuten kuvista 4 ja 6 voidaan tulkita. Suomessa palvelusektorin sähköintensiteetti on selvästi yleistä Euroopan keskitasoa korkeampi. Euroopan unionin ODYSSEE-energiatehokkuusindikaattoritietokannan mukaan palvelusektorin sähköintensiteetti on Suomessa Euroopan toiseksi korkein ja selvästi Euroopan keskitasoa korkeampi. Esimerkiksi Ruotsissa trendi on ollut voimakkaassa laskusuunnassa 1990-luvun puolivälin jälkeen, eikä palvelusektorin sähkönkulutus ole kasvanut samassa suhteessa kuin palvelualan työvoima ja rakennusten pinta-ala. [23, 24]



Kuva 6: Palvusektorin sähköintensiteetti Suomessa, Ruotsissa ja Euroopan Unionissa 1990–2010

4.2.2 Palvelurakennuskanta Suomessa

Taulukossa 1 on esitetty muuhun kuin asumiseen liittyvien rakennusten kerrosalat ja kaikkien rakennusten yhteenlaskettu kerrosala vuonna 2010. Kerrosalassa mitattuna 64 prosenttia rakennuskannasta on asuntoja, 11 prosenttia teollisuusrakennuksia ja loput 25 prosenttia palveluihin liittyviä rakennuksia. Palvelurakennuksista merkittävimmät ryhmät ovat toimisto- ja liikerakennukset sekä varastot.

Vertaamalla palveluiden sähkönkäyttöä vuoden 2002 ja vuoden 2010 rakennusalaan, saadaan keskimääräiseksi palvelurakennusten ominaiskulutukseksi noin 150 kWh/m², v ja 160 kWh/m², v. Sähkönkulutus näyttää siis kasvaneen hieman kerrosalaa voimakkaammin vuosina 2002–2010. Eniten kerrosalat ovat kasvaneet varasto-, liike-, ja hoitoalanrakennuksissa. Lisäksi muu tai tuntematon käyttötarkoitus-ryhmän kerrosala on pienentynyt selvästi. Ominaiskulutuksen kasvua voi selittää toimitilojen kasvanut laitekanta sekä lisääntynyt jäähdytyskuorma. Lisäksi kauppojen aukiolon vapautuminen ja toimitilojen käyttöasteen kasvu ovat lisänneet kulutusta.

Ominaiskulutuksia laskettaessa on hyvä muistaa, että toimialakohtaista tietoa sähkönkäytön jakautumisesta ei ole saatavilla ja samankin käyttötarkoituksen rakennuksissa sähkönkäyttö voi vaihdella suuresti. Liitteessä B on esitetty Motivan energiakatselmusten yhteydessä tilastoituja sähkön ominaiskulutuksia (kWh/m³) ryhmiteltynä kiinteistön käyttötarkoituksen mukaan. Katselmuksista saadut tulokset vahvistavat, että palvelurakennusten sähkönkulutuksessa on suurta vaihtelua. Lu-

Taulukko 1: Palvelurakennusten kerrosala käyttötarkoituksen mukaan Suomessa vuonna 2010 [25]

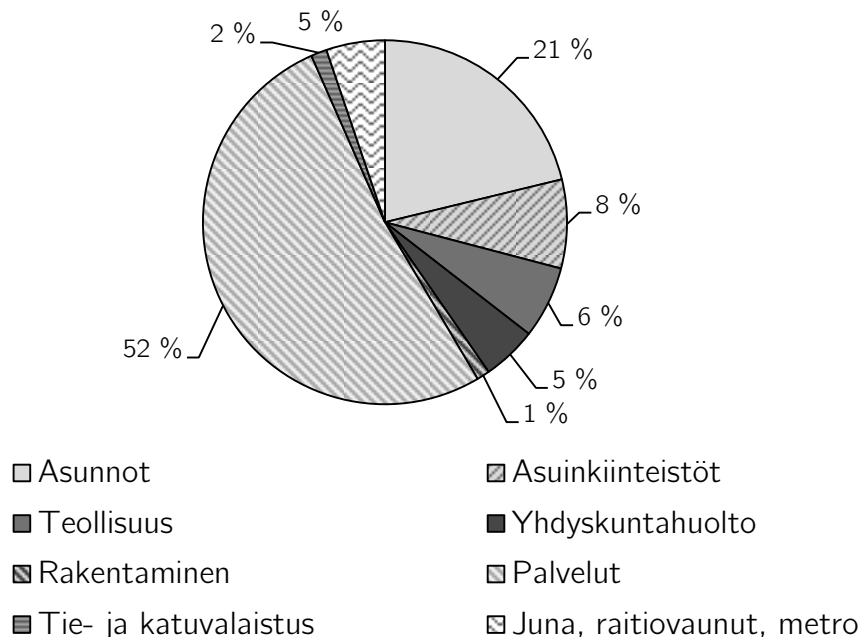
Käyttötarkoitus	Kerrosala (m ²)	Osuus kokonaisalasta (%)	Muutos 2002–2010
Kaikki rakennukset	434 280 128	100%	13%
Liikerakennukset	26 744 110	6%	28%
Toimistorakennukset	18 758 194	4%	6%
Liikenteen rakennukset	11 700 067	3%	6%
Hoitoalan rakennukset	10 521 418	2%	11%
Kokoontumisrakennukset	8 799 831	2%	9%
Opetusrakennukset	17 601 259	4%	7%
Teollisuusrakennukset	46 105 329	11%	5%
Varastorakennukset	18 092 782	4%	43%
Muu tai tuntematon käyttötarkoitus	1 933 078	0%	-35%

vussa 4.4 tarkastellaan palvelurakennusten kulutuksen muodostumista tärkeimpien laiteryhmiä osalta.

4.3 Palvelusektorin osuus sähkökäytöstä Helsingissä

Vuonna 2010 sähkön kokonaiskulutus Helsingissä ilman häviöitä oli 4592 GWh. Kuva 7 esittää sähköenergian loppukäytön jakautumista käyttäjäryhmittäin vuonna 2010. Kuvasta nähdään, että palvelusektorin osuus sähkön kokonaiskulutuksesta oli hieman yli 50 prosenttia. Kotitalouksien ja kiinteistöjen yhteinen erillimitattu kulutus vastasivat yhteensä noin 30 prosenttia kulutuksesta. Käyttöpaikkojen lukumäärässä mitattuna asuinkulutus on selvästi suurin sähkökäyttäjäryhmä. Helsingissä merkittävä osa sähköstä käytetään kuitenkin kotitalouksien ulkopuolella. Seuraavaksi tarkastellaan palvelukulutuksen muodostumista asiakastietojärjestelmästä löytyvän ryhmittelyn perusteella sekä toimitilojen alueellista sijaintia Helsingissä. Nykyiseen asiakastietojärjestelmän ryhmittelyyn on hyvä suhtautua suuntaa-antavana, sillä ryhmittelyn luotettavuudesta ei ole varmuutta.

Tässä työssä palvelusektori käsittää kotitalouksien ulkopuolisen sähkökäytön, joka on järkevällä tasolla mahdollista yhdistää kulutuspaikan kerrosalaan. Tarkastelun ulkopuolelle on jätetty yhdyskuntahuolto, sähköinen raideliikenne ja katuvalaistus,

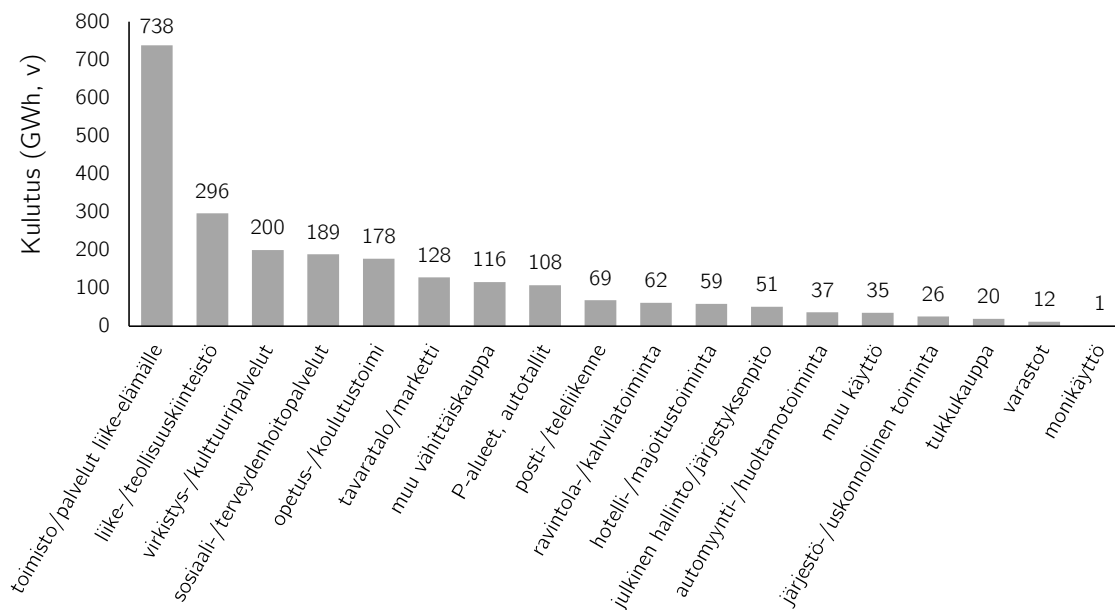


Kuva 7: Sähköenergian loppukäytön jakautuminen Helsingissä vuonna 2010

jotka ovat myös palvelutyypistä kulutusta. Tämän määrittelyn taustalla on tavoite laskea alueellisia ominaiskulutuksia sekä asumisneliöille että toimitilaneliöille. Myös yleiskaavatasolla tuleva rakentaminen jaotellaan asumis- ja toimitilaneliöihin, mikä puoltaa tätä määrittelyä. Suunnittelun ja muutosseurannan avuksi on kuitenkin hyvä laskea myös tarkempia ominaiskulutuksia siltä osin, kun kerrosalat ja asiakasryhmittely ovat luotettavasti saatavissa. Tässä luvussa esitetyt kulutustiedot laskettiin summaamalla osa-alueittain asiakastietojärjestelmästä saadut kulutustiedot. Kerrosalat haettiin Helsingin aluesarjoista, jossa rakennukset on jaoteltu sijainnin, käyttötarkoituksen ja valmistumisvuoden mukaan. Luvussa 6 tarkastellaan palvelusektorin kulutusta pohjautuen automaattiseen asiakasryhmän tunnistukseen.

Palvelusektori jakautuu useaan eri toimialaan, kuten aiemmin on todettu. Nykyinen raportoinnissa käytetty ryhmittely muodostuu kuvan 8 mukaisista käyttäjäryhmistä. Selvästi suurimmat käyttäjäryhmät ovat ”toimisto/palvelut liike-elämälle” ja ”liike-/teollisuuskiinteistö”, jotka kuluttivat yhteensä yli 20 prosenttia koko kaupungin sähköenergiasta. Muita merkittäviä kulutusryhmiä ovat ”virkistys-/kulttuuripalvelut”, ”opetus-/koulutustoimi” ja ”sosiaali-/terveydenhoitopalvelut”.

Käyttäjäryhmät on määritelty asiakastietojärjestelmään käyttöpaikoittain liittymäsopimuksen luontihetkellä. Käyttöpaikka tarkoittaa yhtä mittauskohdetta, tyypillisesti yhtä asiakasta. Liittymä voi kuitenkin muodostua useista käyttöpaikoista,

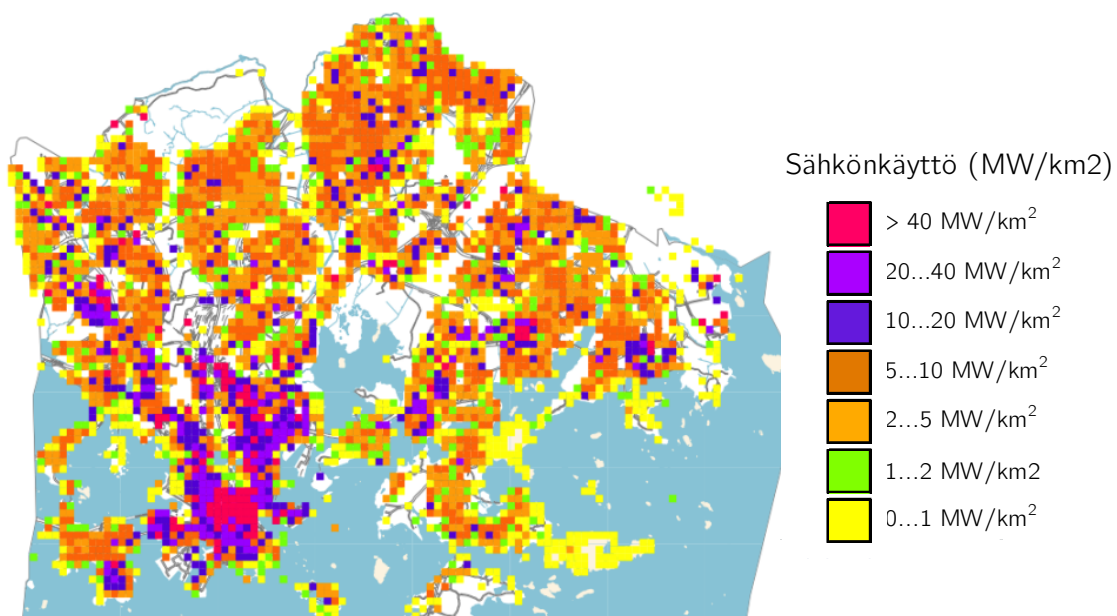


Kuva 8: Palvelut-kulutusryhmän muodostuminen nykyisellä asiakasryhmittelyllä vuonna 2011

kuten huoneistoista koostuva kerrostalo. Liittymä voi sisältää käyttöpaikkoja myös useista eri käyttäjäryhmistä. Lisäksi on hyvin mahdollista, että liittymän asiakasluokittelu ei ole enää ajan tasalla, sillä asiakastyypitietoja ei ole päivitetty aktiivisesti asiakkaiden vaihtuessa. Edellä mainituista syistä johtuen nykyiseen ryhmittelyyn on hyvä suhtautua suuntaa-antavana vertailupohjana uusille asiakasryhmäluokitteluille.

Alueellinen kuormituksen tunteminen on avainasemassa sähköverkkoa suunniteltaessa, jotta verkkoinvestoinnit osataan kohdentaa oikeille alueille oikea-aikaisesti. Alueellisen kuormituksen selvittämiseksi verkko tulee jakaa tarkastelua tukeviin pienalueisiin, joko aluejakoon tai verkkotopologiaan pohjautuen. Kuva 9 esittää tehotiheyden jakautumista (MW/km^2) Helsingissä ruutukoolla 200×200 metriä. Kuva on muodostettu verkkotietojärjestelmästä saatujen paikka- ja vuosienenergiatietojen avulla. Kuvasta on nähtävissä, että suurimmat tehotiheydet sijaitsevat tiiviisti rakennetuilla ja paljon toimitiloja sisältävillä alueilla. Kuvassa värityttämättömät alueet ovat puistoja sekä merialueita. [26]

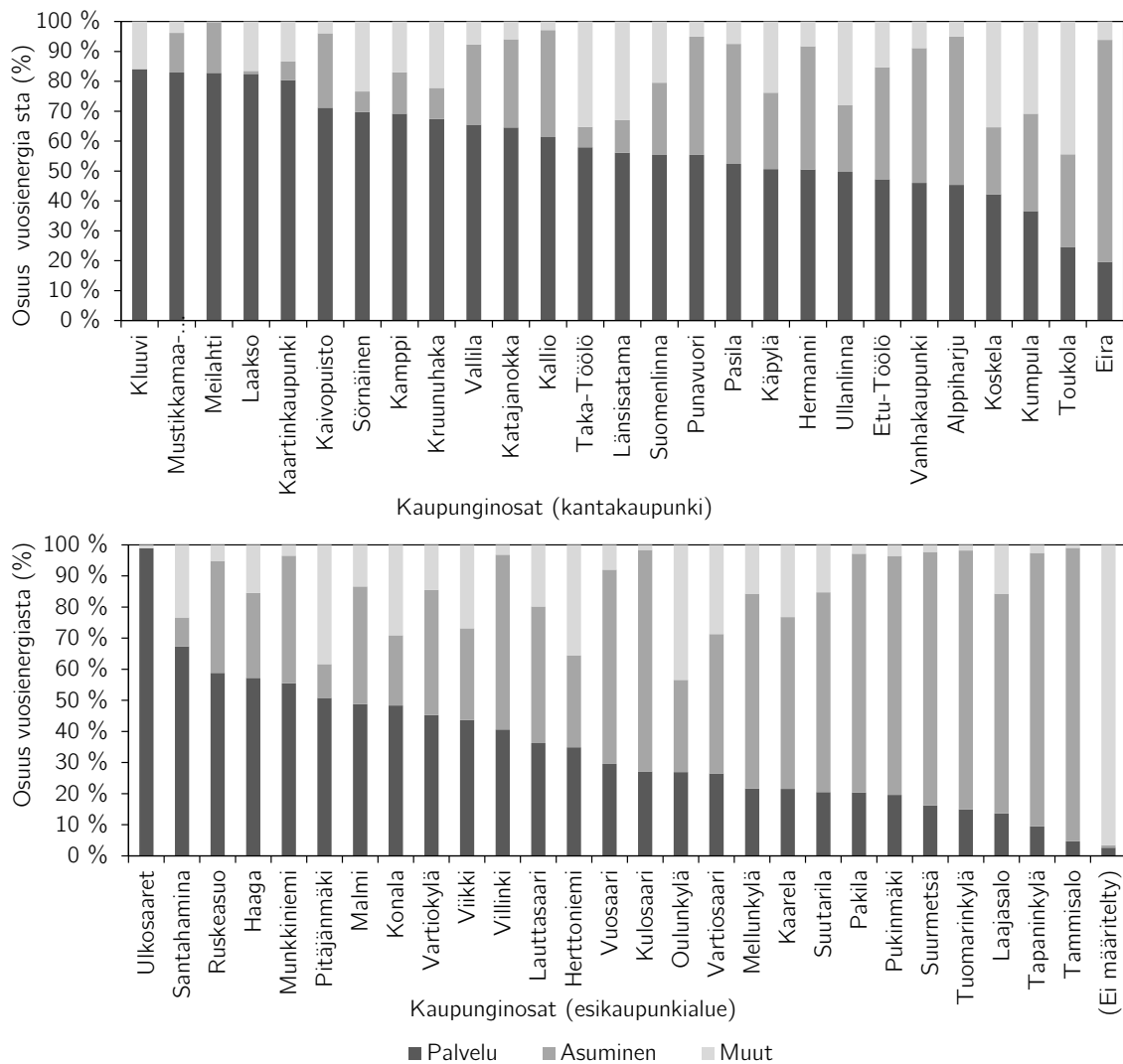
Kuvassa 10 on havainnollistettu palvelusektorin kulutuksen alueellista jakautumista kaupunginosittain vuonna 2011. Kuvan pylväät esittävät kyseisen kaupunginosan prosenttiosuutta koko palvelusektorin vuosikulutuksesta. Aluejaottelussa on selkeyden vuoksi käytetty kaupunginosa-alueita, sillä pienempiä kaupunginosa-alueita on Helsingissä yli 130. Verkon suunnitteluun on hyvä käyttää pienempiä aluekohteita, jotta



Kuva 9: Tehotiheyden jakautuminen Helsingissä (ruutukoko 200×200 m)

kuormituskeskittymät ja alueilla tapahtuvat muutokset voidaan havaita herkemmin.

Kantakaupungissa palveluvaltaisimmat alueet ovat Kampissa, Kluuvissa, Sörnäisissä ja Pasilassa. Esikaupunkialueella suurimmat kuormat ovat Pitäjänmäellä ja Vartiokylässä. Myös näillä alueilla korkea palvelukulutus on odotettua, sillä Pitäjänmäellä sijaitsee suuri toimistotyöpaikkojen keskittymä ja Vartiokylässä on huomattavan suuri kauppakeskus (Itäkeskus). Suurilta osin palvelukulutus sijoittuu kuitenkin eteläiseen Helsinkiin. Tämä on ongelmallista verkon mitoituksen kannalta erityisesti kesäisin, kun alueen voimalaitokset ovat poissa tuotannosta ja tehonsyöttö tapahtuu kantaverkosta.



Kuva 10: Kulutuksen jakautuminen kaupunginosittain nykyisellä asiakasryhmitteilyllä vuonna 2011

Keskeinen alueellista kulutusta selittävä tekijä on rakennusten kerrosala. Alueen rakennuskannassa tapahtuvat muutokset ovatkin oleellinen lähtötieto verkon pitkän tähtäimen suunnittelussa. Alueellinen ominaiskulutus lasketaan vertaamalla nykyistä rakennettua kerrosalaa alueen sähkönkulutukseen. Ominaiskulutus kuvaa energian tai muun suureen kulutusta tiettyä pinta-alaa, tilavuutta tai muuta mittayksikköä kohden. Tässä työssä ominaiskulutuksella tarkoitetaan sähkönkulutusta vuodessa per neliometri (kWh/m², v), koska kerrosalat ovat luotettavammin ja paremmin saatavilla kuin muut sähkönkulutusta selittävät tekijät. Ominaiskulutusta voidaan hyödyntää alueen tulevaisuuden kuormitusta ennustettaessa, jos alueen tuleva rakentaminen on tiedossa. Tulevaisuudessa ominaiskulutukset on mahdollista laskea tuntilukemien avulla, jolloin alueellisesta kulutuksen käyttäytymisestä saadaan aiempaa huomattavasti tarkempi kuva. Kaavoituksessa tuleva rakentaminen on jaoteltu asuinrakennuksiin sekä toimitilarakennuksiin. Tästä syystä käyttäjäryhmäluokittelun ylimpänä tasona on perusteltua käyttää ryhmittelyä kotitalouksiin ja palveluihin.

Taulukossa 2 on kuvattu Helsingin rakennuskanta sekä ominaiskulutukset suurpiireittäin vuonna 2009. Jaotteluna on käytetty ryhmittelyä asuinrakennuksiin ja muihin rakennuksiin. Kerrosalat on haettu Helsingin aluesarjoista, johon on tilastoitu Helsingin rakennuskanta käyttötarkoituksen ja valmistumisvuoden mukaan vuodesta 2002 lähtien. Vuonna 2009 rakennuskannasta 86 prosenttia oli kaukolämmitettyä, 6 prosenttia oli sähkölämmitettyjä, 5 prosenttia oli öljy- tai kaasulämmitettyjä ja muu tai tuntematon lämmitystapa oli noin 3 prosentissa rakennuskannasta. Yhteensä Helsingissä on noin 18 miljoonaa neliometriä toimitiloja. Toimitilarakennukset keskittyvät eteläiseen, läntiseen ja keskiseen suurpiiriin, jotka kattavat koko kanta-

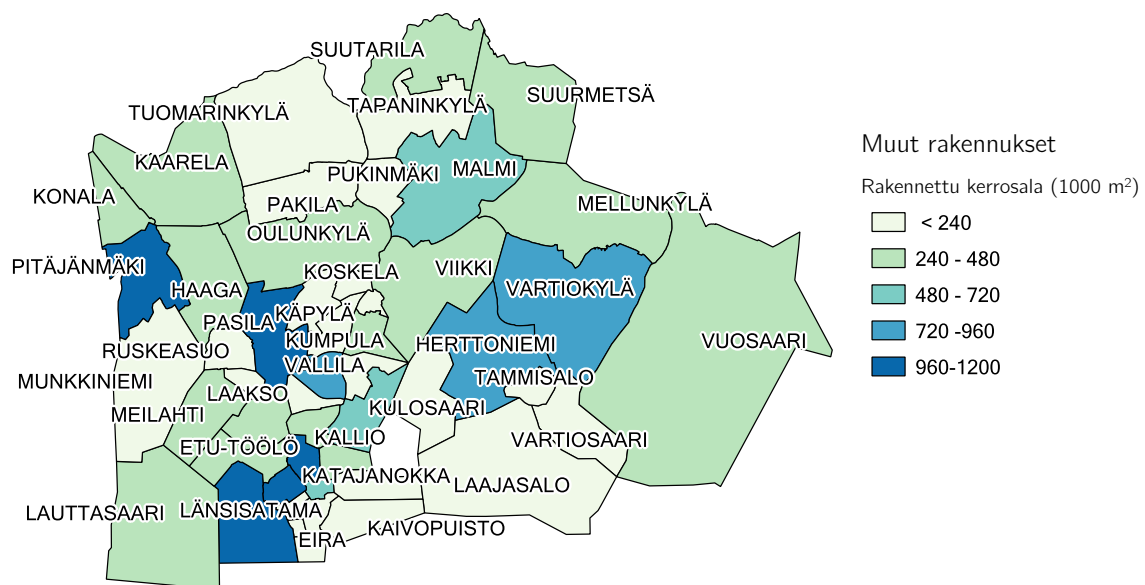
Taulukko 2: Helsingin rakennuskanta vuonna 2010 [25]

Suurpiiri	Asuinrakennukset (m ²)	Muut raken- nukset (m ²)	Asuminen (kWh/m ² , v)	Muut (kWh/m ² , v)
Eteläinen	5 985 703	6 044 228	23,3	138,6
Läntinen	4 617 126	3 204 758	23,3	153,4
Keskinen	3 380 927	4 069 054	21,0	86,8
Pohjoinen	1 907 960	598 695	49,0	119,2
Koillinen	3 971 732	1 720 918	40,2	127,9
Kaakkoinen	2 186 781	1 008 076	25,3	85,0
Itäinen	4 408 316	1 529 733	32,1	86,3
Yhteensä	26 458 545	18 175 462	24,2	126,9

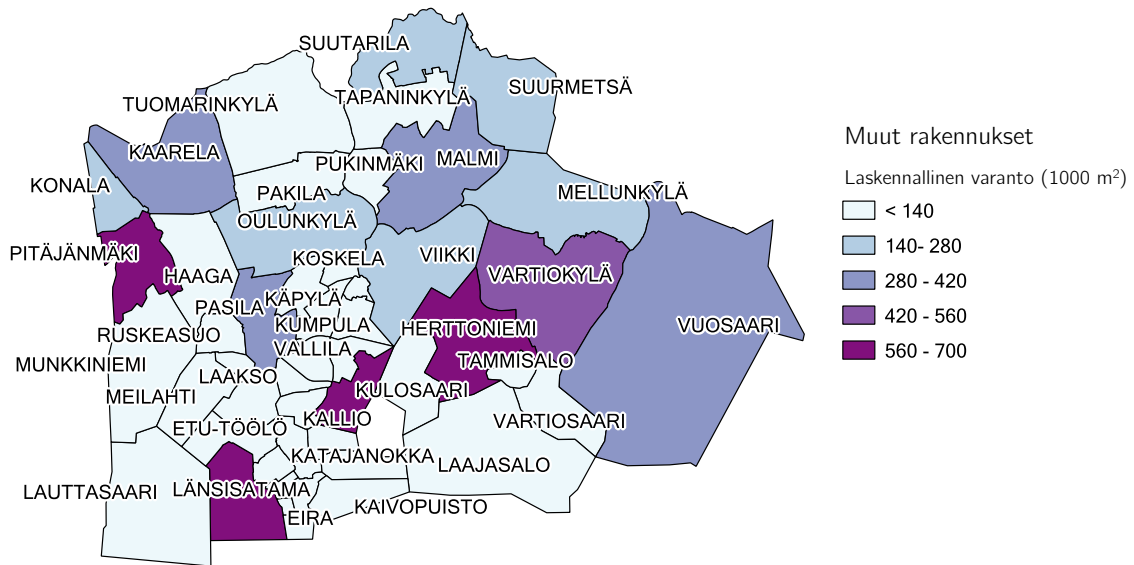
kaupungin alueen. Ominaiskulutuksien laskennassa on käytetty asiakastietojärjestelmän ryhmittelyä sekä osa-alueiden kulutustietoja. Suurpiirien ominaiskulutukset on laskettu osa-alueiden ominaiskulutuksista painottamalla alueiden kerrosaloja. Alueen rakennettua kerrosalaa ei voida kohdentaa tarkasti vastaavaan kulutukseen, koska rakennukselle määritelty käyttötarkoitus ei ole yhtenevä verkkoyhtiössä käytettyyn asiakasryhmittelyyn verrattuna. Lisäksi osassa kerrosalaan lasketuista rakennuksista ei ole lainkaan kulutusta, jolloin alueelle laskettu ominaiskulutus jää liian pieneksi. Tämän vuoksi etäluennan ja paikkatietojärjestelmien mahdollistama liittymän ja kiinteistön välinen yhdistys tarkentaa merkittävästi ominaiskulutusten laskentaa.

Kuvassa 11 on havainnollistettu muuhun kuin asuinkäyttöön tarkoitettuja kerrosaloja kaupunginosittain. Toimitilakeskittymät sijaitsevat samoilla alueilla kuin kuvan 9 suurimmat tehotiheydet. Keskittymien ulkopuolella toimitilarakentaminen on jakautunut melko tasaisesti. Nämä alueet ovat pääasiassa pien- ja kerrostalovaltaisista alueista. Eteläisessä Helsingissä sijaitsee huomattavasti myös asuinrakennuksia ja nämä yhdessä alueen toimitilakeskittymien kanssa aiheuttavat alueelle merkittävän kuormituskeskittymän. Liitteessä on esitetty A asuinrakennusten kerrosaloja kaupunginosittain.

