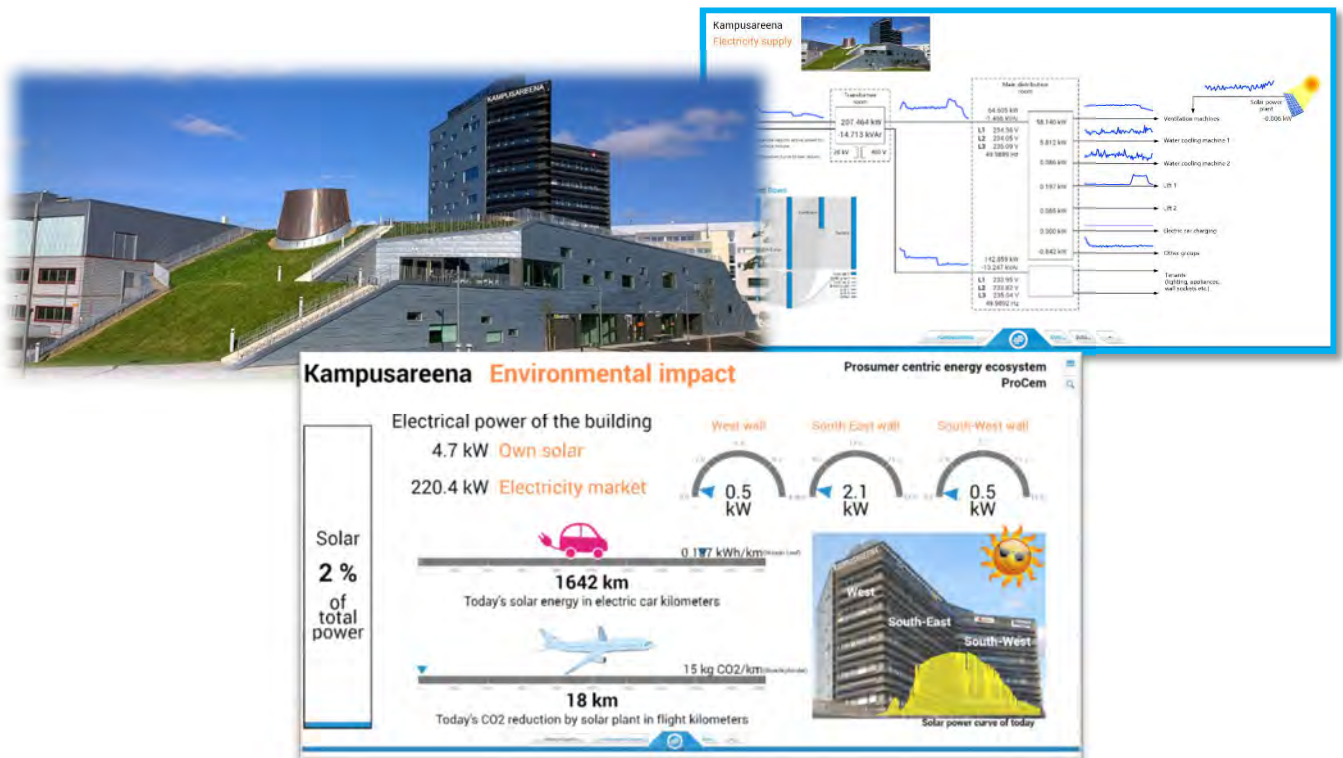




# Social Energy – Prosumer Centric Energy Ecosystem (ProCem)

## Loppuraportti



# ESIPUHE

Tämä raportti on yhteenveto Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) neljän eri laboratorion tutkimusryhmien yhteistyönä toteuttamasta tutkimusprojektikokonaisuudesta Social Energy – Prosumer Centric Energy Ecosystem (ProCem). Projekti alkoi 1.8.2016 ja päättyy syksyllä 2018.

Raportissa kuvataan eri osatehtävien toteutusta ja keskeisiä tuloksia, joita on kuvattu laajemmin ja yksityiskohtaisemmin projektin aikana tehdyissä kansainvälisissä julkaisuissa ja opinnäytetöissä sekä muissa erillisdokumenteissa.

Tutkimusprojektin päärahoittajana on toiminut Business Finland. Projektin rahoitukseen ja toteutusta ohjanneeseen johtoryhmän työskentelyyn ovat osallistuneet seuraavat yritykset ja järjestöt: ABB Oy, Empower IM Oy, Headpower Oy, KONE Oyj, Landis+Gyr Oy, MX Electrix Oy, Wapice Oy, Fingrid Oyj, Elenia Oy, Jyväskylän Energia Oy, Lempäälän Energia Oy, Loiste Sähköverkko Oy, Satapirkan Sähkö Oy, Tampereen Sähköverkko Oy, Suomen Yliopistokiinteistöt Oy, Sitra.

Tutkimusprojektin toteutuksesta ovat vastanneet yhteistyössä TTY:n neljän eri laboratorion tutkimusryhmä, joihin ovat kuuluneet seuraavat henkilöt:

- Sähköenergiatekniikka: prof. Pertti Järventausta, prof. Sami Repo, TkT Antti Rautiainen, TkT Pertti Pakonen, DI Juha Koskela, DI Lasse Peltonen, DI Kimmo Lummi, DI Antti Supponen, DI Jafary Payman, tekn. yo. Antti Hilden
- Tietotekniikka: prof. Kari Systä, TkT Teemu Laukkarinen, DI Otto Hylli, DI Nyyti Kinnunen, tekn. yo. Ville Heikkilä, tekn. yo Ulla-Talvikki Virta
- Systeemitekniikka: prof. Matti Vilkkö, TkT Tomas Björkqvist, TkT Timo Korpela, DI Pekka Itä-vuo
- Teollisuustalous: prof. Saku Mäkinen, DI Kirsi Kotilainen, DI Ulla Saari, DI Jussi Valta

# SISÄLLYSLUETTELO

## ESIPUHE

1	JOHDANTO .....	3
1.1	TAUSTA .....	3
1.2	TUTKIMUSPROJEKTIN TAVOITTEET JA TOTEUTUS.....	4
1.3	VERKKOAINEISTO JA JULKAISUT .....	5
2	PROSUMER JA ENERGIAHYTEISÖ OSANA ENERGIAJÄRJESTELMÄN JA -LIIKETOIMINNAN MURROSTA .....	7
2.1	PROSUMER, ENERGIAHYTEISÖ JA MIKROVERKKO –KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT .....	7
2.1.1	Määritelmät .....	7
2.1.2	Politiikkavaikutukset.....	8
2.2	ENERGIAJÄRJESTELMÄN JA –LIIKETOIMINNAN MURROKSEEN LIITTYVÄT SKENAARIOT .....	9
2.3	PROSUMER USE CASES .....	10
3	PROSUMERIN OMIEN RESURSSIEN KANNATTAVUUS .....	16
3.1	SÄHKÖN VARASTOINNIN KANNATTAVUUS OMAKOTITALOISSA .....	16
3.2	SÄHKÖN VARASTOINTI JA AURINKOSÄHKÖ KERROSTALOISSA .....	18
3.3	MIKROVERKON VERKKOPALVELUMAKSU .....	19
4	KAMPUSAREENAN PILOTTI.....	21
4.1	ICT-JÄRJESTELMÄN ARKKITEHTUURI .....	21
4.2	DATALÄHTEET .....	23
4.2.1	Sähkön laatu .....	24
4.2.2	Sähkön kulutus .....	24
4.2.3	Aurinkovoimala .....	25
4.2.4	Sääasema.....	25
4.2.5	Kiinteistöautomaatiojärjestelmä.....	25
4.2.6	Sääennuste.....	25
4.2.7	Sähkön pörssihinta .....	26
4.2.8	Sähköverkon tila .....	26
4.3	DATANKERÄIN .....	26
4.4	IoT-ALUSTA .....	27
4.5	SOVELLUKSET .....	28
4.5.1	Datan visualisointi .....	28
4.5.2	Datan analysointi .....	30
4.5.3	Akkuvaraston ohjaus .....	34
4.6	KOKEMUKSET .....	36
5	LOHKOKETJUTEKNOLOGIA ENERGIALIIKETOIMINNASSA .....	38
5.1	LOHKOKETJUSOVELLUKSIA HAJAUTETTUIEN RESURSSIEN HALLINTAAN .....	38
5.2	LOHKOKETJUT MIKROVERKOISSA JA ENERGIAHYTEISÖISSÄ -TYÖPAJA .....	39
5.3	KAMPUSAREENAN LOHKOKETJU -DEMO .....	40
6	MARJAMÄEN ENERGIAOMAVARAINEN TEOLLISUUSMIKROVERKKO.....	44
6.1	YLEISKUVAUS.....	44
6.2	SÄHKÖVERKON MALLINTAMINEN .....	45
6.3	MIKROVERKON TEHOTASAPAINO .....	49
6.3.1	Tehotasapainon mallinnus.....	49
6.3.2	Energialähteiden käytön optimointi .....	50
6.4	ENERGIAHYTEISÖN MAHDOLLISUUKSIA .....	52
7	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	53
8	LÄHTEET .....	56

# 1 Johdanto

Tässä raportissa esitetään yhteenveto Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) neljän eri laboratorion yhteistyönä toteuttamasta tutkimusprojektikonaisuudesta. Raportissa kuvataan eri osatehtävien toteutusta ja keskeisiä tuloksia, joita on kuvattu laajemmin ja yksityiskohtaisemmin projektin aikana tehdyissä kansainvälisissä julkaisuissa ja opinnäytetöissä sekä muissa erillisdokumenteissa. Loppuraportin kirjoittajina on toiminut yhteistyössä lähes koko projektiryhmä, ja raportin eri lukujen teksteissä näkyy paikoin eroja käsittelytavassa ja yksityiskohtaisuudessa.

Hankkeen toteutus on edellyttänyt poikkitieteellistä lähestymistapaa, jossa yhdistyy hajautettujen resurssien ja sähköjärjestelmän teknis-taloudellinen hallinta, tietotekniikan mahdollistamat uudet toiminnallisuudet, resurssien optimaalinen käyttö eri toimijoiden näkökulmasta sekä uudet liiketoimintamallit ja ekosysteemit. Tutkimusprojektin on toteuttanut yhteistyössä TTY:n neljän eri laboratorion tutkimusryhmät Sähköenergiatekniikan, Tietotekniikan, Automaatio ja hydrauliiikan sekä Tuotantotalouden ja tietojohdamisen laboratorioissa yhteistyönä projektiin osallistuneiden yritysosapuolien kanssa.

## 1.1 Tausta

Uber, AirBnB ja lukuisat muut ohjelmistointensiiviset yritykset ovat osoittaneet, että palvelun tarjoajan ja asiakkaan roolit voivat muuttua dynaamisesti kysynnän ja tarjonnan mukaisesti. Tällaiset palvelut ja niiden taustalla olevat tietojärjestelmät ovat yksi hypernopean kasvun tekijöistä. Sama vaihdanta- ja jakamistalouteen perustuva ajattelumalli on laajenemassa useille toimialoille, joissa kuluttajan ja tuottajan roolit voivat vaihdella. Yksi tämän suuntaisessa murroksessa olevista toimialoista on sähköenergiajärjestelmä, joka sisältää yhä enemmän erilaisia hajautettuja energiaresursseja (mm. hajautettu sähkötuotanto, ohjattavat kuormat, energiavarastot, sähköautot), joita voitaisiin hyödyntää koko energijärjestelmän reaaliaikaisessa hallinnassa, jos ansaintalogiikka, reaaliaikainen tiedonhallinta ja hajautettuja resursseja omistaville asiakkaille tarjottavat palvelut sen mahdollistaisivat. Murroksen keskeinen piirre on asiakkaiden (customer) muuttuminen sähkökäyttäjistä (consumer) myös sähkön tuottajiksi (producer) ja erilaisten ohjattavissa olevien resurssien tarjoajiksi (provider), eli aktiiviseksi asiakkaksi (prosumer), jotka voivat olla yksittäisiä kotitalouksia, mutta myös isompia yksiköitä esim. kerrostalo, kortteli tai maatalousyritys, tai jopa virtuaalisia yhteisöjä. Aktiivisten asiakkaiden hajautettujen resurssien avulla on toteutettavissa erityyppisiä energia- ja/tai teho-omavaraisia mikroverkkoja, jotka toimivat joustavina osina sähkömarkkinaa ja energijärjestelmää, tai jopa tarvittaessa yksittäisinä saarekkeina.

