

Tuukka Huikari

Sähkönkäytön kehittymisen skenariointi jakeluverkkoyhtiössä

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 13.1.2015.

Työn valvoja:

Prof. Matti Lehtonen

Työn ohjaajat:

TkT Markku Hyvärinen

TkT Pirjo Heine

Tekijä: Tuukka Huikari		
Työn nimi: Sähkökäytön kehittymisen skenariointi jakeluverkkoyhtiössä		
Päivämäärä: 13.1.2015	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 7+73
Sähkötekniikan laitos		
Professori: Sähköjärjestelmät		Koodi: S-18
Valvoja: Prof. Matti Lehtonen		
Ohjaajat: TkT Markku Hyvärinen, TkT Pirjo Heine		
<p>Alueellisen sähkökäytön pitkän aikavälin ennustaminen toimii perustana sähköverkon strategiselle suunnittelulle. Usean kymmenen vuoden päähän ulottuviin ennusteisiin sisältyy kuitenkin paljon epävarmuustekijöitä. Tässä työssä tutkittiin skenariointia menetelmänä epävarmuuksien huomioon ottamiseksi. Työssä tehtiin kirjallisuuskatsaus yleisimpiin skenariointimenetelmiin ja esiteltiin tarkemmin intuitiivisen logiikan menetelmä.</p> <p>Työssä rakennettiin työkalu alueellisten sähkökäyttöskenaarioiden tekemiseksi Helsingin alueella. Työkalun avulla voidaan mallintaa ja havainnollistaa erilaisten rakentamisennusteiden ja ominaiskulutusten muutosten yhteisvaikutuksia sähkökäytön kehittymiseen. Skenaarioiden lähtökohtana on alueiden nykyinen mitattu kulutus, joka saadaan summaamalla etäluettavilta mittareilta saatua tunneittaista mittaustietoa. Tähän dataan voidaan yhdistää taustatietoja kuntarekisteristä, kaavoituksesta, asiakastietojärjestelmästä ja verkkotietojärjestelmästä, mikä mahdollistaa sähkökäytön tarkemman analysoinnin.</p> <p>Työssä laadittiin intuitiivisen logiikan menetelmällä neljä skenaariota Helsingin alueellisen sähkökäytön kehittymisestä. Näiden neljän skenaarion vaikutuksia alueelliseen sähkökäyttöön analysoitiin kahdella demonstraatioalueella: Etu-Töölössä ja Aurinkolahdessa. Eri skenaarioiden mukaiset sähkökäyttöennusteet eroavat toisistaan huomattavasti molemmilla alueilla.</p> <p>Työn tulokset osoittavat, että tulevaisuuden epävarmuuksia on syytä ottaa huomioon sähkökäyttöennusteissa. Skenariointi vaikuttaa toimivalta menetelmältä epävarmuuksien analysoimiseksi. Intuitiivisen logiikan skenariointimenetelmä auttaa asiantuntijoita tunnistamaan suurimmat sähkökäytön kehittymiseen vaikuttavat tekijät ja tekemään “mitä jos” -analyysyjä erilaisista mahdollisista tulevaisuuksista.</p>		
Avainsanat: AMR, sähkökäyttöanalyysi, sähkökäyttöennuste, skenariointi, simulointimenetelmä		

Author: Tuukka Huikari		
Title: Forecasting the electricity use in a distribution company using scenario planning		
Date: 13.1.2015	Language: Finnish	Number of pages: 7+73
Department of Electrical Engineering		
Professorship: Power Systems		Code: S-18
Supervisor: Prof. Matti Lehtonen		
Advisors: D.Sc. (Tech.) Markku Hyvärinen, D.Sc. (Tech.) Pirjo Heine		
<p>Long term spatial electricity use forecasting acts as a foundation for strategic distribution system planning. There are, however, numerous uncertainty factors affecting long term forecasts. In this study, scenario planning was studied as a method for taking these uncertainties into account. A literature review was carried out of the most common scenario planning methods and the intuitive logics method was presented in more detail.</p> <p>A tool was developed in this study for creating spatial electricity use scenarios in the Helsinki area. The tool can be used to model and illustrate the effects of different construction forecasts and changes in nominal consumption. The scenarios are based on the current regional consumptions, which are aggregated from customer specific metered consumption data. This data can be combined with background information from the municipal register, zoning, the customer information system and the network information system which enables detailed analysis of spatial electricity use.</p> <p>In this study, four scenarios were constructed of the development of electricity use in Helsinki. The effects of these scenarios were analysed in two demonstration areas: Etu-Töölö and Aurinkolahti. In both areas, the electricity use differed noticeably between the different scenarios.</p> <p>The results of this study show that uncertainty factors should be taken into account in electricity use forecasting. Scenario planning appears to be a functional method in dealing with these uncertainties. The intuitive logics method helps experts to identify the main factors affecting electricity use and to construct “what if” analyses of the different possible futures.</p>		
Keywords: AMR, electricity use analysis, electricity use forecasting, scenario planning, simulation method		

Esipuhe

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

Kiitän lämpimästi ohjaajiani TkT Markku Hyväristä ja TkT Pirjo Heineä asiantuntevasta ohjauksesta, neuvoista ja hyvistä kommentteista. Suuret kiitokset työn valvojalle professori Matti Lehtoselle kommentteista ja ohjeistuksesta. Kiitos myös Matti Koivistolle asiantuntevista näkemyksistä, jotka auttoivat minua suuresti skenariointityökalun rakentamisessa. Lisäksi kiitän kaikkia Helen Sähköverkko Oy:n työntekijöitä, jotka ovat auttaneet työn materiaalien keräämisessä.

Teekkarielämä Otaniemessä on ollut mahtavaa aikaa. Kiitokset smurffeille ja muille opiskelukavereilleni, teitte näistä kuudesta ja puolesta vuodesta unohtumattomia. Kiitos myös perheelleni ja ystävilleni tuesta opintojeni aikana, olette mahtavia! Lopuksi vielä erityiskiitos Katalle tuesta ja kannustuksesta.

Otaniemessä, 12.1.2015

Tuukka Huikari

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
2 Helen Sähköverkko Oy ja CLEEN Oy	3
3 Sähkökäyttöennusteet jakeluverkon suunnittelussa	4
4 Sähkökäytön ennustaminen	7
4.1 Perinteiset ennustamismenetelmät	7
4.2 Epävarmuuden hallinta skenaarioiden avulla	9
4.3 Intuitiivinen logiikka skenariointimetodina	11
5 Tietolähteet sähkökäytön analyysiin	15
5.1 Etäluettavien sähkömittareiden mittausaineisto	15
5.2 Kuntarekisteri	17
5.3 Kaavoitus	17
5.4 Asiakastietojärjestelmä	20
5.5 Verkkotietojärjestelmä	21
6 Nykyisen sähkökäytön analysointi	22
6.1 Pienalueet	22
6.2 Asiakasryhmien muodostaminen	23
6.3 Ominaiskulutus	25
6.4 Kuormitusmallit	29
7 Muutokset sähkökäytössä	34
7.1 Uudisrakentaminen	36
7.2 Sähkökäytön muutokset nykyisissä käyttökohteissa	37
7.3 Uusi tuotanto ja uudet sähkökäyttökohteet	38
8 Skenariointityökalu	45
8.1 Tietolähteiden yhdistäminen	45
8.2 Työkalun rakenne	46
8.3 Esimerkki työkalun käytöstä	49
8.4 Työkalun menetelmien arviointi	51
8.5 Työkalun kehityskohteet	53

9 Helsinki vuonna 2050 -skenaariot	55
9.1 Eri skenaarioiden vaikutukset sähkönkäyttöön	57
10 Yhteenveto ja johtopäätökset	63
Viitteet	65
Liitteet	70
A Käyttöliittymä	70
B Helsingin sähkönkäyttöskenaariot vuonna 2050	72
C Helsingin jako osa-alueisiin	73

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

E_r	käyttäjärühmän r vuosienergia
ke-m^2	kerrosneliömetri
k_1, k_2	Velanderin kertoimet
k_{ri}	käyttäjärühmän r tunti-indeksi ajankohtana i
kWh	kilowattitunti
P_{max}	huipputeho
P_{ri}	ryhmään r kuuluvan asiakkaan tuntiteho ajankohtana i
W	vuosienergia

Lyhenteet

AMR	Automatic meter reading, automaattinen mittarinluenta
ARVI	Materiaalien arvovirrat, Material Value Chains (CLEEN Oy:n tutkimusohjelma)
BEST	Sustainable Bioenergy Solutions for Tomorrow, Tulevaisuuden kestävät bioenergiaratkaisut (CLEEN Oy:n tutkimusohjelma)
CCSP	Carbon Capture and Storage Program, Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CLEEN Oy:n tutkimusohjelma)
CHP	Combined heat and power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto
CLEEN Oy	Cluster for Energy and Environment, energian ja ympäristön strategisen osaamisen keskittymä
DESY	Distributed Energy Systems, hajautetut energiajärjestelmät (CLEEN Oy:n tutkimusohjelma)
EFEU	Efficient Energy Use, energian käytön tehokkuus (CLEEN Oy:n tutkimusohjelma)
EV	Electric vehicle, täyssähköauto
FCEP	Future Combustion Engine Power Plants, tulevaisuuden polttomoottorivoimalaitokset (CLEEN Oy:n tutkimusohjelma)
HSV	Helen Sähköverkko Oy
KTJ	Valtakunnallinen kiinteistötietojärjestelmä
MMEA	Measurement, Monitoring and Environmental Efficiency Assessment, ympäristön mittaus ja monitorointi (CLEEN Oy:n tutkimusohjelma)
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle, ladattava hybridauto
SGEM	Smart Grids and Energy Markets, älykkäät sähköverkot ja energia-markkinat (CLEEN Oy:n tutkimusohjelma)
SLY	Suomen Sähkölaitosyhdistys ry, nykyisin Sähköenergialiitto (Sener)
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö
VTJ	Valtakunnallinen väestötietojärjestelmä
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT, aiemmin Valtion teknillinen tutkimuskeskus

1 Johdanto

Sähköverkkoyhtiöt joutuvat suuria investointeja tehdessään katsomaan pitkälle tulevaisuuteen sähköverkon komponenttien pitoaikojen ollessa jopa yli 40 vuotta [1] ja esimerkiksi sähköaseman rakentamisen kestäessä useita vuosia. Pitkän tähtäimen suunnittelun tarkoituksena on varmistaa, että investointipäätökset tuottavat verkkoyhtiölle kestäväää arvoa [2]. On esimerkiksi turha rakentaa kallista sähköasemaa alueelle, jonka kulutuksen arvioidaan kääntyvän laskuun aseman valmistuttua.

Sähkönkäytön alueellinen ja ajallinen jakautuminen on yksi merkittävimmistä sähköverkon rakenteeseen vaikuttavista tekijöistä. Tästä syystä onkin tärkeää saada mahdollisimman tarkkaa tietoa sähkönkäytön nykyisestä alueellisesta ja ajallisesta jakautumisesta sekä ennustaa niitä myös tulevaisuuteen. Aiemmin verkkoyhtiöiden käytössä on ollut lähinnä asiakaskohtaisia vuosienergioita, joten sähkönkäytön ajallista vaihtelua on ollut vaikeaa arvioida. Sähkönkulutuksen mittauksessa on kuitenkin viime vuosina siirrytty etäluettavaan mittaukseen. Tämä mahdollistaa aikaisempaa tarkemman, tunneittaisen asiakaskohtaisen kulutusdatan analysoinnin.

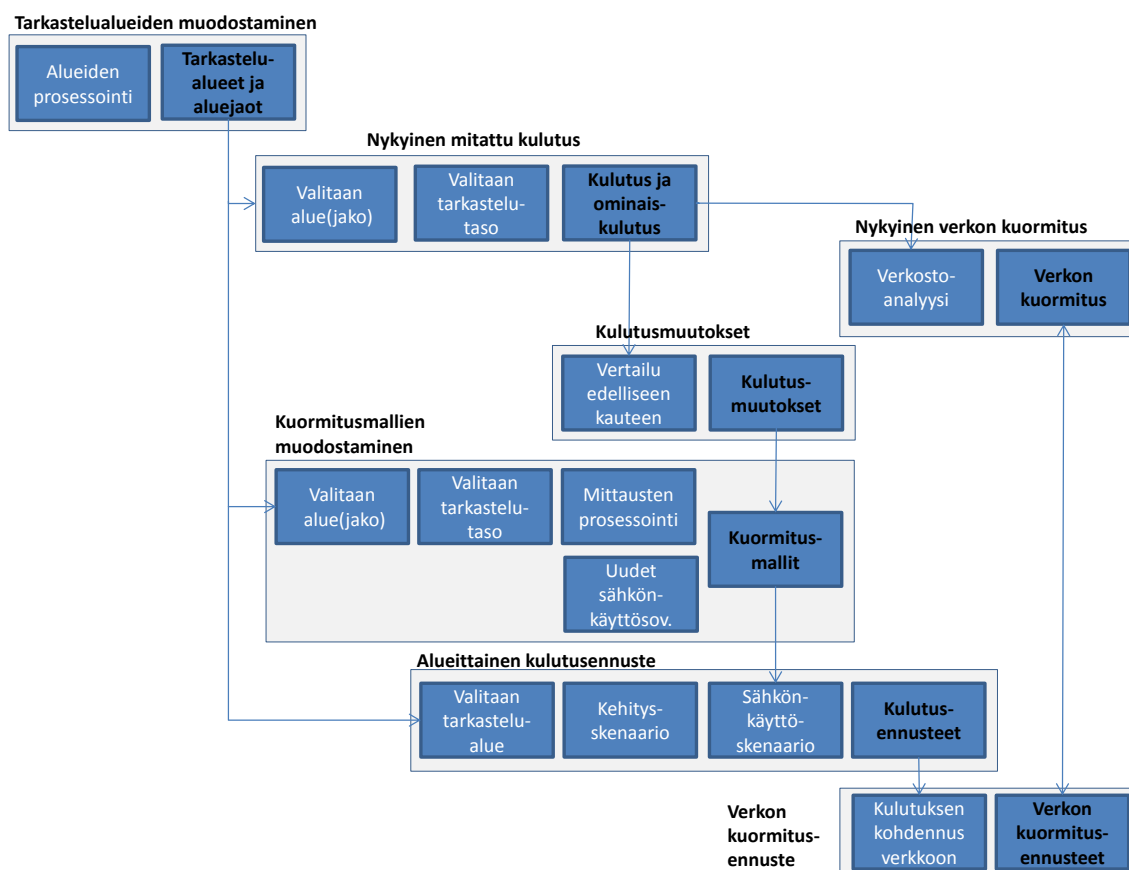
Asiakkaiden sähkönkulutustottumukset kuitenkin muuttuvat aikojen saatossa, joten tulevan kulutuksen ennustaminen tarkasti on hyvin vaikeaa. Ihmisten elintavat muuttuvat, sähkölaitteita tulee lisää ja energiatehokkuus paranee. Sähköverkkoala on suuressa murroksessa: keskitetyn tuotannon rinnalle on yhä kasvavassa määrin tulossa myös hajautettua pientuotantoa ja jakeluverkkoihin tarvitaan yhä enemmän älyä hallinnoimaan tätä muutosta. Lisäksi uusien sähkölaitteiden, kuten sähköautojen ja ilmastointilaitteiden, mahdollinen lisääntyminen voi muuttaa tulevaisuuden kulutusta merkittävästi.

Useista epävarmuustekijöistä johtuen on mahdotonta luoda tarkkaa kulutuksenustetta esimerkiksi 40 vuoden päähän. Verkkoyhtiön on kuitenkin tarpeen analysoida erilaisten muutosten vaikutuksia alueelliseen sähkönkäyttöön. Yhtiö voi luoda useita skenaarioita, joissa arvioidaan sähkönkäyttöä erilaisissa mahdollisissa tulevaisuuksissa. Verkkoyhtiö pystyy näiden analyysien perusteella arvioimaan esimerkiksi kriittisten poliittisten päätösten merkitystä ja tekemään ”mitä jos” -suunnitelman jo ennen päätöksen vaikutusten realisoitumista.

Nykyisin sähkönkäytön alueellista ennustamista tehdään Helen Sähköverkko Oy:ssä (HSV) manuaalisesti taulukkolaskentaohjelmalla. Tämä on hidasta ja sähkönkäytön kehittymisen visualisointi esimerkiksi kartalle on hankalaa ja työlästä.

SGEM-tutkimusohjelmassa on kehitetty demonstraatioversiota uudenlaisesta työkalusta, jolla voidaan tuottaa alueellisia sähkönkäytön kehitysskenaarioita. Työkalun avulla voidaan automatisoida sähkönkäytön ennustamisen vaiheita ja näin helpottaa alueellisten skenaarioiden tekemistä. Tämä mahdollistaa myös usean ”mitä jos” -analyysin tekemisen. Lisäksi työkalu auttaa havainnollistamaan skenaarioita kartalla ja helpottaa näin tulosten analysointia suurjännitteisen jakeluverkon suunnittelun kannalta.

Skenariointityökalun osatehtävät on kuvattu kuvassa 1. HSV on teettänyt ohjelmassa aiemmin skenariointityökaluun liittyen kolme diplomityötä [4] [5] [6]. Näistä Ville Rimalin diplomityössä [4] määritettiin työkalun rakennetta ja tarvittavia ominaisuuksia. Joonas Larinkarin diplomityössä [5] pyrittiin analysoimaan tarkem-



Kuva 1: Skenariointityökalun toiminnallisuuden alustava jako osakokonaisuuksiin ja osatehtäviin [3]

min Helsingin palvelukulutusta. Hannu-Pekka Hellman puolestaan tutki työssään [6] maalämpökohteiden mallintamista ja pyrki luomaan skenaarioita maalämmön yleistymisen vaikutuksesta tulevaisuuden sähkönkulutukseen.

Tämän diplomityön tarkoituksena on rakentaa ensimmäinen versio skenariointityökalusta ja tarkastella yleisten skenariointimetodien soveltuvuutta alueittaiseen sähkönkäytön ennustamiseen. Työ keskittyy siis lähinnä kuvan 1 kohtaan alueittainen kulutusennuste. Työssä arvioidaan skenariointityökalussa käytettäviä metodeja ja esitetään valitut analysointimenetelmät sekä niiden tulokset. Aiempien diplomityöiden tuloksia on käytetty hyödyksi työkalun rakentamisessa.

Työn aluksi esitellään yleistä tietoa Helen Sähköverkko Oy:stä ja SGEM-tutkimusohjelmasta. Luvuissa 3 ja 4 tehdään kirjallisuuskatsaus alueittaisten sähkönkäyttöennusteiden laatimisesta ja käytöstä sähköverkon suunnittelun perustana. Luvussa 5 esitellään tietolähteitä, joista sähkönkäyttöennusteiden lähtötiedot ovat peräisin. Luvuissa 6 ja 7 analysoidaan työkalussa käytettyjä menetelmiä ja esitetään niiden avulla saatuja tuloksia. Luvussa 8 on esitelty varsinaisen työkalun rakenne ja toimintaa. Luvussa 9 on puolestaan esitetty intuitiivisen logiikan metodilla rakennetut skenaariot sähkönkäytön kehittymisestä Helsingissä.

2 Helen Sähköverkko Oy ja CLEEN Oy

Helen Sähköverkko Oy on sähkön jakeluverkkoyhtiö, joka vastaa sähkönjakelusta Helsingin alueella lukuun ottamatta vuonna 2009 Sipoosta Helsinkiin liitettyä Öster-sundomin aluetta. HSV kuuluu Helsingin kaupungin omistamaan Helen-konserniin ja sen toiminta on sähkömarkkinalain mukaisesti erotettu emoyhtiön, Helsingin Energian, sähköntuotanto- ja myyntitoiminnasta.

HSV:n jakelualueella on noin 360 000 asiakasta ja sähkön kokonaiskulutus yhtiön toiminta-alueella oli vuonna 2013 noin 4 500 GWh [7].

CLEEN Oy (Cluster for Energy and Environment) on voittoa tavoittelematon yritys, jonka osakkaana on 28 yritystä ja 17 tutkimusinstituutiota. Yrityksen tarkoituksena on edistää energia- ja ympäristöalalla toimivien yritysten liiketoimintaa palvelevaa tutkimusta ja yritysten, tutkimustahojen sekä julkisten rahoittajien yhteistyötä. CLEEN Oy organisoii näiden tahojen yhteisiä tutkimusprojekteja ja koordinoi niiden rahoitusta. Tutkimusprojektien tavoitteena on suomalaisen tutkimuksen kansainvälisen kilpailukyvyyn kehittyminen. [8]

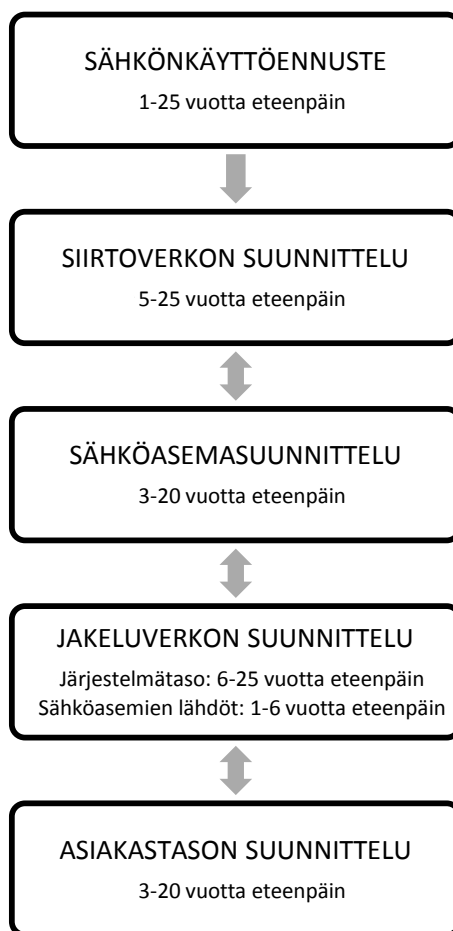
Parhaillaan CLEEN Oy:llä on käynnissä kahdeksan tutkimusohjelmaa [8]:

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

Tämä diplomityö on osa Älykkäät sähköverkot ja energiamarkkinat (SGEM) -tutkimusohjelmaa, jonka tavoitteena on kehittää älykkäitä sähköverkkoratkaisuja suomalaisen tutkimus- ja kehitysinfrastruktuurin avulla. [9]

3 Sähkönkäyttöennusteet jakeluverkon suunnittelussa

Sähköverkon suunnittelussa on katsottava pitkälle tulevaisuuteen. Verkoston komponenttien käyttöiät voivat olla jopa yli 40 vuotta [1] ja investoinnit ovat hyvin suuria, joten on tarkoituksenmukaista hyödyntää laitteiston koko tekninen käyttöikä. Eri-tyisesti kaupunkiolosuhteissa sähkönjakelujärjestelmien sovittaminen muuhun kaupunkirakenteeseen vaatii paljon suunnittelua. Lisäksi jakelujärjestelmien uudistaminen tai laajentaminen suunnittelusta toteutukseen voi kestää useita vuosia.



Kuva 2: Siirto- ja jakeluverkon suunnittelun aikaskaalat [2] [10]

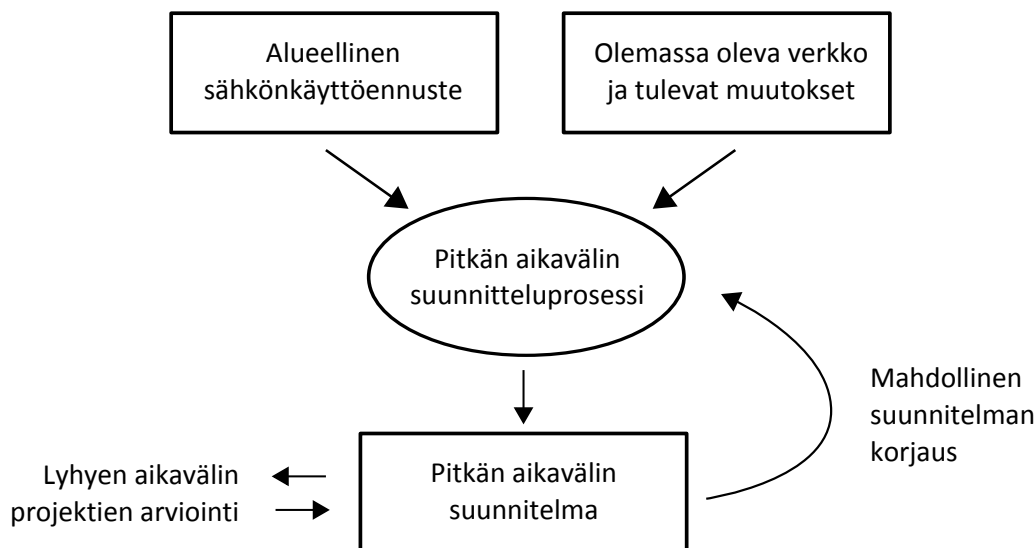
Sähkönkäyttöennusteilla on suuri rooli sähköverkon suunnittelussa. Sähkönjakeluverkko on rakennettava siten, että se pystyy täyttämään asiakkaiden sähkötehon tarpeen. Sähkönkäytön kasvu onkin yksittäisistä syistä vaikuttanut eniten verkoston kehittymiseen. Sähkön tarve on tähän saakka kasvanut lähes jatkuvasti, mutta kaikilla alueilla kasvun ei odoteta enää jatkuvan. [1]

Sähköverkko liiketoiminta on luonnollinen monopoli ja tästä syystä se on Suomessa varsin tarkasti säänneltyä. Verkkoyhtiöiden toimintaa sitoo sähkömarkkinalaki ja

yhtiöiden toimintaa valvoo Energiavirasto. Sähkömarkkinalaissa on määritelty esimerkiksi jakeluverkon toiminnan laatuvaatimukset. Lisäksi lain mukaan sähkön laadun on vastattava Suomessa noudatettavia standardeja. Lain ja standardien määritelmät asettavat siis reunaehdot, jotka sähköverkon tulee täyttää. Lisäksi Energiavirasto julkistaa neljän vuoden välein valvontamallin, jolla määritellään verkko-yhtiöiden kohtuullisen hinnoittelun taso. Tämä puolestaan määrittelee sähköverkon taloudellisen viitekehyksen. [11] [12]

Sähköverkon suunnittelua tehdään useassa eri vaiheessa. Pitkän aikavälin suunnittelussa pyritään määrittämään pääpiirteissään, millaisia toimia verkon kehittämiseksi tarvitaan ja minkälaisia laajasti vaikuttavia investointeja on tarpeen tehdä, jotta verkosto täyttää sille asetetut vaatimukset koko tarkastelujakson ajan. Pitkän aikavälin kehityssuunnitelmaa käytetään pohjana yksityiskohtaista verkkosuunnittelua tehtäessä. Tarvittavien toimenpiteiden arvioimisessa olennaisessa roolissa on alueellisen sähkönkäytön kehittyminen koko tarkastelujakson aikana. Erityisen tärkeää olisi pystyä arvioimaan sähkönkäyttöä tarkastelujakson lopussa, sillä sen avulla pystytään määrittelemään tarvittava, ”lopullinen” verkko. [1] [2]

Yleissuunnittelun tavoitteena on ylläpitää ja kehittää sähköverkkoa, jotta se pystyy vastaamaan tulevaisuuden siirtotarpeeseen tarpeeksi luotettavasti. Yleissuunnitteluun kuuluu esimerkiksi komponenttien mitoituksen, sijainnin sekä käyttönottoajankohdan määrittäminen. Lisäksi tarkastellaan investointien taloudellisuutta, mikä asettaa omat haasteensa verkon luotettavuudelle. Yleissuunnittelu onkin optimointitehtävä, jossa verkon on täytettävä sähkömarkkinalain luotettavuusvaatimukset, mutta kustannukset on pidettävä mahdollisimman pieninä. Nykyisin luotettavuus sekä kustannustehokkuus korostuvat entisestään, sillä Energiaviraston uusimassa valvontamallissa on kannusteita toiminnan tehostamiselle sekä sanktioita asiakaskeskeytyksistä [13]. Sähkönkäyttöennusteiden tärkein tehtävä yleissuunnitteluvaiheessa on määrittää, milloin kulutus ylittää verkon siirtokyvyn.



Kuva 3: Pitkän aikavälin suunnittelun prosessi [2]

Kun yleissuunnittelun tuloksena on todettu verkon siirtokyvyn ylittyvän, käynnistetään toteutussuunnittelu. Se keskittyy projekteihin ja suunnittelun tarkoituksena on johtaa toimenpiteisiin. Toteutussuunnittelu tarkastelee lähinnä projektien läpimenoaikoja, eli milloin projekti on aloitettava, jotta vahvistukset ehditään tehdä ajoissa. Tarvittavien verkkovahvistuksien toteutussuunnittelussa on kuitenkin otettava huomioon tarkasteltavan alueen lisäksi pitkän aikavälin tavoiteverkko. Suunnitelman on oltava järkevä verkon kokonaiskuvan kannalta ja vietävä verkkoa kohti pitkän aikavälin tavoitetta. Esimerkiksi uutta sähköasemaa ei välttämättä kannata rakentaa alueelle, jonka kulutuksen odotetaan kääntyvän myöhemmin laskuun. Toisaalta sähköaseman optimaalinen sijainti saattaa muutaman kymmenen vuoden päästä olla eri paikassa, kuin tällä hetkellä. [2]

Tässä diplomityössä tuotetaan alueellisia sähkökäyttöennusteita pitkän aikavälin suunnittelun tarpeisiin. Ennusteissa keskitytään siis enimmäkseen määrittämään, kuinka paljon sähkökäyttö kasvaa ja missä. Aikaresoluutio ei ole ennusteissa suuressa roolissa, joten tässä diplomityössä tehdään ennusteet vuosille 2020, 2030 ja 2040.

4 Sähkönkäytön ennustaminen

Sähkön kulutus muuttuu kaupungin eri osissa eri tavalla. Alun perin rakentamattomien alueiden sähkökäyttö saattaa kasvaa hyvin voimakkaasti niiden alkaessa rakentua, kun taas jo valmiiksi tiiviisti rakennetuilla alueilla sähkökäyttö voi jopa vähentyä. Erityisesti sähköasemien ja niiden välisten yhteyksien suunnittelussa on tärkeää ottaa huomioon tulevaisuuden sähkökäytön muutokset, jotta suurilta, turhilta investoinneilta vältyttäisiin.

Willisin mukaan [2] sähköenergian kulutuksen ja huipputehon muutokset tietyllä alueella ovat seurausta kahden tekijän muutoksista:

1. Alueen asiakasvolyymi muuttuu. Tätä voidaan kuvata asiakasmääränä tai esimerkiksi kerrosneliömetrimääränä.
2. Asiakkaiden sähkökäyttö muuttuu. Tätä voidaan kuvata esimerkiksi ominaiskulutuksella asiakasta tai kerrosneliometriä kohden. Muutos voi johtua esimerkiksi vanhojen laitteiden korvaamisesta uusilla ja tehokkaammilla, täysin uusien laitteiden käyttöönotosta tai muutoksista kulutustottumuksissa.

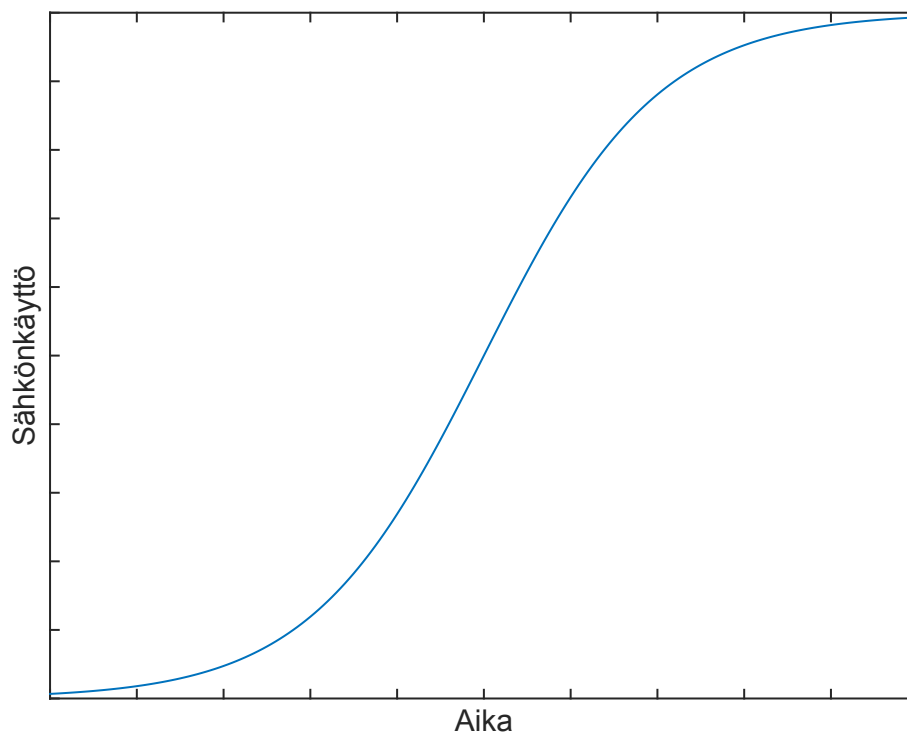
Näiden tekijöiden muutoksille voi olla useita syitä. Asiakkaiden määrä voi esimerkiksi kasvaa uudisrakentamisen myötä. Suurempi määrä asiakkaita kuluttaa enemmän energiaa ja myös tarvittava huipputeho kasvaa. Sähkökäytön muutokset taas voivat johtua esimerkiksi lämmitystavan muutoksesta. Jos suuri määrä asiakkaita vaihtaa varaavasta sähkölämmityksestä energiatehokkaampaan maalämpöön, asiakkaiden määrä ei muutu, mutta he kuluttavat keskimäärin vähemmän sähköä. Lisäksi heidän kulutuksessaan ei ole enää varaavalle sähkölämmitykselle tyypillistä piikkiä edullisen yö sähköajan alkaessa. Tämä siis paitsi vähentää asiakkaiden kuluttamaa energiamäärää, myös vaikuttaa verkosta otetun tehon ajalliseen vaihteluun.

Sähkönkulutuksen kehittyminen näyttää hyvin erilaiselta riippuen siitä, minkä kokoista aluetta tarkastellaan. Jos esimerkiksi seurataan koko Helsingin sähkön kulutuksen kehittymistä, se muuttuu hyvin hitaasti. Jos taas tarkastellaan vain yhtä tonttia, joka on aluksi tyhjä ja jolle rakennetaan talo, sen kulutus muuttuu rakennusvuoden jälkeen hyvin radikaalisti.

