

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Energiatekniikka

Kreetta Manninen

**RAKENNUKSEN KYSYNTÄJOUSTOMALLINNUKSEN
VAATIMUSTEN MÄÄRITYS**

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
 Tutkijaopettaja, TkL Aija Kivistö
Ohjaaja: DI Santeri Siren

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Energiatekniikka

Kreetta Manninen

Rakennuksen kysyntäjoustoprojektin vaatimusten määrittäminen

Diplomityö

2017

81 sivua, 36 kuvaa, 6 taulukkoa ja 1 liitettä.

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
 Tutkijaopettaja, TkL Aija Kivistö

Ohjaaja: DI Santeri Siren

Hakusanat: kysyntäjousto, kuormanohjaus, dynaaminen mallinnus, älykkäät energiasuunnitelmat

Osana ilmastonmuutoksen vastaisia toimenpiteitä tulevaisuudessa lisätään entisestään uusiutuvien energialähteiden käytön osuutta energiantuotantorakenteessa. Tällä on vaikutusta energiasuunnitelman hallintaan ja varmuuteen. Vaikutukset näkyvät sähkösuunnitelman tasapainossa, sillä sähköntuotannosta tulee vaikeasti ennustettavampaa. Sähkösuunnitelma tarvitsee lisää tehotasapainon hallintaan käytettävää säädettävää kapasiteettia. Kysyntäjousto tarjoaa ratkaisuja sähkösuunnitelman tasapainottamiseen eli sähkökäyttäjät osallistuvat kuorman hallintaan joustamalla omaa kulutustaan, sekä tarjoamalla reservikapasiteettia häiriötilanteisiin ja huippukuormien kattamiseen.

Tämän diplomityön tarkoitus oli selvittää liikerakennuksen osallistumista kysyntäjousto- Suomessa. Työssä selvitettiin Suomen sähkömarkkinoiden toiminta ja sähkösuunnitelman tehotasapainon hallinnan periaatteet rakennuksen näkökulma samalla huomioiden. Työssä määriteltiin rakennukselle kysyntäjoustoprojektin ja niiden reunaehdot.

Työn tuloksena voidaan todeta, että vaikka rakennusten osallistuminen kysyntäjoustoprojektin markkinoille on Suomessa vielä haasteellista, se nähdään kiinnostavana ja mahdollisena ratkaisuna lähitulevaisuudessa. Työssä selvitettiin, että kysyntäjoustoprojektin reunaehdot voidaan tarkastella rakennusten energiasimuloinnilla ja näin saadaan samalla tietoa kysyntäjoustoprojektin vaikutuksesta rakennuksen sisäilmasto-olosuhteisiin. Kysyntäjoustoprojektin kautta rakennukset tulevat entistä tiiviimmin osaksi suurempaa energiasuunnitelmaa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Energy Technology

Kreetta Manninen

Evaluation of requirements in buildings demand response modelling

Master's Thesis

2017

81 pages, 36 figures, 6 tables and 1 appendix.

Examiners: Professor, D.Sc. (Tech) Esa Vakkilainen
 Univ. Lecturer, Lic. Tech. Aija Kivistö
Supervisor: M.Sc. (Tech) Santeri Siren

Keywords: demand response, load management, dynamic modelling, smart energy systems

As a part of the climate change actions the use of renewable energy sources in the energy system will be increasing in future. This has an effect on the energy system management and energy supply security. The impact to the system will change the balance of energy system, due to the difficultness of predict renewable electricity production. The electrical system needs to increase the power balance management with an adjustable power capacity. Demand response offers solutions for balancing the electricity system, i.e. electricity consumers may participate in the load management with their flexible consumption, as well as providing reserve capacity for system disturbance situations and to cover peak demands.

The objectives of this Master's Thesis were to research the involvement of the buildings demand response in Finland. The thesis examined the Finnish electricity market and the principles of the power balance markets from the real estate's point of view. During the project the demand response models and boundary conditions for buildings purpose were specified.

The research found out that although the participation of buildings in the demand response markets is still a challenge in Finland, it is seen as an attractive and feasible solution in the near future. The study indicated that energy modelling is a possible option for determining buildings demand response models and the boundary conditions. Also, it will provide feasible information about the effects of demand response strategies to the interior climate conditions.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Ramboll Finland Oy:lle syksyn 2016 ja kevään 2017 aikana. Haluan kiittää Rambollilta Seppo Mäki-Pollaria ja Mika Kovasta erittäin mielenkiintoisesta sekä sopivasta diplomityön aiheesta. Kiitän SRV:tä ja Jani Mäkistä mahdollisuudesta hyödyntää kauppakeskus REDI:ä kohteena työssä. Erityisesti kiitän myös Rambollin Espoon Niittykummun toimipisteen kollegoita, jotka ohjasitte minut rakennusten energiatehokkuuden maailmaan ja annoitte tukea työhön liittyen. Työn aihe oli lähtökohtaisesti hyvin laaja ja sopivan rajauksen hahmottaminen otti aikansa. Vaikka täysin uuteen aiheeseen perehtyminen on ollut ajoittain haasteellista, se on ollut kuitenkin erittäin inspiroivaa.

Opiskeluajan minua kantoa voimakas kiinnostus perehtyä syvemmillä energia-alaan ja tämä intohimo vie minua edelleen eteenpäin. Kiitän suuresti siis myös Lappeenrannan teknillisen yliopiston energiatekniikan koulutusohjelmaa mainiosta tutkinnosta. Tästä on hyvä diplomi-insinöörin jatkaa.

Suurimmat ja tärkeimmät kiitokset haluan osoittaa Jannelle. Olet ollut koko pitkän opiskeluajan tukenani kaikilla kannustavilla sanoillasi ja kaikella tarjoamallasi avulla. Olet ollut aina tarvittaessa tuulena purjeissa ja majakkana myrskyissä. Kiitos.

“The important thing is not to stop questioning. Curiosity has its own reason for existing.”

- Albert Einstein

Helsingissä 17. huhtikuuta 2017

Kreetta Manninen

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	9
1.1	Työn tausta	9
1.2	Työn tavoite ja rajausta	11
2	SÄHKÖMARKKINAT.....	13
2.1	Sähkömarkkinalaki.....	14
2.2	Sähköpörssi	15
2.2.1	Elspot- ja Elbas-markkinat	17
2.2.2	Sähköenergian hinnan muodostuminen.....	18
2.2.3	Loppukäyttäjän sähköhinnan muodostuminen	20
2.3	Valtakunnallisen tehotasapainon hallinta.....	22
2.3.1	Säätösähkömarkkinat.....	23
2.3.2	Reservimarkkinat	24
3	KYSYNTÄJOUSTO ÄLYKKÄÄSSÄ ENERGIAJÄRJESTELMÄSSÄ.....	27
3.1	Kysyntäjoustopäämääritelmä.....	28
3.2	Implisiittiset kysyntäjoustopäämenetelmät.....	31
3.3	Eksplisiittiset kysyntäjoustopäämenetelmät	32
3.4	Sähkömarkkinoiden kysyntäjoustopääpaikat Suomessa.....	33
3.5	Rakennus osana joustavaa energiajärjestelmää.....	35
3.6	Kysyntäjoustopäänykytilanne kansainvälisesti.....	37
3.6.1	Kysyntäjoustopääohjelmat.....	38
3.6.2	Käytännön kysyntäjoustopääratkaisut	39
4	RAKENNUKSEN ENERGIAATEHOKKUUS.....	43
4.1	Rakennuksen energiankulutus.....	44
4.2	Rakennusten energiatehokkuuden direktiivit.....	45
4.3	Rakennuksen tehokkuuden vaatimukset	47
4.3.1	Energiatehokkuus	47
4.3.2	Sisäilmasto	48
4.3.3	Älykkyys	51
5	KYSYNTÄJOUSTON TOTEUTUSMALLIT	52
5.1	Rakennuksen energiamalli	53
5.2	Case kohde: Kauppakeskus REDI	54
5.3	Talotekniikan kysyntäjoustopää	56
5.3.1	Ilmanvaihdon sähkötehon leikkaus	58
5.3.2	Vaikutus jäähtymis- ja lämmitystehon tarpeeseen	61

5.3.3	Ilmanvaihdon sähkötehon lisäys	62
5.3.4	Vaikutus sisäilmasto-olosuhteisiin	63
5.3.5	Valaistuksen tehonleikkaus	66
5.4	Varavoiman ja akustojen hyödyntäminen kysyntäjoustossa	67
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	69
	LÄHDELUETTELO	72

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit

f	Frequency, taajuus
P	Power, teho
SFP	Ominaissähköteho [kW/m ³ ,s]

Yksiköt

Hz	hertsi, taajuuden yksikkö
kW	kilowatti
kWh	kilowattitunti
MW	megawatti
MWh	megawattitunti
ppm	Parts Per Million, miljoonasosa (%)

Lyhenteet

AMI	Automatic Meter Infrastructure, automaattisen mittaroinnin infrastruktuuri
AMR	Automatic Meter Reading, automaattinen mittarinluenta
CHP	Combined Heat and Power, yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto
DLC	Direct Load Control, suora kuormanohjaus
DoE	U.S Department of Energy

DR	Demand Response, kysyntäjousto
DSM	Demand Side Management, sähkön kysynnän hallinta
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive, rakennusten energiatehokkuusdirektiivi
EPRI	The Electric Power Research Institute
EU	Euroopan Unioni
FCR	Frequency Containment Reserve, taajuuden vakautusreservi
FCR-D	Frequency Containment Reserve for Disturbance, taajuusohjattu häiriöreservi
FCR-N	Frequency Containment Reserve for Normal operation, taajuusohjattu käyttöreservi
HEMS	Home Energy Management Systems, asuinkiinteistöjen energianhallintajärjestelmä
ICT	Information and Communication Technologies
LVI	Lämpö, Vesi, Ilma
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö
YM	Ympäristöministeriö
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus (nyk. Teknologian tutkimuskeskus)

1 JOHDANTO

Suomen ja pohjoismaisen energiajärjestelmän rakenteessa tapahtuvat muutokset vaikuttavat kysynnän ja tuotannon tasapainoon. Energiajärjestelmän rakenteellisten muutosten taustalla on ilmastotavoitteiden kiristyminen, tavoitteet lisätä resurssitehokkuutta, energiantuotannon monimuotoisuutta ja omavaraisuutta. Pitkän aikavälin tavoitteiden mukaisesti päästövähennyksiä haetaan korvaamalla osa konventionaalisista energiantuotantomuodoista uusilla päästöttömillä vaihtoehdoilla. Ilmastomuutos on laajalti tiedeyhteistöissä tunnustettu ja välttämätön muutos, johon vaaditaan reagointia muun muassa uusiutuvien energialähteiden aseman vahvistamisella entisestään tulevaisuudessa. Voimakkaasti sääriippuvaisen ja siksi vaikeasti ennustettavan uusiutuvan energiantuotannon, pääasiassa tuulivoiman ja aurinkoenergian, lisääntyminen vaativat energiajärjestelmältä mukautumista. Joustava ja älykäs energiajärjestelmä tarvitsee toteutuakseen säädettävän energiantuotannon lisäksi joustavuutta myös järjestelmän toiselta puolelta eli kuluttajapuolelta. Kuluttajan osallistumista sähköverkon kuormituksen joustoon kutsutaan kysyntäjoustoksi. Aikaisemmin passiiviset energiankuluttajat voivat tulevaisuudessa olla aktiivisempi osapuoli energiajärjestelmän tasapainon ylläpidossa ja hyötyä taloudellisesti kysyntäjoustoon osallistumisesta. Kysyntäjoustoa voidaan tarkastella monesta eri näkökulmasta kysynnän ja tuotannon puolelta. Tässä työssä näkökulmaksi on valittu kuluttajaosapuolelta rakennusten kysyntäjousto.

1.1 Työn tausta

Ilmastomuutokseen liittyviä toimenpiteitä on sovittu kansainvälisellä ilmastopoliittisella järjestelmällä, jonka ensimmäinen linjaus tehtiin vuonna 1994 voimaan tulleessa *YK:n ilmastomuutoksen puitesopimuksessa*. YK:n ilmastopoliittisesta täsmentävästä ensimmäisestä oikeudellisesti sitovasta sopimuksesta, *Kioto-protokolla*, astui voimaan 2005 ja sen avulla kasvihuonekaasupäästöjä on vähennetty asetettujen tavoitteiden ohjaamana kansainvälisesti. Kansainvälisen ilmastopoliittisyyden yhdenmukaisia velvoitteita on linjattu paremmin joulukuussa 2015 hyväksytyssä *Pariisin ilmastopoliittisessä*, jota pidetään yleisesti merkittävänä saavutuksena. (YM 2017)

EU:n ilmastopoliittisyyden tavoitteet ja toimenpiteet on asetettu tarkemmin vuosille 2020 ja 2030. 20–20–20 tavoitteet tarkoittavat 20 prosentin päästövähennyksiä, 20 prosentin uusiutuvan energian käyttöä ja 20 prosentin energiatehokkuuden parantamista

vuoteen 2020 mennessä. Vuoteen 2030 mennessä on kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoite vähintään 40 prosenttia, uusiutuville energialähteille on asetettu tavoitteeksi sitova vähintään 27 prosentin EU-tason tavoite ja energiatehokkuuden parantamiselle 27 prosentin EU-tason ohjeellinen tavoite. (TEM 2017)

Suomi on sitoutunut osaltaan ilmastonmuutosta koskeviin velvoitteisiin ja linjannut joukon toimenpiteitä *kansallisessa energia- ja ilmastostrategiassaan*. Suomen maakohtainen uusiutuvan energian edistämistavoite oli nostaa uusiutuvilla energialähteillä tuotetun energian osuus 38 %:iin. Suomi saavutti tämän tavoitteen jo vuonna 2014. Uusin energia- ja ilmastostrategia julkaistiin loppuvuodesta 2016 ja sen tavoitteet on linjattu vuoteen 2030. Suomen pitkän aikavälin tavoitteena on hiilineutraali yhteiskunta, joka toteutuakseen edellyttää uusien energiaratkaisujen voimakasta implementointia. *Suomen energia- ja ilmastotiekartta 2050* on strategisen tason ohjeena vähähiiliseen yhteiskuntaan. Tiekartta ohjaa tavoitteita Suomen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi 80 – 95 prosentilla vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä. (TEM 2017)

Suomessa tuotettiin vuoden 2015 aikana tuulivoimalla 2327 GWh ja aurinkovoimalla 10 GWh sähköenergiaa, käsittäen noin 3,5 % koko sähköenergiatuotannosta Suomessa (Tilastokeskus 2017). Etenkin aurinkovoiman tuotannon ennustetaan kasvavan voimakkaasti jopa 10 TWh:n saakka ja tuulivoiman tuotanto voi saavuttaa yli 100 TWh:n (Breyer et. al 2015). Uusiutuvan sääriippuvaisen sähköenergiatuotannon lisääntyminen kasvattaa säätövoiman tarvetta Suomessa. Säätövoimaa tarvitaan tunnin sisäiseen ja päivän sisäiseen tehotasapainon säätöön. Tyypillisesti tähän ovat osallistuneet suuret voimalaitokset, kuten säädettävä vesivoimantuotanto tai lämpövoima. Tunnin sisäinen säätövoimantarve kasvaa arvioiden mukaan 400 MW:n tasolle vuoteen 2020 mennessä. Vuorokaudensisäisen säätövoimantarpeen arvioidaan jopa kaksinkertaistuvan vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi haasteita kasvattaa uusiutuvan energian tuotannon lisääntymisestä johtuva sähköjärjestelmän inertian eli pyörivän tuotannon pieneneminen. (Energiateollisuus 2017a)

Rakennetusta ympäristöstä muodostuu merkittävä osuus Suomen kasvihuonepäästöistä, sillä kansallisesti energian loppukäytöstä rakennukset kattavat noin 38 prosentin osuuden. Ilmasto- ja energiastrategiassa on linjattu myös rakennetulle ympäristölle toimia, sillä alueidenkäyttöä ja rakentamista koskevat päätökset vaikuttavat pitkälle tulevaisuuteen infrastruktuurin hitaasta muutoksesta johtuen. Uudisrakentamisessa nähdään tarpeelliseksi

edistää aurinkosähkön ja – lämmön tuotantoa sekä älykkäiden järjestelmien ja sähkön kysyntäjoustopotentialin käyttöönoton edellytyksiä. (TEM 2017)

Energiajärjestelmältä vaaditaan tulevaisuudessa monipuolisuutta ja näin ollen kuluttajapuolen vaikutusmahdollisuudet on huomioitava laajemmin. Kansallisesti sähköjärjestelmästä tulee vaikeampaa ennustaa ja hallita, ja näin syntyy paineita myös sähkökulutuksen joustopotentialin kehityksen suuntaan. Kysyntäjoustopotentialin edistämiseksi merkittävää on mahdollistaa kuluttajien, kuten rakennusten, aktiivinen osallistuminen sähkömarkkinoille älykkäiden ratkaisujen avulla. Tämän toteutuksessa nousee keskeiseen rooliin sähkömarkkinoiden ja älyverkkojen kehittäminen, jotka toimivat palvelualustana siirryttäessä kohti hajautetumpaa ja hiilineutraalia energiajärjestelmää. Älyverkkojen kehityksessä on Suomessa ja Euroopan tasolla otettu edistysaskeleita panostamalla lukuisiin kehityshankkeisiin. Älyverkot lisäävät kuluttaja-asiakkaiden mahdollisuuksia osallistua sähkömarkkinoille ja näin luovat uusia liiketoimintamahdollisuuksia yrityksille. Uudet liiketoimintamahdollisuudet muodostuvat älyverkkojen, hajautetun energiantuotannon ja kysyntäjoustopotentialin kautta. Rakennusten suunnitteluvaiheessa tehtyjen valintojen merkitys korostuu tulevaisuudessa entisestään, kun rakennusten järjestelmät linkittyvät osaksi suurempaa kokonaisuutta.

1.2 Työn tavoite ja rajaus

Työ keskittyy seuraavien tutkimuskysymysten pariin:

- Miten kysyntäjoustopotentialin osallistuminen vaikuttaa kiinteistön energiajärjestelmän suunnitteluun
- Miten kysyntäjoustopotentialin osallistuvaa kiinteistön järjestelmää mallinnetaan
- Mikä on kiinteistön rooli tulevaisuuden energiajärjestelmässä

Tavoitteena on löytää reunaehdot kiinteistön kysyntäjoustopotentialin määrittämiseen ja saada selville kysyntäjoustopotentialin osallistuvalla kiinteistöllä asetetut tekniset vaatimukset sekä näiden vaatimusten mukaisesti toteutetun järjestelmän kysyntäjoustopotentiali. Työssä selvitetään, miten erilaisia kysyntäjoustopotentialin soveltuvia kuormia voidaan hyödyntää ilman rakennuksen sisäilmasto-olosuhteiden heikentymistä. Toisaalta tavoitteena on myös avata kiinteistöjen lvi- ja energiasuunnittelupuolen toimijoille taustatietoja ja eri

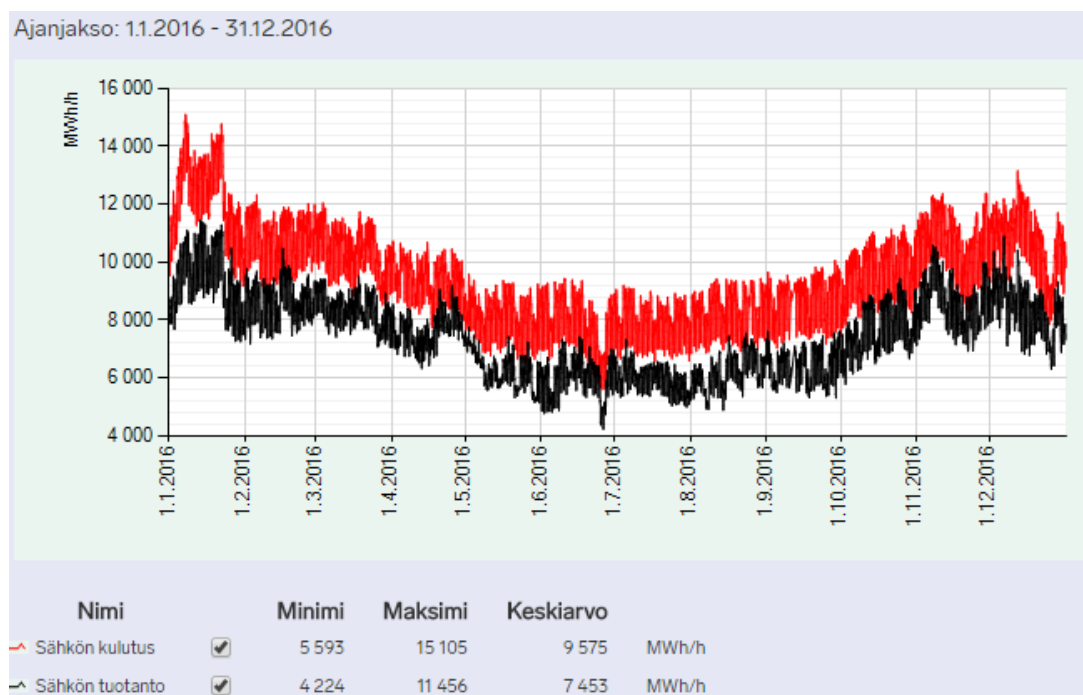
näkökulmia energia- ja sähkömarkkinoiden toimintamekanismeihin, jotka vaikuttavat kysyntäjousta hyödyntävän kiinteistön mahdollisuuksiin.

Työssä määritetään näistä lähtökohdista case kohteena olevan kiinteistön energiajärjestelmän soveltuvuutta kysyntäjousta markkinapaikoille. Case kohteena on Helsingin Kalasatamaan rakennettava kauppakeskus REDI. Työn alkuosa käsittelee ja rajaa aihetta laajasti kirjallisuustiedon perusteella. Työn alkuosassa esitetään tutkittavan aihepiiriin tärkeimmät tekijät kiinteistöjen kannalta, jotka määräytyvät kysyntäjousta markkinapaikan, kiinteistön tehokkuusvaatimusten ja eri kysyntäjousta toteutusmenetelmien kautta. Tämän jälkeen tehdään case tarkastelut työhön valitulle kohteelle. Case tarkastelujen pohjalla käytetään IDA ICE ohjelmistolla simuloitua tuntikohtaista dataa. Työssä käsitellään vain uudisrakennuksia eikä oteta kantaa olemassa olevien rakennusten kysyntäjousta mahdollisuuksiin. Lisäksi työssä käsitellään vain liikerakennuksen kysyntäjoustopotentiaalia. Muut rakennustyypit rajataan tarkastelun ulkopuolelle, sillä niiden kysyntäjousta on käsitelty paljon jo muissa tutkimuksissa ja opinnäytetöissä.

2 SÄHKÖMARKKINAT

Kysyntäjoukseen voi osallistua sähkömarkkinoilla useille eri markkinapaikoille. Rakennuksen mahdollisuudet kysyntäjouksemarkkinoille määräytyvät sen mukaan, kuinka sen järjestelmät vastaavat näiden markkinapaikkojen vaatimuksiin ja sääntöihin. Näiden ymmärtämiseksi on hyvä selvittää sähkömarkkinoiden toiminnan periaatteita ja sähköjärjestelmän tehotasapainon hallinnan tarpeita. Tässä kappaleessa on käyty läpi sähkömarkkinoita niiltä osin kuin niiden tuntemus on tarpeellista rakennuksen kysyntäjoukstemenetelmiä ajatellen.

Suomi on osa yhteispohjoismaista sähkövoimajärjestelmää, joka koostuu voimalaitoksista, kantaverkosta, jakeluverkoista sekä sähkön kuluttajista. Suomi on hyvin riippuvainen tuontisähköstä ja osa kulutuksesta joudutaan kattamaan naapurimaista tuodulla sähköllä. Suomesta on siirtoyhteydet Venäjälle, Viroon, Ruotsiin ja Norjaan. Sähköä tuodaan ja Suomessa tuotettua sähköä siirretään näiden maiden välillä. Kuvassa 2.1. on esitetty vuoden mittaisen jakson aikainen sähkön kokonaiskulutus ja – tuotanto Suomessa. Punainen käyrä kuvaa sähkön kulutusta ja musta käyrä sähkön tuotantoa. Sähkön kulutukseen on huomioitu sähkön tuotannon ja tuonnin summa, josta on vähennetty sähkön viennin osuus.



Kuva 2.1 Sähkön tuotanto ja kulutus Suomessa vuonna 2016. (Fingrid 2017b)

Pohjoismaissa käydään sähkökauppaa omassa Pohjoismaisessa sähköpörssissä eli Nord Poolissa. Suomen lisäksi Nord Poolin markkina-alueeseen kuuluu Ruotsi, Norja, Tanska, Viro, Liettua ja Latvia. Pohjoismaista on siirtoyhteydet lisäksi Saksaan, Puolaan, Hollantiin ja Venäjälle (Partanen et. al 2014). Suomen sähköjärjestelmään aiheuttaa tulevaisuudessa muutoksia uudet voimalaitosinvestoinnit ja poistuva tuotantokapasiteetti, kuin myös sääriippuvaisen uusiutuvan energian tuotannon ja tasaisesti ajettavan ydinvoiman lisääntyminen. Nämä vaativat lisää voimajärjestelmän tehotasapainon hallintaan osallistuvaa säätökapasiteettia ja uusia reservejä, jolloin kysyntäjoustolle syntyy tarvetta.

2.1 Sähkömarkkinalaki

Suomessa sähkömarkkinoiden toimintaa säätelevät *sähkömarkkinalaki (588/2013)*, *valtioneuvoston asetus sähkömarkkinoista (65/2009)*, *laki Energiavirastosta (870/2013)*, valtioneuvoston ja työ- ja elinkeinoministeriön päätökset ja asetukset sekä Euroopan Unionin asetukset ja direktiivit. Sähkömarkkinoiden toimintaa on säädelty Suomessa vuodesta 1995 alkaen sähkömarkkinalailla (386/1995), jolloin markkinat avattiin sähkön myynnin ja tuotannon osalta kilpailulle. Aluksi kilpailuttaminen oli mahdollista suurille yli 500 kW asiakkaille, mutta vuodesta 1997 alkaen tehoraja poistettiin. Tyypikuormituskäyräjärjestelmän käyttöönotto syksyllä 1998 poisti jatkuvan tuntitehon mittaustarpeen, jonka jälkeen pienimmät sähkön käyttäjät pääsivät mukaan kilpailuun. Sähkömarkkinalain uudistus (588/2013) astui voimaan syksyllä 2013. (Partanen et al. 2014, Finlex 2017)

Suomessa voimalaitoksilta kantaverkkoon tapahtuvasta sähkönsiirrosta vastaa valtakunnallinen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj, jonka omistuksessa ovat myös maan rajojen yli menevät johdot. Fingridin vastuulla on sähkövoimajärjestelmän toimitusvarmuus ja tehotasapainon hallinta, mutta ei tehon riittävyys (Fingrid 2016d). Kantaverkkoyhtiötä kutsutaan tämän vastuun johdosta myös järjestelmävastaaviksi.

Kantaverkosta sähkö siirretään kuluttajille jakeluverkkojen kautta. Sähkön jakelusta vastaavat alueellisessa monopoliasemassa toimivat jakeluverkonhaltijat. Sähkömarkkinalaissa (Sähkömarkkinalaki 1995) on säädetty verkonhaltijalle siirto-, liittämisen- ja verkon kehittämisvelvollisuus sekä velvollisuus toimia tasapuolisesti, syrjimättömästi ja avoimesti eri myyjien ja asiakasryhmien suhteen. Hinnoittelun osalta on

lisäksi säädetty, että sähkön siirron hinnoittelu toteuttaa pistehinnoittelua ja verkkopalvelujen hinta jakeluverkossa on riippumaton asiakkaan maantieteellisestä sijainnista verkonhaltijan vastualueella. (Partanen et al. 2014)

Sähkömarkkinalaki vaikuttaa kiinteistön uusiutuvan energian hyödyntämiseen ja energian varastointiin. Sähkömarkkinalaki vaikuttaa tämän kautta siis suoraan kysyntäjoukon hyödyntämiseen kiinteistötasolla, mikäli kiinteistön energiajärjestelmään liittyy sähkön omatuotantoa ja sähkön varastointia. Sähkömarkkinalaki muun muassa määrää kiinteistössä sallitun pientuotannon nimellistehon, sen mittaroinnin ja kiinteistön tontilla tapahtuvan sähkönsiirron esimerkiksi mikroverkon hyödyntämisessä (Finsolar 2017).