Informaatioteknologian arkipäiväistyminen, sulautuminen ja halpeneminen ovat johtaneet laajaan digitalisoitumiseen ja konvergenssiin mahdollistaen Esineiden Internetin (IoT, Internet of Things) hyödyntämisen luotaessa uutta arvoa ja disruptoitaessa toimialojen liiketoiminnan logiikkaa. IoT:n integroituminen energijärjestelmään ja erityisesti hajautettujen resurssien ohjaukseen avaa uuden tason koko energijärjestelmän hallintaan – Internet of Energy (IoE). Hajautettujen resurssien hyödyntämisessä on teknologisten ratkaisujen kehittämisen lisäksi tärkeää myös aktiivisille asiakkaille muodostuvan arvon ymmärtäminen uusien loppukäyttäjälähtöisesti muotoutumassa olevien tietointensiivisten ekosysteemien muodostumisen tukemiseksi. Social Energy –käsite on teknisen Internet of Energy –käsitteen laajennus, joka sisältää myös prosumerina toimivan yksilön tai yhteisön sosioekonomisen näkökulman teknisten ratkaisujen rinnalla. Tiivistetysti voidaan todeta, että Internet of Energy käsite kuvaa energijärjestelmän ekosysteemiä, joka perustuu IoT-tekniikkaan, ja Social Energy sen laajennusta sisältäen yksilöt ja yhteisöt ekosysteemin osana.

Toisin kuin edellä olevissa, muita toimialoja koskevissa esimerkeissä, joissa kuluttaja ja tuottaja ovat suoraan tekemisissä keskenään ja taustalla oleva tietojärjestelmä ainoastaan auttaa heitä löytämään toisensa, sähköenergiajärjestelmän tapauksessa keskeisessä roolissa on myös fyysinen sähköverkko;

sekä koko valtakunnan voimajärjestelmä että paikallisen monopoliasemassa olevan sähkönjakeluverkon toiminnasta vastaava jakeluverkkoyhtiö. Toisaalta sähkömarkkinoilla esim. tasevastuu<sup>1</sup> on rajoite, joka pitää huomioida uusia vaihdantaan perustuvia toimintoja kehitettäessä. Tästä syystä pelkkä tietojärjestelmä ei riitä vastaavanlaisen liiketoiminnan rakentamiseen, vaan olemassa olevan infrastruktuurin rajoitukset on otettava huomioon ekosysteemien kehityksessä. Lisäksi toimijoiden operaatioita säädellään ja ohjataan erilaisilla instrumenteilla eri tasoilta kansallisilla ja ylikansallisilla markkinoilla. Laajana teknisenä järjestelmänä ja useita erilaisia toimijoita sisältävänä kokonaisuutena sähköjärjestelmän kehittymistä leimaa tyypillisesti systeemiset jäykkyydet, mikä vaikeuttaa eri tasojen ja toimijoiden intressien linjaamista uusiksi toiminallisiksi ekosysteemeiksi.

Sähköjärjestelmässä on perinteisesti sopeuduttu kulutuksen vaihteluun säätämällä mm. vesivoima- ja lauhdevoimalaitosten tuotantoa. Jatkossa yhä suurempi osa tuotannosta on sellaista, jota ei teknisesti voida tai ei taloudellisesti kannata säätää (mm. sääriippuva tuuli- ja aurinkovoima, sekä ydinvoima). Tulevaisuudessa erilaisten joustavien energiaressurssien tarve ja arvo järjestelmässä kasvaa merkittävästi. Ohjattava kuormitus ja energiavarastot tarjoavat edullisen ratkaisun lisätä järjestelmään joustavuutta ainoastaan säätökapasiteetiksi rakennettavan sähköntuotannon sijaan. Kysynnän jousto (Demand Response, DR) sisältää laajan joukon erilaisia toimintoja, joiden merkitys, tarve ja ansaintalogiikka vaihtelevat toimijan näkökulmasta. Keskeisessä roolissa kysynnän jouston hyödyntämisessä on myös erilaiset kokonaisvaltaisen digitalisaation mahdollistamat kotien ja kiinteistöjen energian hallinnan automaatiojärjestelmät, jotka tarjoavat kehittyneitä toimintoja kysynnän jouston toteuttamiseen. Kysynnänjousto voidaan hyödyntää myös sähköverkkojen ja mikroverkkojen hallintaan. Sen sijaan, että rakennettaisiin huippukulutuksen tai –tuotannon tarvitsema siirtokapasiteetti myös äärimmäisten harvinaisten tilanteiden varalle, voidaan kysyntä- ja tuotantoujoustoa hyödyntämällä kasvattaa olemassa olevan sähköverkon käyttöastetta. Tällöin voidaan viivästyttää kuormituksen tai tuotannon kasvusta johtuvaa sähköverkkojen investointitarvetta huomattavasti itse kapasiteetti-investointeja edullisemmilla automaatioinvestoinneilla, joita voidaan hyödyntää myös muihin tarpeisiin, kuten reaaliaikaiseen valvontaan ja sähkönsyötön nopeampaan ja laajempaan palauttamiseen häiriötilanteessa.

## 1.2 Tutkimusprojektin tavoitteet ja toteutus

Projektin keskeisenä tavoitteena on ollut tutkia ja pilotoida teknisiä ratkaisuja ja niiden kykyä vastata prosumereiden tarpeisiin, tarkastella prosumereiden roolia energijärjestelmän kehittämisessä ja tutkia erilaisten ”prosumereiden” aktiviteetteihin perustuvia uudenlaisia ekosysteemejä sekä luoda ymmärrystä digitaalisuuteen ja jakamistalouteen pohjautuvien liiketoimintamallien mahdollisuuksista sähköenergiatoimialalla.

Keskeisenä konkreettisenä tavoitteena projektissa on ollut luoda IoT-pohjainen teknologinen alusta erilaisten hajautettujen resurssien (pientuotanto, kuorman ohjaus, energiavarastot, sähköautot jne.) hyödyntämiselle kehitettäessä asiakaslähtöisiä resurssienjakoon pohjautuvia uusia liiketoimintamalleja energiayhteisöille, sähkömarkkinoille sekä sähköjärjestelmän hallintaan. Teknologia-alustan avulla on voitu tutkia myös uudenlaisen toimintaympäristön mahdollistamien uusien liiketoimintamallien ja ekosysteemien syntymistä.

Konkreettisesti toteutettavien pilot-kohteiden avulla tavoitteena on ollut saada kokemuksia teknologia-alustan toiminnasta, uusien toiminnallisuuksien liiketaloudellisista mahdollisuuksista ja koko järjestelmän eri toimijoiden käyttäytymisestä ja mahdollisuuksista toimia ekosysteemissä. Pilot –kohteina hankkeessa ovat toimineet TTY:n Kampusareena ja Lempäälän Energia Oy:n Marjamäen energiaomavarainen teollisuusmikroverkko, jotka on esitelty tarkemmin luvuissa 4 ja 6. Lisäksi projektissa

<sup>1</sup>Tasevastuu: Sähkömarkkinoiden osapuolella tulee olla yksi avoin sähköntoimittaja. Avoimen toimittajan tulee osoittaa sähkömarkkinoiden osapuolelle suorittamalleen avoimelle toimitukselle tasevastaava, joka tämän avoimen toimituksen tai siihen ulottuvan katkeamattoman avointen toimitusten ketjun välityksellä tasapainottaa osapuolen sähkönhankinnan ja -toimitukset. (<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090066>)

on hyödynnetty todellisesta sähköverkosta saatuja mittauksia omakoti- ja kerrostalojen muodostamien mikroverkkojen ja energiayhteisöjen simulointimallien kehityksessä ja tarkasteluissa, joita on kuvattu luvussa 3.

### 1.3 Verkkoaineisto ja julkaisut

Loppuraportti ja tutkimusprojektin muu julkinen dokumentaatio löytyy projektin verkkosivulta osoitteesta: <http://www.senec.fi/projects/procem-2>.

Tutkimusprojektin tuloksien pohjalta on valmistunut/valmistumassa useita kansainvälisiä konferenssi- ja lehtijulkaisuja. Tutkimustuloksia sisältyy useampaan jo valmistuneeseen tai valmistumassa olevaan opinnäytetyöhön. Seuraavassa on listattuna projektiin liittyvät kansainväliset julkaisut ja opinnäytetyöt:

#### Kansainväliset julkaisut

1. Kotilainen K., Mäkinen S. J., Järventausta P., J., Rautiainen A., Markkula, J. (2016, June). The role of residential prosumers initiating the energy innovation ecosystem to future flexible energy system. In IEEE European Energy Market (EEM), 2016 13th International Conference on the (pp. 1-5). IEEE Xplore Digital library.
2. Kotilainen K., Mäkinen S. J., Järventausta, P. (2016, October). Understanding prosumers' intrinsic and extrinsic motivations to become active participants in smart grid innovation ecosystem. In IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2016 (pp. 1-6). IEEE Xplore Digital library
3. Kotilainen K., Sommarberg M., Järventausta P., Aalto, P. (2016, November). Prosumer centric digital energy ecosystem framework. In Proceedings of the 8th International Conference on Management of Digital Ecosystems (MEDES) (pp. 47-51). ACM digital library.
4. Kotilainen K., Järventausta P., Aalto, P. Prosumer centric co-creation in Smart Grid innovation ecosystem. In Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT-Asia), 2016 (pp. 884-889). IEEE Xplore Digital library
5. Kotilainen K., Valta J., Mäkinen S. J., Järventausta P., Understanding consumers' renewable energy behaviour beyond "homo economicus" - An exploratory survey in four European countries. IEEE European Energy Market (EEM2017), 2017 14th International Conference.
6. Kotilainen K., Valta J., Järventausta P., How consumers prefer to innovate in renewable energy and what they expect to get in return for co-creation. IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE 2017).
7. Valta J., Mäkinen S. J., Kotilainen K., Järventausta P., Prosumer centric innovation system and how it is influenced by multi-regime interactions: Exploratory interviews in Central Europe. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe 2017).
8. Kotilainen K., Mäkinen S. J., Valta J. (2017), Sustainable Electric Vehicle – Prosumer Framework and Policy Mix. IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT-Asia) 2017. IEEE Xplore Digital library
9. Koskela J., Rautiainen A., Järventausta P., Utilization Possibilities of Electrical Energy Storages in Households' Energy Management in Finland. International Review of Electrical Engineering (IREE), Feb 2017, p. 607-617
10. Chen, T., Qian, K., Mutanen, A., Schuller, B., Järventausta, P. & Su, W., Classification of electricity customer groups towards individualized price scheme design, North American Power Symposium (NAPS), IEEE, 2017
11. Vilppo O., Rautiainen A., Rekola J., Vuorilehto K., Järventausta P., Profitable Multi-Use Battery Energy Storage for Power Grids in Nordic Market. International Review of Electrical Engineering: IREE, 13, 3, 2018, p. 185-194
12. Lummi K., Rautiainen A., Lasse P., Repo S., Järventausta P., Rintala J., Microgrids as part of electrical energy system - pricing scheme for network charges of DSO. European Energy Market (EEM2018) conference, June 2018
13. Valta J., Mäkinen S., Kotilainen K., et al (2018a), Comparison of Regulatory Challenges Faced by Different Microgrid Ownership Models. ISGT Europe 2018. IEEE,
14. Valta J., Mäkinen S., Kotilainen K., et al (2018b), Comparison of Innovation Policies for Electric Vehicle Business Ecosystems. European Energy Markets 2018.

15. Koskela J., Rautiainen A., Järventausta P., (2018a) Utilization of Households' Electrical Energy Storages with Power-Based Distribution Tariffs. (Under review in IEEE Transactions on Power Systems)
16. Kotilainen K., Saari U.A., Policy Influence on Consumers' Evolution into Prosumers—Empirical Findings from an Exploratory Survey in Europe. *Sustainability* 2018, 10, 186.
17. Saari U.A., Mäkinen, S., Järventausta P., Vilkkö M., Systä K., Kotilainen K., Valta J., Björkqvist T., Laukkanen T., Engaging Students in Cross-Disciplinary Research and Education – A Processual Approach to Educational Development. *Sustainability in University Campuses conference*, 2018 (Under review)
18. Mäkinen S. J., Valta J., Kotilainen K., Saari U.A., Prosumers' Digital Business Models for Electric Vehicles: Exploring Microfoundations for a Balanced Policy Approach. In *Digital Business Models*, Palgrave Macmillan (forthcoming)
19. Koskela J., Rautiainen A., Järventausta P., (2018b), Using electrical energy storage in residential buildings – sizing of battery and PV panels based on electricity cost optimization. Submitted to journal of Applied energy
20. Chen T., Mutanen A., Lummi K., Rautiainen A., Järventausta P., Su, W, Customized Retail Pricing Design with a Hybrid Data-driven Method. Under work
21. Kotilainen K. (2018), Energy prosumerism. *Encyclopaedia of the United Nation's Sustainable Development Goals*. Springer. Forthcoming. (In review)
22. Järventausta P., Peltonen L., Valta J., Uski S., Aalto P., Microgrids: Impact on Development of Sustainable Electric Energy Systems. *Encyclopaedia of the United Nation's Sustainable Development Goals*. Springer. Forthcoming. (In review)
23. Kotilainen K., Kojo M., Aalto P., Valta J., Rautiainen A. (2018), Electric Vehicle - Prosumer policy mix for sustainable energy - a case study in Finland. *Energizing Futures Conference 2018 (Abstract & presentation)*.
24. Hilden A., Pakonen P., Verho P., Solar power plant in a modern office building: Power and power quality considerations. *CIREC 2019 conference (Proposal abstract)*.