Jaettaessa kaupunki hyvin useaan pienalueeseen, onkin ominaista, että niiden sähkökäytön kehitys noudattaa karkeasti niin sanottua S-käyrää [2] [14], jonka muoto on esitetty kuvassa 4. Kaikkien alueiden sähkökäytön kehitys on uniikki, mutta keskimäärin niiden kehitys noudattaa seuraavaa kaavaa: Aluksi alueella ei ole juuri lainkaan asiakkaita ja sähkökäyttö kasvaa hyvin hitaasti. Tämän jälkeen alueelle aletaan rakentaa ja kulutus kasvaa hyvin voimakkaasti. Lopulta alue on rakennettu täyteen, joten sähkökäytön kasvu tasaantuu. Pientä kasvua voi tosin vielä tapahtua esimerkiksi täydennysrakentamisen takia.

4.1 Perinteiset ennustamismenetelmät

Sähkökäytön ennustamiseen on kehitelty hyvin monenlaisia menetelmiä. Suurin osa niistä jakautuu kahteen pääkategoriaan: trenditarkasteluun tai simulointimenetelmiin. Trenditarkastelussa tutkitaan vain historiadataa ja yritetään sen perusteella



Kuva 4: Pienalueen sähkökäytön kehittyminen noudattaa karkeasti niin sanottua S-käyrää [2]

ekstrapoloida sähkökäytön kehitystä. Simulointimenetelmässä puolestaan yritetään mallintaa syitä, joiden takia sähkökäyttö muuttuu. [2]

Trenditarkastelumenetelmät perustuvat historiatiedoista analysoitujen trendien jatkamiseen tulevaisuuteen. Tämä tehdään usein monimuuttujaregressioanalyysillä, jonka avulla polynomifunktio sovitetaan olemassa olevaan huippukulutusdataan. Tällainen tarkastelu ei ota kantaa aiemmin mainittuihin kulutuksen muutoksen syihin. Trenditarkastelu toimii hyvin suurilla alueilla, sillä niissä muutokset tapahtuvat hitaasti. Siirryttäessä pienempiin alueisiin, kulutuksen muutokset voivat olla äkillisiä ja poiketa hyvin voimakkaasti historiadatasta. Lisäksi pienillä alueilla alun perin tyhjää maapinta-alaa voi olla paljon ja sille ei voida määrittää trendiä, sillä historia-dataa ei ole [15]. Tästä syystä trendimenetelmät toimivat parhaiten suurilla alueilla, joilta löytyy runsaasti kulutuksen historiadataa. [2]

Simulointimenetelmät puolestaan yrittävät mallintaa prosessia, joka aiheuttaa sähkökäytön muuttumisen ajallisesti ja paikallisesti. Ne siis yrittävät mallintaa aiemmin mainittua kahta syytä, joista kaikki kulutuksen muutokset johtuvat: asiakkaiden määrän muutoksia sekä asiakkaiden kulutuksen muutoksia. Toisin kuin trenditarkastelumenetelmät, simulointimenetelmät toimivat paremmin tarkalla alueellisella resoluutiolla kuin epätarkalla resoluutiolla, sillä pienen alueen kehitystä on helpompi simuloida. Tästä syystä simulointi soveltuukin erittäin hyvin pitkän aikavälin alueellisen sähkökäytön ennustamiseen sekä skenariointiin. [2]

4.2 Epävarmuuden hallinta skenaarioiden avulla

Sähkönkäytön kehittymiseen vaikuttaa hyvin monta tekijää. Pitkän aikavälin ennusteissa on runsaasti epävarmuuksia, joita ei välttämättä pystytä lainkaan eliminomaan. Ne on kuitenkin hyvä tunnistaa. Osa tekijöistä voi vaikuttaa hyvinkin radikaalisti tulevaisuuden sähkönkäytön alueelliseen kehittymiseen. Tällainen tekijä voi olla esimerkiksi suuren tehtaan rakentaminen. Rakentamisen toteutuessa tarvitaan paljon investointeja verkkoon, mutta investointeja ei ole järkevää tehdä turhaan, mikäli tehdas ei toteudukaan.

H. Lee Willis esittää kirjassaan [2] ajatuksen, että suunnittelijan on parasta vain hyväksyä, että kaikkia tapahtumia ei voida ennustaa. Järkevämpää on tehdä "mitä jos" -analyysi ja tutkia erikseen eri vaihtoehtojen vaikutuksia. Willis ehdottaa, että jokaiselle mahdolliselle vaihtoehdolle tehdään siis oma skenaario, jonka vaikutukset analysoidaan erikseen. Näin suunnittelija tietää jokaisen vaihtoehdon toteutumisen vaikutukset ja osaa varautua näihin mahdollisimman hyvin.

Willisin menetelmä toimii hyvin tapauksille, joissa yksi asia vaikuttaa erittäin voimakkaasti alueen kehittymiseen. Usein nyky maailmassa tilanne ei kuitenkaan ole näin yksinkertainen, vaan useat asiat voivat muuttaa tulevaisuuden sähkönkäytön aivan erilaiseksi. Suurin virhe olisi kuitenkin tehdä keskiarvoon tai todennäköisyyteen perustuvia suunnitelmia, sillä ne ovat huonoja kaikissa mahdollisissa tilanteissa [2]. Tehtaan rakentamisesimerkissä puoliksi varautuminen tehtaan tuloon aiheuttaa turhia kustannuksia, mikäli tehdasta ei rakenneta, ja verkkoa joudutaan joka tapauksessa vahvistamaan, mikäli tehdas rakennetaan.

Useisiin epävarmuustekijöihin voitaisiin mahdollisesti varautua skenarionnin (scenario planning) avulla. Toisin kuin perinteisessä ennustamisessa, skenarionnissa ei yritetä muodostaa yhtä mahdollisimman todennäköistä ennustetta tulevaisuudesta ja määrittää sille virhemarginaaleja. Skenarionnissa hyväksytään, että jotkut asiat ovat mahdottomia ennustaa, joten on muodostettava useita vaihtoehtoisia ennusteita, joista mikä vain voi toteutua. Tällöin voidaan esimerkiksi tarkastella jonkin strategisen päätöksen vaikutuksia useassa eri tilanteessa ja valita sellainen toimintatapa, joka toimii mahdollisimman hyvin kaikissa. Toisaalta jos tällaista tapaa ei löydy, saadaan ainakin selville, millaisissa tilanteissa valittu tapa ei toimi. Lisäksi voidaan määrittää muuttujat, joita seuraamalla tiedetään, mitä skenaariota kohti ollaan menossa. Tämä voi auttaa reagoimaan nopeammin toimintaympäristössä tapahtuviin muutoksiin.

Skenarionnilla on pitkä historia, ja se sai alkunsa armeijoiden sotasimulaatioista. Toisen maailmansodan aikana ja jälkeen skenariontimenetelmiä kehitti amerikkalainen RAND-yhtiö ja siellä erityisesti tulevaisuuden tutkija Herman Kahn. Myöhemmin Kahn perusti oman ajatushautomonsa, Hudson Instituutin, joka jatkoi menetelmien hiomista. 1970- ja 1980-luvuilla Royal Dutch Shellin palveluksessa toiminut Pierre Wack sovelsi Kahnin ajatuksia menestyksekkäästi yritysstrategioiden luomisessa ja teki skenarionnin tunnetuksi useilla merkittävillä julkaisuillaan. Wackin dokumentoima menetelmä toimii yhä pohjana useissa skenariontimenetelmissä, mutta sen rinnalle on kehitetty myös useita uudenlaisia menetelmiä. [16]

Skenarionointi on melko laajasti käytössä yritysten strategisessa suunnittelussa.

Erityisesti Shell on tunnettu skenaarioiden onnistuneesta käytöstä. Van der Heijdenin [16] mukaan Shellin johtajat olivat varautuneet skenaarioiden avulla etukäteen 1970-luvun murrokseen öljyalalla ja osasivat näin reagoida niihin erittäin nopeasti ja tehokkaasti. Tämä on Van der Heijdenin mukaan edesauttanut Shelliä kasvamaan maailman suurimmaksi öljy-yhtiöksi.

Termi “skenaario” on varsin epämääräinen, mutta tulevaisuuden tutkimuksessa se on saanut tietynlaisen merkityksen. Esimerkiksi John Ratcliffe esittelee artikkelissaan [17] suosituimpia määritelmiä skenaarioille:

- “Skenaariönäkökulmassa kehitetään tulevaisuuden tilanteita ja kuvaillaan polku mistä tahansa annetusta nykyisestä tilanteesta näihin tulevaisuuden tilanteisiin.”
- “Skenaarioiden laatiminen on instrumentti, joka auttaa päätöksentekijää tuottamalla kontekstin suunnittelulle, alentamalla epävarmuuden tasoa ja parantamalla tietotasoa nykyisten toimien aiheuttamista seurauksista.”
- “Skenaariot ovat synteesi erilaisista poluista, jotka johtavat mahdolliseen tulevaisuuteen.”
- “Skenaariot ovat kuvailevia kertomuksia jonkin tietyn tulevaisuuden osan erilaisista mahdollisista projektioista.”
- “Skenaariot ovat työkalu, joka auttaa ihmistä järjestelemään käsityksiään vaihtoehtoisista tulevaisuuden ympäristöistä, joissa hänen tekemänsä päätökset vaikuttavat.”
- “Skenaariot ovat keino tutkia tärkeitä päätöksiä.”

Lisäksi Ratcliffe painottaa, että skenaariot eivät ole ennustuksia tai ennusteita. Ne ovat ainoastaan kuvauksia mahdollisesta tulevaisuudesta. [17]

Alan kirjallisuus keskittyy lähinnä kolmeen metodiin skenaarioiden luomiseksi: intuitiiviseen logiikkaan (Intuitive Logics), trendivaikutusten analyysiin (Trend-impact Analysis) ja ristivaikutusten analyysiin (Cross-impact Analysis) [17] [18] [19]. Lisäksi Bradfield esittää kirjallisuuskatsauksessaan [20] ranskalaisen koulukunnan *La Prospective* -menetelmän, jonka on kehittänyt Michel Godet. Tämä menetelmä jää kuitenkin muussa kirjallisuudessa vähälle huomiolle ja nojaa vahvasti siihen räätälöityjen tietokoneohjelmien käyttöön. Näistä syistä en käsittele menetelmää tämän diplomityön puitteissa.

Huss ja Honton ovat artikkelissaan [18] antaneet suuntaviivoja sopivimman skenariointimenetelmän valintaan. Jokaisella kolmella menetelmällä on omat vahvuudet ja heikkoudet ja ne sopivat parhaiten hieman erilaisiin sovellutuksiin.

Intuitiivisen logiikan menetelmä perustuu oletukselle, että yrityksen päätökset perustuvat monimutkaisille, eri tekijöiden välisille suhteille. Menetelmä on hyvin joustava ja sitä voidaan käyttää lähes minkälaisiin ongelmiin vain. Metodien avulla saadaan loogisia ja sisäisesti koherentteja skenaarioita. Intuitiivisen logiikan metodi nojaa vahvasti skenariointitiimin näkemykseen ja kommunikointikykyyn. Hussin ja

Hontonin mukaan menetelmä on melko kvalitatiivinen, joten se ei sovellu tieteelliseen ympäristöön. [18]

Trendivaikutusten analyysin lähtökohtana on selitettävälle muuttujalle tehty riippumaton ennuste, jota muokataan määritettyjen vaikuttavien tapahtumien perusteella. Menetelmä yhdistää onnistuneesti perinteisiä aikasarjamenetelmiä kvalitatiivisiin tekijöihin. Lisäksi se pakottaa käyttäjät tunnistamaan tärkeimmät selitettävään muuttujaan vaikuttavat tapahtumat sekä niiden tärkeyden ja todennäköisyyden. Trendivaikutusten analyysi ei kuitenkaan huomioi tapahtumien vaikutusta toisiinsa. Lisäksi metodi on suunniteltu lähinnä yhden päätöksen tai muuttujan ennustamiseen, joten se soveltuu huonosti usean alueen sähkönkäytön skenariointiin. [18]

Ristivaikutusten analyysimenetelmä muistuttaa trendivaikutusten analyysiä, mutta ottaa myös huomioon tapahtumien vaikutukset toisiinsa. Kullekin vaikuttavalle tapahtumalle määritellään alustavat todennäköisyydet ja lisäksi tapahtumapareille määritellään ehdolliset todennäköisyydet siinä tilanteessa, että toinen tapahtumista on jo tapahtunut. Todennäköisyyksien määrittämisen jälkeen vaihtoehtoisia tulevaisuuksia simuloidaan esimerkiksi Monte Carlo -menetelmällä. Ristivaikutusten analyysillä saadaan määriteltyä erinomaiset todennäköisyysjakaumat selitettävän muuttujan kehittymisestä. Ristivaikutusten analysointi on kuitenkin hyvin työlästä eikä ehdollisten todennäköisyyksien ole todistettu olevan alustavia todennäköisyyksiä tarkempia. Lisäksi menetelmä vaatii koko systeemin simulointimallin kehittämisen, mikä todettiin liian työlääksi tämän diplomityön puitteissa. [21] [18]

Skenariointitavoista valittiin käytettäväksi intuitiivisen logiikan menetelmä, sillä se on joustava ja on toteutettavissa tämän diplomityön puitteissa. Kvalitatiivisuuden ei katsottu olevan suuri ongelma, sillä skenaarioiden laatiminen itsessään auttaa tulevaisuuteen vaikuttavien tekijöiden hahmottamisessa. Lisäksi tehtyjä kvalitatiivisia skenaarioita voidaan hyödyntää laatimalla esimerkkialueelle hahmotelma eri skenaarioiden vaikutuksista sähkönkäyttöön.

4.3 Intuitiivinen logiikka skenariointimetodina

Intuitiivinen logiikka -metodi on ollut käytössä Shellillä ja Global Business Networkilla ja sen on kehittänyt Pierre Wack. Lisäksi menetelmää ovat tehneet tunnetuksi Peter Schwartz vuonna 1991 ilmestyneessä kirjassaan *The Art of the Long View* [22] sekä Kees van der Heijden vuonna 1996 ilmestyneessä kirjassaan *Scenarios: The Art of Strategic Conversation* [16]. Peter Bishopin mukaan intuitiivinen logiikka on hallitseva menetelmä skenariointialalla ja lähes kaikki alan konsultit käyttävät juuri tätä menetelmää lähtökohtana skenarioinnissaan. [23]

Keskeistä intuitiivisessa logiikassa on ajatus, että yrityksen päätökset perustuvat ekonomisten, poliittisten, teknologisten, sosiaalisten, resurssi- ja ympäristötekijöiden monimutkaisille vuorovaikutussuhteille. Useimpiin näistä yritys ei voi itse vaikuttaa, mutta suhteita täytyy ymmärtää, jotta voidaan parantaa strategista päätöksentekoa. Osa tekijöistä voidaan mitata tai ennustaa tarkasti, kuten esimerkiksi väestörakenne. Toisaalta joitakin tekijöistä on vaikeaa määrittellä tai ennustaa, kuten esimerkiksi asiakkaiden asenteet ja poliittiset päätökset. Intuitiivisen logiikan metodi tarjoaa

keinon tarkastella yrityksen päätösten toimintaa ympäristöissä, jotka syntyvät edellä mainittujen tekijöiden erilaisista mahdollisista kombinaatioista. [18]

Metodin rakenne vaihtelee hieman kirjoittajasta riippuen, mutta Ratcliffe [17] on koonnut useissa lähteissä toistuvat kohdat menetelmän rungoksi:

Kohta 1 - Tehtävän tunnistaminen ja analysointi

Aluksi määritellään keskeinen ongelma tai tietty päätös, joka täytyy tehdä. Usein tässä kohdassa määritellään myös analyysin laajuus, esimerkiksi tarkasteltava ajanjakso. Lisäksi analysoidaan organisaation nykyinen tilanne, tavoitteet, vahvuudet ja heikkoudet. [17]

Kohta 2 - Tärkeimmät päätöstekijät

Seuraavaksi määritellään ongelman tai päätöksen onnistumiseen vaikuttavat tekijät. Näiden on tarkoitus olla ulkoisia tekijöitä, joihin yritys itse ei voi vaikuttaa. Tällaisia voivat olla esimerkiksi markkinoiden koko, pitkän aikavälin talouskehitys tai ennakoitua poliittiset päätökset. [17]

Kohta 3 - Makroympäristön voimat

Kolmas tehtävä on löytää ulkoiset makroympäristön muutosvoimat, jotka vaikuttavat kohdassa 2 määriteltyihin päätöstekijöihin. Muutosvoimat ovat tyypillisesti sosiaalisia, ekonomisia, poliittisia tai teknologisia. Näitä voivat olla esimerkiksi väestörakenteen, luonnonvarojen tai talousjärjestelmän muutokset. [18]

Kohta 4 - Tekijöiden ja voimien järjestäminen

Seuraava askel on määriteltyjen päätöstekijöiden ja ulkoisten voimien järjestäminen kahden kriteerin perusteella:

- (i) tekijän merkittävyys ongelman tai kysymyksen ratkaisun onnistumiseen.
- (ii) tekijän epävarmuus. [17]

Tarkoituksena on löytää kolme tai neljä tekijää, jotka ovat kaikista merkittävimpiä **ja** epävarmimpia. Systemaattisuus on tärkeää, joten Ratcliffe esittää käytettäväksi yksinkertaista vaikutus/epävarmuus -matriisia, jossa molemmille annetaan arvosana esimerkiksi asteikolla korkea - keskitasoinen - matala. Matriisista voidaan poimia korkean vaikutuksen ja varmuuden tekijät, joihin suunnittelun on pakko varautua. Lisäksi on hyvä kiinnittää huomiota korkean vaikutuksen ja matalan varmuuden tekijöihin, jotka voivat aiheuttaa huomattavan muutoksen tulevaisuudessa. Näihin pitkän tähtäimen suunnittelun tulisi myös varautua. [17]

Kohta 5 - Vaihtoehtoiset projektiot

Viidennessä kohdassa määritellään aiemmin saadun järjestyksen perusteella skenaarioiden logiikat, ja tämä kohta onkin koko prosessin ydin. Nämä logiikat ovat teemoja, periaatteita tai oletuksia, jotka toimivat kunkin skenaarion perusteena. Ne eivät ole pelkkiä matala/korkea tai optimistinen/pessimistinen -skenaarioita, vaan kokonaan erilaisia tulevaisuuksia, jotta ne kattavat useimmat epävarmuustekijät. Logiikoiden on kuitenkin oltava uskottavia, sisäisesti koherentteja sekä johdonmukaisia. Kaikkia epävarmuustekijöitä on mahdotonta ottaa huomioon, ja sopiva määrä skenaarioille onkin van der Heijdenin mukaan kahdesta neljään [16]. Tällöin lisäksi kuulijakin pystyy muistamaan ja erottamaan kaikki skenaariot toisistaan. [17] [18]

Tässä kohdassa menetelmän nimessäkin mainittu intuitio toimii suuressa roolissa. Juuri tämä kvalitatiivinen tarkastelu erottaa intuitiivisen logiikan muista, kvantitatiivisista skenariointimenetelmistä [18].

Kohta 6 - Skenaarioiden yksityiskohdat

Seuraavaksi edellisessä kohdassa valittujen skenaarioiden pääteemojen ympärille rakennetaan uskottava tarina. Tässä vaiheessa on hyvä palata päätöstekijöiden ja ulkoisten voimien listaan. Tärkeimpien epävarmuustekijöiden toteutumisesta on hyvä arvioida kussakin skenaariossa ja luoda yhtenäinen ja uskottava mahdollinen tulevaisuus. Tässä kohdassa analyysoija todennäköisesti keksii uusia yhteyksiä tekijöiden välillä ja tämä on myös skenarioinnin yksi tarkoitus. [17]

Ratcliffe [17] listaa skenaarioiden tärkeimmiksi tekijöiksi

- kuvaavan otsikon, joka jää mieleen ja kuvaa skenaarion ytimen.
- mukaansatempaavan tarinan, joka on dramaattinen, vaikuttava, johdonmukainen ja uskottava.
- vertailevan taulukon, josta käy ilmi tärkeimpien tekijöiden muutokset kussakin skenaariossa.

Kohta 7 - Tulkinta

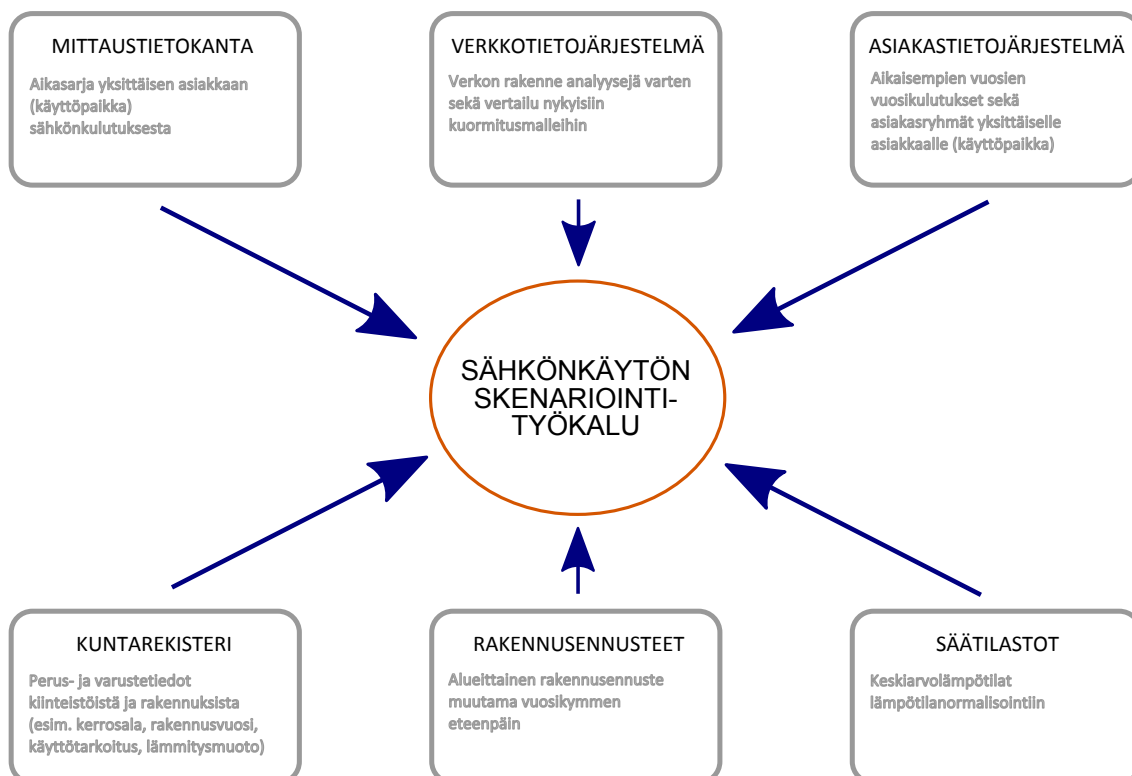
Viimeiseksi analysoidaan alkuperäisen ongelman ratkaisua tai päätöstä kunkin skenaarion valossa. Kuinka hyvin päätös sopii mihinkin skenaarioon? Tuleeko ilmi mahdollisia heikkouksia? Onko päätös tai strategia tarpeeksi robusti? Toimiiko se vain yhdessä skenaariossa, mikä on suuri riski? Kuinka strategiasta saadaan kehitettyä sellainen, että se toimii useammassa tilanteessa? Esimerkiksi näillä kysymyksillä skenaarioista päästään konkreettiseen strategiaan. [17]

Skenaarioista on myös mahdollista saada irti keskeisiä indikaattoreita alan liikkeitä. Aiemmissa kohdissa on analysoitu tärkeimpiä alaan vaikuttavia voimia ja niiden suhteita toisiinsa. Skenaarioihin rakennetuista johdonmukaisista asioiden kausaalisuhteista voidaan toiseen suuntaan päätellä tärkeimpiä merkkejä, joista voidaan päätellä, minkä skenaarion suuntaan maailma on kehittymässä. Näitä merkkejä

tulisi seurata aktiivisesti ja strategiaa kehittää niiden näyttämän suunnan mukaan.
[17]

5 Tietolähteet sähkönkäytön analyysiin

Nykyaikaisten, kattavien sähkökäyttöennusteiden tekemiseen tarvitaan useita tietolähteitä. Aikaisemmin ennusteiden lähtötietoina on käytetty lähinnä asiakkaiden vuosienenergiaa ja asiakasryhmäkohtaisia tyyppikäyriä. Nykyisin voidaan hyödyntää asiakkaiden etäluettavien sähkömittareiden tuottamaa tunneittaista dataa. Ville Rimali on listannut diplomityössään [4] realistisen kuormitusmallin tekemiseen tarvittaviksi tietolähteiksi mittaustietokannan, verkkotietojärjestelmän, asiakastietojärjestelmän, kuntarekisterin, tulevaisuuden maankäyttösuunnitelman sekä säätilastot (Kuva 5).



Kuva 5: Nykyaikaisen sähkönkäytön skenariointityökalun tietolähteet [4]

5.1 Etäluettavien sähkömittareiden mittausaineisto

Helen Sähköverkko Oy käynnisti muiden Suomen verkkoyhtiöiden tavoin projektin sähkömittareiden vaihtamiseksi etäluettaviin mittareihin vuonna 2009. Tämä projekti liittyy Suomen valtioneuvoston vuoden 2009 helmikuussa hyväksymään asetukseen, jossa määrättiin verkkoyhtiöille tuntimittausvelvoite. Helen Sähköverkko Oy:n mittarinvaihtoprojekti on saatu päätökseen ja noin 360 000 asiakkaasta 99,6 prosentilla oli käytössä etäluenta vuoden 2013 lopussa [7].

Etäluettavien sähkömittareiden tuottama data mahdollistaa aikaisempaa tarkemman ja reaaliaikaisemman kulutusdatan käytön sähkökäyttöennusteiden poh-

jana. Ennen etäluettavia mittareita asiakkaalta saatiin noin yksi kulutuslukema vuodessa. Nykyään kaikkien etäluettavien mittareiden mittaustiedot siirretään mobiiliverkon välityksellä kerran päivässä Generis-mittaustietokantaan. Tämän ansioista kaikilta asiakkailta saadaan noin päivän viiveellä tunneittaiset lukemat, jotka kuvaavat asiakkaan yksittäisen tunnin aikana kuluttamaa sähköenergiaa, eli toisin sanoen asiakkaan tunneittaista keskitehoa.

Ennen etäluettavia mittareita sähkökäyttöennusteet ovat perustuneet asiakaskohtaisiin vuosienergioihin, joista jakeluverkon mitoituksen kannalta oleellinen huipputeho on arvioitu matemaattisten menetelmien tai valmiiden, asiakasryhmäkohtaisten kuormitusmallien avulla. Suomessa on yleisesti käytetty Sähkölaitosyhdistyksen (nykyisin Sener) vuonna 1992 julkaiseman sähkön käytön kuormitustutkimuksen tuloksena saatuja, niin sanottuja SLY-käyriä [1].

SLY-käyriä on päivitetty hyvin harvoin niiden muodostamisen jälkeen. Asiakkaiden sähkökulutustottumukset voivat kuitenkin muuttua ajan saatossa. Lisäksi esimerkiksi Helsingin asiakkailta voi olla tiettyjä erityispiirteitä verrattuna muun Suomen asiakkaisiin. Etäluettavien mittareiden tuottama mittaustietosisäe on hyvin reaaliaikaista ja tarkalleen oikealta alueelta, joten tämän aineiston käyttö mahdollistaa aikaisempaa tarkempien kuormitusmallien tekemisen.

Verkkoyhtiöt voivat etäluettavien sähkömittareiden mittaustietosisäen avulla analysoida yksittäisen asiakkaan tuntisarjoja. Lisäksi dataa voidaan lajitella ja suodattaa esimerkiksi

- alueiden perusteella:
 - maantieteelliset alueet, kuten korttelit, osa-alueet, kaupunginosat tai kaupungit
 - sähköverkon osat, kuten liittymät, jakokaapit, pienjännitelähdöt, keski-jännitelähdöt, muuntajat, sähköasemat
- ajanjakson perusteella:
 - vuosianalyysit päiväkeskiarvoilla
 - viikko- tai kuukausianalyysit tuntikeskiarvoilla
 - vertailevat analyysit, kuten talvi / kesä, arkipäivä / pyhäpäivä, huippukulutus / minimikulutus
- asiakastyypin perusteella:
 - sähkölämmitettävät asunnot
 - palvelut
 - teollisuus. [4]

5.2 Kuntarekisteri

Suomen kunnilla on käytössään kuntarekisteri, joka sisältää tietoja valtion perusrekistereistä, kuten väestö- ja kiinteistötietojärjestelmistä, sekä muita kunnan toiminnassaan tarvitsemia tietoja. Helsingissä on käytössä Facta-kuntarekisteri. Tämä on jaettu useaan osaan, joita ovat muun muassa kiinteistö-, suunnitelma-, väestö-, tietopalvelu- ja rakennusvalvontaosat. Kuntarekisterin osat ovat yhteydessä toisiinsa sekä valtion rekistereihin ja Helsingin kaupunki ylläpitääkin valtion kiinteistötietojärjestelmää asemakaavoitetuilla alueillaan. [24]

Kuntarekisterien tietoja voidaan käyttää tarkentamaan sähkökäyttöennusteita. Erityisen hyödyllisiä ennusteita laatiessa ovat tiedot kiinteistöistä sekä rakennuksista. Ongelmana näissä tiedoissa on niiden yhdistäminen sähkön kulutustietoihin, sillä asiakastietojärjestelmän ja kuntarekisterin tiedoissa ei ole yksiselitteisiä yhdistäviä tekijöitä.

Kiinteistöillä tarkoitetaan kiinteistörekisterissä itsenäisiä maanomistusyksiköitä. Jokaiselle näistä on määritetty neliosainen kiinteistötunnus. Kiinteistöjä ovat esimerkiksi tilat, tontit, yleiset alueet ja metsämaat [25].

Kiinteistörekisteri on yksi valtion perusrekistereistä ja se sisältää kaikista Suomen rekisteröidyistä kiinteistöistä perustiedot, kuten sijaintitiedot, kiinteistötunnuksen, pinta-alan ja kiinteistöllä sijaitsevat rakennukset. Rekisteri on julkinen ja se kattaa koko Suomen alueen. Kiinteistörekisteriä ylläpitää Maanmittauslaitos sekä suurimpien kuntien asemakaava-alueilla kunnat itse. Kiinteistörekisteri muodostaa yhdessä lainhuuto- ja kiinnitysrekisterin kanssa valtakunnallisen kiinteistötietojärjestelmän (KTJ). [26]

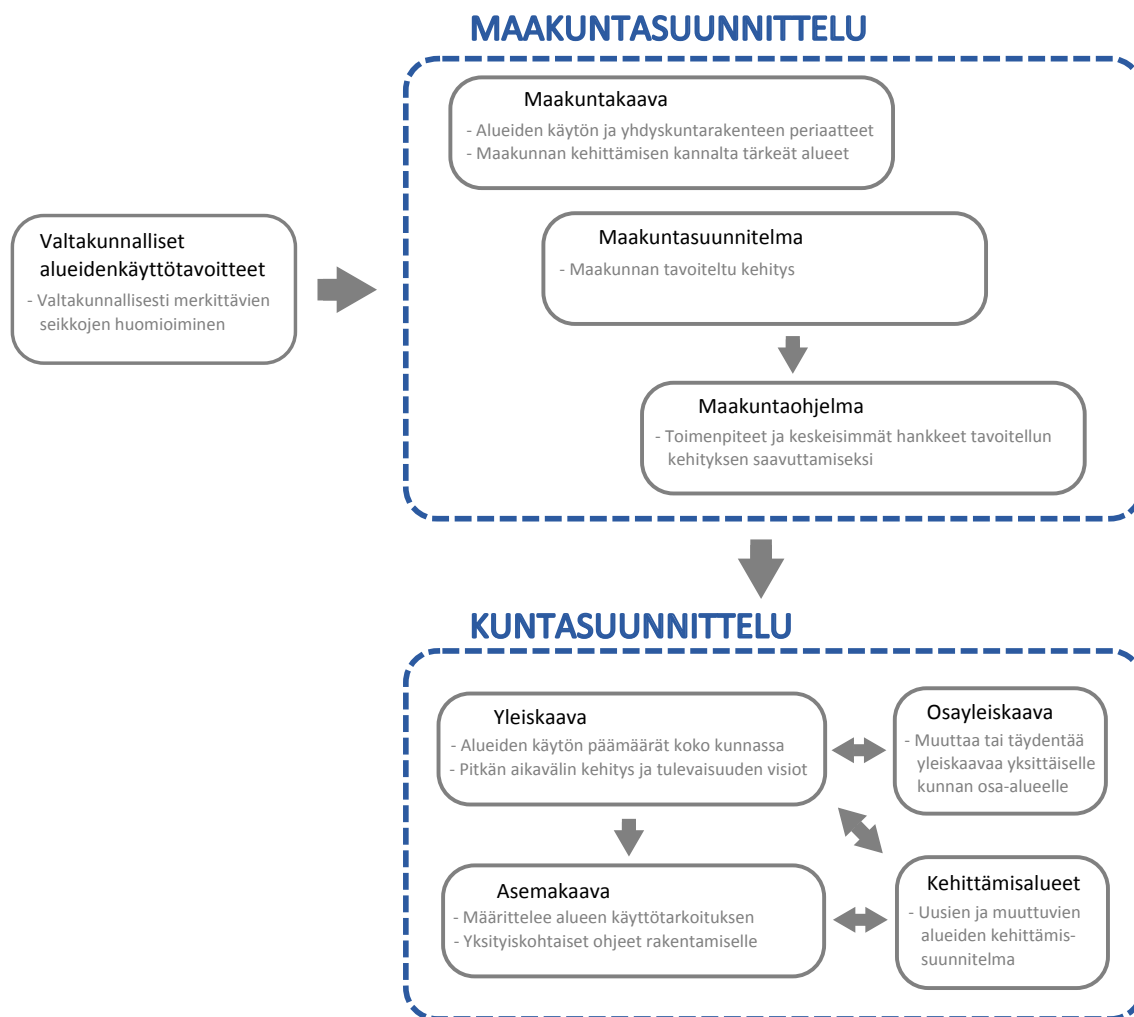
Rakennus puolestaan määritellään erilliseksi, kiinteästi rakennetuksi ja omalla sisäänkäynnillä varustetuksi rakennelmaksi, joka sisältää katettua ja yleensä seinillä erotettua tilaa [27]. Jokaiselle rakennukselle on kiinteistöjen tapaan määritelty yksilöivä rakennustunnus.

Rakennusten tietoja pidetään yllä rakennus- ja huoneistorekisterissä, joka on osa väestötietojärjestelmää (VTJ). Rakennuksista kirjataan rekisteriin perustietoja, kuten omistaja, koordinaatit ja osoite sekä ominaisuustietoja, kuten valmistumisvuosi, käyttötarkoitus, pääasiallinen lämmitystapa ja kerrosala. Lisäksi rekisterissä rakennus kuuluu aina jonkin kiinteistön alle. Rakennus- ja kiinteistötunnuksen avulla rakennuksen tiedot voidaan myös yhdistää muihin yhteiskunnan perusrekistereihin.