2.2 Sähköpörssi

Sähkökauppa jakautuu isojen toimijoiden tukkusähkökauppaan ja pienasiakkaiden vähittäismyyntiin, jota havainnollistaa kuva 2.2. Sähköpörssi toimii kauppojen selvityspaikkana ja sähköpörssissä kaupankäyntiin ei liity vastapuoliriskiä. Sähköpörssissä sähkön markkinahinta määräytyy kysynnän ja tarjonnan perusteella, mutta sähköpörssin lisäksi on myös mahdollista käydä sähkökauppaa kahdenvälisillä markkinoilla eli OTC-markkinoilla. Sähkön tuottajat myyvät sähköä kahdenvälisin sopimuksin suurasiaakkaille ja sähkön vähittäismyyjille, joita ovat pääasiassa paikalliset ja alueelliset sähköyhtiöt. Sähköpörssi ja OTC-markkinat ovat kaupankäyntipaikkoja sähkön tukkukaupalle. (Partanen et. al 2014)

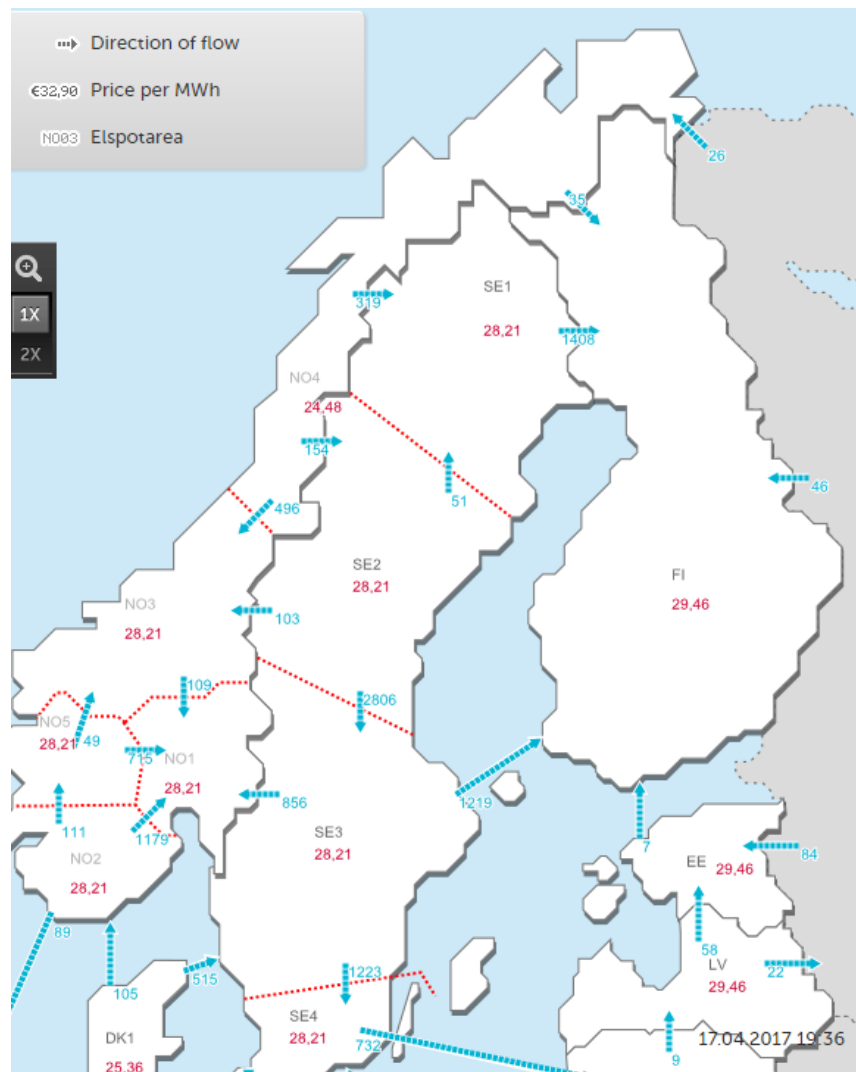


Kuva 2.2 Sähkökaupan jakautuminen tukkusähkö- ja vähittäismyyntimarkkinoihin. Kuvassa "G" tarkoittaa sähkön tuottajaa ja "Asiakas" sähkön käyttäjää. (Partanen et. al 2014)

Sähköpörssi ja OTC-markkinat ovat kaupankäyntipaikkoja sähkön tukkukaupalle ja tukkusähkömarkkinoilla tapahtuu kaupankäyntiä lähinnä suurten toimijoiden kesken. Kaupankäyntiä käydään Pohjoismaissa fyysiseen sähkön toimitukseen johtavilla tuotteilla

Nord Poolin Spot-markkinoilla ja johdannaistuotteilla Nasdaq OMX Commodities – finanssimarkkinoilla. Pohjoismainen Nord Pool sähköpörssi on avoin ja keskitetty sekä neutraali markkinapaikka sähkön ostamiseen ja myymiseen (Nord Pool 2016). Fyysisillä tuotteilla kaupankäynti tapahtuu Nord Poolin Elspot- ja Elbas - markkinoilla. (Partanen et. al 2014)

Koska fyysinen tukkusähkökaupankäynti johtaa aina sähkön toimitukseen, tulee Spot-markkinoiden osapuolilla olla yhteys sähköverkkoon. Spot-markkinoilla tapahtuvasta kaupankäynnistä seuraa sähkönsiirtoa, mutta sähköverkkojen rajoitteista johtuen syntyy kuitenkin pullonkaulatilanteita ja nämä korjataan jakamalla markkinat hinta-alueisiin kuvan 2.3 mukaisesti. Näistä hinta-alueista muodostuu niin kutsutut aluehinnat, joihin esimerkiksi Suomessa tyypillisesti myytävät loppuasiakkaiden sähköhinnat on sidottu. Hinta-alueisiin jakamisen lisäksi pullonkaulatilannetta korjataan kunkin maan järjestelmävastaavan osalta vastaostoilla, eli käytännössä tarvittava teho ostetaan säätösähkömarkkinoilta tai rajoitetaan pullonkaulan eri puolilla olevien toimijoiden tuotantoa tai kulutusta. Säätösähkömarkkinoiden toimintaa on kuvattu lisää kappaleessa 2.3. (Partanen et. al 2014)



Kuva 2.3 Pohjoismaisen sähköjärjestelmän hetkellinen sähkönsiirto (MW) ja sähkön aluehinnat (€/MWh). (Fingrid 2017a)

2.2.1 Elspot- ja Elbas-markkinat

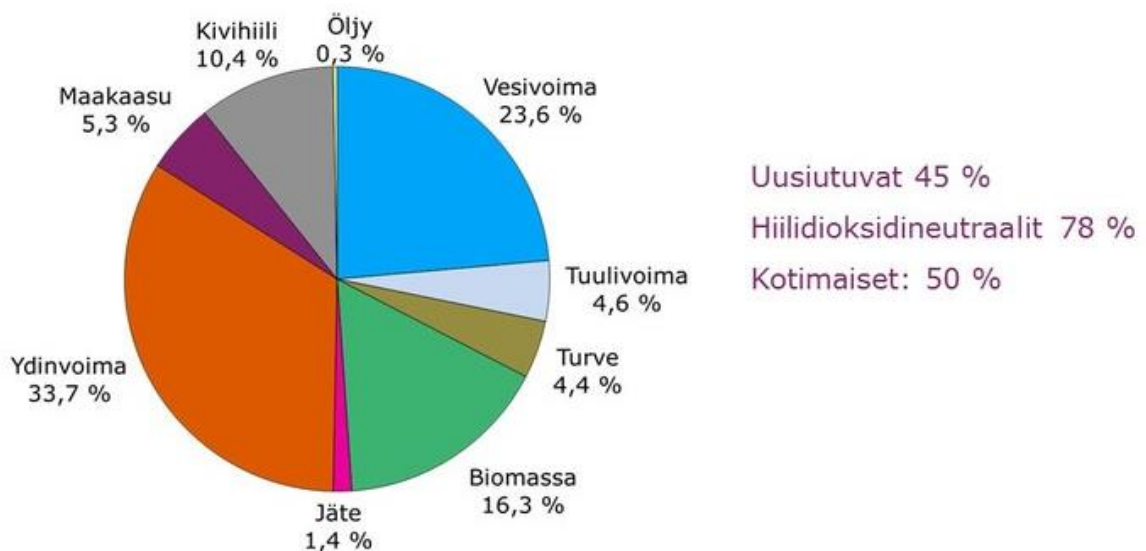
Sähkön spot-markkinoilla viitataan usein Elspot- ja Elbas markkinoihin, joilla käydään kauppaa seuraavan vuorokauden tuntien sähkötoimituksesta. Elspot-markkinoilla toimiessa kaupankäynnin osapuolet tekevät osto- ja myyntitarjouksia suljettuna tarjousmenettelynä kerran päivässä. Kauppaa käydään 0,1 MWh:n ja sen kerrannaisten kiinteillä sähkötoimituksilla. Toimitukset koskevat seuraavan päivän toimitustunteja 00-23. Näiden tarjousten mukaan muodostuu yksi sähkön markkinahinta eli systeemihinta jokaiselle päivän tunnille, joka kuvaa kaikkein kalleimman tuotantotavan hintaa jolla

kysyntä voidaan tasapainottaa. Osto- ja myyntitarjouksien kautta markkinat toimivat tehokkaasti, sillä tuotantomuotoja käytetään tällöin edullisimmasta alkaen. Käytännössä systeemihinta on siis hinta, joka energiasta ollaan tuolloin valmiita maksamaan. (Partanen et. al 2014, Nord Pool 2016)

Elbas- markkinat toimivat Elspot-kaupankäynnin jälkimarkkinana, jossa kaupankäynti on jatkuva-aikaista 365 päivää vuodessa 24 h vuorokaudessa. Näillä markkinoilla kaupankäynnin kohteena ovat 1 MWh:n kerrannaiset. (Partanen et. al 2014)

2.2.2 Sähköenergian hinnan muodostuminen

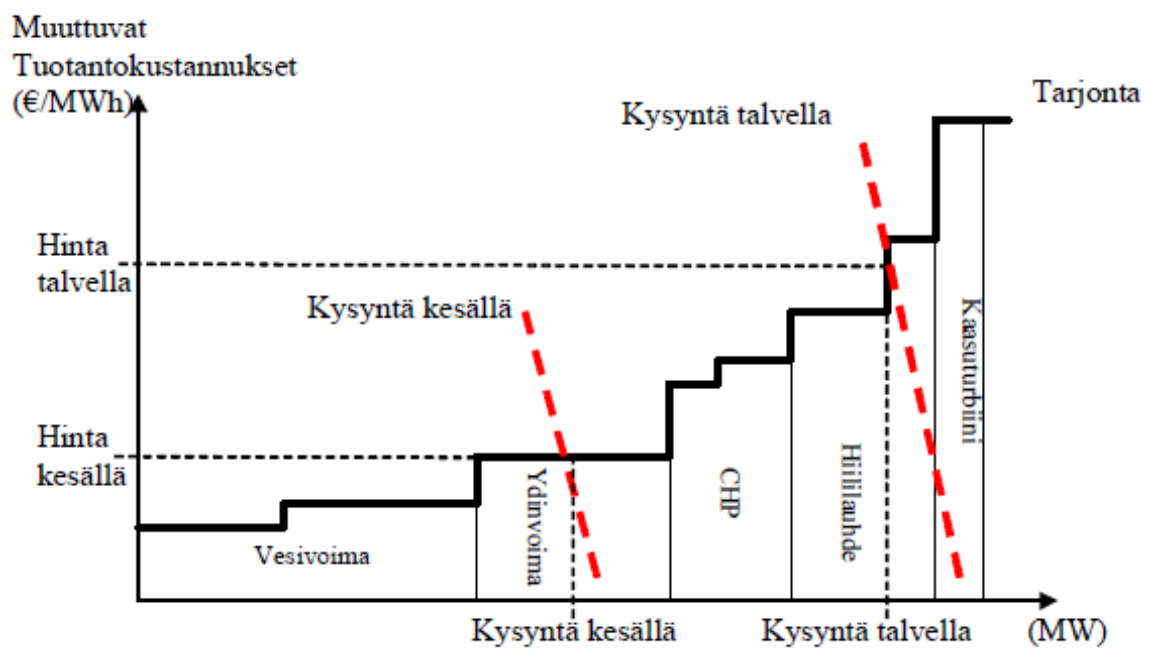
Suomessa sähkönhankinnan rakenne on hyvin monipuolinen, mikä on nähtävissä vuoden tuotantorakenteesta kuvassa 2.4. Sähkön tuotannon toimintaympäristö on muuttunut sähkömarkkinauudistuksen myötä. Suomen liittyttyä selkeämmin osaksi pohjoismaisia ja eurooppalaisia sähkömarkkinoita on seurauksena ollut kilpailun kiristymisen, joka on edelleen lyhentänyt toimitussopimuksia ja kasvattanut toiminnan riskejä. Sähkön tuotantoon vaikuttaa yhä merkittävämmiin ympäristötekijät, kuten ympäristöverot ja päästörajoitukset. (Partanen et. al 2014)



Kuva 2.4 Sähköenergian hankinta vuonna 2016 energialähteittäin. Sähköntuotantoa oli yhteensä 66,1 TWh. (Energiateollisuus 2017b)

Sähköenergian hinta määräytyy muun muassa sähköntuotantomuodon muuttuvien tuotantokustannuksien ja päästökaupan mukaan. Muuttuvia kustannuksia ovat

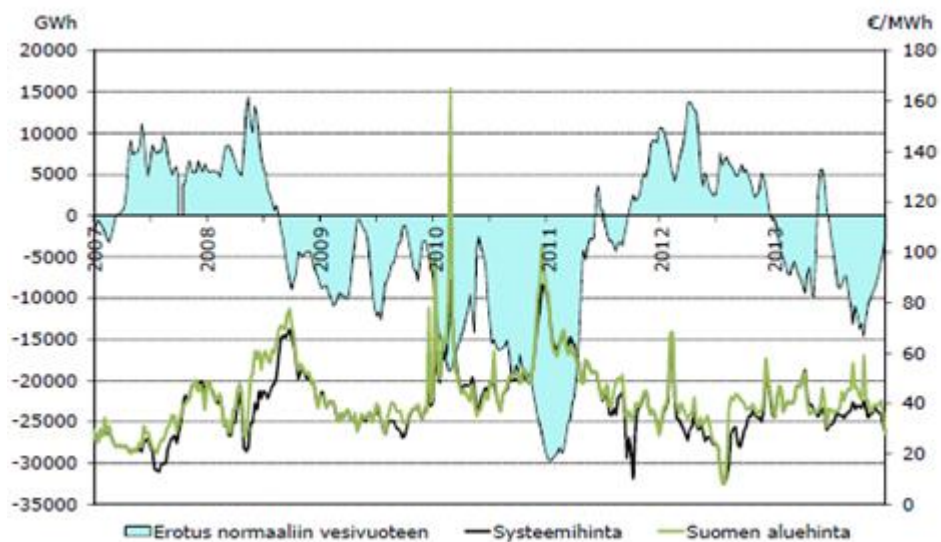
tuotantolaitosten polttoainekustannukset ja erilaiset käytönaikaiset operatiiviset kustannukset. Kysyntä- ja tarjontakäyrien kohtaamispaikassa muodostuu sähkön tukkumarkkinahinta kaikkein kalleimmasta tuotantomuodosta. Kyseisen tuotantomuodon muuttuvat kustannukset määrittävät kyseisen hetken marginaalikustannuksen sähkölle. Kuvassa 2.5 on esimerkkinä tarjontakäyrät kahdelle eri vuodenajalle, kesälle ja talvelle, ja tuotannon ajojärjestys on järjestetty alkaen alhaisimmasta marginaalikustannuksen tuotantomuodosta kalleimpaan kysynnän kattavaan tuotantomuotoon. Tällöin sähkön tuotanto ja kulutus kohtaavat jokaisella hetkellä mahdollisimman alhaiseen hintaan.



Kuva 2.5 Sähköenergian markkinahinnan muodostuminen tuotannon ja muuttuvien tuotantokustannuksien mukaan. Kuvassa punaisella näkyvät kysynnän käyrät kesällä ja talvella ovat esimerkkejä. (Partanen et. al 2014)

Suomessa suuri osa sähköstä on tuotettu tyypillisesti yhteistuotantolaitoksissa, jossa tuotetaan primäärituotteena lämpöä ja näin ollen tuotetun sähkön määrä vaihtelee vuosittain lämmöntarpeen vaihtelun mukaisesti. Toisaalta kesällä pienen kuormitustarpeen aikana kysyntä katetaan ajamalla pienemmällä perustuotannolla, jolle on tavanomaista suuret perustamiskustannukset, mutta pienet muuttuvat kustannukset. Vesivoiman määrään vaikuttaa vuosittainen vesitilanne ja hyvinä vesivuosina Suomeen kannattaa tuoda pohjoismaisilta sähkömarkkinoilta tarjolla olevaa halpaa vesivoimaa. Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla sähkön hintakehitys onkin voimakkaasti riippuvainen Norjan

vesivarannoista kuvan 2.6 mukaisesti, jossa on esitetty vesivarantojen sekä sähkön systeemihinnan ja Suomen aluehinnan riippuvuutta. Kuvassa on nähtävissä kaksi hintapiikkiä vuonna 2010, joiden syynä oli normaalia heikompi vesitilanne ja lisäksi kylmyys sekä ongelmat ruotsalaisissa ydinvoimalaitoksissa. Käytännössä vesivuoden hyvyys vaikuttaa suoraan lauhdevoimalla tuotetun sähkön määrään, sillä tavanomaisen lauhdevoiman osuus kasvaa huonoina vesivuosina. Talvella lämmityskauden vuoksi kysynnän tarve kasvaa ja sähköntuotantokapasiteettia on otettava enemmän käyttöön. Tällöin sähkön tukkuhinnassa voi esiintyä suuriakin piikkejä, mikäli kysynnän ja tarjonnan suhde muuttuu radikaalisti. (Partanen et. al 2014)



Kuva 2.6 Sähkön systeemihinnan ja aluehinnan riippuvuus vesivarannoista. (Partanen et. al 2014)

2.2.3 Loppukäyttäjän sähköhinnan muodostuminen

Sähkön markkinahinta määrittyy siis pääasiassa yhteispohjoismaisessa sähköpörssissä viimeisimmän tuotannon mukaan tulevan voimalaitoksen kustannuksien mukaan, joka on normaaliolosuhteissa nykyään kivihiililauhdevoimaa. Tämän järjestelmän johdosta Suomessa kuluttajan ostamaan sähkön hintaan vaikuttavat tapahtumat muiden maiden energiajärjestelmän tilassa, mutta sähkön pörssihinnan vaikutus vähittäismarkkinoiden hintatasoon ei ole välitön. Asiakkaat solmivat toistaiseksi voimassaolevia ja kiinteähintaisia sopimuksia, jotka perustuvat aluehintoihin ja joihin pörssihinnan muutokset eivät heti vaikuta. Spot-hintaan sidotut sopimukset puolestaan mahdollistavat

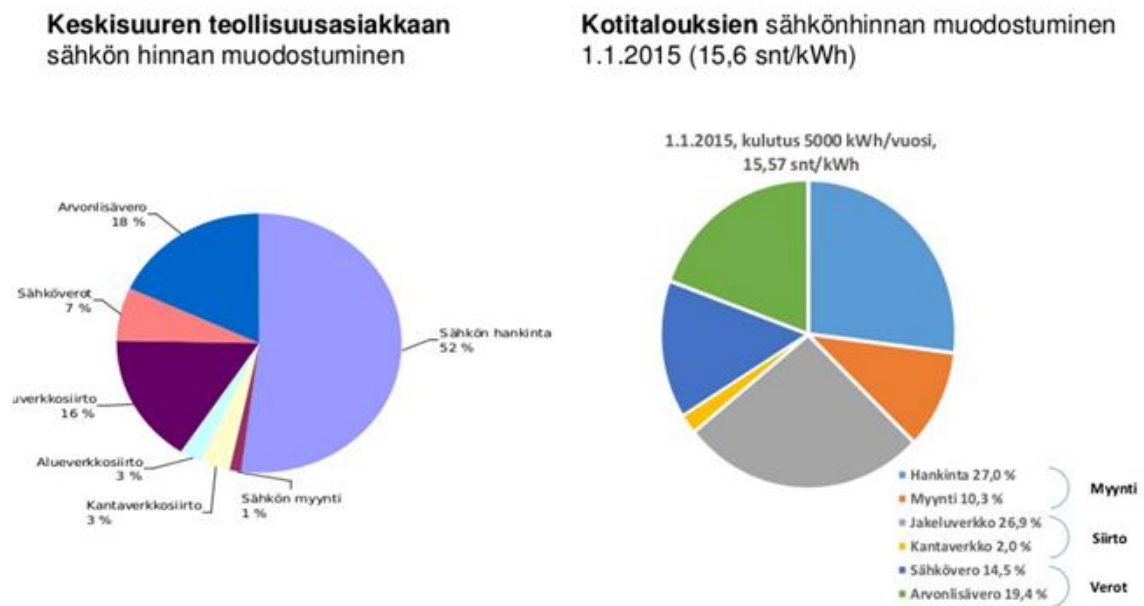
pörssihinnan muutosten vaikutukset, mutta nämä sopimukset ovat tähän mennessä olleet pieniasiakkailla vähemmän suosittuja. (Partanen et al. 2014)

Kiinteistönomistajan näkökulmasta sähkön hinta muodostuu kolmesta osuudesta, jotka ovat sähköenergian hankinnan kustannukset, sähkön siirron kustannukset ja verot. Sähköenergian hankinnan kustannukset jakautuvat sähköenergian hintaan ja sähkön myyntityöstä aiheutuviin kustannuksiin. Sähköenergian hinta muodostuu yleensä kuukausittaisesta kiinteästä perusmaksusta ja käytön mukaisesta kulutusmaksusta. Erilaisia kuluttaja-asiakkaille suunnattuja tariffeja ovat erilliset kulutusmaksut eri ajankohdille. Sähkönmyyjät jaottelevat nämä tariffit Valtioneuvoston asetuksen sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta (66/2009) määritelmän mukaisesti. Tämän määritelmän mukaisesti yleissähkössä on käytössä yksihintainen kulutusmaksu ja tuntihinnoitteluun perustuvassa sähkössä jokaiselle tunnille erillinen kulutusmaksu. Kaksiaikäsähkössä ja kausiaikäsähkössä on puolestaan erilliset kulutusmaksut eri aikajaksoina kulutetulle sähköenergialle. (Energiavirasto 2016b)

Sähkön siirtohinta määräytyy sähkön siirron kustannuksista kantaverkossa, alueverkossa ja jakeluverkossa (Partanen et al. 2014, 3). Siirtomaksua ei voi kilpailuttaa ja se muodostuu tyypillisesti kuukausittaisesta kiinteästä perusmaksusta sekä sähkön käyttöön perustuvasta osuudesta. Tämän siirtopalvelun hinta muodostuu sähkön siirrosta, kulutuksen mittauksesta ja taseselvityksestä. Taseselvityksessä on kyse eri sähkönmyyjien myymään sähköenergian määrän selvittämisestä. Siirrosta perittävillä maksuilla katetaan myös verkon investoinnit, ylläpito ja käyttökustannukset. Energiahinnan ja siirtohinnan lisäksi on olemassa sekä siirtopalvelulle että sähköenergialle yleis-, aika- ja tehotariffeja. Tehotariffit soveltuvat hyvin vain yrityksille tai muille suurille asiakkaille. (Energiavirasto 2016b)

Asiakkaan sähkönkulutusprofiilista riippuen hinnan komponenttien osuudet vaihtelevat. Tyypilliselle pienkuluttajalle kuten kotitalousasiakkaalle sähköenergian osuus sähkön toimituksen kokonaiskustannuksista on yli kolmannes, siirron osuus vajaa kolmannes ja loppuosa muodostuvat veroista. Sähkölämmittäjät ja tyypilliset suurkuluttajat kuten teollisuusasiakkaat, jolloin sähkön sähköenergian osuus sähkön toimituksen kokonaiskustannuksista on suurempi kuin pienkuluttajilla. Suurkuluttajilla sähkön siirtomaksujen osuus on vastaavasti pienempi. (Partanen et al. 2014, 3-4)

Kotitalousasiakkaalla sähkön toimituksen kokonaiskustannuksista sähköenergian osuus on runsas kolmannes, sähkön siirron osuus alle kolmannes ja loppuosa kustannuksista muodostuvat veroista kuvan 2.7 mukaisesti. Sähköenergian osuus sähkölaskusta kuitenkin vaihtelee eri asiakasryhmien välillä. Sähkölämmittäjillä ja teollisuusasiakkailla on sähköenergian osuus sähköhinnasta suurempi kuin kotitalousasiakkailla ja siirron osuus hieman pienempi. (Energiavirasto 2016b, Partanen et. al. 2014)



Kuva 2.7 Teollisuusasiakkaan ja kotitalouksien sähkön hinnan muodostuminen. (Partanen 2016)

2.3 Valtakunnallisen tehotasapainon hallinta

Sähkön kulutuksen ennusteilla on keskeinen rooli sähkömarkkinoiden eri liiketoimintalueilla, kuten sähkön tuotannon ja siirron sekä sähkön hankinnan ja myynnin suunnittelussa. Ennusteet eivät kuitenkaan toteudu koskaan sellaisenaan, sillä tuotannon ja kulutuksen välillä on todellisuudessa aina vaihtelevasti yli- tai alijäämää. Valtakunnallisen tehotasapainon ylläpitämiseksi tulee tuotannon ja kulutuksen olla tasapainossa joka hetkellä. Tämän tasapainon säilyminen hoidetaan reservi- ja säätösähkömarkkinoiden avulla. (Partanen et. al 2014)

Sähköjärjestelmän tasapainon ylläpitämiseksi sähköä tulee tuottaa joka hetki yhtä paljon kuin sitä kulutetaan ja tässä tasapainotilanteessa verkon taajuus on 50 Hz. Tasapaino on

pyrittävä pitämään sallittujen vaihtelurajojen sisäpuolella ja tähän tarvitaan tuotannon säätämistä tai kulutuksen joustamista. Tasapainosta poikkeaminen havaitaan sähköverkon taajuuden vaihteluna, jolle sallitaan Suomessa ja pohjoismaisessa sähköverkossa normaalitilanteessa vaihtelu 49,9 ja 50,1 hertsin (Hz) välillä (Fingrid 2016a). Verkon taajuus lähtee laskemaan tilanteessa, jossa kulutus on tuotantoa suurempaa ja mikäli tuotantoa on enemmän kuin sähköön kulutusta, on seurauksena vastaavasti verkon taajuuden kasvu. Kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj vastaa Suomen sähköntuotannon – ja kulutuksen välisen hetkellisen tasapainon ylläpidosta eli tasehallinnasta. Tehontasapainon ylläpitoon Fingrid Oyj käyttää erilaisia reservituotteita, kuten taajuusohjattuja reservejä. Taajuudensäädön lisäksi ylös- ja alassäätöjä tehdään säätösähkömarkkinoilla. Taseselvityksillä puolestaan käsitellään jokaisen suuren toimijan, eli niin kutsutun tasevastaavan, tuotannon ja kulutuksen välistä poikkeamaa (Partanen et. al 2014). (Fingrid 2017c)

2.3.1 Säätösähkömarkkinat

Sähkönsiirtoverkot muodostavat fyysisen markkinapaikan sähkön myynnille. Järjestelmävastaavat tarjoavat sähköverkkoja sähkömarkkinoiden tarpeisiin, mutta ovat myös vastuussa tärkeästä tehtävästä eli sähkön tuotannon ja kulutuksen tasapainottamisesta. Spot-markkinoiden fyysinen kaupankäynti on tärkeässä roolissa tuotannon ja kulutuksen tasapainottamisessa, sillä sen avulla osapuolet voivat tasoittaa energiataseitansa etukäteen. Fyysisen kaupankäynnin viimeinen vaihe on säätösähkömarkkinat, joilla järjestelmävastaava tasapainottaa käyttötunnin aikaisen tuotannon ja kulutuksen säätösähköllä. Säätösähkömarkkinoilla toimijat osallistuvat jättämällä tarjouksensa samaan tapaan kuin Spot-markkinoilla. (Partanen et. al 2014).