Verkon suunnittelun kannalta on tärkeää pystyä arvioimaan, minne tuleva asuin- ja toimitilarakentaminen sijoittuvat. Kuva 12 esittää muuhun kuin asuinkäyttöön tar-



Kuva 11: Muuhun kuin asuinkäyttöön rakennettu kerrosala kaupunginosittain vuonna 2010 [27]



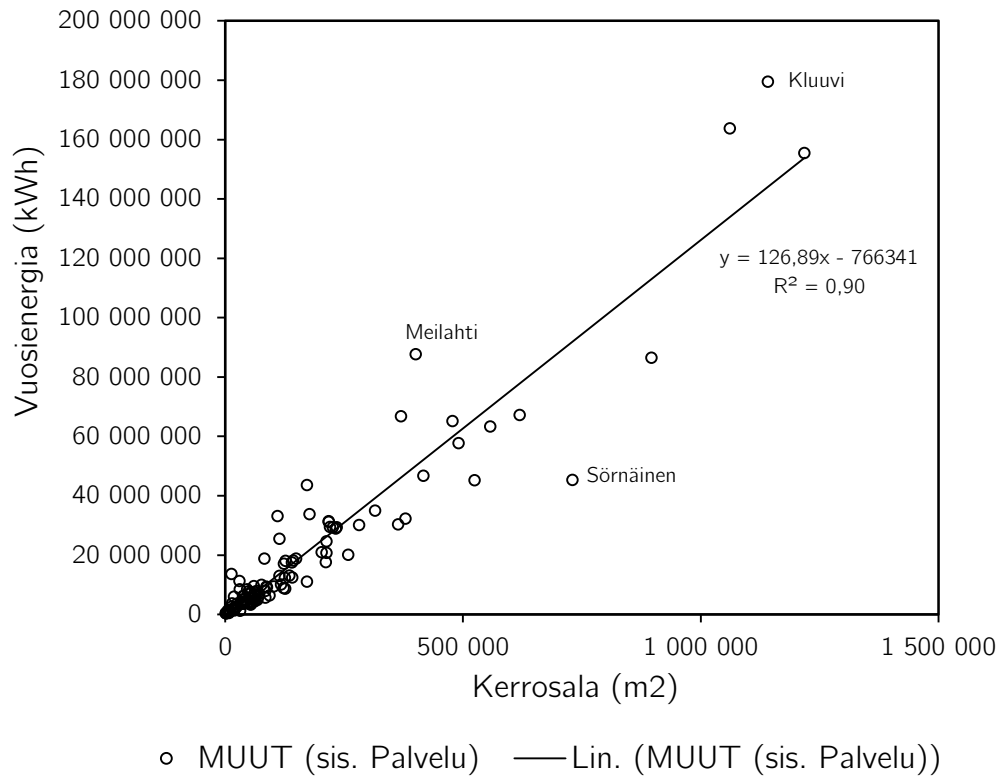
Kuva 12: Muuhun kuin asuinkäyttöön tarkoitettu laskennallinen maavaranto [27]

koitettua laskennallista maavarantoa. Laskennallinen maavaranto kuvaa kaavoitettujen alueiden rakentamismahdollisuuksia riippumatta alueen suunnittelutilanteesta tai kaavoitusvaiheesta. Laskennallinen varanto saadaan vähentämällä teoreettisesta varannosta kerrosala, joka arvioidaan jäävän kaavayksiköllä rakentamatta. Varanto näyttää keskittyvän pääasiassa jo olemassa oleville toimitila-alueille. Tähän lienee syynä se, että nämä alueet ovat jo valmiiksi profiloituneet toimitilarakentamiseen, eikä uusia valtavia toimistokeskitymiä haluta rakentaa pientaloalueille.

Vuonna 2010 koko Helsingin alueen ominaiskulutuksen keskiarvo asunnoille oli noin 24 kWh/m², v ja toimitiloille 127 kWh/m², v (taulukko 2). Yleisesti ottaen toimitilojen ominaiskulutukset ovat asuinrakennuksia korkeampia rakennuksen varustelusta ja käytön luonteesta johtuen. Asuinrakennuksissa korkeimmat ominaiskulutukset sijoittuvat pientaloalueille, joissa käytetään sähkölämmitystä, kun taas korkein palvelukulutus keskittyy toimitilavaltaisille alueille.

Kaupunginosa-alueiden ominaiskulutuksissa on suuria eroja alueen rakenteesta riippuen. Kuvissa 13 ja 14 on havainnollistettu palvelu- ja asuinrakennusten kerrosalojen ja kulutuksen välistä riippuvuutta kaupunginosa-alueittain. Eteläisessä suurpiirissä palvelurakennusten kerrosalan ja vuosienergian välille sovitettun lineaarisen suoran kulmakerroin on 137,4 (kWh/m², v) ja selitysaste R²=0,96. Koko Helsingin palvelurakennuskannan kerroin on 126,12 (kWh/m², v)

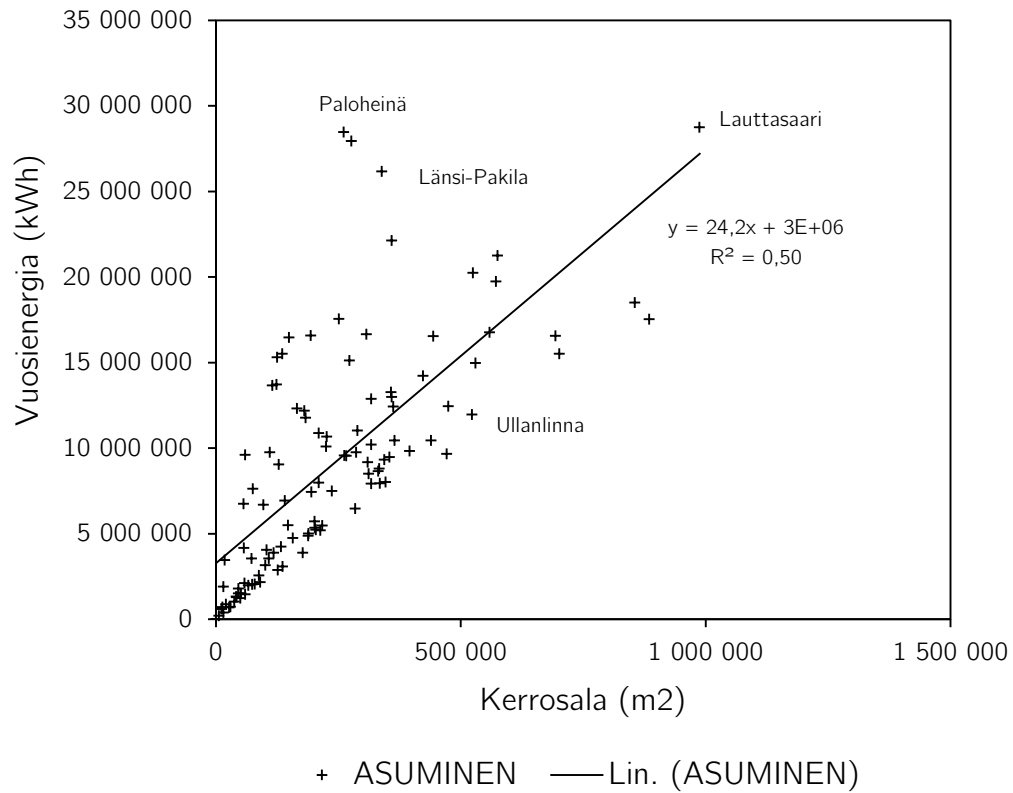
Osa-alueen asumiseen liittyvästä vuosienergiasta puuttuvat asuinkiinteistöt, joihin



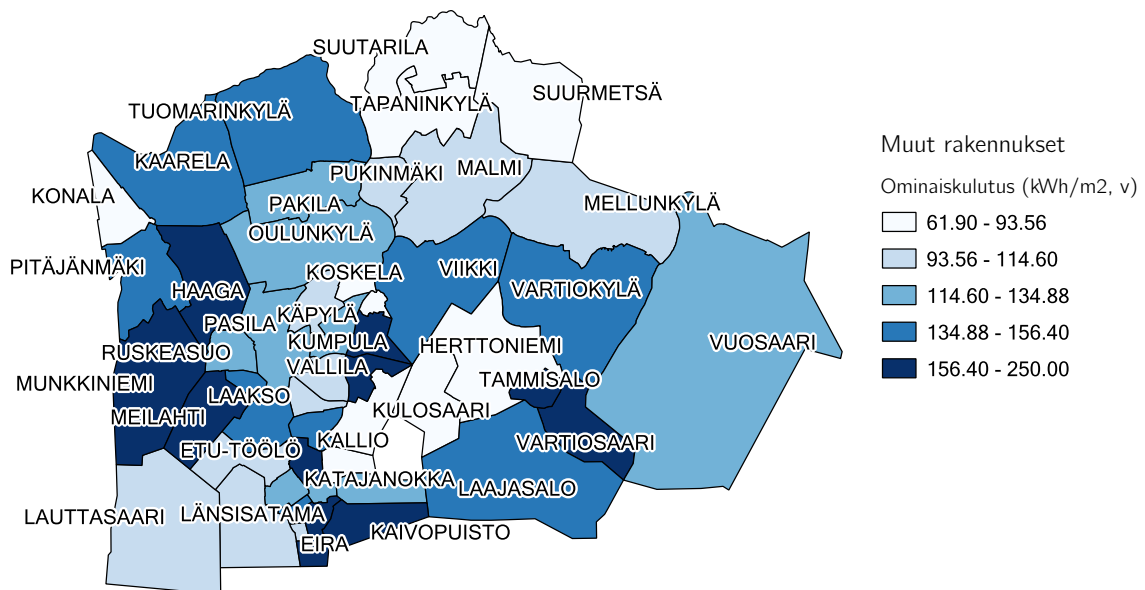
Kuva 13: Kerrosalojen ja vuosikulutuksen välinen hajontakuvio kaupunginosa-alueittain toimitiloille

kuuluu myös palvelukulutusta. Tällaisia asuinrakennuksia, joissa on esimerkiksi ”kivijalkakauppa”, on kuitenkin runsaasti Helsingissä. Tästä syystä osa-alueen asumiseen liittyvä kulutus on kuvassa 14 todellista pienempi, mikä selittää kuvan ja taulukon 2 pieniä arvoja. Lisäksi Asuinrakennuksissa lämmitysratkaisut vaihtelevat huomattavasti toimitiloja enemmän.

Kuva 15 esittää muuhun kuin asumiseen tarkoitettujen rakennusten keskimääräisiä ominaiskulutuksia kaupunginosittain. Kaupunginosan asumiskulutuksen ulkopuolinen osuus on laskettu summaamalla vuosienergiat käyttöpaikoilta, jotka ovat luokiteltu asiakastietojärjestelmässä toimitila-, varasto-, ja muu käyttötarkoitus -ryhmiin. Kaupunginosan kerrosalaan on laskettu kaikki muuhun kuin asumiseen tarkoitettut rakennukset. Korkeimmat ominaiskulutukset sijaitsevat eteläisessä Helsingissä sekä toimistovaltaisilla alueilla, kuten Pitäjänmäellä. Ominaiskulutusten laskentaan tuo epätarkkuutta se, että kerrosaloja ei ole voitu kohdentaa tarkasti vastaavaan sähkönkulutukseen.



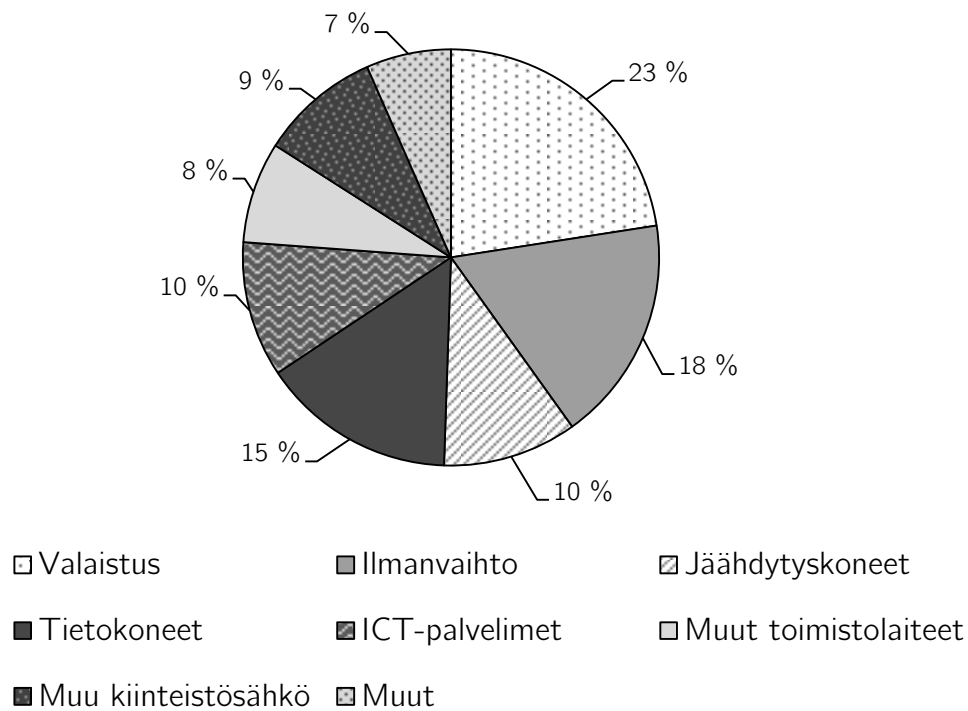
Kuva 14: Kerrosalojen ja vuosikulutuksen välinen hajontakuviokaupunginosa-alueittain asuinrakennuksille



Kuva 15: Muuhun kuin asuinkäyttöön tarkoitettujen rakennusten keskimääräiset ominaiskulutukset osa-alueittain

4.4 Toimitalojen kuormatyypit

Palvelurakennuksen sähkönkäyttö muodostuu kiinteistösähköstä ja palvelun tuottamiseen käytettyjen laitteiden kulutuksesta. Kulutuksen kannalta merkittävimmät laiteryhymät ovat ilmanvaihto- ja jäähdytysjärjestelmät, sisävalaistus sekä toimistolaitteet. Lisäksi toimistossa on aina myös muuta kulutusta, joka jää edellisen ryhmittelyn ulkopuolelle. Tällaisia kuormia ovat esimerkiksi hissit, keittiöt sekä sähköiset ulkolämmitykset. Kuvassa 16 on esitetty palvelukulutuksen jakautumista toimitalossa. Kuvan jakauma on peräisin Ruotsissa vuonna 2005 tehdyistä tutkimuksista, jossa kartoitettiin 123 toimisto- ja hallintorakennuksen energiankulutusta. Kiinteistöjen sähkönkäytössä on suurta vaihtelua toimialoittain, joten yleispätevien kulutusjakaumien antaminen on hyvin haasteellista. Tässä luvussa pyritään antamaan suuruusluokka-arvioita kulutuksen jakautumisesta aiempiin tutkimuksiin pohjautuen. Tulevaisuudessa arviointi tulee helpottumaan, sillä vuonna 2012 voimaan astuneet rakennusmääräykset edellyttävät, että uusissa rakennuksissa sähkönkulutus tulee mitata ilmanvaihtojärjestelmän, lämmityksen, jäähdytyksen ja kiinteän valaistuksen osalta erikseen. Alamittausten yleistymisen tarjoaa mahdollisuuden huomattavasti nykyistä tarkempaan kulutuksen jaotteluun. [28, 29]



Kuva 16: Sähköenergian kulutuksen jakautuminen toimitaloissa [28]

4.4.1 Ilmanvaihto ja jäähdytys

Ilmanvaihtojärjestelmän tehtävänä on ylläpitää terveellinen, turvallinen ja viihtyisä huoneilma rakennuksessa. Ilmanvaihdon avulla huoneilmasta poistetaan terveydelle haitallisia kaasuja ja epäpuhtauksia sekä tuodaan tilalle uutta raikasta ja puhdasta ilmaa. Ilmanvaihdon sähkönkulutus muodostuu pumppujen ja puhaltimien toiminnasta. Ilmanvaihdon osuus on tyypillisesti noin 25–35 prosenttia toimistorakennuksen sähkönkulutuksesta. Ilmanvaihtojärjestelmiä ohjataan aikaperusteisella käynnistyksellä tai taajuusmuuttajien avulla. Aikaperusteisessa käynnistyksessä ilmanvaihto ohjataan päälle rakennuksen käyttöaikojen mukaan, jolloin toimintatiloja on vain kaksi; joko laitteet ovat päällä tai pysäytettynä. Heikkoutena tässä on, että pumppujen ja puhaltimien todellisesta kuormasta huolimatta järjestelmä käy täydellä pyörimisnopeudella. Taajuusmuuttajilla toimivassa ilmanvaihtojärjestelmässä pumppujen ja puhaltimien pyörimisnopeutta voidaan säätää hetkellisen kuorman mukaan, jolloin päästään pienempään sähkönkulutukseen. Taajuusmuuttajakäytön energiansäästöksi on arvioitu yli 20 prosenttia [30].

Ilmanvaihtokoneiden sähkönkulutus W (kWh) voidaan laskea kaavalla (1) suunnittelun ominaissähkötehon SFP (kW/(m³/s)), ilmavirran q_v (m³/s) ja käyntiajan Δt (h) tulona. SFP-luku (Specific Fan Power) kuvaa ilmanvaihtojärjestelmän tarvitsemaa sähkötehoa, kun ilmaa vaihdetaan yksi kuutiometri sekunnissa. SFP-luvun laskennassa ei huomioida ilmanvaihtojärjestelmän muita laitteita, jotka eivät osallistu varsinaisen ilmanvaihtojärjestelmän mitoittamiseen (esim. lämmönottojärjestelmän pumput). Muu ilmanvaihtojärjestelmän sähkönkulutus huomioidaan lisäämällä ilmanvaihtojärjestelmän tarvitsemaan sähkötehoon muiden laitteiden kulutus $W_{iv,muut}$ (kWh). Vuoden 2012 rakennusmääräysten mukaan tulo- ja poistoilmajärjestelmien ominaissähköteho saa olla enintään 2,0 kW/(m³/s). Lähteessä [29] on esitetty lisäksi ympäristöministeriön rakennusmääräyskokoelmassa annettuja ilmavirran ohjearvoja toimistorakennuksille, liiketiloille ja muille palvelurakennuksille. [29, 31]

$$W_{ilmanvaihto} = \sum SFP q_v \Delta t + W_{iv,muut} \quad (1)$$

Rakennuksen sisäilmaa lämmittävät tilassa olevat ihmiset, auringonsäteily, valaistus ja sähkölaitteet. Ylimääräisen lämpöenergian poistamiseen käytetään joko ilma- tai vesikiertoista jäähdytysjärjestelmää tai näiden yhdistelmää. Jäähdytysjärjestelmän energiankulutus muodostuu jäähdytysenergian tuottamiseen vaaditusta energiasta sekä apulaitteiden sähkönkulutuksesta. Jäähdytys kuluttaa huomattavasti sähköä,

joten sen käyttöön kannattaa kiinnittää huomiota. Jäähdytystä käytetään sekä työskentelytilojen että palvelinsalien viilennykseen. Tyypillinen tavoitelämpötila työskentelytiloissa (sisäilmastoluokka S2) on yli 21,5 °C lämmityskaudella ja alle 24,5 °C jäähdytyskaudella. Jäähdytyksen lisääntyminen on havaittu Helsingissä kasva-neena kesäkuormana jäähdytyskauden lyhyestä pituudesta huolimatta. Jäähdytyk-sen aiheuttamaa kuormaa voidaan pienentää merkittäväsi, mikäli kuumimpina hel-lepäivinä sallitaan muutaman asteen lämpötilan nousu sisäilmassa. [30, 32]

4.4.2 Valaistus

Toimitalon valaistus muodostuu yleisvalaistuksesta ja paikallisvalaistuksesta. Kiin-teistössä valaistuksen kuluttamaan energiaan vaikuttavat valaisimen kokonaiste-ho, päivänvalon saatavuus ja valaistuksen ohjausjärjestelmät. Valaistuksen sähkö-energian kulutus $W_{valaistus}$ (kWh) voidaan laskea tilakohtaisesti kaavalla (2), jossa $P_{valaistus}$ (W/m²) on valaistuksen kokonaissähköteho huonepinta-alaa A_{huone} (m²) kohti, Δ_t on valaistuksen käyttöaika ja f valaistuksen ohjaustavasta riippuva ker-roin. Valaistuksen ohjearvo uusille toimistorakennuksille on 12 W/m² ja liikeraken-nuksille 19 W/m². [29]

$$W_{valaistus} = \sum P_{valaistus} A_{huone} \Delta_t f / 1000 \quad (2)$$

Yksittäisen valaisimen osuus kiinteistön kuluttamasta energiasta on pieni, mutta ko-konaisuutena valaistus on merkittävä laiteryhmä, sillä valaisimia on paljon ja valais-tuksen käyttöaika on pitkä. Toimistorakennuksessa valaistuksen käyttötunteja kertyy vuodessa noin 2500 tuntia ja liikerakennuksessa 4000 tuntia. Palvelusektorilla valais-tuksen osuus sähkönkulutuksesta voi olla jopa 30–40 prosenttia. Toimitiloissa on pit-kään käytetty yleisvalaistuksessa energiatehokkaita loistelamppuja, mutta Motivan energiakatselmusten perusteella valaistuksella on yhä huomattava säästöpotentiaali. Energiatehokkuutta voidaan edelleen parantaa suosimalla uusia energiatehokkaita valaisimia ja hyödyntämällä ohjauksessa automaattista läsnäolontunnistusta sekä päivänvaloon perustuvaa säätöä. [9, 33]

4.4.3 Toimistolaitteet

Toimistojen laitekanta muodostuu pääasiassa tietokoneista, kopiokoneista ja tulosti-mista. Laitekanta lisääntyi 2000-luvulle tultaessa tietokoneiden yleistymisen myötä,

mikä näkyy myös kuvassa 6 sähköintensiteetin kasvuna. Tietotekniikan nopean kehittymisen seurauksena toimistojen laitekanta on uusiutunut nopealla syklillä viime vuosina. Kuvaputkinäytöt on korvattu energiatehokkaammilla nestekide- tai LED-näyttöillä ja pöytäkoneista on siirrytty vähemmän kuluttaviin kannettaviin malleihin. Taulukon 3 perusteella siirtyminen pöytäkoneista kannettaviin tietokoneisiin on energiatalousmielessä perusteltua, sillä kannettavien ominaiskulutus on huomattavasti pöytäkonetta pienempi.

Palvelusektorilla toimistolaitteiden osuudeksi on arvioitu noin 15–25 prosenttia kokonaiskulutuksesta. Kuluttajalaitteiden ominaiskulutuksen on arvioitu olevan toimistorakennuksissa noin 12 W/m² ja liikerakennuksissa noin 1 W/m². Toimistolaitteiden energiankulutukseen on mahdollisuus vaikuttaa hyödyntämällä laitteista löytyviä energiansäästöasetuksia ja opastamalla käyttäjiä laitteiden tarpeenmukaiseen käyttöön. [29]

Taulukko 3: Toimistolaitteiden tyypillisiä vuotuisia sähköenergian ominaiskulutuksia [34]

Toimistolaitteet	Ominaiskulutus
Kannettava	24 kWh/kpl
PC:t+näyttö	430 kWh/kpl
Kopiokoneet	1 700 kWh/kpl
Laserkirjoittimet	400 kWh/kpl

4.4.4 Muut kohteet

Palvelusektorin monimuotoisuudesta johtuen kiinteistössä on aina myös edellä esitettyjen päälaiteryhmien ulkopuolista kulutusta. Muilla kulutuskohteilla tarkoitetaan kulutusta, joka saadaan vähentämällä kiinteistön yhteiskulutuksesta toimistolaitteiden, valaistuksen sekä ilmanvaihdon ja jäähdytyksen käyttämä sähkö. Toimialasta riippuen muu kulutus voi olla merkittävä osa kiinteistön sähkökäytöstä. Tarkka laitetason erittely on kuitenkin hyvin hankalaa, sillä erilaisia laitetyppejä voi olla satoja eikä niiden lukumääristä ole tietoa. Vuoden 2012 rakennusmääräyksissä on esitetty asiantuntijoiden kulutusarviot toimistorakennuksen tiloille, joilla on erikoiskäyttötarkoitus (taulukko 4). Myös kiinteistösähkössä voi olla kulutusta, joka ei sisälly edellä käsiteltyihin laitoryhmiin. Tällaisia ovat esimerkiksi vesikiertojärjestelmään kuuluvat pumput, hissien sähkömoottorit ja ulkotilojen sähkölämmitykset.

Taulukko 4: Toimistorakennuksen tilakohtaisia vuotuisia ominaiskulutuksia [34]

Muut kohteet		Ominaiskulutus
Ruokala	1	kWh/annos
Edustussauna	20	kWh/kerta
Hissi	2 000	kWh/(8 henkilön hissi)
Autopaikat	150	kWh/paikka
Pihavalaistus	2	kWh/brm ²

4.5 Toimistorakennusten sähkönkulutukseen vaikuttavat tekijät

Palvelurakennuksen sähkönkulutukseen vaikuttavat useat tekijät. Perinteisiä sähkönkulutukseen vaikuttavia muuttujia ovat lämpötila, kellonaika ja viikonpäivä, joita vertailemalla palvelukulutus erottuu selkeästi asuinkulutuksesta. Yksi keskeisimmistä kulutuksen suuruutta kuvaavista tekijöistä on rakennuksen kerrosala, sillä pistokekuorma on tyypillisesti hajautunut ympäri rakennusta ja talotekniset järjestelmät mitoitetaan koko kerrosalalle. Toimitilat ovat tyypillisesti kaukolämmitettyjä, mikä vähentää sähkönkäytön lämpötilariippuvuutta lämmityskaudella. Kesällä jäähdyststarve näkyy kuitenkin sähkönkulutuksen selvänä kasvuna.

Palvelurakennuksissa yksi tärkeimmistä kulutukseen vaikuttavista tekijöistä on rakennuksen käyttötarkoitus, mikä ohjaa rakennuksen käyttöaikoja. Taulukossa 5 on kerrottu palvelurakennusten tavanomaiset käyttöajat (asiantuntijan arvio) toimialatyypeittäin. Taulukossa on esitetty myös uusien matalaenergiarakennusten tavoitetasot sekä arvio rakennuskannan nykyisestä tasosta. Käyttöajat vaikuttavat suoraan sähkönkulutukseen, sillä isot ilmanvaihtokoneet on ohjattu toimimaan aukioaikojen mukaan ja ihmisten läsnäolo lisää valaistus- ja laitekulutusta välittömästi. Toisaalta käänteisesti voidaan tuntikulutuksista tulkita rakennuksen toimiala. Esimerkiksi toimistoissa työskennellään yleisesti ottaen arkipäivisin kello 7:00-17:00 ja myymälöissä 6:30-21:00, myös viikonloppuisin, mikä näkyy kohteiden tuntisarjoja vertaillaessa. [35]

Rakennuksen energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa suuresti suunnitteluvaiheen ratkaisulla, joko uudisrakentamisen tai saneerauksen yhteydessä. Suunnitteluvaiheessa päätetään 80 prosenttia rakennuksen käyttökustannuksista. Kokonaisvaltaisessa suunnittelussa on tärkeää talotekniikkasuunnittelijoiden yhteistyö, sillä ilmanvaihto-, jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmien tulee toimia kokonaisuutena tehokkaas-

Taulukko 5: Palvelurakennusten tavanomaiset käyttöajat ja energian ominaiskulutukset (rakennuskanta ja tavoitetaso) [31]

Toimitalotyyppi	Tyypillinen käyttö- aika	E-luku kWh/m ² ,v (rakennuskanta)	E-luku (kWh/m ² ,v (tavoitetaso)
Opetusrakennus	ma-pe 7:30-18:00	180-250	170
Toimistorakennus	ma-pe 7:00-18:00	190-250	170
Liikerakennus	ma-la 6:30-21:00	200-500	240
Päiväkoti	ma-pe 7:30-18:00	250-400	170
Seurakuntakeskus	ma-pe 7:30-18:00	190-250	170

ti. Myös julkisivumateriaalilla on huomattava vaikutus rakennuksen lämmitys- ja valaistustarpeeseen. Energiatarkkaiden laitteiden valinnassa tulee tarkastella koko laitteen elinkaaren kustannuksia, jotta valinta on energiataloudellisesti perusteltu. [31]

Rakennuksen käyttövaiheessa energiankulutuksen seurannalla voidaan varmistaa, että järjestelmät toimivat oikein. Toimiva rakennusautomaatiojärjestelmä antaa tietoja kiinteistön olosuhteista, kulutuksesta sekä käyttötilasta, mikä auttaa kiinteistön ohjauksessa ja seurannassa. Rakennuksen energiatehokkuus ei toteudu ainoastaan teknisin ratkaisuin vaan myös toiminnan ohjaamisella. Tilankäyttäjien käyttötottumuksilla on suuri vaikutus energiankulutukseen. Rakennuksen omistajan, kiinteistöhuoltoyhtiön ja tilankäyttäjän olisi hyvä yhdessä huolehtia osapuolien riittävästä perehdytyksestä kiinteistön järjestelmiin ja sopia aktiivisesta tiedonvaihdesta.