5.3 Kaavoitus

Tulevaisuuden maankäyttö on yksi tärkeimmistä sähkönkulutukseen vaikuttavista tekijöistä. Maankäyttö on säädeltyä ja sitä ohjaa moniportainen suunnitteluhierarkia. Verkkoyhtiö saa kaavoituksen kautta tärkeää tietoa tulevaisuuden maankäytöstä, mutta on myös osallisena kaavoituksen valmistelussa, sillä sähköverkkoinfrastruktuurille pitää varata riittävä tila kaavoituksessa.

Maankäyttö- ja rakennuslaissa on määritelty hierarkia maankäytön suunnittelulle Suomessa (Kuva 6). Suunnitteluhierarkia jakautuu useaan tasoon ja periaatteena on, että suurpiirteisempi, laajan alueen kaava ohjaa yksityiskohtaisempien, pienem-



Kuva 6: Maankäytön suunnitteluhierarkia Suomessa [28] [29]

mille alueille laadittavien kaavojen toteutusta. Näin valtakunnalliset alueidenkäyttötavoitteet siirtyvät aina asemakaavatasolle asti.

Maakuntakaava

Maakuntakaava on kaavoitushierarkian ylin ja suurpiirteisin taso, joka sisältää yleispiirteisen suunnitelman maakunnan yhdyskuntarakenteesta ja alueiden käytön perusratkaisuista. Tämän tason tarkoituksena on ratkaista usean kunnan alueelle vaikuttavia maankäyttökysymyksiä sekä ottaa huomioon valtioneuvoston hyväksymät valtakunnalliset alueidenkäyttötavoitteet. Maakuntakaavan perustana on maakuntasuunnitelma, jossa on määritelty maakunnan tavoiteltu kehitys. Maakuntakaava puolestaan toimii perustana kuntien yleis- ja asemakaavoitukselle. [30]

Yleiskaava

Yleiskaava on suurpiirteinen suunnitelma kunnan maankäytöstä. Sen tarkoituksena on “yhdyskunnan eri toimintojen, kuten asutuksen, palvelujen ja työpaikkojen sekä virkistysalueiden sijoittamisen yleispiirteinen ohjaaminen sekä toimintojen yhteensovittaminen”[29]. Yleiskaavoitus on tärkeä työkalu kunnan tulevaisuuden strategian toteuttamisessa. Lisäksi yleiskaavoituksessa sovitetaan yhteen kunnan oma tahtotila maankäytöstä sekä maakuntakaavassa määritellyt tavoitteet. Yleiskaava on varsin vapaa kaavoitusmuoto: se toimii pohjana tarkemmalle asemakaavalle, mutta voi myös suoraan ohjata rakentamista. [31]

Osayleiskaava

Tietylle, rajatulle osalle kuntaa voidaan laatia osayleiskaava. Osayleiskaava voi olla tarkempi kuin koko kunnan yleiskaava. Lisäksi osayleiskaava voidaan hyväksyä erikseen, joten olemassa olevaa yleiskaavaa voidaan täydentää laatimatta kokonaan uutta yleiskaavaa. Helsingin alueen erikoisuutena on maanalainen yleiskaava, jolla varmistetaan riittävä maanalainen tila tulevaisuuden rakentamiselle.

Asemakaava

Asemakaava laaditaan yksityiskohtaiseksi suunnitelmaksi alueen maankäytöstä sekä ohjaamaan rakentamista. Alue voi olla yksittäinen tontti tai jopa kokonainen asuntoalue. Asemakaavassa määritellään maa-alueen käyttötarkoitus, rakennusten sijainti ja sallittu koko sekä usein myös yksityiskohtaisia määräyksiä rakentamisesta. Lisäksi asemakaavassa määritellään muita kaupunkikuvaan liittyviä asioita, kuten viheralueiden ja suojelun alueiden sijainti, rakennusten sallitut korkeudet ja katualueiden leveydet. Helsingissä asemakaavoitusprosessi kestää usein vähintään vuoden ja rakentaminen voidaan aloittaa, kun kaupunginvaltuusto on hyväksynyt asemakaavan ja se on saanut lainvoiman. [32]

Kaavatasoista parhaiten sähkönkulutuksen alueelliseen ennustamiseen soveltuvat yleis- ja asemakaavat. Näistä asemakaava ohjaa lyhyen tähtäimen rakentamista, kun taas yleiskaava ohjaa asemakaavoitusta noin viidentoista vuoden päähän.

Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto suunnittelee parhaillaan uutta yleiskaavaa, joka on tarkoitettu saadaan kaupunginvaltuuston käsittelyyn viimeistään vuonna 2016. Nykyinen yleiskaava on vuoden 2002 yleiskaava, joka sai lainvoiman vuonna 2006. Helsinki on lähes kokonaan asemakaavoitettu, joten uusi yleiskaava muuttaa toteutuessaan vanhoja asemakaavoja. [33]

Uudessa yleiskaavassa on kolme osiota:

- Visio 2050 on suurpiirteinen, pitkän aikavälin tavoitetila Helsingin maankäytöstä vuoteen 2050 asti.
- Yleiskaavakartta on karttamuotoinen kaava merkintöineen ja ne ohjaavat asemakaavoitusta noin vuoteen 2030 asti. Lisäksi karttaan liittyy selostus, jossa on karttaa selventävää aineistoa kaavan perusteluista ja vaikutuksista.

- Toteutusohjelmassa esitetään suunnitelma keinoista, joilla yleiskaavan tavoitteisiin voitaisiin päästä. Lisäksi siinä määritellään kaavan toteuttamisaikataulu ja -järjestys. [33]

Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto on lisäksi tehnyt vuonna 2011 sisäiseen käyttöönsä osa-alueittaisen maankäyttöennusteen vuoteen 2030 asti. Ennuste on laadittu tuolloin parhaita saatavilla olevia tietoja sekä kaupunkisuunnitteluviraston asiantuntemusta käyttäen ja siinä arvioidaan erikseen valmistuvien asunto- ja toimitilakerrosalojen määrää. Ennusteessa on vuosittaiset arviot kaupunginosa-alueittain vuoteen 2020 asti sekä yhteenlaskettu arvio alueittain vuosille 2021–2030. Tässäkin ennusteessa on epävarmuutta etenkin toimitilojen osalta, sillä niiden toteutumisoikeus ja -aste ovat epävarmempia kuin asumisessa. Uusi yleiskaava tuo myös mukanaan muutoksia, joihin ei ole varauduttu ennustetta laadittaessa.

Tämä rakentamisennuste on saatu myös Helen Sähköverkon sisäiseen käyttöön ja verkonkehitysyksikkö voi hyödyntää sitä sähkönkäyttöennusteissaan. Ennusteessa on käytetty hyväksi muun muassa yleis- ja asemakaavavaroja, joiden toteutumista arvioidaan vuosittaisilla kertoimilla. Oletuskertoimia voidaan pitää hieman ylioptimistisina, mutta ennustetta voidaan helposti muokata syöttämällä tilalle uudet kertoimet.

Kuten aiemmin jo todettiin, Helsinki on lähes kokonaan asemakaavoitettu, joten poistuva rakennuskanta pitää ottaa sähkönkäyttöennusteissa huomioon. Erittäin tiivistä keskustan tiiviiksi rakennetuilla alueilla uusien kiinteistöjen rakentaminen onnistuu lähinnä vanhojen tilalle. Poistuvasta rakennuskannasta on vaikeaa löytää arvioita: Helsingin kaupunki ei tee ennusteita purettavista rakennuksista ja Facta-kuntarekisteriin rekisteröidään vain jo puretut rakennukset [4].

5.4 Asiakastietojärjestelmä

Helen Sähköverkko Oy käyttää asiakastietojen hallintaan Tieto Oyj:n toimittamaa Forum-järjestelmää. Tähän asiakastietojärjestelmään on tallennettu asiakkaiden liittymis- ja siirtosopimuksien tietoja ja järjestelmällä hallinnoidaan myös asiakkaiden laskutusta. Tallennettavia tietoja ovat esimerkiksi asiakkaan nimi, käyttöpaikan kaupunginosa, liittymän ja käyttöpaikan sulakekoko sekä käyttöpaikan asiakasryhmä. Forumiin on lisäksi tallennettu asiakkaiden käyttöpaikkakohtaisia kulutuksia noin kymmenen vuoden ajalta. Vanhojen mittareiden lukemat on tallennettu aina, kun mittari on luettu, eli yleensä noin vuoden välein. Etäluettavilta mittareilta viedään järjestelmään kuukausilukemat.

Asiakastietojärjestelmää voidaan käyttää kulutusennusteissa kahdella tavalla: asiakkaiden jaottelussa voidaan käyttää järjestelmään tallennettua asiakasryhmää ja sähkönkulutuksen muutostrendejä voidaan analysoida kulutustietojen perusteella.

Uutta liittymää tai käyttöpaikkaa luotaessa asiakastietojärjestelmään tallennetaan sopivin ryhmä 44 asiakasryhmästä. Lisäksi asiakasryhmätietoa voidaan tarvittaessa päivittää asiakkaan vaihtuessa tai asiakkaan ottaessa yhteyttä esimerkiksi liittymän muutokseen liittyen. Tiedon päivitys on kuitenkin asiakaspalvelijan aktiivisuuden varassa. Lisäksi esimerkiksi lämmitystavan vaihdos sähkölämmityksestä

maalämpöön ei aiheuta liittymässä muutoksia, jolloin asiakkaan ei tarvitse olla yhteydessä verkkoyhtiöön. Tiedon ajantasaisuus on siis hieman epävarmaa.

Asiakkaan kulutustietoja käytetään laskutuksessa, joten niiden voi olettaa olevan hyvin luotettavia. Koska asiakastietojärjestelmään on tallennettu myös asiakasryhmä sekä kaupunginosatieto, voidaan tietojen avulla etsiä sähkönkäytön muutostrendejä alueittain ja asiakasryhmittäin.

5.5 Verkkotietojärjestelmä

Verkkotietojärjestelmästä löytyy tietoja verkon komponenteista sekä niiden kytkeytymisestä toisiinsa, eli verkon topologiasta. Lisäksi verkkotietojärjestelmään on viety asiakkaiden kulutustietoja. Näiden tietojen avulla pystytään laskemaan nykyisen verkon kuormitus. Lisäksi verkkotietojärjestelmän avulla voidaan usein simuloida verkostomuutosten vaikutuksia verkkokomponenttien kuormitukseen. Nykyisin käytössä olevat verkkotietojärjestelmät ovat graafisia tietokantaperusteisia järjestelmiä. Niiden tyypillisiä ominaisuuksia ovat:

- karttapohjainen käyttöliittymä,
- kohteiden ominaisuustietojen kysely osoittamalla kohteita kursorilla ja
- tuloksien liittäminen verkkokuvaan. [1]

Helen Sähköverkko Oy:n verkkotietojärjestelmästä on mahdollista saada verkon nykyisen kuormituksen lisäksi paljon muitakin sähkökäyttöennusteiden laatimises- sa hyödynnettäviä tietoja. Verkkotietojärjestelmään on viety asiakastietojärjestelmästä asiakastietoja, kuten esimerkiksi käyttöpaikan asiakasryhmä. Lisäksi verkkotietojärjestelmä tallentaa tietokantaan jokaisen kartalle piirretyn liittymän koordinaattitiedot. Näitä pystytään käyttämään hyväksi liittymien kohdentamisessa pienalueelle ja liittymien yhdistämisessä rakennustietoihin.

6 Nykyisen sähkönkäytön analysointi

Sähkökäyttöennusteiden avulla arvioidaan, kuinka paljon, missä ja milloin sähköä tarvitaan. Koska ennusteiden pohjana on aina nykyinen kulutus, täytyy myös nykyisestä sähkökäytöstä analysoida sen suuruus sekä paikallinen ja ajallinen vaihtelu. Tässä luvussa käsitellään menetelmiä, joiden avulla olemassa olevaa sähkökäyttöä voidaan analysoida.

6.1 Pienalueet

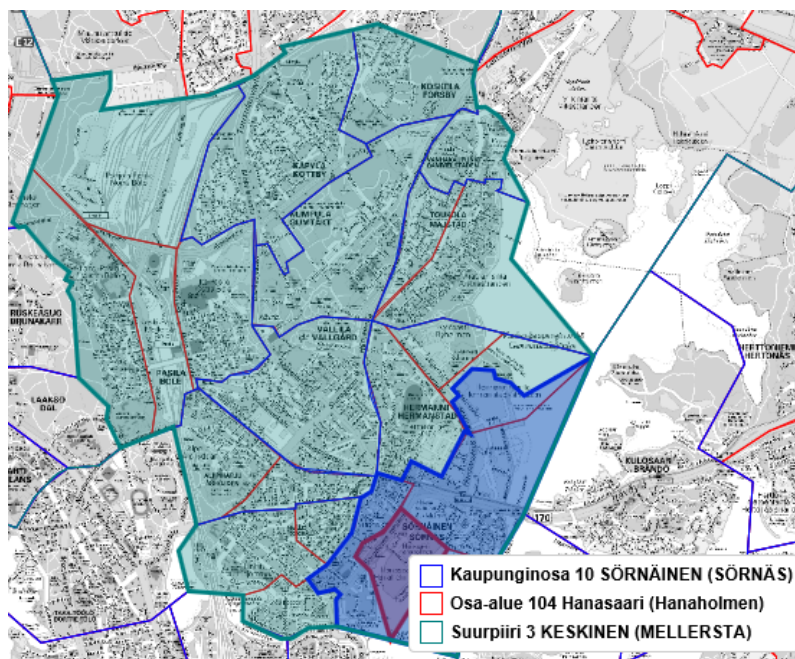
Sähkökäytön sijainnin määrittämiseksi useissa menetelmissä alue jaetaan pienempiin osa-alueisiin, joita kutsutaan pienalueiksi. Kuten luvussa 4 todettiin, sähkönkäytön muutokset pienellä osa-alueella voivat näyttää hyvin erilaiselta koko alueeseen verrattuna. Esimerkiksi uudisrakennusalueella kulutus kasvaa hyvin nopeasti ja voimakkaasti, mutta koko alueen kulutukseen se vaikuttaa vain vähän.

Pienalueita käyttävä menetelmä ei säilytä muuta paikkainformaatiota kuin pienalueen, jolla kulutuspiste sijaitsee. Niinpä tällainen analyysi ei pysty tarkastelemaan pienaluetta pienempiä kohteita. Pienin mahdollinen resoluutio on sellainen, jossa alueet ovat mahdollisimman suuria, mutta antavat tarpeeksi alueellista informaatiota suunnittelun tarpeisiin. Willis esittää kirjassaan [2] minimiresoluutiolle seuraavan nyrkkisäännön: ”Pienalueet, jotka ovat noin yksi kymmenesosa suunniteltavien laitteiden kattaman alueen koosta, ovat yleensä riittävän pieniä tyydyttämään kaikki suunnittelun tarpeet.” Tässä diplomityössä ollaan kiinnostuneita lähinnä suurjännitteisen jakeluverkon ja sähköasemien pitkän aikavälin suunnittelusta. Helen Sähköverkko Oy:llä on tällä hetkellä 23 sähköasemaa, jotka syöttävät jakeluverkkoa. Niinpä pienalueita tulisi olla noin 230.

Alueen jako pienalueisiin voidaan tehdä joko ruudukon avulla tai alueet voivat olla epäsäännöllisen muotoisia. [2] Epäsäännölliset alueet ovat usein jaettu jonkin olemassa olevan jaottelun – kuten kaupunginosien tai sähköasemien syöttöalueiden – mukaan, joten niistä on saatavilla alueellista dataa todennäköisemmin kuin ruuduista. Toisaalta epäsäännöllisen jaon resoluutio ei ole välttämättä tarpeeksi tarkka jakeluverkon tasolla tapahtuvaan tarkasteluun. [10]

Helsinki on virallisesti jaettu 59 kaupunginosaan, jotka on vielä jaettu yhteensä 148 osa-alueeseen. Lisäksi osa-alueet on jaettu useisiin pienalueisiin. Kartta jaottelusta löytyy liitteestä C. Etuna tämän aluejaon käyttämisessä on, että nykyisten rakennusten tiedot ja tulevan rakentamisen ennuste saadaan Helsingin kaupungilta jaoteltuna osa-alueittain. Osa-aluejakoa käytetään myös esimerkiksi HSV:n verkko-tietojärjestelmässä. Huonona puolena tämän jaottelun käyttämisessä on se, että sähköasemien jakelualueiden rajat eivät ole yhteneväiset kaupungin osa-alueiden rajojen kanssa. Pitkällä aikavälillä jakelualueet voivat kuitenkin muuttua merkittävästi, joten ongelma ei ole tämän diplomityön skaalassa merkittävä.

Tässä diplomityössä päädyttiin käyttämään simulaatiomenetelmän pienalueina kaupungin osa-alueita. Erityisesti tähän valintaan on vaikuttanut se, että kaupungilta saatava rakentamisenennuste käyttää juuri tätä aluejakoa. Lisäinformaatiota on myös hyvin saatavilla eri lähteistä kaupungin osa-alueittain jaoteltuna. Osa-alueiden



Kuva 7: Esimerkiksi Hanasaari on Helsingin osa-alue, joka kuuluu Sörnäisten kaupunginosaan ja keskiseen suurpiiriin. Kuva on ruutukaappaus Helsingin kaupungin karttapalvelusta (<http://kartta.hel.fi/>). Kartta koko Helsingin aluejaosta löytyy liitteestä C.

määrä ei aivan täytä Willisin määrittelemää [2] nyrkkisääntöä kymmenesosasta sähköasemien jakelualueen koosta, mutta on kuitenkin hyvin lähellä sitä. Vielä tarkemman tason, kaupungin pienalueiden, käyttö lisäisi työn määrää sekä virhettä rakentamisennusteen jakamisessa pienalueille. Osa-aluejaon tarkkuus katsottiin myös riittäväksi sähköasematason suunnittelun tarpeisiin.

6.2 Asiakasryhmien muodostaminen

Simulointimenetelmässä pyritään löytämään yhteys maankäytön ja sähkönkulutuksen välillä. Koska asiakkaat ovat erilaisia, on ne tarpeen jakaa ryhmiin, joissa sähkönkäyttö on mahdollisimman samanlaista. Tällöin voidaan kulutusdatan perusteella määritellä kunkin asiakasryhmän tyypillinen kulutus. Ryhmiä täytyy olla tarpeeksi, jotta ryhmän sisällä kulutuksissa ei olisi suuria eroavaisuuksia. Toisaalta asiakasryhmiä ei kuitenkaan voi olla liikaa. Maankäyttöennusteet saadaan ainoastaan asuinrakennuksille ja muille rakennuksille, joten niiden jakaminen useampaan ryhmään täytyy tehdä käsin verkkoyhtiön toimesta. Tästä taas aiheutuu lisää työtä sekä epätarkkuutta.

Kotitalousasiakkailta yksi suurimmista sähkönkulutukseen vaikuttavista tekijöistä on asunnon lämmitystapa. Sähkölämmitettyjen asuntojen energiankulutus on huomattavasti korkeampi kuin muulla tavalla lämmitettyjen asuntojen. Ville Rimali on diplomityössään [4] tutkinut Helen Sähköverkko Oy:n asiakkaiden ominaiskulu-

tuksia ja tullut siihen tulokseen, että sähkölämmitettyjen asuntojen ominaiskulutus on yli kolminkertainen muulla tavalla lämmitettyihin asuntoihin verrattuna.

Nykyään asuntojen erottelu sähkölämmitettyihin ja muihin ei ole tosin enää niin itsestään selvä. Esimerkiksi maa- ja ilmalämpöpumppujen suosio on kasvanut huomattavasti viime vuosina. Lämpöpumput ovat huomattavan energiatehokkaita. Hannu-Pekka Hellman on tutkinut diplomityössään [6] maalämpöpumpuilla lämmitettävien ja sähkölämmitettyjen asuntojen sähkönkulutuksen eroja. Tutkimuksessa todettiin maalämpölämmittäjien ja suorien sähkölämmittäjien sähkönkäytön profiilit samankaltaisiksi. Maalämmityksen todettiin kuitenkin olevan huomattavasti sähkölämmitystä energiatehokkaampi lämmitysmuoto.

Tässä diplomityössä toteutetussa työkalussa on asumiskulutus jaettu sähkölämmitettyihin asuntoihin ja muulla tavalla lämmitettyihin asuntoihin. Tieto lämmitystavasta saadaan joko asiakastietojärjestelmästä tai kuntarekisteristä. Kuntarekisterin tiedot ovat tosin hyvin puutteellisia. Koska maalämpökohteita ei ole eritelty asiakastietojärjestelmässä tai kuntarekisterissä eikä niiden profileissa ole suurta eroa sähkölämmittäjiin, ei maalämpöä ole eritelty omaksi ryhmäkseen.

Muu kuin asumiskulutus on jaettu kolmeen ryhmään: palveluihin, teollisuuteen ja muuhun. Palvelusektori on sähköenergian kulutukseltaan Helsingissä selvästi suurin asiakasryhmä. Joonas Larinkari on diplomityössään [5] tutkinut palvelukulutuksen jakamista tarkempiin ryhmiin. Hänen tutkimuksessaan koko Helsingin kulutusta matemaattisesti analysoitaessa palvelusektorista muodostui kuitenkin vain yksi merkittävä ryhmä. Myös tässä työssä käsitellään palvelukulutusta vain yhtenä ryhmänä.

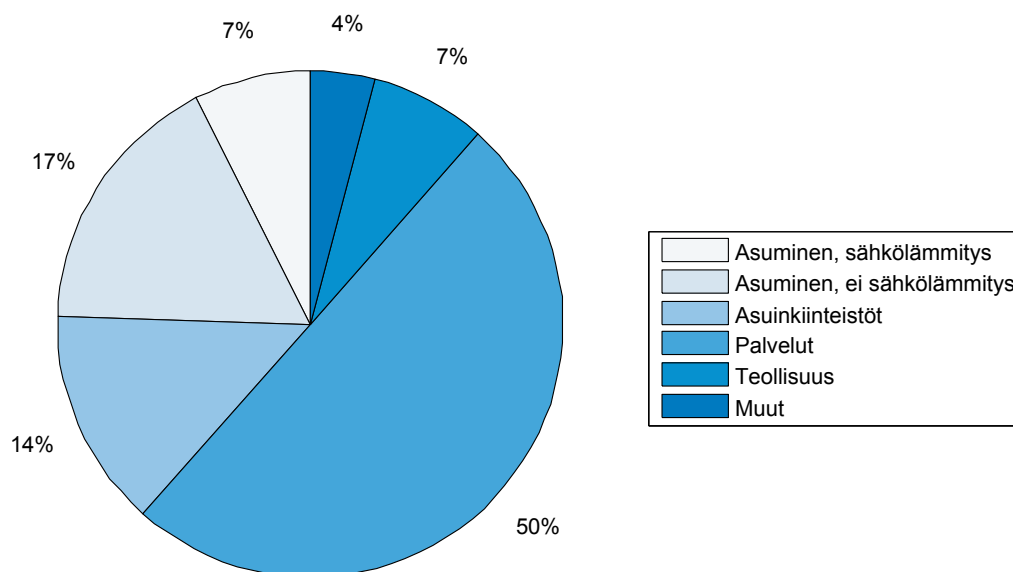
Teollisuuskulutukseen kuuluvat teollisuuslaitokset sekä esimerkiksi varastot. Niiden profiili eroaa palvelukulutuksesta lähinnä vuorokausirytmiltään. Palveluiden kulutus on lähes poikkeuksetta kello 6-18 välillä, mutta teollisuuskulutus jakautuu tasaisemmin vuorokaudelle. Muuhun kulutukseen jää sellainen kulutus, jolla ei ole selkeää yhteyttä kerrosaloihin, kuten sähköinen raideliikenne, rakentaminen sekä ulkoalaistus. Näiden kulutuksien muutoksia on arvioitava yksittäisinä pistekuormina.

Asiakkaat voidaan jakaa ryhmiin joko kuntarekisteristä tai asiakastietojärjestelmästä saatavan asiakasryhmän perusteella tai analysoimalla matemaattisesti heidän kulutustaan. Matemaattisella ryhmittelyllä saadaan erotettua parhaiten samalla tavalla sähköä kuluttavat asiakkaat, mutta ryhmittelyllä ei välttämättä ole suoraa yhteyttä maankäyttöön. Kuntarekisteristä tai asiakastietojärjestelmästä taas saadaan tieto maankäyttöryhmästä, mutta tällöin asiakasryhmän kulutus voi olla hyvin heterogeenistä. Lisäksi järjestelmien tiedot voivat olla virheellisiä.

Tässä työssä päädyttiin käyttämään asiakastietojärjestelmästä saatavaa asiakastietoa ryhmittelyn perusteena. Tämä menetelmä valittiin siitä syystä, että se on helppo määrittää hyvin suurelle datamäärälle ja sen avulla kaikki kulutus saadaan kohdistettua asiakasryhmälle. Lisäksi asiakastietojärjestelmään on tallennettu kaikille asunnoille lämmitystapa, kun taas kuntarekisterin tiedot lämmitystavasta ovat hyvin puutteellisia. Näin saadaan erotettua sähkölämmitysasiakkaat paremmin muusta asumisesta.

Vuoden 2013 kulutuksen jakautuminen Helsingissä on esitetty kuvassa 8. Kuvasta nähdään, että palvelusektori on suurin sähkönkuluttajaryhmä Helsingissä ja se

kuluttaa noin puolet kaikesta sähköenergiasta. Asumiseen kuluu noin 20 prosenttia sähköenergiasta ja asuinkiinteistöihin lisäksi noin 14 prosenttia.



Kuva 8: Sähköenergian loppukäytön jakautuminen asiakastietojärjestelmästä saatujen asiakasryhmien ja vuosienergioiden perusteella Helsingissä vuonna 2013. Asuinkiinteistöihin kuuluu kerrostalojen kiinteistömittareiden takana käytetty sähkö. Tästä kulutuksesta osa voi olla myös palvelukulutusta, sillä kivijalkatoimitilat kuluttavat oman osansa esimerkiksi koko rakennuksen ilmastoinnista.

6.3 Ominaiskulutus

Ominaiskulutus kuvaa, kuinka paljon tiettyyn asiakasryhmään kuuluva asiakas kuluttaa keskimäärin sähköä vuodessa jotakin helposti laskettavaa suuretta kohden. Tämä suure voi olla esimerkiksi asukkaiden määrä tai rakennusten koko. Tässä työssä ominaiskulutus lasketaan kerrosneliometriä kohden, sillä rakennusten kerrosneliometreistä on olemassa kattavat tiedot ja menetelmä soveltuu niin asumiseen kuin toimitiloihinkin. Kun tiedetään alueen tuleva maankäyttö asiakasryhmittäin sekä asiakasryhmien ominaiskulutukset, saadaan tiedoista laskettua arvio uuden rakentamisen vaikutuksesta alueen vuosienergiaan.

Ominaiskulutukset lasketaan verkkoyhtiön historiadatasta. Menetelmiä ominaiskulutuksen laskemiseksi on olemassa useita, esimerkiksi Ville Rimali on diplomityössään [4] tutkinut kolmen menetelmän soveltamista Helen Sähköverkko Oy:n dataan: lineaarista sovitetta vakioterminä, lineaarista sovitetta ilman vakiotermiä sekä jakolaskumenetelmää. Rimali ei löytänyt merkittäviä eroja eri menetelmien tulosten välillä, joten tässä työssä käytetäänkin ominaiskulutuksen laskemiseen helpointa näistä tavoista: jakolaskumenetelmää.

Jakolaskumenetelmä on hyvin yksinkertainen tapa ominaiskulutuksen laskemiseksi. Menetelmässä lasketaan tietyn alueen vuosienergiat yhteen asiakasryhmittäin ja saadut summat jaetaan kunkin asiakasryhmän kokonaiskerrosalalla kyseisellä alueella.

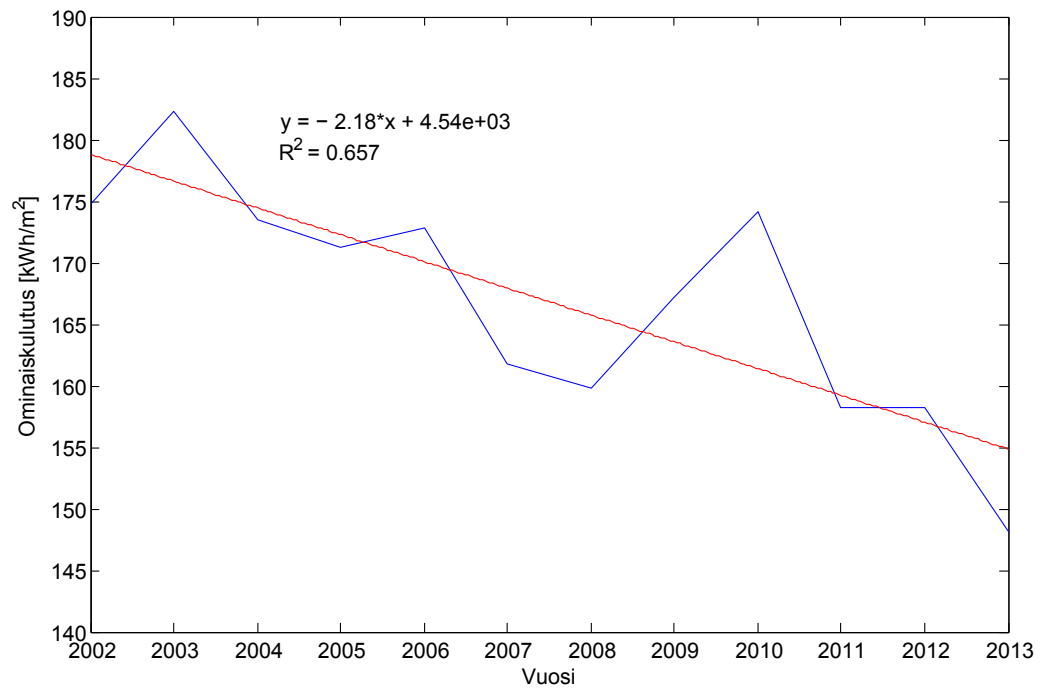
Asiakkaiden sähkönkäyttö ei kuitenkaan pysy vakiona, vaan ominaiskulutus vaihtelee vuosien saatossa esimerkiksi asiakkaiden käyttäytymisen muutosten ja laitteiden energiatehokkuuden parantumisen seurauksena. Helen Sähköverkko Oy:n asiakastietojärjestelmään on tallennettu asiakaskohtaista vuosienergiadataa vuodesta 2002 lähtien. Tässä työssä tutkittiin asiakasryhmäkohtaisten ominaiskulutusten kehittymistä vuodesta 2002 lähtien ja pyrittiin löytämään datasta trendejä, joiden perusteella voitaisiin arvioida tulevaisuuden asiakasryhmäkohtaisia ominaiskulutuksia.

Ominaiskulutuksen laskemisessa käytettiin jakolaskumenetelmää ja asiakasryhminä luvussa 6.2 esiteltyä ryhmittelyä. Lähtötietoina käytettiin asiakastietojärjestelmään sähkönkäyttöpaikoille tallennettuja asiakasryhmiä ja kiinteistötietojärjestelmään kiinteistöille tallennettuja kerrosaloja. Tarkastelussa huomioitiin vain sellaiset liittymät, joilla oli vain yhteen asiakasryhmään kuuluvaa kulutusta ja jotka pystyttiin yhdistämään koordinaattien perusteella tiettyyn kiinteistöön. Lisäksi datasta poistettiin sellaiset kiinteistöt, joihin yhdistettiin useampi kuin yksi liittymä.

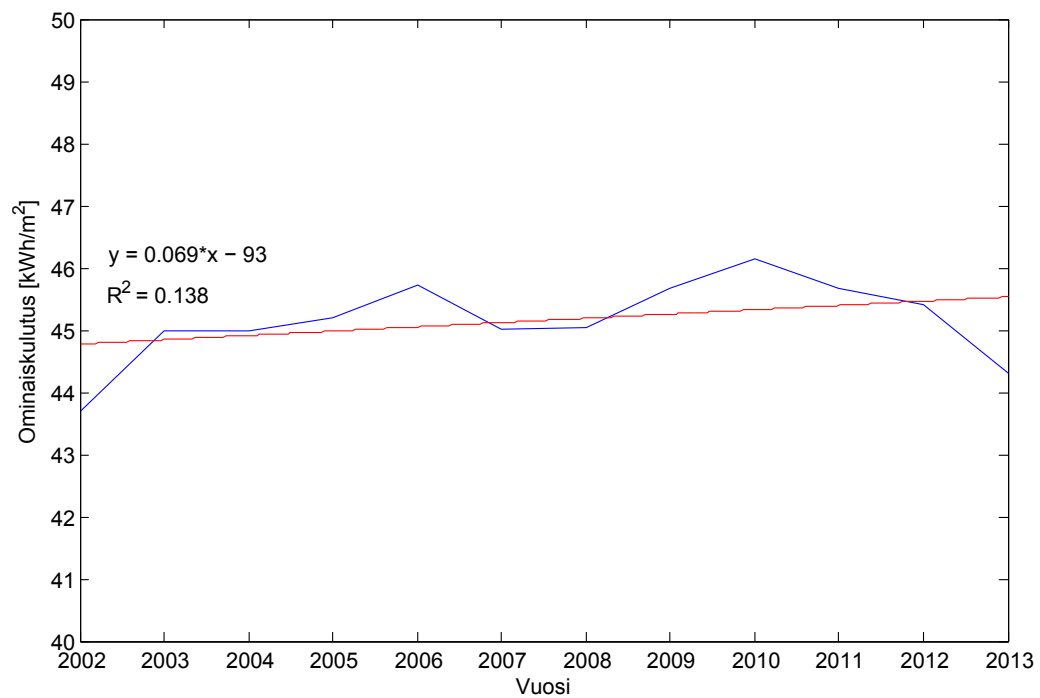
Kuvassa 9 on esitetty sähköllä lämmitettyjen asuntojen ominaiskulutuksen kehitys vuosina 2002–2013. Sähkölämmittäjien ominaiskulutuksessa on selvästi havaittavissa laskeva trendi tarkastelujakson aikana: ominaiskulutus on pienentynyt vuodessa keskimäärin jopa yli 2 kilowattitunnilla kerrosneliometriä kohti. Dataan sovitettuna lineaarisen sovituksen selitysaste on 65,7 prosenttia. Vuosienergiadataan ei ole tehty lämpötilakorjausta ja sähkölämmitysasiakkaiden ominaiskulutuksella on lisäksi huomattava riippuvuus erityisesti talven lämpötiloista, joten selitysaste on huomattavan suuri.