#### Opinnäytetyöt

25. Jussi Valta, Policy pathways towards energy prosumer innovation ecosystem – cross-country comparison from Europe. *Tampere University of Technology, Master of Science Thesis*, November 2017, 118 pages
26. Antti Hilden, Power quality and power monitoring in a modern office building utilizing diverse metering, *Master of Science Thesis*, In progress
27. Ville Heikkilä, Data gathering from IoT devices, *Master of Science Thesis*, In progress
28. Kirsi Kotilainen, Prosumer role in the energy ecosystem. *Doctoral thesis*, In progress

## 2 Prosumer ja energiayhteisö osana energiajärjestelmän ja -liiketoiminnan murrosta

### 2.1 Prosumer, energiayhteisö ja mikroverkko –käsitteet ja määritelmät

#### 2.1.1 Määritelmät

Projektin aikana pohdittiin useassa eri yhteydessä, mitä oikeastaan tarkoitetaan termillä "prosumer". Prosumer -määritelmä on laajemminkin kaivannut parempaa määrittelyä, esimerkiksi EU-tasolla. Talvipaketti (European Commission 2017a) määritteli prosumerin "aktiivisena kuluttajana" (active consumer). Prosumerista on käytetty myös määritelmää "energiakansalainen" (energy citizen). Prosumer -termi johdetaan yleensä sanoista "producer" ja "consumer" (Toffler 1981). Prosumer voidaan kääntää suomeksi "tuottajakuluttajaksi". Tässä määritelmässä korostuu prosumerin rooli nimenomaan energian tuottajan roolissa. Prosumer voi kuitenkin osallistua esimerkiksi kysyntäjoukseen tarjoamalla hallinnassaan olevia varaavia resursseja sähköyhtiön käyttöön. Tällöin olisi ehkä mielekkäämpää liittää prosumer määritelmään "provider" ja "consumer". Sähköauton omistajat ja kysyntäjoukseen osallistuvat kotitaloudet voivat siis ilman energiantuottamiseen tarvittavaa laitteistoa olla prosumereita. Joskus prosumer-termin tulkitaan saaneen alkunsa sanoista "proactive consumer", joka korostaa enemmän kuluttajan roolia aktiivisena osallistujana. Toisinaan näkee myös käytettävän termiä "professional consumer", erityisesti, kun viitataan asiakkaan tarpeeseen saada käyttöönsä lähes kaupalliseen tai ammattimaiseen käyttöön tarkoitettuja tuotteita ja laitteita. Esimerkkinä mainitaan usein digitaaliset kamerat, mutta myös aurinkopaneelit toimivat hyvänä esimerkkinä. Prosumerit voivat energian tuottamisen, varastoinnin, myynnin ja kysyntäjoukon lisäksi osallistua myös lisäarvon tuottamiseen muiden energiaekosysteemin toimijoiden kanssa (e.g. Kotilainen et al. 2016)

Vaikka prosumerin perusmääritelmä alkaakin olla yleisellä tasolla jo paremmin ymmärretty, siihen liittyy edelleen useita tarkentavia näkökulmia, joista ainakin kolme on avaamisen arvoisia:

- 1) Prosumer markkinaosapuolena. Yksi haaste prosumerien määrittelyssä on erilaisten prosumereiden koko ja sen johdosta energian tuotannon ja kulutuksen määrä. Prosumerit voidaan mieltää sähkön kuluttajiksi, jotka myöskin jaetaan erilaisiin ryhmiin; kotitaloudet, taloyhtiöt, kaupalliset toimijat ja teolliset toimijat. Yleisesti puhutaan eri ryhmien osalta joko pienasiakkaista tai suurasiakkaista. Tarkka määritelmä tässä suhteessa puuttuu esimerkiksi EU-tasolla; eri jäsenmaat käyttävät erilaisia kriteerejä, ja sekä sähkön hinnoittelu, verotus että lainsäädäntö vaihtelevat eri asiakasryhmien osalta eri maissa.
- 2) Prosumer suhteessa sähköverkkoon. Prosumer voi joko liittyä sähköverkkoon tai toimia ilman verkkoyhteyttä. Suomessa esimerkiksi kesämokit aurinkopaneeleineen on esimerkki jälkimmäisestä ns. Off-grid prosumerista. Maailmanlaajuisesti off-grid prosumerit sijoittuvat suurelta osin kehitysmaihin, joissa sähköverkon kattavuus ja/tai laatu on heikko. Sähköverkkoon kuuluvat prosumerit voivat joko käyttää koko tuotantonsa itse tai syöttää osan verkkoon.
- 3) Prosumer ja tuotettu energiatyyppi- ja lähde. Yleisimmin prosumerit mielletään aurinkopaneeleilla sähköä tuottaviksi yksiköiksi tai yhteisöiksi. Prosumerit voivat kuitenkin tuottaa myös lämpöä ja viilennystä ja energialähteitä ovat aurinkoenergian lisäksi esimerkiksi tuuli, biomassa ja maalämpö.

Prosumerit voivat olla yksittäisiä toimijoita tai muodostaa yhteisöjä. Kun puhutaan "prosumerista" on siis hyvä tarkentaa tarpeeksi yksityiskohtaisesti, minkä tyyppistä prosumeria tarkoitetaan. Prosumer määritelmiä on tarkasteltu laajemmin lähteessä (Kotilainen, 2018).

Energiayhteisöistä käytetään myös erilaisia termejä ja osin määritelmät menevät päällekkäin. Fyysisen järjestelmän näkökulmasta puhutaan mikroverkkoista (microgrids). Esimerkiksi CIGRÉn työryhmä



C6.22, Microgrid Evolution Roadmap, on määritellyt mikroverkkoihin liittyviä käsitteitä ja toiminnallisuuksia (Marnay et al. 2015). Mikroverkot ovat pieniä kulutus- ja tuotantokeskittymiä, jotka toimivat sähköverkon näkökulmasta yhtenä toimijana eli niillä on oltava selkeät rajat. Mikroverkot toimivat normaalisti osana laajempaa sähköjärjestelmää, mutta pystyvät toimimaan myös itsenäisesti saarekkeena. Mikroverkkoja on hyvin eri kokoisia, eikä niitä ole kansainvälisesti rajoitettu tiettyyn kokoluokkaan.

Lainsäädännössä mikroverkko-käsitettä sellaisenaan ei käytetä vaan tapauksesta riippuen puhutaan suljetuista jakeluverkoista tai eri energiayhteisöistä. Suljetut jakeluverkot (closed distribution network) ovat EU-direktiivin 2009/72/EC mukaan verkkoja, jotka toimivat rajatulla teollisuus-, elinkeino- tai yhteisöpalveluja tarjoavalla alueella, jossa ei toimiteta sähköä kuluttaja-asiakkaille. (European Commission 2009) Näille verkoille voidaan myöntää vapautuksia sääntelyn ja valvonnan osalta. Suljettua jakeluverkkoa koskeva lainsäädäntö tuli Suomessa sähkömarkkinalain kautta voimaan vuonna 2013 (Eduskunta 2013).

EU:n uusi puhtaan energian paketti määrittelee paikalliset energiayhteisöt (local energy communities) ja niihin liittyvät oikeudet ja velvollisuudet (European Commission 2017a). Tässä sähkömarkkinoiden direktiiviehdotuksessa ne määritellään organisaatioiksi tai muuksi entiteeteiksi, jotka eivät ole yleisesti voittoa tavoittelevia vaan muuta arvoa tuottavia. Nämä voivat itsenäisesti operoida omaa jakeluverkkoaan, mutta asiakkailta säilyy niissä oikeus poistua yhteisöstä eli vaihtaa energiatoimittajaa.

Toisaalta Puhtaan energian paketin Uusiutuvan energian direktiivin artikkelissa 22 määritellään myös uusiutuvan energian yhteisöt (renewable energy communities) (European Commission 2017b). Niiden tarkoitus on mahdollistaa kansalaisten ja paikallisten viranomaisten investoinnit omaan uusiutuvan energian tuotantoon ja osallistuminen oikeudenmukaisesti esimerkiksi uusiutuvan energian tarjouskilpailuihin. Tämän direktiivin taustalla on havainto, että pienten paikallisten toimijoiden mukaantulo lisää uusiutuvan energian projektien hyväksyttävyyttä paikallisten keskuudessa. Tämä yhteisö ei siis välttämättä muodosta omaa jakeluverkkoa vaan keskittyy omaan tuotantoon investoimiseen.

Asiakasnäkökulmasta puhutaan myös virtuaaliyhteisöstä, joka on aggregaattorin ohjaama joukko kulutuskohteita, jotka voivat olla yksittäisiä prosumereita, sähköautoja tai muita resursseja. Ne muodostavat suuremman kontrolloitavan yksikön ja profiilin, joten sähkömarkkinoiden näkökulmasta yhteisö toimii perinteisenä voimalana. Virtuaaliyhteisöissä korostuu tietojärjestelmien rooli, jotka mahdollistavat etäohjattavuuden ja automatiikan ohjattavissa kohteissa. (Plancke et al. 2015)

### **2.1.2 Poliittikkavaikutukset**

Prosumerien määrän kasvuun vaikuttavat merkittävästi taloudelliset kannusteet sekä erilainen sääntely ja ohjaus. Esimerkiksi Saksassa ja Englannissa prosumereiden määrä on kasvanut nopeasti feed-in-tariff (FIT) järjestelmän ansiosta. FIT kannuste tarjoaa itsetuotetulle energialle hyvän tuoton verkkoon syötettynä ja nopeuttaa aurinkopaneelien takaisinmaksua merkittävästi. Suomessa prosumereita kannustetaan varsin maltillisesti verrattuna moniin muihin maihin ja meillä aurinkoenergialla sähköä tuottavia prosumereita on vielä vähän. Projektissa tarkasteltiin erilaisten kannusteiden ja muiden poliittikkatoimien merkitystä prosumereihin.

Poliittikkatoimet jaetaan yleisesti regulatiivisiin (sääntely), taloudellisiin ja nk. pehmeisiin instrumentteihin ("soft instruments"), jotka sisältävät esimerkiksi koulutusta ja tiedotusta, vapaaehtoisia toimenpiteitä ja suunnittelua ja organisointia. Erilaisten prosumereihin liittyvien ohjaus- ja kannustekeinojen kirjo on suuri. Poliittikkatoimia voidaan tarkastella esimerkiksi prosumereiden aktiviteettien kautta. Näitä ovat mm. energian tuottaminen, myynti- ja jakaminen, energian varastointi (esimerkiksi sähköauton avulla), kysyntäjoustoon osallistuminen ja innovaatiotoimintaan osallistuminen. Esimerkiksi Suomessa erityisesti pienet prosumerit eivät saa merkittävää tukea aurinkopaneelijärjestelmän hankintaan tai energian myyntiin, ja myös sähköautoihin kohdistuvat taloudelliset kannusteet ovat vaatimattomia. Lisäksi poliittikkatoimien jakautuminen monelle eri osa-alueelle tekee kokonaisvaltaisen prosumeriin liittyvien kannusteiden ja ohjauksen tarkastelun haastavaksi. Projektissa julkaistiin

prosumeriin liittyvistä politiikkatoimista konferenssipaperi (Kotilainen et al. 2017), jossa painopisteenä oli tarkastella regulatiivisia, taloudellisia ja pehmeitä politiikkatoimia kysyntäjoustopuolueen, mikrogeneraation ja sähköautojen suhteen. Paperissa suositellaan kokonaisvaltaisempaa näkökulmaa prosumeriin liittyviin kannusteisiin. Tätä analyysiä on myöhemmin täydennetty tarkastelemalla prosumereihin liittyviä politiikkatoimia Suomessa ja tuloksia on esitelty mm. Energizing futures -konferenssissa 2018 (Kotilainen et al. 2018). Lisäksi kirjoitettiin aikaisemmin kerätyn kuluttaja-aineiston pohjalta julkaisu (Kotilainen, Saari 2018), jossa tarkasteltiin erilaisten politiikkatoimien vaikutusta kuluttajien asenteisiin energiateknologioiden käyttöönottoon ja esitettiin suosituksia sekä liiketoiminnan- että kannusteiden kehittämiseksi. Keskeisiä löydöksiä olivat mm. ei-taloudellisten politiikkatoimien merkittävä rooli kokonaisratkaisujen käyttöönoton osalta.