5 Etäluentatietojen hyödyntäminen kuormitusanalyseissä

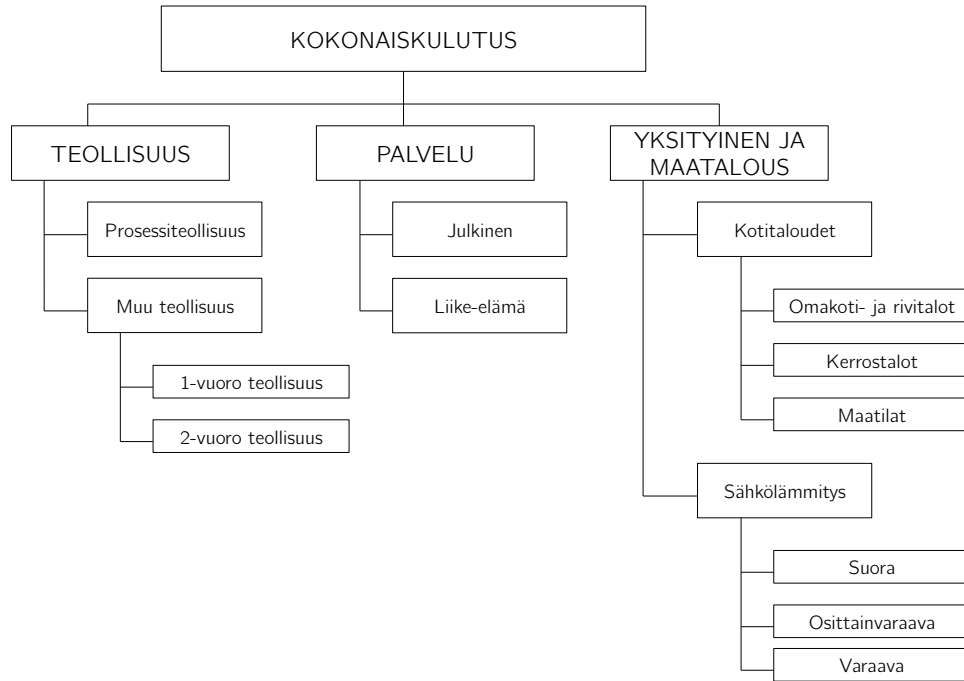
Perinteisesti sähköverkkoyhtiöissä kuormitusennusteet on laadittu vuosienenergioiden perusteella. Etäluentaan siirtymisen myötä verkon kuormituksen ajallisesta vaihtelusta on saatavilla huomattavasti aiempaa tarkempaa tietoa. Tuntimittaustietojen tarjoamien mahdollisuuksien kartoitus on vasta käynnistymässä, kun viimeisetkin mittarin asennukset valmistuvat. Tässä luvussa tarkastellaan etäluentatietojen hyödyntämistä verkon kuormitusanalyseissä kahden Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulussa tutkitun menetelmän osalta. Pyrkimyksenä luvussa ei ole selvittää menetelmien matemaattista taustaa, vaan keskittyä pohtimaan kuinka menetelmiä voitaisiin soveltaa kuormitustutkimuksessa. Luvussa esitellään myös työssä käytetyt tutkimusaineistot.

5.1 Liittymien ryhmittely tuntilukemien avulla

5.1.1 Kuormituksen mallinnus indeksisarjoilla

Asiakasluokittelulla tarkoitetaan sähkökäyttäjien jaottelua ryhmiin, joiden kulutuksen suuruus ja ajallinen vaihtelu ovat yhtenevää. Sähköverkon kuormitusta ja tulevaa kysyntää on tyypillisesti mallinnettu vuosienenergiaennusteen, ulkolämpötilan ja kalenterin mukaan muuttuvan kuormitusmallin avulla. Suomessa nykyisin laajalti käytössä oleva asiakasluokittelu perustuu Suomen Sähkölaitosyhdistys ry:n (nykyinen Sähköenergiaaliitto ry Sener) vuonna 1992 julkaisemaan sähkökäytön kuormitustutkimukseen. Kuormitustutkimuksen mittaukset tehtiin 42 sähkölaitoksen toimesta lähes 1200 mittauskohteessa 1980 ja -90 luvuilla. Mittausten tuloksena määriteltiin 46 tyyppikäyttäjälle kuormitusta mallintavat indeksisarjat, jotka toimivat edelleen käyttäjäryhmittelyn lähtökohtana verkkoyhtiössä. Kaikki 46 kuormitusmallia eivät välttämättä ole jokaisessa yhtiössä käytössä, vaan käytetyt ryhmät valitaan mahdollisimman hyvin verkon kuormitusta vastaavaksi. Lisäksi suurimmat yksittäiset kulutuskohteet on usein mallinnettu erikseen omilla kuormituskäyrillä. Kuvassa 17 on esitetty pääpiirteittäin kulutuksen ryhmittelyperiaate vuoden 1992 kuormitustutkimuksessa.

Indeksisarjalla voidaan arvioida tietyn käyttäjäryhmän keskimääräinen teho sekä tehon normaalihajonta tietyssä ajan hetkenä. Indeksisarjan avulla käyttäjäryhmän



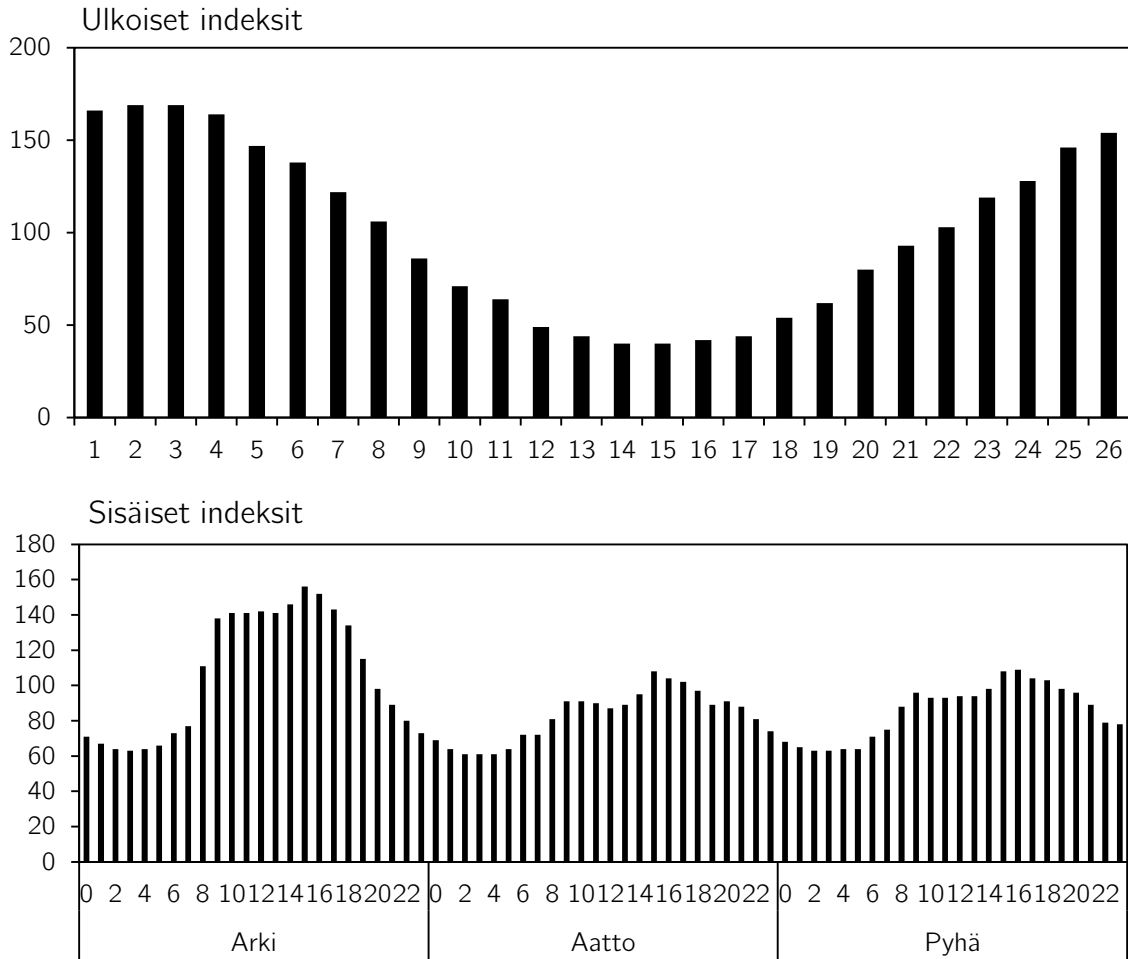
Kuva 17: Pääpiirteittäinen asiakasluokittelu vuoden 1992 kuormitustutkimuksessa [36]

vuosienergia skaalataan vuoden jaksolle. Keskitheoa kuvataan indeksillä 100. Pienempi indeksi merkitsee keskimääräistä pienempää tehoa ja suurempi vastaavasti keskimääräistä suurempaa tehoa. Käyttäjäröhmän keskitheo halutulla ajanhetkellä lasketaan kaavan 3 avulla:

$$P_{ri} = \frac{E_r}{8760} \cdot \frac{Q_{ri}}{100} \cdot \frac{q_{ri}}{100} \quad (3)$$

missä P_{ri} on käyttäjäröhmän r ajankohdan i tuntikeskitheo; E_r käyttäjäröhmän r vuosienergia; Q_{ri} on käyttäjäröhmän r ajankohtaa i vastaava 2-viikkoindeksi (ns. ulkoinen indeksi) ja q_{ri} on käyttäjäröhmän r ajankohtaa i vastaava tunti-indeksi (ns. sisäinen indeksi). Kuvassa 18 on esitetty rahoitus- ja vakuutustoiminta-ryhmän (SLY 920660) 2-viikkojaksot sekä sisäiset indeksit arki-, aatto-, ja pyhäpäivälle vuoden viimeisellä 2-viikkojaksolla. [37, 38]

Ulkoisella indeksillä kuvataan sähkönkulutuksen vuodenaikavaihtelua verrattuna koko vuoteen. Ulkoisia indeksejä on 26 jokaista käyttäjäröhmää kohden ja ne jakavat vuoden kahden viikon peräkkäisiin jaksoihin. Ensimmäinen 2-viikkojakso alkaa 1. tammikuuta ja päättyy 14. tammikuuta. Viimeisessä 2-viikkojaksossa on poikkeuksellisesti 15 päivää. Sisäiset indeksit kuvaavat vuorokauden tuntitehojen vaihtelua



Kuva 18: Ryhmän 920660 ulkoiset (2-viikkojaksot) ja sisäiset indeksit (1 = arkipäivä, 2= aatto, 3= pyhä)

verrattuna ajankohdan 2-viikkokeskitehoon. Vuorokauden tehonvaihtelu on määritetty 24 indeksillä erikseen arki-, aatto-, ja pyhäpäiville. Sisäiset indeksit alkavat klo 07.00 eli esimerkiksi pyhäindeksillä kuvataan tuntitehönvaihtelua välillä sunnuntai klo 07.00 ja maanantai klo 07.00.

Ulkoiset indeksit on muodostettu vastaamaan pitkäaikaisia lämpötiloja laskemalla Helsingin, Tampereen, Joensuun ja Oulun lämpötiloista vuosina 1931–1960 keskiarvo (ns. normaalilämpötila). Käyttäjärühmän r lämpötilariippuvuus ajankohtana i on huomioitu lineaarisella laskentamallilla kaavan mukaisesti:

$$M_{ki}(T_{ti}) = M_{ki,n} + \beta_r(T_i - T_{i,n}) \quad (4)$$

missä $M_{ki}(T_i)$ on lämpötilakorjattu ulkoinen indeksi, M_{ki} on ulkoinen indeksi nor-

maalilämpötilassa, T_i on todellinen tai laskennallinen lämpötila, $T_{i,n}$ on normaali-lämpötila ja β_r käyttäjäryhmän lämpötilakerroin. [39, 40]

5.1.2 Automaattisen tunnistuksen hyödyt

Sähkönkäyttäjien ryhmittely on keskeisessä asemassa verkon kuormituksen analysoinnissa sekä ennustamisessa, sillä kuormitusennusteet ohjaavat verkon pitkän aikavälin suunnittelua. Kuormitusmalleihin pohjautuvalla asiakasluokittelulla on tärkeä rooli myös sähkön hankinnan ja hintatariffien suunnittelussa. Siirtotariffien rakenteilla verkkoyhtiö voi ohjata, miten verkkotoiminnan kustannukset jaetaan eri asiakasryhmien maksettavaksi. Sähkön myyjälle kuormitusmallit ovat lähtötieto tulevan sähkönkysynnän suuruuden ja ajankohdan arvioinnissa, mikä ohjaa myyjän toimintaa sähkömarkkinoilla. Edellä mainituista syistä johtuen asiakasluokittelussa olevilla virheillä voi olla suuri vaikutus sähköverkon haltijan ja sähkön myyjän tuloksiin. [41]

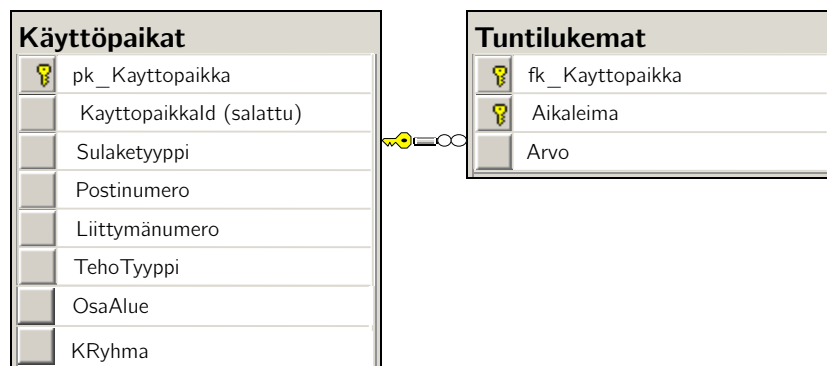
Helen Sähköverkko Oy:ssä kulutusryhmät on määritelty käyttöpaikoittain asiakastietojärjestelmään liittymän luonnin yhteydessä. Luokittelussa käytetään käyttöpaikkoja, koska liittymä voi sisältää kulutusta useista eri käyttäjäryhmistä. Käyttöpaikan sähkönkäytössä tapahtuvat muutokset eivät automaattisesti muuta asiakasryhmää paremmin uutta kulutusta vastaavaksi, joten nykyinen ryhmittely sisältää helposti virheitä. Tällaisia muutoksia ovat esimerkiksi lämmitys- ja jäähdytystavassa tai rakennuksen käyttötarkoituksessa tapahtuvat muutokset. Asiakasluokittelussa olevien virheiden lisäksi 1992 julkaistujen kuormituskäyrien käytettävyyttä on heikentänyt se, että ne ovat osittain vanhentuneita ja tarkoitettu kuvaamaan keskimääräistä kulutusjakamaa koko Suomen tasolla. Sähkölaitteiden lukumäärä toimistoissa ja kotitalouksissa on kasvanut huomattavasti sekä kauppojen aukioloajat pidentyneet 1990-luvun alkuun verrattuna. Lisäksi älykkään sähköverkon myötä uudenlaiset kuormatyyppit, kuten sähköautot ja hajautettu tuotanto, lisääntyvät tulevaisuudessa ja sähkönkäyttäjät muuttuvat dynaamisemmiksi sähkön hinnan suhteen. Näiden muutosten mallintamiseen nykyiset SLY:n kuormituskäyrät eivät sovellu. [42]

Etäluentaan siirtyminen parantaa mittaustiedon saatavuutta huomattavasti. Hyödyntämällä asiakasluokittelussa AMR-mittauksia voidaan kuormitusmallit muodostaa oman jakelualueen todellisista mittauksista. Todellisiin mittauksiin perustuva ryhmittely luokittelee asiakkaat toteutuneen kulutuskäyttäytymisen mukaan, mikä parantaa luokittelun tarkkuutta verrattuna nykyiseen kyselyyn perustuvaan ryhmit-

telyyn. Jakelualueen mittauksista muodostetuille ryhmille voidaan laskea uudet kyseisen jakelualueen kulutusta mallintavat tyyppikäyrät, jotka ei ole sidottu SLY ry:n indeksisarjoihin. Tämä mahdollistaa lisäksi indeksisarjoja tarkemman kuormituksen lämpötilariippuvuuden mallintamisen. Todellisiin mittauksiin perustuva luokittelu edellyttää tunti lukemien tilastollista käsittelyä, jotta lukemista voidaan löytää yhtenevästi käyttäytyviä ryhmiä. Oman haasteensa mittaustiedon tehokkaaseen käsittelyyn tuo etäluentatiedon valtava määrä, koska lukemien manuaalinen tarkistaminen ei ole mahdollista suuren datamäärän takia. Tuntisarjoissa ei saa olla virheitä kuormitusanalyysijä tehtäessä. Tässä työssä käytetty aineisto (AMR-data) on kuvattu luvussa 5.1.3 ja ryhmittelyyn käytetyt menetelmät on esitelty luvussa 5.1.4.

5.1.3 Ryhmittelyyn käytetyn aineiston kuvaus

Asiakkaiden luokitteluun käytettiin kantakaupungin ja Pakilan etälueuttavilta mittareilta mitattuja tuntisarjoja vuodelta 2010 (1.1.2010–31.12.2010). Analyysit rajattiin kantakaupungin (postinumerot 00100–00580) ja Pakilan alueille, koska näillä alueilla mittariasennukset valmistuivat suurilta osin jo vuonna 2009. Tuntisarjojen tehokasta käsittelyä varten rakennettiin kuvan 19 mukainen MySQL-tietokanta. Tietokanta sisälsi kaikkien datan hakupäivämäärään mennessä asennettujen etälueuttavien mittareiden aikasarjat, joten maantieteellinen rajausta toteutettiin osa-aluekenttää hyödyntäen. Tietokanta sisälsi myös muita lisätietoja käyttöpaikalta, kuten sulaketyypin ja asiakastietojärjestelmässä käytetyn käyttäjäryhmän (KRyhma). Matemaattinen ryhmittely pohjautui kuitenkin ainoastaan tunti lukemien analysointiin.

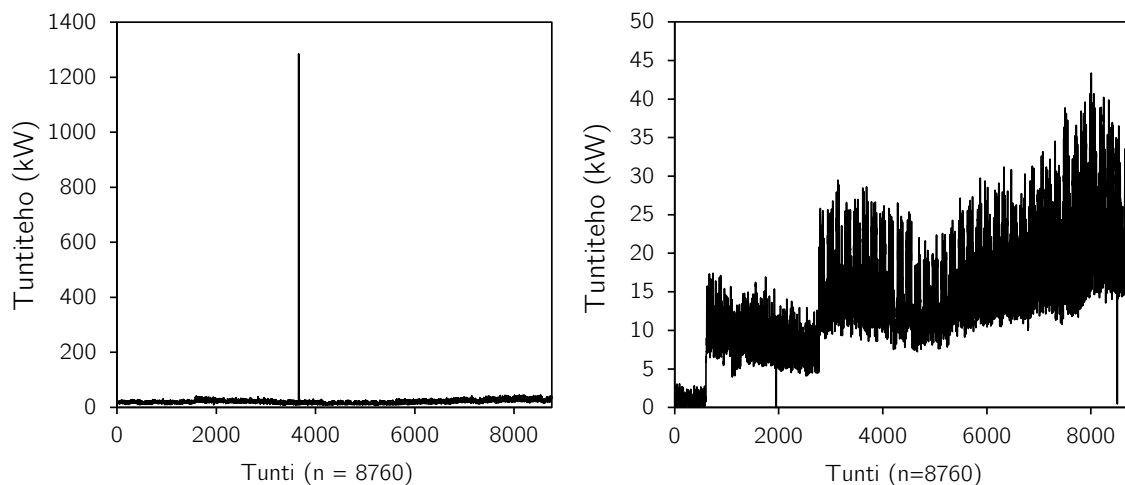


Kuva 19: Energiamittaustietojen säilytystä ja käsittelyä varten rakennettu tietokanta

Etäluentatietoihin perustuvan luokittelun lähtökohtana oli analysoida liittymien aikasarjoja. Liittymätason tarkastelua varten samaan liittymään kuuluvien käyttöpaikkojen kulutukset summattiin yhteen tunneittain. Analyysien kannalta tarkastelu olisi voitu suorittaa myös käyttöpaikoille. Liittymätason käsittely vastaa kuitenkin paremmin pitkän aikavälin suunnitteluun tähtäävää käyttötarkoitusta, koska liittäminen on mahdollista yhdistää paikkatiedon avulla siihen kytketyn kiinteistön kerrosalaan. Käyttöpaikkatason tarkastelussa ongelmana on, että neliöiden kohdentaminen kulutusta vastaavaan käyttöpaikkaan on tällä hetkellä mahdoton toteuttaa, mikäli liittäminen koostuu useista käyttöpaikoista. Liittymätason tarkastelua tukee myös se, että liittymän sähkönkulutus käyttäytyy tasaisemmin kuin yksittäisen sähkönkäyttöpaikan.

Tuntisarjojen kelpoisuus varmistettiin ennen liittymien muodostusta, jotta puutteelliset aikasarjat eivät vääristäisi analyysijä. Kuvassa 20 on esitetty kaksi aikasarjoissa havaittua ongelmaa. Vasemmanpuoleisessa kuvassa oleva ”piikki” aiheutuu, kun mittarin ja luentajärjestelmän välinen tiedonsiirtoyhteys on ollut poikki ja mittari lähettää kumulatiivisen lukeman yhteyden palattua. Oikealla oleva kuva esittää toista aikasarjoissa esiintynyttä ongelmaa, jossa liittymän kulutus näyttää kasvavan loppuvuotta kohti. Todellisuudessa osa liittymän käyttöpaikoista siirtyy etäluentaan keskellä vuotta, mikä näkyy liittymän kulutuksen kasvuna.

Ongelmien poistamiseksi aikasarjat tarkistettiin yksitellen nolla-arvojen sekä luentavirheistä aiheutuvien ”piikkien” varalta. ”Piikit” ja nolla-arvot haluttiin poistaa, sillä ne vääristäisivät analyysien tuloksia ja voisivat johtaa väärin johtopäätöksiin.



Kuva 20: Aikasarjoissa esiintyviä ongelmia: a) ”piikki”, b) kulutuksen ”lineaarinen kasvu”

Analyyseihin sisällytettiin käyttöpaikat, jotka läpäisivät seuraavat ehdot:

- Yli 90 prosenttia päivistä sisälsi kulutusta vuoden aikana
- Maksimituntitehon suhde keskitehoon (ilman maksimituntia) oli alle 35.

Maksimituntitehon tarkistus sisälsi kolme tarkistuskierrosta: Jos maksimituntitehon suhde keskitehoon oli yli 50, korvattiin maksimin arvo keskiteholla ennen seuraavaa tarkistuskierrosta. Tuntisarja poistettiin analyyseistä, jos kolmannen korjauksen jälkeen maksimin arvo oli yli 35-kertainen keskitehoon nähden. Mikäli ensimmäisellä tarkistuskierroksella löydettiin arvo, joka oli yli 50-kertainen keskitehoon verrattuna, korvattiin arvo keskiteholla ennen toista kierrosta. Tuntisarja poistettiin analyyseistä, jos kolmannen korjauksen jälkeen maksimin arvo oli yli 35-kertainen keskitehoon nähden. Ehdot läpäisseitä käyttöpaikkoja oli 5445 kappaletta. Käyttöpaikoista muodostettiin liittymiä summaamalla samaan liittymään kuuluvat käyttöpaikat yhteen. Liittymien oikeellisuus tarkistettiin vielä erikseen vertaamalla liittymän kulutusta asiakastietojärjestelmästä saatuihin laskutettuihin lukemiin. Liittymät, joiden kulutus poikkesi laskutetusta energiasta $-3 \dots +1$ prosenttia otettiin lopulta mukaan analyyseihin. Tällaisia liittymiä löytyi 2728 kappaletta.

Analysoitavien liittymien datajoukko voidaan kuvata kaavan 5 mukaisella matriisilla, missä n on liittymien lukumäärä ($n=2728$) ja p on vuoden tuntien lukumäärä ($p=8760$). Matriisin alkio x_{ij} kuvaa näin ollen liittymän i tunnin j skaalattua keskitehoa. Ennen matemaattista analyysiä liittymien vuosienergia (matriisin rivit) skaalattiin arvoon 1, jotta liittymien välinen suuruusero ei vääristäisi analyysin tuottamia profileja. Myös muuttujat (matriisin sarakkeet) standardoitiin siten, että jokaisen sarakkeen keskiarvo oli 0 ja hajonta 1. Tämän muunnoksen seurauksena kaikkien muuttujien painoarvo analyysissä oli yhtä suuri. Datan käsittelyyn käytettyjä menetelmiä on kuvattu tarkemmin lähteessä [43].

$$X_{n,p} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{ij} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix} \quad (5)$$

5.1.4 Pääkomponenttianalyysi ja klusterointi

Pääkomponenttianalyysi (Principal Component Analysis, PCA) on dimension redusointimenetelmä, jossa suuri joukko muuttujia pyritään korvaamaan pienellä joukolla uusia muuttujia. Menetelmän tavoitteena on esittää mahdollisimman suuri osa alkuperäisen datajoukon vaihtelusta keinotekoisilla muuttujilla (ns. pääkomponenteilla), joiden lukumäärä on alkuperäisten muuttujien lukumäärää pienempi. Pääkomponenttianalyysin perusidea on löytää monidimensioisesta datasta toisistaan riippumattomia lineaarisia yhdistelmiä eli pääkomponentteja, jotka kuvaavat mahdollisimman suuren osan alkuperäisten muuttujien kokonaisvaihtelusta. Toisaalta, pääkomponenttianalyysi voidaan ajatella menetelmäksi, joka pyrkii löytämään moniulotteisesta avaruudesta ne ”katselukulmat”, joilla näytepisteet erottuvat toisistaan mahdollisimman hyvin. Tämä saavutetaan korvaamalla alkuperäisen avaruuden kantavektorit uusilla kantavektoreilla, jotka ovat lähtöavaruuden kantavektorien lineaarisia yhdistelmiä. Ensimmäinen pääkomponentti asettuu suuntaan, joka selittää suurimman mahdollisen osan aineiston vaihtelusta. Toinen ja sitä seuraavat pääkomponentit selittävät suurimman mahdollisen osan jäljelle jääneestä vaihtelusta ja ovat kohtisuorassa kaikkiin edellisiin pääkomponentteihin nähden. [44]

Pääkomponenttianalyysin luoman avaruuden ulottuvuuksien lukumäärä on yhden pienempi kuin alkuperäisen matriisin pienin dimensio (tässä $n-1=2727$). Kaikki pääkomponentit yhdessä kuvaavat tarkasti alkuperäisen aineiston. Pääkomponentit järjestäytyvät kuitenkin siten, että ensimmäiset pääkomponentit selittävät suurimman osan lähdeaineiston vaihtelusta (informaatioista). Viimeiset pääkomponentit selittävät jäljelle jääneestä informaatiosta vain vähän ja esittävät mahdollisesti vain aineiston merkityksetöntä satunnaisvaihtelua (kohinaa). Tästä syystä moniulotteisen datajoukon rakenne voidaan tulkita vain muutaman ensimmäisen pääkomponenttien avulla ja jättää myöhemmät pääkomponentit huomiotta.

Pääkomponentille j lasketaan pääkomponenttipisteet kaavalla 6, missä tietylle liittymälle lasketaan pääkomponentin j pistearvo kertomalla muuttujien saamat arvot $x_i \in \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ j :tä pääkomponenttia vastaavilla pääkomponenttikertoimilla c_{ij} .

$$s_j = \sum_{i=1}^p (c_{ij}x_i) \quad (6)$$

Liittymien pääkomponenttipisteet kuvaavat sitä, kuinka voimakkaasti liittymä edus-

taa kutakin pääkomponenttia. Pääkomponenttipisteitä hyödyntämällä voidaan liittyä klusteroida matemaattisesti. Tässä työssä pääkomponenttipisteiden ryhmittelyyn käytettiin Gaussin mikstuurimallia (GMM, Gaussian Mixture Models) [45]. Ryhmittelyyn tehtiin ensin K-means klusterointia käyttäen, mutta GMM:n todettiin antavan hieman parempia tuloksia. Liittymien matemaattinen ryhmittely on tarpeen, sillä pääkomponenttianalyysin jälkeenkin aineisto on usein moniulotteinen. Klusteroinnin pyrkimyksenä on löytää aineistosta (tässä liittymistä) ryhmiä, joissa samaan ryhmään kuuluvat alkioit ovat mahdollisimman samankaltaisia, mutta eri ryhmien väliset alkioit mahdollisimman erilaisia. Ryhmitellyt pääkomponenttipistejoukot kuvaavat lähtöaineistosta löydettyjä asiakasryhmiä. Klusteroinnissa liittymä voi kuulua vain yhteen klusteriin, vaikka osa pääkomponenttipisteistä osuu ”epäselvälle” alueelle klusterikeskittymien väliin. Tällaiset ryhmien välillä olevat liittymät sisältävät ominaisuuksia molemmista ryhmistä. Helsingin kantakaupungin aineistolle suoritettun pääkomponenttianalyysin tuloksia käsitellään luvussa 6.2.

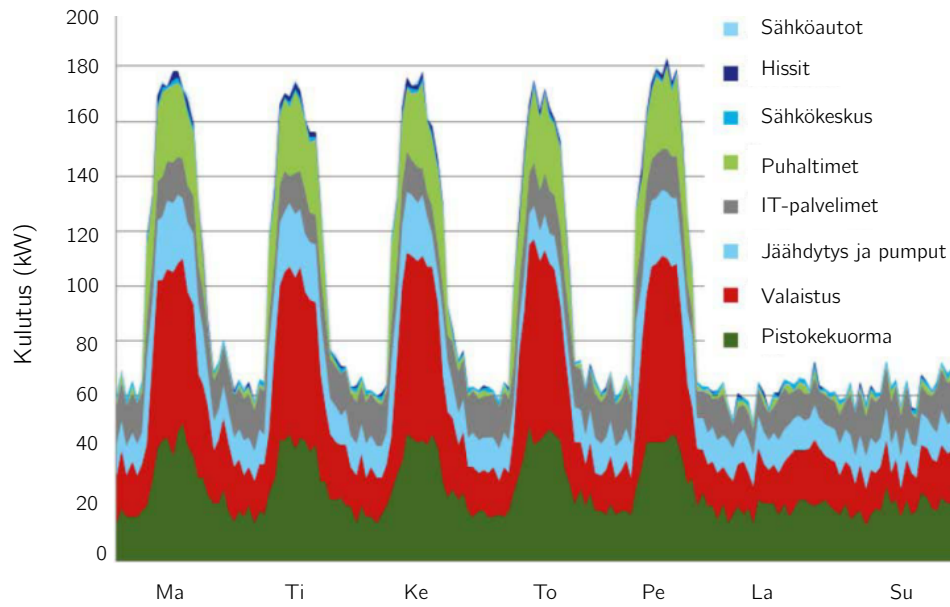
[43, 46]

5.2 Sähkönkulutuksen jakautumisen arviointi tilastollisesti

5.2.1 Laitetason profiilien hyödyntäminen

Etäluentaan siirtymisen myötä verkkoyhtiöllä on käyttöpaikalta mitattu kulutus vuoden jokaiselta tunnilta. Mittaustieto kertoo kuorman ”muodon” eli profiilin, mutta ei sitä millaisista laitteista kulutus on muodostunut. Perusajatuksena tuntisarjan jakamisessa laitetasolle on hajottaa (disaggregoida) mitattu tuntikäyrä kulutuksen kannalta keskeisimpien laiteryhmiä välille (kuva 21). Jokaisen yksittäisen laitteen profiilia ei luonnollisestikaan ole mahdollista selvittää ja osa kulutuksesta jää aina jakamatta (ns. muu tai pohjakulutus).