Suomen kantaverkkoyhtiö Fingridillä ei ole omaa säätökapasiteettia tehotasapainon ylläpitämiseksi. Tästä syystä Fingrid ylläpitää säätösähkömarkkinoita, joilla tuotannon ja kuorman haltijat voivat antaa säätötarjouksia säädettävästä kapasiteetistaan. Tasevastaavat tekevät tasepalvelusopimuksen ja muut kapasiteetin haltijat osallistuvat markkinoille tekemällä Fingridin kanssa säätösähkömarkkinasopimuksen, jonka kiinteän maksun suuruus on 1200 €/vuosi. (Fingrid 2017d)

Säätötarjouksien minimitarjouskoko on 10 MW ja säätötarjouksia voidaan antaa kaikista resursseista, jotka kykenevät toteuttamaan tämän suuruisen tehonmuutoksen 15 minuutin kuluessa tehonsäätöpyynnöstä. Tarjousten tulee sisältää tiedot säädettävän kapasiteetin

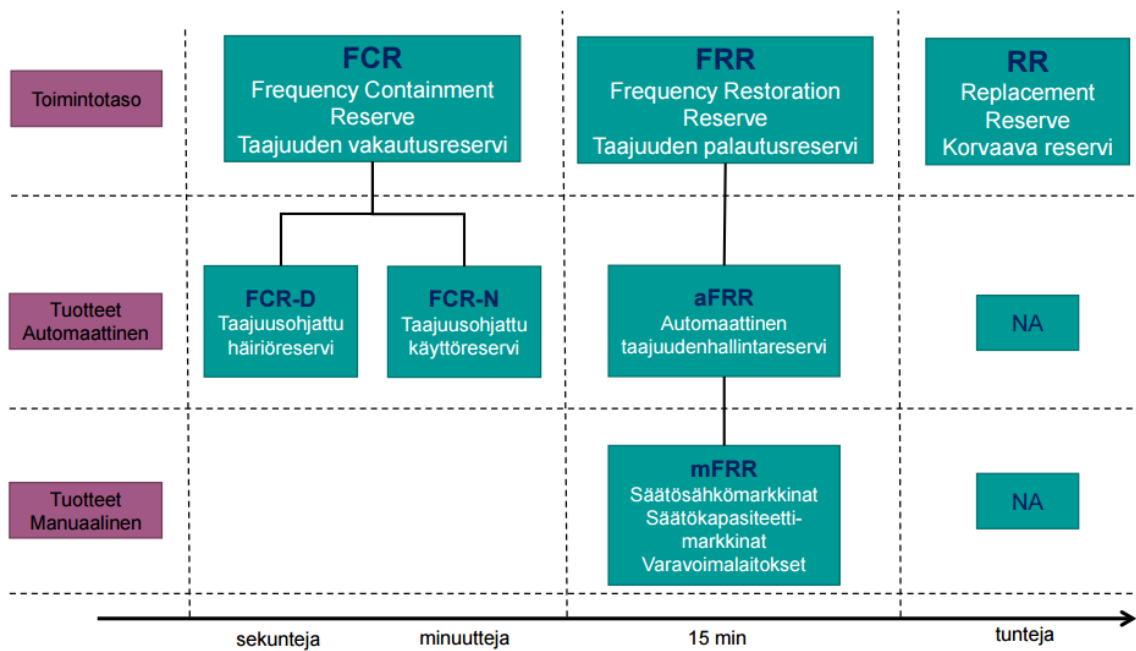
suuruudesta (MW), hinnasta (€/MWh), tieto siitä onko teho tuotantoa vai kulutusta, sekä ilmoitus kapasiteetin siirtoalueesta ja säätöresurssin nimestä. Säätötarjoukset annetaan Fingridille vähintään 45 minuuttia ennen käyttötuntia. Säädettävä kuorma voi olla ylös- tai alassäätöä, joka voidaan koostaa myös pienemmistä kuormista aggregoimalla. Ylös- ja alassäädöt tarjouksittain voivat muodostua kuva 2.8 mukaisesti. (Fingrid 2017d)



Kuva 2.8 Säätämärkinoiden tarjoukset. (Fingrid 2017d)

2.3.2 Reservimarkkinat

Sähkönjärjestelmän tehotasapainon ylläpitämiseksi Fingrid tasapainottaa käyttötunnin aikaiset poikkeamat käyttämällä automaattisia ja operaattorin aktivoimia reservejä. Pohjoismaittain on sovittu yhteisestä reservimäärästä ja jaettu maakohtaiset veloitteet, jotka jokaisen maan kantaverkko-yhtiö hankkii parhaaksi katsomallaan tavalla. Reservilajit on esitetty kuvassa 2.9 (Fingrid 2016d)

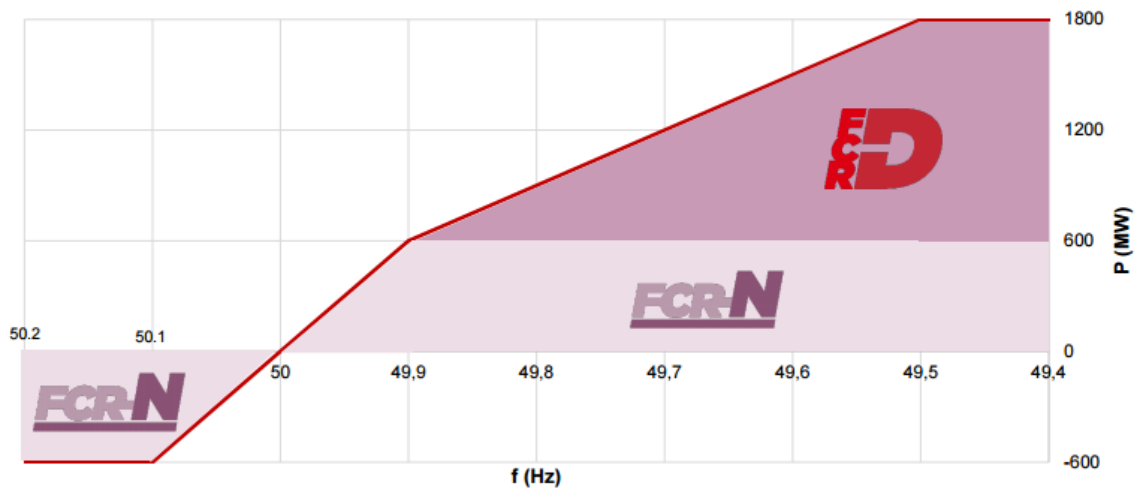


Kuva 2.9 Pohjoismaissa käytössä olevat reservit ja niiltä vaadittavat aktivoitumisnopeudet. (Fingrid 2016e)

Reservilajit jakautuvat toimintotason mukaan taajuuden vakautusreserviin, taajuuden palautusreserviin ja korjaavaan reserviin. Taajuuden vakautusreservejä käytetään jatkuvaan taajuuden hallintaan, jonka tarpeisiin ne on jaettu taajuusohjattuun häiriöreserviin FCR-D ja taajuusohjattuun käyttöreserviin FCR-N, jotka aktivoituvat taajuuden funktiona kuvan 2.10 mukaisesti. Taajuuden palautusreservien tarkoituksena on palauttaa sähköjärjestelmän taajuus normaalialueelle ja vapauttaa aktivoituneet taajuuden vakautusreservit takaisin käyttöön. Korvaavia reservejä ei ole käytössä pohjoismaisessa energiajärjestelmässä. (Fingrid 2016e)

Taajuusohjattu käyttöreservi FCR-N säätelee jatkuvasti taajuuden mukaan parin minuutin viiveellä. Tähän reservilajiin osallistuminen edellyttää symmetristä säätöä eli on kyettävä sekä tehonpudotukseen että tehonlisäykseen. Ohjaus tapahtuu automaattisesti ja perustuu paikalliseen taajuusmittaukseen. Markkinoille pääsyn edellytyksenä on minimitarjouskoko 0,1 MW sekä vaatimukset kuorman reagointinopeudesta. Nämä markkinat toimivat tuntikohtaisesti ja niiltä saadaan korvaus ylläpidetystä kapasiteetista sekä nettoenergiasta. Markkinoille voi osallistua vuosimarkkinasopimuksella ja lisäksi tuntimarkkinasopimuksella. Tuntimarkkinoille osallistumisen edellytyksenä on, että vuosimarkkinasopimuksen mukainen reservi on toimitettu sovitusti. (Fingrid 2016e)

Taajuusohjattu häiriöreservi FCR-D säätää lähes lineaarisesti suuremmissa taajuuspoikkeamissa. Osallistuminen edellyttää vain ylössäädön ja tämä tarkoittaa kiinteistökuormien osalta tehonpudotusta. Edellytyksenä on, että reserviin osallistuva kuorma kykenee säätämään 50 % sähkötehosta 5 sekunnin sisällä ja 100 % 30 sekunnissa. Kuormat voivat osallistua myös portaittain irtikytkentään isoissa taajuushäiriöissä. Ohjaus tapahtuu vastaavasti kuin FCR-N reservissä eli automaattisesti ja perustuu paikalliseen taajuusmittaukseen. Markkinoilla on vaihtoehtona vuosimarkkinasopimus ja tuntimarkkinasopimus. Tässäkin reservilajissa tuntimarkkinoille osallistumisen edellytyksenä on, että vuosimarkkinasopimuksen mukainen reservi on toimitettu sovitusti. (Fingrid 2016e)



Kuva 2.10 FCR-N ja FCR-D reservien aktivoituminen taajuuden funktiona (Fingrid 2016d)

3 KYSYNTÄJOUSTO ÄLYKKÄÄSSÄ ENERGIAJÄRJESTELMÄSSÄ

Sähkövoimajärjestelmään liittyvissä liiketoiminnoissa kysynnän ja kuormien hallinta sekä niihin liittyvät tekniset ratkaisut ovat saaneet lisääntyvässä määrin huomiota viime vuosina. Tämä johtuu etenkin älykkään sähköverkkoon liittyvän kiinnostuksen kasvamisesta viime vuosikymmenen aikana. Lisäksi on arvioitu, että kysyntäjousto on avaintekijä EU:n vuodelle 2030 asetettujen 27 % uusiutuvan energian tavoitteiden saavuttamisessa (SEDC 2015). Älykäs sähköverkko nähdään suurimpana tekijänä tämän kaltaisen uusiutuvan energiantuotannon ja kysyntäjouston laajamittaisen käyttöönoton kannalta.

Älykäs energiajärjestelmä tarkoittaa yleisesti järjestelmää, jolla älykkään sähköverkon avulla mahdollistetaan hajautetun tuotannon ja kuluttajan osallistuminen markkinapaikoille. Tulevaisuudessa rakennukset liittyvät entistä tiiviimmin osaksi energiajärjestelmää kysyntäjouston ja kiinteistökohtaisen pientuotannon kautta, kuten kuvassa 3.1 on havainnollistettu. Tässä kappaleessa kuvataan kysyntäjouston eri menetelmiä ja ratkaisuja rakennusten näkökulmasta, sekä kartoitetaan markkinapaikkojen asettamia vaatimuksia.



Kuva 3.1 Älykkään energiajärjestelmän havainnekuva. (Sarvaranta 2010)

3.1 Kysyntäjoustop määritelmä

Sähkön kysyntäjoustopista puhuttaessa viitataan yleisesti käsitteeseen sähkön *kysynnän hallinta* (DSM, Demand Side Management). DSM tarkoittaa Valtion Teknillisen Tutkimuslaitoksen (VTT) määritelmän mukaan toimenpiteitä, joilla vaikutetaan sähkön kysynnän ajalliseen vaihteluun tai sen tasoon tavalla, jonka tavoitteena on useimmiten kulutusvaihtelujen tasoittaminen erityisesti sähkön huippukulutuksen aikana (Savolainen et al. 2008). The Electric Power Research Institute (EPRI) on määritellyt kysynnän hallinnan käsitteen seuraavasti (Paterakis et al. 2017):

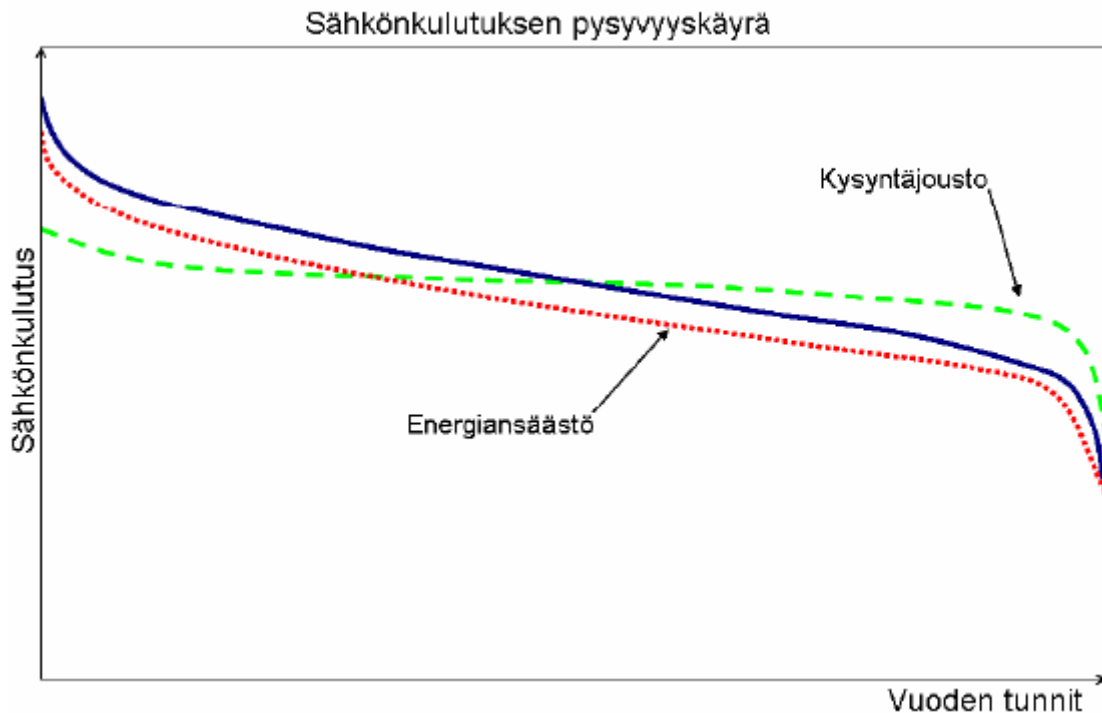
”Suunnittelu, käyttöönotto ja valvonta niiden sähköverkkotoimintojen osalta, jotka on suunniteltu vaikuttamaan kuluttajan sähkönkulutukseen sellaisilla tavoilla jotka tuottavat haluttuja muutoksia sähköverkkoston kuormituskäyrään, toisin sanoen muutoksia sähköverkon kuorman ajallisuuteen ja suuruuteen.”

Kysynnän hallintaa (DSM) voidaan pitää sekä teknisesti että konseptina varsin kehittyneenä etenkin teollisuusasiakkaiden tapauksessa, jotka pienentävät tai siirtävät loppukäyttäjänä sähkönkulutustaan ja samalla vähentävät sähköverkon rasitusta etenkin kriittisinä huippukuormien hetkinä. Kysynnän hallinta voidaan määrittää koostuvaksi neljästä eri toimesta, jotka liittyvät energiatehokkuuteen, säästöihin, sähkön omatuotantoon ja kuormituksen hallintaan. (Paterakis et al. 2017)

Kysynnän hallinnan sijaan on siirrytty käyttämään ilmaisua *kysyntäjoustop* (DR, Demand Response). Sähkön kysyntäjoustop voidaan määrittellä *”sähkön kysynnän vapaaehtoiseksi ja tilapäiseksi sopeuttamiseksi vastauksena hintasignaalin tai käyttövarmuuden ylläpitoon liittyvään toimeen”* Pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden järjestön Nordelin työryhmän määritelmän mukaisesti (ET, 2007). U.S Department of Energy (DoE) on määritellyt kysyntäjoustopin seuraavasti (Paterakis et al. 2017):

”Loppukäyttäjän normaalista sähkönkulutuksesta poikkeavat kulutuksen muutokset vastauksena sähkön hinnan muutoksiin aikavälillä, tai vastauksena kannustimiin, jotka on suunniteltu johtamaan pienempään sähkönkulutukseen niillä ajanhetkillä jolloin sähkön tukkumarkkinahinta on korkea tai kun sähköjärjestelmän luotettavuus on vaarantunut.”

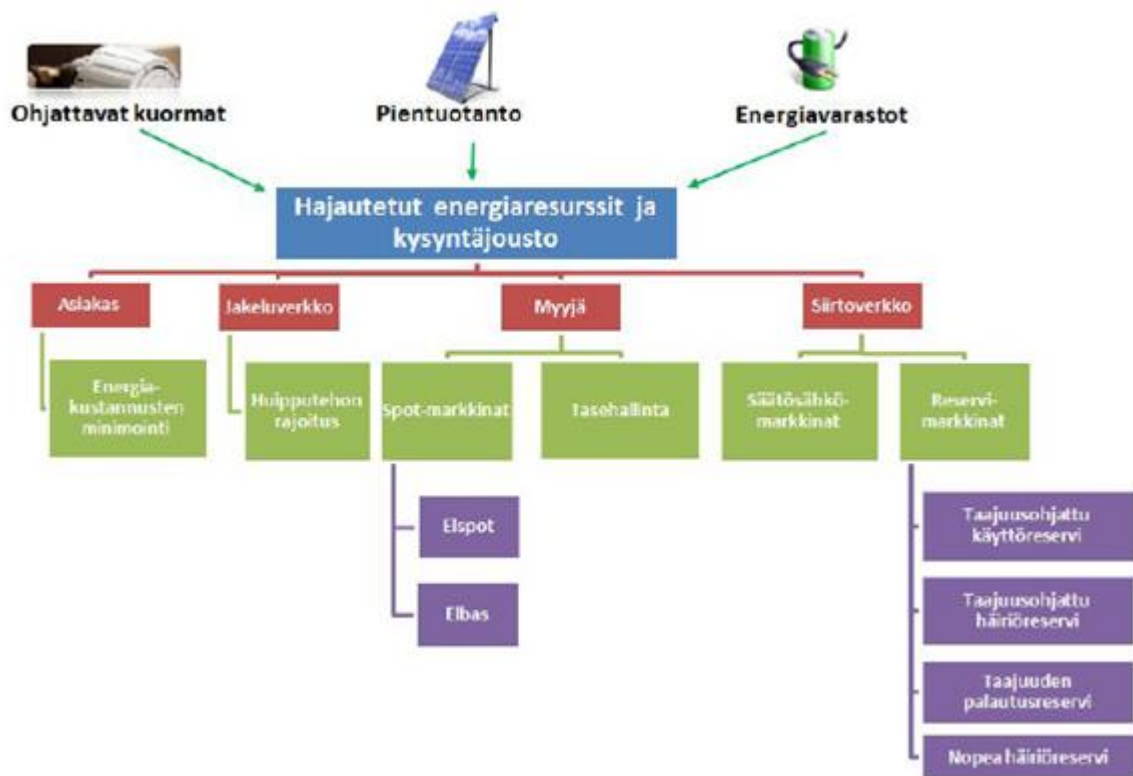
Kuvassa 3.2 on esitetty sähkön kysyntäjoustop vaikutus kulutushuippuun verrattuna strategiseen energiansäästöön. Kysyntäjoustop laajamittaisessa käytössä on mahdollisuus vaikuttaa Suomen sähköjärjestelmän kulutushuippujen tasoittumiseen.



Kuva 3.2 Sähkön kysyntäjoustop vaikutukset. Kysyntäjoustop vaikutuksesta sähköjärjestelmässä ilmenevät kulutushuiput tasoittuvat. (Rittonummi et. al. 2008)

Kaukolämmityksen kysyntäjoustop voidaan määritellä kaukolämmön kulutuksen ja sitä kautta lämpötehon tarpeen ajoituksen muuttamisena tavanomaiseen lämmitystarpeeseen verrattuna niin, ettei se heikennä asiakkaiden kokemaa palvelun laatua (Valor 2015, 5). Tässä työssä käsitellään sähkön kysyntäjoustopa syvällisesti ja kaukolämmityksen kysyntäjoustopa jatkossa vain yleisellä tasolla. Kaukolämmön ja sähkön kysyntäjoustopa liittyvät kuitenkin toisiinsa, sillä sähkötarpeen vähentäminen vaikuttaa myös kaukolämmöntarpeeseen kiinteistöissä.

Sähkön kysyntäjoustopa toimijaosapuolia ovat asiakas, jakeluverkkoyhtiö, sähkön myyjä, aggregaattori ja kantaverkkoyhtiö. Nämä osapuolet toimivat sähkömarkkinoilla ja ovat yhteydessä toisiinsa markkinapaikasta ja kysyntäjoustopa toteutustavasta riippuen. Toimijoiden liittymistä toisiinsa havainnollistaa kuva 3.3, jossa on esitetty myös ohjattavat kuormat sekä pientuotanto osana kokonaisuutta.



Kuva 3.3 Kysyntäjousto ja hajautetut energiaresurssit eri markkinaosapuolten näkökulmasta. (Järventausta et. al 2015)

Asiakas eli *loppukäyttäjä* toimii kysyntäjoustopissa sähkön vähittäismyyjän ja jakeluverkkoyhtiön asiakkaana. Asiakas voi olla esimerkiksi liikekiinteistön omistaja, taloyhtiö tai asuinkerrostalon asukas. Sähkön loppukäyttäjän näkökulmasta kysyntäjousto tarjoaa muun muassa mahdollisuuden käyttää sähköä edullisen hinnan aikana, vähentää ostosähköä, hyödyntää asiakkaan omaa pientuotantoa täysimääräisesti, pienentää huipputehoja ja mahdollisesti myös rajoittaa liittymäkokoja. Motivaattorina asiakkaan näkökulmasta on pienentää sähkölaskua. Kiinteistön alueella toimiva *jakeluverkkoyhtiö* on sähkönsiirron osapuoli, joka toimittaa sähkön loppukäyttäjälle. Kysyntäjoustopin toimijana *tasevastaava*, esimerkiksi sähkön myyjä, vastaa sähkön loppukäyttäjän sähkötaseesta ja laskuttaa asiakasta toimitetun sähkön mukaisesti. (Järventausta et al. 2015).

Pienet sähkökuluttajat eivät voi toimia suoraan nykyisillä sähkömarkkinoilla vaan ne tarvitsevat avuksi kolmannen osapuolen eli toimijan joka mahdollistaa osallistumisen. *Aggregaattori* on tällainen palveluntarjoaja, joka operoi suoraan tai epäsuorasti

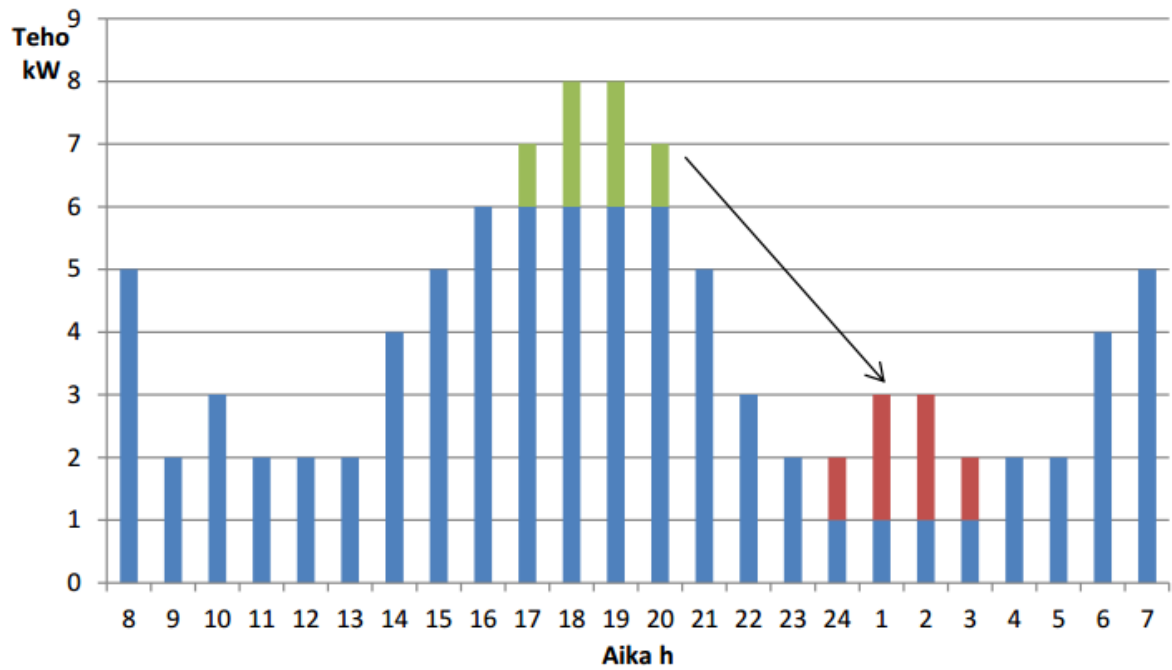
kysyntäjoustopotentialissa myymällä joukkoja ohjattavia sähköisiä kuormia yhtenä yksikkönä sähkömarkkinoille (SEDC 2015). Nämä kuormat voivat sisältää yksittäin tai yhdistelmänä esimerkiksi puhaltimia, sähköisiä lämmityksiä ja jäähdytyksiä, lämminvesivaraajia, sulatuksia ja vesipumppuja. Yhdistettävillä kuormilla voi olla erilaisia ominaisuuksia ja aggregaattorin tehtävänä on parantaa tällöin kokonaisuuden luotettavuutta ja pienentää yksittäisen osallistujan riskejä. Kuluttajat eivät usein ole tietoisia omasta kysyntäjoustopotentiaalistaan ja tällöin tarvitaan kysyntäjoustopotentialin erikoisasiantuntemusta avuksi. Aggregaattorit nähdäänkin tässä keskeisessä roolissa kysyntäjoustopotentialin edistämiseksi tulevaisuudessa niin Suomessa kuin kansainvälisestikin.

3.2 Implisiittiset kysyntäjoustopotentialin menetelmät

Kysyntäjoustopotentialin voi tarkoittaa vapaaehtoisesta hetkellisen kulutuksen vähentämistä tai siirtämistä korkean kulutuksen ja hinnan tunneilta sellaiseen ajankohtaan, jossa sähkön hinta on alhaisempi kuvan 3.4 mukaisesti. Kyseessä on asiakaslähtöinen sähkön hintaohjaukseen perustuva kysyntäjoustopotentialin menetelmä. Vastaavasti voidaan käyttää määritelmää *implisiittiset kysyntäjoustopotentialin menetelmät*, jotka toimivat epäsuorasti asiakkaan saadessa hyödyn vasta sähkölaskussaan (SEDC 2015). Tällöin kuluttaja siis valitsee osallistumisensa taloudellisin perustein sähköhinnoitteluun perustuen.

Hintatiedon mukaan toteutettu kysyntäjoustopotentialin menetelmä ei tyypillisesti vähennä asiakkaan energian kulutusta vaan kokonaisenergiatarve pysyy ennallaan. Kysyntäjoustopotentialin menetelmä ja energiansäästö ovat kuitenkin toisilleen läheisiä, mutta silti eri asioita. Perinteinen vapaaehtoisuuteen perustuva sähkön kysyntäjoustopotentialin menetelmä on ollut Suomessa päivä- ja yötariffien hinnoittelu eli kaksiaikahinnoittelu, jolla on haluttu vaikuttaa etenkin sähkölämmittäjien kulutustottumuksiin. Energiayhtiöt tarjoavat myös Suomessa asiakkaille pörssisähkön hinnan mukaista sähköenergiaa, jolloin hinta muodostuu Spot-markkinoiden aluehinnan mukaan jokaiselle tunnille. Asiakas maksaa tällöin sähköstä Suomen aluehinnan mukaisesti, joka määräytyy Spot-markkinoiden kautta. Yritysten sitoutuminen tämän tyyppiseen sähkön kysyntäjoustopotentialin menetelmään voi tuoda niille merkittäviä säästöjä sähkökustannuksissa, sillä hyötyä voidaan saada jo mahdollisuudesta rajoittaa kulutusta yhtenä tuntina vuorokaudessa (Linna 2012). Merkittäviä säästöjä on näin ollen odotettavissa etenkin silloin, mikäli asiakkaan kuten kiinteistön kulutus on suurta ja sitä on mahdollista leikata korkean hinnan tunneilla paljon. Yksittäiselle yritykselle tämä

tarkoittaa joustavuutta toiminnan suunnittelussa ja aikataulutuksessa, ja niille yrityksille jotka voivat tarvittaessa sopeuttaa nopeasti toimintaansa, voi kysyntäjousto tuoda uuden mahdollisuuden säästää energiakustannuksissa (Linna 2012).