Mikroverkkojen lainsäädännölliset haasteet ovat moninaisia, sillä ne rikkovat pitkään vallalla olleen paradigman, jossa verkkoyhtiöllä on monopoliasema sähkönsiirtoon ennalta määritellyllä alueella. Näitä haasteita on käyty yleisellä tasolla läpi konferenssijulkaisussa (Valta et al. 2018). Lainsäädännön kannalta olennaista on se, kuka mikroverkon ja sen tuotannon omistaa ja kuka sitä operoi. Kansainvälisesti myös verkkoyhtiöt hallinnoivat mikroverkkoja ja tuotantoa, vaikka vapautetuilla markkinoilla verkkoliiketoiminta ja tuotanto toimivat erotettuina ja siten verkkoyhtiöt eivät voi omistaa tuotantoa tai energiavarastoja. Euroopan Unionin direktiiveissä on pykälä, jotka sallivat pienten alueiden ja asiakasmäärien tapauksissa tällaiset poikkeukset. Olennainen piirre tällaisissa poikkeuksissa on määritellä, miten ja milloin asiakkaan oikeus valita sähköntoimittaja säilytetään ja että asiakkaan maksamat maksut pysyvät läpinäkyvinä ja kohtuullisina.

Kun mikroverkkoa hallinnoi joku muu kuin sähköverkkoyhtiö, tulee ottaa huomioon monia taloudellisia kysymyksiä, kuten verotus ja eri hinnoittelumenetelmien yleinen reiluus, läpinäkyvyys, ja aiheuttamisperiaatteellisuus. Tärkeä kehitysaskel tällaisten mikroverkkojen esiintulossa on uuden EU:n Puhdasta energian paketin määrittelemät paikallisten energiayhteisön vaatimukset, jotka muun muassa takaavat asiakkaan oikeuksia ja asettavat yhteisöille sähköverkkoyhtiöihin rinnastettavat vaatimukset. Jotta ala kehittyisi ja uusia toimijoita tulisi markkinoille, on näiden kysymysten määrittely erittäin tärkeää. Aiheeseen liittyen myös Energiavirasto julkaisi kesällä 2018 ohjeen suljetun jakeluverkon menetelmien laatimiseksi (Energiavirasto 2018).

Sähköautojen kasvava suosio on yksi merkittävimmistä syistä, minkä takia hallitukset ovat alkaneet panostaa älyverkkoihin ja hajautettujen energiaressurssien hallintaan. Sähköautojen liiketoimintakosysteemeihin liittyviä politiikkatoimenpiteitä pohjoismaissa vertailtiin konferenssijulkaisussa (Valta et al. 2018b). Vertailun tuloksena huomattiin, että jopa verrattain samankaltaiset pohjoismaat painottavat hyvin erilaisia elementtejä niiden sähköautopolitiikoissaan. Siinä missä johdonmukainen Norja ja myös Ruotsi panostavat kysynnän luomiseen tukemalla kuluttajia, Suomi ja Tanska panostavat enemmän teknisempiin haasteisiin, kuten V2G-ratkaisuihin. Ruotsissa politiikkatoimenpiteet kohdistuvat kuluttajapanostuksen lisäksi myös heidän auto- ja rekkateollisuutta tukeviin hankkeisiin.

## **2.2 *Energiajärjestelmän ja –liiketoiminnan murrokseen liittyvät skenaarit***

Aktiivisten kuluttajien merkitys osana Suomen sähköjärjestelmää on nostettu tärkeäksi Ilmasto- ja energiastrategiassa ja sen keskipitkän aikavälin toteutussuunnitelmassa (Ympäristöministeriö 2017). Luodaksemme paremman käsityksen sähköalan toimijoiden näkemyksestä kuluttajien ja prosumerien merkityksestä, projektissa kartoitettiin projektiin osallistuvien yritysten näkemyksiä prosumereiden roolista tulevaisuuden sähköjärjestelmässä Suomessa. Projektiin osallistuvat yritykset haastateltiin (n=14). Haastatteluissa kerättiin pääasiassa kahden tyyppistä tietoa. Ensiksi, koottiin prosumereiden rooliin vaikuttavia keskeisiä trendejä ja muita tekijöitä, jotka arvoitettiin sekä niiden vaikutuksen että epävarmuuden perusteella. Toiseksi, haastatellut kertoivat oman näkemyksensä prosumerin rooliin ja

merkitykseen liittyvistä mahdollisista skenarioista, joista kerätyn aineiston perusteella muodostettiin kolme skenaariota; optimistinen, pessimistinen ja business as usual (BAU).

Prosumereiden rooliin ja merkityksen arviointiin kerättiin yhteensä 211 tekijää, jotka myöhemmin tiivistettiin 26 ryhmään ja vielä lopuksi kuuteen klusteriin. Eniten vaikuttaviksi tekijöiksi, joissa nähtiin olevan myös paljon epävarmuutta, muodostuivat: politiikka ja regulaatio, kuluttajien vaikutus, energiateknologioiden teknologia- ja hintakehitys. Lisäksi tunnistettiin kolme tärkeää tekijää, joilla nähtiin olevan vähemmän epävarmuutta: digitalisaatio, uudet liiketoimintamallit ja konvergoituvat ratkaisut. Poliitiikka ja regulaatio pitävät sisällään mm. kansainväliseen politiikkaan ja lainsäädäntöön liittyviä epävarmuustekijöitä, esimerkiksi "Trumpismi" ja "EU ohjaus ja kansainväliset sopimukset", mutta myös kotimaan lainsäädännön kehitystä ja verotuksen kehitystä pidettiin merkittävänä. Energiateknologiatekniikan osalta suurimpana epävarmuustekijänä pidettiin varastointiteknologian kehitystä. Kuluttajan roolin merkitystä energijärjestelmään kehitykseen arvioitiin monelta kannalta, mm. miten energiayhteisöjen muodostaminen lähtee leviämään ja miten ympäristöarvot vaikuttavat kuluttajien käyttäytymiseen. Kriittisistä epävarmuustekijöistä muodostettiin vielä yksityiskohtaisempia skenarioita, joita tarkasteltiin erityisesti seuraavien kysymysten kautta:

- Syntykö energiayhteisöjä ja energian jakamista?
- Tuleeko akkuvarastoinnista yleistä ja yleistyvätkö sähköautot?
- Syntykö merkittävästi hajautettua pientuotantoa ja prosumereita?
- Osallistuvatko kotitaloudet kysynnänjoustoon?

Skenaariotyön tuloksia esiteltiin kahdessa johtoryhmän kokouksessa, käytettiin pohjana use case -työssä sekä johtoryhmän työpajassa että use case –suunnittelussa. Skenarioista on lisäksi tarkoitus kirjoittaa kansainvälinen julkaisu.

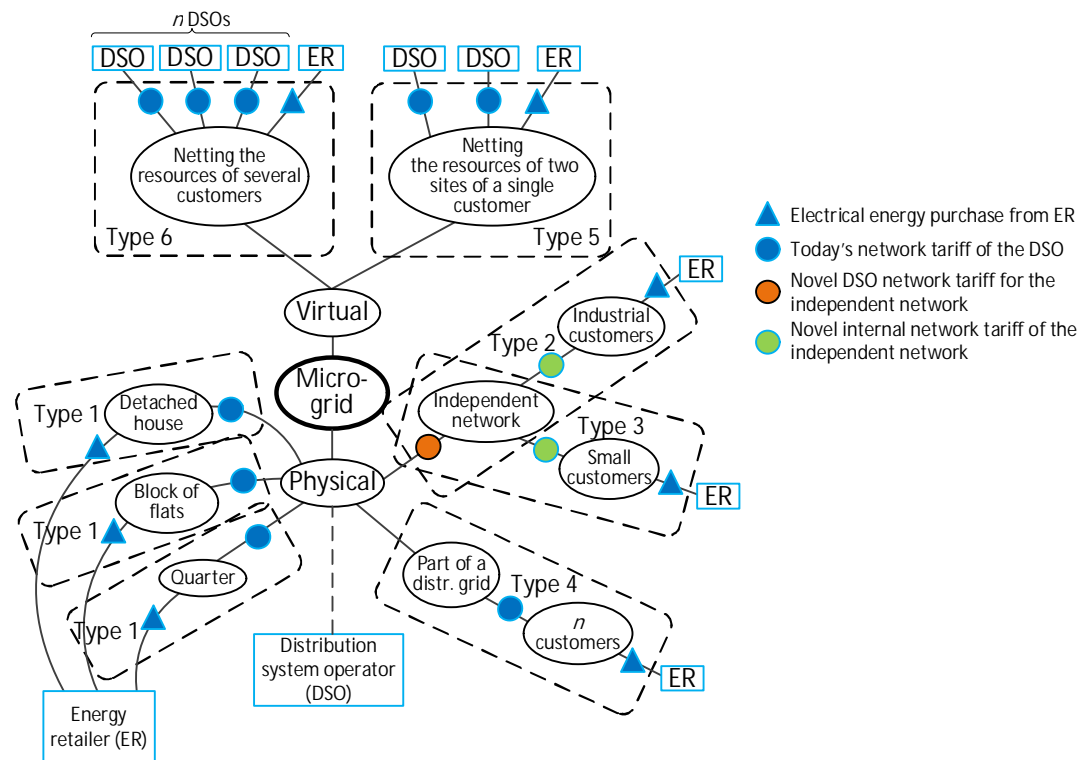
Prosumereihin liittyvän sosio-tekniikan toimintaympäristön kehittymistä analysoitiin konferenssijulkaisussa (Valta et al. 2017). Julkaisu perustui kesän 2016 aikana tehtyyn 11 haastatteluun Saksassa, Sveitsissä ja Ranskassa. Haastatteluiden avulla analysoitiin vuorovaikutuksia keskitetyn ja hajautetun energijärjestelmän, sähköautojen ja akkujen sekä digitalisaation välillä. Järjestelmien erilaiset teknologiat, toimijat sekä normit ja säännöt aiheuttavat kilpailua, mikä näkyy varsinkin keskitetyn ja hajautetun järjestelmän välillä esimerkiksi poliittisen kamppailun, osaamiserojen ja energiaomavaraisuuden houkuttelevuuden kautta. Kilpailuvuorovaikutuksesta huolimatta järjestelmät toimivat yhä enemmän symbioosisissa ja ovat jopa integroituneet. Lähentyminen vauhdittaa auto- ja energiateollisuuden kehittymistä ja luo entistä tehokkaampia integroituvia ratkaisuja esimerkiksi rakentamiseen. Toisaalta integroituminen edellyttää esimerkiksi tietosuojan ja akkujen omistajuuskysymysten ratkaisemista. On huomattava, että nämä prosumerismia hidastavat vuorovaikutukset korostuivat eri tavoin eri maissa, mikä vaikuttaa myös innovaatiojärjestelmien kehittymiseen alueellisesti.

Lisäksi projektin aikana tarkasteltiin myös uusien liiketoimintamallien potentiaalia, erityisesti liittyen prosumereihin ja sähköautoihin osana sähköjärjestelmää. Prosumerit, jotka tuottavat energiaa voivat olla myös sähköauton omistajia tai palveluntarjoajia. Projektin johtoryhmä arvioi business canvas model (BCM) -työpajassa kolmea eri toimintamallia: ajaminen, lataaminen ja varastointi. Tuloksia arvioitiin suhteessa arvonmuodostuksen, arvon luomiseen ja arvon haltuunottoon (value creation, value delivery, value capture). Johtopäätöksenä työstä oli, että keskeisten innovatiivisten liiketoimintamallien arvolupaus on jo nyt uskottava, mutta lisäarvon luomisessa ja haltuunotossa on vielä paljon aukkoja liittyen teknologian kypsyyteen ja saatavuuteen, toimijoiden valmiuteen toteuttaa ja toimittaa ratkaisuja ja tuottopotentiaalin heikkouteen kustannusrakenteeseen suhteutettuna. Työn tuloksia esitellään tarkemmin julkaisussa (Mäkinen et al. 2018).

## 2.3 Prosumer use cases

Kuten edellä on jo esitetty prosumerilla voi olla erilaisia rooleja sähköjärjestelmässä. Laajasti nähtynä prosumer voi toimia myös mikroverkkona tai osana sellaista. On olemassa erilaisia mikroverkkoja, ja

niillä voi olla monenlaisia sopimussuhteita sähkömyyjiin ja sähköverkkoyhtiöihin. Kuva 2.1 havainnollistaa erilaisia energiayhteisö- ja mikroverkkokonsepteja.



Kuva 2.1. Erilaisia energiayhteisö- ja mikroverkkokonsepteja, ja niiden sopimussuhteita energian myyjiiin (Energy retailer – ER) ja sähköverkkoyhtiöihin (Distribution system operator – DSO) (Lummi et al. 2018)

Energiayhteisö ja mikroverkko voi olla virtuaalinen tai fyysinen. Virtuaaliverkossa fyysiset resurssit kuten sähkökuormat ja pienimuotoinen sähköntuotanto voivat sijaita kaukana toisistaan, mutta resursseja käsitellään kuitenkin yhtenä virtuaalisena kokonaisuutena. Tämä mahdollistaa esimerkiksi sähkönkulutuksen ja -tuottamisen netottamisen. Tässä yhteydessä kyse on virtuaalisesta energiayhteisöstä. Fyysisessä mikroverkossa resurssit ovat lähellä toisiaan samassa sähkönjakeluverkossa ja usein jopa saman sähköliittymän takana. Fyysisen mikroverkon voi muodostaa yksittäinen kotitalous, kerros- tai rivitaloalueiden joukko, yhden korttelin alueella olevat kiinteistöt tai laajempi osa julkisen jakeluverkon asiakkaita. Lisäksi mikroverkko voi rakentua myös yksityisessä (ei julkisen jakeluverkkoyhtiön) omistuksessa olevan sähköverkon (independent network) sisälle, jolloin sen sisällä on sähkönkuluttajia ja mahdollisesti tuotantoa/energiavarastoja.