Tavoitteena laitetason tarkastelussa on selvittää tärkeimpien laiteryhmiä kulutusprofiilit sekä niiden osuudet kokonaiskulutuksesta. Verkon suunnittelun sekä kuorman ennustamisen kannalta olisi erityisen arvokasta ymmärtää, miten ja milloin eri laitteita käytetään. Tämä auttaisi verkkoyhtiötä muun muassa arvioimaan, mitä laitteita asiakkaat käyttävät huipputehon aikana sekä tunnistamaan laitekannassa tai lämmitystavassa tapahtuvia muutoksia. Lisäksi kuormitusennusteita laadittaessa voitaisiin nykyisiin profileihin mallintaa tulevaisuudessa odotettuja sähkönkäytön muutoksia, kuten sähkölämmityksen energiatehokkuuden parantuminen. Nykyistä



Kuva 21: Sähkönkulutuksen jakautuminen toimistorakennuksessa alamittausten perusteella [47]

tarkempi tieto kulutuksen jakautumisesta auttaisi myös tunnistamaan laiteryhmiä, joita voitaisiin ohjata esimerkiksi sähkön hinnan mukaan. Kysyntäjouston potentiaalin kartoittaminen onkin yksi suurimmista motiiveista selvittää eri laitteiden käyttötottumuksia.

Laitetason profiilien ja osuuksien arviointi on erittäin haasteellista, koska käyttötottumukset ja laitekanta vaihtelevat suuresti käyttöpaikkojen välillä. Laitetason tuntiprofiilit onkin hyvä esittää luokittain esimerkiksi kiinteistön käyttötarkoituksen mukaan. Käyttöpaikkojen kirjavuuden lisäksi toinen keskeinen ongelma on hankkia tyyppikäyrien muodostamiseen vaadittu lähdeaineisto. Suoraviivainen keino laiteprofiilien muodostamiseksi on mitata asiakkailta eri laitteiden sähkönkäyttöä. Tämän tyyppinen järjestely on hyvin hankala ja kallias toteuttaa, sillä asiakasmäärän tulisi olla riittävän suuri ja mittausajan pitkä. Kuvassa 21 on havainnollistettu alamittauksiin perustuvaa sähkönkulutuksen disaggregointia yhden toimistorakennuksen osalta.

Sähkönkulutuksen loppukäytön jakautumista voidaan tutkia myös tilastollisin keinoin yhdistämällä käyttöpaikan sähkönkulutus, säätilastot ja asiakkailta kerätyt energiankäyttöä selittävät taustatiedot. Tilastollisella menetelmällä voidaan saada karkea arvio kulutuksen jakautumisesta ilman hankalaa ja kallista mittausjärjestelyä. Tilastollinen lähestymistapa ja mittausmenetelmä ovat ennen kaikkea toisiaan

täydentävät menetelmät. Laadittaessa lopullista arvioita kulutuksen jakautumisesta on tilastollisesti saadut tulokset hyvä yhdistää asiakkailta saatuihin mittauksiin sekä laitevalmistajien antamiin keskimääräisiin tehoarvoihin. Tilastollisen mallin toivuutta onkin tärkeä verrata aina mittaamalla saatuihin tuloksiin.

5.2.2 Käytetyn aineiston kuvaus

Sähkönkulutuksen jakautumista tutkittiin 39 kohteen avulla, jotka olivat erilaisia palvelusektorin toimijoita. Kohteet olivat vastanneet energiankäytön taustatietoja kartoittavaan kyselyyn aiemman tutkimuksen yhteydessä vuonna 2006. Näin ollen kohteista oli saatavilla tilastollisen mallin laadintaan tarvittut lähtötiedot rakennuksien käyttöajoista ja laitevarusteluista. Analyyseissä päätettiin käyttää aiemman kyselytutkimuksen aineistoja, koska uuden laajemman kyselyn toteuttaminen ei olisi ollut diplomityön aikataulun kannalta mahdollista.

Vuonna 2006 tehty kysely oli kattavuudeltaan melko sopiva tilastollisen mallin laadintaan, vaikkakin vastausten laadussa oli suurta vaihtelua. Lisäksi jo tilastollisen analyysin suunnitteluvaiheessa tiedostettiin, että 39 kohteen otanta on liian pieni luotettavien tulosten saamiseksi. Analyysiä haluttiin kuitenkin kokeilla, sillä siitä saataisiin arvokasta tietoa tulevien asiakaskyselyiden laadintaan ja mallin suunnitteluun. Kyselytulosten lisäksi analyysiin käytettiin kohteilta mitattuja tuntisarjoja sekä vuoden 2006 tunnittaista Kaisaniemen keskilämpötilaa. Tutkimuksessa käytetty kyselylomake on liitteessä C.

5.2.3 Laitetason erittelyyn käytetty tilastollinen menetelmä

Sähkönkulutuksen tilastollisen erittelyn lähtökohta on yhdistää asiakkaan mitattu kulutus asiakkaalta saatuihin energiankäyttöä selittäviin taustatekijöihin. Tällaista tilastollista menetelmää kutsutaan englanninkielisissä lähteissä ehdolliseksi kysyntäanalyysiksi (Conditional Demand Analysis, CDA). Menetelmä pohjautuu monimuuttujaregressioon, jossa mitattu sähkönkulutus, säätilastot, sekä laite- ja käyttötottumustietojen pohjalta rakennetaan sähkön kokonaiskulutusta selittävä malli. Laite- ja käyttötottumusten lisäksi asiakkaalta voidaan pyytää tietoja kiinteistön rakennusvuodesta, kerrosalasta, rakennusmateriaaleista, ikkunapinta-alasta ja muista muuttujista, jotka vaikuttavat kiinteistön sähkönkäyttöön. Kohteesta kerättävien lähtötietojen tulee keskittyä keskeisimpiin kulutusta selittäviin tekijöihin ja ne tu-

lee pystyä ilmaisemaan numeerisessa muodossa analyysiä varten, joko binäärilukuna (1/0) tai lukumääränä.

Menetelmää voidaan soveltaa eripituisille ajanjaksoille. Esimerkiksi vuosienergialle tehdystä analyysistä saadaan arvio kulutuksen jakautumisesta vuositasolla. Etäluentatiedon yleistyttyä mallia voidaan käyttää myös tuntikulutuksen erotteluun, mikä antaa loppukäytön jakautumisesta huomattavasti lisätietoa nykyiseen verrattuna. Tuntitason tarkastelu tekee analyysistä kuitenkin selvästi haasteellisemmän, koska laitteen kulutusta kuvaava kerroin (Unit Energy Coefficient, UEC) tulee laskea jokaiselle tunnille erikseen.

Matemaattisen disaggregoinnin etu verrattuna laitekohtaiseen mittaukseen on, että asiakaskyselyn toteuttaminen on edullisempaa kuin kattavan laitekohtaisen mitausjärjestelyn. Tilastolliseen malliin vaaditut taustatekijät voidaan kerätä kohtuullisin kustannuksin asiakaskyselyn avulla, joten menetelmällä voidaan saada karkeita laitetason kulutusarvioita huomattavasti edullisemmin kuin laitekohtaisella mitausjärjestelyllä. Tilastollinen disaggregointi perustuu asiakkaiden laitekannassa ja käyttötottumuksissa oleviin eroihin, mikä vaikuttaa suoraan myös sähkönkulutukseen. Yksittäisen laiteryhmän osuus kokonaiskulutuksesta voidaan tunnistaa vertailemalla asiakkaiden välillä laitekannassa olevia eroja ja mitattua sähkönkulutusta. Laiteryhmien osuuksien määrittämiseksi asiakkaita tarvitaan analyysiin paljon, jotta tilastolliset virheet saadaan minimoitua. Lisäksi kyselyä laadittaessa on tärkeää huomioida, että menetelmä perustuu asiakkaiden laitekannan ja muihin energiankäyttöön liittyvien erojen tunnistamiseen.

Menetelmä pyrkii selittämään kiinteistön sähkönkulutuksen laitteiden lukumäärän, ominaisuuksien ja käyttötottumusten sekä rakennuksen ominaispiirteiden avulla. Malli voidaan esittää matemaattisesti kaavalla 7:

$$HEC_{it} = E_0 + \sum_{j=1}^m UEC_{ijt} D_{ijt} \quad (7)$$

missä HEC_{it} on kohteen i sähkönkulutus aikavälillä t , E_0 on mallin ulkopuolelle jäävien laitteiden kulutus, UEC_{ijt} on laitteen j osuus kokonaiskulutuksesta kohteessa i aikavälillä t , D_{ij} on osoitin (1 tai 0), joka kertoo onko kohteessa i laitetta j , ja m on analyysiin sisällytettyjen laitetyyppien lukumäärä. Riippuvana muuttujana regressiomallissa on kohteen sähkönkulutus tarkasteltavalla aikajaksolla. Riippumattomat muuttujat ovat lineaarikombinaatioita asiakkailta saaduista lähtötiedoista, joilla ku-

vataan laitteiden sähkönkulutusta. Laitteen sähkönkulutus UEC_{ijt} voidaan ilmaista kaavalla 8:

$$UEC_{ijt} = f(AF_{ij}, STRUC_i, UP_{ijt}, e_{ijt}) \quad (8)$$

missä AF_{ij} kuvaa laitteen j ominaisuuksia kohteessa i , $STRUC_i$ on rakennuksen ominaispiirteet, UP_{ijt} on laitteen käyttötottumukset, ja e_{ijt} on virhetermi. Esimerkiksi valaistuksen osuus kokonaiskulutuksesta voidaan kuvata kaavan 9 yhtälöllä:

$$UEC_{valaistus,t} = a_1HALO + a_2HEHKU + a_3LOISTE \quad (9)$$

missä $UEC_{valaistus,t}$ on valaistuksen osuus kokonaiskulutuksesta aikavälillä t , HALO on halogeenivalaisimien lukumäärä, HEHKU on hehkulamppujen lukumäärä, LOISTE on loistevalaisimien lukumäärä ja kertoimet $a_1...a_3$ ovat muuttujien regressiokertoimia. Tunnittaisen mallin aikaansaamiseksi regressiokertoimet täytyy laskea jokaiselle 24 tunnille erikseen.

Yksi menetelmän suurimmista haasteista on erotella laitteita, joiden lukumäärä ja ominaisuudet ovat lähes samanlaisia kaikissa kohteissa. Tällöin laitteen kulutus häviää helposti yleiseen sähkönkulutukseen (E_0 kaavassa 7). Menetelmällä saatavien tulosten laatu riippuu suuresti laitteiden kulutusta kuvaavien yhtälöiden määrittelystä sekä käytettävissä olevista lähtötiedoista. Tässä työssä saatuja tuntitason palvelukulutuksen disaggregointi tuloksia tarkastellaan luvussa 6.3

[48, 49]

6 Palvelusektorin sähkönkäytön ominaispiirteet

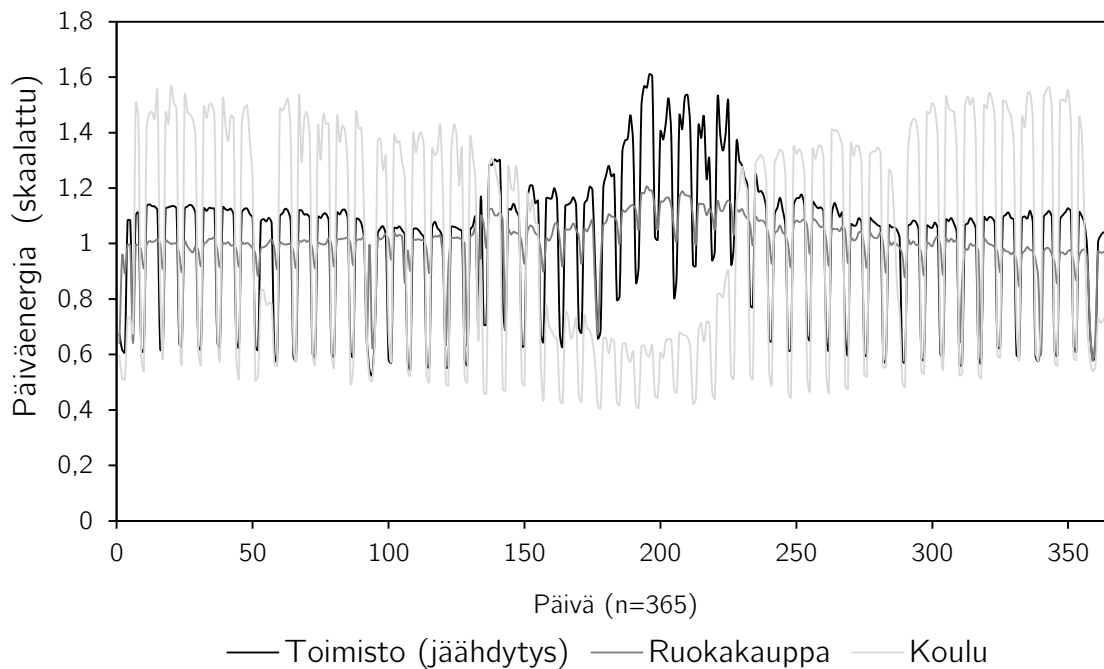
Palvelusektorin sähkönkäyttöä on tutkittu yleisesti ottaen vain vähän johtuen alan monimuotoisuuden tuomista haasteista. Tulevina vuosina palvelusektorin merkityksen sähkönkäyttäjänä odotetaan kasvavan Suomessa. Uusien tuntimittaustietoja hyödyntävien sähkönkäytön tutkimusmenetelmien toivotaan tuovan lisätietoa palvelualan sähkönkäytöstä. Lisäksi uudistuvien rakennusmääräysten myötä tulevat almittaukset yleistymään toimitiloissa, jolloin myös kulutuksen jakautumisesta saadaan aiempaa tarkempaa tietoa. Tässä luvussa tarkastellaan työssä tutkittujen tuntimittaustietoja hyödyntävien matemaattisten menetelmien antamia tuloksia. Lisäksi luvussa pohditaan menetelmien soveltuvuutta palvelusektorin sähkönkäytön analysointiin. Luvussa esitetään myös tuntimittaustiedoista muodostetut tuntiprofililit kolmelle tyypilliselle palvelusektorin toimijalle.

6.1 Tyypillisiä palvelusektorin tuntikäyriä

Sähkönkäyttäjien ryhmittelyn kannalta on keskeistä tunnistaa volyymiltään (lukumäärä tai energia) tärkeimmät ryhmät, joita ryhmittelyssä käytetään. Teholtaan suurimmat tai muuten erityiset käyttöpaikat on usein tarpeen mallintaa omilla tyyppikäyriä. Tässä luvussa esitetään kolmelle palvelusektorin toimijalle esimerkkikituntikäyrät, mitkä havainnollistavat toimijoiden sähkönkäytössä olevia eroja. Käyrät on laskettu valitsemalla käsin käyttöpaikat, jotka kuuluvat selvästi kyseiseen ryhmään. Menetelmä edellyttää siis asiantuntijan näkemystä eri ryhmien sähkönkäytöstä. Tämän jälkeen kaikkien samaan ryhmään kuuluvien käyttöpaikkojen vuosienenergia on skaalattu arvoon 1. Ryhmää kuvaavana tuntiprofilina on käytetty näiden skaalattujen tuntisarjojen keskiarvoa. Tällainen profilien muodostustapa eroaa oleellisesti matemaattisen ryhmittelyn avulla muodostetuista profileista, sillä liittymien sähkönkäyttö pitää käytännössä tuntea etukäteen. Matemaattinen ryhmittely sen sijaan perustuu ainoastaan sähkönkäytön vaihtelussa olevien erojen tunnistamiseen, ja näin ollen sähkönkulutusta selittävää taustatietoa ei tarvita.

Kuvassa 22 on esitetty edellä kuvatulla tavalla muodostetut vuosiprofililit toimistolle, ruokakaupalle sekä koululle. Kuvassa y-akselin arvot ovat skaalattuja siten, että kaikkien ryhmien vuosienenergian keskiarvo 1. Toimistoryhmän profiilin muodostamiseen käytetyt käyttöpaikat koostuvat kesällä voimakkaasti jäähdytystä käyttävistä kohteista, kuten kesäajan kohonneista päiväkulutuksista voidaan päätellä. Toimis-

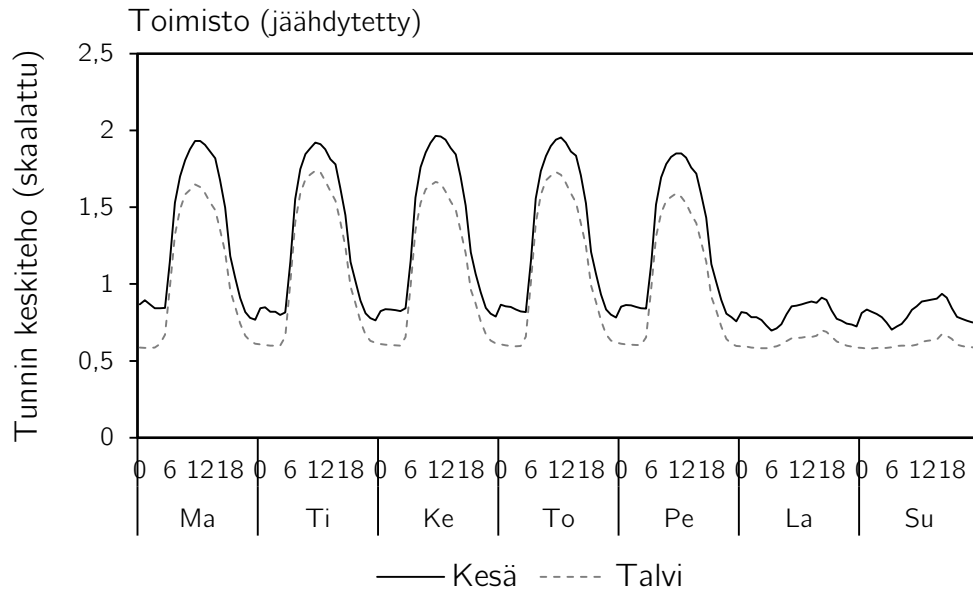
tosta voidaan havaita myös selkeä viikkorakenne; rakennusta käytetään pääsääntöisesti vain arkipäivinä. Ruokakaupparyhmä on muodostettu joukosta keskikokoisia elintarvikemyymälöitä. Ruokakaupan vuosiprofilista on havaittavissa myös selkeä kulutuksen kasvu kesällä, mikä johtunee kylmälaitteiden lisääntyneestä jäähdytystarpeesta. Kuvasta on nähtävissä, että ruokakaupalla sähkönkäytön vaihtelu arkipäivien ja viikonlopun välillä ei ole aivan yhtä suurta kuin toimistoissa tai kouluissa. Viikonlopun lyhyemmät aukioloajat kuitenkin pienentävät päiväkulutusta hieman. Ruokakauppojen vuosiprofilista erottuvat selvästi päivät, jolloin kaupat ovat suljettuna. Koulujen vuosiprofilista on nähtävissä toimistoja vastaava viikkorytmiikka. Profilista on myös nähtävissä koulujen loma-aikojen vaikutus sähkönkäyttöön, erityisesti kesäloman vaikutus. Kaikista tutkituista ryhmistä on huomattava, että kohteet ovat kaukolämmitettyjä eikä sähkönkäyttö juuri kasva talvikuukausina.



Kuva 22: Jäähdytetyn toimiston, ruokakaupan ja koulurakennuksen keskimääräiset päiväenergiat vuoden aikana

Kuvissa 23-25 on esitetty toimiston, ruokakaupan ja koulun keskimääräiset tuntiprofililit kesä- ja talviviikoille. Keskimääräinen kesäviikko on muodostettu laskemalla kesäkuukausilta (kesä, heinä, elo) keskimääräinen tuntiprofiili jokaiselle viikonpäivälle. Talviviikkoa kuvaava profiili on laskettu vastaavasti talvikuukausilta (joului, tammi, helmi).

Toimistoa kuvaavista kesä- ja talviviikon profileista (kuva 23) erottuu selvästi toimistolle tyypillinen viikkorytmiikka, jossa rakennusta käytetään vain arkipäivisin.



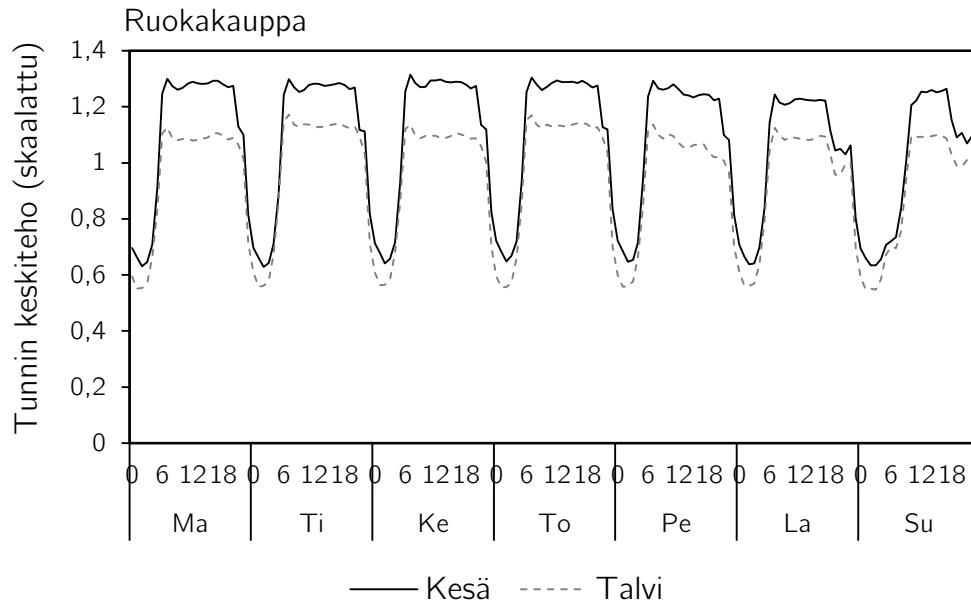
Kuva 23: Jäähdytetyn toimiston keskimääräiset tuntitehot kesä- ja talviviikoille

Talvi- ja kesäviikkoja verratessa on nähtävissä jäähdytyksen vaikutus kesäajalla. Kuvan mukaan jäähdytys näyttäisi nostavan kesällä kulutusta noin 15 prosenttia talviviikkoon verrattuna. Lisäksi kulutus näyttää kasvavan kaikilla tunneilla melko tasaisesti eikä ainoastaan toimiston tyypillisenä käyttöaikana.

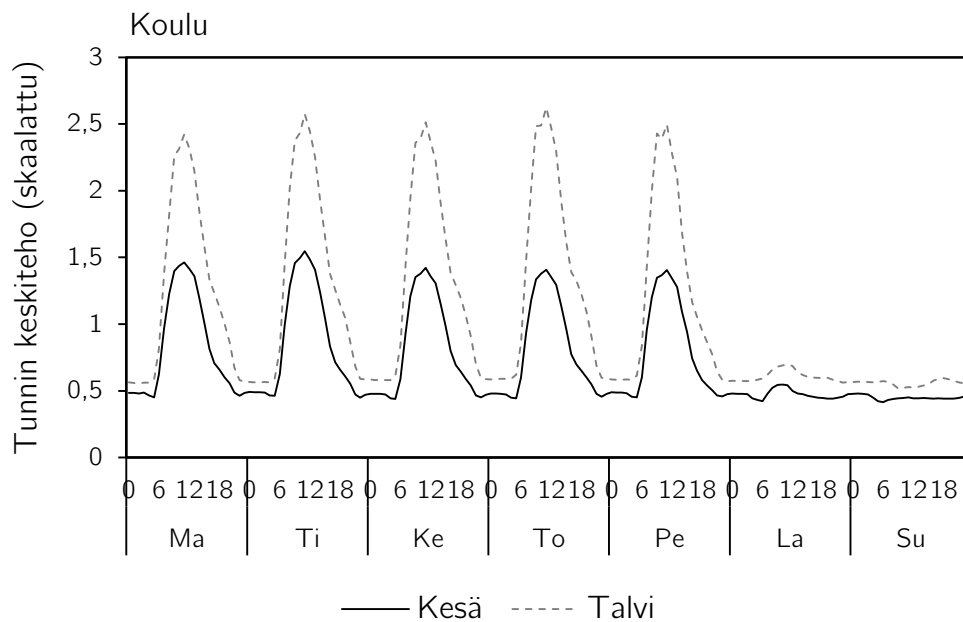
Ruokakaupan viikkoprofilista on nähtävissä ruokakaupoille tyypilliset aukioloajat arkipäivien ja viikonlopun osalta (kuva 24). Kesän profilista erottuvat lisääntyneet jäähdytystarve erityisesti kauppojen aukiolon aikana. Tämä johtunee liiketilan kasvaneesta ilmanvaihto- ja viilennystarpeesta sekä tuore-elintarvikkeiden säilytykseen käytettävien säilytystilojen lisääntyneestä jäähdytystarpeesta. Profilin mukaan kesäviikon kulutus on ruokakaupassa noin 13 prosenttia suurempi kuin talviviikon kulutus.

Kuvassa 25 on esitetty koulurakennuksen kesä- ja talviviikon tuntiprofilit. Kesällä kulutus on oppilaiden kesäloman ansiosta huomattavasti opetuskautta pienempi. Kesällä viikkoprofilissa säilyy toimiston viikkoprofilia muistuttava rytmikka. Tähän voi olla syynä se, että osa koulun henkilökunnasta jatkaa rakennuksen käyttöä oppilaiden kesälomien alettua, mikä näkyy toimistomaisena käyttönä. Toisaalta myös ilmanvaihto ja muut rakennuksen ylläpidon kannalta keskeiset talotekniset järjestelmät ovat käytössä myös kesäisin.

Profilien muodostamiseen käytetyillä toimistoilla ja ruokakaupoilla kesänkulutus kasvaa selvästi talveen verrattuna, kuten kuvan 22 vuosiprofileista on nähtävissä.



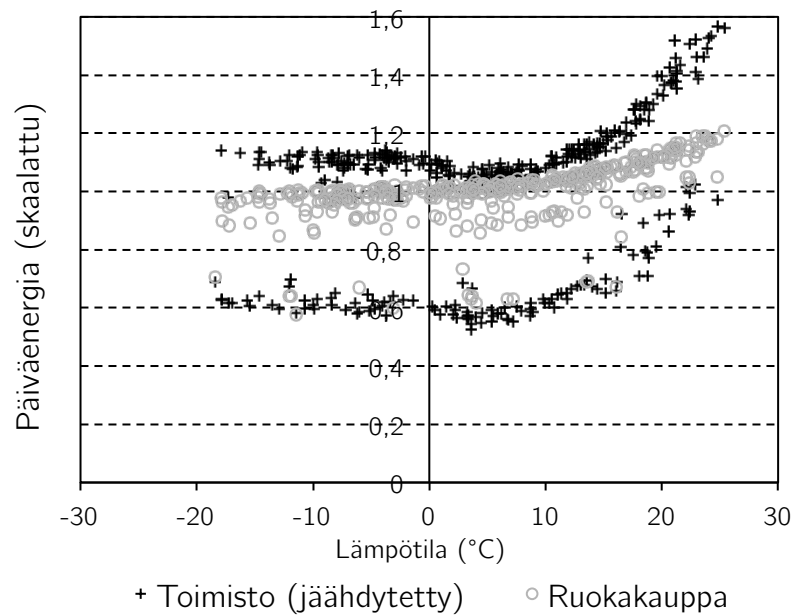
Kuva 24: Ruokakaupan keskimääräiset tuntitehot kesä- ja talviviikoille



Kuva 25: Koulurakennuksen keskimääräiset tuntitehot kesä- ja talviviikoille

Kuvassa 26 on tarkasteltu toimiston ja ruokakaupan päiväenergioiden riippuvuutta päivän keskilämpötilasta. Toimiston pisteparvista erottuvat selvästi arkipäivät ja viikonloput omina joukkoina. Toimistoissa jäähdytystarve näyttää alkavan, kun päivän keskilämpötila on noin $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tyypillisesti tämä ajoittuu huhtikuun lopun ja lokakuun alun väliselle ajanjaksolle. Toimistolla sähkönkulutus näyttäisi kasvavan myös kylminä päivinä, mutta ei läheskään yhtä voimakkaasti kuin lämpimänä

ajanjaksona. Ruokakaupan kohdalla sähkönkulutus näyttää kasvavan tasaisesti keskilämpötilan noustessa. Sähkönkulutus nousee kuitenkin nopeammin, kun päivän keskilämpötilan ylittää noin 12 °C. Ruokakaupan pisteparvista erottuvat selvästi irrallisena pisteinä päivät, jolloin kaupat ovat suljettuna.