Kuva 3.4 Sähkön kysyntäjousto ajan ja tehon funtiona. (Gripp 2013)

3.3 Eksplisiittiset kysyntäjoustomenetelmät

Eksplisiittiset kysyntäjoustomenetelmät tarkoittava suoran kuorman ohjauksen tapaisia, markkinalähtöisiä, kannustinpohjaisia järjestelmiä, joissa kuluttajakohteet osallistuvat kysyntäjoustoa tarjoaville markkinoille ja saavat suoraan korvauksia kulutuksensa muutoksista (SEDC 2015). Tässä työssä kysyntäjoustoa tarkastellaan jatkossa lähinnä suoran kuorman ohjauksen eli markkinalähtöisen kysyntäjouaston näkökulmasta.

Kiinteistössä tapahtuva suora kuorman ohjaus ja hinnan mukaan tapahtuva ohjaus ovat luonteeltaan erilaisia. Kuormaa leikatessa huippukuormitustilanteessa kantaverkkoyhtiön tavoitteena on siis turvata sähkön jakelu pienentämällä verkon kuormitusta. Rakennus voi osallistua tähän ohjaamalla kuormaansa hetkellisesti alas. Vastaavasti sähköverkon taajuuden ollessa liian korkea kuormanohjaukseen osallistuva rakennus voi tasapainottaa sitä lisäämällä sähkönkulutustaan.

On huomattava, että kuluttaja voi osallistua sekä eksplisiittiseen että implisiittiseen kysyntäjoukseen yhtäaikaaisesti ja saada molempien markkinoiden hyödyt. Suomen ulkopuolisilla kysyntäjouksemarkkinoilla kuluttajat osallistuvat usein eksplisiittiseen kysyntäjoukseen aggregaattorin kautta ja samalla myös implisiittiseen kysyntäjoukseen enemmän tai vähemmän dynaamisen hinnoittelun tariffeilla. Molemmilla menetelmillä on myös erilaiset vaatimukset ja hyödyt. Ne myös aktivoituvat eri aikoina ja palvelevat eri markkinoiden tarpeita. Dynaamisen hinnoittelun mukaiseen kysyntäjoukseen osallistuva kuluttaja hyötyy siitä pienemmän sähkölaskun kautta ja eksplisiittisen kysyntäjoukseen kautta hyöty tulee suorana korvauksena osallistumisesta.

3.4 Sähkömarkkinoiden kysyntäjoukstopaikat Suomessa

Kysyntäjoukset tarvitaan Suomen sähkömarkkinoille lisää, kun joustamattoman tuotannon määrä verkossa lisääntyy. Suurteollisuuden kuormat, kuten metsä-, metalli- ja kemianteollisuuden, ovat toimineet pitkään tehotasapainon ylläpidossa Fingridin käytettävissä olevina reserveinä. Kysyntäjoukset voidaan luontevasti tarjota lisää joukset tehotasapainon ylläpitoon säätösähkö- ja reservimarkkinoilla. Suomessa olemassa olevan kysyntäjoukseen tilanne vuoden 2017 alussa on nähtävissä kuvasta 3.5. Suurteollisuudesta poikkeavan pienkuluttajan oma pientuotanto voidaan rinnastaa kysyntäjoukseen, mikäli se reagoi markkinatilanteeseen ja sillä pienennetään kohteen omaa sähkönottoa verkosta. Tähän soveltuvia esimerkkejä ovat rakennusten ja liiketilojen varavoimakoneet. (Fingrid 2016f)



Kuva 3.5 Kysyntäjoukseen markkinapaikat ja markkinoilla oleva reservimäärä vuoden 2017 keväällä. (Fingrid 2016f)

Kysyntäjoustoon voi tällä hetkellä osallistua Suomessa kahdeksalle eri markkinapaikalle, joiden aktivointien määrät, korvaustasot sekä tekniset vaatimukset vaihtelevat ja nämä on esitetty taulukossa 3.6 Reserveihin osallistuminen voi tarkoittaa muutaman sekunnin mittaista verkosta otettavan tehon vähennystä tai esimerkiksi tunnin katkoa kerran kymmenessä vuodessa. Mikäli tehoa pystytään säätämään joustavasti, ei katkoa tapahdu ollenkaan. Spot-hintaan perustuvassa kysyntäjoustossa ei osallistuta reserveihin vaan mukautetaan sähkönkulutusta sähkön hintaan nähden. (Fingrid 2016b)

Taulukko 3.1 Kysyntäjouston markkinapaikat ja korvaustasot vuonna 2016 Suomessa. (Fingrid 2016b)

Tuote	Lyhenne	Sopimustyyppi	Minimi-tarjouskoko	Aktivoituminen	Aktivoituu	Korvaustaso 2016*
Taajuusohjattu käyttöreservi	FCR-N	Vuosi- ja tuntimarkkinat	0,1 MW	Lineaarisesti välillä 50,1 - 49,9 Hz, 0,1 Hz muutos 100 % 3 min	Jatkuvasti	17,42 €/MW,h (vuosi-markkinat) + energiahinta nettoenergiasta
Taajuusohjattu häiriöreservi	FCR-D	Vuosi- ja tuntimarkkinat	1 MW	Voimalaitokset: lineaarisesti välillä 49,9 - 49,5 Hz, kun f alle 49,5 Hz 50 % 5 s ja 100 % 30 s Relekytketyt kuormat: vaihtoehtoisesti 49,7 Hz 5s TAI 49,6 Hz 3s TAI 49,5 Hz 1 s	Useita kertoja vuorokaudessa Muutaman kerran vuodessa	4,5 €/MW,h (vuosi-markkinat)
Automaattinen taajuudenhallintareservi	FRR-A	Tuntimarkkinat	5 MW	FG:n lähettämän tehonpyyntisignaalin mukaisesti, 100 % 2 min	Useita kertoja vuorokaudessa	Kapasiteettikorvaus pay as bid periaatteella + energiahinta
Säätösähkömarkkinat	FRR-M	Tuntimarkkinat	10 MW	FG aktivoi tarjouksia hintajärjestyksessä, 100 % 15 min	Tarjouksen ja säätötarpeen mukaisesti	Markkinahinta
Elsport **)		Tuntimarkkinat	0,1 MW	12 h	-	Markkinahinta
Elbas **)		Tuntimarkkinat	0,1 MW	1 h	-	Markkinahinta
Tehoreservi ***)		Pitkäaikainen	10 MW	15 min	Harvoin	EV:n hankintakilpailun mukaisesti

*) Korvaustason hinnat ovat viitteellisiä, tarkemmat ehdot ja hinnoitteluperiaatteet löytyvät kuhunkin markkinapaikkaan liittyvistä sopimuksista. Automaattisten reservien toteutuneet tuntimarkkinahinnat on esitetty täällä.

***) Nord Pool

***) Energiavirasto

Fingridin tarjoamia markkinapaikkoja ovat edellisessä kappaleessa kuvatut taajuusohjattu käyttöreservi, taajuusohjattu häiriöreservi, automaattinen taajuudenhallintareservi ja säätösähkömarkkinat. Suomen tehoreservimarkkinoita puolestaan ylläpitää Energiavirasto. Elspot- ja Elbas – markkinoilla toimimiseen tarvitaan sopimus Nord Poolin kanssa sekä

lisäksi sopimus avoimen sähköntoimittajan kanssa tasevastuun sopimiseen. (Fingrid 2016b)

Reservimarkkinoille osallistuvan reservikohteen tulee täyttää tekniset vaatimukset ja markkinapaikan aktivointikriteerit, joita on käsitelty tämän työn aiemmissa kappaleissa. Kohteita on myös mahdollista aggregoida siten, että kokonaisuus täyttää minimitarjouskoon. Tähän mennessä aggregointi on ollut sallittua saman tasevastaavan kohteilla. Reservien sopimuksissa on erikseen määritetyt korvaukset tunti- ja vuosimarkkinoille. (Fingrid 2016c)

Kiinteistölle mahdollisesti soveltuvat kysyntäjoustop menetelmät markkinapaikkojen ja toteutuksen mukaan ovat:

- Sähkön hintaohjaus
- Taajuusohjattu käyttöreservi
- Taajuusohjattu häiriöreservi (relekytketyt kuormat)
- Säätosähkömarkkinat

Kiinteistön kannalta merkittävää on huomioida reservien minimitarjouskoko ja aktivoitumiskriteerit. Minimitarjouskoko voi täytyä, mikäli kiinteistössä on paljon ohjattavaa kuormaa jonka voi yhdistää kiinteistön sisällä tai jos eri kiinteistöjen kuormien yhdistäminen onnistuu aggregoinnin kautta. Aktivoitumiskriteerit ovat olleet haasteellisia täyttää kiinteistön kannalta etenkin varavoimakoneiden osalta, mikäli varavoimakoneen yhteydessä ei ole reagointinopeutta tukevaa järjestelmää. Fingrid on pilotoinut pienten varavoimakoneiden ja UPS-järjestelmien hyödyntämistä taajuusohjattuna häiriöreservinä sekä säätosähkömarkkinoilla (Fingrid 2016g).

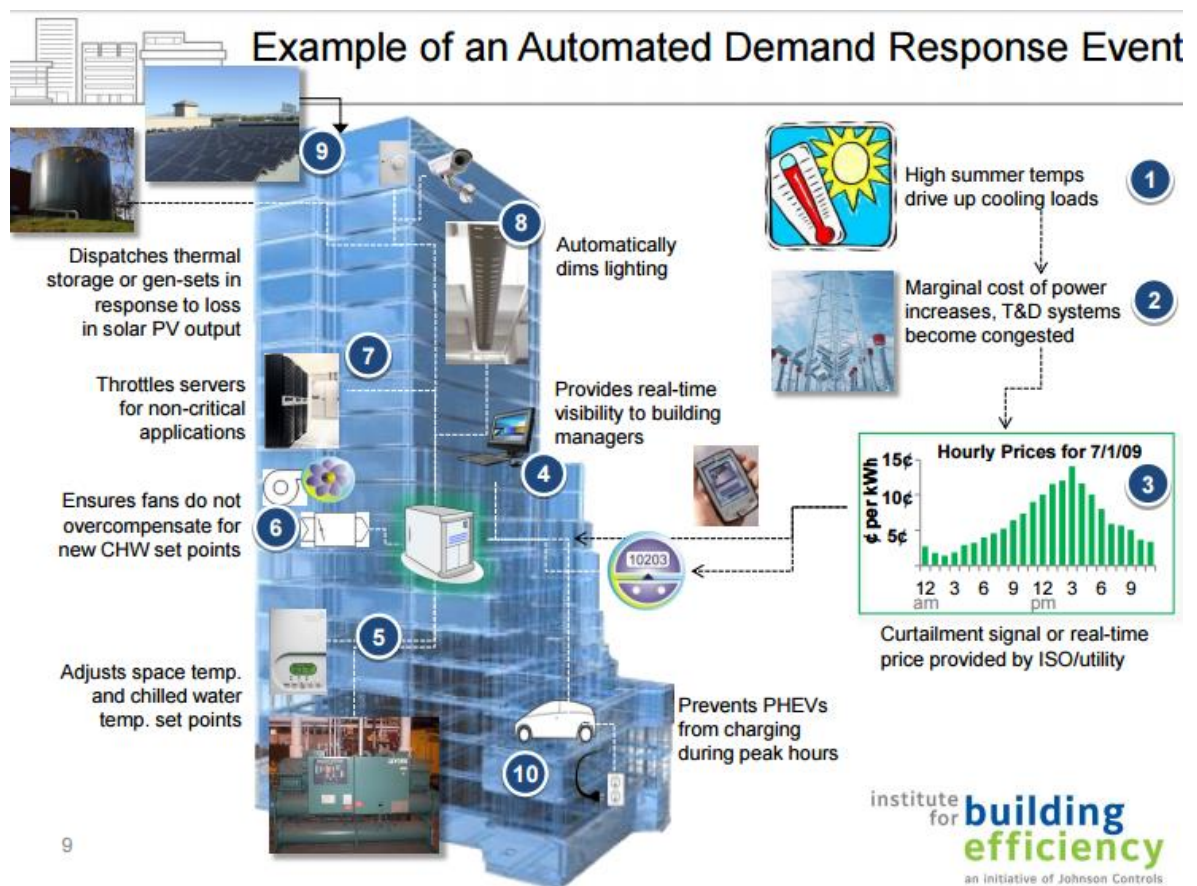
3.5 Rakennus osana joustavaa energiajärjestelmää

Rakennus linkittyy osaksi joustavaa energiajärjestelmää älykkään sähköverkon (Smart Grid) ja kiinteistöautomaatiojärjestelmän luoman rajapinnan kautta. Yhdistymistä edistää edelleen kiinteistön oman mikroverkon tuoma älykkyys, jolla eri kiinteistökuormia ja kiinteistökohtaista pientuotantoa sekä energiavarastoja voidaan hyödyntää täysimääräisesti kuormanhallinnan tarpeisiin. Tässä työssä ei kuitenkaan syvennyttä kiinteistöautomaatiojärjestelmän toimintaan vaan kuvataan niiden merkitys rakennuksen kysyntäjoustopon liittämässä.

ilmastointijärjestelmällä. Moderneilla kiinteistöautomaatiojärjestelmillä kysyntäjoustopon osallistuminen olisi mahdollista pienin ohjelmistollisten muutosten kautta (Järventausta et al. 2015). Yleisesti käytössä olevia kiinteistön älykkäitä taloautomaatiojärjestelmiä ovat esimerkiksi KNX-pohjaiset ratkaisut, joiden soveltuvuutta kysyntäjoustopon on selvitetty muissa tutkimuksissa. Älykkään rakennuksen ja kysyntäjoustopon konseptia asuinkerrostalossa on pilotoitu Suomessa Skanska Oy:n rakennuttamassa Espoon Adjutantien asunnoissa, joissa kerrostalohuoneiston potentiaalista ohjattavaa kuormaa seurattiin reaaliaikaisesti. Potentiaaliset ohjattavat kuormat asuinkerrostalon huoneistossa todettiin kuitenkin hyvin pieniksi, jopa alle 1 kW kuormaksi huoneistokohtaisesti. (Andelin 2017)

3.6 Kysyntäjoustopon nykytilanne kansainvälisesti

Suomessa rakennuksia ei ole vielä liitetty aktiivisesti osaksi energiajärjestelmää, toisin kuin osassa muista maista. Kuvassa 3.7 on esimerkki automatisoidusti toteutetusta kysyntäjoustoporatkaisusta liikekiinteistössä.



Kuva 3.7 Esimerkki kysyntäjoustopon osallistuvan liikekiinteistön järjestelmistä (Institute BE 2017).

Kysyntäjousto on edistymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat olleet edistysaskeleet älykkään sähköverkon mahdollistavissa teknologioissa, kuten ICT:n eli tieto- ja viestintäteknologian käyttöönotto sähköjärjestelmissä, älykkäiden energianhallintajärjestelmien (EMS) kasvava määrä loppukäyttäjillä ja älykkään sähköverkon mittausinfrastruktuurin kehittäminen. Suurin yksittäinen sähkövoimayhtiöiden kuluttajaryhmä on teollisuusasiakkaat. Eräiden tilastojen mukaan usean verkkoyhtiön teollisuusasiakkaista suurimmat 2-10 % kuluttavat koko verkon sähköntarpeesta noin 80 % osuuden (Mohagheghi et al. 2014). Teollisuusasiakkaat potentiaalisia kysyntäjouston kohderyhmiä, jotka kuitenkin rajataan tässä työssä tarkastelun ulkopuolelle ja keskitytään asuin- ja liikekiinteistöjen kysyntäjoustoratkaisuihin.

Kysyntäjoustopuolelta johtava alue oli vuonna 2013 Pohjois-Amerikka, joka käsitti yli 80 % koko markkinaosuudesta ja sen jälkeen suurimpana Eurooppa (Transparency Market Research 2014). Yhdysvalloissa puolet huippukuorman tarpeesta tulee keskisuurien tai suurien kiinteistöjen kulutuksesta, joiden huipputehon tarve on yli 20 kW (Institute BE 2017). Eri maiden kysyntäjousto-ohjelmia ja käytännön ratkaisuja on kuvattu seuraavissa kappaleissa.

3.6.1 Kysyntäjousto-ohjelmat

Kysyntäjousto on olemassa kansainvälisesti Suomeen verrattavissa olevia erilaisia ohjelmia, jotka voidaan luokitella kannustinperusteiseen tai hintaperusteiseen kysyntäjousto-ohjelmaan. Erona näillä kahdella menetelmällä on kuluttajalta vaadittava toiminta. Kannustinperusteisessa ohjelmassa kuluttajalle maksetaan korvauksia sen mukaisesti kun kulutusta on pienennetty tietyssä aikajaksossa, mutta hintaperusteisessa kuluttajat saavat itse valita kuorman pienentämisestä taloudellisin perustein.

Kannustinperusteinen kysyntäjousto-ohjelma voi olla suora kuormanohjaus eli DLC (direct load control), jonka tavoitteena on yhdistää suuri määrä pienien kuluttajien tiettyjä kuormia. Tämän tyyppisessä ohjelmassa loppukäyttäjän laitteistoa ohjataan suoraan ja tyyppillisesti kuormanohjaustapahtumien lukumäärä ja keskeytysten kesto on asetettu niin, että se ei vaikuta loppukäyttäjän viihtyvyytasoon. Ohjattavia kuormia ovat esimerkiksi ilmanjäähdytys, valaistus, vedenlämmittimet ja allaspumput. Loppukäyttäjälle kysyntäjousto-ohjelmien osallistuminen kompensoidaan alennuksilla tai eduilla sähkölaskussa ja mahdollisesti muilla osallistumisen mukaan maksettavilla korvauksilla. Näitä ohjelmia hallinnoi sähköverkoista vastaava yhtiö ja asiakasta ei informoida etukäteen.

keskeytyksistä. Suoran kuormanohjauksen tarpeet voivat verkkoyhtiön osalta liittyä joko taloudellisiin tai sähköjärjestelmän luotettavuuden varmistamisen toimenpiteisiin. Osa kuorman ohjaukseen liittyvistä ohjelmista on suunnattu keskisuurille ja suurille kuluttajille, jotka saavat korvauksia ajamalla alas määritellyt kuormat tai jopa keskeyttävät energiankulutuksensa verkkoyhtiön pyynnöstä. Kysyntäjoustosopimuksessa määritellään enimmäismäärä ja kesto kuorman leikkaukselle. Tämän ohjelman mukaiset toimenpiteet ovat sitovia ja pakollisia, jolloin asiakkaat voivat saada sanktioita mikäli kuormanleikkausta ei toteuteta pyydetysti. (Paterakis et al. 2017)

Sähkönkuluttajat voivat osallistua hintaperusteisiin ohjelmiin esittämällä kuorman leikkauksesta esimerkiksi hintaan ja kapasiteettiin pohjautuvia tarjouksia. Nämä tarjoukset voidaan osoittaa joko yhdelle tai useammalle markkinalle. Suuret kuluttajat voivat osallistua markkinoille suoraan ja pienkuluttajat osallistuvat kolmannen osapuolen, kuten aggregaattorin tai energiayhtiön kautta. Hintaperusteinen kysyntäjousto-ohjelma käsittää tyypillisesti sähkösopimuksen, jonka mukaan kuluttaja voi osallistua kysyntäjousto-ohjelmaan muuttuvan sähkönhinnan ohjaamana. Nämä sähkösopimukset käsittävät portaittain hinnoitellun TOU (time-of-use) tariffin. Kriittisten hintapiikkien mukaan hinnoitellut sopimukset määrittelevät enimmäismäärän päiviä vuodessa, jolloin mahdollinen hintapiikki voisi tapahtua ja määrän sellaisia ajanjaksoja jolloin CPP eli Critical Peak Pricing on käytössä. Menetelmänä reaaliaikainen hinnoittelu tarkoittaa tyypillisesti tunnin välein päivittyvää hintaa, ja tällöin kuluttajan sähkönhintaa seuraa joko koko sähkömarkkinan tai alueellisen sähkönhinnan vaihtelua. (Paterakis et al. 2017)

3.6.2 Käytännön kysyntäjoustoratkaisut

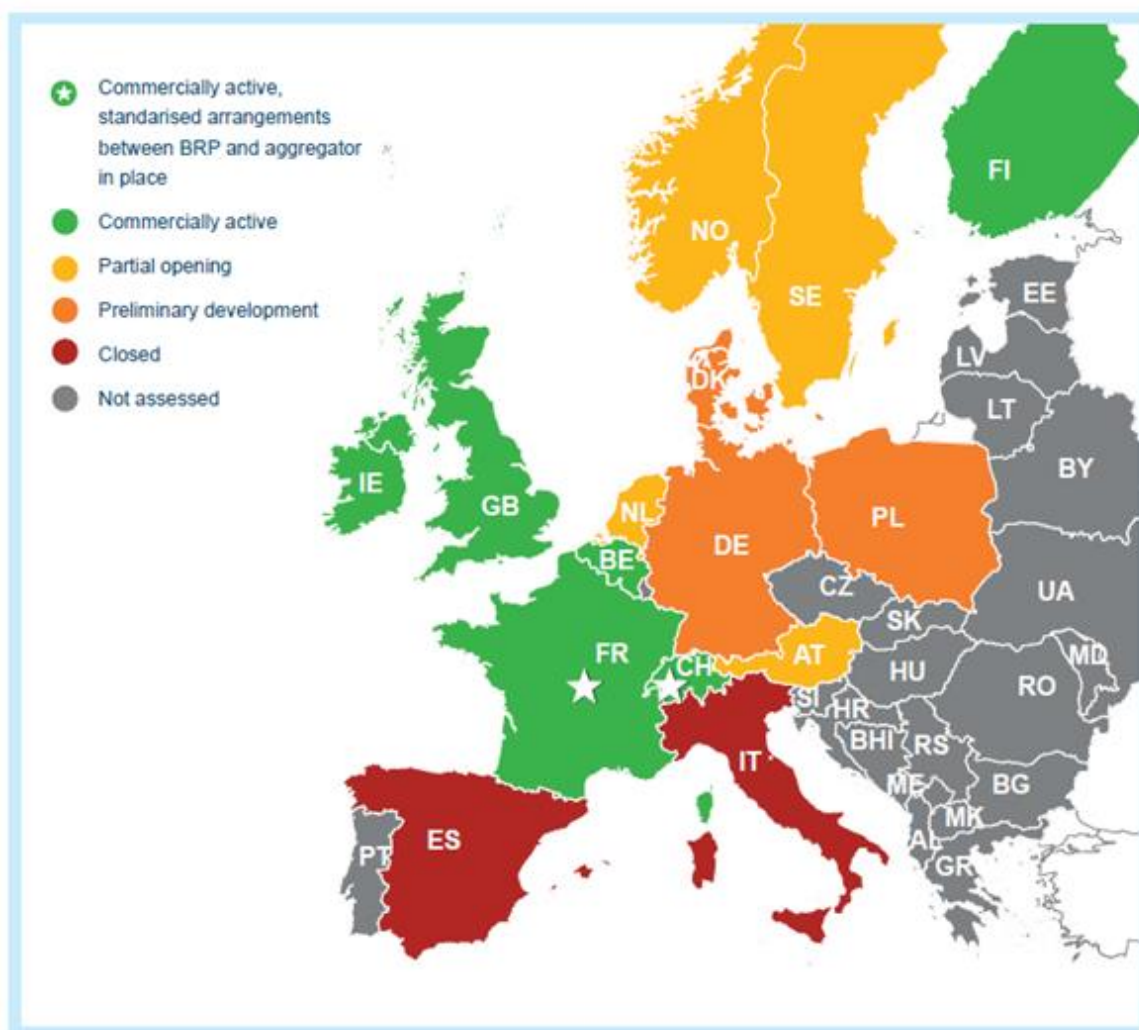
Kalifornian alueella on asukkaita lähes 40 miljoonaa asukasta ja sen energiayhtiöillä on useita omia kysyntäjousto-ohjelmia asuin-, liike- kuin teollisuusasiakkaillekin. Pacific Gas&Energy Company (PG & E) on ottanut käyttöönsä ”SmartAC” ohjelman, joka on suunnattu liike- ja asuinkiinteistöille ilmanjäähdytyksen ohjaukseen. Kesäajan helteiden piikkitalanteessa ilmanjäähdytyksiä ohjataan aggregoidusti, eli ohjattavia kuormia kierrätetään. Ohjelma varmistaa, että kesällä kysyntäjoustopiikkitalanteessa lämpötila liikekiinteistöissä ei ylitä sille asetettua tavoitelämpötilaa kuin korkeintaan 4 asteysikköä sellaisissa tiloissa joissa työskennellään. Teknisesti tämä toteutetaan asentamalla termostaatit, jotka kommunikoivat ja ovat etäohjattavissa PG & E – yhtiön tarpeisiin eli käytännössä nostamalla termostaatin asetuksia 4 asteysikköä tarpeen vaatiessa. Asiakas

voi kieltäytyä ilman sanktioita jäähdytyskuorman leikkauksesta, mikäli kysyntäjoustopyyntö tulee epäsovinnalla hetkellä. Suurille asiakkaille PG & E – yhtiö tarjoaa myös laajan joukon muita kysyntäjousto-ohjelmia, joilla kuormia ohjataan joko yksittäin tai aggregaattorin välityksellä. PDPD (Peak Day Pricing Program) on kesäajan hintapiikkien mukaan toteutettava ohjelma, jossa tyypillisesti kysyntäjoustotapahtumia on 9-15 kappaletta päivässä ja nämä tapahtuvat normaalisti kuumana kesäpäivänä. Loppukäyttäjä saa tiedon päivän etukäteen kysyntäjoustotapahtumasta. BIP (Base Interruptible Program) ohjelma tarjoaa loppukäyttäjälle kuorman leikkauksesta sovitulle tasolle rahallisen kannustimen, joka on 8 – 9 \$/kW kuukausittain, ja maksetaan vaikka joustoa ei tarvita. Kuormanleikkauksien määrälle on asetettu rajaksi 10 kertaa kuukaudessa tai korkeintaan 120 tuntia vuodessa. DBP (Demand Bidding Program) ohjelma on niin kutsuttu day-ahead eli päivä etukäteen tiedotettava kysyntäjoustotapahtuma. Minimitarjous kuormanrajoitukselle on 10 kW, kuormanrajoituksesta esitetyt tarjoukset varmistetaan kello 12:00 iltapäivällä ja kuorman leikkauksesta saadaan 0,50 \$/kWh korvaus. SLRP (Scheduled Load Reduction Program) ohjelma tarjoaa 0,10 \$/kWh korvausta etukäteen sovituista ajankohdista asiakkaille, joiden keskimääräinen vähimmäisteho kuukaudessa on 100 kW. Ajankohdat ovat neljän tunnin jaksoja päivisin ja kuormaa tulisi pienentää vähintään 15 % baseline – tehosta, joka arvioidaan 10 edellisen normaalin päivän tehontarpeesta. (Paterakis et al. 2017)

Vastaavasti myös muun muassa New Yorkissa sähköverkkoyhtiö New York Independent System Operator (NYISO) tarjoaa neljää erilaista kysyntäjousto-ohjelmaa. Näistä EDRP (Emergency DR Program), SCR (Special Case Resources) ja DADRP (Day-Ahead DR Program) ovat liikekiinteistöille sovellettavissa. (Paterakis et al. 2017)

Euroopassa kysyntäjoustoa tuetaan tällä hetkellä energiapolitiikassa ja siihen on viittauksia seuraavissa lakiteksteissä: *energiatehokkuusdirektiivi (EED, The Energy Efficiency Directive) 2012/27/EU*, *Eurooppalaiset verkkosäännöt* osana EU:n kolmannen energiapaketin tavoitteita, kuten *sähködirektiivi 2009/72/EC* sekä valtiontukea koskevat ohjeet energiaprojekteille. Kysyntäjoustopon mahdollistamiseksi Euroopassa on kuitenkin vielä tarve ohjauskeinoille, jotta energiapolitiikan esittämiin vaatimuksiin päästään käytännössä. Nykytilanteessa vain harva kysyntäjoustopon markkinapaikka on suunnattu kuluttajapuolen kuormille, sillä valtaosin kysyntäjoustopon osallistuu vain suurimmat teollisuuskuluttajat kahdenkeskeisten sähkösopimusten kautta. Tämä johtuu pääosin

puutteellisesta sääntelystä valtaosassa EU maista. Esitettyjä tarpeita ovat kuluttajan osallistumisen mahdollistaminen, kannattavien tuotteiden kehitys, mittaus- ja varmistusvaatimusten selventäminen, sekä oikeudenmukaisten maksujen ja seuraamuksien parempi määrittely. Eurooppa tulee kuitenkin seuraavana Pohjois-Amerikan jälkeen kysyntäjoustop kehityksen edistämistavoitteillaan. Suomen lisäksi Belgia, Ranska, Irlanti ja Sveitsi ovat saavuttaneet tason, jolla kysyntäjousto on kaupallisesti mahdollista. Kuvassa 3.8 on esitetty eksplisiittisen kysyntäjoustop markkinatilannetta Euroopassa. (SEDC 2015).