Tässä kappaleessa on tarkasteltu yleisesti prosumerin omistamien resurssien hyödyntämistä eri tavoin joustoa tarjoavana elementtinä. Tarkastelu kohdistuu erityisesti akkuvarastojen hyödyntämiseen, joiden kannattavuutta omakoti- ja kerrostalokiinteistöjen muodostamissa mikroverkoissa ja energiayhteisöissä on tarkasteltu luvussa 3. Lisäksi projektissa määriteltiin yleiset use case -kuvaukset prosumerin oman energiakäytön optimoinnille omakotitalossa, kerrostalossa ja virtuaaliyhteisössä sekä sähkön vähittäismyyjän (=aggregaattorin) energiakäytön optimoinnille hyödynnettäessä omakotitalo-asiakkaan resursseja.

#### Kiinteistön omistajan näkökulma

Sähköakkuja voidaan hyödyntää monipuolisesti sekä sähköenergian että –tehon ohjauksessa. Niiden sovelluksia rajoittaa kuitenkin tällä hetkellä keskeisesti korkeat kustannukset. Kustannusten alentamiseksi eräs keino on hyödyntää akkuja mahdollisimman monipuolisesti erilaisiin tarpeisiin. Esimerkiksi akun hyödyntäminen sähköenergian hankintakustannusten alentamiseksi on yksi keskeinen tarve

kiinteistön omistajalle. Lisäksi TTY:n kampuksen suuruisen sähkökäyttäjän sähkön kokonaiskustannuksista merkittävä osuus syntyy myös sähkönjakelutariffeista, joissa tässä kokoluokassa tyypillisesti sovelletaan keskijännitetehotariffia. Tehotariffi kannustaa pienentämään sähkönjakeluverkosta otettavan sähkötehon huippua.

Energianhankinnan optimoinnissa akkua ja muita joustavia energioresursseja kuten kysyntäjoustoja ja ohjattavia paikallisia tuotantoyksiköitä voidaan ohjata sähköenergian hankintahinnan vaihteluiden perusteella. Loppukäyttäjän kannalta riittää, kun tunnetaan esimerkiksi päivää edeltävän sähkömarkkinan (Pohjoismaissa Elspot) kunkin käyttötunnin hinnat ja sähkönkulutuksen ja –tuotannon ennusteet. Akun ja muiden joustavien resurssien avulla voidaan sähköenergian hankintaa osittain aikaistaa tai viivästyttää hankintahinnan minimoimiseksi. Optimointiongelmaksi on luonteeltaan stokastinen dynaaminen optimointiongelmaksi, mutta sen yksinkertaistamiseen ja linearisointiin on olemassa vakiintuneita tapoja.

Huipunleikkaus on pitkään tunnettu ajatus ja sen automatisointiin on olemassa teknologiaa esimerkiksi ohjaamalla vähempiarvoisia kuormia pois päältä tai käynnistämällä huipunleikkaukseen tarkoitettuja generaattoreita kiinteistön automaatiojärjestelmän välityksellä liittymispisteen reaaliaikaisen tehomittauksen perusteella. Lisäksi ohjaukset voidaan suunnitella (ennustaa) kiinteistön energianhallintajärjestelmän yhteyteen toteutetun optimointiohjelman avulla, jolloin energianhankinnan ja sähkönjakelun kustannukset voidaan huomioida samanaikaisesti ja siten välttää ristiriidat energianhankinnan ja huipputehojen välillä kaikkein halvimpien sähköenergian käyttötuntien aikana. Lisäksi energianhallintajärjestelmissä on mahdollista kuvata erilaisten kulutuslaitteiden kysyntäjousto-ominaisuuksia (varastointi, ohjaus, tehot, jne.) reaaliaikaista ohjausta tarkemmin, mikä luo kuorman ohjaukselle merkittävää lisäarvoa. Tähän kokonaisuuteen akku sopii erinomaisesti erittäin joustavana energian ja tehon ohjausresurssina (riippuen luonnollisesti akun ominaisuuksista), mikä mahdollistaa esimerkiksi ennustevirheistä johtuvien ”yllättävien” tehopiikkien kompensoimisen. Ennustevirhe voi syntyä esimerkiksi tilanteessa, missä yksi pysäytetyistä ilmanvaihtopuhaltimista joudutaan käynnistämään suunniteltua aikaisemmin ilmanlaadun heikennyttyä jossain osassa rakennusta tavanomaista suuremman käyttäjämäärän johdosta. Akusta otettavan tehon ja energian avulla liittymispisteen teho voidaan pitää suunnitellulla tasolla ja välttää ylimääräisen energian hankinta kalliin käyttötunnin aikana.

#### Akut ja muut joustoresurssit sähkömarkkinoilla

Perinteisten sovelluskohteiden rinnalle on akuille muodostunut myös uusia sovelluskohteita, joiden avulla akun kustannuksia voidaan pyrkiä alentamaan. Sähköenergian hankinnan osalta voidaan koko hankintaketjussa saavuttaa säästöjä, jos osa joustoresursseista hyödynnetään kulutustaseen ylläpitämiseen. Tällöin ajatuksena on, että osa akun, kysyntäjouston tai ohjattavan tuotantoyksikön kapasiteetista jätetään hyödyntämättä energian hankinnassa ja se varataan kysyntäennusteiden korjaamiseen, jotta ennalta sovittu tase voidaan toteuttaa mahdollisimman tarkasti. Tällainen toimintatapa vaatii yhteistyötä hankintaketjun päässä olevan tasevastaavan kanssa, jonka käyttöön vapaaksi jätettävä joustoresurssi annetaan, koska tasehallintaa ei toteuteta yksittäisen kuluttajan tasolla, vaan tasevastaavan kaikkien kuluttajien kesken. Jotta tilanne olisi kannattava molemmille osapuolille, on tasehallinnan kustannusten alenemisen johdettava myös kiinteistön energian hankintakustannusten alenemiseen tai muunlaiseen taloudelliseen kompensaatioon. Tasehallintaa voidaan tuki myös parantaa tarkentamalla kysyntäennusteita, johon projektissa kehitetty Kampusareenan monitorointijärjestelmä tarjoaa erinomaisen mahdollisuuden jopa yksittäisten laitteiden tasolla, kun etsitään ennustevirheiden syitä tai kehitetään kokonaan uusia ennustemenetelmiä.

Toinen mahdollisuus hyödyntää joustoresursseja energianhankinnan kustannusten alentamiseksi on kysyntäjouston hyödyntäminen kysyntätarjousten jättämisen yhteydessä päivää edeltävälle markkinalle, mikä on pääasiallinen fyysisen sähköntoimituksen hankintakanava. Tällöin kaupankäynnin hinnoja ei vielä tunneta, joten ne joudutaan ennustamaan. Hintaennusteiden ollessa erityisen epävarmoja

tai ennusteiden ollessa erityisen korkeita, voidaan joustoresurssien avulla pienentää sähköhankinnan hintariskiä. Tässä tapauksessa joustoresurssit annetaan sähkökauppaa käyvän osapuolen käyttöön. Korkean hinnan aikana kaupankäyntihinta on erityisen herkkä erityisesti kysyntätarjousten volyymille, koska sekä tuotannon että kulutuksen tarjouskäyrät ovat lähes pystysuorat indikoiden, että edullinen tuotantokapasiteetti on loppumassa ja kysyntäpuoli on valmis maksamaan sähköstä lähes mitä tahansa joustamattoman kulutuksen ja kiinteiden tariffien seurauksena. Yksittäisen tunnin hintapiikin ennustaminen on kuitenkin äärimmäisen vaikeaa ja toisaalta hintatason noustessa yleisesti, kysyntäjoustopuolen hyödyntämiselle jää vähemmän pelivaraa, koska jousto on käytännössä kulutuksen siirtämistä joltakin tunnilta jollekin toiselle tunnille. Jotta ajatus toimii, tarvitaan hyvin ennustettavia ja vaihtelevia kaupankäyntihintoja. Samaa ideaa voidaan soveltaa myös päivän sisäiselle markkinalle (Pohjoismaissa Elbas), mutta sen likviditeetin vähäisyyden takia hintaennusteet ovat entistä haastavampia toteuttaa tarkasti.

Sähköhankinnassa on keskeistä miettiä myös, minkä verran sähköä hankitaan miltäkin markkinapaikalta ja minkälaisilla tuotteilla. Strategioita tämän toteuttamiseksi on varmasti hyvin monenlaisia, mutta useimmat niistä pyrkivät minimoimaan avoimeen positioon liittyvää hintariskiä. Joustoresurssien avulla tätä hintariskiä voidaan hallita tarkemmin tai jopa hallitusti kasvattaa, jotta päästään hyödyntämään markkinoiden hintavaihteluita paremmin.

Prosumer osana energiayhteisöä ja mikroverkkoa

Kiinteistötason sähköenergian hankinnan ja siirtokustannusten minimoinnin lisäksi viime aikoina on alettu kehittää ajatusta paikallisesta energiayhteisöstä tai mikroverkosta, jossa useampi sähkön prosumer toimisivat yhdessä saman tavoitteen saavuttamiseksi kokonaisuutena ja siten hyödyntäen käytettävissä olevat joustoresurssit ja paikallinen energiantuotanto yksittäistä prosumeria tehokkaammin, minimoimaan energiayhteisön ulkopuolelta ostettavan energian ja siirron kokonaishinta, ja tarvittaessa pyrkimään energia- tai jopa teho-omavaraisuuteen paikallisesti.

Täydellisen teho-omavaraisuuden saavuttamiseksi akuilla on merkittävä rooli, koska useimmissa tulevaisuuden energiaskenaarioissa aurinkosähköllä on hyvin suuri rooli eikä sen avulla voida saavuttaa teho-omavaraisuutta jatkuvasti edes teoriassa. Energiaomavaraisuuden saavuttamiseksi aurinkosähkön rinnalle tarvitaan Suomessa jokin toinen sähköenergian lähde. On kuitenkin syytä huomata, että merkittävässä osassa maailman väkirikkaista maista aurinkosähkö ja akut yksistään riittävät energia- ja teho-omavaraisen mikroverkon rakentamiseksi. Energiayhteisön tai mikroverkon optimointitehtävä muokkautuu riippuen niiden rakenteesta ja käytettävissä olevista energiaresursseista.

Energia- ja teho-omavaraiselle energiayhteisölle tai mikroverkoille tulee lisäksi samanlaisia käyttövarmuus- ja luotettavuusvaatimuksia kuin koko sähköjärjestelmälle on asetettu. Energiayhteisön tai mikroverkon etu käyttövarmuus- ja luotettavuusmielessä on kuitenkin niiden pienessä koossa. Luotettavuus- ja käyttövarmuusmielessä mikroverkon akkujärjestelmää ei kannata perustaa yhden suuren akkuyksikön vaan modulaarisen pienemmistä akkujärjestelmistä koostuvan kokonaisuuden varaan. Sama ajattelu näkyy vastaavasti tuotantoyksiköiden ja kysyntäjoustopuolen kohdalla. Energiayhteisössä tai mikroverkossa energia- ja joustoresurssit ovat hajautuneet prosumereiden kiinteistöihin, vaikka muodostavatkin yhden suuren kokonaisuuden keskinäisten sopimusten ja mikroverkon hallintajärjestelmän kautta.

Erityisesti saarekekäyttöön kykenevässä mikroverkossa korostuvat myös sähkönlaatukysymykset ja vaatimukset joustoresurssien sähköteknisille ominaisuuksille. Mikroverkon pienen koon vuoksi (joustoresursseja vähän) yksittäisten resurssien ominaisuudet korostuvat sekä hyvässä että pahassa. Entistä pienempi sähkönlaadun häiriölähde voi häiritä koko järjestelmää ja pahimmassa tapauksessa sotkea sen toiminnan kokonaan. Parhaimmista tapauksista inverttereihin voidaan sisällyttää ominaisuuksia, joilla parannetaan mikroverkon sähköteknistä laatua verkon häiriötapauksissa. Näitä ominaisuuksia voidaan hyödyntää myös, kun mikroverkko on kytkettynä muuhun sähköjärjestelmään, jotta mikroverkko täyttää järjestelmätekniiset liittymisehdot tai järjestelmäpalveluiden, kuten erilaisten re-

servien, tekniset ominaisuudet. Käytännössä mikroverkoille ei ole vielä olemassa erillisiä liittymisehtoja, mutta voimalaitosten järjestelmäteknisiä vaatimuksia voitaneen soveltaa ainakin osittain myös mikroverkkoihin. Saarekekäytössä erityisesti inverttereiltä vaaditaan erityisominaisuuksia, jotta ne voivat luoda jännitteen jännitteettömään verkkoon keskeytyksen kautta tapahtuvan saarekkeeseen siirtymisen jälkeen ja toimimaan saarekemoodissa tukien jännitteen ja taajuuden ylläpitämistä esimerkiksi perinteisellä droop-säädöllä. Lisäksi niiden olisi hyvä kyetä kommunikoidaan ja vastaanottamaan uusia säädön asetusarvoja ylemmän tason säätäjiltä, jotta joustoresurssien tekninen ja taloudellinen koordinointi onnistuisi.