Kuva 26: Jähdytetyn toimiston ja ruokakaupan päivänenergian riippuvuus päivän keskilämpötilasta

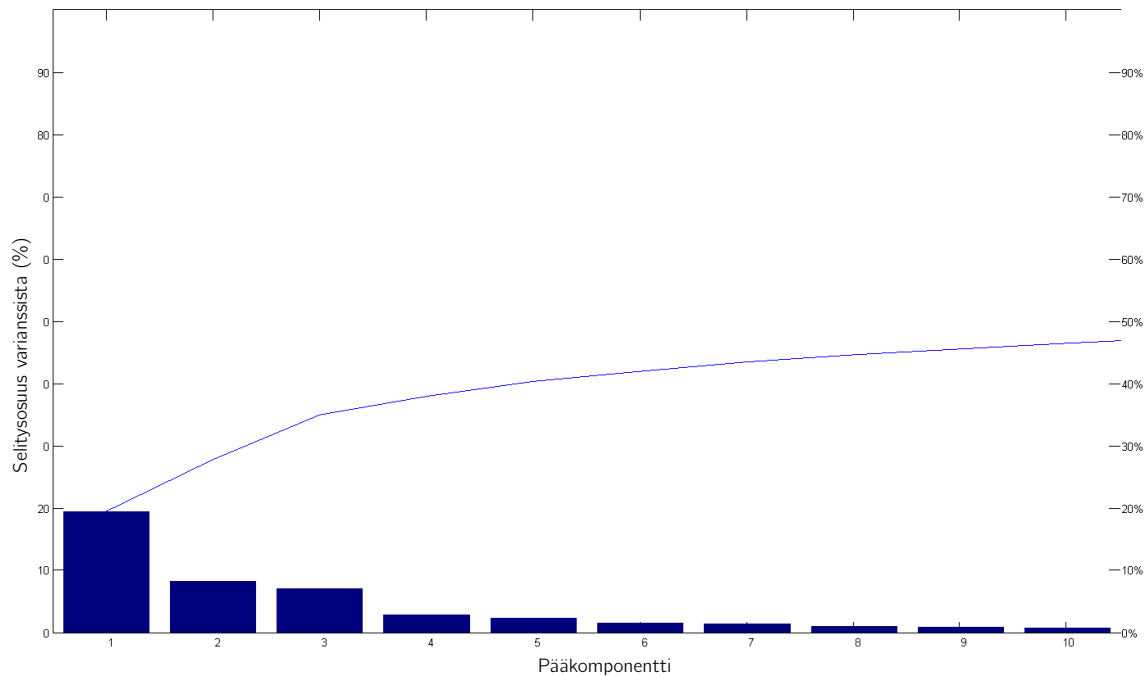
6.2 Matemaattinen ryhmittely kantakaupungin AMR-datalla

Liittymien matemaattinen ryhmittely suoritettiin Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulussa tohtorikoulutettava Matti Koiviston toimesta. Datan käsittelyssä käytettiin The MathWorks yhtiön MATLAB-ohjelmaa. Matemaattiset analyysit suoritettiin 2728 liittymälle, jotka sijaitsivat kantakaupungin sekä Pakilan alueella. Analyysin tavoitteena oli ryhmitellä liittymät niiden sähkönkäytön ajallisen vaihtelun (profiilin) perusteella. Ryhmittelyyn ei käytetty tunti lukemien lisäksi muuta liittymien sähkönkäyttöä selittävää tausta-aineistoa. Liittymien matemaattinen ryhmittely pohjautui pääkomponenttianalyysiin sekä Gaussin mikstuurimalliin. Analyysiin käytettyä menetelmää ja aineistoa on esitelty tarkemmin luvussa 5.1.3.

6.2.1 Pääkomponenttianalyysin tulokset

Pääkomponenttianalyysin tavoitteena on löytää monidimensioisesta datasta ne komponentit, joiden avulla alkuperäisen aineiston rakenne voidaan kuvata ilman, että informaatiota häviää merkittävästi. Pääkomponentit ovat toisistaan riippumattomia lineaarisia yhdistelmiä ja ne järjestäytyvät siten, että ensimmäiset pääkomponentit selittävät suurimman osan lähdeaineiston vaihtelusta. Kuvassa 27 on esitetty kymmenen ensimmäisen pääkomponentin selitysosuudet. Kuvasta on nähtävissä, että alkuperäisen aineiston vaihtelusta voidaan selittää noin 30 prosenttia kahden ensimmäisen pääkomponentin avulla. Toisin sanoen, alkuperäisen aineiston rakenteesta voidaan selittää noin kolmannes käyttäen kahta ensimmäistä pääkomponenttia, mikä on alle 0,1 prosenttia alkuperäisen aineiston muuttujista.

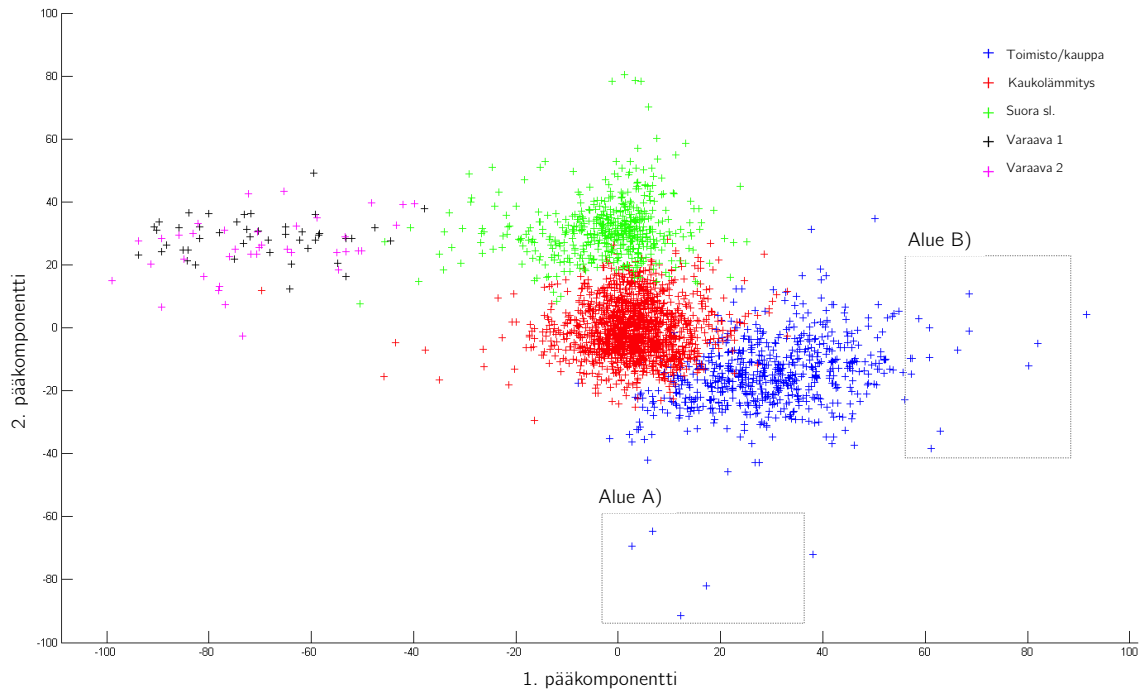
Liittymien matemaattiseen ryhmittelyyn käytettiin pääkomponenttien pääkomponenttipisteitä 1-8, lukuun ottamatta pääkomponenttia 5. Viidennen pääkomponentin tulkittiin kuvaavan sähkönkäytön lineaarista muutosta (nousua tai laskua), jonka taustalla on usein virheellinen tai keskellä vuotta alkava mittaus. Tästä syystä pääkomponenttia 5 ei pidetty oleellisena ryhmittelyn kannalta. Ennen tulkintaa pääkomponentit rotatoitiin SOBI-algoritmia käyttäen. Pääkomponentin 1 (kuvassa 28 x-akseli) tulkittiin erotteluvan liittymät sähkönkäytön vuorokausirakenteen perusteella. Käytännössä tämä näkyy kuvassa 28 siten, että kuvassa vasemmalla olevat violetit ja mustat pisteet ovat liittymiä, jotka käyttävät sähköä pääosin yöllä. Tällaisia sähkönkäyttäjiä ovat erityisesti varaavat sähkölämmittäjät, joiden lämmitys kytkeytyy päälle illalla tai yöllä (katso liite E). Kuvassa 28 varaavia sähkölämmittäjiä esittävät violetit ja mustat pisteet eivät ole jakautuneet selkeästi omiin ryhmiin



Kuva 27: Kymmenen ensimmäisen pääkomponentin selitysosuus varianssista (Matti Koivisto, Aalto-yliopisto)

katsottaessa ryhmittelyä ensimmäisen ja toisen pääkomponentin suhteen. Ryhmät erottuivat kuitenkin pääkomponenttien 3 ja 4 avulla, perusten varaavan sähkölämmityksen kytkentäaikaan. Keskellä kuvassa olevien liittymien sähkökäyttö on jakautunut tasaisemmin vuorokauden aikana sisältäen suoria sähkölämmittäjiä (vihreät pisteet) ja kaukolämmittäjiä (punaiset pisteet). Oikealla kuvassa on sen sijaan liittymiä, jotka kuluttavat sähköä pääosin päivisin, kuten toimistot ja kaupat (sininen pistejoukko).

Pääkomponentti 2 (kuvassa 28 y-akseli) erottelee liittymät lämmitystavan mukaan. Kuvassa 28 tämä erottuu siten, että ylimpänä olevat vihreät, violetit ja mustat pisteet ovat sähkölämmittäjiä, jotka käyttävät sähköä enemmän kylminä ajanjaksoina. Keskellä kuvassa näkyvä punainen pistejoukko sisältää pääasiassa kaukolämmitettyjä asuinrakennuksia, joiden sähkön käyttö ei riipu yhtä paljon ulkolämpötilasta kuin sähkölämmittäjien. Toimistoja ja kauppoja sisältävä sininen pistejoukko asettuu hieman kaukolämmittäjien alapuolelle. Liitteessä D on esitetty ryhmien vuosiprofiilit päiväenergioiden avulla. Liitteestä on nähtävissä, että toimistoryhmän sähkönkulutus ei juurikaan kasva kylminä vuodenaikoina. Toimistoilla ja kaupoilla on kuitenkin havaittavissa jäähdytystarpeesta johtuen pientä kulutuksen kasvua kesällä. Tutkitussa aineistossa jäähdytystä sisältävien liittymien lukumäärä oli kuitenkin sen ver-



Kuva 28: Tutkittujen liittymien pääkomponenttien 1 ja 2 pääkomponenttipisteet (SOBI-rotatoitu) (Matti Koivisto, Aalto-yliopisto)

ran pieni, että jäähdytyskuormaa sisältävät liittymät eivät muodostuneet omaksi ryhmäksi.

Pääkomponenttianalyysin jälkeen liittymät ryhmiteltiin käyttäen Gaussin mikstuurimallia (GMM) [45]. Liittymien ryhmittelyyn käytettiin pääkomponenttien pääkomponenttipisteitä 1-8 (pois lukien 5. pääkomponentti). Taulukossa 6 on esitetty yhteenveto ryhmittelyn tuloksista. Järkevä tulkinta löydettiin viidelle ryhmälle: Kolme sähkölämmitykseen liittyvää ryhmää (GM Suora, GM Varaava 1 ja GM Varaava 2), yksi kaukolämmitys ryhmä (GM Kauko) sekä yksi pääasiassa palvelukulutusta sisältävä ryhmä (GM Toimisto). Ryhmät vastaavat kuvassa 28 esitetyjä pistejoukkoja. Matemaattiseen ryhmittelyyn sisältyi 2728 liittymää, joista 1285 oli Länsi- ja Itä-Pakilasta. Kantakaupungin alueelta analysoitavia liittymiä oli 1443 kappaletta. Pakilan alueen sähkölämmittäjien oli tarkoitus toimia pääkomponenttianalyysissä ”vertailupohjana”, jotta lämmitystavalle löydettäisiin vaihtelua (kantakaupungissa käytetään pääosin kaukolämmitystä). Yhteensä ryhmiteltyjen liittymien vuosienenergia vastasi noin 20 prosenttia vuoden 2010 kokonaiskulutuksesta. Tästä syystä tulosten perusteella ei voida tehdä yleistyksiä koskien koko Helsinkiä, vaan analyysin tulokset kuvastavat vain tässä käytettyä aineistoa. Liitteessä F on esitetty ryhmiteltyjen liittymien lukumäärät kaupungin osa-alueittain. Tuloksista on hyvä huomata,

Taulukko 6: Yhteenveto matemaattisen ryhmittelyn tuloksista

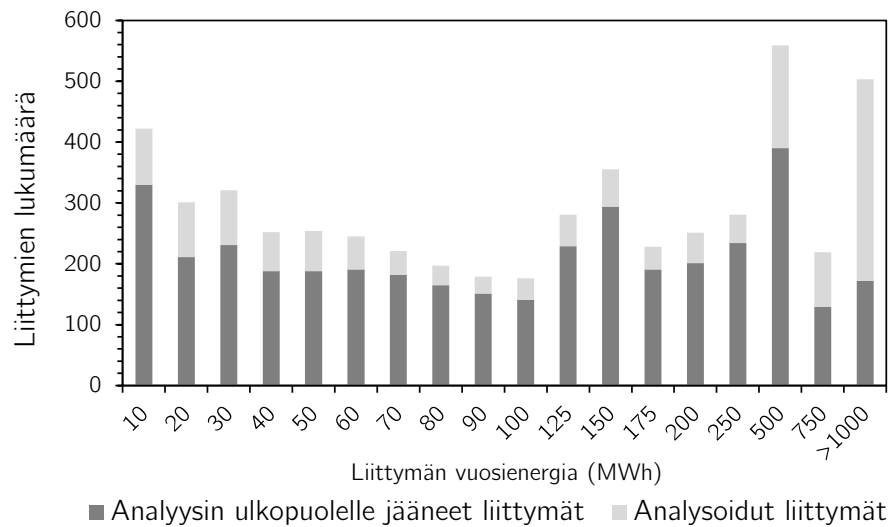
Ryhmä	Liittymien lkm	Asiakkaiden lkm	Vuosienergia (MWh)
GM Toimisto	647 (24%)	2 424 (13%)	956 671 (86 %)
GM Kauko	1 497 (55%)	15 554 (81%)	115 061 (10 %)
GM Suora sl	501 (18%)	1 135 (6%)	31 951 (3 %)
GM Varaava 1	45 (2%)	55 (0 %)	1 894 (0 %)
GM Varaava 2	38 (1%)	49 (0 %)	1 475 (0 %)
Yhteensä	2 728	19127	1 107 052

että Pakilan alue on ylikorostetusti edustettuna. Tähän lienee syynä se, että Pakilassa etäluenta on ollut käytössä jo pidemmän aikaa, jolloin tuntienergiaan siirtymisestä aiheutuvat ongelmat ovat poistuneet. Analyysiin sisältyi kuitenkin kantakaupungin alueelta kohtuullisin suuri joukko toimisto- ja palvelurakennuksia, joita Pakilassa ei juuri ole.

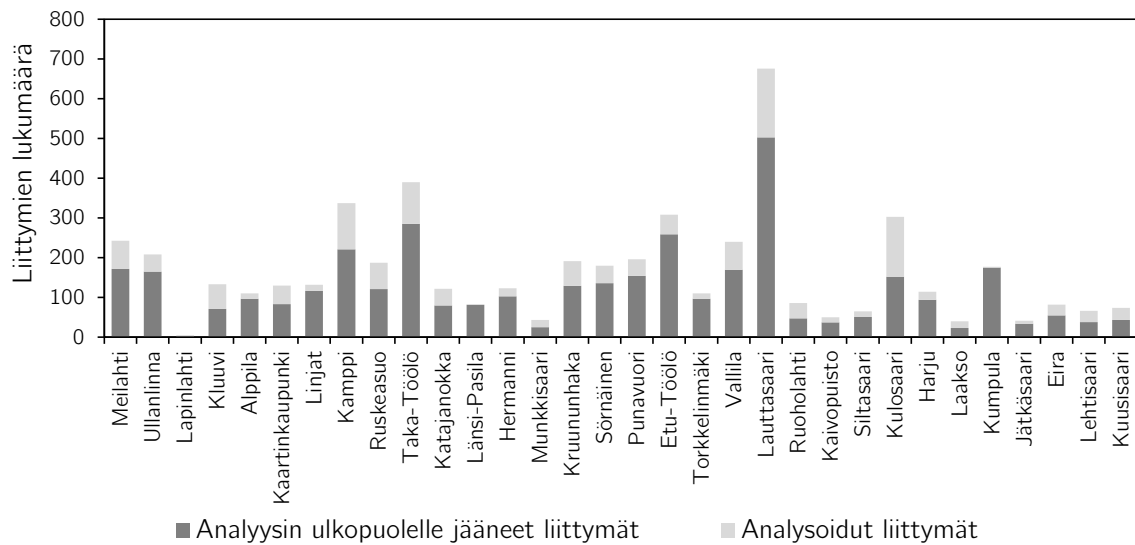
Liittymien lukumäärässä mitattuna suurin matemaattisen ryhmittelyn tuottama ryhmä oli kaukolämmitetyt liittymät (taulukko 6). Yhteensä näitä oli 1497 kappaletta, mikä oli 10 prosenttia analysoitujen liittymien kokonaisenergiasta. Vuosienergialtaan suurin ryhmä oli selvästi toimistoja ja kauppoja sisältävä ryhmä, joka oli 86 prosenttia analysoidusta energiasta. Liittymien lukumäärässä mitattuna toimistoja oli 24 prosenttia. Tämä vahvistaa käsitystä, että yksittäiset palvelusektorin liittymät voivat olla vuosienergialtaan hyvin suuria.

Kuvassa 29 on esitetty ryhmiteltyjen liittymien ja analyysin ulkopuolelle jääneiden liittymien vuosienergiat. Kuvan tarkoituksena on havainnollistaa sitä, kuinka suuri osa kantakaupungin potentiaalisista liittymistä sisältyi analyysiin. Kuvan tarkasteluun ei ole sisällytetty Pakilan liittymiä, koska ryhmittelyn lähtökohtana oli alunperin luokitella kantakaupungin liittymät. Tässä yhteydessä kantakaupunkiin luettavat kaupungin osa-alueet on taulukoitu liitteessä F. Yhteensä liittymiä tällä alueella on noin 5300 kappaletta, joista ryhmittelyyn sisältyi 1427 liittymää. Kantakaupungin vuosienergiasta ryhmittely kattoi kuitenkin noin 50 prosenttia. Ryhmittely näyttää siis sisältäneen enemmän vuosienergialtaan suuria liittymiä kuin pieniä. Tähän voi olla syynä se, että teholtaan isot liittymät ovat olleet etäluettuja jo kauan, jolloin etälentalaitteistosta aiheutuvat mittausvirheet ovat korjautuneet. On hyvä huomata, että liittymiä on jäänyt ryhmittelyn ulkopuolelle kaikista kokoluokista melko tasaisesti. Ongelmien ei myöskään huomattu kohdistuvan millekään tietylle kaupungin osa-alueelle, kuten kuvasta 30 voidaan nähdä. Suuret erot ryhmiteltyjen liittymien ja analysoitujen liittymien välillä johtuvat ennen pääkomponenttianalyysiä lukemille

suoritetuista esitarkistuksista, joilla luentavirheet pyrittiin poistamaan (katso luku 5.1.3).



Kuva 29: Kantakaupungin liittymät koon mukaan; x-akselin asteikko kuvaa liittymän kokoa ja y-akseli liittymien lukumäärää



Kuva 30: Kantakaupungin liittymät kaupungin osa-alueittain eroteltuna ryhmiteltyihin ja ryhmittelyn ulkopuolelle jääneisiin liittymiin

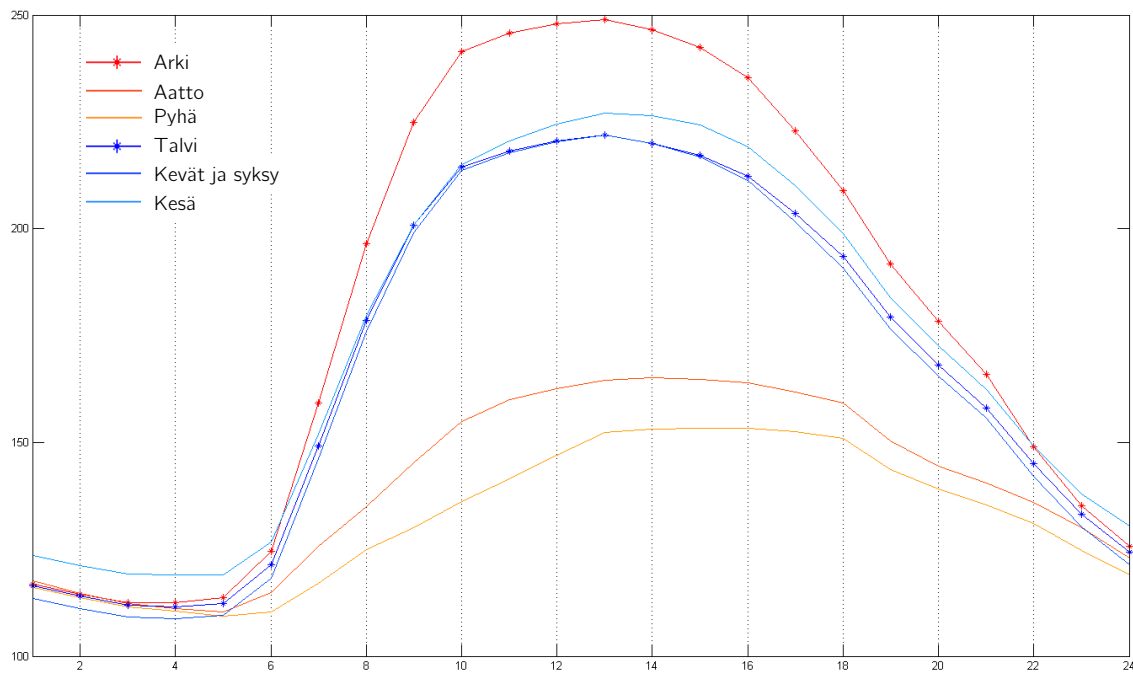
Muodostetuille ryhmille voidaan laskea ryhmää kuvaava keskimääräinen profiili, joiden avulla ryhmittelyn mielekkyys voidaan varmistaa. Ryhmien keskimääräiset profiilit tulee olla selkeästi liitettävissä tietyn tyyppiseen sähkökäyttäjärhyhmään, jotta

ryhmittely on järkevä. Toisin sanoen, profiilien tulee olla selvästi erilaisia ja niiden tulee kuvastaa tiettyä tyyppikäyttäjää. Kuvassa 31 on esitetty toimistoja ja kauppvoja sisältävän ryhmän keskimääräinen päiväprofiili eri vuodenajoille sekä päivätyypeille. Liitteessä E on esitetty myös neljän muun ryhmän päiväprofiilit. Kuvan 31 profiileista voidaan nähdä, että ryhmä sisältää toimistoja ja kauppvoja. Arkipäivän profiilissa tämä näkyy kulutuksen jatkumisena iltaan asti, mikä johtuu kauppojen pidemmästä aukioloajasta. Toisaalta myös aatto ja pyhäpäivät sisältävät kulutusta, vaikkakin selvästi pienempää kuin arkipäivät. Tämä vahvistaa käsitystä, että ryhmä sisältää sekä toimistoja että kauppvoja, koska toimistorakennuksia ei tyypillisesti käytetä viikonloppuisin, mutta useat kaupat ovat viikonloppuna auki. Keskimääräisen päiväprofiilin muodosta voidaan päätellä, että ryhmä sisältää enemmän toimistotyyppisiä liittymiä kuin kauppvoja, koska profiilin muoto on lähempänä tyypillistä toimistorakennusta kuin kauppa. Kesän päiväprofiilista on havaittavissa palvelukulutukselle tyypillinen kulutuksen kasvu, mikä aiheutuu toimistojen ja liiketilojen jäähdytyksestä. Tutkitussa aineistossa jäähdytettyjä liittymiä ei kuitenkaan ollut merkittävästi mukana.

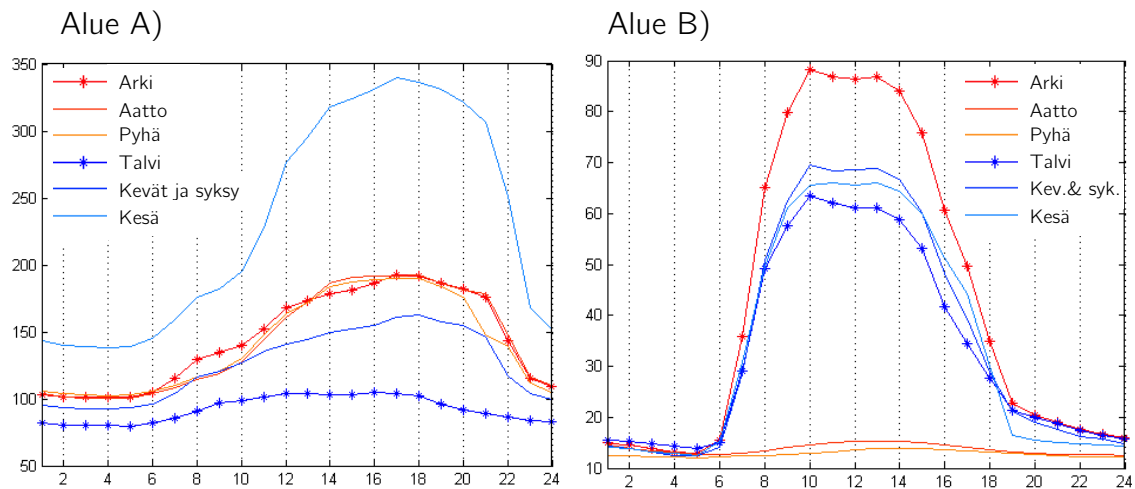
Toimistoja ja kauppvoja sisältävä ryhmä oli energiassa mitattuna yli 85 prosenttia tutkittujen liittymien vuosienergiasta. Matemaattisen ryhmittelyn avulla liittymät muodostivat kuitenkin vain yhden järkevästi tulkittavissa olevan ryhmän. Tutkitun aineiston kohdalla tämä tarkoittaa, että pääosa kulutuksesta mallinnettaisiin vain yhdellä profiililla. Palvelusektorin monimuotoisuudesta johtuen olisi toivottavaa, että ryhmittelyn avulla palvelusektorin kulutus voitaisiin jaotella tarkemmin. On erittäin tärkeää huomata, että vaikka ryhmittelyn tuloksena toimistoille ja kauppoille muodostettiin yksi keskimääräinen profiili, sisältää ryhmä todellisuudessa hyvinkin erilaisia sähkönkäyttäjää. Kuvasta 28 on nähtävissä, että toimistoja kuvaavat siniset pisteet jakaantuvat melko laajalle alueelle eikä yhtä selkeää pistetihentymää erotu. Ryhmien muodostamisen kannalta tulisi liittymien muodostaa selkeitä ryhmiä, mutta tutkitun palvelukulutuksen kohdalla näin ei käynyt. Tämä voi johtua palvelusektorin heterogeenisyydestä.

Esimerkiksi kuvassa 32 on esitetty alueilta A ja B (merkitty kuvaan 28) muodostetut päiväprofiilit. Alueiden A ja B profiilit ovat selvästi erilaisia kuin toimistoryhmän keskimääräinen profiili, vaikka ne kuuluvatkin samaan ryhmään. Alue A muodostuu liittymistä, joiden kesäajan kulutus on selvästi talvea suurempi. Profiilin muodon perusteella ryhmä vastaa voimakkaasti jäähdytettyä liiketilaa, esimerkiksi kauppakeskusta. Alue B sisältää liittymiä, joiden kulutus ajoittuu päivän tunneille ja ovat

suljettuna viikonloppuisin. Tällaisia liittymiä ovat toimistorakennukset, joissa työskennellään säännöllisesti vain arkipäivisin.



Kuva 31: Matemaattisesti löydetyn toimistoryhmän keskimääräinen päiväprofiili eri vuodenajoille ja päivätyypeille (Matti Koivisto, Aalto-yliopisto)



Kuva 32: Toimistoryhmän äärialueiden profiilit: Alue A) jäähdytetyt toimistot, alue B) vain arkipäivänä käytetyt toimitilat (Matti Koivisto, Aalto-yliopisto)

6.2.2 Ryhmittelyn vertailu nykyiseen asiakasryhmittelyyn

Käyttöpaikalle määritellään nykyisin käyttäjäryhmä liittymän luonnin yhteydessä asiakkaalta saatuja taustatietoja hyödyntäen. Luokittelu ei huomioi asiakkaan todellisia sähkönkäyttöä, mikä on yksi menetelmän puutteista. Matemaattinen ryhmittely sen sijaan pohjautuu asiakkaiden (liittymien tai käyttöpaikkojen) ryhmittelyyn tuntimittauksiin perustuen. Ryhmittelyiden oikeellisuutta voidaan arvioida vertaamalla matemaattisesti löydettyjä ryhmiä nykyiseen asiakasluokitteluun. Vertailussa on käytetty liittymän nykyisenä SLY-ryhmänä energialtaan suurinta luokkaa. Pakilan liittymien osalta jouduttiin käyttämään kuitenkin lukumäärältään suurinta asiakasryhmää, mikä voi näkyä ryhmittelyvirheenä ristiintaulukoinnissa. Taulukoinnin selkeyttämiseksi HSV:llä käytetyt SLY-ryhmät on jaoteltu viiteen taulukossa 7 esitettyyn joukkoon.