Kuva 3.8 Eksplisiittisen kysyntäjoustop markkinatilanne Euroopassa vuonna 2015. (SEDC 2015)

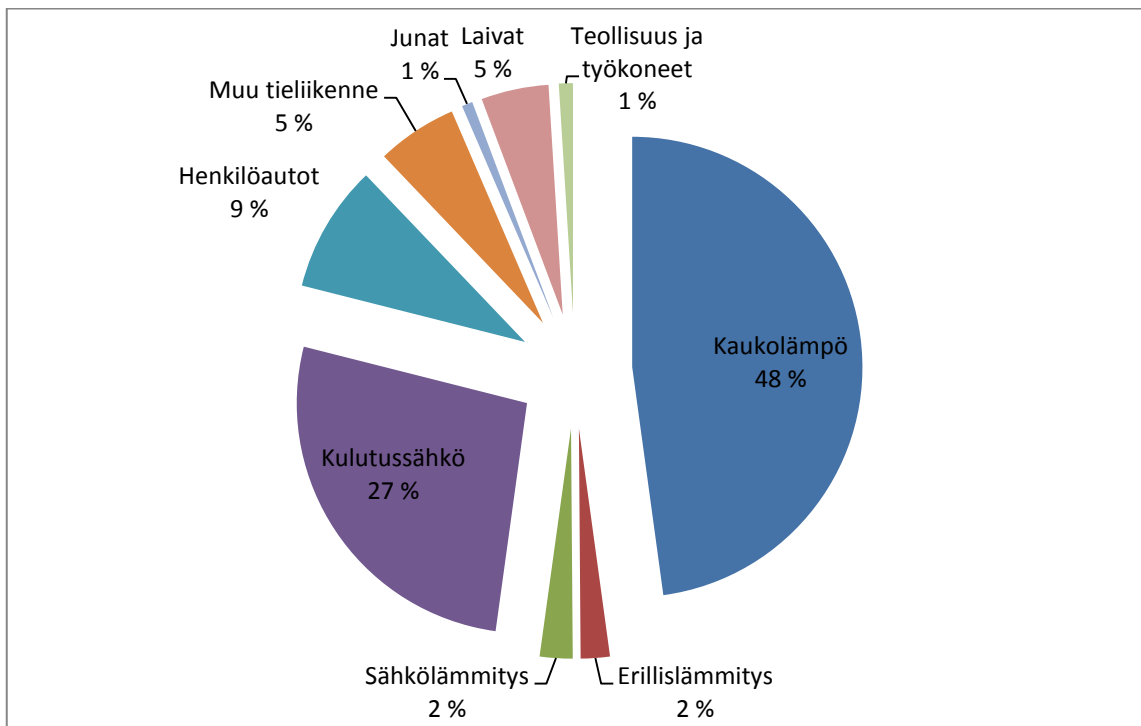
Britanniassa on kilpailukykyiset energiamarkkinat, jotka ovat mahdollistaneet kysyntäjoustop kehityksen, mutta tulevaisuudessa sitä vaikeuttanee uuden ydinvoimaa sekä fossiilista tuotantoa tukevan kapasiteettimarkkinamallin käyttöönotto (SEDC 2015).

Englannissa käytössä oleva kapasiteettimarkkinajärjestelmä, jossa tarjouskilpailun perusteella esimerkiksi voimalaitoksille maksetaan varakapasiteetin ylläpidosta, ei ole käytössä kaikissa maissa kuten Suomessa. Englannissa esimerkiksi KiWi energiayhtiö tarjoaa kysyntäjoustoan liittyvää strategiaa ja vastaavia ohjelmia kuin Yhdysvaltojen energiamarkkinoilla. KiWi – yhtiöllä on käytössä LVI – laitteistojen ohjaukseen tarkoitettu ohjelma, jolla muun muassa valaistusta etäohjauksen mahdollistavien kojeistojen kautta huippukuormituksen aikana. Eri kuluttajatyypeille on räätälöidyt ohjelmat, kuten sairaaloille, terästeollisuudelle, tietoliikenne- ja logistiikkayksiköille. Esimerkiksi lentokenttien jäähdytyslaitteistot ja matkalaukkujen käsittelyalueen ilmastointiyksiköt voidaan sammuttaa hetkellisesti kysyntäjoustopilanteessa. Kysyntäjousto-ohjelma voi tarkoittaa suurien ruokakauppojen tapauksessa valaistustason laskentaa tai jäähdytysyksikön kompressorien sammutusta. (KiWi Power 2017)

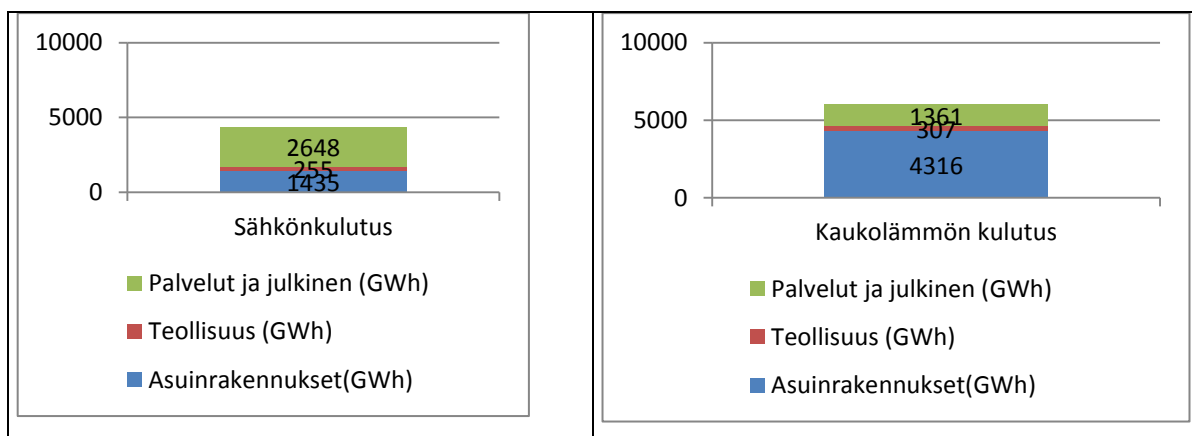
4 RAKENNUKSEN ENERGIATEHOKKUUS

Rakennusten energiatehokkuus on sekä kansallisesti että globaalisti hyvin merkittävässä roolissa energia- ja ilmastonäkökulmasta katsottuna. Euroopan unionin tasolla rakennusten osuus koko energiankäytöstä on 40 % ja hiilidioksidipäästöistä 36% (EC 2017). Tarkasteltaessa yksittäisiä alueita ja kaupunkeja on rakennetun ympäristön osuus energiankäytöstä vielä merkittävämpi. Helsingissä kokonaisenergiankulutuksesta rakennusten lämmityksen ja kulutussähkön osuus oli vuonna 2015 yli 80 % kuvan 4.1 mukaisesti. Rakennusten sähkönkulutuksesta yli 60 % muodostuu palvelu- ja julkisista rakennuksista, mutta kaukolämmönkulutuksesta yli 70 % muodostuu pelkästään asuinrakennuksista, kuten kuvassa 4.2on esitetty. (Helsingin Ympäristötilasto 2017)

Tässä kappaleessa kuvataan tyypillisen liikerakennuksen ja asuinkerrostalon energiankäytön muodostuminen. Lisäksi käydään läpi uudisrakennuksen energiasuunnitteluun liittyviä määräyksiä ja ohjauksia, jotka tulisi huomioida rakennuksen kysyntäjoustoratkaisujen suunnittelussa.



Kuva 4.1 Helsingin seudun kokonaisenergiankulutus vuonna 2015 kulutuslajeittain. Kokonaiskulutus oli 4774 GWh. (Helsingin Ympäristötilasto 2017)



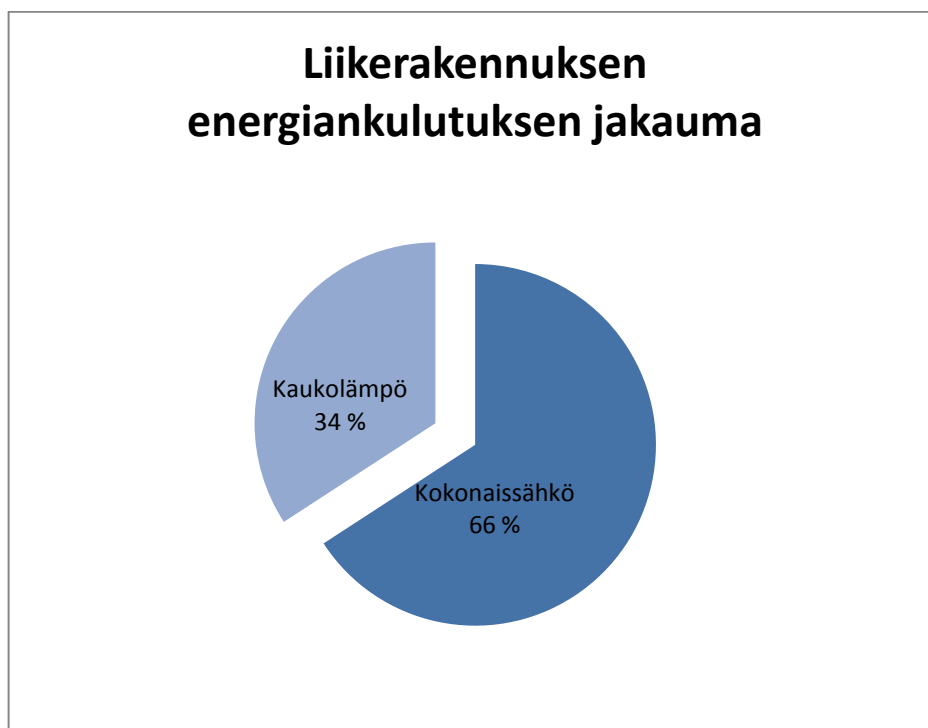
Kuva 4.2 Rakennusten sähkön- ja kaukolämmön kulutuksen jakautuminen Helsingissä 2015. (Helsingin Ympäristötilasto 2017)

4.1 Rakennuksen energiankulutus

Rakennusten energiatalouteen vaikuttavia tekijöitä ovat rakennuspaikka, rakennusfysiikka ja rakennuksen käyttötarkoitus. Rakennuksen sijainti ja maasto määrittävät ympäristön lämpötilanvaihtelun, sääolot ja säteilyenergian vaikutuksen. Sijainti ja sääolot vaikuttavat lämmitysenergian ja – tehon tarpeeseen sekä myös kiinteistön energian omatuotantoon. Rakennuksen vaipan rakenteella on merkitystä lämmön siirtymiseen rakenteiden läpi sekä lämmön varastoitumiseen. Asuinrakennuksella, toimisto-, liike- tai julkisella rakennuksella sekä teollisuus- ja varastorakennuksella on jokaisella oma käyttötarkoituksesta riippuva sisäilmastovaatimus. Lvi-järjestelmän laitteilla on merkittävä vaikutus rakennuksen energiankäyttöön.

Kiinteistötasolla tarkasteltuna asuinrakennusten energiankäyttö painottuu hyvin vahvasti lämmityksen energiantarpeeseen. Uudemmissa asuinrakennuksissa lämpimän käyttöveden osuus kulutuksesta on merkittävää. Liikerakennuksissa sähkölaitteiden käyttö ja niiden tuoma lämpökuorma osaltaan pienentävät tätä lämmöntarvetta. Erityisesti kiinteistökohtaisia sähkönkulutuksia vertailtaessa on kuitenkin muistettava, että vanhemmissa rakennuksissa kiinteistön mitattu sähkönkulutus kattaa yleensä vuokralaisten sähkönkulutuksen, kun taas uudemmissa kiinteistöissä kaikilla vuokralaisilla on omat sähkösopimukset ja tietoa vuokralaisten kulutuksesta ei välttämättä ole johdettu kiinteistön seurantajärjestelmään.

Kuvassa 4.3 on esitetty erään vuonna 2010 rakennetun liikekeskuksen energiankulutusjakauma, joka kuvaa tyypillistä liikerakennuksen kulutusjakaumaa.



Kuva 4.3 Liikerakennuksen kulutusjakauma (sis. vuokralaissähkön ja jäähdytys­sähkön)

Liikekeskuksen energiankulutustieto pohjautuu kiinteistön energianhallintajärjestelmällä kerättyyn kulutusdataan. Kuvasta on nähtävissä kokonaissähkön suhteellisesti merkittävä osuus liikerakennuksen kokonaisenergiankulutuksesta. Kokonaissähköllä tarkoitetaan tässä liikerakennuksen vuokralaisten, kuten myymälöiden, sähkönkulutusta sekä kiinteistön yleisten tilojen LVI- ja valaistuksen sähköntarvetta. Liikerakennuksen energiankulutus poikkeaa tyypillisesti esimerkiksi asuinkerrostalon kulutuksesta huomattavasti etenkin kiinteistösähkön osalta.

4.2 Rakennusten energiatehokkuuden direktiivit

Euroopan unionin tasolla rakennusten energiankäyttöä ja kasvihuonekaasupäästöjä säädellään keskeisesti *rakennusten energiatehokkuusdirektiivillä, EPBD (Energy Performance of Buildings Directive)*. Lisäksi energiatehokkuuteen liittyvät myös jo aiemmin mainittu *energiatehokkuusdirektiivi, EED (Energy Efficiency Directive)* ja *ekosuunnitteludirektiivi (Ecodesign Erp)*. EED asettaa tavoitteita lähinnä valtakunnallisella ja alueellisella tasolla. (EC 2017)

Ekosuunnitteludirektiivi määrittelee tuotteiden suunnittelun ja tuotekehityksen ekologiset vaatimukset. Taloteknisistä laitteista direktiivin sääntelyn piirissä ovat esimerkiksi pumput, puhaltimet, ilmanvaihtokoneet ja lämmöntuottolaitteet. Direktiivin työsuunnitelmaehdotuksen mukaan direktiivin piiriin tulisi vuoteen 2019 mennessä myös esimerkiksi rakennusautomaatio- ja säätöjärjestelmät.

EPBD tuli voimaan vuonna 2002 ja direktiivi uusittiin vuonna 2010. Direktiivi vaikuttaa sekä uusiin että olemassa oleviin rakennuksiin ja se sisältää kolme pääaluetta: energiatodistusten käyttöönotto, energiatehokkuuden vähimmäisvaatimukset, ja lämmitys- ja ilmastointijärjestelmien sekä -laitteiden määräaikaistarkastukset. Energiatehokkuuden vähimmäisvaatimuksien vuoden 2010 päivityksen mukaisesti tulee kaikkien uusien rakennusten olla lähes nollaenergiarakennuksia vuoden 2020 loppuun mennessä. Uusien julkisten rakennusten osalta tämä tavoite on vuoden 2018 mennessä. (EC 2017)

Euroopan unionin komissio esitti marraskuussa 2016 päivitystä EPDB direktiiville, jonka tarkoituksena on muun muassa edistää älykkäiden järjestelmien käyttöönottoa rakennuksissa. Kysyntäjoustop kannalta direktiiviin on kirjattu useita kiinnostavia ehdotuksia erityisesti älykkäiden energijärjestelmien kehittämiseksi. Direktiiviehdotuksessa kiinteistön teknisten järjestelmien määritelmää on laajennettu ja se sisältää uusia määräyksiä sähköautojen latauspaikkoihin. Ehdotuksen mukaan jokaisessa uudessa rakennuksessa tulisi olla latauspisteitä, jotka kykenevät aloittamaan ja lopettamaan latauksen hintasignaalin mukaisesti. Tämä ehdotus ei koske asuinrakennuksia. (Haakana 2016)

Älykkäiden järjestelmien kannalta direktiivin keskeinen uusi ehdotus on älykkäitä ratkaisuja koskevan indikaattorin lisääminen. Tällä hetkellä direktiivi määrää, että rakennusta myytäessä tai vuokrattaessa on esitettävä rakennuksen kokonaisenergiatehokkuutta kuvaava energiatodistus. Uuden direktiiviehdotuksen mukaisesti olisi myös annettava tieto rakennuksen älykkäiden järjestelmien valmiuksista. Älykkäillä ratkaisulla tarkoitetaan laitteistoja, jotka on integroitu rakennuksen perinteisiin järjestelmiin ja ne parantavat muun muassa rakennuksen kykyä osallistua kysynnänohjaukseen sekä edistää erilaisten energijärjestelmien optimaalista toimintaa. (Haakana 2016)

4.3 Rakennuksen tehokkuuden vaatimukset

Rakennuksia tarvitaan useisiin eri käyttötarkoituksiin, joiden tekniset vaatimukset voivat erota merkittävästi toisistaan. Jokaiseen käyttötarkoitukseen voidaan kohdistaa sekä yksilöityjä vaatimuksia että käyttötarkoitussuokkat ylittäviä yhteneviä vaatimuksia. Rakennusten energiankäytön tehokkuutta arvioidaan perinteisesti vertaamalla rakennuksen ominaiskulutusta, esimerkiksi kWh/m² tai kWh/m³ tietyn käyttötarkoitussuokan sisällä. Rakennuksen käyttötarkoituksen ja rakennuksen sisältämien tilatyypin vaatimuksien edellytykset on säädelty *Maankäyttö ja rakennuslaissa (MRL)* ja yksityiskohtaisemmat vaatimukset MRL:n mukaisesti valtioneuvoston- ja ympäristöministeriön asetuksissa. MRL:n pykälä 117§ koskien energiatehokkuutta asettaa rakennuksen rakentamiselle vaatimuksia joiden täyttymisestä rakennushankkeeseen ryhtyvän täytyy vastata (MRL 5.2.1999/132). Tässä työssä on keskitytty kuvaamaan erityisesti rakennuksen sisäilmastolle ja energiatehokkuudelle asetettuja vaatimuksia ja näiden liittymäpintaa älykkäisiin energijärjestelmiin sekä kysyntäjouston.

4.3.1 Energiatehokkuus

Energiatehokkuudesta on rakennukselle asetettu vaatimuksia, jotka on huomioitava jo rakennushankkeessa. Vaatimuksena on, että rakennuksen energiatehokkuuden vähimmäisvaatimukset on osoitettava laskelmilla. Taloteknisten järjestelmien ja niiden säätö- ja mittausjärjestelmien on tuettava energiatehokkuustavoitteiden toteutumista käytössä. Uusien rakennuksen ominaisuuksilta vaaditaan suunnittelussa ja rakentamisessa lähes nollaenergiarakennusta. Lisäksi energiatehokkuutta on parannettava korjaus- ja muutostyön yhteydessä, mikäli se on teknisesti, toiminnallisesti sekä taloudellisesta mahdollista toteuttaa. (MRL 5.2.1999/132)

Suomen kansallinen rakennuslupakäytäntö muuttui vuonna 2012 EPBD-direktiivin vaatimusten mukaiseksi. Määräysten perusluonne muuttui oleellisesti yksittäisten arvojen säätämistä kokonaisenergiatarkasteluun. Rakennuksille on asetettu rakennustyyppikohtainen E-lukuvaatimus ja suunnittelijoille sekä konsulteille on annettu vapaammat kädet pohtia ratkaisuja, joilla vaatimus saavutetaan. Rakennusta käsitellään näin ollen kokonaisuutena eikä vain yksittäisinä seinien U-arvoina tai lämmöntalteenoton hyötysuhteina. E-luku lasketaan jäähdytettävissä rakennuksissa tuntitasoisesti simulointityökalulla, joka pystyy mallintamaan rakenteiden lämmönvarausominaisuudet.

Ei-jäähdytettävien rakennusten E-luku voidaan laskea kuukausitasolla esimerkiksi Rakentamismääräyskokoelman osan D5 ohjeiden mukaisesti.

E-luku kuvaa rakennuksen standardoitua ostoenergiankulutusta painotettuna energiamuotojen kertoimilla ja se lasketaan rakennuksen lämmitettyä nettoalaa kohti [$\text{kWh}_E/\text{m}^2/\text{v}$]. E-luvun laskennassa rakennuksen standardikäyttö määrittää laskennan kiinteät lähtötiedot, jotka saadaan Ympäristöministeriön asetuksesta. Ympäristöministeriön asetukset ovat päivittymässä vuoden 2017 aikana. Rakennuksen E-lukua tarkasteltaessa on lisäksi huomioitava, että se ei vastaa todellista ostoenergiankulutusta. E-luku on ainoastaan arvo jonka välityksellä saman rakennustyyppin mukaisia rakennuksia voidaan keskenään vertailla, jos niitä käytettäisiin standardin mukaisella tavalla. Koska E-luku huomioi rakennuksen tehokkuutta vain tietyllä käytötavalla ja säätiedolla, sitä ei tulisi käyttää ainoana energiatehokkuuden indikaattorina hankkeen suunnitteluratkaisujen vertailussa (Vuolle 2014). Tämän lisäksi rakennuksen todellisten energiankulutusten tai niiden arvioiden vertaaminen toisiinsa saman rakennustyyppin kesken ei ole täysin ongelmatonta, sillä saman käyttötarkoituksen omaavien rakennusten välillä voi olla merkittäviä käyttäjälähtöisiä eroja. Kilowattituntipohjaiset ominaiskulutukset eivät ota huomioon esimerkiksi rakennuksen käyttäjämäärää, käyttöaikaa tai mitä rakennuksen kuluttamalla energialla on saatu aikaan.

Rakennuksen todellisen energiatehokkuuden tunnistaminen vaatisi siis rakennuksen käyttötavan ja käyttöolosuhteiden kattavaa seuraamista ja mittaamista. Älykkäässä energijärjestelmässä energiankulutusta tulisi painottaa lisäksi ajalla, jolloin rakennuksen tehokkuus ei välttämättä muodostuisi siitä miten paljon energiaa kulutetaan vaan milloin energiaa kulutetaan. Kysyntäjoustossa mukana olevan tehokkaan ja älykkään rakennuksen tulisi siis olla aktiivisessa vuorovaikutussuhteessa sekä käyttäjään että energijärjestelmään.

4.3.2 Sisäilmasto

Maankäyttö ja rakennuslaissa on määrätty, että rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, että se on terveellinen ja turvallinen sisäilma, kosteus-, lämpö- ja valaistusolosuhteet sekä myös vesihuolto huomioon ottaen (MRL 5.2.1999/132). MRL:n lisäksi sisäolosuhteiden säätelyyn vaikuttaa *Terveydensuojelulaki 19.8.1994/763*. Asuntojen ja muiden oleskelutilojen terveydellisten olosuhteiden vaatimuksia säädellään asumisterveysasetuksessa. Asetuksessa on asetettu toimenpiderajat tilojen lämpötiloille

joiden jälkeen tilanteeseen on puututtava. Nämä rajat ovat siis lämpöolosuhteiden minimi- ja maksimiarvot, jotka ovat asuinrakennuksen huoneistolle ja palvelu- ja liikerakennukselle soveltaen esitetty taulukossa 4.1:

Taulukko 4.1 Lämpöolosuhteiden minimi ja maksimirajat. (Terveystieteiden laiton laki 19.8.1994/763)

	<i>Lämpötilojen toimenpiderajat</i>
<i>Asunnossa</i>	
Huoneilman lämpötila lämmityskaudella	+ 18 °C – + 26 °C
Huoneilman lämpötila lämmityskauden ulkopuolella	+ 18 °C – + 32 °C
Seinäpinnan alin keskiarvolämpötila	+ 16 °C
Lattiapinnan alin keskiarvolämpötila	+ 18 °C
Alin pistemäinen pintalämpötila	+ 11 °C
<i>Palvelutaloissa, vanhainkodeissa, lasten päivähoitopaikoissa, oppilaitoksissa ja vastaavissa tiloissa</i>	
Huoneilman lämpötila lämmityskaudella	+ 20 °C – + 26 °C
Huoneilman lämpötila lämmityskauden ulkopuolella lasten päivähoitopaikat, oppilaitokset ja muut vastaavat tilat	+ 20 °C – + 32 °C
Huoneilman lämpötila lämmityskauden ulkopuolella, palvelutalot, vanhainkodit ja muut vastaavat tilat	+ 20 °C – + 30 °C
Seinäpinnan alin keskiarvolämpötila	+ 16 °C
Lattiapinnan alin keskiarvolämpötila	+ 19 °C
Alin pistemäinen pintalämpötila	+ 11 °C

Toimitilarakentamisessa on kuitenkin yleistä, että rakennuksille asetetaan määräystasoa parempia sisäilmaston laatutavoitteita. *Sisäilmaluokitus 2008 (RT-07-10946)* on yleisesti käytetty luokitus sisäilmastolle ja rakennushankkeessa yleensä sitoudutaan tarjoamaan käyttäjälle luokitustasoa S1-S3 vastaavat olosuhteet käyttötilanteissa. Tämän tason mukaisesti voidaan määrittää kysyntäjoustopientien vaatimukset. Sisäilmastoluokitus 2008:ssa annetaan ulkolämpötilasta riippuvaiset tavoitearvot tilan operatiiviselle lämpötilalle ja sisäilman laadulle taulukoiden 4.2 ja 4.3 mukaisesti. *Operatiivisella lämpötilalla* tarkoitetaan huoneilman lämpötilan ja ihmistä ympäröivien pintojen

säteilylämpötilojen keskiarvoa. Operatiivinen lämpötila kuvastaa huoneilman lämpötilasta poikkeavien pintalämpötilojen vaikutusta ihmisen lämmöntunteeseen. Operatiivinen lämpötila voi poiketa huomattavasti huoneilman lämpötilasta esimerkiksi huoneissa, joissa on suuria ikkunoita tai joiden alla on lämmittämättömiä ilmatiloja.

Taulukko 4.2 Sisäilmastoluokitus 2008:n mukaiset lämpötilan tavoitearvot.

	S1	S2	S3
Operatiivinen lämpötila t_{op} [°C]			
$t_u \leq 10$ °C	21,5*	21,5	21
$10 < t_u \leq 20$ °C	$21,5 + 0,3 \times (t_u - 10)^*$	$21,5 + 0,3 \times (t_u - 10)$	$21 + 0,4 \times (t_u - 10)$
$t_u > 20$ °C	24,5*	24,5	25
Sallittu poikkeama tavoitearvosta [°C]	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$
Operatiivisen lämpötilan enimmäisarvo [°C]	$t_{op} + 1,5$	$t_u \leq 10$ °C: $t_{op} + 1,5$ $10 < t_u \leq 20$ °C: $23 + 0,4 \times (t_u - 10)$ $t_u > 20$ °C: 27	$t_u \leq 15$ °C: 25 $t_u > 15$ °C: $t_{umax} + 5$
Operatiivisen lämpötilan vähimmäisarvo [°C]	20	20	18
Olosuhteiden pysyvyys [% käyttöajasta]			
• toimi- ja opetustilat	95 %	90 %	–
• asunnot	90 %	80 %	–

* S1-luokassa operatiivisen lämpötilan on oltava tila/huoneistokohtaisesti aseteltavissa välillä $t_{op} \pm 1,5$ °C. Jos samassa huoneessa on useita henkilöitä, käytetään lämpötilan tavoitetasona taulukossa esitettäviä tavoitearvoja.

Taulukko 4.3 Sisäilmastoluokitus 2008:n mukaiset sisäilman laadun tavoitearvot.

	S1	S2	S3
Hiilidioksidipitoisuus [ppm]	<750	<900	<1 200
Radonpitoisuus [Bq/m ³]	<100	<100	<200
Olosuhteiden pysyvyys [% käyttöajasta]			
• toimi- ja opetustilat	95 %	90 %	
• asunnot	90 %	80 %	

Älykkäässä kysyntäjoustoos osallistuvassa rakennuksessa sisäilmaluokituksen laatutaso määrittää ne olosuhteet joissa on pysyttävä, mikäli luokitus on käytössä. Luokitus mahdollistaa poikkeamat lämpötilan tavoitearvosta. Mikäli luokitusta ei ole käytössä olosuhteiden raja-arvot määräytyvät rakentamismääräyskokoelman mukaisesti, joka vastaa sisäilmaluokituksen tasoa S3.