Sähkölämmittäjien ominaiskulutuksen pienenemiseen on useita syitä. Esimerkiksi Adaton teettämässä kotitalouksien sähkönkäyttötutkimuksessa [34] todettiin, että vuonna 2011 noin 40 prosentissa Suomen huonekohtaisesti lämmitetyistä asunnoista oli lisälämmittimenä ilmalämpöpumppu. Todennäköisesti myös Helsingissä ilmalämpöpumput ovat lisääntyneet sähkölämmityksessä asunnoissa, mikä laskee lämmitykseen tarvittavan sähköenergian määrää. Lisäksi Adaton tutkimuksen mukaan maalämpöpumput yleistyvät asunnoissa todella nopeasti. Asiakkaan vaihtaessa sähkölämmityksestä maalämpöön hänen asiakasryhmänsä ei todennäköisesti vaihdu. Tämä johtuu kahdesta asiasta: maalämmölle ei ole asiakastietojärjestelmässä omaa käyttäjäryhmää ja lisäksi asiakkaan ei tarvitse tehdä lämmitystapaa vaihtaessaan sähköliittymäänsä muutoksia. Näin ollen verkkoyhtiö ei välttämättä edes saa tietoa muutoksesta. Niinpä asiakkaiden vaihtaessa lämmitystapaansa sähkölämmityksestä vähemmän sähköä kuluttavaan maalämpöön, sähkölämmitys-asiakasryhmän ominaiskulutus pienenee.

Muulla kuin sähköllä lämmitettyjen asuntojen ominaiskulutuksessa (Kuva 10) ei ole havaittavissa mitään selkeää trendiä, vaan ominaiskulutuksen vaihtelu vaikuttaa melko satunnaiselta. Hyvin loivasti nousevan lineaarisen trendisuoran selitysaste on 13,8 prosenttia, joten vuosittainen kasvu ei ole erityisen merkittävä selittävä tekijä. Lisäksi vuosittainen vaihtelu on muihin asiakasryhmiin nähden varsin pientä. Yksi



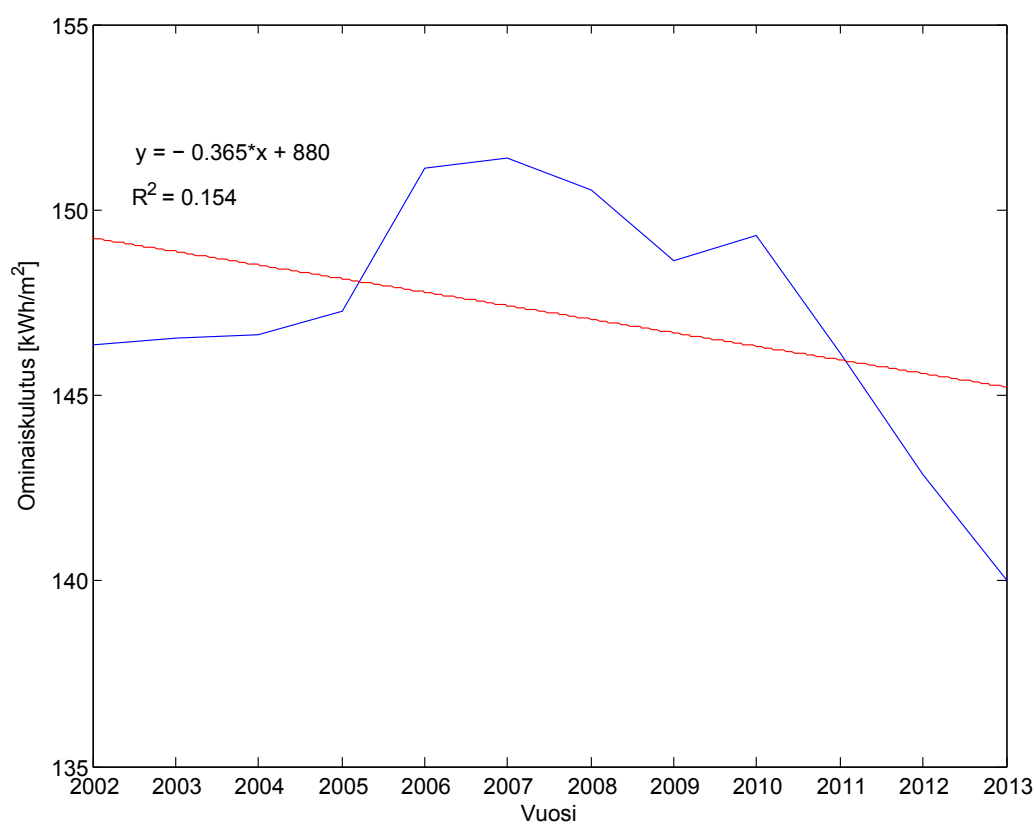
Kuva 9: Sähkölämmitettyjen asuntojen kerrosalakohtaisen ominaiskulutuksen kehitys vuosina 2002–2013



Kuva 10: Muulla kuin sähköllä lämmitettyjen asuntojen kerrosalakohtaisen ominaiskulutuksen kehitys vuosina 2002–2013

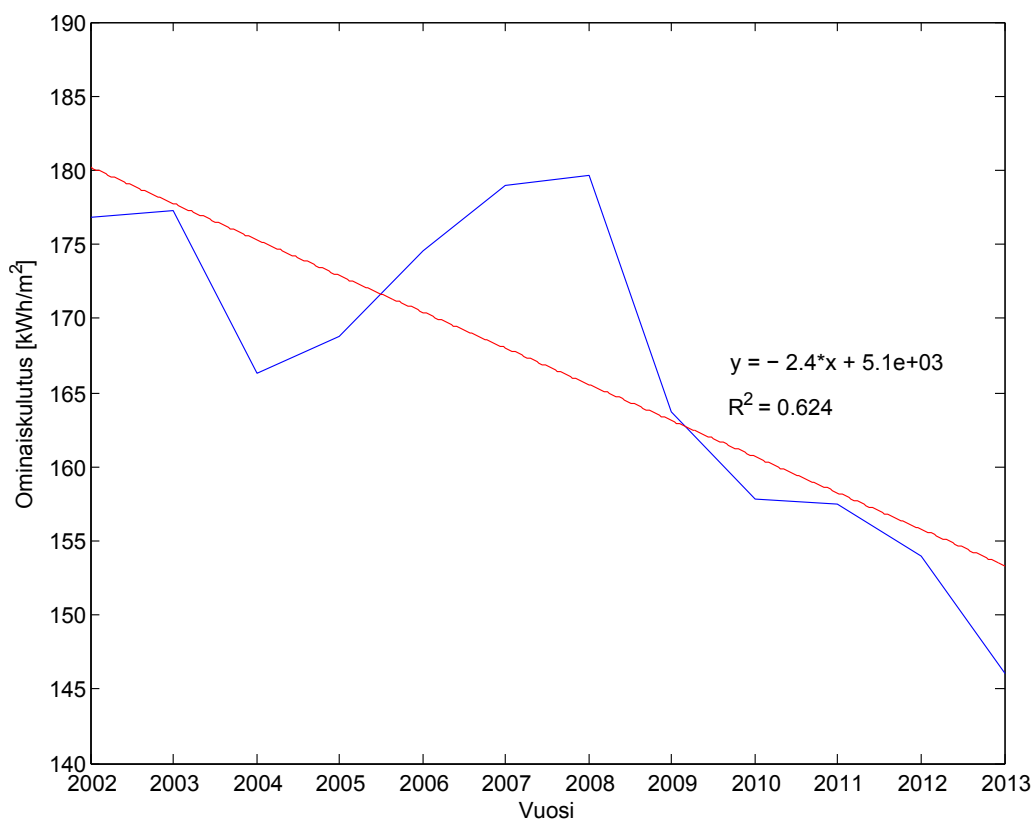
selittävä tekijä neljän viimeisen vuoden ominaiskulutuksen laskulle voisi olla EU:n komission vuonna 2009 antama asetus, jolla on kiristetty valaistuksen energiatehokkuusvaatimuksia, mikä on käytännössä tarkoittanut hehkulamppujen myynnin loppumista. Tämän varmentamiseksi tarvitaan kuitenkin lisää kulutusdataa, sillä lasku voi selittyä normaalilla vuosittaisella vaihtelulla.

Ei-sähkölämmitettyjen asuntojen sähkönkulutus koostuu lähinnä laitesähköstä. Adaton sähkönkäyttötutkimuksen [34] mukaan Suomen laitesähkön kulutuksen määrässä ei ole tapahtunut suurta muutosta vuosien 2006 ja 2001 välillä, mutta ryhmän sisällä muutokset ovat suuria. Esimerkiksi tietotekniikan sähkönkulutus on kaksinkertaistunut näiden viiden vuoden aikana ja valaistuksen sähkönkulutus puolestaan puolittunut. Ylipäänsä selvityksen mukaan laitteiden määrä on viidessä vuodessa lisääntynyt, kun taas niiden energiatehokkuus on parantunut, mikä on pitänyt kulutetun energian määrän lähes ennallaan.



Kuva 11: Palveluasiakkaiden kerrosalakohtaisen ominaiskulutuksen kehitys vuosina 2002–2013

Kuvassa 11 on esitetty Helsingin palveluasiakkaiden ominaiskulutuksen kehitys vuodesta 2002 vuoteen 2013 sekä kulutukseen sovitettu lineaarinen trendiviiva. Palveluasiakkaiden ominaiskulutuksen trendi on pysynyt melko tasaisen nousevana vuoteen 2010 asti, minkä jälkeen ominaiskulutus on laskenut voimakkaasti. Koko aikavälin lineaarisen trendiviivan selitysaste on heikko, joten pidemmän aikavälin trendiä ei ole havaittavissa. Vuoden 2008 jälkeen ominaiskulutuksen kasvu on jo hieman



Kuva 12: Teollisuusasiakkaiden kerrosalakohtaisen ominaiskulutuksen kehitys vuosina 2002–2013

taittunut, joten on oletettavaa, että vuonna 2008 alkanut taantuma on vaikuttanut ominaiskulutukseen. Tähän voisi olla syynä sekä tyhjillään olevien toimitilojen määrän kasvu että toiminnan supistuminen käytössä olevissa toimitiloissa.

Teollisuusasiakkaiden ominaiskulutuksen kehitys Helsingissä vuodesta 2002 vuoteen 2013 on esitetty kuvassa 12. Samoin kuin palvelukuluttajilla, myös teollisuusasiakkailla ominaiskulutus on viime vuosina ollut laskussa. Tosin lasku alkoi jyrkkinä jo vuonna 2008. Ehkä tästä syystä sovitetun laskevan suoran selitysaste on huomattavasti parempi kuin palvelukulutuksen vastaavan. Todennäköisesti heikon taloudellisen tilanteen vaikutus on kuitenkin niin suuri, että kovin pitkälle näin laskevaa trendiä ei ole syytä ekstrapoloida.

6.4 Kuormitusmallit

Sähkökäyttö vaihtelee merkittävästi vuodenajasta, päivästä ja tunnista riippuen. Erityisesti sähkölämmitetyt kohteet kuluttavat talvella huomattavasti enemmän sähköä kuin kesällä. Lisäksi esimerkiksi kotitalousasiakkaat kuluttavat eniten sähköä aamulla ennen asukkaiden lähtöä töihin sekä illalla töistä palattuaan. Verkko-yhtiön toiminnan kannalta vuosienergiaa kiinnostavampi tieto onkin siis siirrettävä hetkellinen teho, sillä verkon komponentit on mitoitettava tätä tehoa varten. Niinpä vuo-

sienergiasta täytyy päästä jollakin menetelmällä hetkittäisiin tehoihin. Ennen tuntimittausta tämä on tehty joko laskemalla teho Velanderin kaavalla vuosienenergiasta tai niin sanotuilla SLY-käyrillä [1].

Velanderin kaavalla huipputehojen arvioimiseen vuosienenergioista käytetään kaavaa 1. Yhtälössä huipputeho, P_{max} , saadaan vuosienenergiasta W niin kutsuttujen Velanderin kertoimien, k_1 ja k_2 , avulla. Jokaiselle asiakasryhmälle määritellään omat kertoimet ja ne on määritelty käytännön kokemusten ja mittausten perusteella. Huipputehon ajallista vaihtelua voidaan huomioida käyttämällä niin sanottuja osallistumiskertoimia, jotka kertovat tietyinä ajanhetkenä tehon suhteen asiakasryhmän huipputehoon. [1]

$$P_{max} = k_1 \cdot W + k_2 \cdot \sqrt{W} \quad (1)$$

Velanderin kaavaa tarkempaan sähkönkäytön mallintamiseen päästään muodostamalla kunkin asiakasryhmän tehon määrällisestä ja ajallisesta jakautumisesta vuosiprofiili. Näitä profileja kutsutaan kuormitusmalleiksi. Yleisesti Suomen verkkoyhtiöillä käytössä olevat mallit perustuvat Suomen Sähkölaitosyhdistyksen (SLY, nykyisin Energiateollisuus ry) vuonna 1992 julkaisemaan kotitalouksien sähkönkäyttötutkimukseen. Tutkimuksessa määriteltiin tyyppikäyttäjät, joita on yhteensä 40 ja niiden sähkönkäyttöä mitattiin koko maassa. Mittausten tuloksena kullekin tyyppikäyttäjälle määriteltiin kuormitusmallit, jotka kuvaavat tuntikohtaista tehovaihtelua, tuntikeskitehojen hajontaa sekä lämpötilariippuvuutta. Näitä malleja kutsutaan yleisesti SLY-käyriksi. [1]

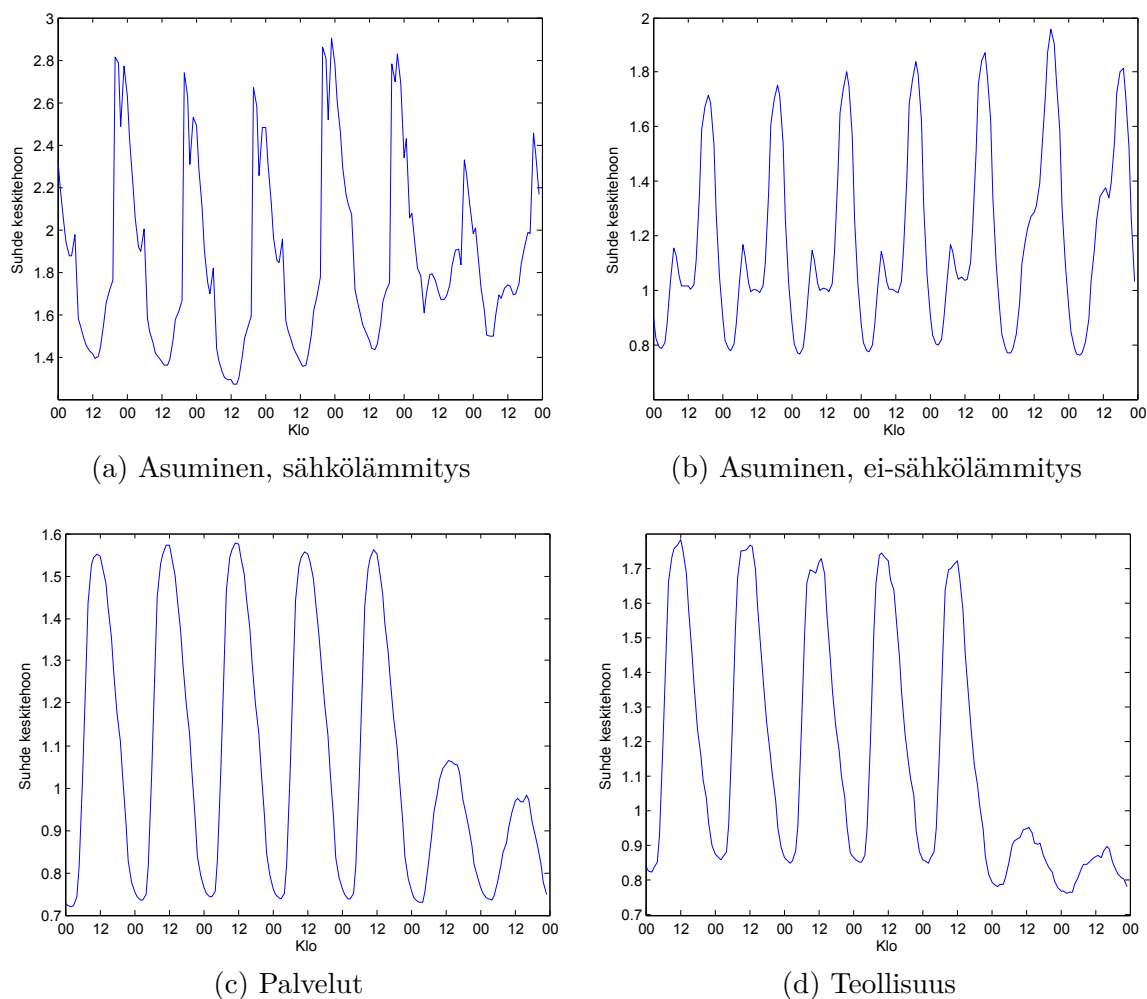
Nykyisin SLY-käyristä ollaan siirtymässä käyttämään etälueuttavien mittareiden tuottamaa tunneittaista keskitehodataa sähkönkäytön mallintamiseen. Verkkoyhtiö voi tällöin itse määrittellä asiakasryhmät ja määrittää kuormitusmallit analysoimalla kunkin ryhmän historiadataa. Lisäksi yhtiö voi esimerkiksi luoda suurimmille asiakkaille omat kuormitusmallinsa, sillä mittausdata mahdollistaa jopa yksittäisten asiakkaiden kulutuksen analysoinnin.

Tässä diplomityössä kullekin asiakasryhmälle on muodostettu kuormitusmallit vuoden 2013 tuntisarjoista. Tarkasteluun on otettu huomioon vain sellaiset liittymät, joilla on vain yhteen asiakasryhmään kuuluvia käyttöpaikkoja. Kuhunkin asiakasryhmään kuuluville liittymille on laskettu koko vuoden tuntisarjoista systeemitason summasarja. Tämä summasarja on vielä jaettu sen keskiteholla, jolloin kunkin tunnin indeksi kertoo kyseisen tunnin tehon suhteessa asiakasryhmän keskitehoon. Yksittäisen käyttäjän tai samaan asiakasryhmään kuuluvien käyttäjien ryhmän arvioitu tuntiteho P_{ri} tietyinä ajankohtana saadaan siis laskettua kaavan 2 avulla:

$$P_{ri} = E_r / 8760 \cdot k_{ri} \quad (2)$$

,missä E_r on käyttäjäryhmän r vuosienenergia ja k_{ri} on käyttäjäryhmän r tuntindeksi ajankohtana i .

Kuvassa 13 on esitetty kunkin asiakasryhmän keskimääräinen kuormitusmalli tyyppillisenä talviviikkona. Tunneittaiset tehot on esitetty suhteessa asiakasryhmän keskitehoon.



Kuva 13: Asiakasryhmien tunnettainen teho tyypillisenä talviviikkona vuonna 2013 suhteessa ryhmän keskitehoon

Sähkölämmitetyn asumisen tyypillisen talviviikon kulutuskäyrä on esitetty kuvassa 13a. Kuvaajasta voidaan nähdä, että kulutushuiput osuvat arkipäiville kello 20 ja 24 välille. Kello 19:sta kello 20:een havaitaan arkipäivinä suuri hyppäys tunti-tehossa. Tämä johtuu HSV:n aikasiirto-tariffin hinnoittelusta, jossa halvempi yösiirtohintaa alkaa arkipäivinä kello 20. Suurin osa varaavasta sähkölämmityksestä kytkeytyy tällöin päälle. Viikonloppuna aivan yhtä selvää piikkiä ei näy. Tämä johtuu osittain siitä, että muu kulutus on arkea suurempaa ihmisten ollessa päivän aikana kotona ja toisaalta siitä, että viikonloppuisin aikasiirtotariffin yöhinta on koko ajan voimassa.

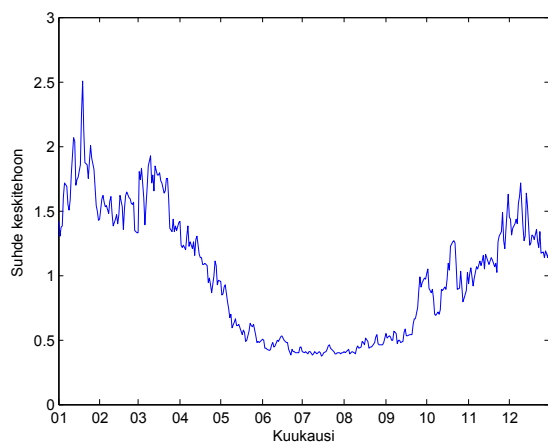
Ei-sähkölämmitetyn asumiskulutuksen kuormitusmalli noudattelee ihmisten päivärytmiä. Arkipäivinä aamulla sähkökäytössä on pieni piikki noin kello kuudesta yhdeksään, kun ihmiset heräävät ja lähtevät töihin. Päivällä kulutus on pientä ja illalla taas huomattavan suurta noin kello viidestä yhdeksään, eli töistä pääsyn jälkeen ja ennen nukkumaan menoa. Viikonloppuisin kulutus vastaa muuten arkipäivän kulutusta, mutta päivällä kulutus ei laske, sillä suurin osa ihmisistä on kotona.

Palveluilla ja teollisuudella on keskenään hyvin samanlaiset keskimääräiset viik-

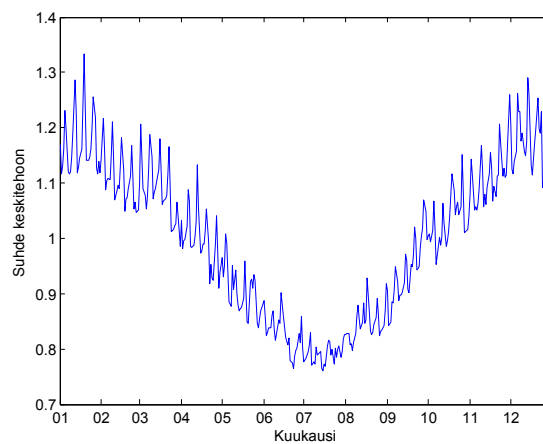
kokäyrät. Päivän kulutus alkaa nousta aamulla ja saavuttaa huipun noin puolen päivän aikaan. Tämän jälkeen kulutus laskee iltaa kohti mentäessä. Arkena huippu on huomattavasti suurempi kuin viikonloppuna, sillä suuri osa palveluista ja teollisuudesta on toiminnassa ainoastaan arkisin. Teollisuudessa ero viikonloppuna ja arjen välillä on hieman palveluita suurempi ja viikonloppuna yön kulutus laskee. Palve- luilla puolestaan vuorokauden sisäinen vaihtelu on hieman suurempaa.

Eri asiakasryhmien vuosittaista vuorokausienergian vaihtelua on havainnollistet- tu kuvassa 14. Tiedot ovat vuodelta 2013 ja pystyakselilla on kuvattu kunkin vuo- rokauden energian suhdetta asiakasryhmän keskimääräiseen vuorokausienergiaan. Sähkölämmitystä käyttävien kotitalousasiakkaiden kulutus on luonnollisesti talvel- la huomattavasti kesää korkeampi. Lisäksi kulutuksessa on suuria epätasaisuuksia, mikä johtuu muutoksista ulkolämpötilassa. Myös ei-sähkölämmitettyjen kotitalous- asiakkaiden kulutus on talvella jonkin verran kesää suurempaa, sillä kulutus seu- raa vuositasolla varsin tarkasti yön pituutta [4]. Palvelu- ja teollisuuskulutuksella viikoittainen vaihtelu on huomattavasti vuosittaista vaihtelua suurempaa. Keski- määräinen vuorokausikulutus on kuitenkin myös palvelu- ja teollissektorilla hieman suurempaa talvella kuin kesällä. Tämä johtunee myös lisääntyneestä valaistuksen ja lämmityksen tarpeesta talvisin. Lisäksi juhlapyhät ja tyypilliset loma-ajat näyttävät aiheuttavan kulutuksen pienenemistä.

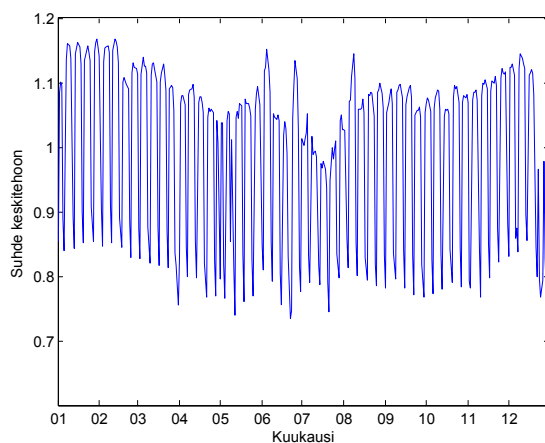
Viikko- ja vuosikäyrien muoto vastaa hyvin oletettua asiakasryhmien käyttäyty- mistä. Tämä tarkoittaa sitä, että ainakin suurin osa asiakastietojärjestelmän asia- kastiedoista on oikein. Lisäksi asumisen vuosikäyrien muoto vastaa varsin hyvin Ville Rimalin diplomityössä [4] esitettyjä, matemaattisen erottelun avulla muodostettuja sähkönkäyttökäyriä Pakilan ja Lauttasaaren alueilta. Erityisesti sähkölämmitettyjen kotitalouskiinteistöjen vuosikäyrässä on luonnollisesti säästä johtuvaa vuosittaista vaihtelua, mutta tämä oli myös odotettavissa.



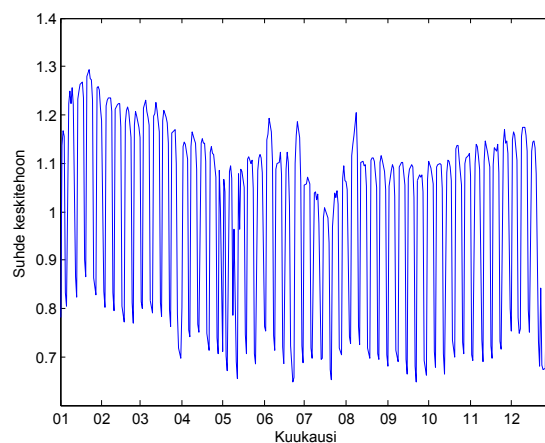
(a) Asuminen, sähkölämmitys



(b) Asuminen, ei-sähkölämmitys



(c) Palvelut



(d) Teollisuus

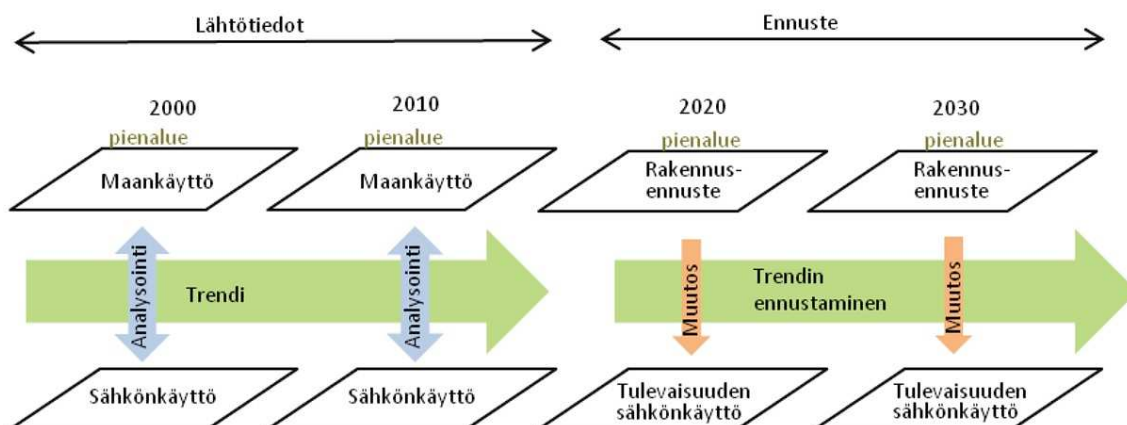
Kuva 14: Asiakasryhmien vuorokauden keskiteho vuonna 2013 suhteessa ryhmän koko vuoden keskittehoon

7 Muutokset sähkökäytössä

Sähkönkulutus riippuu monista tekijöistä ja muuttuu jatkuvasti. Yksi suurimmista sähkökäyttöön vaikuttavista muutoksista on uudisrakentaminen. Esimerkiksi aikaisemmin rakentamattoman alueen rakentaminen täyteen aiheuttaa muutoksen kokonaiskulutuksen suuruudessa ja sähkökäytön alueellisessa sijoittumisessa.

Lisäksi sähkön tuotannossa eletään tällä hetkellä suurta murrosta. Pitkään sähköntuotantoa hallinneen keskitetyn tuotannon rinnalle on hiljalleen tulossa myös hajautettua sähköntuotantoa. Suurin syy tähän on uusiutuvien energiamuotojen lisääntyneeseen käyttöönottamiseen. Ihmisen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä pyritään vähentämään esimerkiksi poliittisilla päätöksillä, ja valtioiden tukien ansiosta uusiutuvasta tuotannosta on tullut aiempaa kilpailukykyisempää suhteessa muihin tuotantomuotoihin.

Myös sähkökulutuksessa on tapahtumassa suuria muutoksia, joista merkittävä osa liittyy ilmastomuutoksen torjumiseen. Ladattavia sähköautoja on jo tullut markkinoille vaihtoehdoksi saastuttaville polttomoottoriautoille. Sähköautot eivät tuota lainkaan pakokaasuja, ja käytettäessä uusiutuvilla energianlähteillä tuotettua sähköä sähköautot ovat täysin saasteettomia. Ilmastointi kodeissa ja toimistoissa on lisääntynyt ja ihmiset asentavat koteihinsa yhä enemmän ilmalämpöpumppuja pääasiallisen lämmitysmuotonsa rinnalle. Myös maalämpöpumput ovat kasvattaneet suosiotaan lämmitystapana. Niiden yleistymisen voi nostaa tai laskea sähkökulutusta riippuen asiakkaan aikaisemmasta lämmitystavasta.



Kuva 15: Maankäytön simulointimenetelmän pääperiaate [10]

Suunnitellussa alueellisen sähkökäytön skenariointityökalussa käytetään Ville Rimalin diplomityössään [4] määrittelemää ennustusmenetelmää. Se perustuu niin sanottuun simulointimenetelmään (Luku 4.1), jossa tarkastellaan eri maankäyttötyyppien kulutusta ja niiden jakautumista pienalueille. Metodien pääperiaate on esitetty kuvassa 15. Simulointimenetelmä perustuu sähkökäyttöpaikkojen nykyiseen kulutukseen. Kullekin asiakastyypille määritellään lähihistoriadatasta ominaiskulutus ja kuormitusmalli. Käyttämällä tätä yhteyttä sähkökäytön ja maankäytön välillä voidaan tulevaisuuden alueellista sähkökäyttöä ennustaa kaavoituksesta saata-

van rakentamisennusteen avulla. Lisäksi saadun alueittaisen ennusteen päälle pyritään mallintamaan muita muutoksia sähkökäytössä mahdollisimman tarkasti hyödyntämällä historiallisia kulutustietoja sekä erilaisia tietolähteitä. Näin saadaan ennuste sekä kulutuksen muutoksen suuruudelle että sähkökäytön alueelliselle ja ajalliselle jakautumiselle. Rimalin mukaan työkalun menetelmät soveltuvat parhaiten pitkän aikavälin ennusteisiin, ja niitä voidaan tehdä pienillekin alueille, esimerkiksi kaupunginosille tai kortteleille.

Skenarioinnin lähtötietona on etäluettavilta mittareilta saatu tunneittainen asiakaskohtainen kulutusdata, jota analysoidaan luvussa 6 esiteltyjen menetelmien avulla. Tämän diplomityön puitteissa tehtyyn työkaluun tiedot vietiin alueittain jaoteltuina summakäyrinä. Lopullisen työkalun on tarkoitus hyödyntää suoraan Generistietokannasta löytyviä asiakaskohtaisia kulutuksia, mutta tietokantayhteyden rakentaminen olisi ollut tämän työn puitteissa liian työlästä.

Asiakasryhmille muodostettiin ominaiskulutukset ja kuormitusmallit vuoden 2013 kulutuksista. Tässä työssä oletettiin Helsingin sisäisten erojen olevan melko pieniä, joten kuormitusmalleja ei muodostettu erikseen jokaiselle alueelle. Asiakasryhmien muodostamisessa käytettiin hyväksi asiakastietojärjestelmään tallennettuja asiakasryhmiä. Tulevaisuudessa kuormitusmalleissa olisi hyvä käyttää esimerkiksi useamman vuoden keskiarvoa.