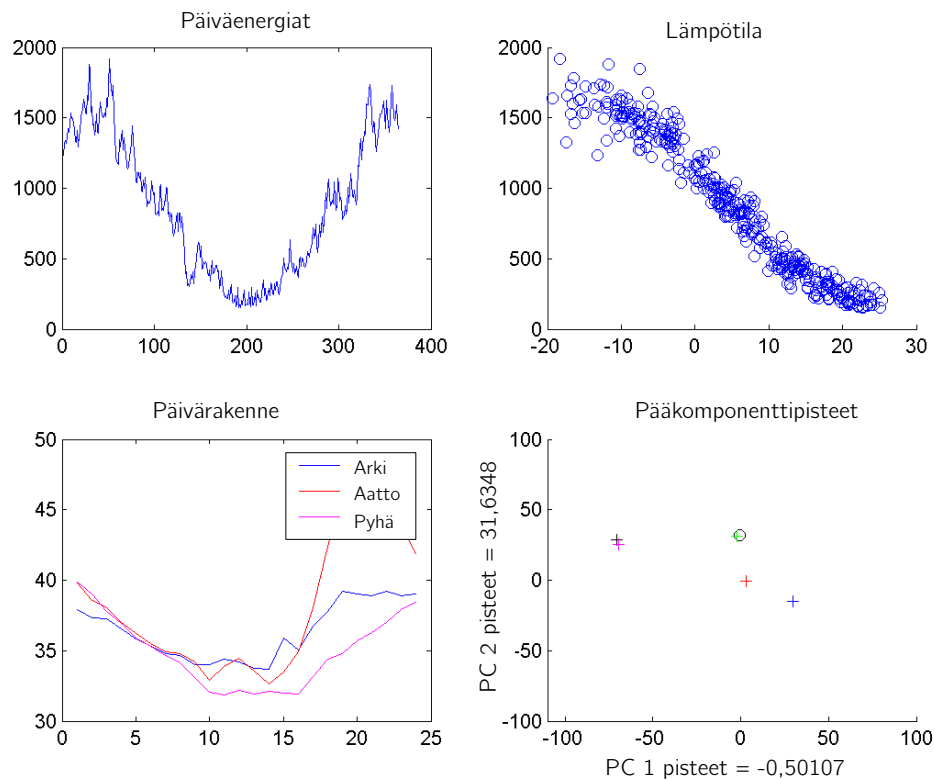
Tuloksista voidaan nähdä, että pääsääntöisesti matemaattinen ryhmittely vastaa SLY-ryhmittelyä. Esimerkiksi kaukolämmitysryhmät GM Kauko ja SLY Kauko ovat suurusluokaltaan samat. Myös palvelukulutusta sisältävä matemaattinen ryhmä (GM Toimisto) vastaa kooltaan SLY:n palveluryhmää. Suurimmat erot liittyvät sähkölämmittäjien ryhmittelyyn, sillä matemaattisen ryhmittelyn mukaan suorina sähkölämmittäjiä on selvästi SLY:n ryhmittelyä enemmän. Tähän on suurimpana syynä se, että osittain varaavat sähkölämmittäjät on tässä ryhmitelty SLY Varaava-ryhmään, mutta matemaattinen ryhmittely luokittelee nämä suoriksi sähkölämmittäjiksi. Työssä tutkittu ryhmittelymenetelmä ei sovellu lukumäärältään pienien ryhmien tunnistamiseen, vaikka vuosienergialtaan nämä olisivat suuria liittymiä. Tämä johtuu ennen pääkomponenttianalyysiä suoritetusta skaalauksesta, jolla poistettiin liittymien välinen suuruus ero. Vuosienergiaskaalaus on nähty välttämättömäksi

Taulukko 7: Liittymien matemaattisen ryhmittelyn (GMM) ristiintaulukointi nykyisen asiakasluokittelun suhteen (SLY)

Ryhmä:	SLY Toimis- to	SLY Kauko	SLY Muut	SLY Suora sl	SLY Varaa- va	Yhteensä
GM Toimisto	546	73	28	0	0	647
GM Kauko	131	1326	16	12	12	1497
GM Suora sl	44	143	15	53	246	501
GM Varaava 1	0	4	0	1	40	45
GM Varaava 2	0	4	1	0	33	38
Yhteensä	721	1550	60	66	331	2728

ryhmittelyn kannalta, mutta tulevaisuudessa pohditaan vaihtoehtoisia tapoja huomioida liittymän koko ryhmittelyssä. Palvelukulutuksen ryhmittelyn kannalta tämä on ongelmallista, koska liittymien tehot ovat usein suuria, mutta asuinkulutukseen verrattuna liittymien lukumäärä on huomattavasti pienempi.

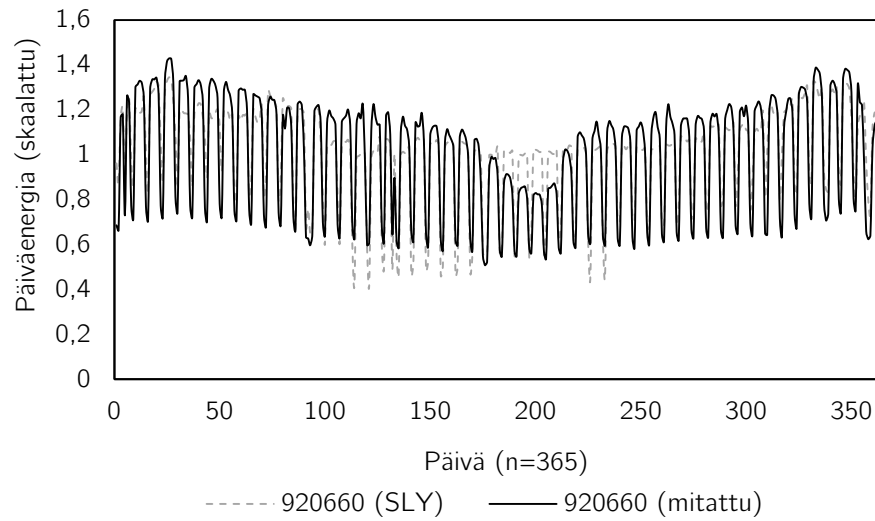
Matemaattisen ryhmittelyn avulla on mahdollista havaita ryhmittelyvirheitä, kuten kuvasta 33 on nähtävissä. Kuvassa 33 on esitetty yhden liittymän vuosiprofiili, päivärakenne, lämpötilariippuvuus ja pääkomponenttipisteet (PC1 ja PC2). Kuvan esimerkki on ryhmitelty nykyisessä asiakasluokittelussa palvelukulutusryhmään. Matemaattinen ryhmittely tunnistaa liittymän suoraksi sähkölämmittäjäksi, mikä näyttää järkevältä päiväenergioiden, lämpötilariippuvuuden ja päivärakenteen perusteella. Useinkaan erot eivät ole näin selkeitä, vaan liittymän sähkönkäyttö voi sisältää ominaisuuksia useista ryhmistä. Esimerkiksi toimisto, joka sisältää myös sähkölämmityskuormaa voi päivärakenteesta huolimatta ryhmittyä sähkölämmittäjäksi. Toimivan ryhmittelymenetelmän kannalta on keskeistä määritellä, mitä ominaisuutta sähkönkäytössä pidetään ryhmittelyn kannalta tärkeimpänä. Matemaattista ryhmittelyä on mahdollisuus muokata vastaamaan näitä tarpeita.



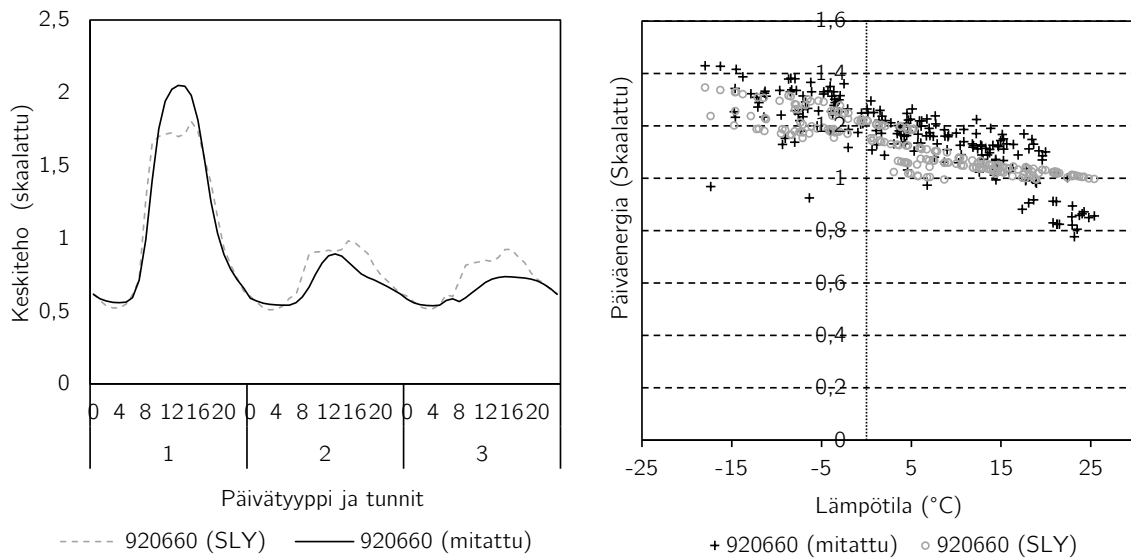
Kuva 33: Esimerkki liittymästä, joka on asiakastietojärjestelmässä ryhmitelty palvelukulutukseksi, mutta matemaattisen ryhmittelyn mukaan sähkönkäyttö vastaa suoraa sähkölämmittäjää. (Matti Koivisto, Aalto-yliopisto)

Tutkitussa aineistossa palvelukulutus muodosti vain yhden järkevän ryhmän johon liittyvien sähkönkäytön heterogeenisyydestä. Palvelukulutuksen ryhmittymistä kokeiltiin myös valitsemalla vain ne käyttöpaikat, jotka oli määritelty johonkin SLY:n palveluita sisältävään käyttäjäryhmään. Tämän jälkeen pääkomponenttialyysi suoritettiin vain näille käyttöpaikoille. Tällaisia käyttöpaikkoja oli tutkitussa aineistossa 6191 kappaletta eli noin kolmannes koko aineiston käyttöpaikoista. Suurin SLY-ryhmä oli 920660 (yks. palvelu, rahalaitos- ja vakuutustoiminta), joita oli 60 prosenttia tutkituista palvelukäyttöpaikoista. Toinen merkittävä palveluryhmä oli käyttöpaikkojen lukumäärässä mitattuna SLY-ryhmä 920623 (yks. palvelu, muu vähittäiskauppa), joita oli noin 16 prosenttia. Käyttöpaikoille suoritettu ryhmittelyanalyysi jakoi käyttöpaikat ryhmiin, mutta ryhmät eivät muodostaneet selkeitä joukkoja, vaan sekoittuivat toisiinsa. Käyttöpaikkojen analysointi liittymien sijaan ei näin ollen auttanut tarkentamaan palvelukulutuksen ryhmittelyä. Käyttöpaikkojen analysointi luo kuitenkin paremmat lähtökohdat palvelukulutuksen yksityiskohdaisemmalle ryhmittelylle, sillä tällöin erityyppiset sähkönkäyttäjät voidaan erottaa selkeämmin. Työssä suoritettujen ryhmittelyanalyysien jälkeen vaikuttaa siltä, että matemaattista analysointimenetelmää täytyy kehittää, jotta palvelusektorin erityispiirteet saadaan huomioitua paremmin ryhmittelyssä.

Käyttöpaikoille määriteltyjen SLY-ryhmien avulla voidaan selvittää, kuinka paljon käyttöpaikkojen todellinen sähkönkulutus poikkeaa SLY:n kuormitusmallista. Kuvissa 34 ja 35 on vertailtu käyttöpaikoilta mitattua keskimääräistä profiilia SLY:n indeksisarjaan 920660 (yks. palvelu, rahalaitos- ja vakuutustoiminta). SLY-ryhmää 920660 käytetään HSV:n verkkotietojärjestelmässä kuvaamaan asiakastietojärjestelmän käyttäjäryhmää ”toimisto/palvelut liike-elämälle”. Kokonaiskulutuksesta tämä ryhmä on hieman alle viidenes. Kuvan 34 vuosiprofilista on nähtävissä, että SLY:n indeksisarja ja mitattu profiili ovat pääpiirteittäin yhtenevät. Esimerkiksi viikkorakenne on molemmissa profiileissa hyvin samanlainen. Suurimmat erot löytyvät lämpiminä kesäpäivinä, jolloin kulutus on SLY:n mallissa hieman mitattua profiilia korkeampi. Kuvassa 35 on esitetty kyseisille profiileille päivärakenteet eri päivätyypeinä sekä arkipäivien lämpötilariippuvuus. Profiilien päivärakenteet ovat likipitään samanlaiset kulutuksen ajoittumisen osalta. Lämpötilariippuvuuden kuvaajasta erottuvat kesän kuumimpien päivien erot, jotka mitatussa profiilissa ovat SLY:n mallia pienempiä. Yleisesti ottaen profiilit ovat kuitenkin yllättävän samanlaiset, jos huomioidaan, että SLY:n profiilit on muodostettu koko Suomea kuvaavista mittauksista 1980- ja 1990-luvun vaihteessa.



Kuva 34: SLY:n indeksisarjan 920660 (yks. palvelu, rahalaitos- ja vakuutustoiminta) ja kyseiseen ryhmään kuuluvilta käyttöpaikoilta mitattu vuosiprofilili päiväenergiolina



Kuva 35: SLY:n indeksisarjan 920660 (yks. palvelu, rahalaitos- ja vakuutustoiminta) ja käyttöpaikoilta mitatun profiilin vertailu: Vasemmalla päivärakenne eri päivätyypeinä, oikealla arkipäivien lämpötilariippuvuus

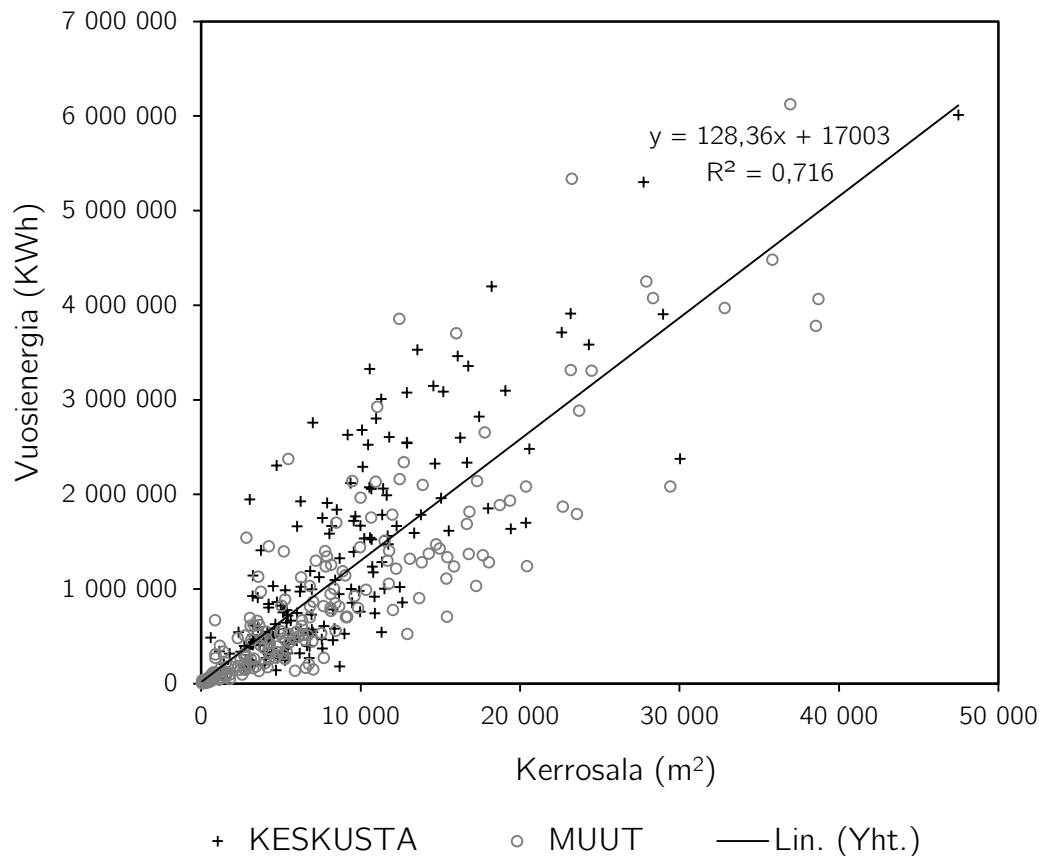
6.2.3 Ryhmiteltyjen liittymien ominaiskulutukset

Sähköverkon tulevan kuormituksen arvioinnissa on alueellisten ja käyttäjäryhmäkohtaisten ominaiskulutusten tunteminen keskeisessä asemassa. Ominaiskulutustarkastelujen avulla voidaan havainnoida myös toteutuneessa sähkökäytössä tapahtuneita muutoksia pidemmällä aikavälillä. Yhdistämällä kiinteistön kerrosala sitä syöttävän liittymän kulutustietoihin, voidaan ominaiskulutukset laskea kiinteistökohtaisesti. Lisäämällä analyysiin liittymien tuntimittaustiedot ja matemaattisen ryhmittelyn tuottamat profilit pystytään verkon kuormituksen alueellista kehittymistä mallintamaan huomattavasti nykyistä tarkemmin.

Kuvassa 36 on esitetty toimistoliittymien (GM Toimisto) vuosienergian ja kerrosalan välinen hajontakuvio. Tarkasteluun on otettu ne liittymät, joihin liittyi vain yksi kiinteistö ja ne kiinteistöt, joihin kuului vain yksi liittymä. Kuvasta on poistettu ne liittymät, joiden kulutus tai kerrosala oli selvästi muista poikkeava (ns. outlier-liittymä). Kaikkien tutkittujen toimistokiinteistöjen ominaiskulutus oli noin 129 kWh/m^2 , v ja selitysaste $R^2 = 0,72$. Toimistoille laskettu ominaiskulutus vastaa suuruusluokaltaan olemassa olevaa käsitystä toimitilojen keskimääräisestä ominaiskulutuksesta ja on myös yhtenevä osa-aluekohtaisesti lasketun arvon kanssa (kuva 13).

Ominaiskulutuksia tarkasteltiin myös alueittain, mutta ominaiskulutusten perusteella aineistosta ei löydetty alueellisia eroja. Tämä näkyy myös kuvassa 36 siten, että ydinkeskustan (punaiset pisteet) ja muiden analyysiin kuuluneiden alueiden (siniset pisteet) pisteet sijoittuivat selvästi päällekkäin. Keskustan liittymille lasketun lineaarisen sovitteen kulmakerroin vaikuttaa hieman muille alueille laskettua korkeammalta. Tutkitun aineiston osalta johtopäätöstä keskustan korkeammasta ominaiskulutuksesta ei voida tehdä johtuen ominaiskulutusten suuresta hajonnasta ja toimistojen pienestä lukumäärästä per kaupungin osa-alue. Ominaiskulutukset laskettiin myös kesä- ja talvikuukausille erikseen, mutta tutkitussa aineistossa kesän ominaiskulutukset eivät juuri poikenneet talven ominaiskulutuksista. Tämä näkyy myös matemaattisen ryhmittelyn tuottamissa päiväprofileissa, joissa kesän ja talven profilit ovat hyvin lähellä toisiaan (kuva 31).

Kuvassa 37 on tarkasteltu sähkö- tai kaukolämmitysryhmiin kuuluvien liittymien ominaiskulutuksia. Tarkasteluun on huomioitu ne liittymät, joihin kuului vain yksi kiinteistö, ja kiinteistöt, joihin kuului vain yksi liittymä. Lisäksi kuvasta on poistettu selvästi ulkopuoliset pisteet. Asuinkiinteistöt jakaantuivat kahteen ryhmään riippuen



Kuva 36: Toimistokiinteistöille (liittymille) lasketut ominaiskulutukset keskustassa ja muilla analyysiin kuuluneilla alueilla

kohteen lämmitystavasta. Kaukolämmitettyjen kohteiden (vihreät pisteet) ominaiskulutus oli noin $48 \text{ kWh/m}^2, \text{ v}$ ja sähkölämmittyjen kohteiden (punaiset pisteet) ominaiskulutus oli noin $152 \text{ kWh/m}^2, \text{ v}$. Asuinkiinteistöjen osalta alueittaisia eroja ei etsitty, koska suurin osa tarkasteluun kuuluneista liittymistä oli Pakilan alueelta (liite F). Sähkö- ja kaukolämmittäjille lasketut ominaiskulutukset ovat suuruudeltaan oikeaa luokkaa. Osa-aluekohtaisessa tarkastelussa (kuva 14) saadut ominaiskulutukset ovat asuinrakennusten osalta selvästi pienempiä kuin liittymittäin lasketut. Tähän vaikuttaa erityisesti se, että osa-alueilla käytetään tyypillisesti useaa eri lämmitystapaa. Lisäksi osa-aluekohtaisista ominaiskulutuksista on hyvä huomata, että energiasta puuttuvat ne liittymät, joihin kuuluu sekä asuin- että palvelukulutusta. Tämä näkyy erityisesti keskustan alueella, jossa liittymät muodostuvat tyypillisesti useista käyttöpaikoista, jotka voivat olla eri käyttäjäryhmistä.

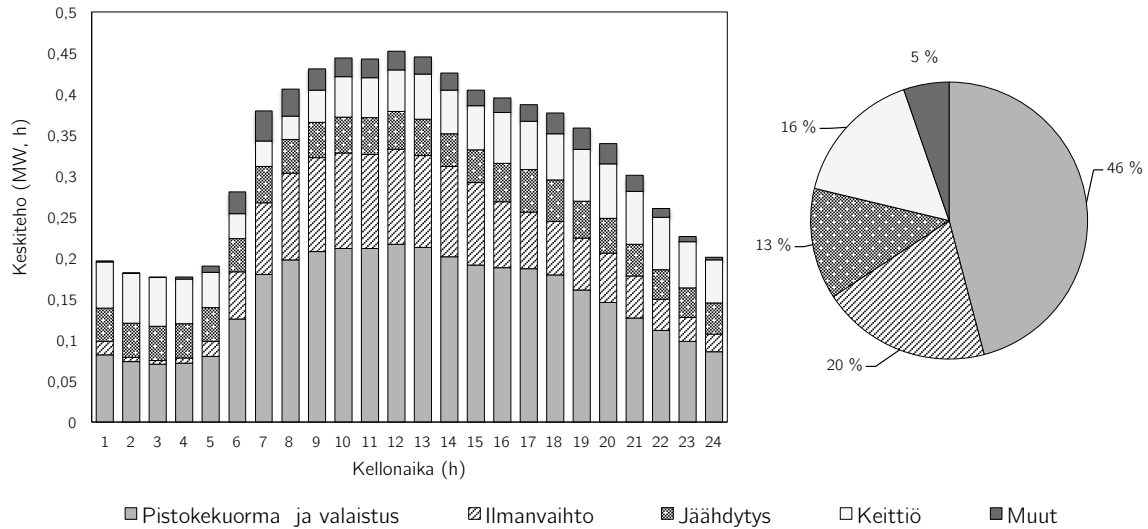
Tulevaisuudessa eri alueiden väliset ominaiskulutukset erottuvat selvemmin, kun analyysiin sisältyvien liittymien lukumäärä kasvaa ja mukaan tulee liittymiä koko Helsingin alueelta. Matemaattisen ryhmittelyn avulla ominaiskulutukset voidaan

6.3 Palvelusektorin laitetason profiilit

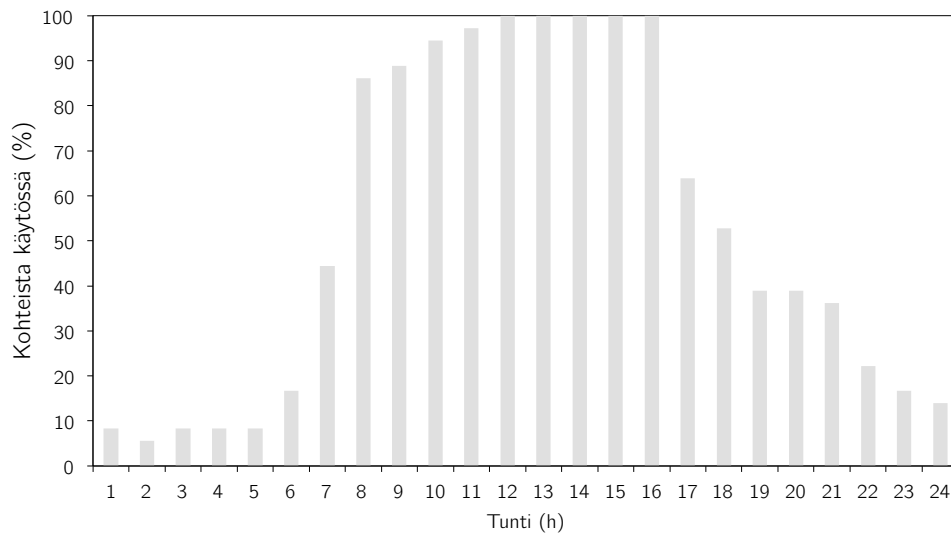
Sähkönkäytön laitetason erottelua tutkittiin tilastollisin menetelmin 39 asiakkaan ryhmälle, joka muodostui erilaisista palvelusektorin toimijoista. Analyysit suoritettiin Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulussa soveltamalla kotitalouskulutukselle aiemmin tehtyä mallia. Analyysiin käytettyä aineistoa ja menetelmää on käsitelty tarkemmin luvussa 5.2. Yhteenvedona aineistosta todettakoon, että luotettavan tilastollisen analyysin kannalta näytteiden (tässä asiakkaiden) määrä oli selvästi liian pieni. Lisäksi vastausten laatu asiakkaille tehdyssä energiankäytön taustatietoja kartoittavassa kyselyssä oli hyvin vaihteleva. Nämä puutteet olivat tiedossa jo analyysien suunnitteluvaiheessa. Tässä työssä suoritettun laitetason tarkastelun päätaavoitteena oli selvittää, miten aiemmin kotitalouksille laadittu menetelmä soveltuu palvelukulutuksen mallintamiseen. Palvelukulutuksen disaggregoinnille saatuja tuloksia ei voida pitää luotettavina, koska lähtöaineisto oli puutteellinen. Tästä syystä saatuja tuloksia ei ole mielekästä verrata kirjallisuudessa esitettyihin arvioihin.

Kuvassa 38 on esitetty analyysin tuottama keskimääräistä arkipäivää kuvaava laitetason profiili. Käytetty malli sisälsi 25 muuttujaa, joiden avulla pyrittiin kuvaamaan päälaiteryhmien sähkönkulutus. Laiteryhmän osuus kokonaiskulutuksesta tiettyinä tuntina määräytyi mallin antamista regressiokertoimista. Laiteryhmät muodostettiin yhdistelemällä kyselyssä (liite C) esiintyvät laitteet käyttötarkoituksen mukaan viiteen pääryhmään. Kuvassa 38 y-akselin yksikkö on megawatti (MW), mutta analyysin luonteesta johtuen on järkevämpää tarkastella eri laiteryhmiä keskinäisiä suuruseroja absoluuttisten tehoarvojen sijaan.

Kuvasta 38 on huomattava, että valaistuksen osuus on sisällytetty pistokekuormaan. Tilastollinen malli ei kyennyt erottelemaan valaistusta järkevästi käytettävissä olevien lähtötietojen avulla. Analyysin antama valaistuksen osuus jäi selvästi liian pieneksi (alle 5 prosenttia päivässä), joten yhdistys muuhun pistokekuormaan koettiin järkeväksi. Pistokekuorman osuus arkipäivän kulutuksesta oli analyysin mukaan 46 prosenttia, ilmanvaihdon osuus 20 prosenttia, jäähdätyksen osuus 13 prosenttia, keittolaitteiden osuus 16 prosenttia ja muun kulutuksen osuus oli 5 prosenttia. Lähtöaineistoon nähden analyysin tuottaman profiilin muoto ”näyttää” järkevältä. Toimitalojen sähkönkäyttö on kuitenkin vahvasti kytköksissä rakennuksen käyttöaikoihin. Profiilin muoto muistuttaa hyvin paljon tutkittujen kohteiden käyttöaikaa esittävään kuvaan (kuva 39).



Kuva 38: Vasemmalla tilastollisen mallin tuottama laitetason tuntiprofiili arkipäivänä, oikealla vastaavien laiteryhmiä osuudet koko päivän osalta (Merkebu Degefa, Aalto-yliopisto)(muokattu)



Kuva 39: Tutkittujen kohteiden tuntikohtaiset avoinnaolon osuudet (Merkebu Degefa, Aalto-yliopisto)

Menetelmän antamaan laitetason profiiliin täytyy suhtautua varauksella, sillä tutkituista kohteista ei ole saatavilla mittauksia, joilla tulosten oikeellisuutta voitaisiin arvioida. Lähtöaineistona käytettyä kyselyä ei oltu laadittu työssä sovellettua menetelmää varten. Lisäksi käytetty tilastollinen malli oli alunperin laadittu kotitalouskäyttäjien analysointiin. Kotitalouksien sähkönkäyttöä vertailtaessa on rakennuksen lämmitystavalla merkittävä vaikutus sähkönkäytön suuruuteen. Kotitalouksissa läm-

mitystapa vaihtelee myös huomattavasti toimitaloja enemmän, sillä palvelusektorin rakennukset ovat pääasiassa kaukolämmitettyjä. Tästä syystä toimitalojen sähkönkäyttö ei ole samalla tavoin lämpötilariippuva kuin esimerkiksi sähkölämmitettyjen omakotitalojen. Tutkitussa menetelmässä kulutusosuuksien arviointi perustuu asiakkaiden laitekannan ja muun energiankäyttöön liittyvien erojen tunnistamiseen. Näin ollen palvelusektorin tarkastelussa ei lämpötilamuutosten avulla saada esille sähkönkäytön vaihtelua samalla tavoin kuin kotitalouksissa. Tämä havaittiin myös tutkitun aineiston osalta: Kesä- ja talvikuukausien laiteprofileista ei löydetty merkittäviä eroja. Tämä johtunee siitä, että aineisto ei sisältänyt jäähdytettyjä toimistoja tai liiketiloja, joiden kulutus olisi kasvanut selvästi lämpimänä ajanjaksona.

Lämpötilariippuvuuden sijaan palvelusektorilla on huomattavaa vaihtelua johtuen rakennuksen käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi toimistojen, koulujen ja ruokakauppojen aukiolo-/käyttöajoissa, laitekannassa ja kerrosaloissa on suuria eroja, mitkä vaikuttavat sähkönkäytön suuruuteen ja ajalliseen vaihteluun. Palvelusektorin sähkönkäytössä on myös vaihtelua, joka liittyy laitekannan sijaan palvelun kausiluenteisuuteen. Tällaisia laitekannasta riippumattomia kulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi koulujen ja toimistojen loma-ajat.