4.3.3 Älykkyys

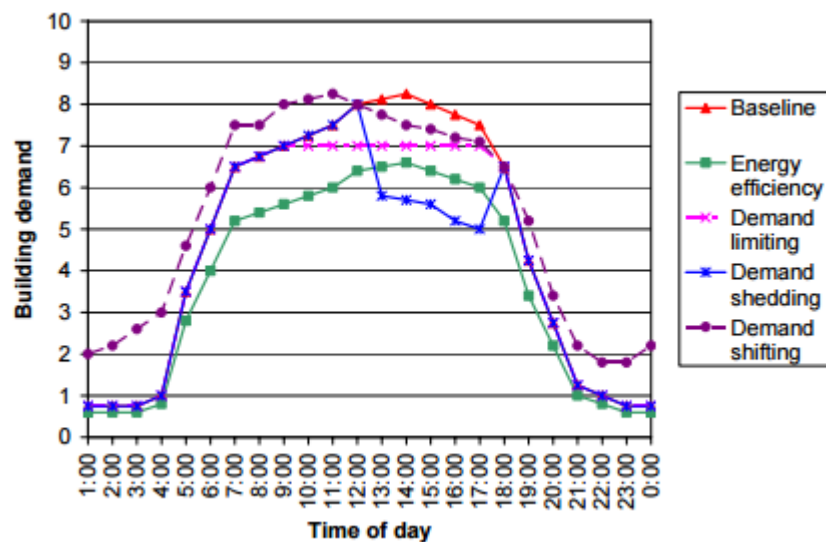
Rakennusten älykkyydelle tai automaatiojärjestelmien laajuudelle ei ole asetettu rakentamismääräyksissä kattavia vaatimuksia. Rakennusmääräyskokoelma D3 edellyttää kuitenkin, että rakennuksen keskeisten järjestelmien energiankulutus on mitattavissa. Älyrakennus voidaan määritellä rakennukseksi joka sisältää reaaliaikaisesti reagoivia, käyttäjän kanssa vuorovaikutussuhteessa olevia tietoteknisiä, taloteknisiä ja rakenneteknisiä järjestelmiä sekä energian tuotto- ja siirtojärjestelmiä. Liitteessä I on esitetty Suomen Rakennusinsinöörien Liiton ohjeen mukainen käyttäjälähtöisen älyrakennuksen luokittelun periaate. Taulukon luokittelu linkittyy vahvasti automaatiostandardiin EN-15232, jossa on kuvattu automaatiojärjestelmien vaikutusmahdollisuuksia rakennuksen energiatehokkuuteen. (RIL 267-2015)

5 KYSYNTÄJOUSTON TOTEUTUSMALLIT

Tässä kappaleessa on esitetty eri kysyntäjoustostrategioiden arviointi hyödyntäen tarkasteltavien rakennusten dynaamista energiasimulointimallinnusta IDA ICE ohjelmistolla. IDA ICE:a on käytetty muodostamaan suunniteltavina olevista rakennuksista suunnittelutilannetta vastaava virtuaalinen mallinnus, jota voidaan käyttää eri strategioiden testipenkkinä.

Kysyntäjouston potentiaalitarkasteluissa tulee määrittää perustaso (baseline) josta joustetaan. Tämän perustason mukaan voidaan arvioida rakennuksen kysyntäjoustopitoimienpitemien suuruutta kuormanohjauksen tarpeisiin. Lisäksi on hyvä eritellä, mitkä toimenpiteistä ovat niin sanottuja tavallisia energiatehokkuuden toimenpiteitä. Kysyntäjouston toteutusmalleja voidaan jakaa muun muassa seuraavasti (Motegi et. al. 2007):

- kuorman rajoitus (demand limiting)
- kuorman poisto kokonaan (demand shedding)
- kuorman siirto (demand shifting)
- kuorman lisääminen (demand increasing)



Kuva 5.1 Esimerkki rakennuksen kuormitusprofiileista eri kysyntäjoustopitoimienpitemien avulla. (Motegi et. al. 2007)

Kohteen kysyntäjoustopotentiaalia on lähdetty tutkimaan osin Suomessa tehdyn kysyntäjoustopotentialin eli *DR poolin* tutkimustulosten valossa ja siksi tähän työhön on valittu tarkemmin tarkasteltavaksi ilmanvaihto sekä valaistus (Järventausta et. al. 2015). Kysyntäjoustopotentiaalin toteutusmalleiksi on valittu kuorman leikkaus ja kuorman lisääminen. Samalla huomioidaan rakennuksen liittymäpinta kaukoenergiaan ja tarkastellaan kysyntäjoustopotentiaalin vaikutusta kaukolämpö- ja jäähdytystehoon. Tuloksia on esitetty havainnollistavien esimerkkitapausten kautta yksittäiselle rakennuksen alueelle.

5.1 Rakennuksen energiamalli

Tässä työssä käytetään tuntitason dataa rakennuksen energiankulutuksesta. IDA Indoor Climate and Energy eli IDA ICE on dynaamiseen monivaiheiseen mallinnukseen käytettävä simulointiohjelmisto, jolla voidaan tutkia rakennuksen lämpötilaa ja energiankulutusta (IDA ICE 2017). Rakennuksen energialaskennassa voidaan IDA ICE:n avulla mallintaa rakennuksen järjestelmät ja niiden säätölaitteet, sekä huomioida sisäilmaolosuhteet. Energialaskentamallin luomisessa huomioidaan Suomen Rakentamismääräyskokoelmassa esitetyt vaatimukset rakennuksen energiatehokkuudelle ja vaatimukset sisäilmasto-olosuhteille. Energiamallilla saadaan sääolosuhteisiin ja paikkaan sidottua tuntikohtaista tietoa rakennuksen jäähdytyksen, lämmityksen ja ilmanvaihdon tehoista.

IDA ICE mallinnusta voidaan käyttää kysyntäjoustopotentiaalin kannalta siihen, että hyödynnetään ohjattavan kuorman tutkimisessa koko vuoden tuntitasoista tehoprofiilia. Toisaalta mallinnuksella tutkitaan, että mikä vaikutus eri toimenpiteillä on rakennuksen olosuhteisiin. Energiamallinnusta ei kuitenkaan voi sellaisenaan käyttää rakennuksen sähköjärjestelmän mallintamiseen. Lisäksi huomioitava, että vaikka energialaskentatyökaluja käytetään tyypillisesti tuntitason tarkasteluun ja ne mahdollistaisivat myös sekuntitason aika-askeleen, ne eivät lähtötiedoista johtuen yleensä anna mahdollisuutta siihen. Lähtötiedot, kuten käyttöprofiilit, ovat usein muodostettu tuntitasolle. Tässä työssä liikerakennuksen vuositasoisen energiamallia on hyödynnetty kysyntäjoustopotentiaalin tarkasteluun tutkimalla olosuhteiden käyttäytymistä huipputilanteissa kesällä ja talvella. Energialaskentamallin luomisessa toteutetaan seuraavat vaiheet:

1. Rakennuksen geometrian ja vyöhykkeiden mallintaminen arkkitehtipohjien mukaisesti
2. Sijainnin ja säätiedon määrittely
3. Rakennusvaipan tietojen määrittely
4. Seinät ja ikkunat, U-arvot, g-arvot, kylmäsilat, vuotoilmavirta
5. Tilatietojen määrittely
6. Käyttäjämäärät, laitekuormat, valaistuskuormat, käyttöprofiilit, ilmamäärät, asetusarvot
7. Ilmanvaihtokoneiden määrittely
8. Sähkötehokkuus, lämmöntalteenotto, vaikutusalueet, käyttöajat
9. Häviöiden ja muiden LVI-laitteiden määrittely
10. Mitoituslaskennat ja tilalaitteiden määrittely
11. Lämmitys- ja jäähdytystarve huippukulutustilanteessa
12. Energialaskenta koko vuodelle tai tarkastelujaksolle

5.2 Case kohde: Kauppakeskus REDI

Tässä työssä on tarkasteltu esimerkkikohteena Kalasatamaan rakenteilla olevaa REDI:ä, jonka rakennuttajana toimii SRV. Kauppakeskus REDI:issä tulee olemaan useita liiketiloja kuten kahviloita, ravintoloita, viihde- ja liikuntakeskuksia ja myymälöitä. REDI:n yhteydessä on lisäksi metroasema sekä kahdeksan tornitaloa, joista suurin osa on suunniteltu asuinkäyttöön. Tornitaloissa on 20–35 kerrosta ja ensimmäisenä taloista valmistuu Majakka. REDI:n ympärille rakennetaan seuraavan vuosikymmenen aikana Kalasataman asuinalueita, joka tarjoaa kodin 20 000 asukkaalle ja 8 000 työpaikkaa. Kauppakeskus REDI:in kuuluu pysäköintihallit ja lisäksi alueelle rakennetaan pysäköintitilat kallion sisälle. Kuva 5.2 on havainnekuva REDI:stä. (REDI 2017)



Kuva 5.2 REDI-hankkeen havainnekuva. Hankkeen rakennuttajana toimii SRV. (SRV 2017)

Avainluvut kauppakeskusta koskevasta energiamallista pääpiirteittäin on esitetty taulukoissa 5.1 ja 5.2.

Taulukko 5.1 REDI:n energiamallin tunnuslukuja.

Parametri	
Bruttoala	164 000 brm ²
Tilavuus	731 000 m ³
Liiketilojen suhteellinen osuus bruttoalasta	30 %
Pysäköintitilojen suhteellinen osuus bruttoalasta	40 %

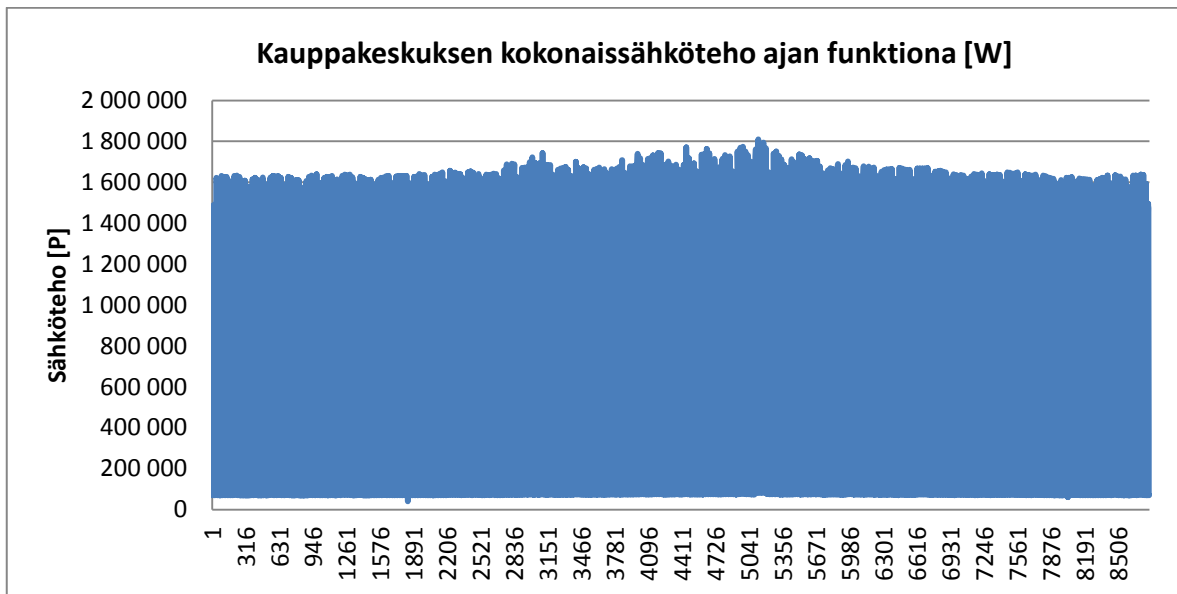
Taulukko 5.2 REDI:n simuloidut energiankulutukset vuositasolla järjestelmittäin.

Järjestelmä	Energiankulutus [MWh/v]
Kaukolämpö, koko kiinteistö	3 100
Sähköenergia, koko kiinteistö	14 400
Kaukojäähdytys, koko kiinteistö	2 600

Rakennuksen kulutustasossa korostuu kytkentä kaukolämmitys- ja kaukokylmäverkostoon. Lisäksi rakennuksessa kiinteistön omistajilla on tällä hetkellä mahdollista ohjata vain kiinteistölle kuuluvia sähkökuormia. Kauppakeskuksen vuokralaisten eli liiketilojen sähkönkulutus tapahtuu omien mittareiden takana jolloin kuormia ei voi kiinteistötasolla ohjata kysyntäjoustopuolella.

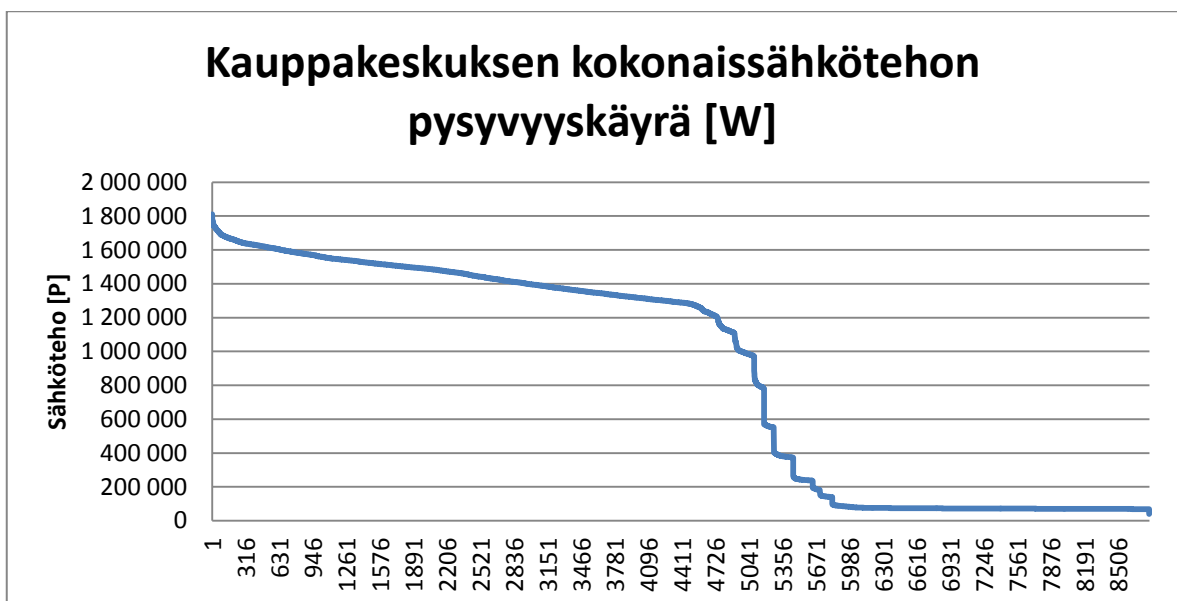
5.3 Talotekniikan kysyntäjousto

Kuvassa 5.1 on esitetty REDI:n kauppakeskuksen sähkötehon tarve energialaskennan tyyppivuoden aikana. Kauppakeskukseen kuuluu vuokralaistilat, pysäköintitilat ja yleiset tilat. Yleisillä tiloilla tarkoitetaan tässä käytäviä ja auloja sekä teknisiä tiloja. Sähkötehon tarve koostuu koko kiinteistön kuluttamasta sähköstä, johon on laskettu mukaan myös vuokralaisten sähkönkulutus. Sähkön tarve muodostuu pääasiassa taajuusohjattujen iv-puhaltimien, pumppujen ja valaistuksen kulutuksesta. Kuormituskäyrässä on nähtävissä kuukausitason ja viikkotason vaihtelua, joka aiheutuu vuodenajan mukaisista sääolosuhteista ja käyttöprofiilista. Käyttöprofiili on määritelty tuntitasolla arkipäiville ja viikonlopuille.



Kuva 5.1 REDI:n simuloitu sähköteho tarve vuoden mittaisella ajanjaksolla.

Pelkkä vuositason kokonaissähkötehon tarkastelu ei riitä antamaan tarpeeksi kattavaa kuvaa kiinteistön sähköntarpeesta tai mahdollisesta kysyntäjoukosta osallistuvasta kuormasta. Pysyvyyskäyrästä kuvassa 5.2 nähdään, että kiinteistön sähköteho vaihtelee ajallisesti hyvin paljon. Sähköteho on yli 1,2 MW noin 4 400 tuntia vuodesta eli noin puolet vuoden tunteista. Tällä aikaikkunalla on mahdollista osallistua kysyntäjoukosta kuormanleikkauksen osalta.

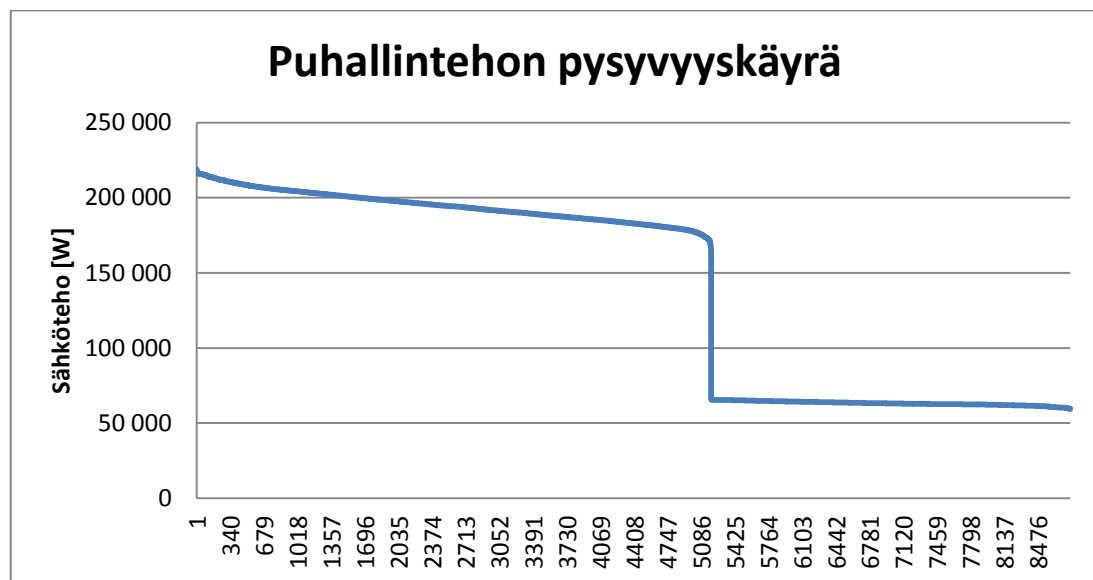


Kuva 5.3 Kauppakeskuksen kokonaissähkötehon pysyvyyskäyrä energialaskentamallista.

Kauppakeskus REDI:ssä on tarkasteltu kysyntäjoustoos osallistuvia kuormia tarkemmin ilmanvaihdon ja valaistuksen osalta. Rakennuksesta on valittu alueet, joissa sähkökuormaa on mahdollista säätää. Ajankohdaksi on valittu yhden kesäpäivän ja yhden talvipäivän huipputilanteet, jolloin kauppakeskuksessa on päivän aikana suuri henkilömäärä ja korkea sähkön-, lämmityksen- tai jäähdytyksen tarve. Kesäpäivä sijoittuu elokuuhun ja talvipäivä helmikuuhun. Tässä työssä esimerkiksi valitussa kysyntäjoustopmallissa tarkastellaan kuormanleikkausta ja -lisäystä säätämällä taajuusohjattuja ilmanvaihdon puhaltimia. Kuormaa ei siirretä toiseen ajanhetkeen. Valaistuksen säätö tapahtuu leikkaamalla osa valaistuskormasta pois. Tämä on kauppakeskuksen valaistuksenohjausjärjestelmästä, valaistuksen ryhmittelystä ja valaisintyyppistä riippuen joko päällä/pois – säätöä tai portaittaista valaistustehon säätöä.

5.3.1 Ilmanvaihdon sähkötehon leikkaus

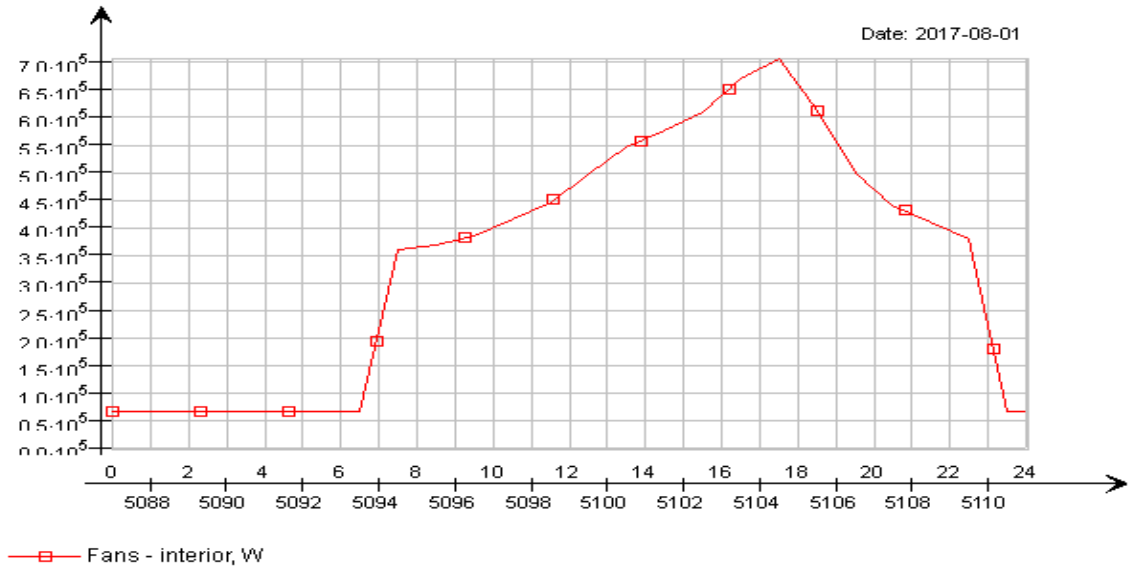
Tarkasteltavien alueiden ilmanvaihdon puhallinsähkötehon pysyvyyskäyrä vuoden mittaisella jaksolla on esitetty kuvassa 5.3. Noin 5 000 tuntia vuodesta sähköteho on yli 160 kW ja yli 200 kW:n maksimikuormitusta noin 1 500 tuntia vuodessa.



Kuva 5.4 Puhallintehon pysyvyyskäyrä vuoden mittaisella jaksolla.

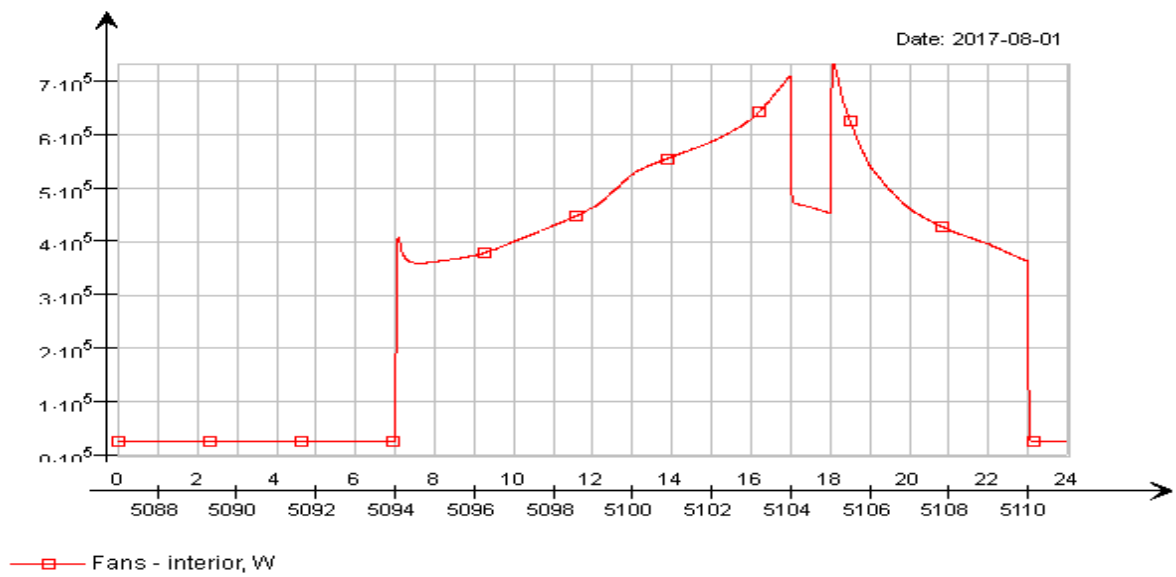
Kuvassa 5.4 on esitetty koko rakennuksen ilmanvaihdon energialaskentamallin mukainen sähkötehortarve yhtenä kesäpäivänä. Kuvasta on nähtävissä kyseisen päivän huippukuormatilanne, joka ajoittuu kello 16:00–18:00 välille. Huipputehortarve kyseisenä

päivänä on 700 kW. Tällöin kauppakeskuksessa on henkilöprofiilin mukaisesti eniten kävijöitä arkipäivänä.



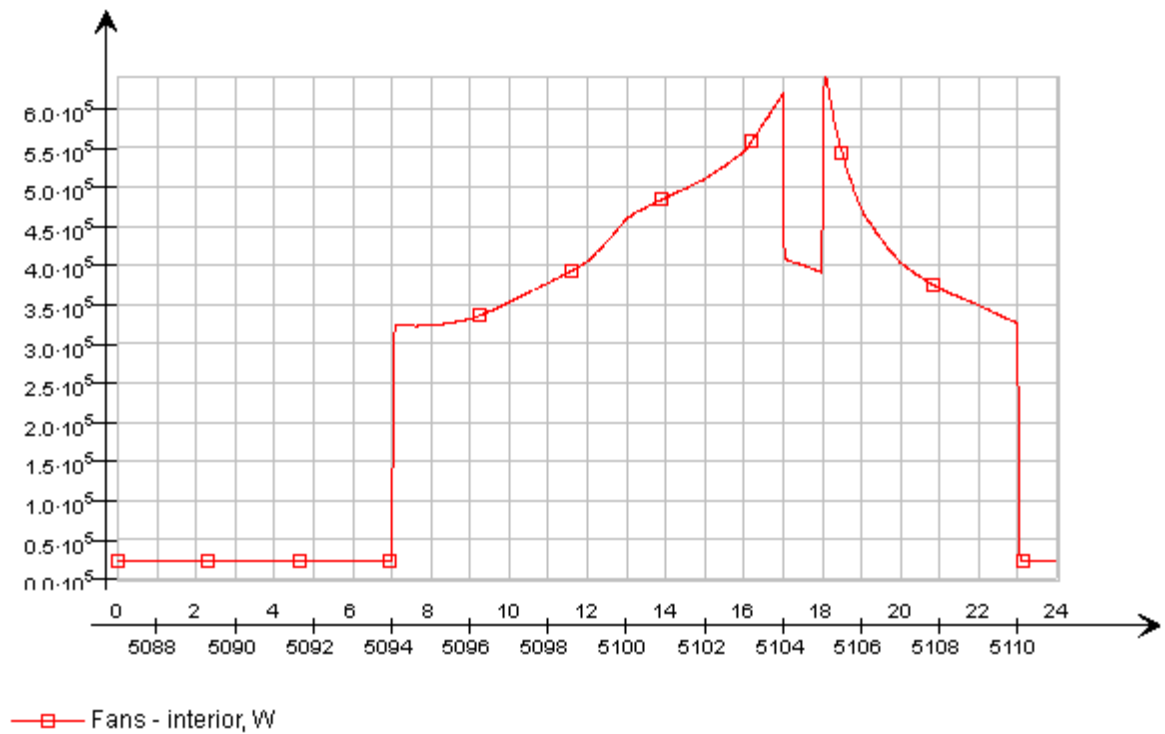
Kuva 5.5 Koko rakennuksen puhallinsähkötehon kuormituskäyrä kesäpäivänä.