Tulevaisuuden sähkökäytön muutokset on työkalussa jaettu kolmeen ryhmään: uudisrakentaminen, sähkökäytön muutokset nykyisissä käyttökohteissa sekä uusi tuotanto ja uudet sähkökäyttökohteet. Näillä pyritään mallintamaan mahdollisimman tarkasti tulevaisuuden muutokset, joilla on merkittävä vaikutus sähkökäyttöön. Tällaisia voivat olla esimerkiksi muutokset väestörakenteessa, elinkeinoelämässä, rakennuskannassa tai ihmisten ajatustavoissa. Sähkökulutukseen vaikuttavia tekijöitä on esitetty tarkemmin taulukossa 1. Kukin näistä voi lisätä tai vähentää sähkökäyttöä tai muuttaa sen profiilia. Kun nykyiseen sähkökäyttöön lisätään näiden muutostekijöiden vaikutukset, saadaan arvio tulevaisuuden sähkökäytöstä. [4]

Sähkökäytön skenaario =

Nykyinen sähkökäyttö

- ± Uudisrakentamisen vaikutukset sähkökäyttöön
- ± Sähkön käytön muutokset nykyisissä käyttökohteissa
- ± Uusi tuotanto ja uudet sähkökäyttökohteet

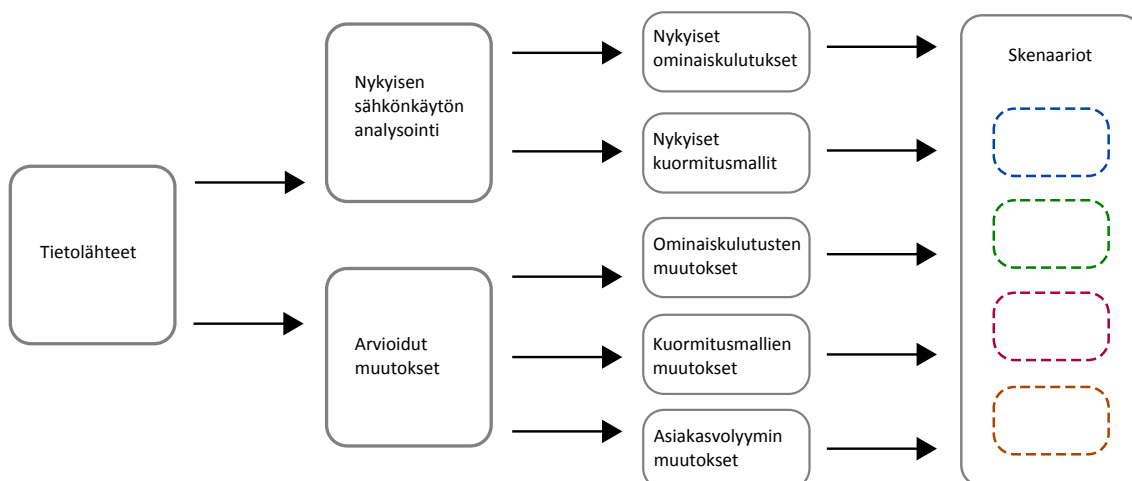
Kuva 16: Skenarioinnin lähtökohtana on nykyinen kulutus. Siihen lisätään muutostekijöiden vaikutukset, jotka voivat olla joko positiivisia tai negatiivisia. [4]

Koko ennustusprosessin kulku on kuvattu kuvassa 17. Historiallisesta kulutusdatasta voidaan analysoida nykyiset asiakasryhmäkohtaiset ominaiskulutukset sekä kuormitusmallit. Näitä käytetään lähtötietoina tulevaisuuden sähkökäytön mallintamisessa. Lisäksi lähistorian kulutusdatasta voidaan analysoida ominaiskulutusten muutostrendejä ja mahdollisia kuormitusmallien muutoksia. Näille voidaan

Taulukko 1: Sähkönkäyttöön lisäävästi tai vähentävästi vaikuttavia tekijöitä. [6] [4]

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

tehdä erilaisia skenaarioita, joiden perusteella nykyisiä ominaiskulutuksia ja kuormitusmalleja muokataan. Kokonaan uudentyyppiselle kulutukselle tai tuotannolle voidaan myös muodostaa täysin uusi kuormitusmalli. Asiakasvolyymin muutoksia puolestaan voidaan ennustaa asiakasryhmäkohtaisten rakentamisennusteiden perusteella. Myös uudisrakentamiselle voidaan tehdä useita erilaisia skenaarioita. Lopuksiin sähkönkäyttöskenaarioihin päästään yhdistämällä nykyiseen sähkönkäyttöön halutut muutosskenaariot ja asiakasvolyymin muutokset.



Kuva 17: Tämän diplomityön simulointimenetelmän rakenne

7.1 Uudisrakentaminen

Uudisrakentamista arvioidaan simulointimenetelmällä käyttämällä hyväksi rakentamisennustetta. Rakentamisennuste vuoteen 2030 saakka saadaan kaupungilta, ja siinä on kuvattu kaupunginosa-alueittainen, vuosittain valmistuva kerrosala asumiselle sekä toimitiloille. Tätä ennustetta voidaan lisäksi täydentää uusimpien tietojen perusteella. Tässä työkalussa asumisen kerrosala on jaettu manuaalisesti kahdelle asiakasryhmälle: sähkölämmitetylelle asumiselle sekä muulla tavalla lämmitetylelle asumiselle. Toimitilojen ennuste on puolestaan jaettu samalla tavalla palveluihin ja

teollisuuteen.

Uudisrakentamisen aiheuttamaa muutosta alueen vuosienergiiaan mallinnetaan ominaiskulutuksen avulla. Asiakasryhmäkohtaiset ominaiskulutukset on esitelty luvussa 6.3. Vuosikulutuksen muutos saadaan siis kertomalla kunkin asiakasryhmän lisääntynyt kerrosneliömäärä kyseisen asiakasryhmän ominaiskulutuksella.

Lopuksi vuosienergiasta päästään vielä hetkittäisiin tehoihin käyttämällä hyväksi luvussa 6.4 määriteltyjä kuormitusmalleja. Asiakasryhmäkohtaisia kuormitusmalleja skaalataan vuosittaisilla, kaupunginosa-aluekohtaisilla energian muutoksilla ja nämä summakäyrät lisätään nykyiseen sähkönkäyttöön. Näin saadaan arvio tulevasta vuosittaisesta sähkönkäytöstä alueittain.

7.2 Sähkönkäytön muutokset nykyisissä käyttökohteissa

Asiakkaiden sähkönkäyttö ei pysy täysin vakiona, vaan muuttuu aikojen saatossa, joten pitkän aikavälin ennustamisessa tämä on otettava huomioon. Kulutuskäyttäytymiseen vaikuttavat esimerkiksi ihmisten asenteiden muutokset sekä laitteiden energiatehokkuuden parantuminen.

Poliittinen paine vähentää kasvihuonekaasupäästöjä parantamalla rakennusten energiatehokkuutta on kova. EU on asettanut yhteiseksi tavoitteeksi energiatehokkuuden 20 prosentin parantamisen vuoteen 2020 mennessä [35]. Aikaisemmin Suomessa uusiin rakennuksiin vaadittu energiatodistus vaaditaan nyt myös vanhoihin rakennuksiin myynnin tai vuokrauksen yhteydessä. Tämän on tarkoitus helpottaa rakennusten energiatehokkuuden vertailua ja näin kannustaa parempaan remontointiin. Lisäksi Suomen rakentamismääräyskokoelmaan on lisätty kohta, jonka mukaan vuoden 2020 loppuun mennessä kaikkien uusien rakennusten tulee olla lähes nollaenergiarakennuksia. [36]

Suuri vaikutus rakennusten ominaiskulutukseen on myös lämmitystavan muutoksilla. Esimerkiksi lämpöpumput yleistyvät tällä hetkellä pientalojen lämmitysmuotona varsin nopeasti [34] ja niiden suosio jatkaa kasvuaan. Hannu-Pekka Hellman on tehnyt diplomityössään [6] skenaarioita lämpöpumppujen vaikutuksesta pientalovaltaisten alueiden tulevaisuuden sähkönkäyttöön Helsingissä. Maalämmön yleistyminen näyttäisi kasvattavan alueen vuosienergiaa hieman verrattuna skenaarioon, jossa maalämpö ei lisäänty. Huipputeho sen sijaan vaikuttaisi pienentyvän lämpöpumppujen vaikutuksesta.

Tämän työn skenariointityökalussa sähkönkäytön pitkän aikavälin muutoksia kuvataan muuttamalla ominaiskulutusta. Esimerkiksi laitteiden hyötysuhteiden parantamista voidaan kuvata pienentämällä ominaiskulutusta ja uusien laitteiden lisääntymistä voidaan kuvata nostamalla ominaiskulutusta. Eri asiakasryhmien ominaiskulutuksen muutostrendejä on analysoitu alaluvussa 6.3. Esimerkiksi sähkölämmitettyjen asuntojen ominaiskulutus on viimeisen kymmenen vuoden ajan laskenut keskimäärin 2 kWh/ke-m^2 vuodessa.

Kulutuksen ajallisen vaihtelun muutoksia voidaan puolestaan kuvata muuttamalla olemassa olevia kuormitusmalleja. Esimerkiksi sähkölämmitettyjen kotitalouksien kulutuksen iltapiikki johtuu aikatariffin yösähkön alkamisesta, joten tariffin muuttaminen voi siirtää piikkiä tai poistaa sen kokonaan. Tässä diplomityössä kuormi-

tusmalleja ei muutettu, vaan niiden oletettiin pysyvän muuttumattomina.

7.3 Uusi tuotanto ja uudet sähkökäyttökohteet

Sähkönkulutus voi muuttua radikaalisti täysin uudenlaisten teknologioiden käyttöönoton myötä. Tällaisesta hyvä esimerkki voisi olla sähköautojen nopea yleistyminen. Suuri määrä sähköautoja lisäisi sähkönkulutusta erittäin huomattavasti ja mikäli niiden latauksessa ei käytettäisi lainkaan älykkäitä ratkaisuja, ne aiheuttaisivat myös huomattavia piikkejä kulutukseen. Työkalulla pitäisikin pystyä skenarionimaan myös tällaisia epätodennäköisiä, mutta suuresti kulutukseen vaikuttavia muutoksia.

Sähkökäytön muutosten huomioimiseksi voidaan muuttaa olemassa olevia ominaisuuksia ja käyriä [37]. Esimerkiksi sähköautojen aiheuttama kulutuksen lisäys päivisin voitaisiin sisällyttää palveluiden ja teollisuuden kuormitusmalleihin, sillä ihmiset lataavat autoaan päivisin töissä. Illan muutos voitaisiin puolestaan mallintaa asumisen kuormitusmalleja muuttamalla. Tällöin kuitenkin sähköautojen lisääntyminen muuttaa käyrää, joten jokaiselle ennustevuodelle täytyisi tehdä oma käyrä, jonka muoto riippuisi sähköautojen määrästä. Lisäksi usean muutoksen aiheuttama yhteisvaikutuksen mallintaminen on vaikeaa.

Toinen vaihtoehto on tehdä muutokselle oma käyrä [38], joka lisätään olemassa olevan sähkökäytön päälle. Tämä lisättävä käyrä voisi sisältää myös negatiivisia arvoja, jos kulutuksen odotetaan vähenevän. Sähköautoille voidaan luoda oma käyrä, jota skaalataan autojen määrällä ja joka lisätään ennusteeseen. Toisaalta tämä käyrä saattaa olla erilainen eri alueella, johtuen asiakasryhmien erilaisesta jakaumasta. Alueita voitaisiin kuitenkin tyypittää, jolloin käyrien määrä pysyy huomattavasti pienempänä kuin edellisessä vaihtoehdossa.

Tässä työssä on päädytty käyttämään jokaiselle muutokselle omaa käyrää, joka voidaan lisätä olemassa olevaan sähkökäyttöön. Tämä helpottaa usean tekijän yhtäaikaisen muutoksen mallintamista. Lisäksi kunkin tekijän vaikutus saadaan summakäyrästä takaisin erilleen, toisin kuin olemassa olevaa käyrää muutettaessa.

Sähköautot

Sähköautojen yleistymisen voi aiheuttaa huomattavia muutoksia sähkönkulutukseen. Erityisesti osa täysin ohjaamattomasta latauksesta ajoittuisi ilta-aikaan, jolloin sähkökäyttö on muutoinkin suurimmillaan. Tämä kasvattaisi kulutuspiikkiä huomattavasti. Sähköautojen sähkökäytön mallintaminen on haastavaa, sillä yhtä autoa voidaan ladata useassa eri paikassa jopa saman päivän aikana.

Sähköautojen yleistymisen riippuu hyvin monesta tekijästä, joten niiden määrää on erittäin vaikeaa ennustaa. Sähköautoteknologia on varsin nuorta, ja sen suorituskyvystä ei ole vielä varmaa tietoa. Tällä hetkellä suurin este sähköautojen nopealle yleistymiselle on vaadittavien akkujen kapasiteetin pienuus suhteessa akkujen koon, painoon ja hintaan. Sähköautojen kilpailukykyyn vaikuttaa radikaalisti öljyn hinta suhteessa sähkön hintaan. Lisäksi useat maat ovat poliittisilla päätöksillä antaneet verohelpotuksia vähäpäästöisille autoille, kuten sähköautoille. Myös tällaiset poliittiset päätökset vaikuttavat huomattavasti sähköautojen yleistymiseen.

Vuonna 2013 Suomessa rekisteröitiin noin 102 000 uutta henkilöautoa, joista 50 oli sähkökäyttöisiä autoja ja 168 ladattavia hybridautoja [39]. Sähkökäyttöisiä autoja oli siis hieman yli 0,2 prosenttia uusista autoista, joten ainakaan vielä sähköautot eivät ole saavuttaneet suurta suosiota. Sähköautojen latausinfrastruktuuria on kuitenkin alettu jo kehittää ja Suomessa onkin jo 104 julkista sähköautojen latauspistettä. Näistä 19 sijaitsee Helsingissä ja 21 Vantaalla [40].

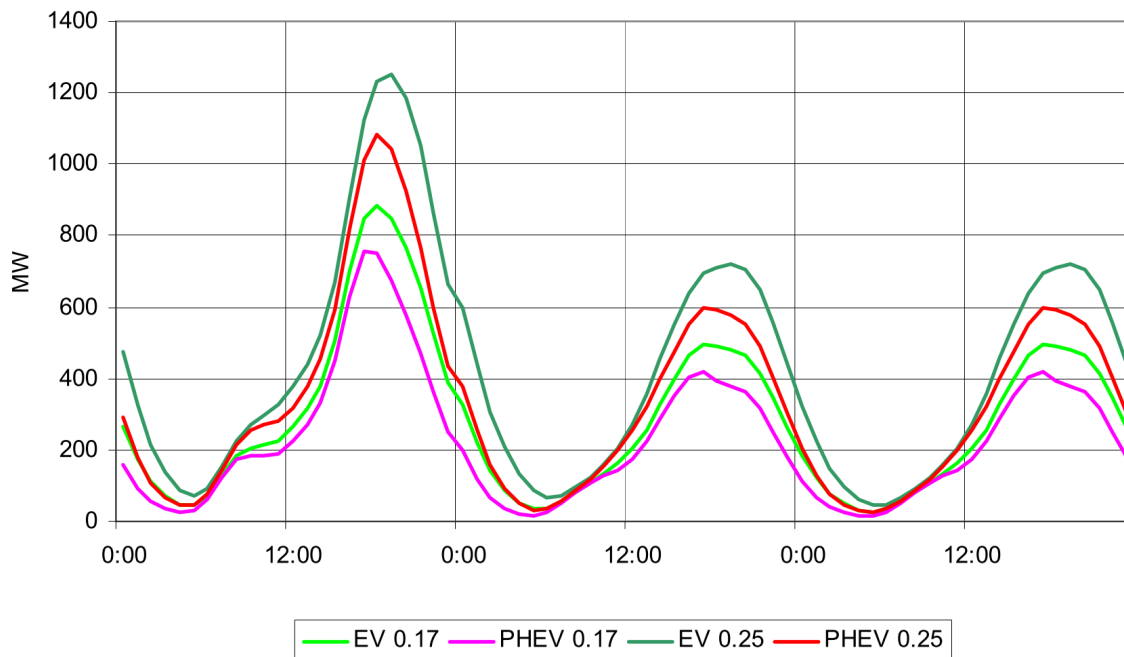
Työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) vuonna 2009 teettämän selvityksen [41] mukaan sähköautojen arvioitu osuus uusista autoista on Suomessa 3 prosenttia vuonna 2020 ja 20 prosenttia vuonna 2030. Lisäksi ladattavia hybridejä olisi uusista autoista 10 prosenttia vuonna 2020 ja 50 prosenttia vuonna 2030. Tämän perusskenaarion lisäksi ministeriön selvityksessä on määritelty nopeutetut ja hidastetut skenaariot sähköautojen yleistymiselle. Lisäksi Antti Alahäivälä on diplomityössään [42] arvioinut skenaarioiden vaikutuksia sähköautojen ja ladattavien hybridien osuuksiin Suomen autokannasta. Skenaariot on esitelty tarkemmin taulukossa 2.

Taulukko 2: Työ- ja elinkeinoministeriön selvityksen kolme skenaariota ladattavien hybridien (PHEV) ja täyssähköautojen (EV) osuuksista uusista autoista, kumulatiivisista myyntimääristä ja osuuksista henkilöautokannasta Suomessa vuosina 2020 ja 2030 [41] [42]

Skenaario	Vuosi	Osuus uusista autoista [%]		Kumulatiivinen myyntimäärä [kpl]		Osuus henkilöautoista [%]	
		PHEV	EV	PHEV	EV	PHEV	EV
Perus	2020	10	3	66 000	13 000	2	0,3
	2030	50	20	480 000	160 000	9	3
Nopea	2020	40	6	190 000	26 000	5	0,7
	2030	60	40	960 000	450 000	17	8
Hidas	2020	5	2	38 000	12 000	1	0,3
	2030	20	10	207 000	92 000	4	2

Sähköautojen vaikutus sähkönkulutukseen riippuu huomattavasti latauksen ohjauksesta. VTT:n selvityksessä [43] on arvioitu, että jos puolet Suomen autoista käyttäisi käyttövoimanaan pääasiassa sähköä, Suomen sähkön kulutus nousisi noin 2,8 terawattituntia, eli noin 3 prosenttia. Ilman minkäänlaista ohjausta suurin osa tästä kulutuksesta ajoittuisi kuitenkin ilta-aikaan, eli samaan aikaan nykyisen kulutuspiikin kanssa. Sähköverkolle kokonaisenergian kasvua haitallisempia olisivatkin latauksen aiheuttamat tehopiikit. Verkkoyhtiön kannalta tilanne olisi huomattavasti parempi, jos autoja ladattaisiin alhaisemman kulutuksen aikaan. Tämä tarkoittaisi esimerkiksi sähköautojen latauksen viivästämistä illalla tehohuipun ajan yli. Kuluttajille tämä aiheuttaisi kuitenkin vaivaa, joten heille pitäisi tarjota jotakin hyötyä latauksen ajoittamisesta pienemmän kulutuksen hetkiin. Mikäli tulevaisuudessa myös sähkön kuluttajahinnoittelussa käytetään tunneittaisia markkinahintoja, voisi tämä ohjata kulutusta halvemmille tunneille. Toisaalta sähköauton käyttö on niin edullista, että säästö olisi kuluttajalle vain muutamia kymmeniä euroja vuodessa.

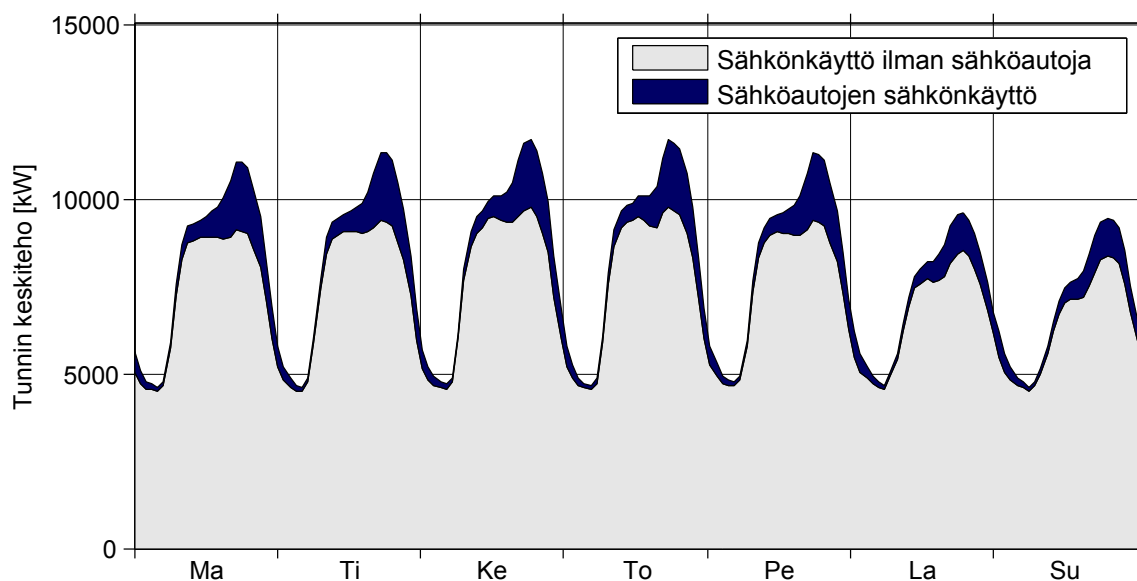
VTT:n selvityksessä [43] on myös arvioitu erilaisten sähköautojen aiheuttamat kuormitusmallit systeemitasolla. Ne on esitetty kuvassa 18. Jokainen kuvan käyristä vastaa siis miljoonan kyseisen tyyppin auton lataustarvetta. Hybridien oletetaan kuluttavan täyssähköautoja vähemmän energiaa per auto, sillä ne käyvät osittain bensiinin voimalla. Huippukulutus osuu arkipäivien iltoihin, ajalle, jolloin ihmiset pääsevät kotiin töistä, kaupasta ja harrastuksista. Tämä johtuu oletuksesta, että suurin osa ihmisistä lataa autojaan vain kotona.



Kuva 18: Miljoonan tietyn tyyppisen sähköauton sähkökäyttö systeemitasolla arkena, lauantaina ja sunnuntaina, olettaen että lataus alkaa heti auton liittyessä sähköverkkoon. 0.17 viittaa 0,17 kilowattitunnin kilometrikulutukseen, joka vastaa tavallista sähköhenkilöautoa. 0.25 puolestaan viittaa 0,25 kilowattitunnin kilometrikulutukseen, joka vastaa sähköisen maastoauton kulutusta. [43]

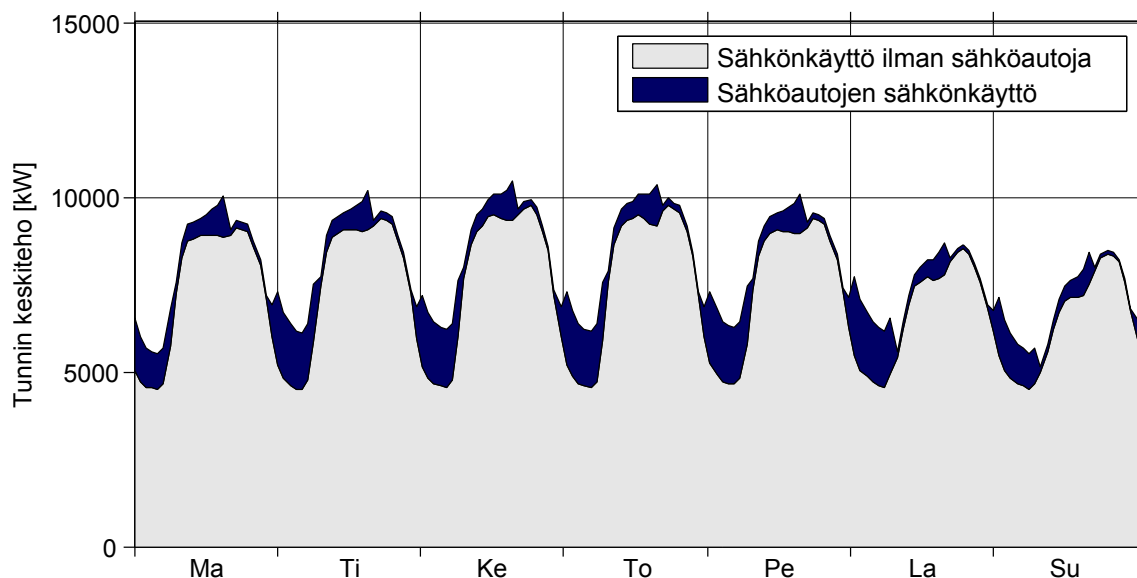
Sähköautojen vaikutusta alueelliseen sähkökäyttöön arvioitiin tässä työssä Etu-Töölön alueella (Kuva 19). Etu-Töölössä on hyvin monipuolisesti erilaisia kuluttajia, joten systeemitason käyrää voidaan soveltaa sähkökäytön muutosten arviointiin. Laskennassa on käytetty hyväksi VTT:n selvityksen [43] sähköautojen indeksisarjaa. Työssä tarkasteltiin tilannetta, jossa puolet autoista olisi joko ladattavia hybridejä tai sähköautoja. Helsingissä on liikennekäytössä 337 henkilöautoa tuhatta asukasta kohti [44] ja Etu-Töölön väkiluku on 14 110 henkilöä, joten autoja arvioitiin olevan 4 755 kappaletta. Ladattavia hybridejä oletettiin olevan 33 % ja täyssähköautoja 17 % kaikista autoista. Kummankin tyyppisten autojen oletettiin kuluttavan 0,17 kWh energiaa kilometrillä. Lisäksi VTT:n mallissa oletetaan, että alueella ladataan päivisin työpaikoilla sama määrä autoja kuin iltaisin kodeissa.

Etu-Töölön huipputeho kasvoi puolen autokannan muuttuessa sähköautoiksi 9,8 megawattista 11,8 megawattiin, eli noin 20 prosenttia. Tämä on huomattavasti enem-



Kuva 19: Etu-Töölön sähkönkäytön muutos, jos puolet alueen autoista olisi sähköautoja tai ladattavia hybridejä

män kuin VTT:n arvio systeemitason vaikutuksesta [45]. VTT:n raportissakin kuitenkin todetaan, että alueelliset vaikutukset voivat olla systeemitason vaikutuksia suurempia. On myös huomattava, että Etu-Töölö on varsin tiheästi asuttua kerrostaloaluetta, joten sähköautojen aiheuttama verkkovaikutus on siellä keskimääräistä aluetta suurempi.



Kuva 20: Etu-Töölön sähkönkäytön muutos, jos puolet alueen autoista olisi sähköautoja tai ladattavia hybridejä ja niiden latausta viivästetään suurimman iltakuormituksen yli

Mikäli sähköautojen kulutus olisi mahdollista ajoittaa älykkään latauksen avulla pienemmän kulutuksen tunneille, olisi vaikutus huipputehoon huomattavasti pienempi. Älykkään latauksen vaikutusta Etu-Töölön tapauksessa on arvioitu kuvassa 20. Kuvassa on oletettu, että 90 % autoista ei aloita lataamista heti kello 16 ja 23 välillä, vaan lataus ohjataan tasaisesti koko yön ajaksi, eli kello 24 ja 6 välille. Muina aikoina autot lataavat heti kun ne kytketään verkkoon. Näinkin yksinkertaisella ohjauksella huipputeho on noin 10,5 megawattia, eli yli yhden megawatin pienempi kuin ilman ohjausta. Ohjauksen kanssa puolen autokannan muuttaminen sähköautoiksi lisää huipputehoa Etu-Töölössä noin seitsemän prosenttia.

Myös Antti Alahäivälä on mallintanut diplomityössään [42] sähköautojen vaikutusta eräiden pääkaupunkiseudun jakelumuuntajien kuormituksiin. Alahäivälän mukaan sähköautojen 10 prosentin penetraatioaste ei vielä lisää huippukuormitusta merkittävästi. Suuremmilla penetraatioilla asiakkaiden asiakasryhmä vaikuttaa huomattavasti huipputehon muutokseen. Alahäivälän mukaan suurin vaikutus latauksella on sellaisiin jakelumuuntajiin, joiden syöttämässä verkossa ei ole sähkölämmityksen eri muotoja. Tällöin sähköautojen latauskuorma osuu samaan aikaan alueen huippukuormituksen kanssa. Suurimmalla osalla jakelumuuntajista kuormitus ei noussut juurikaan edes suureholla sähköautojen määrällä, mutta kolmella muuntajalla viidestätoista huipputeho kasvoi 50 prosentin sähköautopenetraatiolla ilman ohjausta jopa 50 %. Latauksen viivästämisellä tai ohjaamisella sähkön hinnan mukaan oli joissain tapauksissa suotuisa ja joissain tapauksissa epäsuotuisa vaikutus kuormituspiikkiin. Lähinnä ongelmana oli suuri piikki kaikkien sähköautojen kulutuksen kytkeytyessä yhtä aikaa päälle, mikä voitaisiin välttää porrastamalla latauksen aloitusta.

Hajautettu sähköntuotanto

Hajautetulla sähköntuotannolla tarkoitetaan sellaista tuotantomallia, jossa sähköä tuotetaan pienikokoisissa ja -tehoisissa voimalaitoksissa lähellä kulutuspisteitä. Sähkön siirtotarpeen kannalta tämä eroaa huomattavasti nykyisestä, keskitetystä mallista. Siinä energiantuotanto on keskitetty suuriin voimalaitoksiin, josta sähkö siirretään hyvin pitkiäkin matkoja aina kuluttajille asti. Hajautetun tuotannon yleistyminen aiheuttaisi siis suuria muutoksia sähkönsiirtotarpeeseen.

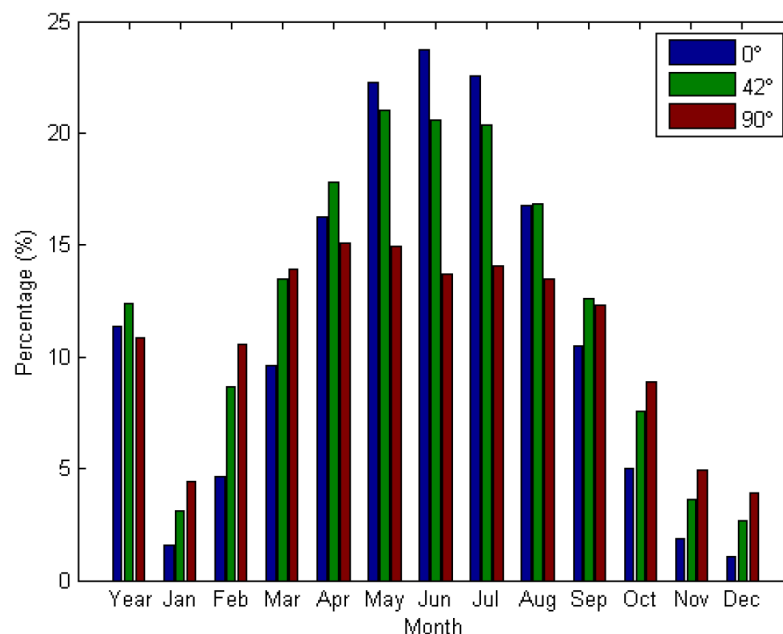
Poliittinen ilmapiiri on tällä hetkellä hyvin suotuisa hajautetulle tuotannolle. Ilmastomuutosta pyritään torjumaan vähentämällä hiilidioksidipäästöjä, mikä tapahtuu esimerkiksi ottamalla käyttöön entistä enemmän uusiutuvia energianlähteitä. Ne taas soveltuvat erityisen hyvin hajautettuun tuotantoon. Kaikki hajautettu tuotanto ei kuitenkaan tarkoita uusiutuvaa energiantuotantoa, vaan pienimuotoisesti voidaan tuottaa sähköä myös esimerkiksi kaasu- tai dieselmootoreilla. Usein muilla kuin uusiutuvilla pientuotantomuodoilla tuotetaan sähkön lisäksi yhteistuotannossa lämpöä (CHP), jolloin niiden hyötysuhde on pelkkää sähköntuotantoa huomattavasti parempi. [46]

Hajautetun tuotannon energianlähteitä ja pienimuotoisen yhteistuotannon tekniikoita ovat [47]:

- Uusiutuvat energianlähteet:

- tuulivoima
 - pien- ja minivesivoima
 - aurinkosähkö ja -lämpö
 - lämpöpumput
 - biomassakattilat
- Pienimuotoinen yhteistuotanto (CHP):
- kaasu- ja dieselmoottorit
 - mikroturbiinit
 - stirling-moottorit
 - polttokennot
 - höyryturbiinit ja -koneet

Suomessa merkittävimmät pienimuotoiset sähköntuotantomuodot ovat pienvesivoima, tuulivoima, aurinkosähkö ja bioenergia. Täsmällisiä tietoja hajautetun tuotannon määrästä ei kuitenkaan ole saatavilla. Suomessa ei ole voimakkaasti taloudellisesti tuettu pientuotantoa, joten määrä on vähäisempi kuin sellaisissa maissa, joissa taloudellinen tuki hajautetulle tuotannolle on ollut merkittävämpää. [48]



Kuva 21: Keskimääräinen aurinkopaneelin energiantuotto verrattuna nimellistehoon [49]

Kaupunkiolosuhteissa helppoihin käyttöönotettava energianlähde on aurinkosähkö. Aurinkopaneelit ovat kompakteja ja niitä voidaan helposti asentaa esimerkiksi

rakennusten katoille ja seiniin. Tällä hetkellä aurinkosähkön hinta ei ole kilpailukykyinen sähkön markkinahintaan verrattuna, mutta aurinkosähkön hinta on laskenut tasaisesti ja sen oletetaan jatkavan laskuaan myös pitkällä tähtäimellä [47]. Eduskunnan tulevaisuusvaliokunnan teettämän selvityksen [50] mukaan aurinkoenergian nopea halventuminen on yksi tärkeimmistä radikaaleista teknologisista kehityskuluista lähitulevaisuudessa. Selvityksen mukaan aurinkopaneelien keskihinta on laskenut keskimäärin seitsemän prosenttia vuosittain viimeisen kolmenkymmenen vuoden ajan. Yhdysvalloissa paneelien tuotantokustannuksien arvellaan alittavan sähkön jälleenmyyntihinnan vuonna 2018. Selvityksen mukaan hinnan uskotaan laskevan tämän jälkeenkin, minkä seurauksena kuluttajat asentavat aurinkopaneeleja kiihtyvässä määrin aiheuttaen merkittäviä vaikutuksia sähkön siirtotarpeeseen ja sen vaihteluun.

Suomen olosuhteissa aurinkosähkön tuotannossa on kuitenkin merkittävää kuukausittaista vaihtelua vuodenajan mukaan. Kuvassa 21 on esitetty aurinkopaneelien keskimäärin tuottaman energian kuukausittaista vaihtelua Helsingin korkeudella. Talvikuukausina aurinkopaneelien tuottama energiamäärä jää hyvin pieneksi, joten talven huippukuormituksen aikana aurinkopaneelilla tuskin on suurta merkitystä verkon kuormituksen kannalta. Kesäaikaan vaikutus on huomattavasti merkittävämpi.

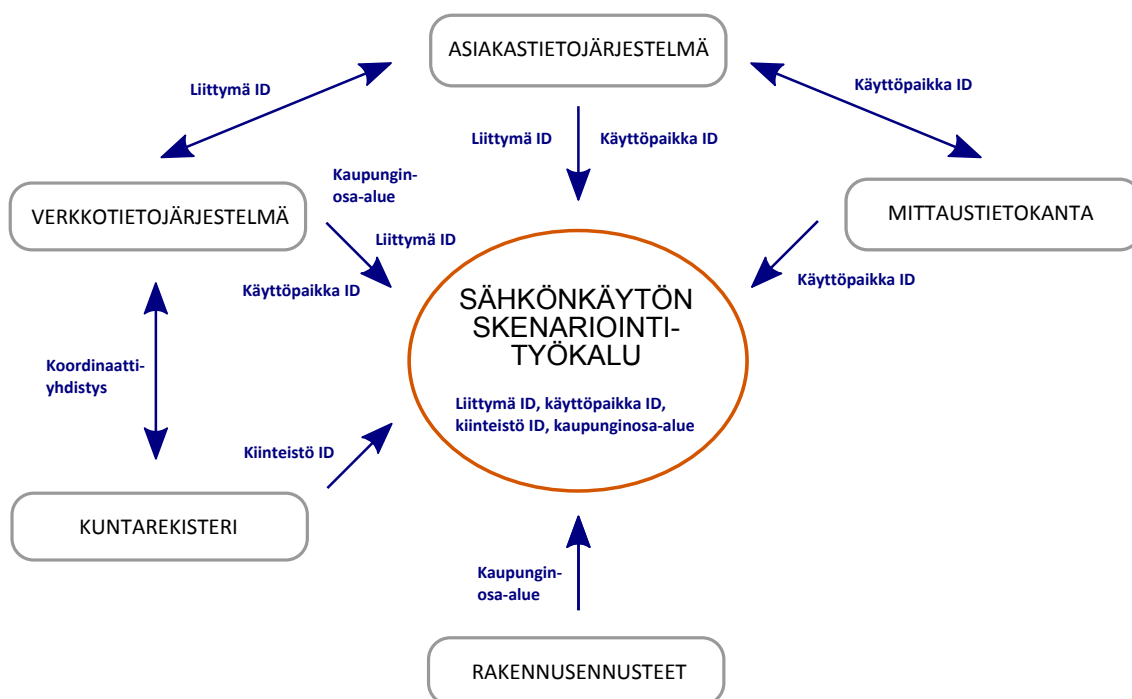
8 Skenariointityökalu

Tässä työssä kehitettiin työkalu alueellisen sähkönkulutuksen muutosten tutkimiseksi. Työkalun avulla voidaan tehdä erilaisia skenaarioita rakentamisesta ja ominaiskulutuksen muutoksista sekä tarkastella näiden vaikutuksia alueelliseen sähkönkäyttöön.