Yleisesti ottaen toimitalojen sähkönkäytön jakautumisesta on saatavilla hyvin vähän tietoa. Tulevaisuudessa kiinteistöjen alamittausten odotetaan yleistyvät uudistuvien rakennusmääräysten myötä, mikä toivottavasti lisää tietoa kulutuksen jakautumisesta kiinteistössä. Palvelusektorin monimuotoisuudesta johtuen on yleispätevien laitetason kulutusarvioiden antaminen hyvin haasteellista. Työssä kokeilumielessä tutkittu tilastollinen menetelmä tarjoaa kustannustehokkaan tavan laajojen asiakasjoukkojen kulutuksen jaotteluun. Laadittaessa tilastollista mallia sekä asiakaskyselyä on huomioitava palvelukulutuksen erot kotitalouskulutukseen verrattuna. Menetelmän antamien tulosten varmistamiseksi täytyy tulokset todentaa kohteissa suoritetuilla laitetason mittauksien avulla. Tämän jälkeen mallia voidaan laajentaa suuremman asiakasjoukon käsittelyyn. Paras käsitys laitetason sähkönkäytöstä saadaan yhdistämällä tilastollisella menetelmällä saadut tulokset, mittauksiin ja laitevalmistajilta saatuihin tietoihin.

7 Yhteenveto ja jatkotutkimusehdotukset

Sähköverkon pitkän aikavälin suunnittelussa on kuormituksen alueellinen tunteminen avainasemassa, jotta verkkoinvestoinnit osataan kohdentaa oikeille alueille oikea-aikaisesti. Kuormitusmallinnuksen lähtökohtana on tutkia verkon nykyistä sekä aiempaa kuormitusta käyttäjäryhmittäin ja alueittain. Mallinnuksen tavoitteena on selvittää käyttäjäryhmien alueelliset ominaiskulutukset ja tyyppikäyrät. Kuormitusennusteen kannalta keskeisiä lähtötietoja ovat tyyppikäyrien ja ominaiskulutusten lisäksi alueelle kaavailtu tuleva rakentaminen ja käyttäjäryhmien sähkönkäytössä arvioidut muutokset. Käytännössä kuormitusennusteesta laaditaan useita skenaarioita, koska ennustamiseen liittyy epävarmuutta rakennushankkeiden toteutumisaikataulun sekä sähkönkäytössä tapahtuvien muutosten osalta.

Suomessa siirrytään sähkönkulutuksen tuntimittaukseen vuoden 2013 loppuun mennessä, jolloin käyttöpaikoilta saadaan kulutuslukemat tunneittain. Tuntimittaustiedot mahdollistavat verkon kuormituksen mallintamisen huomattavasti aiempaa tarkemmin. Mittausdatan valtava määrä edellyttää kuitenkin uusien menetelmien ja työkalujen kehittämistä, jotta mittaustiedot saadaan hyötykäyttöön verkkoyhtiöissä.

Kuormitusanalyysillä tutkitaan verkon nykyisen kuormituksen muodostumista, suuruutta ja ajallista vaihtelua sekä havainnoidaan sähkönkäytössä tapahtuvia muutoksia. Tulevaisuudessa tuntimittaustietoihin pohjautuvat kuormitusanalyysit ovat avainasemassa laadittaessa alueellisia kuormitusennusteita, jotka toimivat verkon kehityksen suuntaviivoina. Käyttäjäryhmittelyn tavoitteena on ryhmitellä sähkönkäyttäjät yhtenevästi käyttäytyviin joukkoihin, joita tutkimalla voidaan mallintaa ryhmän ominaispiirteet ja havainnoida ryhmän sähkönkäytössä tapahtuvia muutoksia. Käyttäjäryhmäkohtaisten tyyppikäyrien ja ominaiskulutusten avulla voidaan mallintaa tulevan rakentamisen vaikutus kuormituksen alueelliseen kehittymiseen sekä arvioida nykyisessä asiakaskannassa tapahtuvien muutosten vaikutusta tulevaisuuden kulutukseen. Tästä syystä käyttäjäryhmien ominaispiirteet on tunnettava. Perinteisesti tutkimuskohteena on ollut kotitalouksien sähkönkäyttö ja palvelusektorin rooli on jäänyt vähemmälle huomiolle. Suomessa palveluiden osuus sähkönkokonaiskulutuksesta on hieman yli viidennes. Teollisuuden rakennemuutoksen seurauksena palvelusektorin merkityksen sähkönkäyttäjänä odotetaan kasvavan tulevina vuosina. Helsingissä palvelut kuluttavat jo nyt yli 50 prosenttia sähköenergiasta. Sähkönkäyttäjärühmänä palvelusektorin on hyvin heterogeeninen ja se jakaantuu use-

aan eri toimialaan. Myös toimialojen sisällä on paljon vaihtelua, koska kohteet ovat toiminnoiltaan ja teknisiltä ratkaisuiltaan yksilöllisiä. Monimuotoisuudesta johtuen palveluiden sähkönkäytön tutkiminen on hyvin haasteellista.

Tässä diplomityössä tutkittiin palvelusektorin sähkönkäyttöä tuntimittaustietojen avulla. Työn tavoite oli selvittää palvelusektorin sähkönkäytön suuruus, alueellinen sijoittuminen ja ajallinen vaihtelu Helsingissä. Lisäksi työssä tutkittiin etäluentatietojen hyödyntämistä osana alueellista kuormitusennustetta. Palvelusektori käsitti yksityisen ja julkisen sektorin palvelut sisältäen mm. liike-elämän, terveydenhoidon, kulttuurin ja koulutustoimen palvelut. Tarkastelun ulkopuolelle rajattiin yhdyskuntahuolto, katuvalaistus ja sähköinen raideliikenne. Työssä tarkasteltiin myös toimitilojen sähkönkäyttöä ja siihen vaikuttavia tekijöitä.

Palvelusektorin sähkönkäyttöä tutkittiin vuosienenergia- ja tuntimittaustietoja hyödyntäen. Asiakastietojärjestelmästä saatujen käyttäjäryhmäkohtaisten vuosienenergioiden avulla selvitettiin, mihin toimialoihin palvelukulutus Helsingissä jakaantuu ja minne se alueellisesti sijoittuu. Lisäksi työssä tutkittiin eri alueiden ominaiskulutuksia ja toimitilojen kerrosaloja rakennuskanta- ja maavarantotietoja käyttäen. Palvelusektorin osuus sähkön kokonaiskulutuksesta oli 51 prosenttia vuonna 2010. Merkittävimmät toimialat olivat palvelut liike-elämälle (liiketilat ja toimistot), terveydenhoitopalvelut ja koulutustoimi sekä virkistys- ja kulttuuripalvelut. Suurimmat toimitilakeskittymät sijaitsevat eteläisessä Helsingissä, Pitäjänmäessä ja Vartiokylässä. Rakentamaton toimitilavaranto on kantakaupungin reuna-alueilla (Herttoniemi, Pasila), entisillä satama-alueilla (Jätkäsaari, Kalasatama) sekä nykyisten toimitilakeskittymien läheisyydessä (Pitäjänmäki, Vartiokylä, Vuosaari). Kaikkien kaupungin osa-alueiden ominaiskulutusten keskiarvo oli toimitiloille 127 kWh/m^2 , v. Korkeimmat ominaiskulutukset sijaitsivat eteläisessä suurpiirissä, joka on rakenteeltaan tiivistä kaupunkiympäristöä ja huomattavasti toimistoja sekä liiketiloja sisältävä alue.

Tuntimittaustietojen analysoinnin tavoitteena oli ryhmitellä liittymät matemaattisesti niiden sähkönkäytön ajallisen vaihtelun (profilin) perusteella. Todellisiin mittauksiin perustuva ryhmittely luokittelee kohteet toteutuneen kulutuskäyttäytymisen mukaan, jolloin ryhmittely kuvaa kohteiden sähkönkäytössä olevia eroja. Matemaattiseen ryhmittelyyn käytettiin kantakaupungin ja Pakilan tuntimittauksia vuodelta 2010. Tuntisarjat esitarkistettiin ennen matemaattista ryhmittelyä, koska puutteellisten mittausten ei haluttu vääristävän analyysyä. Esitarkistusten jälkeen ryhmittelyyn jäi 2728 liittymää. Yhteensä analyysin sisältyneiden liittymien

vuosienergia oli noin 20 prosenttia vuoden 2010 kokonaiskulutuksesta. Liittymien matemaattinen ryhmittely perustui pääkomponenttianalyysiin sekä Gaussin mikstuurimalliin. Pääkomponenttianalyysin jälkeen pystyttiin alkuperäisen aineiston rakenteesta selittämään noin kolmannes kahden ensimmäisen pääkomponentin avulla. Ensimmäinen pääkomponentti erotteli liittymät sähkönkäytön päivärakenteen (toimistomaisuuden) perusteella. Toinen pääkomponentin tulkittiin erottelevan liittymät lämmitystavan mukaan. Ryhmittelyyn käytettiin pääkomponenttien pääkomponenttipisteitä 1-8, lukuun ottamatta pääkomponenttia 5. Viidennen pääkomponentin tulkittiin kuvaavan kulutuksen lineaarista muutosta vuoden aikana, jonka taustalla oli usein virheellinen mittausta. Tästä syystä pääkomponenttia 5 ei pidetty oleellisena ryhmittelyn kannalta.

Matemaattisen ryhmittelyn avulla löydettiin järkevä tulkinta viidelle ryhmälle: Kolme sähkölämmitykseen liittyvää ryhmää, yksi kaukolämmitysryhmä ja yksi palvelukulutusta sisältävä ryhmä. Toimistoja ja kauppoja sisältävä palveluryhmä oli 86 prosenttia ryhmiteltyjen liittymien vuosienergiasta. Palvelukulutuksen tarkempi matemaattinen jaottelu osoittautui haasteelliseksi johtuen palvelusektorin heterogeenisyydestä: Palvelukulutusta sisältävien liittymien pääkomponenttipisteet eivät muodostaneet selkeitä ryhmiä, jolloin järkevää tulkintaa tarkemmalle jaottelulle ei löytynyt. Palvelusektorin ryhmittymistä tutkittiin myös suorittamalla pääkomponenttianalyysi ainoastaan palvelukulutusta sisältäville käyttöpaikoille. Käyttöpaikkojen analysointi liittymien sijaan ei kuitenkaan auttanut tarkentamaan palvelukulutuksen ryhmittelyä.

Matemaattisesti muodostetuille ryhmille laskettiin ryhmän sähkönkäyttöä kuvaava keskimääräinen profiili. Matemaattisesti saatuja profileja ja ryhmittelyä verrattiin nykyisin käytössä olevaan asiakasluokitteluun sekä SLY:n indeksisarjoihin. SLY-ryhmään ”rahalaivos- ja vakuutustoiminta” kuuluvilta käyttöpaikoilta mitattu profiili vastasi pääpiirteittäin kyseistä SLY:n indeksisarjaa. Tuntimittauksiin pohjautuva ryhmittely antoi erittäin lupaavia tuloksia. Ryhmittelyn antamat tulokset olivat pääosin yhteneviä myös nykyisen käytössä olevan asiakasluokittelun kanssa. Kiinteistökohtaisen ominaiskulutuksen laskentaa varten ryhmitellyt liittymät yhdistettiin paikkatiedon avulla siihen kytketyn kiinteistön kerrosalaan. Ryhmille lasketut ominaiskulutukset antoivat oikeansuuruisia tuloksia. Toimistokiinteistöjen ominaiskulutus oli noin 129 kWh/m², v; kaukolämmitysten kohteiden ominaiskulutus oli noin 48 kWh/m², v ja sähkölämmitettyjen kohteiden ominaiskulutus oli noin 152 kWh/m², v. Tutkitusta aineistosta ei löydetty ominaiskulutusten perusteella selkei-

tä alueittaisia eroja.

Alueellisten ja käyttäjäryhmäkohtaisten kulutusanalyysien lisäksi työssä pyrittiin selvittämään, mistä laitteista toimitilojen sähkönkulutus muodostuu. Toimitilojen sähkönkulutuksen kannalta tärkeimmät laiteryhvät ovat valaistus, ilmanvaihto ja jäähdytys sekä toimistolaitteet. Palvelusektorin monimuotoisuudesta johtuen oli yleis-pätevien arvioiden esittäminen kulutuksen jakautumisesta hyvin haasteellista. Työssä tutkittiin palvelukulutuksen jakautumista päälaiteryhmiin hyödyntäen usean selittäjän regressiomenetelmää. Menetelmän perusajatuksena oli yhdistää kohteen mittattu kulutus tilankäyttäjältä saatuihin energiankäyttöä selittäviin taustatekijöihin. Tilastollisen mallin toimivuudessa havaittiin selviä puutteita eikä saatuja tuloksia voitu pitää luotettavina. Puutteet johtuivat pääosin kohteiden pienestä lukumäärästä ja vastausten kirjavasta laadusta. Lisäksi tilastollinen malli oli alunperin suunniteltu kotitalouksien sähkönkäytön tutkimiseen, joten se ei huomioinut palvelusektorin erityispiirteitä. Tilastollinen menetelmä osoittautui kuitenkin tulevien tutkimusten kannalta mielenkiintoiseksi ja kustannustehokkaaksi tavaksi arvioida sähkönkäytön jakautumista.

7.1 Pohdinta ja jatkotutkimusehdotukset

Työssä käytetyn matemaattisen ryhmittelymenetelmän avulla ei löydetty kuin yksi järkevä palvelukulutusryhmä. Kuormitusanalyysien kannalta tämä on ongelmallista, koska esimerkiksi Helsingissä yli 50 prosenttia kulutuksesta kuvattaisiin näin ollen yhdellä ryhmällä. Työssä havaittiin, että palvelukulutus sisältää hyvinkin erilaisia sähkönkäyttäjiä, jotka olisi hyvä pystyä ryhmittelemään omiin luokkiin. Osittain palvelukulutuksen ryhmittelyssä havaitut puutteet johtuivat siitä, että ryhmittelymenetelmä perustui lukumäärältään suurien ryhmien tunnistamiseen, eikä huomioinut liittymien energiassa olevia eroja. Palvelusektorin osalta tämä on haasteellista, koska liittymiä ei ole lukumäärällisesti paljon, mutta ne voivat olla vuosienergialtaan huomattavan suuria. Tuntisarjojen esitarkistuksessa huomattava osa mittauksista hylättiin, joten vuosi 2010 näyttää olleen vielä selvästi etäluentaan siirtymisenvuosi. Tulevaisuudessa ryhmittelyyn voidaan käyttää koko Helsingin tuntimittauksia, jolloin sähkönkulutuksen alueellisesta ja käyttäjäryhmäkohtaisesta jakautumisesta saadaan parempi käsitys. Kuormituksen analysoinnissa on pienien maantieteellisten alueiden lisäksi hyvä tutkia myös laajempia alueita, jolloin saadaan parempi käsitys kokonaiskulutuksen kehittymisestä. Kokonaiskulutuksen analysointiin voidaan

käyttää yhteiskunnan ja talouden yleistä kehitystä kuvaavia muuttujia, kuten bruttokansantuotetta.

Palvelusektorin ryhmittelyn tarkentamiseksi olisi hyvä tutkia keinoja, joilla palvelukulutuksen ominaispiirteet saataisiin paremmin huomioitua ryhmittelyssä. Yksi tutkimuksenarvoinen vaihtoehto on huomioida ryhmittelyssä liittymän tai käyttöpaikan vuosienenergia, jolloin vuosienenergialtaan suuret kohteet saisivat suuremman painoarvon ryhmittelyssä. Nykyinen vuosienenergiaskaalaus, jossa kaikkien liittymien vuosienenergiat skaalataan arvoon 1, nähdään edelleen analyysien tulosten kannalta välttämättömänä. Liittymien koon huomioimiseksi on pohdittu muita keinoja, joiden toimivuutta selvitetään tulevissa ryhmittelyissä. Tässä työssä analyysit suoritettiin pääosin liittymille, koska liittymätason tarkastelu vastasi paremmin pitkän aikavälin suunnitteluun tähtäävää käyttötarkoitusta. Palvelusektorin tarkempi ryhmittely saattaa edellyttää käyttöpaikkatason analyysiä, koska liittymät voivat sisältää sekä asuin- että palvelukulutusta. Käyttöpaikkojen ryhmittelyn ongelma on, että käyttöpaikkaa ei voida yhdistää kulutusta vastaavaan kerrosalaan yhtä luotettavasti kuin liittymää. Tulevaisuudessa on tärkeää tutkia myös tuntimittaustietoja hyödyntävien analysointimenetelmien toimivuutta pidemmän aikavälin trenditarkasteluilla, kun etäluentatietoja on saatavilla useammalta vuodelta. Kuormituksen analysointi ja -ennustustyökalu ei kuitenkaan tarkoita ainoastaan tuntimittaustiedon matemaattista käsittelyä, vaan työkalussa on keskeisessä osassa myös kaavoitus- ja paikkatietojen hyödyntäminen. Kuormituksenmallinnusta tukevan ryhmittelymenetelmän kehittämiseksi on tärkeää määritellä ne piirteet, joiden ympärille ryhmittelyn halutaan tapahtuvan.

Palvelusektorin sähkönkäytöstä on saatavilla vähän tutkimustietoja. Tutkimustiedon puutteeseen on vaikuttanut se, että sähkönkulutus ei ole perinteisesti ollut mukana yritysten jokapäiväisessä päätöksenteossa. Viime vuosina suhtautuminen energia- ja ympäristöasioihin on muuttunut ja yhä useammassa toiminnossa on mukana energia- ja ympäristöselvitys. Verkon kuormituksessa tapahtuvien muutosten ja kuorman ennustamisen kannalta olisi arvokasta ymmärtää, miten ja milloin eri laitteita käytetään. Laitetason jaotteluun käytetty tilastollisen menetelmän toimivuutta tulisi soveltaa seuraavaksi kohteissa, jotka on varustettu alamittauksin. Tällä tavoin menetelmän luotettavuutta olisi huomattavasti helpompi arvioida. Yleisesti ottaen merkittävä edistysaskel energiankulutuksen ja energiasäästötoimenpiteiden toimivuuden seurannassa olisi alamittausten yleistymisen kulutusseurannan kannalta keskeisissä kulutuskohteissa.

Viitteet

- [1] CLEEN Oy. Yhtiön verkkosivut. [Verkkójulkaisu]. 2012. Saatavissa: <http://www.cleen.fi> [Viitattu 17.8.2012].
- [2] Työ- ja elinkeinoministeriö. Energiakatsaus 1/2009. [Verkkójulkaisu]. 2009. Saatavissa: http://www.tem.fi/files/30326/WEB_Energiakts1_11.pdf [Viitattu 10.08.2012].
- [3] Valtioneuvosto. Valtioneuvoston asetus 66/2009: *Sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta*. 2009. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090066> [Viitattu 31.8.2012].
- [4] Markus Piispanen. Synergioiden saavutettavuus automaattisessa mittarinluennassa sähkö-, kaukolämpö- ja vesihuolto-yhtiöiden välillä. [Diplomityö]. Teknillinen korkeakoulu, Tietoliikenne- ja tietoväkkotekniikan laitos. Espoo. 2010. 8+91 s. Saatavissa: http://www.energia.fi/sites/default/files/synergioiden_saavutettavuus_mittarinluennassat_diplomityo_2010_piispanen.pdf [Viitattu 05.08.2012].
- [5] Energiategollisuus ry. Tuntimittauksen periaatteita. Energiategollisuus ry. 2010. 46 s. Saatavissa: http://www.energia.fi/sites/default/files/tuntimittaussuositus_2010_paivitetty20111118.pdf [Viitattu 05.08.2012].
- [6] Seppo Kärkkäinen, Pekka Koponen, Antti Martikainen ja Hannu Pihala. Sähkön pienkuluttajien etäluettavan mittaroinnin tila ja luomat mahdollisuudet. [Tutkimusraportti] VTT-R-09048-06. VTT. 2006. 7+63 s. Saatavissa: [http://ktm.elinar.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/12b74ae4d1122aadc22565fa003211a6/b59277de45908071c22572100045d09c/\\$FILE/746462006.pdf](http://ktm.elinar.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/12b74ae4d1122aadc22565fa003211a6/b59277de45908071c22572100045d09c/$FILE/746462006.pdf) [Viitattu 10.08.2012].
- [7] Aki Pesola. Energian ja vedenkulutuksen etäluentajärjestelmät Hollolan ja Nastolan kunnissa –toteutusvaihtoehtojen arviointi. [Diplomityö]. Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, Energiategoniikan laitos. Espoo. 2010. 4+76 s. Saatavissa: http://lahti.aalto.fi/fi/julkaisut/tutkimukset_ja_raportit/diplomityo_immu_aki_pesola_2010-002.pdf [Viitattu 10.08.2012].
- [8] Pertti Pakonen, Sami Vehmasvaara, Marko Pikkarainen, Bashir Ahmed Siddiqui ja Pekka Verho. Experiences on narrowband powerline communication of automated meter reading systems in Finland. *Electric Power Quali-*

- ty and Supply Reliability Conference (PQ)*, 2012, s. 1–6, kesäkuu 2012. doi: 10.1109/PQ.2012.6256242.
- [9] Matti Lehtonen et al. IT-sovellukset ja energiatehokkuuden kehittäminen. Teknillinen korkeakoulu, Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos. Espoo. 2007. 87 s. ISBN 978-921-22-8835-9
- [10] Petri Valtonen. Interaktiivisen asiakasrajapinnan mahdollistamat energiatehokkuutta tukevat toiminnot ja niiden kannattavuus. [Diplomityö] Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan laitos. Lappeenranta. 2009. 131 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe200908242051> [Viitattu 10.08.2012].
- [11] Helen Sähköverkko Oy. [Verkkajulkaisu]. Yhtiön verkkosivut. 2012. Saatavissa: <https://www.helen.fi/siirto/hsv.html> [Viitattu 11.8.2012].
- [12] Timo Kaartio. Alueellisen sähkökuorman ennustamisen kehittäminen. [Diplomityö]. Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos. Espoo. 2010. 8+107 s. Saatavissa: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2010/urn100210.pdf> [Viitattu 11.8.2012].
- [13] Ville Rimäli. Etäluettavan energiamittaustiedon hyödyntäminen alueellisissa kuormitusennusteissa. [Diplomityö]. Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos. Espoo. 2011. 8+107 s. Saatavissa: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2011/urn100528.pdf> [Viitattu 11.8.2012].
- [14] Gabriel Peschiera ja John E. Taylor. The impact of peer network position on electricity consumption in building occupant networks utilizing energy feedback systems. *Energy and Buildings*, 49(0):584 – 590, 2012. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812001594> [Viitattu 11.8.2012], doi:10.1016/j.enbuild.2012.03.011.
- [15] Pekka Koponen, Merja-Leena Pykälä, ja Kari Sipilä. Mittaustietojen tarpeet ja saatavuus rakennuskannan automaattisten energia-analyyysien näkökulmasta. *VTT Tiedotteita*. VTT 2008. 62+3 s. ISBN 978-951-38-7216-8. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2008/T2438.pdf> [Viitattu 11.8.2012].
- [16] Euroopan standardointikomitea (CEN). [Verkkajulkaisu]. Älykkäät sähkömittarit. 2012. Saatavissa: <http://www.cen.eu/cen/Sectors/Sectors/Measurement/Smartmetering/Pages/default.aspx> [Viitattu 11.8.2012].
- [17] Anni Sarvaranta. Älykkäät sähköverkot ja niiden kehitys Euroo-

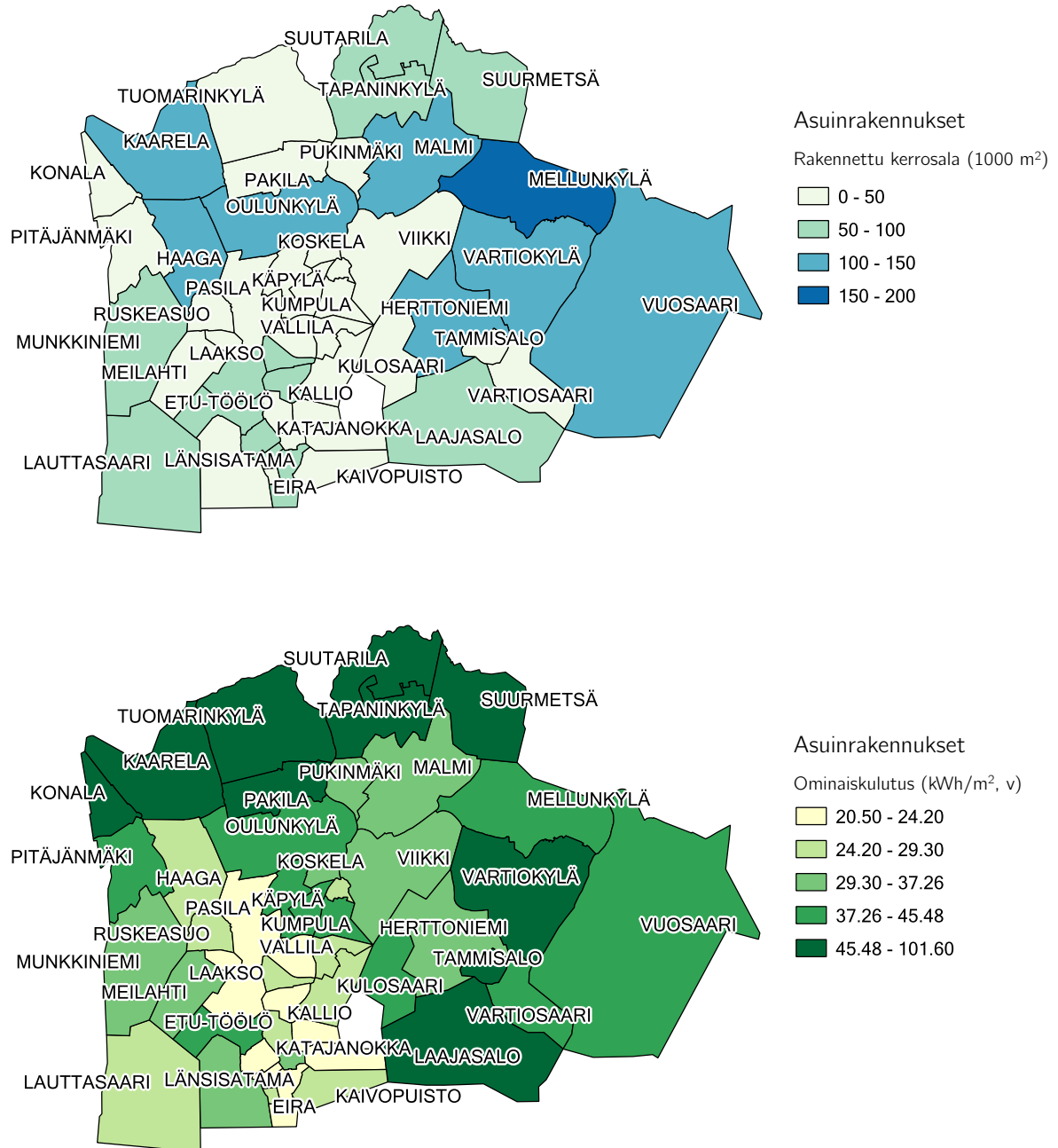
- pan unionissa ja Suomessa. [Harjoitustyö]. Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan laitos. Espoo. 2010. 68+8 s. Saatavissa: http://www.energia.fi/sites/default/files/alykkaat_sahkoverkot_2010_diplomityo_anni_sarvaranta.pdf [Viitattu 11.8.2012].
- [18] Tilastokeskus. [Verkkajulkaisu]. Energiatilastot. 2012. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/ene.html> [Viitattu 17.8.2012].
- [19] Elinkeinoelämän keskusliitto EK ja Energiateollisuus ry. Arvio Suomen sähkön kysynnästä vuonna 2030. Elinkeinoelämän keskusliitto EK ja Energiateollisuus ry. 2009. 23 s. Saatavissa: http://www.energia.fi/sites/default/files/arvio_sahkon_kysynnasta_2030_271009.pdf [Viitattu 17.08.2012].
- [20] Iivo Vehviläinen, Mikko Halonen, Anna Kumpulainen ja Juha Vanhanen. Energiatehokkuustoimet kasvihuonepäästöjen vähentämisessä. Gaia Consulting Oy. 2008. 49 s. Saatavissa: <http://www.greenpeace.org/finland/Global/finland/p2/ilmasto/report/2008/gaia-consultingin-energiansaeaes.pdf> [Viitattu 09.10.2012].
- [21] Tilastokeskus. [Verkkajulkaisu]. Kansantalouden tilinpito. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/vtp/index.html> [Viitattu 17.8.2012].
- [22] Pekka Ylä-Anttila. Teollinen tulevaisuus. Elinkeinoelämän tutkimuslaitos. *Suhdanne 2010:2*, s. 5, 2010. Saatavissa: http://www.etla.fi/files/2601_SUH_10_2_teollinen_tulevaisuus.pdf [Viitattu 17.08.2012].
- [23] ODYSSEE-MURE.
[Verkkajulkaisu]. Odyssee energiatehokkuusindikaattorit. 2012. Saatavissa: <http://www.odyssee-indicators.org> [Viitattu 17.8.2012].
- [24] Saara Elväs, Lea Gynther ja Ulla Suomi. Energiatehokkuusindikaattorit 11/2010 2010. 80 s. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/3942/Energiatehokkuusindikaattorit_Loppuraportti_2010.pdf [Viitattu 17.8.2012].
- [25] Helsingin kaupunki, Helsingin seudun ympäristöpalvelut. [Verkkajulkaisu]. Helsingin seudun aluesarjat. 2012. Saatavissa: <http://www.aluesarjat.fi/> [Viitattu 17.8.2012].
- [26] Markku Hyvärinen. *Electrical networks and economies of load density*. [Väitöskirja]. Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos. Espoo. 2008. 44+94

- s. ISBN 978-951-22-9658-3. Saatavissa: <http://lib.tkk.fi/Diss/2008/isbn9789512296583/isbn9789512296583.pdf> [Viitattu 02.09.2012].
- [27] Helsingin seudun ympäristöpalvelut. Rakennusmaavaranto SeutuRAMAVA. [Avoin data]. 2012. Saatavissa: <http://www.hsy.fi/seututieto/kaupunki/Sivut/ramava.aspx> [Viitattu 02.09.2012].
- [28] Hanne Sæle, Eva Rosenbergm ja Nicolai Feilberg. State-of-art projects for estimating the electricity end-use demand. [Tutkimusraportti]. SINTEF Energy research. SINTEF Energi AS. 2010. 86 s. ISBN 978-82-594-3445-6. <http://www.sintef.no/home/Publications/> [Viitattu 07.11.2012].
- [29] Rakennetun ympäristön osasto. *Rakennusten energiatehokkuus: Määräykset ja ohjeet 2012*. Ympäristöministeriö. 2011. Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf [Viitattu 07.011.2012].
- [30] Timo Vehosmaa. Sähköenergian käytön tehostaminen kiinteistötoimialalla. [Diplomityö]. Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos. Espoo. 2008. 95 s. Saatavissa: <http://urn.fi/urn:nbn:fi:tkk-012348> [Viitattu 10.08.2012].
- [31] Motiva Oy. Kiinteistöjen energiatehokkaat sähkötekniset ratkaisut 2012. 28 s. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/5439/Kiinteiston_sahkotekniset_ratkaisut.pdf [Viitattu 17.8.2012].
- [32] Sisäilmayhdistys. [Verkkojulkaisu]. Yhdistyksen verkkosivut. 2012. Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/>.
- [33] Riikka Holopainen, Martti Hekkanen, Kari Hemmilä ja Markku Norvasuo. Suomalaisen rakennusten energiakorjausmenetelmät ja säästöpotentiaalit. *VTT Tiedotteita*. VTT. 2007. 2+104 s. ISBN 978-921-38-6908-3. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2377.pdf> [Viitattu 20.08.2012].
- [34] Rakennetun ympäristön osasto. *Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta: Ohjeet 2012*. Ympäristöministeriö. 2011. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=135289&lan=fi> [Viitattu 9.10.2012].
- [35] Heikki Wilen. Toimistokiinteistön sähköenergian mittaustiedon analysointi ja hyödyntäminen. [Diplomityö]. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähköenergia-tekniikan laitos. Tampere. 2011. 10+68 s. Saatavissa: http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dtyot/Wilen_Heikki_julk.pdf [Viitattu 20.08.2012].