Joustoresurssien aggregointi ja muut uudet mahdollisuudet joustoresurssien hyödyntämiseksi

Paikallista energiayhteisöä tai mikroverkkoa laajempi yhteistyö saavutetaan aggregaattorikonseptin myötä. Aggregaattori kokoaa hajautetut joustoresurssit yhteen ja käy niillä kauppaa eri sähkömarkkinoilla. Aggregointia tarvitaan, koska yksittäisen toimijan on käytännössä mahdotonta osallistua suoraan sähkömarkkinoille korkeiden kustannusten, tarvittavan tietotaidon puuttumisen takia ja lisäksi monilla markkinoilla tarjottava minimikapasiteetti on tyypillisiä hajautettuja joustoresursseja suurempi. Aggregaattori voi koota yhteen maantieteellisesti laajallakin alueella olevia resursseja ja muodostaa niistä yhdessä tarjouksia esimerkiksi säätösähkö- ja reservimarkkinoille päivää edeltävien ja päivän sisäisten markkinoiden lisäksi. Akkujärjestelmän rooli aggregoidussa joustoresurssissa on toimia riittävän joustavana resurssina joustotavoitteiden saavuttamiseksi, jotta yksittäisten joustoresurssien ominaisuuksiin (esim. resurssin saatavuus haluttuna ajanhetkenä tai vasteaika) liittyvät epävarmuudet eivät johtaisi ylimitoitettuun joustoresurssien kapasiteettiin. Täysin ohjattavissa oleva akkujärjestelmä pienentää kokonaisjärjestelmän ominaisuuksien hajontaa ja siten aggregoituun kokonaisuuteen voidaan hyväksyä mukaan myös epävarmempia kysyntäjoustoresursseja kokonaisuuden siitä liiaksi kärsimättä.

Soveltamalla aggregointikonseptia energiayhteisöön päädytään ns. virtuaaliseen energiayhteisöön. Tällä tarkoitetaan energiayhteisöä, joka ei sijaitse fyysisesti samalla maantieteellisellä alueella, eikä yhteisöllä siten ole yhtä yhteistä sähköverkon liittymispistettä. Tällainen energiayhteisö voi yhteisen energianhankinnan lisäksi käydä keskinäistä kauppaa energiasta tai joustoista, ja aggregoida joustoresursseja eri markkinoille kuten aggregaattorikonseptissa. Keskinäinen kaupankäynti voi olla esimerkiksi:

- Yhteisomisteisen aurinkosähkövoimalan netottaminen kunkin osakkaan sähkönkulutukseen omistusosuuksien suhteessa ja siten vähentää yhteisön ulkopuolelta ostettavan sähköenergian määrää.
- Prosumerin ylijäämäisen aurinkosähkön myyminen energiayhteisön muille jäsenille ja siten prosumerkohtaisten joustoresurssien tarpeen tai hyvin edullisesti yhteisön ulkopuolelle myynnin minimoimista.
- Yhteisomisteisen akkujärjestelmän allokoimista prosumereiden ylijäämäaurinkosähkön varastointiin ja hyödyntämiseen myöhemmin. Aurinkosähkön yleistettyä sen marginaaliarvo sähkömarkkinoilla voi muuttua jopa negatiiviseksi, kun aurinkosähköä on tarjolla markkinoilla liian paljon kulutukseen nähden. Samalla akun avulla voidaan ylläpitää energiayhteisön kulutusta-setta, jolloin sähkönhankinnan kustannuksen pienenevät.

Tulevaisuudessa kantaverkkotason järjestelmäpalveluiden rinnalla voi olla myös paikallinen jousto-markkina jakeluverkkoyhtiön tarpeisiin esimerkiksi vikatilanteiden ja paikallisten pullonkaulatilanteiden (congestion management) hallintaan. Ajatuksena molemmissa on, ettei kyseisiin tilanteisiin tarvitse varautua täydellä varasyöttöyhteyden tai tehonsiirron kapasiteetilla kaikkialla, vaan osa kapasiteetista voidaan ostaa paikallisilta joustoresursseilta esimerkiksi saarekekäytön mahdollistamiseksi halutulla alueella vikatilanteen seurauksena tai tehonsiirron rajoittamiseksi kulutus- tai tuotantopiikin aikana joko kulutusta tai tuotantoa ohjaamalla. Jakeluverkossa ongelmana on, että joustoresurssien täytyy sijaita ratkaistavan ongelman kannalta oikealla alueella, mikä voi olla huomattavan pienikin alue. Tällöin joustoresurssien oikea-aikainen saatavuus (availability) on erittäin kriittistä verkon hallin-

nan kannalta. Paikallisen jakeluverkon hallinnan mahdollistavat joustoresurssit tulisikin priorisoida tähän tarkoitukseen, kuitenkin siten, ettei niiden pääsyä muille markkinoille estetä. Yhtä lailla tärkeää on suunnitella paikallinen joustomarkkina siten, etteivät kriittisissä paikoissa sijaitsevat joustoresurssit pääse väärinkäyttämään määräävää markkina-asemaansa.

Oma erityiskohteensa joustoresurssien hyödyntämisen suhteen tulevat olemaan sähköautot. Niiden erityispiirre on, että niitä voidaan hyödyntää useassa eri fyysisessä paikassa. Tyypiesimerkki tällaisista tilanteista on työmatkaliikenne, missä autoa ladataan sekä kotona että työpaikalla. Ajoittamalla lataus oikein, voidaan sähköauton avulla osallistua kaikkiin edellä kuvattuihin kysynnänjoustosovel-  
luksiin. Jos sähköautossa ja sen laturissa on V2G (Vehicle to Grid) –ominaisuus, voidaan sähköautoa hyödyntää kuten akkujärjestelmää niillä reunaehdoilla, joita auton käyttäjä järjestelmälle sallii (esim. auton akun latausasteen oltava xx % klo xx:yy). Koska akun ylimääräiset lataus- ja purkukerrat lyhennävät akun elinikää, tulee sähköauton omistajan saada tästä jonkinlainen korvaus, kun kiinteistön omistaja, aggregaattori tai energiayhteisö hyödyntää sähköautoa joustoresurssina edellä kuvatuilla tavoilla.



### 3 Prosumerin omien resurssien kannattavuus

Tässä luvussa on tarkasteltu prosumerin omien resurssien kannattavuutta erityisesti omakoti- ja kerrostalojen muodostamien mikroverkkojen ja energiayhteisöjen osalta tilanteessa, jossa prosumerilla on oman pientuotannon (aurinkosähköjärjestelmä) lisäksi myös akkuvarasto. Lisäksi on tarkasteltu suuremman kokoluokan mikroverkon verkkopalvelumaksun (siirtotariffi) rakenteiden kehittämistä.

Jokaisen sähköjakeluverkkoyhtiön asiakkaan ja mikroverkon, joka on kytkettynä julkisen verkkoyhtiön jakeluverkkoon, tulee maksaa verkkoyhtiölle verkkopalvelumaksua (siirtomaksua) verkkopalvelusopimuksessa sovitulla tavalla. Jakeluverkkoyhtiön siirtotariffeissa on tyypillisesti perusmaksu (€/kk), ajasta riippuvia tai riippumattomia kulutusmaksuja (€/kWh), sekä mahdollinen tehomaksu (€/kW) perustuen erikseen määritettävään asiakkaan huipputehoon. Lisäksi voi olla myös loistehon siirtoon perustuvia maksuja (€/kVAr). Verkkopalvelumaksuilla jakeluverkkoyhtiö kattaa verkon rakentamis-, huolto-, ylläpito- ja korjauskustannukset. Lisäksi asiakkaat maksavat verkkoyhtiölle liittymän rakentamisvaiheessa liittymismaksun. Verkkopalvelumaksun ja verojen lisäksi asiakas ostaa sähköenergiansa sähkön vähittäismyyjältä, jonka tuotteissa on kilpailuilla markkinoilla mahdollisuus erilaisiin variaatioihin. Esim. sähkön tukkumarkkinahintaa seuraava tunti hinnoittelu on yleistymässä asiakkaiden keskuudessa.

#### 3.1 Sähkön varastoinnin kannattavuus omakotitaloissa

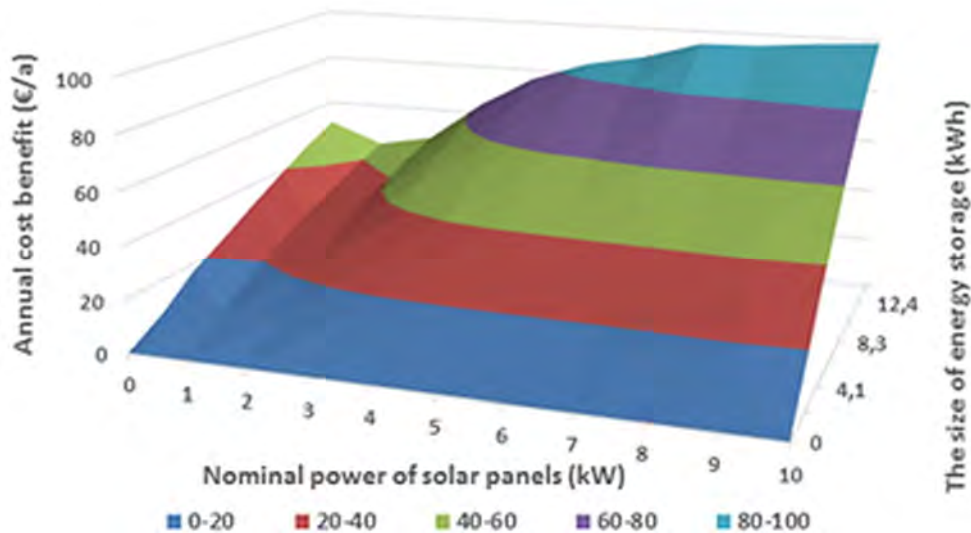
Sähkövarastot tulevat olemaan tärkeä osa älykästä sähkökäyttöä tulevaisuudessa. Niiden avulla sähkön käytöstä saadaan joustavampaa ja ohjattavampaa. Akut soveltuvat hyvin omakotitalon sähköenergiavarastoksi. Kannattavuuden näkökulmasta akun tärkeimpiä ominaisuuksia ovat korkea hyötysuhde, pitkä käyttöikä ja edullinen hinta. Hyötysuhteeltaan ja käyttöikänsä litiumioniakut ovat parhaiten soveltuvia akkuja sähkövarastoksi omakotitaloissa. Kannattavuutta heikentää toistaiseksi niiden korkea hinta.

Aurinkopaneelien asentaminen omakotitalojen yhteyteen on lisääntynyt voimakkaasti viime vuosina. Aurinkosähkön tuotannon huipputeho ajoittuu keskipäivälle, kun taas tyypillinen omakotitalon kulutus ajoittuu pääasiassa aamulle ja illalle. Aurinkopaneelit pyritään mitoittamaan välttämättä oman kulutuksen ylittävää tuotantoa. Ylijäämä voidaan myydä sähkönjakeluverkon kautta sähkön vähittäismyyjälle, mutta siitä saatava korvaus on huomattavasti pienempi kuin ostosähkön hinta. Ostosähköstä laskutetaan vähittäismyyjältä ostetun sähköenergian lisäksi jakeluverkkoyhtiön siirtomaksu ja sähkövero, kun itse tuotetusta sähköstä saatava korvaus myydessä sisältää vain sähköenergian hinnan. Tämä antaa kannusteen varastoida sähköä ylituotannon aikana ja käyttää se myöhemmin omassa kulutuksessa korvaamaan ostosähköä (Koskela et al. 2017).

Omakotitalossa asuva kuluttaja voi valita sähköenergian ostamiseen sähkön markkinahintaan perustuvan sopimuksen, jolloin sähkön hinta muuttuu tunneittain. Tällöin tulee kannuste siirtää kulutusta kalliilta tunneilta edullisille tunneille. Akkua ladataan edullisen tunnin aikana ja puretaan kalliilla tunnilla. Tuntien välinen hintaeron tulee kuitenkin olla niin suuri, että se korvaa häviöiden ja akun kulutuksen aiheuttamat kustannukset (Koskela et al. 2017). Useat sähköverkkoyhtiöt suunnittelevat siirtymistä tehopohjaisiin tariffeihin myös pienasiakkaiden osalta. Kolme jakeluverkkoyhtiötä on tehopohjaisen maksukomponentin sisältävän siirtotariffin jo ottanutkin käyttöön. Perusmaksun ja kulutukseen perustuvan energiamaksun rinnalle on tullut huipputehoon perustuva tehomaksu. Tämä luo kannusteen laskea huipputehoa, joka voidaan tehdä purkamalla akkua huippukulutuksen aikana (Koskela et al. 2018a).