Kysyntäjoustotilanteessa valittujen alueiden puhallintehoja leikataan tunnin ajaksi kuvan 5.5 havainnollistamalla ajanhetkellä, joka ajoittuu kiinteistön huippukuormituksen aikaan. Ilmanvaihdon puhaltimien tehonleikkaus on mahdollista tehdä suurelle alueelle tai osalle puhaltimista huomioiden ilmanvaihtokoneiden vaikutusalueet. Tässä esimerkissä kaikki tarkasteltavien alueiden puhaltimet pysäytettäisiin tunnin ajaksi, jolloin sähkötehoa saadaan leikattua yhteensä noin 200 kW. Tämä leikkaus mahdollistaisi kuorman suuruuden puolesta taajuusohjattuun käyttöreserviin osallistumisen, jonka osallistumisraja on 0,1 MW (Fingrid 2016b). Tätä kuormaa ei siirrettäisi toiseen ajankohtaan vaan se leikattaisiin pois ja kuormitus palautuisi tunnin jälkeen normaalitilaan. Kuvasta 5.5 on nähtävissä pieni piikki kuormanleikkauksen ajanjakson jälkeen. Tämä piikki johtuu ilmanvaihdon hetkellisestä lisäämisestä, jotta sisäilmasto-olosuhteet saavuttavat normaalitilan. Piikiltä vältytään, mikäli ilmanvaihto säädetään takaisin päälle portaittain.



Kuva 5.6 Koko rakennuksen puhallinsähkötehon kuormituskäyrä kysyntäjoustotilanteessa kesäpäivänä.

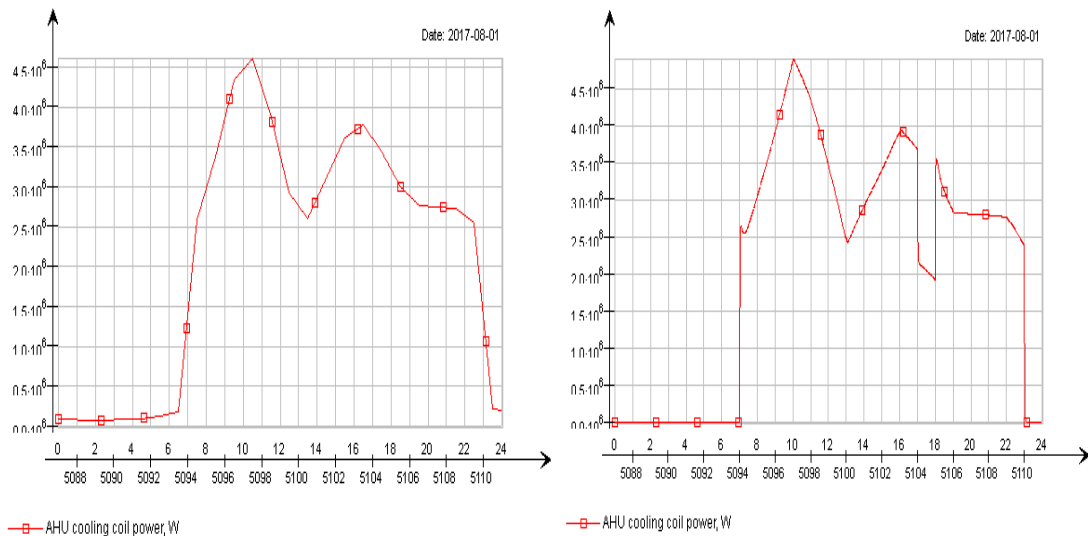
Talvitalanteessa koko rakennuksen ilmanvaihdon puhallinsähköteho on pienempi kuin kesäpäivänä. Talvipäivänä 200 kW puhallinsähkötehon leikkausta havainnollistaa kuva 5.6.



Kuva 5.7 Koko rakennuksen puhallinsähkötehon kuormituskäyrä kysyntäjoustotilanteessa talvipäivänä.

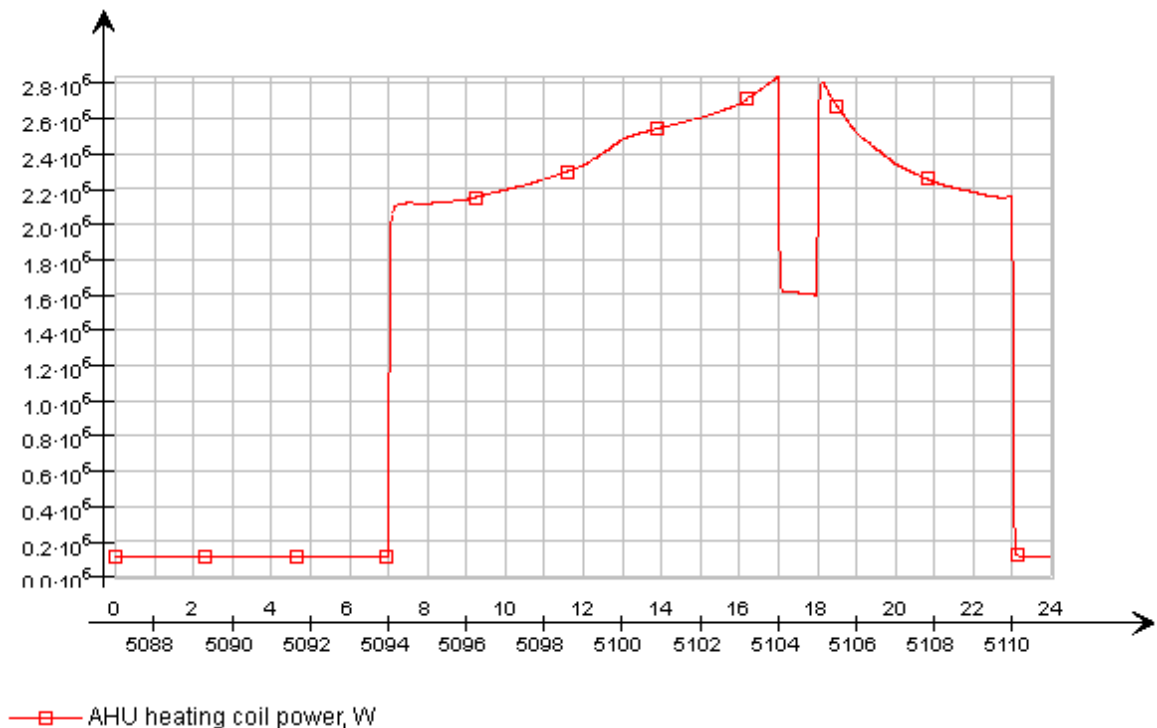
5.3.2 Vaikutus jäähdytys- ja lämmitystehon tarpeeseen

Ilmanvaihdon sähkötehon jousto vaikuttaa myös ilmanvaihdon jäähdytys- ja lämmitystehon tarpeeseen. Esimerkkinä olevien alueiden jäähdytystehontarvetta kesäpäivänä on havainnollistettu kuvassa 5.7 vasemmalla ja puhallintehojen leikkauksesta syntyvä vaikutus jäähdytystehontarpeeseen on nähtävissä kuvassa oikealla.



Kuva 5.8 Puhallintehon leikkauksen vaikutus koko rakennuksen ilmanvaihdon jäähdytystehontarpeeseen kesäpäivänä. Vasemmalla on ilmanvaihdon jäähdytystehontarve ilman joustoa. Oikealla on tunnin mittainen joustotoimenpide klo 17:00-18:00.

Talvitilanteessa puhaltimien kuormanleikkaustoimenpide vaikuttaa lämmitystehontarpeeseen, joka katetaan kaukolämmityksellä. 200 kW tunnin mittainen puhallinsähkötehon leikkaus vaikuttaa kuvan 5.8 mukaisesti kaukolämpötehoon. Kyseisenä talvipäivänä on vuoden 2012 Helsingin säädataan perustuen energialaskentamallin ulkolämpötila $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Kuva 5.9 Koko rakennuksen ilmanvaihdon lämmitystehon kuormituskäyrä kysyntäjoustotilanteessa talvipäivänä.

5.3.3 Ilmanvaihdon sähkötehon lisäys

Mikäli rakennuksella halutaan osallistua taajuusohjattuun käyttöreserviin, tulisi rakennuksella olla ylös- sekä alassäätöön soveltuvaa kuormaa vähintään 0,1 MW (Fingrid.2016b). Käytännössä ilmanvaihdon puhallintehon kasvattamista rajaa puhaltimien mitoitus-teho. Normaalisissa käyttötilanteissa puhallinteho voi olla 70–80 % maksimitehosta. Maksimitehon perusteella voidaan arvioida, paljonko kuormituksen perustasosta on mahdollista joustaa ylöspäin. Rakennuksen perustasoksi voidaan olettaa energialaskentamallin mukainen kulutus.

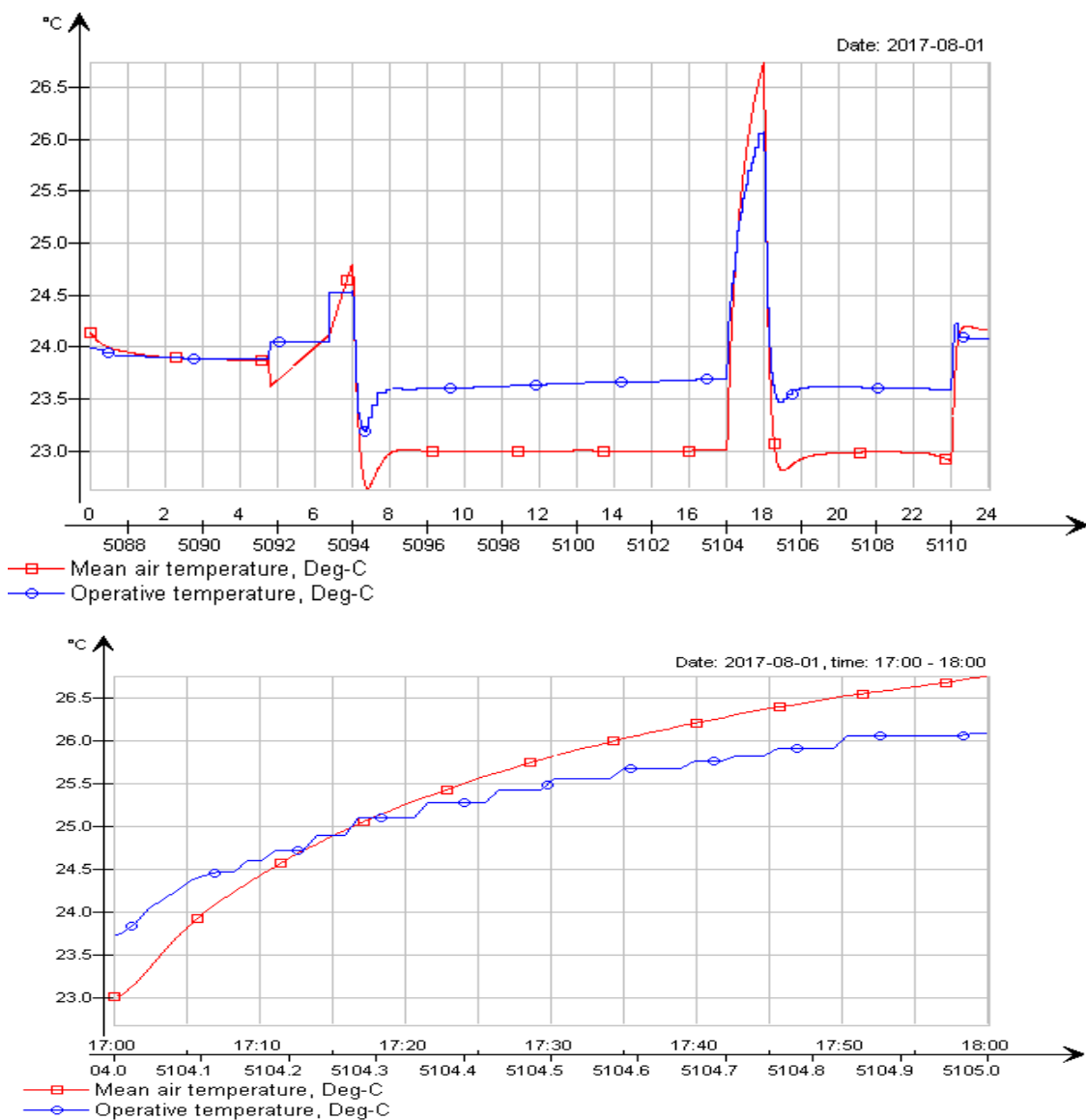
Kauppakeskus REDI:n tapauksessa ylöspäin lisättävää kuormaa voi löytyä kauppakeskuksen ilmanvaihdosta ja kuorman lisäystä voidaan hakea eri alueelta kuin kuorman leikkausta. Näin maksimoidaan mahdollinen kuormanohjaukseen soveltuva sähköteho taajuusohjattuun käyttöreserviin.

Ilmanvaihdon sähköntehon lisäykseen soveltuva potentiaali arvioidaan laskennallisesti. Olettaen, että puhaltimien ominaissähköteho SFP on $2 \text{ kW/m}^3, \text{s}$ voidaan

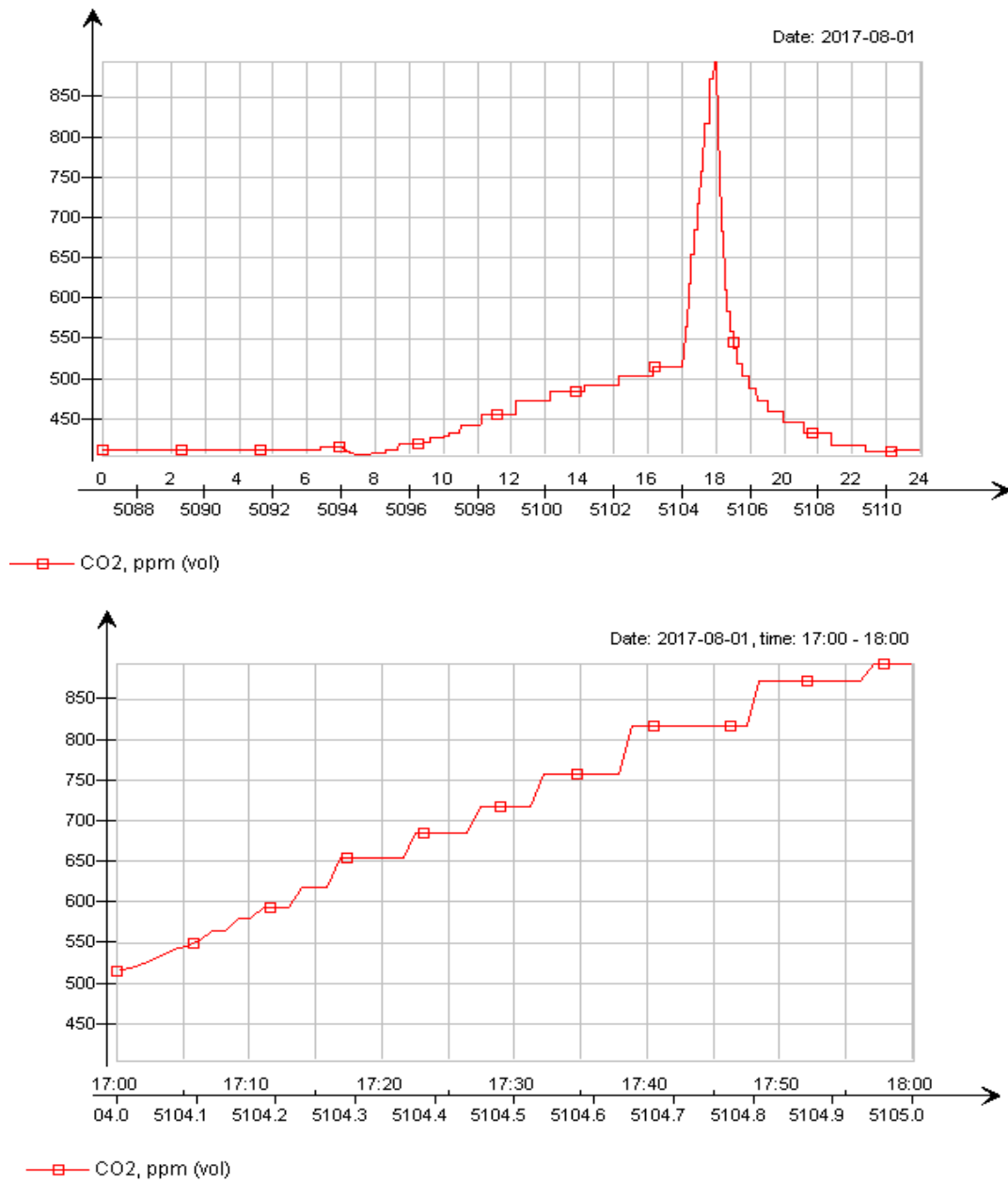
energiälaskentamallin mukaisen tuloilmamäärän avulla karkeasti arvioida puhaltimien ottamaa maksisähkötehoa ja saada laskennallisesti yli 200 kW ylössäädettävää kuormaa.

5.3.4 Vaikutus sisäilmasto-olosuhteisiin

Ilmanvaihdon puhallintehon leikkauksella on vaikutusta sisäilmasto-olosuhteisiin ja nämä tulee huomioida kysyntäjoustossa. Tätä vaikutusta on havainnollistettu esimerkillä ja tarkasteltu tilannetta, jossa tarkasteltavan alueen puhaltimet on pysäytetty tunniksi kyseisenä kesäpäivänä. Kuvassa 5.9 on nähtävissä vaikutus tilan lämpötiloihin ja kuvassa 5.10 vaikutus CO₂ tasoihin.

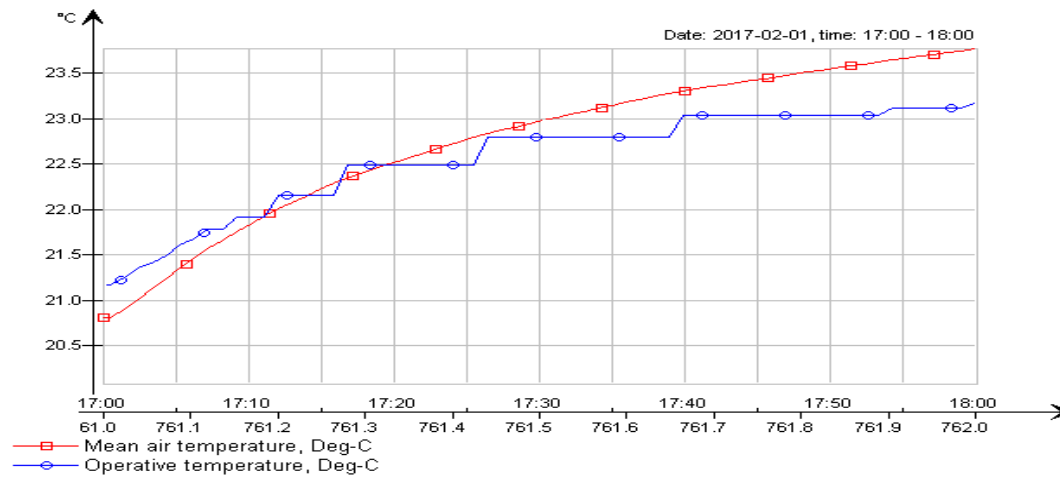
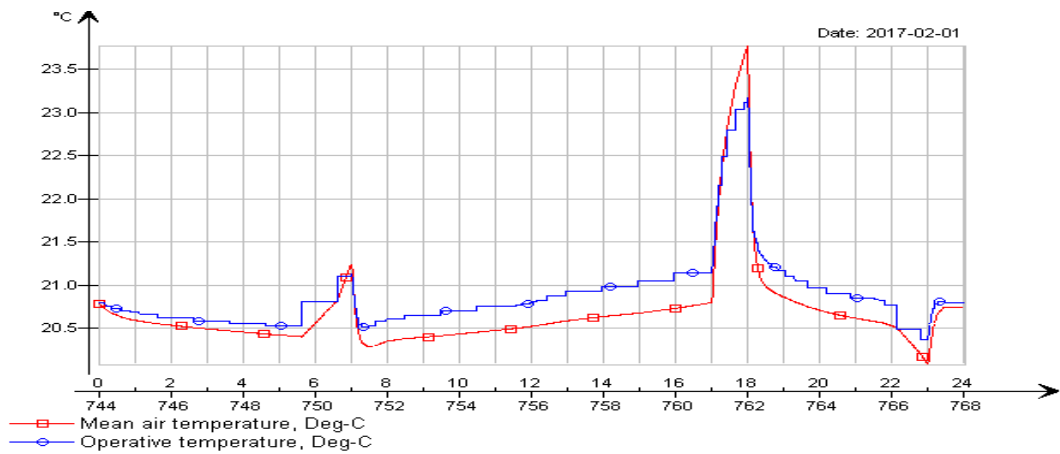


Kuva 5.10 Kuormanleikkauksen vaikutus lämpötilatasoihin. Ylempi kuva on normaali käyttötilanne ja alempi kuva esittää tunnin mittaista kuormanleikkausta.



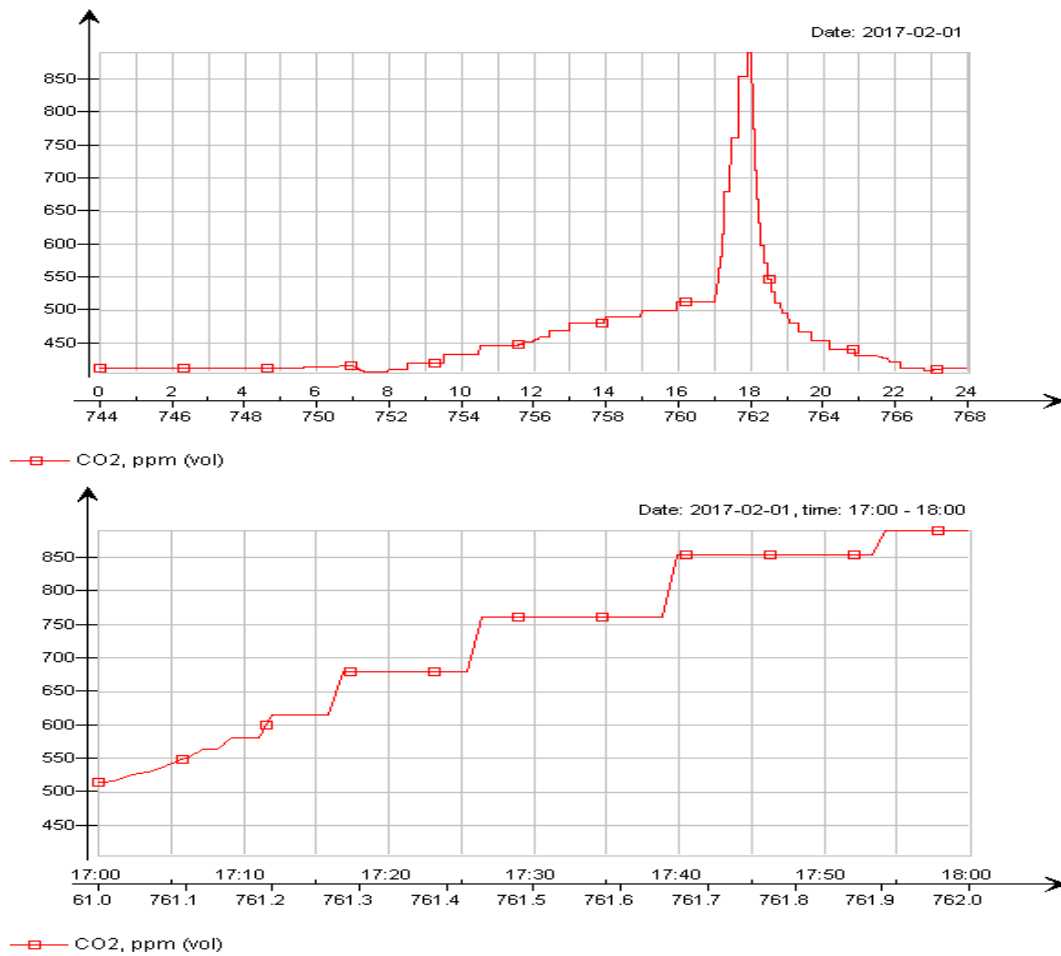
Kuva 5.11 Kuormanleikkauksen vaikutus CO2 tasoihin. Ylempi kuva on normaali käyttötilanne ja alempi kuva esittää tunnin mittaista kuormanleikkausta.

Vastaavat tarkastelut on tehty talvipäivän tilanteessa, jota havainnollistaa kuva 5.11. Merkittävää tässä tilanteessa on huomata, että operatiivisen lämpötilan talvitilanteen enimmäisarvo + 23 °C ylitetään noin 40 minuutin kohdalla.



Kuva 5.12 Talvipäivänä tehtävän kysyntäjoustotoimenpiteen vaikutukset alueen sisäilman lämpötilaan. Ylempi kuva on normaali käyttötilanne ja alempi kuva esittää tunnin mittaista kuormanleikkausta.

Talvitilanteen CO₂ taso on esitetty kuvassa 5.12. Kysyntäjoustotoimenpiteen aikana talvitilanteen S2 mukainen 900 ppm – taso alittuu, mutta S1 taso ylittyy jo 25 minuutin kohdalla.



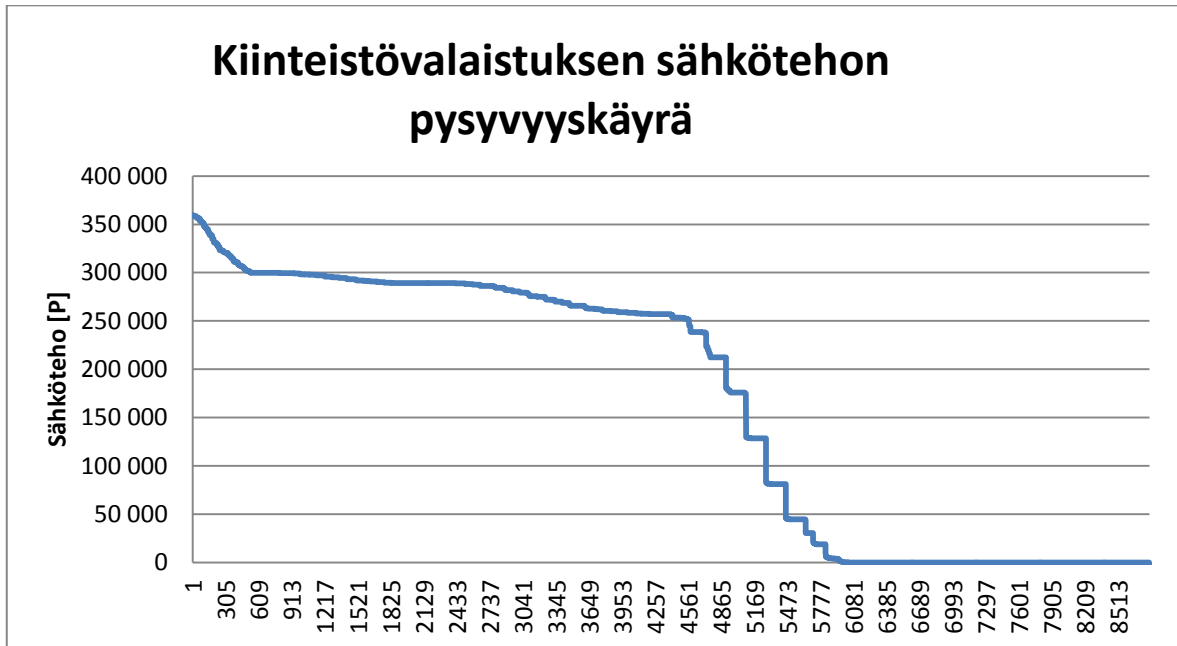
Kuva 5.13 Talvitilanteen CO2 taso kysyntäjoustotoimenpiteen aikana. Ylempi kuva on normaali käyttötilanne ja alempi kuva esittää tunnin mittaista kuormanleikkausta.

Tämän simuloitun tilanteen perusteella kyseisen tilan lämpötilatasot ja CO2 pitoisuudet muuttuvat tunnin mittaisessa puhallinsähkötehon kuormanleikkauksessa. CO2 pitoisuudet eivät kuitenkaan ylittäisi sisäilmastoluokituksen S2 mukaisia rajoja kesä- tai talvitilanteessa. Sen sijaan lämpötilarajat ylittyvät talvitilanteessa noin 40 minuutin kuormanleikkauksen jälkeen. Yksittäisen kuormanleikkauksen kesto olisi todellisuudessa tätä aikarajaa huomattavasti lyhyempi, jolloin lämpötilannousun ongelmaa ei pääsisi syntymään. Lisäksi kiinteistöautomaatiojärjestelmällä estetään se, etteivät sisäilmasto-olosuhteet kuormanleikkauksessa pääse ylittymään sovitusta rajoista.