Työkalu toteutettiin Matlab-ohjelmistolla. Tämä valinta tehtiin siksi, että suurien datamäärien käsittely on Matlabilla nopeaa ja melko tehokasta. Ohjelmistoon on myös saatavilla Mapping Toolbox -työkalu, jonka avulla voidaan käsitellä HSV:n olemassa olevia kartta-aineistoja sekä havainnollistaa skenarionnin tuloksia helposti kartalla. Lisäksi Matlabin avulla voidaan tehdä käyttöliittymiä melko yksinkertaisesti. Näiden ominaisuuksien ansiosta datan käsittely, skenaarioiden valinta sekä tulosten visualisointi kartalla voidaan toteuttaa samalla ohjelmalla, jolloin ei tarvita rajapintoja useiden ohjelmistojen välillä. Tämä helpottaa toteutusta huomattavasti.

8.1 Tietolähteiden yhdistäminen

Nykyaikaisissa sähkönkäytön ennustamisen työkaluissa käytetään useista järjestelmistä hankittuja lähtötietoja. Tämän diplomityön puitteissa tehdyn skenarointityökalun käyttämiä tietolähteitä on esitelty luvussa 5. Näiden tietolähteiden yhdistäminen työkalua varten on kuvattu kuvassa 22.



Kuva 22: Tietolähteiden yhdistäminen skenarointityökaluun ja niitä yhdistävät tiedot

Työkalun lähtötietoina on käytetty verkkotietojärjestelmästä saatua liittymäli-

taa, jossa on myös lueteltu liittymään kuuluvat sähkökäyttöpaikat. Käyttöpaikkameroiden avulla liittymä saadaan yhdistettyä Generis-järjestelmästä haettuihin kulutuksen historiatietoihin. Asiakastietojärjestelmästä saadaan puolestaan käyttöpaikkanumeron avulla asiakkaan asiakasryhmä. Liittymät ja käyttöpaikat saadaan puolestaan kohdistettua alueille verkkotietojärjestelmästä löytyvän kaupunginosa-alue tiedon perusteella.

Jotta voidaan tarkastella kerrosalakohtaisia ominaiskulutuksia, liittymän tiedot pitää vielä yhdistää kuntarekisteristä saataviin kerrosalatietoihin. Kuntarekisterin tiedot on yksilöity kiinteistö- ja rakennustunnuksilla, mutta näitä tietoja ei löydy Helsingin Sähköverkko Oy:n rekistereistä. Niinpä liittymätunnukset sekä kiinteistötunnukset on yhdistettävä toisiinsa jollakin muulla tavalla. Ville Rimali on diplomityössään [4] tutkinut menetelmiä tämän yhdistyksen tekemiseksi. Rimalin mukaan yleisin tapa yhdistää kiinteistöt liittymiin on osoitteen perusteella. Tämä ei kuitenkaan ole Helsingin tapauksessa toimivin tapa johtuen katujen risteyksissä sijaitsevien kulmatonttien osoitteiden eroavaisuuksista. Tässä työssä käytetäänkin Rimalin toteuttamaa menetelmää, jossa kiinteistöt ja liittymät yhdistetään toisiinsa koordinaattien perusteella.

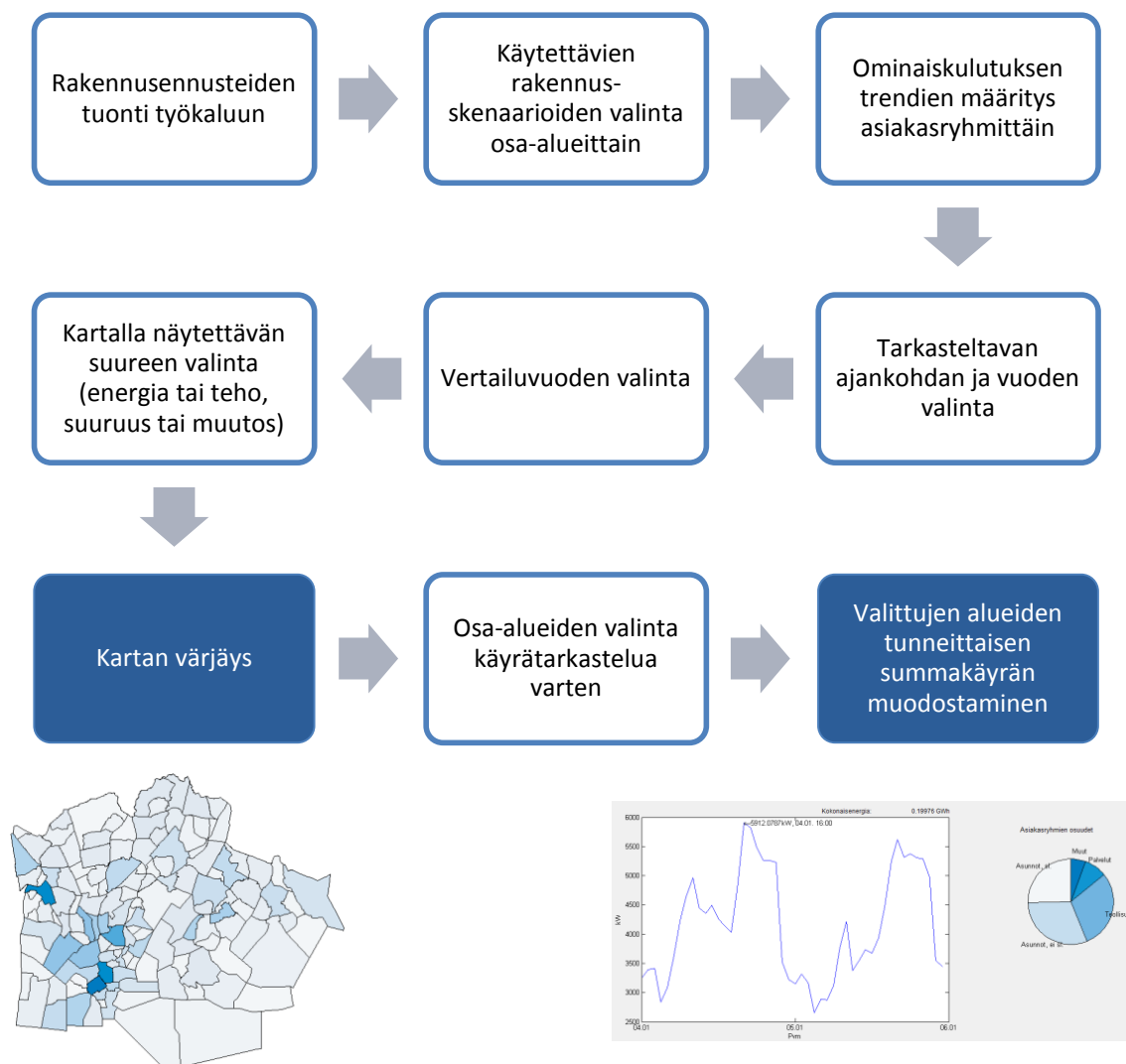
Tulevaisuuden rakentamisennusteet saadaan Helsingin kaupunkisuunnitteluvirastolta kaupunginosa-alueittain. Nämä tiedot on helppo yhdistää työkaluun, sillä kaupunginosa-alue tieto löytyy myös verkkotietojärjestelmästä. Ainoa haaste on se, että Helsingin kaupunki muutti osa-aluejakoa vuoden 2013 alussa ja ennuste on tehty ennen sitä, joten siinä käytetään vanhaa osa-aluejakoa. Muutoksessa neljä osaluuetta pilkottiin pienemmiksi ja lisäksi tehtiin pieniä rajamuutoksia. Niinpä ennusteen päivittämiseksi riittää poistuvien osa-alueiden kerrosalojen jakaminen uusien alueiden kesken, mikä voidaan tehdä manuaalisesti asiantuntijan toimesta.

8.2 Työkalun rakenne

Tässä työssä rakennettu työkalu toimii yksittäisellä pöytäkoneella, joten datan määrää on jouduttu tehonpuutteen takia hieman rajoittamaan. Asiakkaiden sähkökäytön historiatiedot viedään ohjelmaan alueittaisina summakäyrinä. Työkalua tehtäessä alueittaista AMR-dataa ei ollut saatavilla asiakasryhmittäin jaoteltuna. Lopullisessa työkalussa olisi tarkoitus käyttää asiakaskohtaisia tuntisarjoja, jotka voitaisiin lukea suoraan tietokannasta. Myös asiakasryhmäkohtaiset ominaiskulutukset on laskettu asiakastietojärjestelmän tietokanta-ajosta saatujen, liittymäkohtaisten vuosienergioiden perusteella. Ominaiskulutuksetkin olisi mahdollista laskea suoraan asiakaskohtaisesta tuntidatasta. Valmiiden summien käyttämisestä johtuen asiakasryhmittelyä ei ole mahdollista muuttaa helposti, vaan summat on laskettava uudella ryhmittelyllä uudestaan.

Työkalua varten on laskettu asiakasryhmäkohtaiset ominaiskulutukset sekä määritetty koko alueen asiakasryhmäkohtaisista summatuntisarjoista kuormitusmallit kaikille asiakasryhmille. Nämä on laskettu kerran ja määritetty valmiiksi ohjelmaan, jotta sen suorittaminen ei kestäisi liian kauan. Rakentamisennusteita täytyy pystyä muuttamaan, joten niitä varten on laadittu vakiomuotoinen excel-tiedosto, joka viedään työkaluun sen käyttöliittymän kautta.

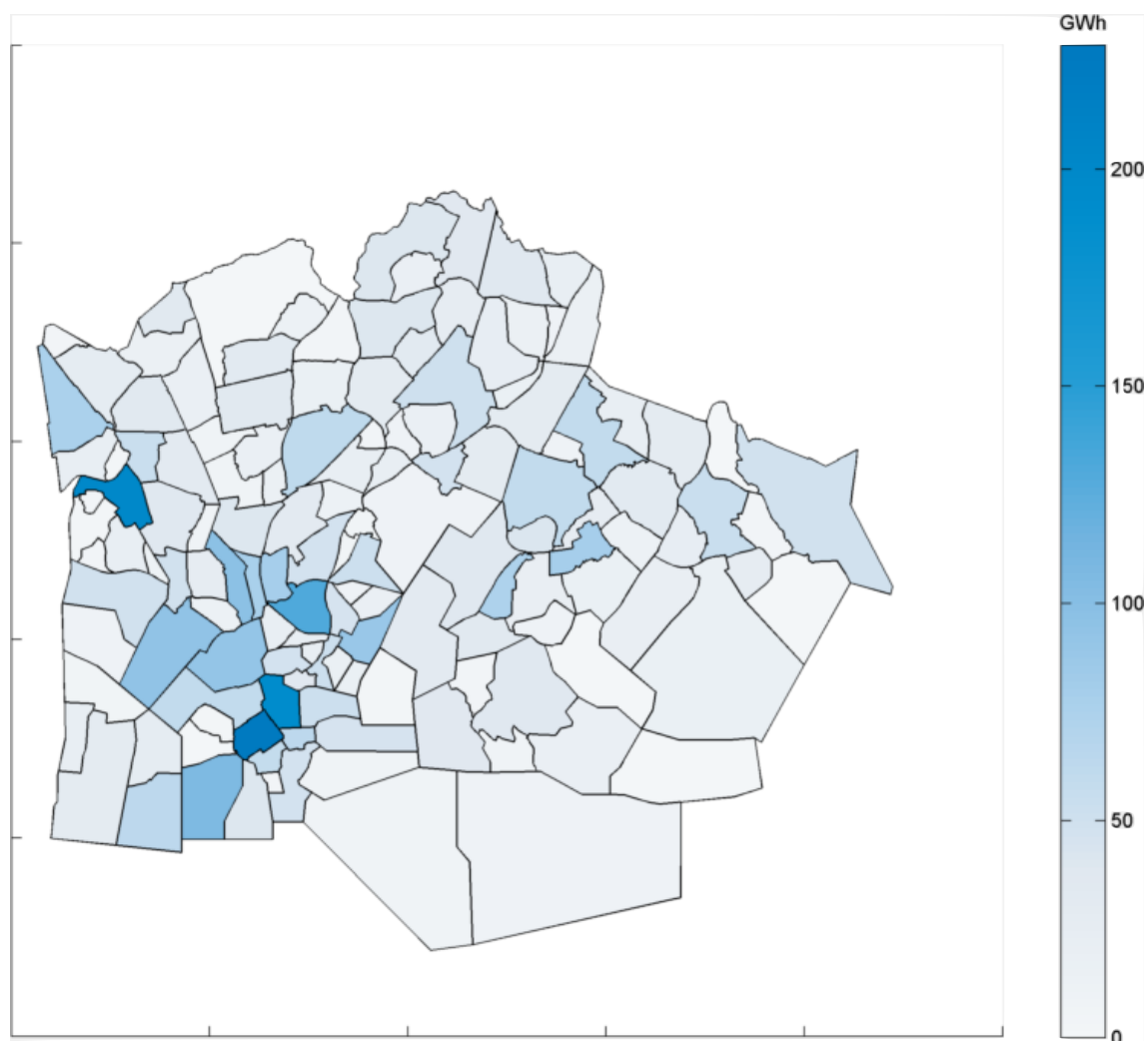
Työkalun käyttöliittymä koostuu kahdesta ikkunasta: pääikkunasta sekä aluekenaarioikkunasta. Käyttöliittymän ruutukaappauskuvat löytyvät liitteestä A. Karttaosan prosessikaavio on puolestaan esitetty kuvassa 23.



Kuva 23: Skenaariotyökalun prosessikaavio. Vaalealla pohjalla esitetyt vaiheet suorittaa käyttäjä ja tummalla pohjalla olevat vaiheet ohjelma suorittaa automaattisesti.

Pääikkunassa on Helsingin kartta, johon on piirretty kaupunginosa-alueiden rajat. Lisäksi ikkunassa on kohta, josta saadaan valittua, mitä rakentamisennustetiedostoa halutaan käyttää. Työkalu laskee annetun rakentamisennusteen perusteella sähkönkäyttöennusteen käyttäjän määrittelemällä aikavälillä ja vuotena, ja näyttää ennusteesta tietoja kartalla. Pääikkunasta saa valittua, halutaanko kartalla näyttää tarkasteltavan aikajakson energioita, huipputehoja vai niiden muutoksia vertailuvuoteen verrattuna. Muutokset voidaan myös näyttää joko absoluuttisina tai suhteellisina. Valintojen mukaan kartalla värjäytyvät tummemmiksi alueet, joilla on

suurin energia, teho tai muutos, käyttäjän tekemistä valinnoista riippuen.

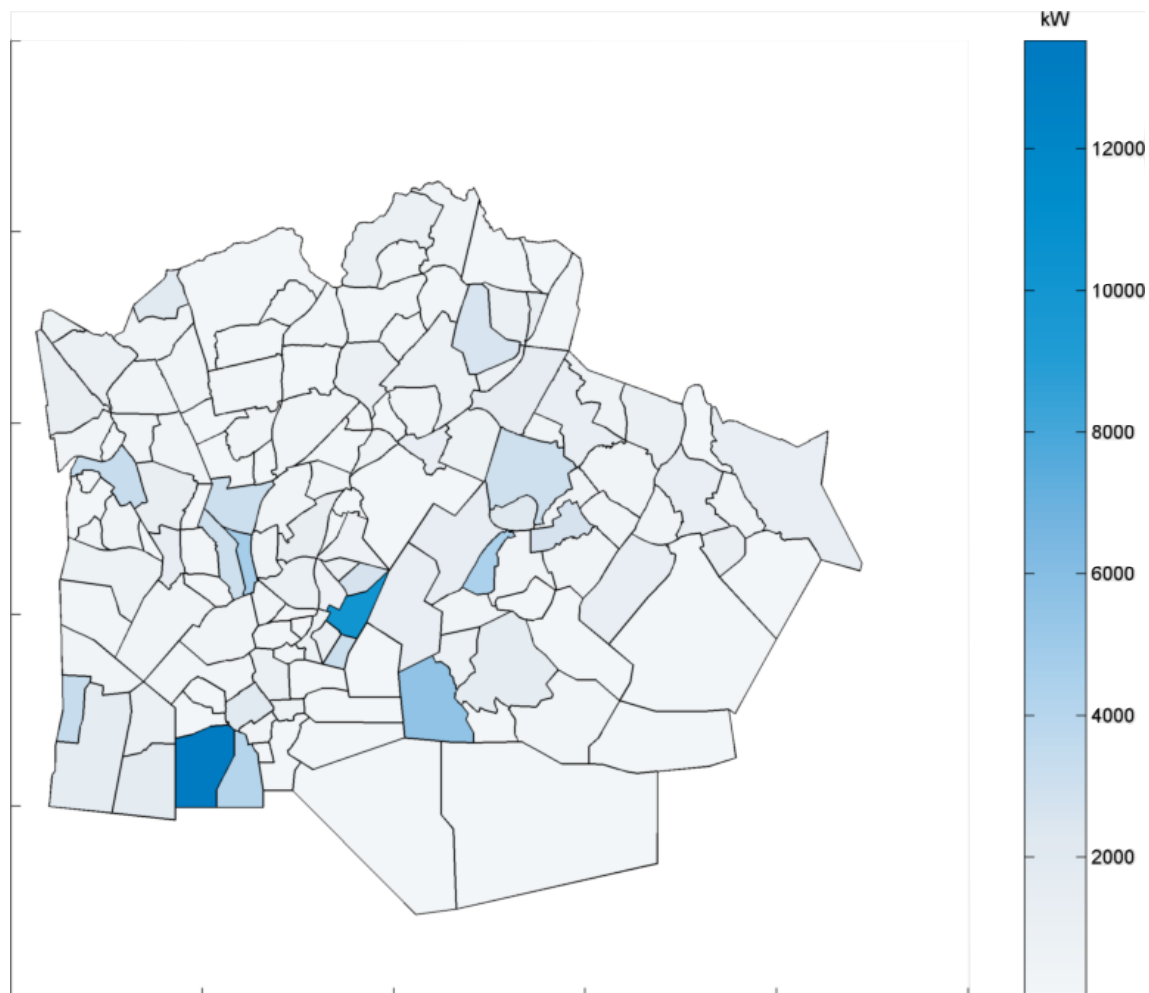


Kuva 24: Työkalun avulla muodostettu esimerkkiskenaario Helsingin kaupunginosa-alueiden vuosienergioista vuonna 2030

Käyttäjä voi valita pääikkunassa tähtäntyökalulla yhden tai useampia alueita kartalta tarkasteltavaksi lähemmin. Näistä työkalu piirtää kahteen kuvaajaan tunneittaiset kulutukset tarkasteltuna vuotena sekä käyttäjän määrittelemänä vertailuvuotena. Lisäksi ohjelma näyttää energian tai huipputehon jakautumisen eri asiakasryhmien kesken. Lisäksi toiseen kuvaajaan voidaan myös piirtää tunneittaisen kulutuksen erotus tarkasteltavan ja verrokkivuoden välillä.

Alueskenaarioikkunassa käyttäjä voi tehdä erilaisia skenaarioita alueiden sähkönkäytön kehittymisestä. Ikkuna aukeaa pääikkunasta nappia painamalla. Skenaarioikkunassa on kaikille kaupunginosa-alueille valinta, jolla voidaan määritellä, mitä kolmesta rakentamisennustetiedostossa määritellystä ennusteesta käytetään. Valintoja ovat hidas, perus, ja nopea. Näistä perusennuste vastaa Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston ennustetta. Hidas ja nopea ovat siitä omin kriteerein muokat-

tuja ennusteita. Skenaarioikkunassa käyttäjä voi myös määrittää olemassa olevan ja tulevan rakennuskannan asiakasryhmittäisen ominaiskulutuksen muutoksen prosentteina nykyiseen verrattuna. Näistä olemassa olevan kulutuksen muutos ei tässä versiossa vaikuta skenaarioon, sillä osa-aluekohtaista AMR-dataa ei tässä vaiheessa ollut saatavilla asiakasryhmittäin jaoteltuna. Lisäksi käyttäjä voi tallentaa valintansa ja työkalu muistaa tallennetut valinnat myös käynnistettäessä ohjelma kokonaan uudestaan.

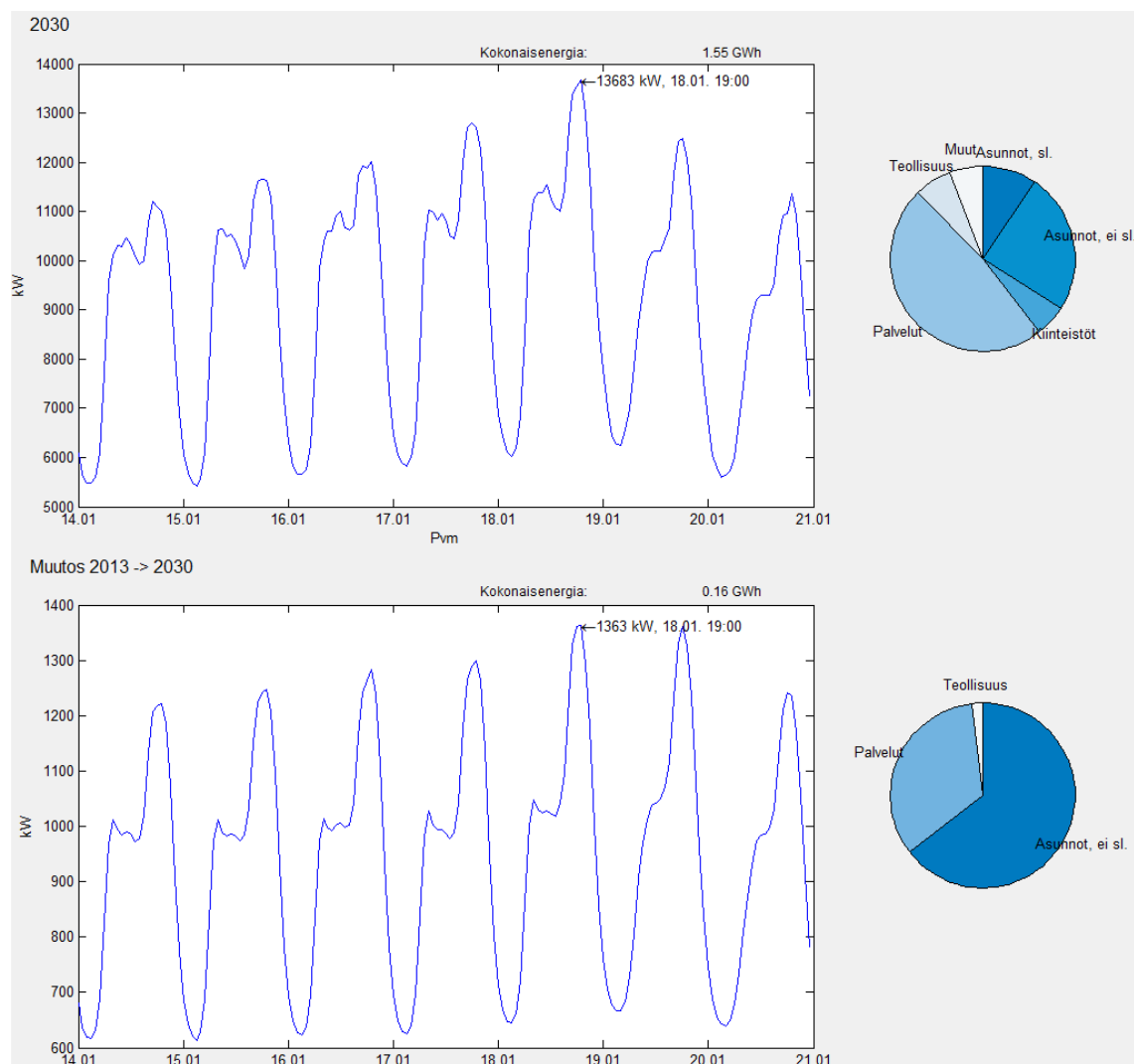


Kuva 25: Työkalun avulla muodostettu esimerkkiskenaario Helsingin kaupunginosa-alueiden huipputehojen muutoksista nykytilanteesta vuoteen 2030

8.3 Esimerkki työkalun käytöstä

Tässä aluvussa on esitelty työkalun toimintaa käytännössä. Työkalun avulla tehtiin esimerkkiskenaario Helsingin sähkönkäytöstä vuonna 2030. Kaikille kaupungin osa-alueille käytettiin kaupunkisuunnitteluvirastolta saatua rakentamisennustetta. Uusien kotitalousasiakkaiden oletettiin kaikkien olevan ei-sähkölämmitetyjä, sillä

suurimmalla osalla alueista ei ole lainkaan sähkölämmitysasiakkaita. Uusien toimittilojen oletettiin olevan 95-prosenttisesti palveluita ja 5-prosenttisesti teollisuutta. Olemassa olevan sähkönkäytön oletettiin tässä vaiheessa pysyvän muuttumattomana. Uusien ei-sähkölämmittäjien ja palveluiden ominaiskulutuksen oletettiin nousevan hieman ja teollisuuden ominaiskulutuksen pysyvän muuttumattomana. Kartta vuoden 2030 vuosienenergiosta on esitetty kuvassa 24 ja huipputehojen muutoksista nykytilanteesta vuoteen 2030 kuvassa 25.



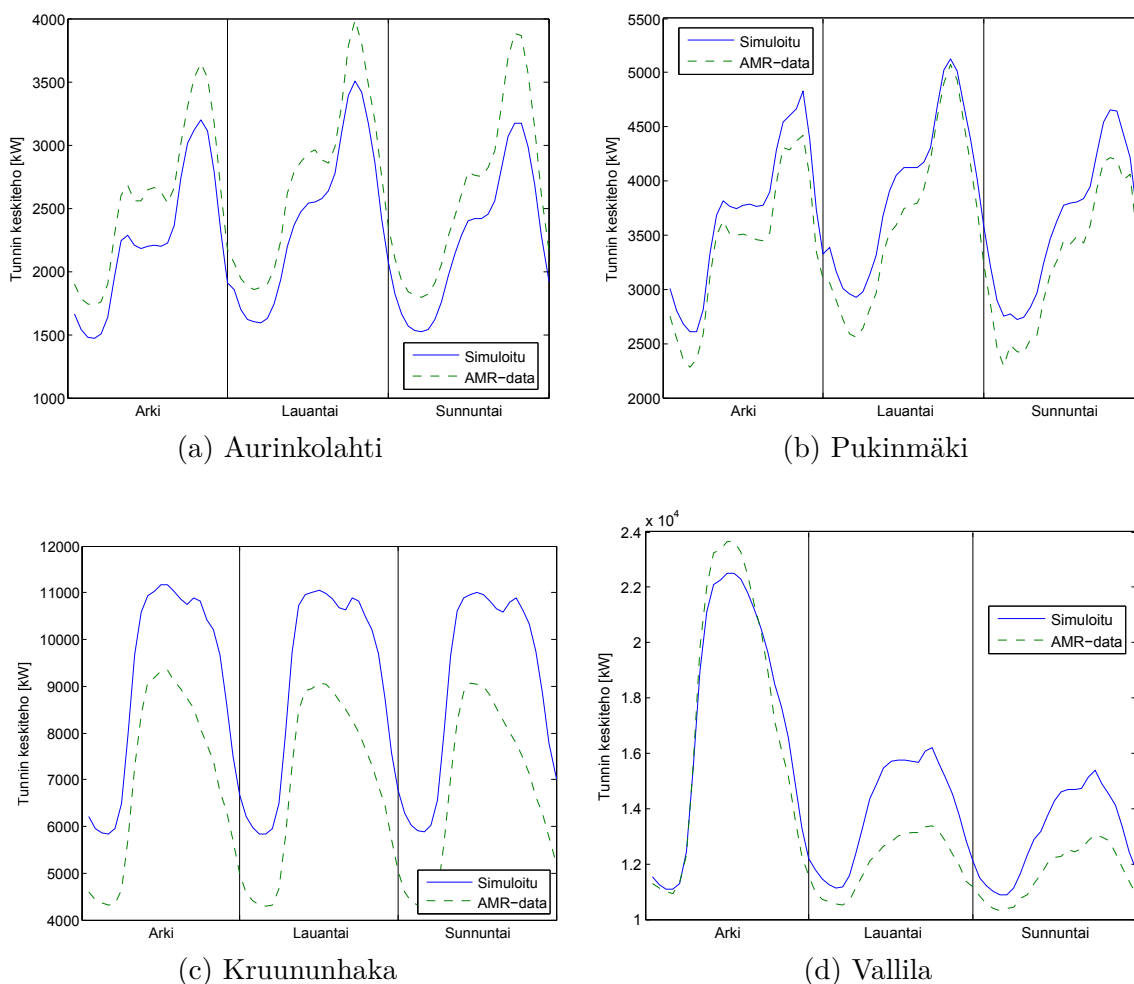
Kuva 26: Työkalun avulla muodostettu esimerkkiskenaario Etelä- ja Pohjois-Haagan sähkökäytössä vuonna 2030

Työkalu pystyy myös piirtämään tarkemmat käyrät halutuille osa-alueille. Tässä esimerkissä valittiin tarkempaan tarkasteluun kaksi Helsingin osa-alueita: Etelä- ja Pohjois-Haaga. Alueet voidaan siis valita kartalta klikkaamalla ja tämän jälkeen työkalu laskee automaattisesti valitun skenaarion mukaiset sähkökäyttökäyrät alueille. Kuvassa 26 on esitetty Etelä- ja Pohjois-Haagan huippuviikon sähkökäyttö vuonna

2030 valitun esimerkkiskenaarion mukaan laskettuna. Näyttövaihtoehdoksi on valittu energian muutos, jolloin alemmassa kuvaajassa näytetään muutos vertailuvuodesta tarkasteluvuoteen, eli tässä esimerkissä vuodesta 2013 vuoteen 2030. Kuvaajassa voidaan vaihtoehtoisesti näyttää myös vertailuvuoden sähkönkäyttöä.

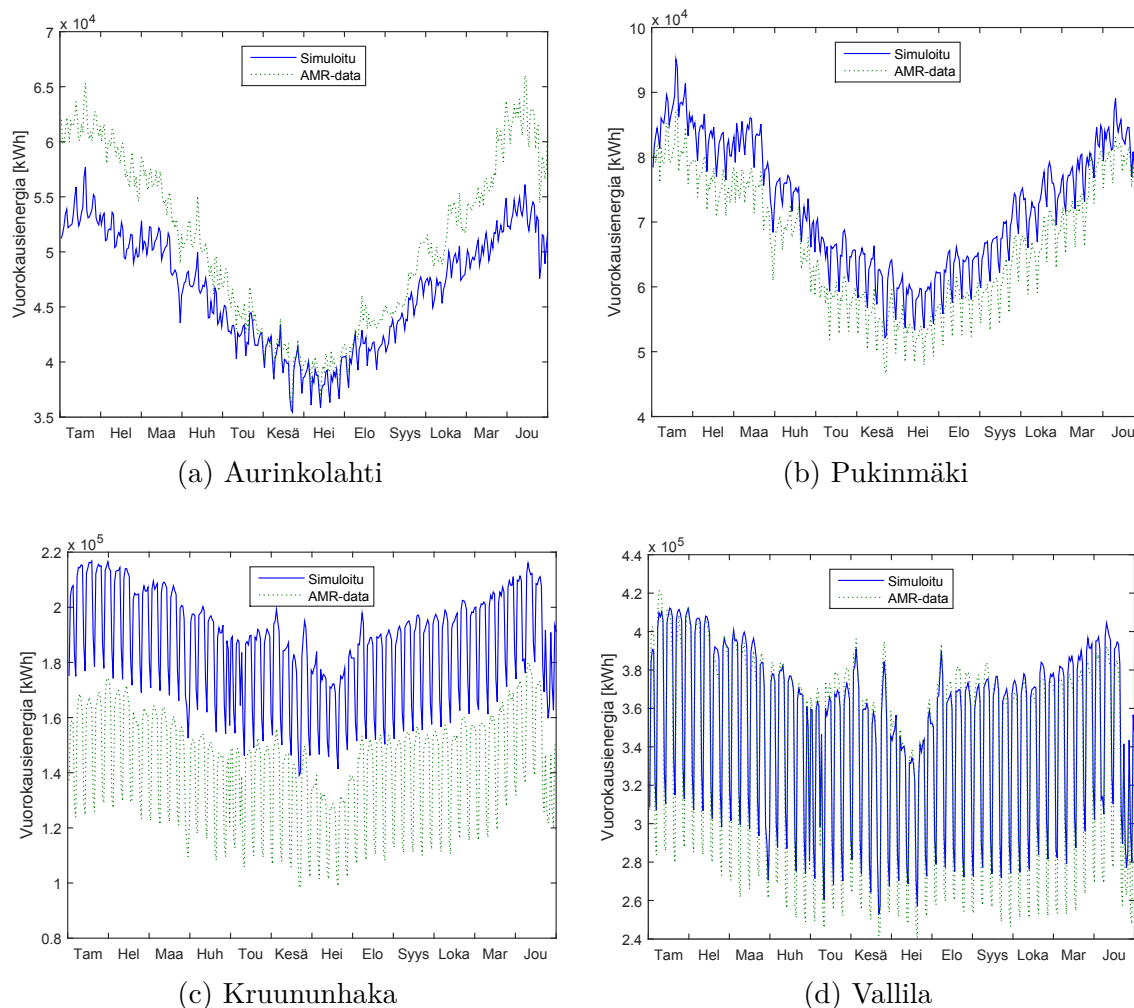
8.4 Työkalun menetelmien arviointi

Jotta voidaan arvioida työkalussa käytettyjen menetelmien tarkkuutta tulevaisuuden ennustamisessa, voidaan menetelmän avulla simuloida nykyistä sähkönkäyttöä ja verrata sitä oikeaan AMR-dataan. Simuloinnissa lähdetään osa-aluekohtaisista kerrosaloista, jotka saadaan aluesarjat.fi -palvelun avulla kuntarekisteristä jaoteltuna asumiseen ja muuhun kerrosalaan. Nämä kerrosalat on vielä jaettu asiakasryhmille samassa suhteessa kuin sellaisten alueen liittymien kerrosalat, joille löytyy yksiselitteinen asiakasryhmä sekä kerrosala. Nämä kerrosalat on muunnettu vuosienenergioiksi asiakasryhmäkohtaisten ominaiskulutusten avulla. Vuosienenergioista taas saadaan tuntikäyrä kaavan 2 avulla.