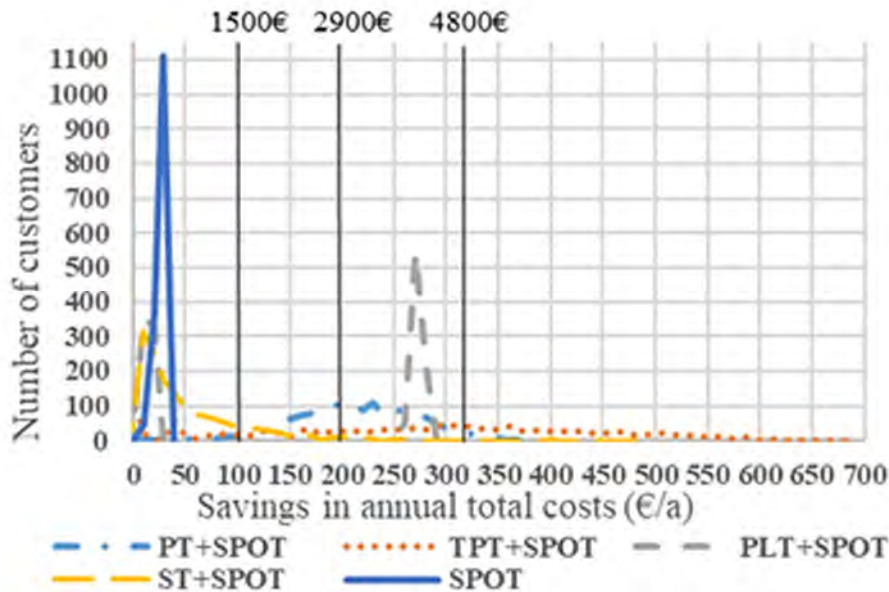
Tutkimuksessa selvitettiin sähköenergian varastoinnin kannattavuutta omakotitaloissa, kun varastoa hyödynnetään eri ohjaustavoitteisiin. Kuvassa 3.1 on esitetty eri kokoisilla litiumioniakuilla saatava vuotuinen kustannushyöty tyypillisessä sähkölämmitteisessä omakotitalossa asuvalla kuluttajalla, kun akkua käytetään aurinkosähkön oman käytön tehostamiseen ja markkinahintaan perustuvaan ohjauk-

seen. Kustannushyötyä on tarkasteltu myös eri kokoisilla aurinkopaneeleilla. Kuvassa esitetty kustannushyöty kuvaa akulla saatavaa lisähyötyä, joka tulee aurinkopaneelin oman hyödyn lisäksi. Kuvasta nähdään, että pieni aurinkopaneeli (1-2 kW) pienentää akulla saatavaa hyötyä, mutta paneelikoon kasvaessa (3-6 kW) hyöty kasvaa voimakkaasti. Kun paneelikokoa kasvatetaan edelleen (7-10 kW) kustannushyödyn kasvu on enää hyvin vähäistä. Suurin hyöty suhteessa akun kokoon saadaan 4-6 kWh akulla ja tällaisesta akusta paras hyöty suhteessa aurinkopaneelin kokoon saadaan 4-5 kW aurinkopaneelilla. Tarkastelussa on käytetty todellisten asiakkaiden kuormituskäyriä simulointimallin kehityksessä ja laskelmissa.



Kuva 3.1. Tyypillisen sähkölämmittäjän vuotuinen kustannushyöty akulla (Koskela 2017)

Huipputehon laskemisen kannattavuutta akulla tarkasteltiin neljällä erilaisella jakeluverkkoyhtiön tariffirakenteella. Pieniasiakkaan tehotariffi (PT) vastaa sähköverkkoyhtiöiden uusia tariffeja, joilla tehomaksu määräytyy kuukauden suurimman tehon mukaan. Kynnystehotariffissa (TPT) tehosta laskutetaan vasta, jos kynnysteho (5 kW) ylittyy. Tehorajatariffissa (PLT) asiakkaille on määritetty tehoraja ("kaista"), josta maksetaan vuotuinen vakiohintaa ja muita maksuja ei ole. Porrastariffissa (ST) portaan (5 kW) ylittäviltä tunneilta maksetaan korkeampaa sähkön hintaa kuin muulloin. Tutkimuksessa tarkasteltiin suuren asiakasjoukon (1525 asiakasta) kustannushyötyjä, kun 6 kWh akkua käytettiin huipputehon laskemiseen eri jakeluverkkotariffien tarpeisiin ja rinnalla sähkön vähittäismyyjän energiatuotteen markkinahintaan perustuvaan ohjaukseen (SPOT). Tulokset asiakkaiden kustannushyötyjen teoreettisista maksiarvoista on esitetty jakauma kuvassa 3.2. Todellisuudessa kustannushyödyt jäävät pienimmiksi, koska ohjaukseen tarvittava kulutuksen ennuste ei ole ideaalinen. Kuvaan on merkitty kolme mahdollista akkujärjestelmän hintaa niiden vuotuisten kustannushyötyjen kohtiin, jolloin akkujen hankinta on kannattavaa. Kuvasta nähdään, että akun käyttö pelkkään markkinahintaperusteiseen ohjaukseen ei ole kannattavaa. Tehopohjaisilla tariffeilla sähkövaraston hankinta voi olla kannattavaa ja osalla asiakkaista hyvinkin kannattavaa. Tulokset riippuvat tariffien rakenteista ja hintatasoista. Tarkasteluissa käytetyt tariffirakenteet ja tariffien maksukomponentit perustuvat raportissa (Honkapuro et al. 2017) esitettyihin aiheuttamisperiaatteen mukaisesti määritettyihin tarffeihin.



Kuva 3.2. Asiakkaiden kustannushyötyjen jakauma erilaisilla tariffirakenteilla yhdistettynä markkina-hintaan perustuvaan ohjaukseen (Koskela 2018a)

### 3.2 Sähkön varastointi ja aurinkosähkö kerrostaloissa

Digitaalinen palvelualusta mahdollistaa kerrostalon, muun isomman kiinteistön tai yhteisön muodostaman mikroverkon, jonka sisällä energiaresurssien vaihdanta perustuu jakamistalouteen pohjautuviin malleihin ja joka näyttäytyy yhtenä kokonaisuutena osana laajempaa sähköverkkoa ja -markkinaa. Esimerkiksi kerrostalon muodostamassa kokonaisuudessa olisi tällöin "jakamistalouden" resursseina huoneistokohtaiset joustavat kuormat, kiinteistöön integroitu pientuotanto (aurinkopaneelit), hissi-käytöt, energiavarastot, sähköautojen lataus, paikallinen maalämpö jne. Tällainen uudentyypinen hierarkkinen ratkaisu edellyttää sekä digitalisaation mahdollistamia mittauksia, ohjauksia ja uudenlaisia IoT-pohjaisia palvelualustoja että lainsäädännöllisiä muutoksia mm. sähkömarkkinalakiin. Uudenlainen toimintamalli antaisi vauhtia asiakkaiden aktivoitumiselle, uusiutuvien energiateknologioiden lisääntymiselle ilman tukia sekä koko energijärjestelmän resurssitehokkuuden parantamiselle. Lisäksi kerrostalo-kokoluokan mikroverkon energiaresurssien hallinta voisi tarjota mahdollisuuden muodostaa suomalaisista automaatio-, tietojärjestelmä- ja energia-alan toimijoista "vientiklusteri", joka tarjoaisi älykkäiden rakennusten energiahallintajärjestelmäkokonaisuutta globaaleille markkinoille.

Kerrostaloissa on tyypillisesti yksi liittymä, jonka sisällä asunnoille sekä kiinteistösähkölle on erilliset käyttöpaikat, joille on erilliset sähkö sopimukset. Tällöin kerrostaloon asennettavien aurinkopaneelien tuotto voidaan hyödyntää ainoastaan kiinteistön kuormituksissa nykyisen sähkömarkkinalain mukaan, koska kiinteistöverkon kautta huoneistoon syötettävä aurinkopaneelien tuottama energia summautuu energiamittarissa jakeluverkkoyhtiön verkosta ostettavaan sähköenergiaan, jolloin siitä pitää maksaa sekä siirtomaksu että sähkövero. Myös sähkövaraston kapasiteettia voidaan hyödyntää vain kiinteistösähkön käyttöpaikassa. Kerrostalosta voidaan kuitenkin muodostaa myös edellä kuvatun mukaisesti energiayhteisö, jonka sisällä asunnot ja kiinteistösähkö ovat. Tämä on lain mukaan mahdollista, kun asuntojen omistajat tähän suostuvat ja heillä on mahdollisuus irtautua yhteisöstä halutessaan ja kilpailuttaa oma sähkö sopimuksensa. Energiayhteisöllä on yhteinen sähkö sopimus erikseen sekä sähkövähittäismyyjän että jakeluverkkoyhtiön kanssa, ja kustannusten jyvittäminen asuntojen välillä tapahtuu asuntoyhtiön sisällä todellisen käytön mukaan. Tätä varten liittymän sisälle tarvitaan käyttöpaikkojen sähkön mittaus, kuten aiemminkin, mutta energiayhteisössä asuntoyhtiö vastaa mittauksen kustannuksista. Erilliset mittarit mahdollistavat asuntojen irtautumisen yhteisöstä kilpailutusmahdollisuuden mukaisesti.

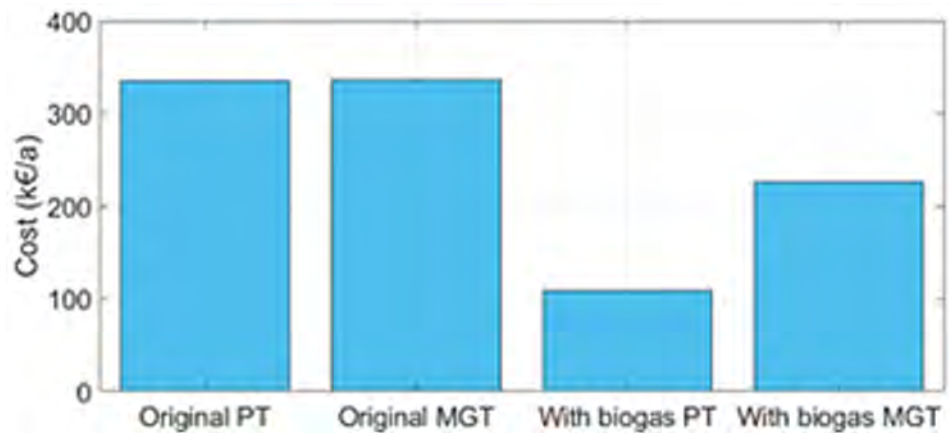
Energiayhteisössä aurinkopaneelien tuotantoa ja sähkövaraston kapasiteettia voidaan hyödyntää koko kerrostalon kulutuksessa. Tällöin aurinkopaneelit voidaan mitoittaa huomattavasti suuremmiksi kuin ilman energiayhteisöä. Tutkimuksessa huomattiin, että optimaalisesti mitoitettujen aurinkopaneelien kerrostalon energiayhteisössä ovat 2-3 kertaa suuremmat kuin ilman energiayhteisöä, riippuen aurinkopaneelien hankintahinnasta (Koskela et al. 2018b). Tarkastelut on tehty todellisesta kerrostalokohdeesta saatujen kuormitusmittausten pohjalta. Aurinkopaneelien koon kasvaminen tarkoittaa suurempaa energiaomavaraisuusastetta ja verkosta ostettavat sähkön määrä pienenee huomattavasti. Tutkimuksen toinen tärkeä huomio oli, että akun kannattavuus sähkövarastona kasvoi merkittävästi siirryttäessä energiayhteisömalliin. Kun ilman energiayhteisöä akun käyttö kerrostalossa ei ole kannattavaa, niin energiayhteisössä akku voi olla kannattava jo nykyisellään aurinkopaneelien rinnalla, riippuen sähkön ja akkujärjestelmän hinnoista.

### 3.3 Mikroverkon verkkopalvelumaksu

Jos mikroverkko on edes osittain teho- ja/tai energiaomavarainen, voivat nykyisin käytössä olevat jakeluverkkotariffit olla soveltumattomia laajemman kuvassa 2.1 esitetyn tyyppin 2 mukaisen mikroverkon verkkopalvelumaksujen laskutukseen. Liittymän rakennusvaiheessa asiakkaalle rakennetaan tietynsuuruinen kapasiteetti verkon käyttöä varten. Liittymän rakentamisen jälkeen mikroverkon operaattori voi teho- ja energiaomavaraisuudellaan saavuttaa huomattavan pienen energianoton jakeluverkosta sekä alhaisen liittymäkapasiteetin käyttöasteen, vaikka tarvittaessa, esimerkiksi mikroverkon sisältämän oman tuotannon vikaantuessa, liittymispisteen koko kapasiteetti on tarvittaessa käytössä. Tämä tarkoittaa sitä, että verkkoyhtiö ei välttämättä saa riittävää, aiheuttamisperiaatteen, mukaista tuloa mikroverkon operaattorilta tarjoamastaan verkkopalvelusta.