- [36] Anssi Seppälä. *Load forecasting and load estimation in electricity distribution*. [Väitöskirja]. Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos. Espoo. 1996. 19+118 s. ISBN 951-38-4947-3.
- [37] Jarmo Elovaara ja Liisa Haarla. *Sähköverkot 1 : Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta*. 1. painos. Otatieto Helsinki University Press, Helsinki, 2011. 520 s. ISBN 978-951-672-360-3.
- [38] Erkki Lakervi ja Jarmo Partanen. *Sähkönjakeluteknikka*. 1. painos. Otatieto Helsinki University Press, Helsinki, 2008. 285 s. ISBN 978-951-672-357-3.
- [39] Tekla Oyj. *TEKLA Xpower PSA Theory Guide*. 2011. 200 s.
- [40] Milla Kallonen. [Diplomityö]. Etäluennan tuntimittaustietojen hyödyntäminen sähkönjakeluverkon suunnittelussa. Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos. Espoo. 2007. 77 s.
- [41] Jarmo Partanen et al. [Opetusmoniste]. Sähkömarkkinat -opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT Energia Sähkötekniikka. 2010. 92 s. ISBN 951-764-819-9
- [42] Göran Korenoff. Kuormituskäyrien hyödyntäminen tulevaisuudessa. [Tutkimusraportti] VTT-R-09048-06. VTT. 2010. 38 s. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2010/VTT-R-07496-10.pdf> [Viitattu 30.08.2012].
- [43] Matti Koivisto, Pirjo Heine, Ilkka Mellin ja Matti Lehtonen. Clustering of connections points and load modelling in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, s. 10, hyväksytty julkaistavaksi 2012 (artikkelin sisältävä lehti ei tiedossa vielä).
- [44] Ilkka Mellin. [Opetusmoniste]. Monimuuttajamenetelmät: Pääkomponenttianalyysi. Teknillinen korkeakoulu, Matematiikan ja systeemianalyysin laitos. 2004. 28 s. Saatavissa: http://www.sal.tkk.fi/vanhat_sivut/Opinnot/Mat-2.112/K08/PCOMP10.pdf [Viitattu 09.10.2012].
- [45] D. Reynolds. Gaussian mixture models. *Encyclopedia of Biometric Recognition*, s. 12–17, 2008. Saatavissa: http://extwebprod.ll.mit.edu/mission/communications/publications/publication-files/full_papers/0802_Reynolds_Biometrics-GMM.pdf [Viitattu 09.10.2012].
- [46] Jari Oksanen. [Opetusmoniste]. Monimuuttajamenetelmät yhteisöekologiassa.

- Oulun yliopisto. 2004. 41 s. Saatavissa: <http://cc.oulu.fi/~jarioksa/opetus/mmm/mmm.pdf> [Viitattu 22.8.2012].
- [47] Natasa Djuric, Vojislav Novakovic ja Frode Frydenlund. Electricity use in two low energy office buildings in Norway. *REHVA European HVAC Journal*, 1:5, 01 2012. Saatavissa: http://www.rehva.eu/?download=/_/498/electricity-use-in-two-low-energy-office-buildings-in-norway_rj1201.pdf [Viitattu 02.09.2012].
- [48] K. H. Tiedemann. Statistical modelling of residential electricity consumption and electricity savings by end-use. *Proceedings of the 19th IASTED International Conference on Modelling and Simulation*, MS '08, s. 414–417, Anaheim, CA, USA, 2008. ACTA Press. Saatavissa: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1722520.1722598>.
- [49] Merih Aydinalp-Koksal ja V. Ismet Ugursal. Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modeling end-use energy consumption in the residential sector. *Applied Energy*, 85(4):271 – 296, 2008. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626190600136X>, doi:10.1016/j.apenergy.2006.09.012.

Liite A: Asuinrakennusten kerrosalat ja ominaiskulut kaupunginosittain



(A)

Liite B: Motivan Oy:n raportoimia ominaiskulutuksia

Tyyppi	Kohteita kpl	Tilavuus 1000 r-m	Sähkö - ominaiskulutus (kWh/r-m)											
			Min	5 %	10 %	Alakv	Med	Yläkv	90 %	95 %	Max			
TK 1994														
11 Myymälä rakennukset (poislukien Liike- ja tavaratalot, kauppakeskukset)	87	3 475	3,4	8,0	10,2	15,5	30,8	49,1	75,0	91,5	176,3			
11.2 Liike- ja tavaratalot, kauppakeskukset	62	4 843	5,3	7,4	8,4	14,7	30,0	51,7	60,5	71,6	221,0			
12 Majoitusliikkeen rakennukset	14	421	2,2	4,3	6,9	20,4	31,4	43,7	50,3	55,2	62,0			
13 Asuntolarakennukset	13	66	8,8	9,0	9,1	9,4	16,5	18,1	23,3	24,8	26,2			
14 Ravintolat	4	60	2,4	7,4	12,4	27,4	40,6	47,7	51,7	53,1	54,4			
15 Toimistorakennukset (kaikki)	338	12 885	4,9	7,7	9,4	15,3	23,4	32,8	49,5	63,2	200,1			
15 Toimistorakennukset, julkinen palvelusektori	40	942	5,9	8,5	9,8	12,2	17,1	23,4	27,7	33,5	103,6			
15 Toimistorakennukset, yksityinen palvelusektori	279	11 141	4,9	7,7	9,3	15,7	23,9	32,9	48,2	59,3	200,1			
16 Liikenteen rakennukset	20	1 036	2,9	5,1	6,1	14,2	17,9	26,7	38,0	51,6	195,9			
21 Terveystieteiden rakennukset (pois lukien Terveyskeskukset ja -asemat)	48	2 882	11,0	15,0	16,8	19,5	25,2	33,0	41,0	42,7	60,5			
21.4 ja 21.9 Terveyskeskukset ja -asemat	28	362	11,1	14,3	14,4	20,1	24,0	28,5	38,3	45,4	49,3			
22 Huoltolaitosrakennukset (pois lukien Vanhainkodit)	26	140	5,6	7,1	7,9	11,0	16,9	24,9	37,1	51,3	55,9			
22.1 Vanhainkodit	30	516	11,1	13,7	18,0	22,0	24,8	29,4	33,4	34,0	36,3			
23 Muut sosiaalitoimen rakennukset (pois lukien Päiväkodit)	16	140	11,1	14,4	15,7	17,5	22,9	26,6	29,8	34,2	45,0			
23.1 Päiväkodit	107	397	5,5	10,9	13,5	16,1	19,7	23,3	25,7	31,4	44,8			
31 Teatteri- ja konserttirakennukset	9	531	6,4	8,2	10,0	11,6	15,0	18,1	19,7	20,9	22,1			
32 Kirjasto-, museo-, ja näyttelyhallirakennukset	21	271	5,0	8,7	12,5	15,1	19,7	24,0	25,3	25,4	37,7			
33 Seura- ja kerhorakennukset	21	113	2,0	3,4	4,5	6,4	10,8	15,3	32,7	33,0	105,6			
34 Uskonnonlaitosten yhteisöjen rakennukset	24	279	2,7	3,2	3,7	8,2	10,8	18,6	24,7	27,6	28,5			
35 Urheilu- ja kuntolurakennukset (pois lukien Jää- ja uimahallit)	25	787	4,2	6,2	7,1	9,3	15,4	23,8	46,5	70,7	192,5			
35.1 Jäähallit	8	463	2,7	9,5	16,2	26,9	33,5	65,7	69,7	72,6	75,5			
35.2 Uimahallit	20	489	14,8	19,1	22,0	26,4	39,9	51,7	69,1	90,8	107,1			
36 Muut kokoonntumisrakennukset	10	145	9,3	10,1	10,9	14,3	22,1	23,4	28,5	45,4	62,4			
51 Yleissivistävien oppilaitosten rakennukset	294	5 543	0,7	6,5	7,4	9,3	11,8	14,4	17,9	20,5	66,0			
52 Ammatillisten oppilaitosten rakennukset	57	1 745	5,9	9,2	10,7	12,8	15,5	21,0	28,7	32,9	35,5			
53 Korkeakoulu- ja tutkimuslaitosrakennukset	8	357	8,2	10,1	12,0	17,2	18,4	31,0	34,4	37,6	40,8			
54 Muut opetusrakennukset	9	138	3,7	5,4	7,0	11,2	12,3	13,5	15,1	16,4	17,7			
71 Varastorakennukset	22	2 457	3,9	8,0	9,2	13,2	15,5	21,4	23,5	24,4	37,9			
72 Palo- ja pelastustoimen rakennukset	41	987	2,8	4,5	5,8	7,6	11,1	17,0	24,5	27,6	48,0			
89 Muut maatalousrakennukset	4	291	5,9	6,4	7,0	8,7	11,5	33,6	70,0	82,1	94,2			
93 Muut rakennukset	3	241	4,5	10,3	16,1	33,4	62,3	62,7	63,0	63,1	63,2			

Liite C: Toimistokyselyn lomake

TAUSTATIEDOT

- 1 Montako henkilöä toimitilassanne työskentelee? _____
- 2 Mitkä ovat aukioloaikanne? Ma - pe _____ La _____ Su _____
- 3 Käyttösähkön (toimitilassa kulutettu sähköenergia, esim. valaistus, pistorasialaitteet) maksaminen
 Maksatte itse Kuuluu yhtiövastikkeeseen tai vuokraan En tiedä
- 4 Kiinteistösähkön (ilmastointi, ulkoalueet, hissit yms.) maksaminen
 Maksatte itse Kuuluu yhtiövastikkeeseen tai vuokraan En tiedä
- 5 Toimitilanne koko
 Kerrosten lukumäärä _____
 Huoneiden lukumäärä _____
 Pinta-ala _____ m²

LÄMMITYS- JA ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄT

- 6 Onko toimitilassanne sisäilman koneellinen jäähdytys? Jos kyllä, mikä?
 Kaukokylmä
 Ilmalämpöpumppu
 Sisäilman jäähdytin, ilmastointilaitte -huonekohtaiset laitteet
 Sisäilman jäähdytin, ilmastointilaitte -ilmastoinnin yhteydessä
 Muu, mikä? _____
 En tiedä
- 7 Toimitilanne ilmanvaihto
 Painovoimainen
 Koneellinen poisto
 Koneellinen tulo ja poisto
 Koneellinen tulo ja poisto lämmön talteenotolla
 En tiedä

LAITTEET JA SÄHKÖNKÄYTTÖTOTTUMUKSET

- 8 Sisävalaistus toimitilassanne
 Hehkulamppujen lukumäärä..... _____ kpl
 joista energiansäästölampeilla varustettuja... _____ kpl
 Halogeenilamppujen lukumäärä..... _____ kpl
 Loisteputkilamppujen lukumäärä..... _____ kpl
- Onko sisävalaistus toteutettu pääasiassa yleisvalaistuksena? Kyllä Ei
 Onko sisävalaistus toteutettu pääasiassa kohde- tai paikallisvalaistuksena? Kyllä Ei
 Onko yleisvalaistuksella kellokytkin? Kyllä Ei
 Onko kohde- ja paikallisvalaistuksella kellokytkin? Kyllä Ei
 Ohjataanko valaistusta tarpeen mukaan päivänvalo- ja/tai läsnäolotunnistimilla? Kyllä Ei
- Onko toimitilassanne sisävalaistus myös aukioloaikojen ulkopuolella? Kyllä Ei
 Jos kyllä, montako prosenttia toimitilastanne on valaistu? _____ %
- 9 Ulkovalaistus
 Ulkovalaistusta ohjataan hämäräkytkimellä kellokytkimellä käsiohjauksella
- 10 Onko ilmastoinnissanne säätöä kellonajan mukaan? Kyllä Ei En tiedä

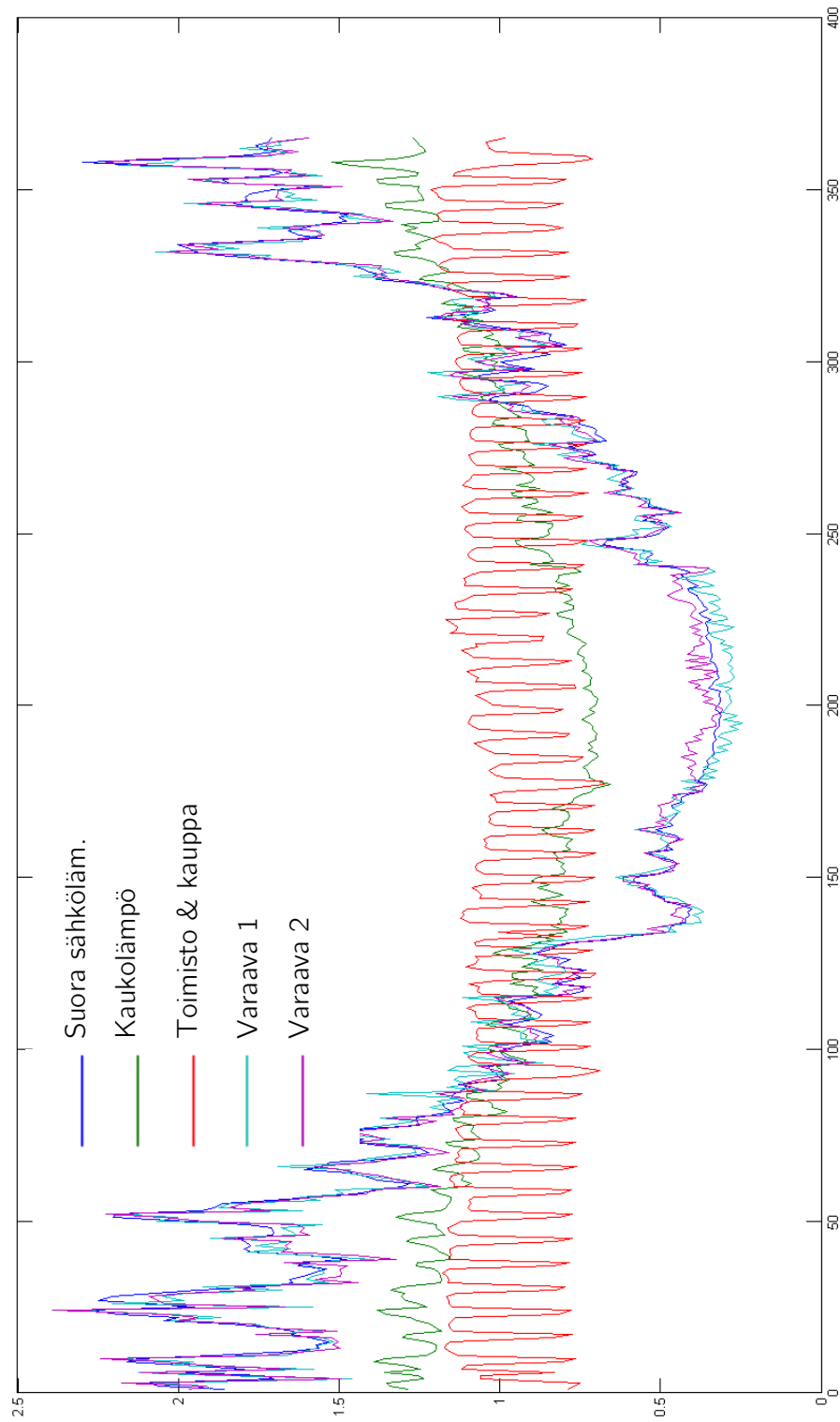
11 Toimitilassanne olevia laitteita

<input type="checkbox"/>	Tietokone kuvaputkinäytöllä.....	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Tietokone litteällä näytöllä.....	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Kannettava tietokone.....	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Kopiokone.....	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Fax.....	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Tulostin monitoimilaite.....	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Jääkaappi.....	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Kylmiö.....	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Kaappipakastin.....	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Pakasteallas.....	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Muita kylmlaitteita.....	_____ kpl
	Mitä? _____	_____ kpl
	_____	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Sähköhella.....	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Astianpesukone.....	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Muita keittiölaitteita.....	_____ kpl
	Mitä? _____	_____ kpl
	_____	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Kuvaputkitelevisio.....	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Taulutelevisio.....	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Viihde-elektroniikkaa (DVD, videot jne.)	_____ kpl
<input type="checkbox"/>	Muita laitteita, mitä?.....	_____ kpl

12 Onko toimitilassanne tehty energiakatselmusta? Kyllä Ei En tiedä

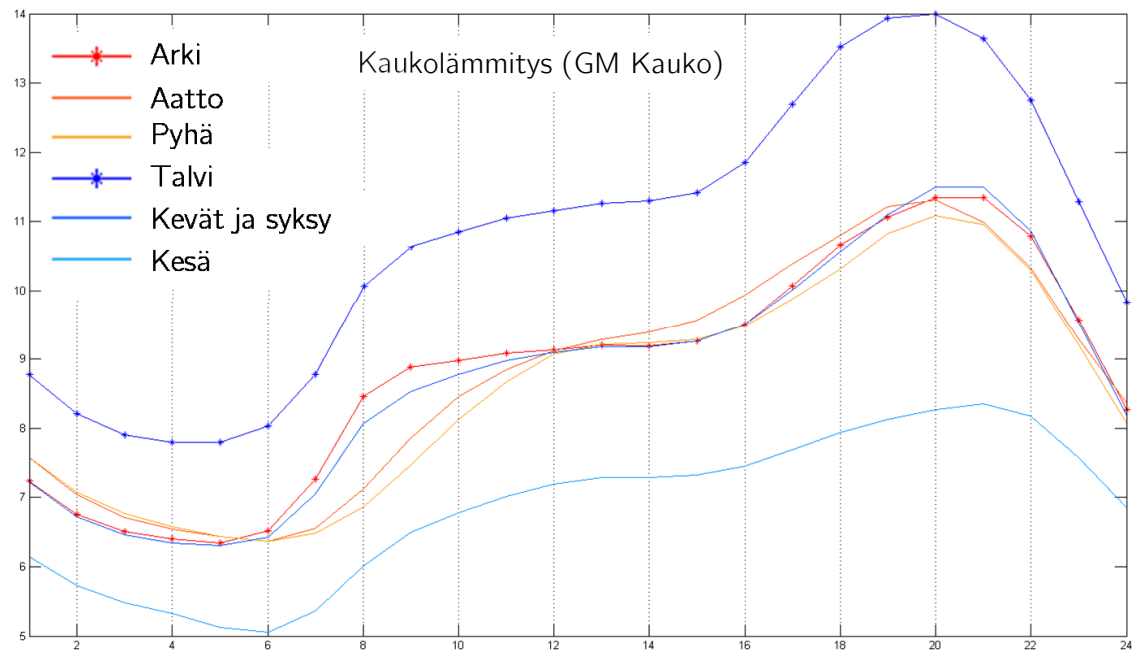
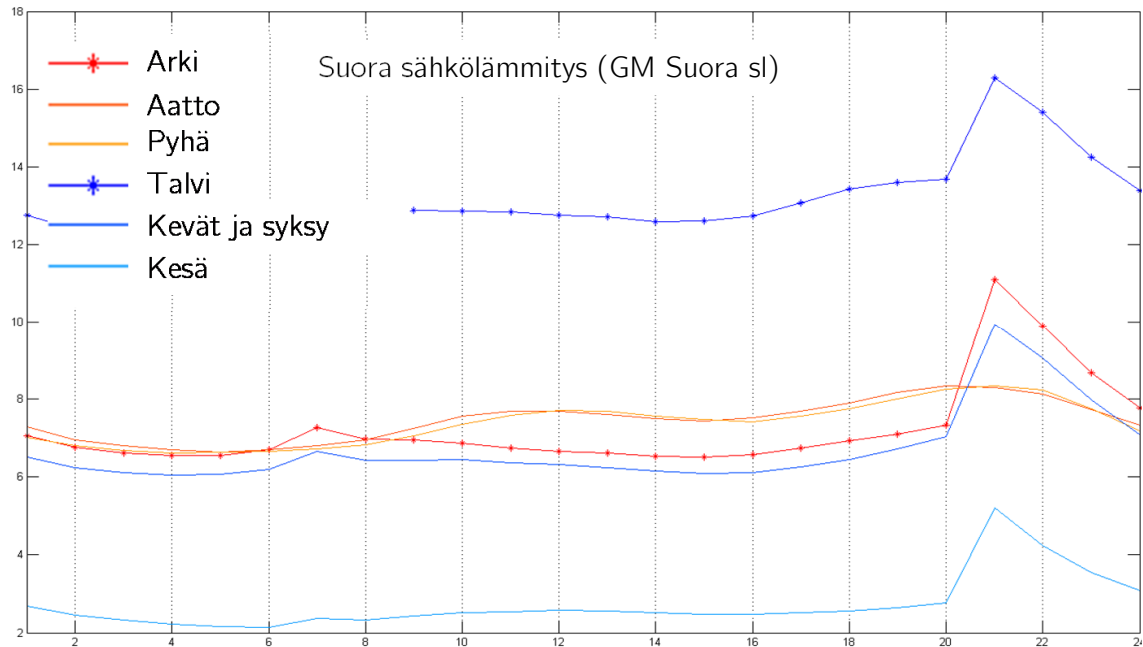
13 Vapaata palautetta

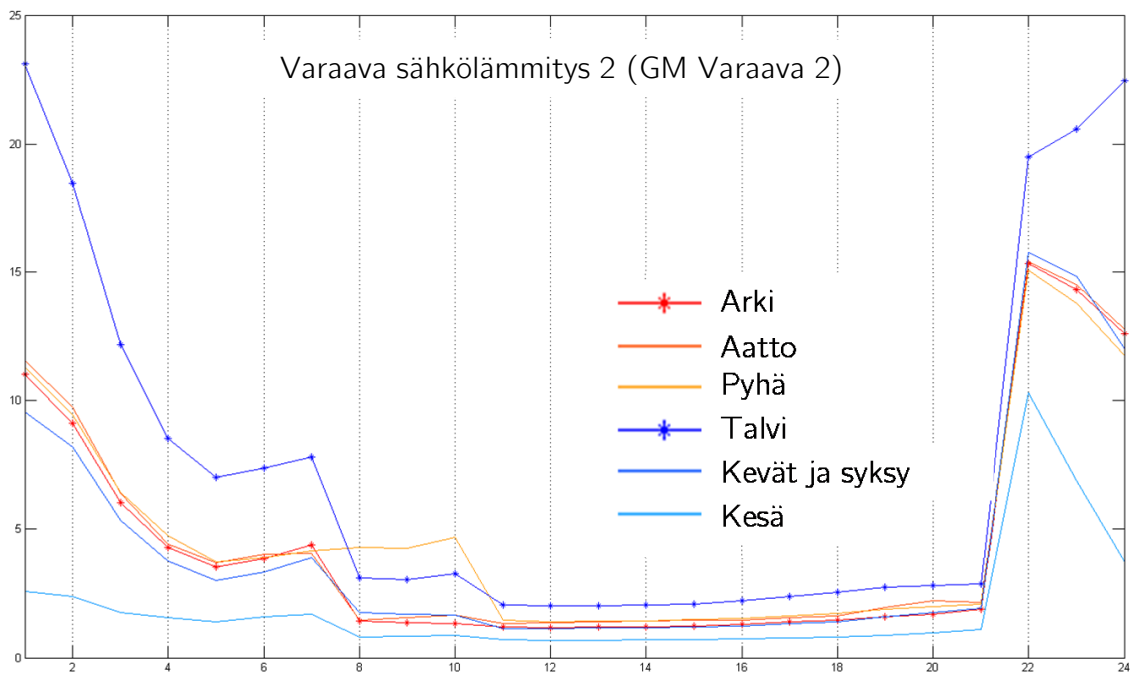
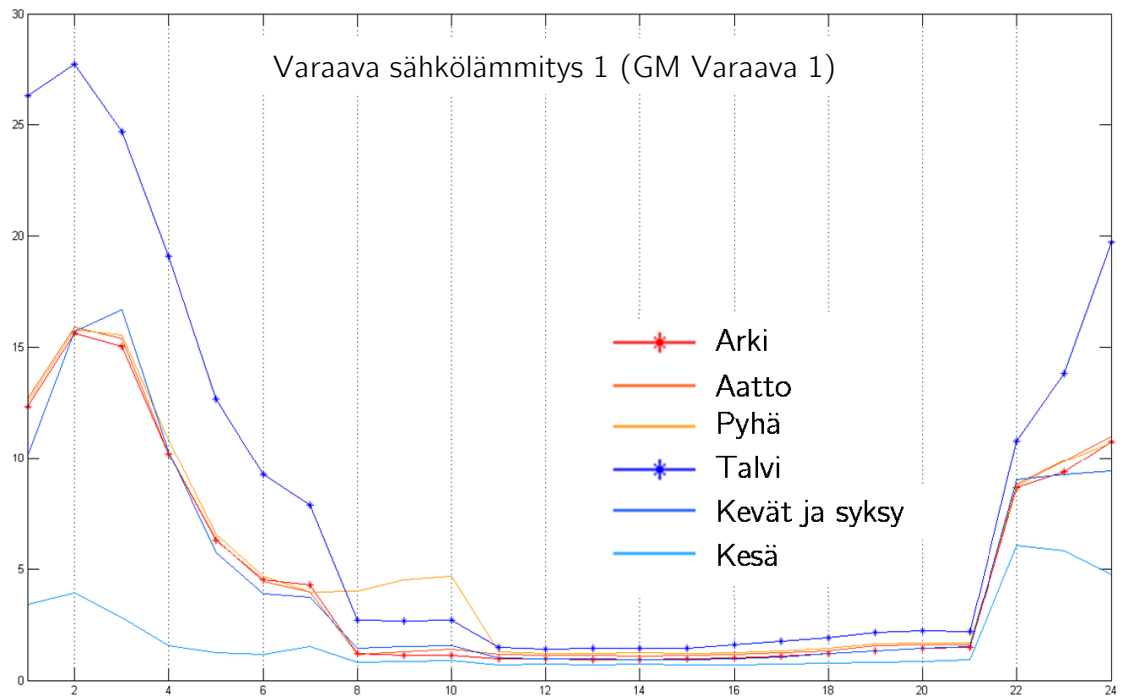
Liite D: Ryhmien vuosiprofililit (normeerattu)



(D)

Liite E: Muiden ryhmien päiväprofiilit





(E)

Liite F: Matemaattisesti ryhmiteltyjen liittymien lukumäärät kaupungin osa-alueittain

	GM Toimisto	GM Kauko	GM Suora sl	GM Varaava 1	GM Varaava2	
Meilahti	26	40	5	0	0	71
Ullanlinna	13	29	1	0	0	43
Lapinlahti	1	1	2	0	0	4
Kluuvi	55	4	4	0	0	63
Alppila	8	5	0	0	0	13
Kaartinkaupunki	42	2	4	0	0	48
Linjat	13	1	2	0	0	16
Kamppi	92	23	2	0	0	117
Ruskeasuo	14	49	5	0	0	68
Taka-Töölö	42	55	8	0	0	105
Katajanokka	23	20	0	0	0	43
Länsi-Pasila	1	1	0	0	0	2
Hermannin	10	6	4	0	0	20
Munkkisaari	7	9	2	0	0	18
Kruununhaka	34	23	5	0	0	62
Sörnäinen	32	9	3	0	0	44
Punavuori	22	21	0	0	0	43
Etu-Töölö	18	30	1	0	0	49
Torkkelinmäki	6	7	0	0	0	13
Vallila	44	25	1	0	0	70
Lauttasaari	26	139	9	0	0	174
Ruoholahti	29	8	2	0	0	39
Kaivopuisto	5	8	0	0	0	13
Siltasaari	11	2	1	0	0	14
Kulosaari	14	108	35	1	0	158
Harju	4	15	1	0	0	20
Laakso	8	8	1	0	0	17
Kumpula	0	1	1	0	0	2
Länsi-Pakila	19	522	265	24	26	856
Itä-Pakila	17	269	115	17	11	429
Jätkäsaari	2	5	0	0	0	7
Eira	5	20	2	0	0	27
Lehtisaari	2	20	4	3	0	29
Kuusisaari	2	12	16	0	1	31
	647	1497	501	45	38	2728