Kuva 27: Simuloidut sekä AMR-datasta koostetut, osa-aluekohtaiset kulutuskäyrät tyypillisenä talviviikkona vuonna 2013

Kuvassa 27 on verrattu työkalun menetelmällä simuloitua alueellista huippuviiikon sähkönkäyttöä etäluettavien mittareiden datasta aggregoituihin alueellisiin kulutusdatoihin. Tarkasteluun on valittu neljä toisistaan poikkeavaa aluetta: Aurinkolahti, Pukinmäki, Kruununhaka ja Vallila. Aurinkolahti on hyvin uutta, kerrostalovalttaista aluetta, kun taas Pukinmäessä on paljon sähkölämmitettyjä omakotitaloja. Kruununhaka on keskustalle tyypillistä, palveluvaltaista aluetta ja Vallila taas on hyvin monipuolinen alue, jolta löytyy kaikkia käyttäjätyyppejä.



Kuva 28: Simuloidut sekä AMR-datasta koostetut, osa-aluekohtaiset vuorokausienergiat vuonna 2013

Kuvasta 27 nähdään, että simuloitu käyrämuoto vastaa melko hyvin oikeaa käyrää Aurinkolahdessa ja Pukinmäessä. Myös Vallilassa käyrämuoto on muuten oikea, mutta arkipäivän ja viikonlopun huippujen suhteessa on hieman virhettä. Kruununhaan simuloidussa käyrässä illalla on pieni piikki, jota oikeassa datassa ei ole. Eniten virhettä käyrien muodossa näyttäisi siis olevan palveluvaltaisilla alueilla. Tämä on ymmärrettävää, sillä palvelukulutukselle on vain yksi käyttäjäryhmä, vaikka palvelukuluttajia on hyvin erityyppisiä.

Simuloitujen käyrien tasossa on varsin paljon virhettä. Aurinkolahden simuloitu käyrä on koko viikon ajan hieman liian matala ja Pukinmäen taas hieman liian korkea. Vallilan käyrän taso on melko hyvä, mutta Kruununhaalle simulointi antaa aivan liian suuria tuntitehoja.

Myös simuloitujen vuorokausienergioiden vuosikäyrän muoto vastaa hyvin oikeaa AMR-dataa. Ainoastaan Aurinkolahden simuloitun käyrän virhe on talvella hieman suurempi kuin kesällä. Muissa osa-alueissa virhe on koko vuoden osapuilleen samansuuruinen.

Simuloitu alueellinen sähkönkäyttö eroaa siis melko tasaisesti koko vuoden ajan aggregoidusta AMR-datasta. Koska käyrät näyttävät oikeanlaisilta, voidaan olettaa, että suurin virhe johtuu ominaiskulutuksista. Helsingin osa-alueet voivat olla liian heterogeenisia, jotta niiden rakennuksia voisi kuvata koko alueen kattavilla ominaiskulutuksilla. Toisaalta esimerkiksi rakennusvuosi voi vaikuttaa rakennusten ominaiskulutukseen hyvin voimakkaasti [4], joten tämä olisi ehkä syytä ottaa huomioon työkalussa. Työkalun jatkokehityksessä olisi syytä pureutua tarkemmin tähän asiaan ja simuloinnin tulisi täsmätä melko hyvin nykyiseen sähkönkäyttöön, ennen kuin ennusteisiin voidaan luottaa.

8.5 Työkalun kehityskohteet

Tärkein kehityskohde työkalussa on rajapinnan rakentaminen tuntidatatietokantaan. Tässä diplomityössä rakennettuun työkaluun tuntidata viedään valmiina summasarjoina, joten esimerkiksi asiakas- tai alueryhmittelyn vaihtamiseksi summasarjat on muodostettava kokonaan uudestaan. Jos työkalulla olisi suora yhteys tuntikulutustietokantaan ja laskentatehoa olisi riittävästi, summasarjat voitaisiin muodostaa annettujen kriteerien perusteella ohjelman suorituksen aikana. Tämä tekisi työkalusta huomattavasti joustavamman asiakasryhmien ja aluemuutosten suhteen.

Tämän diplomityön puitteissa toteutetussa työkalussa huomioidaan lähinnä uudisrakentamisen aiheuttamien muutosten vaikutusta sähkönkäyttöön. Vaikka tämä onkin yksi tärkeimmistä muutostekijöistä, pitäisi työkalulla pystyä tulevaisuudessa mallintamaan myös muita tekijöitä. Tärkein lienee olemassa olevan rakennuskannan ominaiskulutusten muutosten mallintaminen. Tällä hetkellä työkalua varten ei ollut saatavilla asiakasryhmiin jaettuja alueittaisia summakäyriä, joten asiakasryhmäkohtaisten ominaiskulutusten muutoksia ei voitu mallintaa. Tämäkin ongelma ratkeaisi helposti, jos työkalussa olisi suora rajapinta tuntidatatietokantaan.

Skenariointityökalu ei myöskään ota huomioon poistuvaa rakennuskantaa. Joillakin alueilla uudisrakentaminen saattaa korvata vain olemassa olevia rakennuksia, jolloin muutokset alueen sähkönkäytössä ovat pieniä. Poistuvan rakennuskannan mallintaminen on kuitenkin haastavaa, sillä siitä ei ole ainakaan Helsingin alueella saatavissa ennusteita.

Lisäksi toteutetun työkalun pitäisi pystyä ottamaan huomioon myös muutokset asiakkaiden tuntikäyrissä. Näitä voivat aiheuttaa asiakkaiden kulutustottumusten muutokset tai esimerkiksi kysynnänjouston lisääntyminen. Lisäksi tulisi ottaa huomioon uudet sähkön kulutus- ja tuotantomuodot, kuten esimerkiksi sähköautot ja aurinkopaneelit. Työkaluun pitäisi siis pystyä lisäämään moduuleina uusia käyriä ja

arvioimaan niiden suuruutta alueittain.

Toteutetussa työkalussa tulevaisuuden muutokset lisätään suoraan edellisen vuoden kulutuksen päälle, mutta työkalussa ei huomioida lainkaan sitä mahdollisuutta, että edellinen vuosi on voinut ollut kulutukseltaan huomattavasti muista vuosista poikkeava. Tätä ongelmaa voidaan mahdollisesti vähentää tarkastelemalla useamman vuoden kulutustietoja. Myös tässä tarkastelussa rajapinta tuntidatatietokantaan olisi erittäin hyödyllinen. Lisäksi työkalussa olisi tarpeen olla sääkorjaus, joka vähentäisi lämpimistä tai kylmistä vuosista aiheutuvaa virhettä.

Jatkossa olisi syytä myös arvioida, olisiko asiakastietojärjestelmästä saatavan asiakastiedon sijaan hyödyllisempää käyttää matemaattista erottelua asiakasryhmien muodostamiseen. Ville Rimali on diplomityössään [4] määritellyt matemaattisen erottelumenetelmän, jota voitaisiin käyttää ryhmittelyn perusteena. Tässä työssä on valittu asiakastietojärjestelmästä saatava tieto ryhmittelyn perusteeksi lähinnä sen helppouden takia. Kaikkien Helsingin käyttöpaikkojen matemaattinen erottelu on työläs ja paljon laskentatehoa vaativa prosessi, mutta se saattaisi auttaa tarkentamaan ennusteita entisestään.

9 Helsinki vuonna 2050 -skenaariot

Tämän diplomityön puitteissa tehtiin skenaariot Helsingin sähkönkäytön kehittymisestä luvussa 4.3 esitellyn intuitiivisen logiikan -menetelmän avulla. Menetelmää varten kerättiin Helen Sähköverkko Oy:stä joukko asiantuntijoita, jotka työnsä puolesta tarvitsevat tietoa tulevaisuuden sähkönkäytöstä. Ryhmä laati skenaariot Helsingin tulevaisuuden sähkönkäytöstä intuitiivisen logiikan metodin askelten pohjalta.

Päädyimme ryhmän kanssa muodostamaan skenaariot Helsingin sähkönkäytön kehittymisestä vuoteen 2050 mennessä. Kaikki jäsenet olivat yksimielisiä siitä, että skenaariot tulisi tehdä mahdollisimman pitkälle tulevaisuuteen, mutta kuitenkin siten, että epävarmuuksia ei ole liikaa. Vuosi 2050 vaikutti sopivalta kompromissilta näiden kriteerien suhteen. Willis ehdottaa kirjassaan [2] tarkasteluajaksi vähintään puolta laitteiden käyttöiästä. Nyt valittu noin 35 vuotta täyttää tämän kriteerin, sillä verkkokomponenttien käyttöikä voi olla jopa 40 vuotta [1].

Skenariointityön edetessä ryhmämme pääsi yhteisymmärrykseen siitä, että kaksi merkittävintä vaikuttajaa Helsingin sähkönkäyttöön ovat taloudellinen tilanne ja ympäristönäkökulmat. Taloudellinen tilanne vaikuttaa sähkönkäyttöön hyvin moninaisesti: Talouskasvu luo alueelle lisää työpaikkoja, mikä puolestaan houkuttelee seudulle lisää asukkaita. Molemmat näistä seikoista lisäävät sähkön kulutusta. Lisäksi, kuten luvussa 6.3 esitettyjen ominaiskulutusten kehittymisestä käy ilmi, palveluja teollisuuskulutuksen näennäinen ominaiskulutus on kytköksissä taloudelliseen tilanteeseen. Tämä johtuu esimerkiksi tyhjillään olevien toimitilojen määrästä. Ihmisten suhtautuminen ympäristöön puolestaan vaikuttaa hajautetun uusiutuvan tuotannon käyttöönottoon ja sähköautojen yleistymiseen. Lisäksi asenteet vaikuttavat välillisesti poliittisiin päätöksiin uusien teknologioiden käyttöönoton tukemisesta. Hajautetulla tuotannolla, kysynnänjoustoilla ja sähköautoilla voi laajasti käyttönotettuna olla hyvin merkittävä vaikutus tulevaisuuden sähkönkäyttöön.

Koska ryhmämme löysi kaksi selvästi merkittävintä sähkönkulutukseen vaikuttavaa voimaa, oli skenaariot luontevinta luokitella Van der Heijdenin kirjassaan [16] kuvaamalla matriisimallilla. Kummallakin muuttujalla on kaksi tilaa, esimerkiksi korkea ja matala, ja näiden yhdistelmät kuvataan matriisissa. Kahden muuttujan tapauksessa muodostetaan 2x2 matriisi, jonka soluihin kuvataan kaikki neljä tilojen yhdistelmää.

Helsingin vuoden 2050 sähkönkäytön skenaariot on kuvattu nelikentässä (Kuva 29), jossa pystyakselilla on Helsingin taloustilanne verrattuna ympäröiviin alueisiin ja vaaka-akselilla toimet ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Molemmilla muuttujilla on kaksi tilaa: korkea ja matala. Taloustilanteella tarkoitetaan tässä yhteydessä Helsingin taloudellista tilannetta verrattuna esimerkiksi muuhun Suomeen ja Eurooppaan. Toimilla ympäristömuutoksen hillitsemiseksi puolestaan tarkoitetaan sekä EU:n, valtion ja kuntien poliittisia päätöksiä että yksittäisten kuluttajien toimia.

Ensimmäisessä skenaariossa, Nousukaudessa, Helsingin taloustilanne on hyvä, mutta ihmiset eivät kiinnostu toimista ympäristön hyväksi. Helsinkiin syntyy paljon lisää palveluita ja teollisuutta, jotka vetävät puoleensa myös asutusta. Tästä syystä kaupunkirakennetta tiivistetään. EU ja valtio eivät määritä merkittäviä uusia säädöksiä ilmastotavoitteiden toteuttamiseksi ja kuluttajat pohjaavat päätöksensä



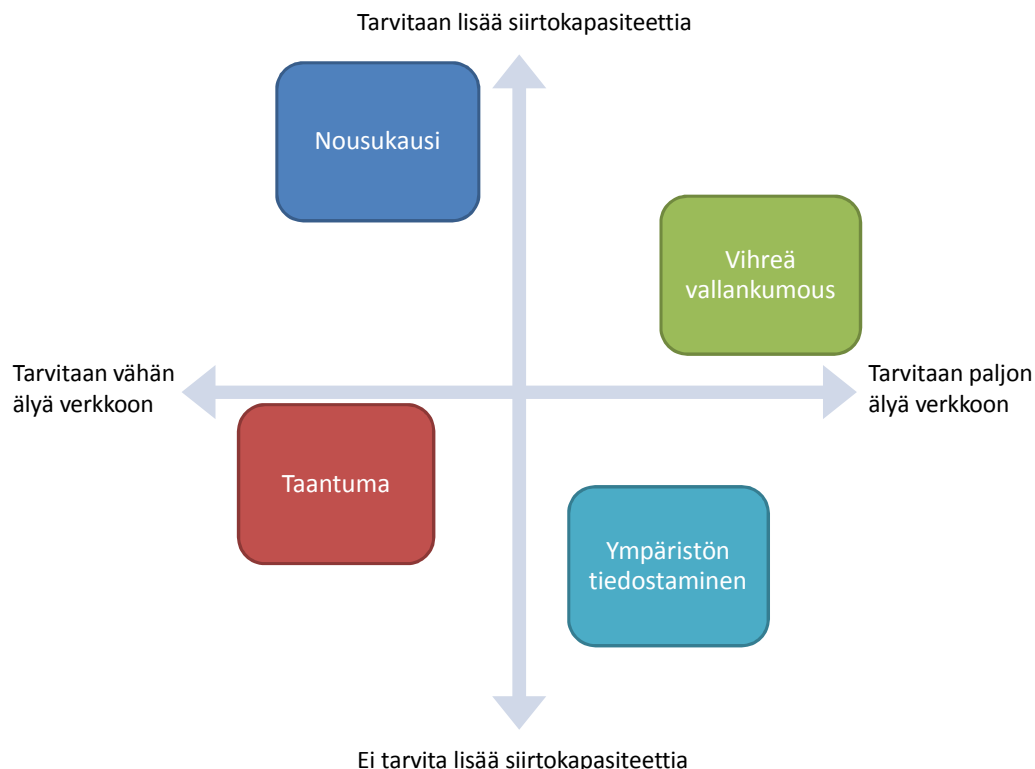
Kuva 29: Helsingin sähkönkäytön skenaariot vuonna 2050.

ainoastaan hintaan. Lisäksi elintaso kasvaa nopeasti ja uusia laitteita otetaan käyttöön paljon. Kulutus kasvaa tässä skenaariossa eniten ja jakeluverkkoon ei tarvita erityisen paljon älyä.

Seuraava skenaario on nimeltään Vihreä vallankumous, ja siinä Helsingissä on hyvä taloudellinen tilanne ja vuoteen 2050 mennessä on toteutettu paljon toimia ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Kuten edellisessä skenaariossakin, Helsinkiin syntyy lisää palveluita ja teollisuutta ja kaupunkirakennetta tiivistetään. Tämän lisäksi EU ja valtio panevat toimeen tiukkoja säästöksiä päästöjen vähentämiseksi ja ihmiset asennoituvat vähentämään myös omaa kulutustaan. Kuluttajat ovat valmiita maksamaan hieman enemmän ympäristöystävällisistä tuotteista ja palveluista, mutta elintaso nousee kuitenkin maltillisesti. Sähköautot ja hajautettu uusiutuva tuotanto yleistyvät nopeasti ja Helen Sähköverkko Oy investoi huomattavasti älyverkkoon, jotta uudet resurssit saadaan käyttöön tehokkaasti ja ilman kulutuspiikkejä.

Taantuma -skenaariossa Helsingin taloustilanne on aiempia skenaarioita heikompi suhteessa ympäröiviin alueisiin. Teollisuutta ja palveluita ei synny lisää ja muuttoliike Helsinkiin hidastuu ja mahdollisesti pysähtyy. Kaupunkirakennetta ei ole siis

tarpeen tiivistää. Taloudessa menee huonosti koko EU:n alueella ja poliittisilla päätöksillä pyritään parantamaan kilpailukykyä, jolloin ilmastokysymykset jäävät taka-alalle. Kuluttajat eivät myöskään kiinnostu kulutuksensa vähentämisestä ja elintaso pysyy entisellään. Sähkön hinnan rooli korostuu ja kysyntäjoustot energian hinnan mukaan lisääntyvät, mikä kasvattaa kulutushuippuja.



Kuva 30: Eri skenaarioiden vaikutukset siirtokapasiteetin ja älyverkon tarpeeseen.

Viimeinen skenaario on nimeltään Ympäristön tiedostaminen, jossa Helsingin taloustilanne jää hieman jälkeen muusta Suomesta tai Euroopasta, mutta ihmiset asennoituvat positiivisesti ilmastomuutoksen hillitsemiseen. Teollisuuden ja palveluiden kulutus vähentyy hieman edellistä skenaariota vähemmän ja kaupunkirakennetta on tarpeen tiivistää, mutta vain hieman. Ihmiset tiedostavat ilmastomuutoksen, mutta heikon taloustilanteen takia heidän keinonsa vaikuttaa ovat rajalliset. EU- ja valtiotasolla on myös poliittista tahtoa ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi, mutta kaikkiin keinoihin ei ole varaa. Sähköautot ja hajautettu tuotanto yleistyvät, mutta huomattavasti Vihreää vallankumousta hitaammin. Jakeluverkkoon lisätään myös älyä hiljalleen.

9.1 Eri skenaarioiden vaikutukset sähkönkäyttöön

Tässä alaluvussa on tarkasteltu kuvassa 29 määriteltyjen skenaarioiden aiheuttamia muutoksia kahden esimerkkiosa-alueen sähkönkäyttöihin. Muutokset on laskettu manuaalisesti, sillä kehitetty työkalu ei pysty ottamaan kaikkia skenarioitavia

asioita huomioon. Skenaariot on tehty vuodelle 2030, sillä ennen uuden yleiskaavan vahvistamista rakentamisennusteita on saatavilla vain vuoteen 2030 asti.

Tarkastelun alueiksi valittiin kaksi erityyppistä Helsingin osa-aluetta: Etu-Töölö ja Aurinkolahti. Etu-Töölö on vanha, tiiviisti rakennettu ja palveluvaltainen alue, jonne ei ole odotettavissa juurikaan uudisrakentamista. Aurinkolahti puolestaan on hyvin uusi, kerrostaloasuntovaltainen alue, jonne rakennetaan jonkin verran lisää asumis- ja palvelurakennuksia vuoteen 2030 mennessä.

Skenaarioissa on vaihdeltu useita tekijöitä ja tarkasteltu näiden yhteisvaikutusta alueiden sähkönkäyttöihin. Alueille on saatu kaupunkisuunnitteluvirastolta rakentamisennuste, joka toimi perusskenaariona. Tämän pohjalta määritettiin myös hidas ja nopea rakentamisennuste. Lisäksi skenaarioissa muuteltiin olemassa olevan ja tulevan rakennuskannan ominaiskuluksia asiakasryhmittäin.

Uusista sähkönkulutus- ja tuotantotavoista arvioitiin sähköautojen ja ladattavien hybridien yleistymisen vaikutuksia. Sähköautojen latauskäyrinä käytettiin kuvassa 18 esitettyjä, VTT:llä muodostettuja [43] lataustarvekäyriä. Sähköautojen määrää autokannasta varioitiin taulukossa 2 esitettyjen, Työ- ja elinkeinoministeriön teettämän selvityksen [41] mukaisten osuuksien mukaan. Lisäksi osassa skenaarioista autot alkoivat ladata heti, kun ne kytkettiin verkkoon ja osassa skenaarioista 90% sähköautoista viivästytti latausta yön vähäkulutuksisille tunneille.

Helsingissä oli vuonna 2013 liikennekäytössä 337 henkilöautoa 1 000 henkilöä kohti ja määrä on ollut melko tasaisessa kasvussa [44]. Tästä luvusta laskettiin alueen väkiluvun ja asumisen kerrosalan perusteella henkilöautotiheys asumiskerrosneliometriä kohti. Henkilöautotiheyden muutokselle käytettiin kahta skenaariota: tiheys kasvaa 20% vuoteen 2030 mennessä tai tiheys pysyy ennallaan.

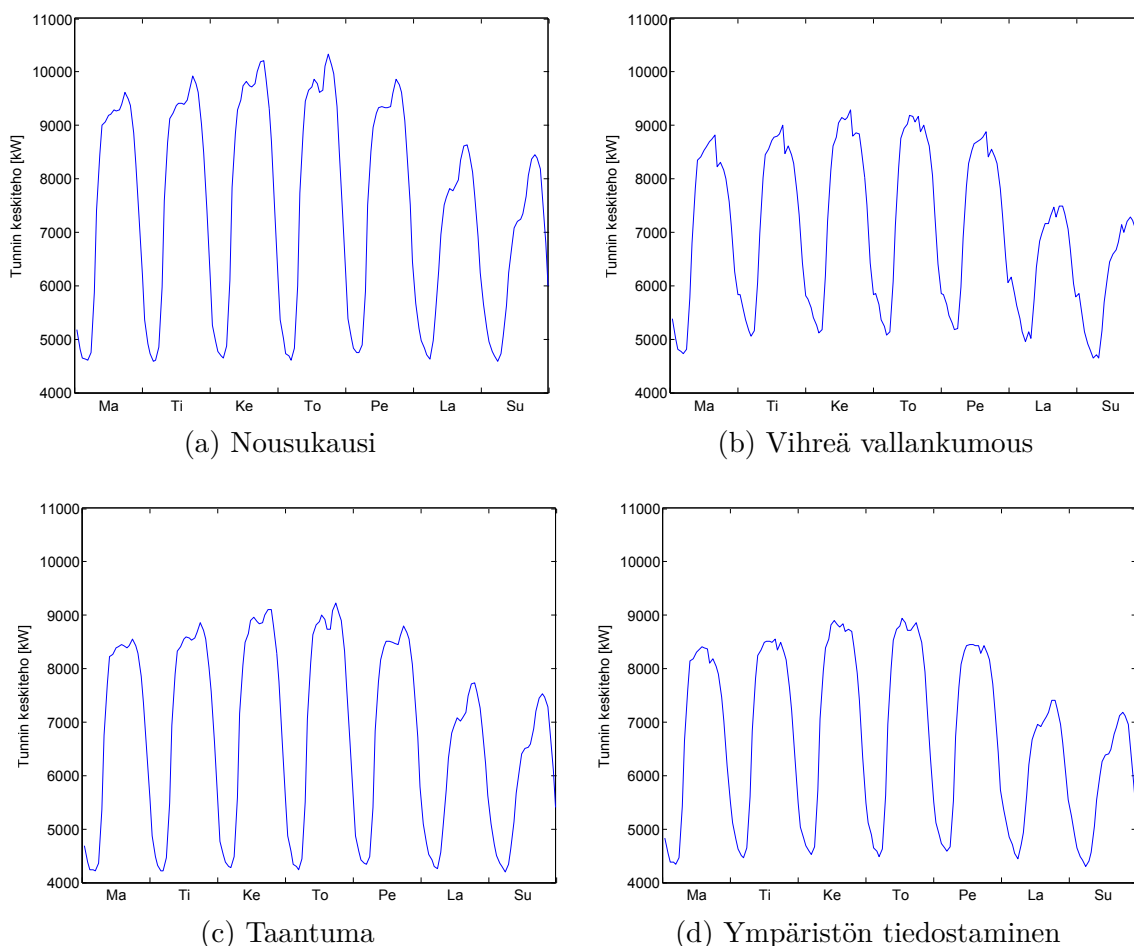
Eri skenaarioille valittiin seuraavat ominaisuudet:

- Nousukausi
 - Rakentamisennuste: nopea skenaario
 - Ominaiskulutukset: kasvava skenaario
 - Henkilöautotiheys: kasvava skenaario
 - Sähköautot: perusskenaario ilman ohjausta
- Vihreä vallankumous
 - Rakentamisennuste: nopea skenaario
 - Ominaiskulutukset: laskeva skenaario
 - Henkilöautotiheys: kasvava skenaario
 - Sähköautot: nopea skenaario ohjauksella
- Taantuma
 - Rakentamisennuste: hidas skenaario
 - Ominaiskulutukset: pysyvät ennallaan tai laskevat
 - Henkilöautotiheys: pysyy ennallaan

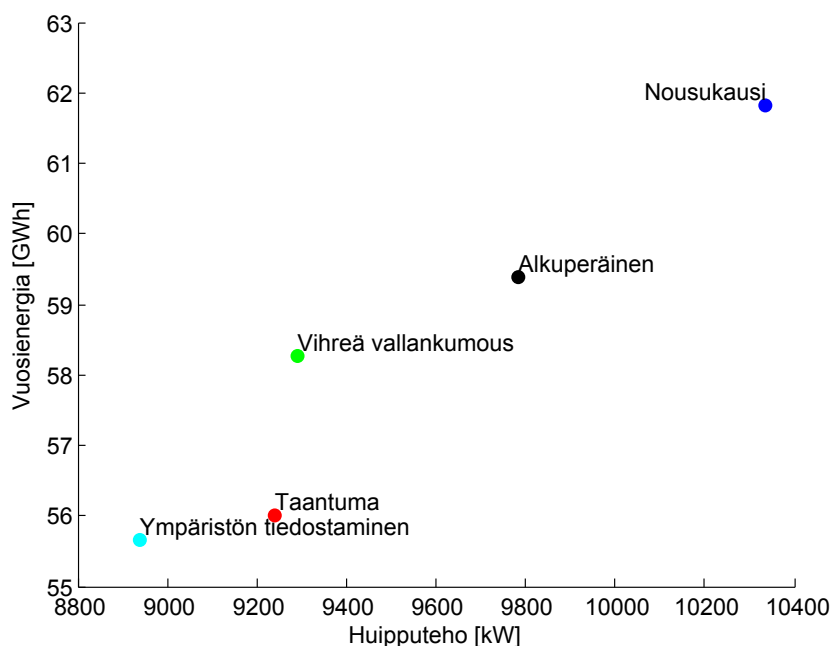
- Sähköautot: hidas skenaario ilman ohjausta
- Ympäristön tiedostaminen
 - Rakentamisennuste: perusskenaario
 - Ominaiskulutukset: laskeva skenaario
 - Henkilöautotiheys: pysyy ennallaan
 - Sähköautot: perusskenaario ohjauksella

Etu-Töölö

Etu-Töölö on vanha, kerrostalovaltainen alue. Asukkaita siellä on noin 14 100 [51], asuinrakennuksia 890 000 kerrosneliometriä ja toimitiloja 320 000 kerrosneliometriä [52]. Perusskenaariossa Etu-Töölöön rakennetaan noin 17 000 kerrosneliometriä uusia asuntoja ennen vuotta 2030, mikä tarkoittaa noin 2 % lisäystä. Suurin vaikutus Etu-Töölön sähkönkäyttöön ei siis ole uudisrakentamisella, vaan olemassa olevan sähkönkäytön muutoksilla sekä uusilla sähkönkulutus- ja tuotantomuodoilla.



Kuva 31: Etu-Töölön sähkönkäyttö talven huippuviikkona vuonna 2030 eri skenaarioissa



Kuva 32: Eri skenaarioiden vaikutus Etu-Töölön huipputehoon ja vuosienergiaan

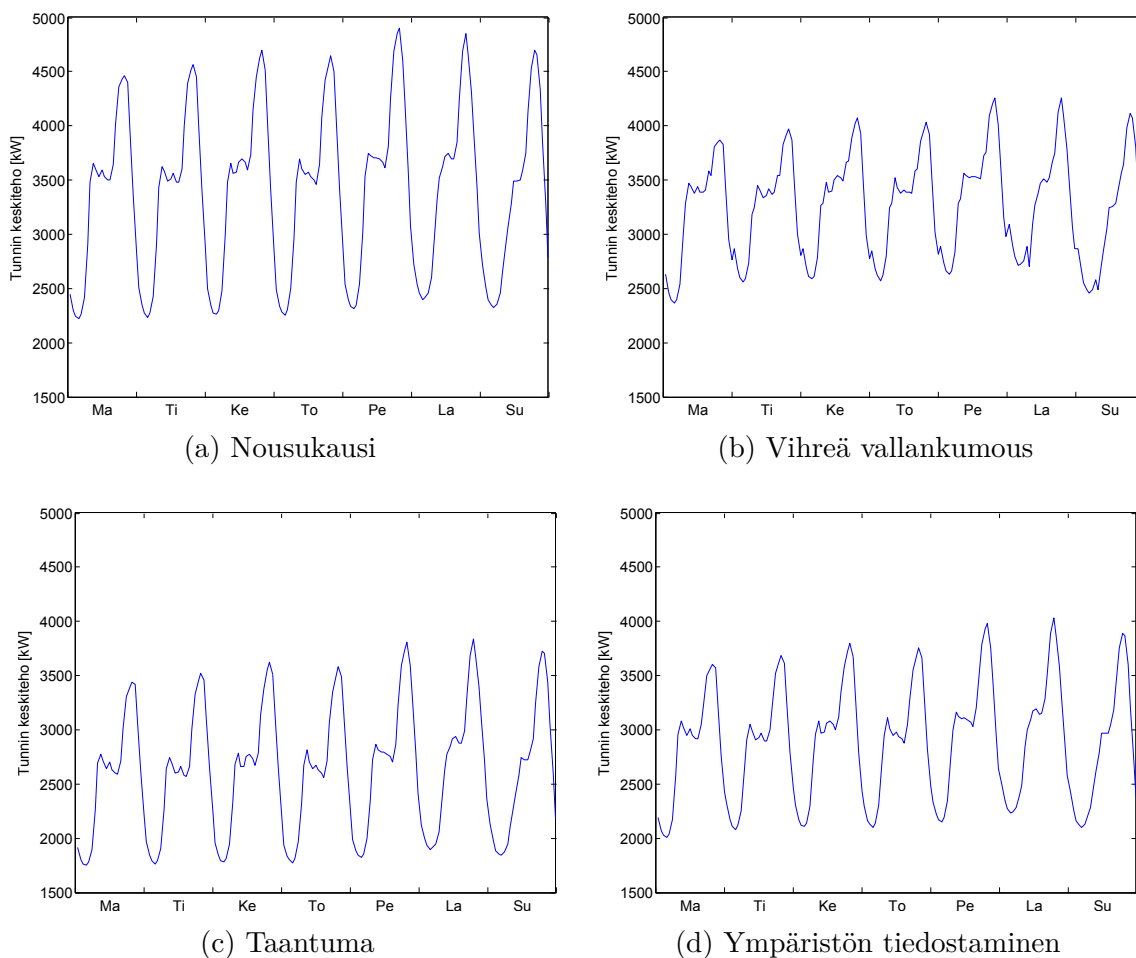
Eri skenaarioiden arvioidut huippuviikon sähkönkäyttöprofiilit vuonna 2030 on esitetty kuvassa 31. Nousukaudella sähkönkäytön perustaso on huomattavasti muita suurempi kasvavan ominaiskulutusennusteen johdosta. Lisäksi iltaisin on voimakas piikki, joka johtuu melko suuresta sähköautojen määrästä sekä niiden ohjaamattomasta latauksesta. Vihreässä vallankumouksessa sähköautojen latausta on siirretty illasta yölle, joten illan piikki jää pois, mutta öisin kulutus on skenaarioista suurinta.

Kuvassa 32 on esitetty eri skenaarioiden vaikutusta huipputehoon ja vuosienergiaan. Nousukausi on ainoa skenaario, jossa vuosienergia ja huipputeho kasvavat nykyiseen tilanteeseen verrattuna. Tämä johtuu siitä, että Etu-Töölöön ei rakenneta juurikaan lisää ja ominaiskulutuksen muutokset ovat suuressa roolissa. Vihreässä vallankumouksessa ja Taantumassa sähköautojen määrä ja lataustyyppi sekä ominaiskulutusten muutokset näyttävät kompensoivan toisiaan siten, että huipputeho on lähes sama, hieman yli 9 200 kW. Pienin huipputeho on Ympäristön tiedostamisessa, sillä palvelukulutus ei kasva heikon talouskasvun myötä, sähköautojen latausta ohjataan pois huippukuormituksen ajalta ja vihreän ajattelun myötä ominaiskulutukset laskevat.

Aurinkolahti

Aurinkolahti on uusi, 2000-luvun alussa rakennettu kerrostaloalue Itä-Helsingissä. Alueella asuu noin 6 600 asukasta [51] ja siellä on asuinrakennuksia 300 000 kerrosneliometriä ja muita rakennuksia 26 000 kerrosneliometriä [52]. Aurinkolahdessa on myös potentiaalia lisärakentamiselle, sillä Kaupunkisuunnitteluvirasto on arvioinut alueelle rakennettavan vuoteen 2030 mennessä noin 75 000 kerrosneliometriä asuinrakennuksia ja 22 000 kerrosneliometriä toimitiloja. Tämä tarkoittaa noin neljäsosan

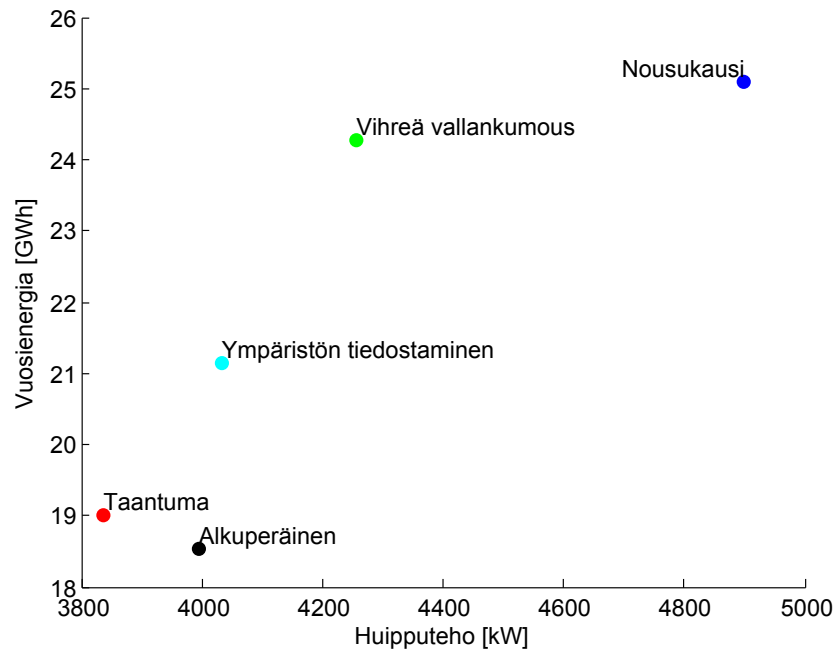
lisäystä asuinrakennuksiin ja 80 prosentin lisäystä toimitiloihin. Aurinkolahti on hyvin asumispainotteinen alue, toisin kuin Etu-Töölö, jossa on paljon erilaista kulu- tusta. Lisäksi uudisrakentaminen on erittäin merkittävässä roolissa Aurinkolahden tulevaisuuden sähkökäytön kehittymisessä.