5.3.5 Valaistuksen tehonleikkaus

Valaistustehon portaittainen 30 % tehonlasku ei vaikuttaisi tutkimusten mukaan ihmiseen (Motegi et. al 2007). Valaistus myös tuottaa tilaan lämpötehoa, jolloin valaistuksen

säädöllä on vaikutusta jäähdytyksen ja lämmityksen tarpeeseen. Valaistustehon joustopotentialia voidaan arvioida laskennallisesti leikkaamalla 30 % energialaskentamallin mukaisesta kiinteistön valaistustehontarpeesta, kuva 5.13. Vuokralaistilojen valaistustasoa ei oteta mukaan tähän tarkasteluun.



Kuva 5.14 Valaistuksen pysyvyyskäyrä esimerkkialueella.

Valaistuksen sähkötehontarve on yli 250 kW noin 4 300 tuntia vuodessa. Tällä aikavälillä maksimissaan noin 75–100 kW kuormanleikkaus on mahdollista valaistustehoa säätämällä.

5.4 Varavoiman ja akustojen hyödyntäminen kysyntäjoustossa

Kiinteistön kysyntäjoustopotentialia voi lisätä varavoiman ja sähköakuston hyödyntäminen. REDI:n kauppakeskuksen tapauksessa esimerkiksi noin 1 MW:n dieselgeneraattorin tulee täyttää Fingridin reservimarkkinoiden vaatimukset aktivoitumisajasta. Tarjottavan minimitehon mukaan 1 MW:n varavoimakone soveltuisi taajuusohjattuun käyttöreserviin tai taajuusohjattuun häiriöreserviin. Muiden ominaisuuksien puolesta varavoimakone ei kuitenkaan sovellu reservikäyttöön ja tällä hetkellä varavoimakoneita ei sellaisenaan osallistu taajuusohjattuihin reserveihin, ellei järjestelmään ole liitetty UPS-järjestelmää (Fingrid 2015). UPS-järjestelmän lisäksi vaihtoehtona voisi olla sähköakku, joka toimii puskurina käynnistystilanteessa.

Sähköakkua voidaan myös ladata halvemman sähkönhinnan tunneilla sekä sähkön omatuotannolla ja hyödyntää joustavana kuormana kysyntäjoustotoimenpiteiden tarpeisiin.

Varavoimakoneen käyttö kiinteistössä perustuu häiriötilanteisiin, jolloin varavoimakone ei ole normaalitilanteessa käytössä jatkuvasti. Reservimarkkinoille osallistuva kohde aktivoituu reservilajista riippuen jatkuvasti, useita kertoja vuorokaudessa tai mahdollisesti vain muutaman kerran vuodessa. Aktivoinnit kestävät tyypillisesti sekunneista minuutteihin. Reservikohteen käynnistymisen on aina tapahduttava sopimuksessa olevan aktivoitumiskriteerin mukaisesti, joka on reservilajista riippuen muutamasta sekunnista 15 minuuttiin. Varavoimakoneet voisivat mahdollisesti olla soveltuvia säätösähkömarkkinoille, joilla säädön aktivoitumisaika on 15 minuuttia. Säätösähkömarkkinoille osallistuminen vaatii aggregointitoimintaa, sillä minimitarjous markkinoille on yleisesti 10 MW. Minimikoko on kuitenkin nykyään 5 MW, mikäli käytössä on elektroninen aktivointi.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Rakennusten sähkön kysyntäjousto on Suomessa vielä melko vähän tunnettu ja hyödynnetty aihe, mutta kiinnostus sitä kohtaan on huomattavassa kasvussa. Suomessa on pilotoitu erilaisia rakennusten kysyntäjoustoratkaisuja eri tahojen osalta. On odotettavissa, että pilottihankkeiden kautta löydetään Suomen sähkömarkkinoille soveltuvia menetelmiä jo mahdollisesti lähitulevaisuudessa.

Suomessa on kuitenkin muihin maihin verrattuna kehittyneet kysyntäjoustopaikat, joita ei kuitenkaan vielä aktiivisesti hyödynnetä kiinteistötasolla. Suomessa ei tarjota kuluttajille aktiivisesti mahdollisuuksia osallistua kysyntäjoustopaikaan. Paikat ovat olemassa etenkin hintaohjaukseen perustuvalla kysyntäjoustopaikaan ja vaikka teknologiaa on olemassa, sen täysimääräinen hyödyntäminen ei ole vielä löytänyt suurta asiakaskuntaa. Kannustinpohjaista eli käytännössä erilaista reservimarkkinoille kohdennettua kysyntäjoustopaikaan on kuitenkin vähän käytössä. Tämä vaatii niin paikoiden kehittämistä kuin yhteistyön kehittämistä myös rakennuttaja- ja suunnittelupuolelta. Lisäksi tiedon välittäminen on nähtävästi olennaisessa osassa, sillä usein kuluttaja ei tiedä mahdollisuuksista osallistua kysyntäjoustopaikaan.

Toisaalta Suomen sähkömarkkinoilta puuttuvat vielä aggregaattorit, jotka mahdollistavat pienempien kysyntäjoustopaikaan osallistumisen. Aggregaattorit ovat käytännössä välttämätön osapuoli jatkossa kiinteistöpaikaan kysyntäjoustopaikaan osallistumisessa, sillä usein jo valmiiksi energiatehokkaat rakennukset eivät voi tarjota nykyisten paikoiden vaatimia tehokapasiteetteja yksistään. Tämä tilanne on kuitenkin kehittymässä, sillä tällä hetkellä aggregointia pilotoidaan Suomessa ja kiinnostus sitä kohtaan on nähtävissä kantaverkkoyhtiön puolelta.

Haasteita kysyntäjoustopaikaan laajamittaiselle rakennuskohtaiselle hyödyntämiselle tuo myös sähkölaki ja sähkömarkkinoiden toimintamallit sähkötoimitussopimusten osalta. Useita asiakkaita käsittävässä kiinteistössä, kuten kerrostalossa tai kauppakeskuksessa, kysyntäjoustopaikaan hyödyntäminen koko kiinteistössä vaatii sähkösopimuksien yhdenmukaistamista kiinteistön asiakkaiden kesken. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kiinteistön jokaisen erillisen asiakkaan, kuten asukkaan tai liiketilan omistajan, tulisi solmia sähkösopimus saman tasevastaavan kanssa.

Nykyiset rakentamismääräykset eivät ohjaa riittävästi älykkäisiin järjestelmiin ja tämä vaikuttaa tulevaisuudessa rakennusten mahdollisuuksiin osallistua kysyntäjousto. Vaikka rakennuksen tarpeenmukainen ohjaus voidaan huomioida tehokkuustekijänä niin ohjauksen ja säädön kattavuuteen tai logiikoihin ei suoraan oteta kantaa nyt olemassa olevissa määräyksissä.

Rakennusten energiatehokkuutta kuvaava E-luku ei ota kantaa siihen miten rakennus pystyy toimimaan ja hyödyntämään eri ohjausparametreja muuttuvissa tilanteissa. Muuttuvia tilanteita ovat rakennuksen käytön tai sään vaikutukset rakennuksen toimintavaatimuksiin. E-luku ei näin ollen ota kantaa siihen, miten rakennus toimisi kysyntäjoustopilanteissa. Kysyntäjoustopilanne vaatii rakennukselta kykyä mukautua muuttuviin tilanteisiin.

Energiatodistus ei kuvaa rakennuksen älykkyyttä tällä hetkellä, mikä ei osaltaan ohjaa älykkäiden rakennusten mahdollisuuksia markkinoilla. Kuitenkin tilanteeseen ollaan heräämässä ja tästä on esimerkkinä EPBD liittyvä muutosehdotus, joka koskee älyrakennuksiin liittyvää indikaattoria. Kyseinen muutosehdotus lisää kysyntäjousto osallistuvien rakennusten kehitysnäkymiä Suomessa. Jotta rakennus voi osallistua kysyntäjousto on sillä oltava moderni kiinteistöautomaatiojärjestelmä, jolla voidaan tuottaa hyvät olosuhteet kysyntäjoustopitoimien aikana. Standardit mahdollistavat jo automaatiojärjestelmien luokittelun älykkäisiin järjestelmiin ja niiden kautta voidaan kehittää vaatimuksia kysyntäjousto soveltuville järjestelmille. Rakennuksen energiatehokkuutta ei tulisi kuitenkaan nähdä pelkästään vuositason tehokkuutena vaan hetkellisenä tehokkuutena, johon liittyy käyttäjän lisäksi myös koko energijärjestelmä.

Case tarkastelun perusteella todettiin, että nyt suunnitteluratkaisujen arviointiin käytettäviä energiamallinnuksia voidaan hyödyntää kysyntäjoustopilanteiden reunaehtojen määrittelyyn. Kiinteistön talotekniset järjestelmät antavat merkittävän joustopotentiaalin, jota tulisi arvioida samaan aikaan kun muutenkin arvioidaan energiatehokkuutta. Kaukojärjestelmään kytketyssä rakennuksessa suurimman potentiaalin antaa ilmanvaihto. Ilmanvaihdon puhaltimien käyttö kuormanleikkauksessa ei vaikuta radikaalisti sisäilmasto-olosuhteisiin suhteellisen lyhyen kysyntäjoustopilanteiden aikana. Merkittävää on huomata, että kiinteistöistä löytyy myös ylössäädettyä joustopotentiaalia reservimarkkinoiden tarpeeseen. Tämän lisäksi taajuusohjattuun reserviin osallistuva kiinteistö voi saada lisäpotentiaalia valaistuksen ohjauksesta. Lisäpotentiaalia on odotettavissa myös kohteissa

joissa hyödynnetään lämpöpumppuja tai vedenjäähdytyskojeita. Älykkäissä ja optimoidussa järjestelmässä voi myös olla mukana varavoimakone ja sähkö- ja/tai lämpövarasto, jotka luovat uusia kiinnostavia mahdollisuuksia.

Kuluttajan näkökulmasta motivaattorina on taloudellinen hyöty. Tässä työssä ei esitetty kysyntäjoustoos osallistuvan järjestelmän kannattavuuslaskelmia. Kysyntäjoustoos voidaan saada taloudellista etua sähkön hinnan mukaan tapahtuvalla joustolla, mutta myös suoralla kuormanohjauksella. Suomessa kysyntäjoustoos osallistuvan kiinteistön voi olla mahdollista teknisesti osallistua Fingridin taajuusohjattuihin reserveihin. Nämä markkinat ovat kuitenkin edelleen kehittymässä. Arvioiden mukaan sen tuomat tuotot voivat olla suuremmat kuin esimerkiksi kiinteistökohtaisella aurinkosähköllä, sillä kysyntäjoustoos osallistuvan järjestelmän investoinnit voivat olla edullisemmat. Investointikustannuksiin vaikuttaa etenkin valitun älykkyystason eli muun muassa automaatiojärjestelmän tuomat mahdollisuudet.

LÄHDELUETTELO

Andelin Mia. 2017. Käytönajan havaintoja ja oppeja älytalosta. As. Oy Espoon Adjutantista. Skansa Oy. Vihreä Foorumi – esitysmateriaali. [viitattu 01.04.2017] Saatavissa: <http://figbc.fi/wp-content/uploads/2017/03/Vihre%C3%A4-Foorumi-160317-Adjutantista-t%C3%A4h%C3%A4n-p%C3%A4iv%C3%A4%C3%A4n.pdf>

Belonogova N. et al. 2010. Effects of demand response on the distribution company business. Nordic Conference on Electricity Distribution System Management and Development Aalborg, Denmark, 6-7 September 2010. 17 s

Breyer C. et. al. 2015. Vision and initial feasibility analysis of a recarbonised Finnish energy system. Tutkimusraportti. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [viitattu 14.3.2017] Saatavissa: <http://www.lut.fi/documents/10633/70751/LUT-Vision-and-initial-feasibility-of-a-recarbonised-Finnish-energy-system-for-2050.pdf>

Gripp K. 2013. Pienasiakkaan kysynnän jouston ja oman tuotannon vaikutukset kuormitusmalleihin. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 2013. Saatavissa: <http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21665/Grip.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Grönberg Iiro. 2014. Passiivisesta sähkönkuluttajasta aktiiviseksi energiakansalaiseksi? - Aurinkopaneelien yhteistilaus ja -rakentaminen Etelä-Karjalassa. Tutkimusraportti 21. Etelä-Karjala-instituutti. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta 2014. ISBN 978-952-265-567-7

EC 2017. European Commission – Energy. Buildings. [viitattu 05.04.2017] Saatavissa: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>

Energiavirasto 2016a. Energiavirasto sähkö- ja maakaasumarkkinoilla. [viitattu 14.10.2016] Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/energiavirasto-sahko-ja-maakaasumarkkinoilla>

Energiavirasto 2016b. Sähkön hinta. [viitattu 14.10.2016] Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/sahkon-hinta>

Energiateollisuus ry (ET) 2007. Sähkön kysyntäjousto suurten loppuasiakasryhmien kannalta. [Viitattu 26.04.2016]. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/kysyntajoustoraportti_et.pdf

Energiateollisuus 2017a. Säättövoima – säädettävää sähköntuotantoa. [viitattu 15.1.2017] Saatavissa: http://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatovoima

Energiateollisuus 2017b. Sähköntuotanto energialähteittäin. [viitattu 15.1.2017] Saatavissa: http://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto

EPRI. 2017. Electrical Power Research Institute. Smart Grid Resource Center. [viitattu: 4.2.2017] Saatavissa: http://www.smartgrid.epri.com/App_Themes/Default/Images/SmartGrid-graphic.jpg

Fingrid. 2016a. Taajuuden ylläpito sähköjärjestelmässä. [Viitattu 15.06.2016] http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/kantaverkonABC/Sivut/ABCtaajuuden_yllapito.aspx

Fingrid. 2016b. Kysyntäjouston markkinapaikat. [Viitattu 17.08.2016] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/Kysyntajousto/Markkinapaikat/Sivut/default.aspx>

Fingrid 2016c. Kuinka osallistua reservimarkkinoille. Tarvittavat sopimukset reservituotteille. [Viitattu 17.08.2016] Saatavissa: http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/Tarvittavat_sopimukset/Sivut/default.aspx

Fingrid 2015. Varavoimageneraattorit saivat lisätöitä kysyntäjoudesta. [Viitattu 13.01.2017] Saatavissa: <http://view.24mags.com/mobilev/5799fb47bab816ccfed4f4c098d56be1#/page=14>

Fingrid 2016d. Reservituotteet. [viitattu 17.03.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/markkinaliitteet/Reservit/Reservituotteet.pdf>

Fingrid 2016e. Reservilajit. [viitattu 17.03.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservilajit/Sivut/default.aspx>

Fingrid 2016f. Kysyntäjouston markkinapaikat. [viitattu 04.02.107] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/Kysyntajousto/Sivut/default.aspx>

Fingrid 2016g. Pienet varavoimakoneet – pilottihanke. [viitattu 04.02.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/markkinaliitteet/Kysynt%C3%A4jousto/Pienet%20varavoimakoneet.pdf>

Fingrid 2017a. Pohjoismainen voimajärjestelmän tila. Fingrid. [Viitattu 17.04.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/voimajarjestelman-tila/Sivut/Pohjoismainen-voimajarjestelman-tila.aspx>

Fingrid 2017b. Sähkön tuotanto ja kulutus. Fingrid. [Viitattu 17.04.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/kulutus-ja-tuotanto/Sivut/default.aspx>

Fingrid 2017c. Kulutuksen ja tuotannon tasapaino eli taajuuden ylläpito. [Viitattu 17.04.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimaj%C3%A4rjestelm%C3%A4nhallinta/kulutuksen%20ja%20tuotannon%20tasapainon%20yll%C3%A4pito/Sivut/default.aspx>

Fingrid 2017d. Säätosähkömarkkinat. [Viitattu 17.04.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/tasepalvelut/tasehallinta/saatosahkomarkkinat/Sivut/default.aspx>

Finlex 2017. Sähkömarkkinalaki 588/2013. [Viitattu 02.02.2017] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588>

Haakana M. 2016. Komission ehdotus rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (EPBD) muuttamiseksi. Ympäristöministeriö. [viitattu 05.04.2017] Saatavissa: [http://www.ymparisto.fi/FI/Ajankohtaista/Uutiset/Rakennusten_energiatehokkuusdirektiivi_m\(41395\)](http://www.ymparisto.fi/FI/Ajankohtaista/Uutiset/Rakennusten_energiatehokkuusdirektiivi_m(41395))

Helsingin Ympäristötilasto. 2017. Tilastot – Energia. [viitattu 02.04.2017] Saatavissa: <http://www.helsinginymparistotilasto.fi/>

IDA-ICE. 2017. [viitattu 10.04.2017] Saatavissa: <http://www.equa.se/fi/ida-ice>

Institute BE 2017. Demand Response in Commercial Building. Institute for Building Efficiency. Johnson Controls. [viitattu 05.04.2017] Saatavissa: http://www.buildingefficiencyinitiative.org/sites/default/files/legacy/InstituteBE/media/Library/Resources/Smart-Grid_Smart-Building/CommercialBuildingsDR.pdf

Järventausta P. et al. 2015. Kysynnän jousto – Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli). Loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan laitos. Tampere 2015. ISBN 978-952-15-3485-0

Kiwi Power. 2017. Kiwi Power Solutions – Demand Response. [viitattu 05.04.2017]
Saatavissa: <http://www.kiwipowered.com/solutions>

Linna, J., Nuutinen, J. 2012. Energiaopas pienille ja keskisuurille yrityksille. Elinkeinoelämän keskusliitto. Saatavissa: <https://ek.fi/wp-content/uploads/energiaopas.pdf>

SEDC 2015. Mapping Demand Response in Europe Today. 2015. Smart Energy Demand Coalition, SEDC. Brysseli. [viitattu 04.02.2017] Saatavissa: <http://www.smartenergydemand.eu/wp-content/uploads/2015/09/Mapping-Demand-Response-in-Europe-Today-2015.pdf>

Mohagheghi S. & Raji N. 2014. "Managing Industrial Energy Intelligently: Demand Response Scheme". *IEEE Industry Applications Magazine*. Julkaisu 20, nro. 2. Sivut 53-62, Maaliskuu-Helmikuu 2014. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6689333/>

Motegi et al. 2007. Introduction to Commercial Building Control Strategies and Techniques for Demand Response. Lawrence Berkeley National Laboratory. DRRC Demand Response Research Center. California. [Viitattu 14.11.2016] Saatavissa: <http://gaia.lbl.gov/btech/papers/59975.pdf>

Motiva 2016a. Energia- ja ilmastostategia. [viitattu 18.10.2016] Saatavissa: <http://www.motiva.fi/taustatieto/ohjauskeinot/energia- ja ilmastostrategia>

Nord Pool 2016. Nord Pool power market. [Viitattu 15.7.2016] Saatavissa: <http://www.nordpoolspot.com>

Partanen J. et al. 2014. Sähkömarkkinat – Opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUT ENERGIA SÄHKÖTEKNIikka. Lappeenranta 2011. ISBN 951-764-819-9

Partanen J. 2016. Sähkön hinta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [viitattu 17.09.2016] Saatavissa: <http://www.slideshare.net/FinSolar/jarmo-partanen-lut-shkn-hinta-18022016>

Passi Pekka. 2015. Kaukolämmön kysyntäjouaston hyödyt, haitat ja potentiaali. Kaukolämpöpäivät 27.8.2015. Valor Partners Oy. [Verkkajulkaisu] [Viitattu 17.09.2016] Saatavissa: <http://docplayer.fi/7309194-Kaukolammon-kysyntajouaston-hyodyt-haitat-ja-potentiaali-kaukolampopaivat-27-8-2015-pekka-passi.html>

Paterakis N. et al. 2017. An overview of Demand Response: Key-elements and international experience. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Julk. 69. Marraskuu 2017. Sivut 871-891. [viitattu 01.04.2017] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116308966>

Päivinen R. 2012. Tuotantorakenteen muutos haaste sähköjärjestelmälle. Käyttövarmuuspäivä 3.12.2012. [viitattu 12.11.2016] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Seminaarit/K%C3%A4ytt%C3%B6varmuusp%C3%A4iv%C3%A4/2012/Tuotantorakenteen%20muutokset%20haaste.pdf>

RIL 287-2015. Käyttäjälähtöinen älyrakennus – suunnittelu, rakentaminen, käyttö ja ylläpito. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. ISBN 978-951-758-598-9

REDI 2017. REDI- hankkeen kuvas. [viitattu 16.04.2017] Saatavissa: <http://www.redi.fi/redi-hanke/>

Ritonummi et. al. 2008. Sähkön kysyntäjouaston edistäminen. Sähkön kysyntäjouaston roolia ja tavoitteita sähkömarkkinoilla selvittäneen työryhmän mietintö. TEM. Energia ja ympäristö 15/2008. Helsinki. Edita Publishing Oy. 101 sivua. ISBN 978-952-227-039-9

Sarvaranta S. 2010. Selvitys älykkäistä sähköverkoista ja niiden kehityksestä Euroopan unionissa ja Suomessa. Selvitystyö. Aalto Yliopisto. Energiategollisuus. Saatavissa: http://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/alykkaat_sahkoverkot_ja_niiden_kehitys_suomessa_ja_euroopassa.html

Savolainen, I et. al. 2008. Teknologiaopolut 2050: Teknologian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa, Taustaraportti kansallisen ilmasto- ja energiastrategian laatimista varten. VTT tiedotteita 2432. 222 s. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2008/T2432.pdf>

SRV 2017. Helsingin REDI, Majakka. [viitattu 16.04.2017] Saatavissa: <https://www.srv.fi/en/apartments/helsingin-redi>

TEM 2016. Sähkömarkkinat. [Viitattu 14.11.2016]. Saatavissa: <http://tem.fi/sahkomarkkinat>

TEM 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesti energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 4/2017. Helsinki. 117 s. ISBN: 978-952-327-189-0

Tilastokeskus 2016a. Energian hankinta ja kulutus. Tilastokeskuksen PX-Web-tietokannat. [viitattu 20.10.2016] Saatavissa: http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ene_ehk/?tablelist=true

Tilastokeskus 2017. Sähkön ja lämmön tuotanto 2015. Suomen virallinen tilasto, 2016. [viitattu 5.1.2017] Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/ehk/2015/04/ehk_2015_04_2016-03-23_tie_001_fi.html

Transparency Market Research. 2014. Smart Demand Response Market (By End User – Residential, Commercial, and Industrial) – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast 2014-2025. [viitattu 05.04.2017] Saatavissa: <http://www.transparencymarketresearch.com/smart-demand-response.html>

TUT. 2016. Päättäneitä tutkimushankkeita. Energia- ja elinkaariyhmä (EE). Tampereen teknillisen yliopiston tutkimusryhmä. [Viitattu 1.11.2016] Saatavissa: <http://www.tut.fi/ee/tutkimusp.html>

Valor Partners Oy. 2015. Kaukolämmön kysyntäjousto. Energiateollisuus. Viitattu: 10.10.2016. Saatavissa: <http://docplayer.fi/7895819-Kaukolammon-kysyntajousto.html>

Vaittinen O. 2010. Pienvoimantuotannon aggregointi virtuaaliseksi voimalaitokseksi. Diplomityö. Aalto-Yliopisto. Teknillinen korkeakoulu. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/3333>

Vuolle M. 2014. Rakennushankkeen energiatehokkuuden ohjaaminen energialaskennan avulla. [viitattu 04.04.2017] Saatavissa: <http://www.finvac.org/rakennustenenergiaseminaari/ohjelma>

YM. 2016. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Saatavissa <http://www.ym.fi/Rakentamismaarayskokoelma>

YM 2017. Kansainväliset ilmastoneuvottelut. Ympäristöministeriö. 2017. [viitattu 10.03.2017] Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kansainvaliset_ilmastoneuvottelut

LIITE I

Taulukko 0.1 Käyttäjälähtöisen älyrakennuksen toiminnalliset, tekniset, taloudelliset ja käyttäjälähtöiset edut/hyödyt eri luokissa

Luokka	Tekniset ominaisuudet	Käyttäjälähtöisyys	Esimerkki
Luokka D	Normaali osajärjestelmävarustetaso	Tämän päivän rakentamismääräysten mukaisesti toteutettu	Automaattiset säätö- ja ohjaustoiminnot, manuaalinen käyttö
Luokka C	Osajärjestelmät optimoivat ominaisuuksia; tietomallinnuksella kootaan kiinteistöstä sähköinen tietokanta sen suunnitteluun, rakentamiseen, ylläpitoon, korjauskesen ja huoltoon liittyvistä tekijöistä	Helppo kommunikointi osajärjestelmien kanssa,. Tiedostettu tai tiedostamaton vuorovaikutus, kommunikointi eli viestintä. Rakennuksen fyysiset ja tiedolliset ominaisuudet tukevat elinkaariedullisuutta ja muutonjoustoa	Tietomallinnettu LVIS järjestelmät reititetty Rakennusautomaatiojärjestelmä Mittausdata hyödyntämismahdollisuus, automaattiset säätö- ja ohjaustoiminnot
Luokka B	Yhteinen käyttöliittymä kaikille osajärjestelmille	Helppo kommunikointi rakennuksen kanssa. Rakennusautomaatiojärjestelmä tukee energiatehokkuutta, käyttäjäystävällisyyttä	Talotekniikan hallintajärjestelmä Rakennetekninen hallintajärjestelmä Yhteinen käyttöjärjestelmä
Luokka A	Yhteydet digitaaliseen ympäristöön internetin ja pilvipalveluiden tuella	Helppo kommunikointi ympäristön kanssa	Vuorovaikutteinen ja suojattu avoin yhteys ympärillä olveiin rakennuksiin, talotekniikan hallintajärjestelmä, rakennetekninen hallintajärjestelmä

Luokan A määrittely

EN-15232 standardissa A-luokan säätö ja ohjaustoiminnot koostuvat seuraavista taloteknisten järjestelmien toiminnoista:

Lämmitysjärjestelmä

Lämmönjaon yksilöllinen huonetason hallinta tarpeenmukaisella ohjauksella

Lämmönjakoverkoston pumppujen tarpeenmukainen ja muuttuvaohjaus

Lämmönjaon automaattinen ohjaus tarpeen arvioinnilla

Lämmöntuoton muuttuva kuorman ja tarpeenmukainen ohjaus

Lämmöntuoton ohjauskyky tuotannon hyötysuhteen mukaan

Lämmin käyttövesi

Lämminvesivaraajan automaattinen päälle/pois säätö ja monisensorinen ohjausjärjestelmä lämpötilan säädöllä

Lämpimän käyttöveden kierron tarpeen mukainen ohjaus

Jäähdytysjärjestelmä

Jäähdytyksen yksilöllinen huonetason hallinta viestinnällä ja tarpeenmukaisella ohjauksella

Jäähdytyksen jakoverkoston tarpeenmukainen ohjaus

Jäähdytysverkoston pumppujen muuttuva ohjaus

Jäähdytyksen tuoton automaattinen ohjaus tarpeen arvionnilla

Lämmityksen ja jäähdytyksen ohjausjärjestelmät on täysin kytketty toisiinsa

Jäähdytyksen tuotannon ohjaus hyötysuhteen mukaisesti

Ilmanvaihto

Ilmamäärän tarpeenmukainen ohjaus huonetasolla

Ilmamäärän tai painetason automaattinen ohjaus ilmanvaihtokoneen tasolla

Lämmöntalteenottojärjestelmä sulatuksen ja ylläampemisen ohjauksella

Vapaajäähdytys yötuuletuksella; ulkoilman entalpiatason mukaisesti

Tuloilman lämpötilan ohjaus kuorman mukaisella kompensoinnilla

Suora kosteudenhallinta; tuloilman tai huonetilan kosteutta pidetään vakiona

Valaistusjärjestelmä

Automaattinen läsnäolo-ohjaus

Automaattinen päivänvalo-ohjaus

Auringonsuojausjärjestelmä

Yhdistetty valaistuksen, auringonsuojauksen (esimerkiksi kaihdinjärjestelmä) ja LVI-järjestelmän ohjaus

Tekninen kodin ja rakennuksen hallintajärjestelmä

Tunnistaa viat kodin ja rakennuksen ohjausjärjestelmissä ja tarjoaa tukea vikojen diagnosointiin

Raportoi informaatiota liittyen energiankulutukseen, sisäolosuhteisiin ja parannusehdotuksiin