Kuva 33: Aurinkolahden sähkökäyttö talven huippuviikkona vuonna 2030 eri skenaarioissa

Kuvassa 33 on esitetty eri skenaarioiden vaikutus Aurinkolahden viikkoprofiiliin vuonna 2030. Kaikissa skenaarioissa on näkyvässä selkeä iltapiikki noin kello neljän ja kymmenen välillä, eli ajalla jolloin töissä käyvät ihmiset ovat kotona. Suurin sähköautojen latauspiikki osuu myös ilman ohjausta juuri samaan aikaan. Tämä näkyy selvästi Nousukauden skenaariossa, jossa on taulukon 2 perusskenaarion mukainen määrä sähköautoja ilman ohjausta. Vihreässä vallankumouksessa on huomattavasti enemmän sähköautoja, mutta latauksen ohjauksen ansiosta päivittäinen vaihtelu on huomattavasti pienempää.

Aurinkolahden on tulossa melko paljon täydennysrakentamista, joten kaikkien skenaarioiden vuosienergia kasvaa alkutilanteeseen verrattuna. Tämä voidaan nähdä kuvasta 34. Toisin kuin Etu-Töölössä, Aurinkolahdessa Taantumassa huipputeho on pienempi kuin Ympäristön tiedostamisessa. Tämä johtuu Taantumassa hitaammasta



Kuva 34: Eri skenaarioiden vaikutus Aurinkolahden huipputehoon ja vuosienergiaan

rakentamisennusteesta, joka vaikuttaa kasvavalla alueella enemmän kuin ominaiskulutuksen muutokset. Vihreässä vallankumouksessa vuosienergia kasvaa huomattavasti, mutta huipputeho vain hieman, mikä on sähköautojen älykkään latauksen ansiota.

10 Yhteenveto ja johtopäätökset

Sähköverkkoa suunniteltaessa on katsottava pitkälle tulevaisuuteen, sillä verkkokomponenttien pitoajat ovat jopa kymmeniä vuosia. Sähköverkon on kyettävä vastaamaan tulevaisuuden haasteisiin, joten suunnittelussa tärkeässä osassa ovat alueelliset sähkökäyttöennusteet. Sähkökäytön kehittämisessä on kuitenkin erittäin paljon epävarmuustekijöitä, joten on mahdotonta luoda yhtä, mahdollisimman tarkkaa ennustetta.

Tässä työssä tutkittiin skenariointia keinona ottaa huomioon tulevaisuuden epävarmuuksia. Työssä tehtiin kirjallisuuskatsaus erilaisiin yleisiin skenariointimenetelmiin, joista esiteltiin tarkemmin intuitiivisen logiikan menetelmä. Lisäksi työssä laadittiin intuitiivisen logiikan -menetelmällä neljä skenaariota Helsingin sähkökäytön kehittymiselle vuoteen 2050 mennessä.

Tässä diplomityössä kehitettiin myös työkalu alueellisten sähkökäyttöskenaarioiden tekemiseksi Helsingin alueella. Työkalun tarkoituksena on automatisoida ennusteiden tekemisen vaiheita ja näin mahdollistaa helpommin useiden erilaisten skenaarioiden mallintaminen. Lisäksi tarkoituksena on visualisoida skenaarioiden vaikutuksia sekä kartalla että sähkökäyttökäyrinä.

Työssä esitettiin useita tietolähteitä nykyaikaisiin sähkökäyttöennusteisiin. Ennusteissa käytettiin lähtötietona etäluettavilta mittareilta saatuja kulutustietoja. Työssä kuvattiin, miten ennusteissa voidaan hyödyntää tietoja myös kuntarekisteristä, kaavoituksesta, asiakastietojärjestelmästä ja verkkotietojärjestelmästä sekä miten näiden tietoja voidaan yhdistää toisiinsa mahdollisimman luotettavasti.

Yhdistämällä asiakaskohtaiset kulutustiedot kuntarekisterin kiinteistötietoihin saatiin yhteys maankäytön ja sähkökulutuksen välille. Viidelle asiakasryhmälle laskettiin keskimääräinen kerrosneliömetrikohtainen ominaiskulutus koko Helsingin alueelta. Lisäksi työssä tutkittiin ominaiskulutuksen muutostrendejä asiakasryhmittäin vuodesta 2002 lähtien. Sähkölämmitettyjen asuntojen ominaiskulutus on laskenut selvästi ja teollisuuden myös hieman. Muille ryhmille selviä trendejä ei löytynyt. Kullekin asiakasryhmälle muodostettiin myös kuormitusmallit, joka määrittää vuosienenergian jakautumisen kullekin vuoden tunnille.

Alueellisen sähkökäytön skenarioinnissa lähtötietona käytetään kunkin kaupunginosa-alueen toteutunutta kulutusta. Tulevaisuuden muutokset on jaettu kolmeen ryhmään: uudisrakentamiseen, sähkökäytön muutoksiin nykyisissä käyttökohteissa sekä uuteen tuotantoon ja uusiin sähkökäyttökohteisiin. Uudisrakentamisen vaikutuksia mallinnetaan simuloimalla uuden rakennuskannan vaikutus ominaiskulutusten ja kuormitusmallien avulla. Sähkökäytön muutosta nykyisissä käyttökohteissa voidaan mallintaa ominaiskulutusten muutoksilla sekä muokkaamalla olemassa olevia kuormitusmalleja. Uusi tuotantotavat ja sähkökäyttökohteet voidaan huomioida joko muuttamalla vanhoja kuormitusmalleja tai lisäämällä ennusteeseen uusia tuntisarjoja. Jotkut tuntisarjat voivat olla myös negatiivisia, esimerkiksi uusiutuvan tuotannon vaikutus. Työssä arvioitiin sähköautojen ja hajautetusta sähköntuotannosta erityisesti aurinkosähkön aiheuttavan suurimpia muutoksia sähkökäyttöön lähitulevaisuudessa. Näiden vaikutuksia myös arvioitiin tarkemmin.

Työssä esitettiin rakennetun skenariointityökalun toimintaa ja rakennetta. Työ-

kalulla voidaan mallintaa erilaisten rakentamisskenaarioiden ja tulevan rakennuskannan ominaiskulutusten muutosten vaikutuksia alueelliseen sähkönkäyttöön. Tuloksia voidaan visualisoida kartalla. Työkalun avulla voidaan myös valita alueita lähempään tarkasteluun ja niille voidaan näyttää sähkönkäytön summakäyrä halutulla aikavälillä sekä esimerkiksi muutokset nykyhetken verrattuna.

Työssä arvioitiin myös käytetyn kerrosalapohjaisen simulointimenetelmän tarkkuutta. Simuloitujen osa-aluekohtaisten summakäyrien muoto näytti vastaavan hyvin etäluettavien mittareiden tiedoista summatun käyrän muotoa. Käyrien tasossa oli jonkin verran aluekohtaista virhettä, jonka arvioitiin johtuvan ominaiskulutusten heterogeenisuudesta Helsingin eri alueilla. Tätä eroa olisi syytä tutkia jatkossa tarkemmin.

Helsingin sähkönkäytöstä vuonna 2050 laadittiin intuitiivisen logiikan menetelmän avulla neljä erillistä skenaariota. Selittävinä tekijöinä olivat Helsingin taloustilanne ympäröiviin alueisiin verrattuna sekä toimet ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Työssä analysoitiin näiden tekijöiden eri kombinaatioiden vaikutuksia alueelliseen sähkönkäyttöön. Lisäksi kahdelle esimerkkialueelle, Etu-Töölölle ja Aurinkolahdelle, muodostettiin skenaarioiden mukaiset sähkönkäytön summakäyrät talven huippuviikolle vuodelle 2030. Molemmilla tarkastelualueilla sähkönkäytön ajallinen jakautuminen ja huipputeho vaihtelivat merkittävästi eri skenaarioissa.

Työn tulokset kertovat siitä, että tulevaisuuden epävarmuudet vaikuttavat sähkönkäyttöön huomattavasti. Skenariointi todettiin käyttökelpoiseksi menetelmäksi epävarmuuksien huomioimiseksi. Skenarioinnin avulla voidaan tehdä “mitä jos” -analyysyjä erilaisista mahdollisista tulevaisuuksista ja analysoida niiden vaikutuksia. Näin asiantuntijat tietävät eri vaihtoehtojen vaikutukset ja osaavat varautua niihin mahdollisimman hyvin.

Intuitiivisen logiikan skenariointimenetelmän avulla pystyttiin analysoimaan ja tunnistamaan tärkeimpiä sähkönkäytön muutoksiin vaikuttavia tekijöitä. Menetelmä auttoi asiantuntijoita myös arvioimaan tekijöiden vaikutuksia toisiinsa. Intuitiivisen logiikan menetelmän tuloksena saatiin uskottavat ja sisäisesti koherentit skenaariot. Ne ovat kuitenkin varsin kvalitatiivisia, joten niitä on vaikeaa käyttää suoraan suunnittelun apuna. Skenaarioiden pohjalta rakennettiin lisäksi kvantitatiivisemmat sähkönkäyttöskenaariot kahdelle esimerkkialueelle. Jatkossa voitaisiin tutkia myös kvantitatiivisempien skenariointimenetelmien, esimerkiksi ristivaikutusten analysoinnin, soveltuvuutta sähkönkäyttöennusteiden muodostamiseen.

Viitteet

- [1] Erkki Lakervi ja Jarmo Partanen. *Sähkönjakelutekniikka*. Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto, 2008.
- [2] H Lee Willis. *Spatial Electric Load Forecasting – Second Edition, Revised and Expanded*. Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [3] Markku Hyvärinen et al. Alueellisen sähkönkulutusanalyysin ja -ennusteprosessin toiminnallinen kuvaus. Tutkimusraportti, CLEEN Oy, 2012.
- [4] Ville Rimali. Etäluettavan energiamittaustiedon hyödyntäminen alueellisissa kuormitusennusteissa. Diplomityö, Aalto-yliopisto, 2011.
- [5] Joonas Larinkari. Palvelusektorin sähkönkäytön tutkiminen tuntimittaustietojen avulla. Diplomityö, Aalto-yliopisto, 2012.
- [6] Hannu-Pekka Hellman. Maalämpökohteiden sähkönkäytön analysointi. Diplomityö, Aalto-yliopisto, 2013.
- [7] Helsingin Energia. Helen-konsernin tilinpäätös ja toimintakertomus. [Viitattu 26.3.2014]. Saatavissa: http://www.helen.fi/Documents/Vuosikertomukset%20ja%20osavuosikatsaukset/Helen-konsernin_tilinpaaatos_ja%20toimintakertomus_2013.pdf.
- [8] Cleen Oy. Yrityksen verkkosivut. [Viitattu 13.10.2014]. Saatavissa <http://www.cleen.fi/fi>.
- [9] Jani Valtari. Smart grids and energy markets factsheet – Developing smart grids and energy markets. [Viitattu 26.3.2014]. Saatavissa http://www.cleen.fi/fi/Markkinointiviestint/Cleen_Factsheet_SGEM_final.pdf.
- [10] Markku Hyvärinen. Spatio-temporal load forecasting. Tutkimusraportti, Helsinki University of Technology, 2006.
- [11] FINLEX ®. Ajantasainen lainsäädäntö: 9.8.2013/588 – Sähkömarkkina-laki. [Viitattu 14.11.2014]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>.
- [12] Arto Miettinen et al. *Sähkötöimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje*. Energiateollisuus ry, 2005. [Viitattu 14.11.2014]. Saatavissa http://energia.fi/sites/default/files/sahkontoimituksen_laatu-_ja_toimitustapavirheen_sovellusohje_2005.pdf.
- [13] Energiamarkkinavirasto. Sähkön jakeluverkkotoiminnan ja suurjännitteisen jakeluverkkotoiminnan hinnoittelun kohtuullisuuden valvontamenetelmien suuntaviivat vuosille 2012 - 2015. [Viitattu 8.9.2014]. Saatavissa http://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/Sahkonjakeluverkko_suurjannitteinen_jakeluverkko_suuntaviivat_2012_2015.pdf/e9de867e-513b-4ce5-84d2-322e1c585ba0, 2011.

- [14] Turen Gönen. *Electric Power Distribution System Engineering – Second edition*. CRC Press, 2007.
- [15] Ville Rimali et al. Development of spatial load forecasting utilizing amr measurements. Tutkimusraportti, Helen Sähköverkko Oy and Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu, 2011. SGEM Work Package 1.4. report.
- [16] Kees Van der Heijden. *Scenarios: the art of strategic conversation*. John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- [17] John Ratcliffe. Scenario building: A suitable method for strategic property planning? *Property Management*, 18(2):127–144, 2000.
- [18] William R Huss ja Edward J Honton. Scenario planning? What style should you use? *Long range planning*, 20(4):21–29, 1987.
- [19] Gill Ringland ja Peter Préfacier Schwartz. *Scenario planning: Managing for the future*. John Wiley & Sons, 1998.
- [20] Ron Bradfield, George Wright, George Burt, George Cairns, ja Kees Van Der Heijden. The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning. *Futures*, 37(8):795–812, 2005.
- [21] Theodore Jay Gordon. Cross-impact method. [Viitattu 16.12.2014]. Saatavissa <http://www.lampsacus.com/documents/CROSSIMPACT.pdf>, year=1994.
- [22] Peter Schwartz. *The art of the long view: paths to strategic insight for yourself and your company*. Random House LLC, 1996.
- [23] Peter Bishop, Andy Hines, ja Terry Collins. The current state of scenario development: an overview of techniques. *Foresight – The journal of future studies, strategic thinking and policy*, 9(1):5–25, 2007.
- [24] Pirjo-Liina Koivusaari. Helsinki, Vantaa vai uusi uljas vanki; tutkimus Helsingin ja Vantaan kaupunkien teoreettisen yhdistymisen vaikutuksista kuntien kiinteistötekniikkaan. Insinööriyö, Metropolia Ammattikorkeakoulu, 2013.
- [25] Maanmittauslaitos. Kiinteistörekisteri. [Viitattu 27.8.2014]. Saatavissa: <http://www.maanmittauslaitos.fi/kiinteistot/rekisterit-otteet/kiinteistorekisteri>.
- [26] Maanmittauslaitos. Kiinteistötietojärjestelmä (KTJ). [Viitattu 27.8.2014]. Saatavissa: <http://www.maanmittauslaitos.fi/kiinteistot/rekisterit-otteet/kiinteistotietojarjestelma-ktj>.
- [27] Tilastokeskus. Rakennus- ja asuntotuotanto – Käsitteet ja määritelmät. [Viitattu 28.8.2014]. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/ras/kas.html>.

- [28] FINLEX ®. Ajantasainen lainsäädäntö 5.2.1999/132 – Maankäyttö- ja rakennuslaki. [Viitattu 17.7.2014]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>.
- [29] Ympäristöministeriö. Maankäytön suunnittelujärjestelmä. [Viitattu 17.7.2014]. Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Elinymparisto_ ja_kaavoitus/Maankayton_suunnittelujarjestelma.
- [30] Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön esite – Maakuntakaava. [Viitattu 18.7.2014]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B94F8848F-7786-41A5-918B-479ABE33FB24%7D/37627>.
- [31] Ritva-Liisa Salmi. *Yleiskaavan sisältö ja esitystavat*. Ympäristöministeriö, 2006. *Maankäyttö- ja rakennuslaki 2000*. Opas 13.
- [32] Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto. Kaavoituksen tasot. [Viitattu 21.7.2014]. Saatavissa: <http://www.hel.fi/www/Helsinki/fi/asuminen-ja-ymparisto/kaavoitus/kaavoituksen-tasot>.
- [33] Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto. Yleiskaava. [Viitattu 22.7.2014]. Saatavissa: <http://www.yleiskaava.fi/yleiskaava/>.
- [34] Virve Rouhiainen et al. Kotitalouksien sähkönkäyttö 2011. Tutkimusraportti, Adato Energia Oy, 2013. [Viitattu 5.9.2014]. Saatavissa http://www.adato.fi/portals/2/attachments/Energiatehokkuus/Kotitalouksien_sahkonkaytto_2011_raportti.pdf.
- [35] Työ ja elinkeinoministeriö. Energiatehokkuus. [Viitattu 2.1.2015]. Saatavissa <http://www.tem.fi/energia/energiatehokkuus>.
- [36] Ympäristöministeriö. Rakennuksen energia- ja ekotehokkuus. [Viitattu 2.1.2015]. Saatavissa http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennuksen_energia_ ja_ekotehokkuus.
- [37] Antti Mutanen, Pertti Jarventausta, Matti Karenlampi, ja Pentti Juuti. Improving distribution network analysis with new AMR-based load profiles. In *Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference*, pages 1–4. IET, 2013.
- [38] Timo Kaartio. Alueellisen sähkökuorman ennustamisen kehittäminen. Diplomityö, Aalto-yliopisto, 2010.
- [39] Trafi. Tietopalvelut – Henkilöautojen ensirekisteröinnit käyttövoimittain. [Viitattu 29.9.2014]. Saatavissa http://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ensirekisteroinnit/ensirekisteroinnit_kayttovoimittain.
- [40] Sähköinen liikenne hanke. Suomen julkiset latauspisteet. [Viitattu 28.9.2014]. Saatavissa <http://www.sahkoinenliikenne.fi/suomen-julkiset-latauspisteet>.

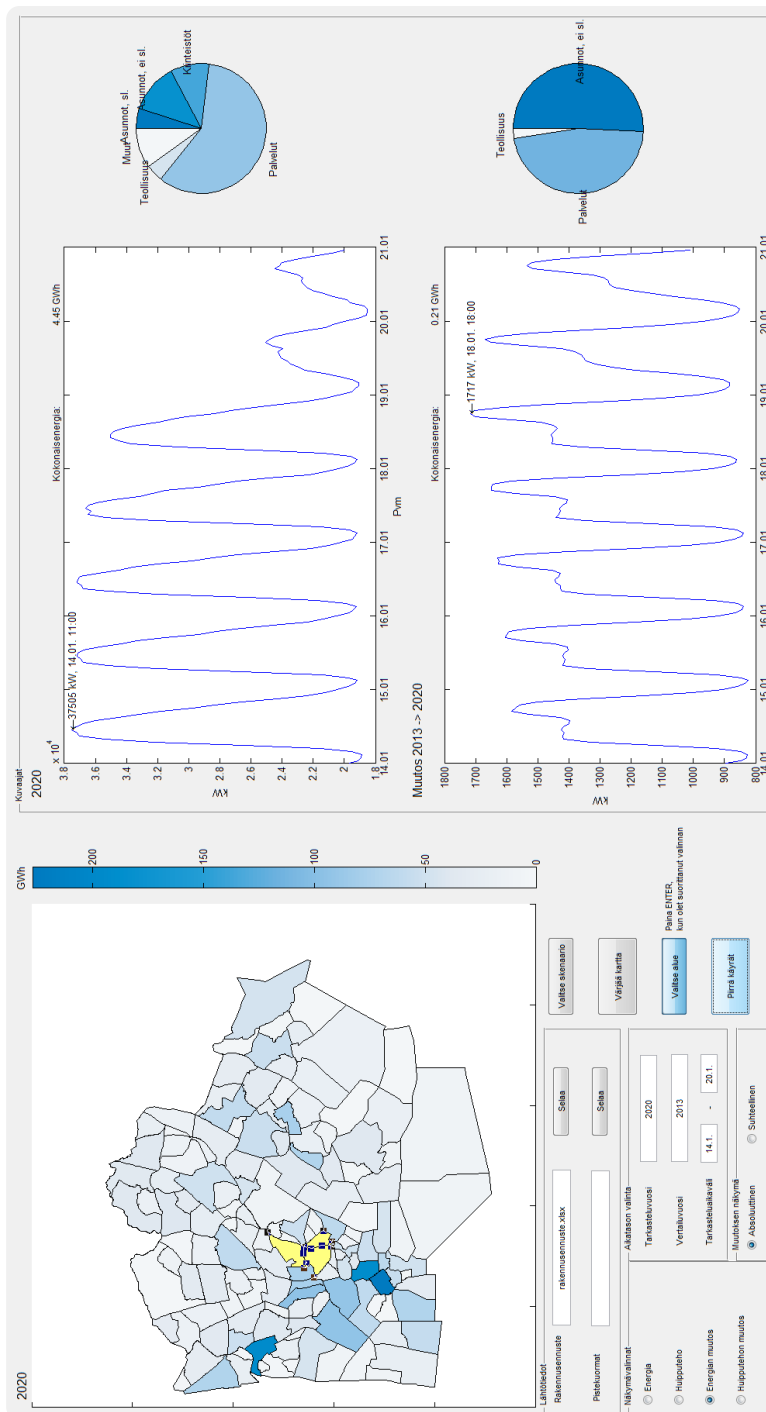
- [41] Biomeri Oy. Sähköajoneuvot Suomessa -selvitys. Tutkimusraportti, Työ- ja elinkeinoministeriö, 2009. [Viitattu 28.9.2014]. Saatavissa https://www.tem.fi/files/24099/Sahkoajoneuvot_Suomessa-selvitys.pdf.
- [42] Antti Alahäivälä. Sähköautojen lataaminen ja sen vaikutus kaupunkialueen jakelumuuntajiin. Diplomityö, Aalto-yliopisto, 2012.
- [43] Göran Koreneff, Maija Ruska, Juha Kiviluoma, Jari Shemeikka, Bettina Lemström, Raili Alanen, ja Tiina Koljonen. Future development trends in electricity demand. Tutkimusraportti, VTT, 2009.
- [44] Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluvirasto. Liikenteen kehitys Helsingissä vuonna 2013. [Viitattu 30.11.2014]. Saatavissa http://www.hel.fi/hel12/ksv/julkaisut/esitteet/esite_2014-2.pdf.
- [45] Maija Ruska, Juha Kiviluoma, ja Göran Koreneff. Sähköautojen laajan käyttöönoton skenaarioita ja vaikutuksia sähköjärjestelmään. Tutkimusraportti, VTT, 2010. [Viitattu 28.9.2014]. Saatavissa <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2010/W155.pdf>.
- [46] Aki Pesola, Hannu Hoviniemi, Iivo Vehviläinen, ja Juha Vanhanen. Selvitys hajautetusta ja paikallisesta energiantuotannosta erilaisilla asuinalueilla. Tutkimusraportti, Motiva, 2010. [Viitattu 8.10.2014]. Saatavissa http://www.motiva.fi/files/7938/Selvitys_hajautetusta_ja_paikallisesta_energiantuotannosta_erilaisilla_asuinalueilla_Loppuraportti.pdf.
- [47] Eero Vartiainen, Päivi Luoma, Jari Hiltunen, ja Juha Vanhanen. *Hajautettu energiantuotanto: teknologia, polttoaineet, markkinat ja CO₂-päästöt*. Gaia Group Oy, 2002. [Viitattu 14.11.2014]. Saatavissa <http://energia.fi/sites/default/files/hajautettuenergiantuotanto2cloppuraportti.pdf>.
- [48] ÅF Consult Oy. *Opas sähkön pientuottajalle*. Motiva Oy, 2012. [Viitattu 8.10.2014]. Saatavissa http://www.motiva.fi/files/5724/Opas_sahkon_pientuottajalle_2012.pdf.
- [49] Hannu-Pekka Hellman, Matti Koivisto, ja Matti Lehtonen. Photovoltaic power generation hourly modeling. In *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*, 2014. Saatavissa: <https://dx.doi.org/10.1109/EPE.2014.6839426>. The 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, Brno, Czech Republic, May, 2014.
- [50] Risto Linturi, Osmo Kuusi, ja Toni Ahlqvist. Suomen sata uutta mahdollisuutta: radikaalit teknologiset ratkaisut. Tutkimusraportti, Eduskunnan tulevaisuusvaliokunta, 6/ 2013.
- [51] Helsingin kaupungin tietokeskus. Ennakkotietoja Helsingin väestömuutoksista vuonna 2012 ja väkiluvusta vuodenvaihteessa 2012/2013. [Viitattu 4.12.2014].

Saatavissa http://www.hel.fi/A83844CF-D2E3-4395-ABE2-83A55E2A89DB/ForceRequestingFullContent/A83844CF-D2E3-4395-ABE2-83A55E2A89DB/hel2/tietokeskus/julkaisut/pdf/13_02_21_Tilastoja_7_Vuori.pdf.

- [52] Vantaa HSY ja Uudenmaan liitto Helsinki, Espoo. Aluesarjat.fi. [Viitattu 4.12.2014]. Saatavissa <http://www.aluesarjat.fi/>.

A Käyttöliittymä

Skenariointityökalu koostuu kahdesta ikkunasta: pääikkunasta ja alueskenaarioikkunasta. Pääikkuna on esitetty kuvassa A1 ja skenaarioikkuna kuvassa A2.



Kuva A1: Skenariointityökalun pääikkuna

Yhteis skenaario:

testi
testi2

Uudist ratkaisut

	2020	2030	2040
Asuminen, sl	0.98	0.95	0.94
Asuminen, ei sl	1	1	0.95
Palvelut	1.05	1.10	1.15
Teollisuus	1.03	1.05	1.09
Muut	1	1	1

Demassaivelev ratkaisut

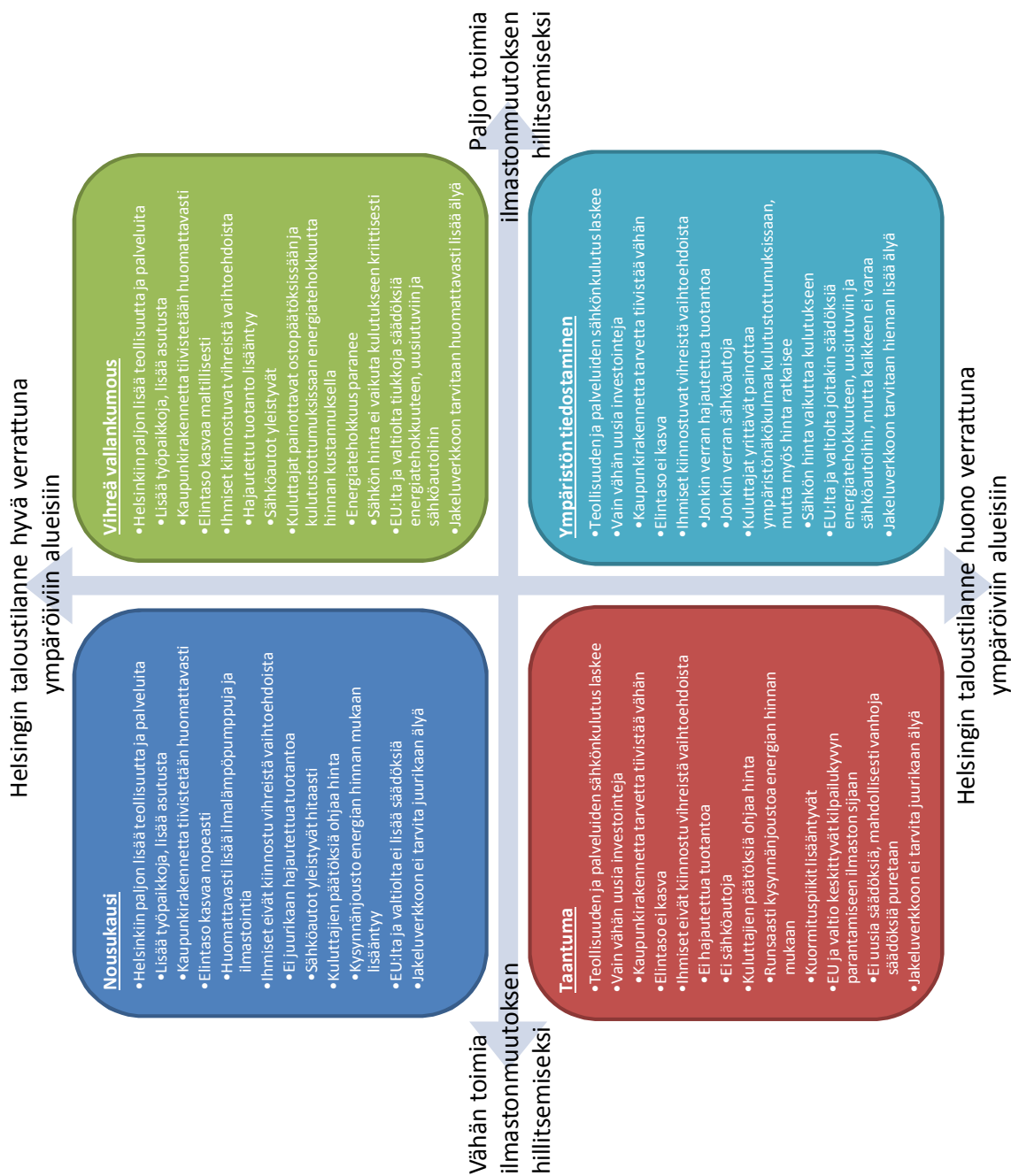
	2020	2030	2040
Asuminen, sl	0.97	0.93	0.90
Asuminen, ei sl	1	1	0.98
Palvelut	1	1.04	1.07
Teollisuus	1.01	1.02	1.03
Muut	1	1	1

testi2
Tallenna
Poista
Kytke

	Eteläisen suurpiiri	Läntinen suurpiiri	Keskinen suurpiiri	Pohjoinen suurpiiri	Koillinen suurpiiri	Kaakonnen suurpiiri	Itäinen suurpiiri	Oyeyrsuudinn suurpiiri
Kuunuhaka	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Kuivi	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Kaartinraupunki	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Kangas	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Punavuori	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Era	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Ullanlinna	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Katjanokka	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Kalvopuisto	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Etu-Töölö	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Taka-Töölö	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Ruoholahti	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Lepolahti	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Järvenpää	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Hemasaari	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Kotkavuori	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Vartiainen	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Myykkälä	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Konviskaari	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Suomenlinna	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea
Lansaanret	Hidas	Hidas	Perus	Nopea	Hidas	Hidas	Perus	Nopea

Kuva A2: Työkälun alueskenariointi-ikkuna

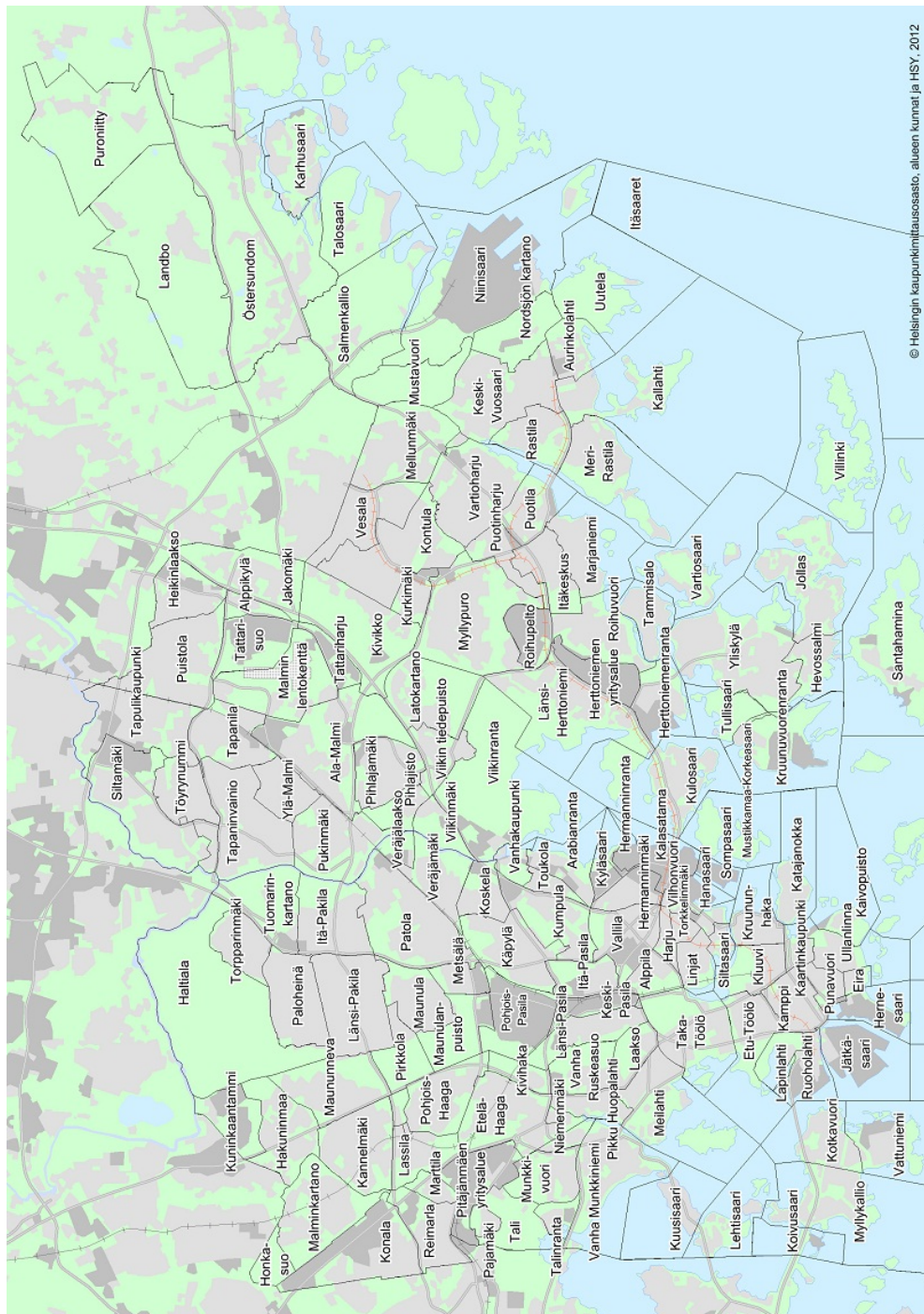
B Helsingin sähkönkäyttöskenaariot vuonna 2050



Kuva B1: Helsingin sähkönkäytön skenaariot vuonna 2050

C Helsingin jako osa-alueisiin

Lähde: Helsingin kaupunkimittausosasto, Helsinki ja HSY. Helsingin osa-alueet. [Viitattu 29.09.2014], Saatavissa: http://www.aluesarjat.fi/aluejakokartat/.%5CHelsingin_osaalueet.html



Kuva C1: Helsingin jako osa-alueisiin