Yksi mahdollinen ratkaisu edellä kuvattuun tilanteeseen on, että teho ja/tai energiaomavaraisille mikroverkoille luodaan uudenlainen siirtotariffi, joka kompensoi edellä kuvatun tilanteen riittämätöntä tuloa verkkoyhtiölle. Mallia voidaan ottaa kantaverkkoyhtiö Fingridin kantaverkkopalvelumaksujen rakenteesta, jolla Fingrid veloittaa jakeluverkkoyhtiöitä siirtoverkon käytöstä. Kantaverkkotariffi sisältää mm. maksukomponentin, joka riippuu jakeluverkon sisällä olevan sähkönkulutuksen määrästä riippumatta siitä, otetaanko kulutusta vastaava energia kantaverkosta vai tuotetaanko se jakeluverkon sisällä olevilla tuotantoyksiköillä. Vastaava maksukomponentti voitaisiin ottaa osaksi uudenlaista mikroverkkotariffia ("Novel DSO network tariff for the independent network" kuvassa 2.1). Tällainen tariffi tarjoaisi edelleen kannusteita mikroverkolle kehittää energiatehokkuutta, mutta parantaisi myös jakeluverkkoyhtiön näkökulmasta kustannusvastaavuutta.

Kuva 3.3 kuvaa simuloitua esimerkkiä (Lummi et al. 2018) edellä kuvatusta mikroverkko-operaattorin verkkopalvelumaksuista (= jakeluverkkoyhtiön tulo mikroverkko-operaattorilta) neljässä eri skenaariossa. "Original PT" tarkoittaa sitä, että mikroverkolla ei ole omaa tuotantoa vaan ainoastaan kulutusta, ja mikroverkon verkkopalvelutariffina sovelletaan nykyisten tariffien kaltaista keskijännitetehotariffia (PT = Power Tariff). "Original consumption with MGT" tarkoittaa muuten samaa kuin edellinen, paitsi että käytössä olisi uudenkaltainen edellä kuvattu mikroverkkotariffi (MGT = Micro Grid Tariff), jonka maksukomponentit on määritelty esimerkin tarpeisiin niin, että kun mikroverkolla ei ole omia tuotanto- ja varastoresursseja, ovat kustannukset näissä kahdessa tapauksessa saman suuruiset. Kaksi muuta skenaariota esittävät mikroverkon kustannuksia edellä mainitulla kahdella eri tariffilla, mutta siten, että mikroverkkoon tuodaan biokaasuvoimala, joka tekee mikroverkosta huomattavan teho- ja energiaomavaraisen. Perinteisellä tehotariffilla verkkopalvelumaksuista tuleva tulo olisi verkkoyhtiölle huomattavan pieni (vähennys > 60%), mutta mikroverkkotariffilla jakeluverkkoyhtiön tulomuodostusta saadaan vietyä aiheuttamisperiaatteen mukaiseen suuntaan viemättä kuitenkaan kaikkea biokaasuvoimalan tuomaa siirtomaksujen vähentymisestä syntyvää kustannushyötyä. Laskennassa on käytetty todellisen verkkoyhtiön keskijännitetariffin maksukomponentteja sekä todellisen suuremman kokoluokan asiakkaan tuntikuormituskäyrää.



Kuva 3.3. Mikroverkon maksamat verkkopalvelumaksut eri skenaarioissa.

## 4 Kampusareenan pilotti

Projektissa tutkittavat liiketoiminta- ja tekniset ratkaisut edellyttävät tiedon keräämistä useasta lähteestä, muuntamista yhteiseen muotoon ja tarjoamista sovelluksille ja käyttäjille. Tätä varten projektissa kehitettiin ja pilotoitiin sitä varten rakennettua ICT-järjestelmää. Pilotti toteutettiin käyttäen alustana Kampusareena-nimistä rakennusta (kuva 4.1), joka sijaitsee TTY:n kampusalueella.

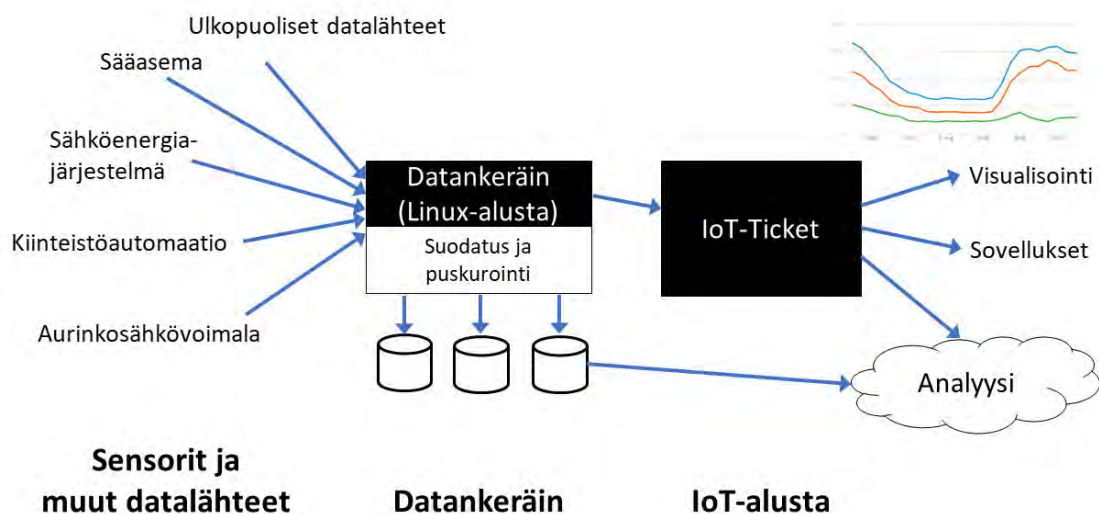


Kuva 4.1. Kampusareena.

Tässä luvussa käydään läpi tutkimusprojektissa rakennetun ICT-järjestelmän arkkitehtuuria ja toimintaa sekä kerrotaan pilotissa käytetyistä datalähteistä. Lisäksi käsitellään ICT-järjestelmään suoraan liittyvät projektin aikana tehdyt sovellukset, jotka liittyvät datan visualisointiin ja analysointiin sekä akun ohjaamiseen. Luvussa 4.6 on käsitelty pilotin aikana ilmenneitä huomioita ja kokemuksia.

### 4.1 ICT-järjestelmän arkkitehtuuri

Projektin aikana kehitetyn ja pilotoidun tiedonkeräysjärjestelmän yleisen arkkitehtuurin rakennetta on hahmotettu kuvassa 4.2. Järjestelmän kehityksessä tavoitteena on ollut saada aikaan systeemi, joka pystyy keräämään ja tallentamaan kaiken eri datalähteistä saatavan tiedon yhdenmukaiseen muotoon sekä välittämään valitun tiedon edelleen suuremmalle käyttäjäkunnalle IoT-alustan kautta. Koska tiedonsiirrossa IoT-alustalle on aina jonkin verran viivettä, laitteiden ohjausta varten systeemin täytyy myös mahdollistaa nopea tiedonsaanti suoraan datankeräyskomponentilta ohjausohjelmalle. Laitteen ohjausohjelman liittäminen systeemiin on arkkitehtuuritasolla kuvattu kuvassa 4.3.



Kuva 4.2. Kampusareenan pilotin ICT-järjestelmä.

Kuvassa 4.2 esitetty ICT-järjestelmän arkkitehtuuri jakaantuu neljään osakokonaisuuteen:

1. Sensorit ja muut datalähteet

Kampusareenan kiinteistöautomaatiojärjestelmässä on suuri määrä erilaisia sensoreita, joiden lähettämää dataa pilotissa kerätään. Näiden lisäksi dataa kerätään sähköenergiajärjestelmästä, säähavaintolaitteista, aurinkosähkövoimalan inverttereiltä sekä ulkoisista lähteistä (Ilmatieteenlaitoksen sääennuste, sähköverkon tilatiedot ja sähkön pörssihinnat). Eri datalähteet on esitelty tarkemmin luvussa 4.2.

Kullekin datalähteelle on järjestelmässä tehty oma adapteriohjelmansa, joka muodostaa yhteyden datalähteeseen, vastaanottaa datalähteen antaman tiedon, muokkaa tiedon yhdenmukaiseen muotoon ja lähettää sen edelleen keskitetylle datankeräysohjelmalle.

2. Datankeräin

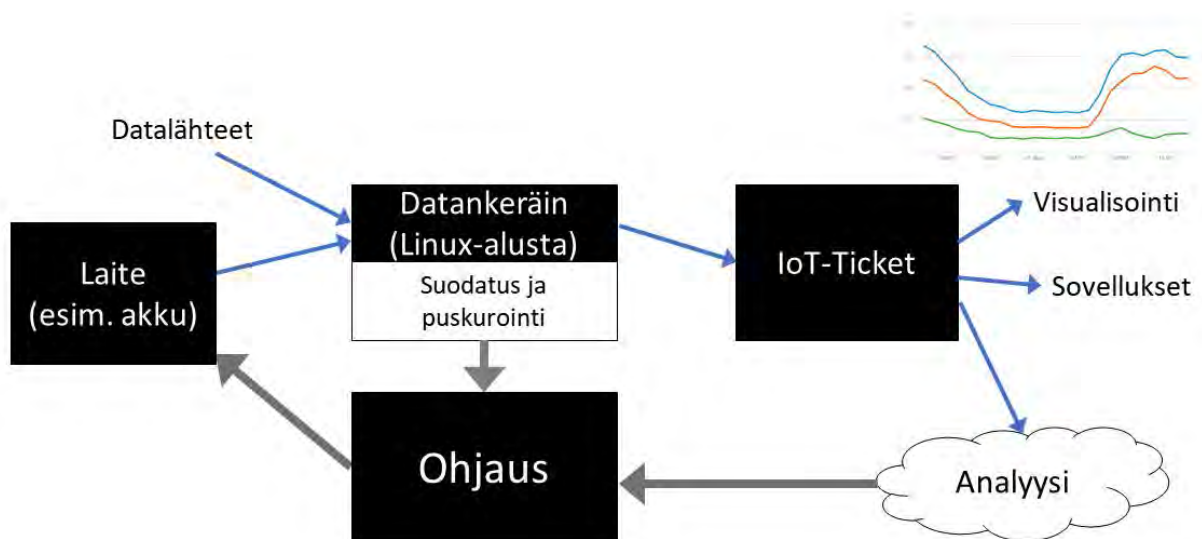
Lähes reaaliaikaisesti toimiva datankeräysohjelma on keskeinen osa järjestelmää. Se toimii protokollasovittimena sensoreiden suuntaan vastaanottaen adapteriohjelmien lähettämän datan. Datankeräin suodattaa vastaanotettua dataa (esimerkiksi poistamalla tarpeettomat yksityiskohdat sekä Kampusareenan asiakkaiden yksityisyyttä vaarantavat tiedot) ja lähettää datan edelleen IoT-alustalle. Lähetyksenopeuden optimoimista varten ohjelma tekee datalle mm. puskurointia. Samalla datankeräysohjelma myös tallentaa kaiken kerätyn datan omaan tietokantaan, johon on vain rajoitettu pääsy. Datankeräysohjelman toiminnasta ja kommunikaatiosta adapteriohjelmien ja IoT-alustan kanssa on kerrottu tarkemmin luvussa 4.3.

3. IoT-alusta

IoT-alustana projekti käytetään Wapice Oy:n IoT-Ticket-järjestelmää, jonka erityinen vahvuus on sovellusten ja visualisointien luominen ilman varsinaista ohjelmointiosaamista. IoT-alustasta ja sen käytöstä on kerrottu tarkemmin luvussa 4.4.

4. Visualisointi, analysointi ja muut sovellukset

Tähän osakokonaisuuteen kuuluvat kerättyä dataa käyttävät sovellukset (erityisesti pilotin aikana tehtiin datan visualisointiin ja analysointiin liittyviä sovelluksia). Jos sovellus tarvitsee suodattamatonta tietoa, on käyttäjien mahdollista ladata omiin järjestelmiinsä datankeräysjärjestelmän tallentamaa tietoa. Koska osa tästä tiedosta voi olla luottamuksellista, pääsy siihen on rajoitettu vain nimetyille käyttäjille. Muut sovellukset käyttävät IoT-Ticket-järjestelmään tallennettua tietoa, johon pääsee käsiksi IoT-Ticket-järjestelmän rajapintojen kautta. Rajapintojen käyttö edellyttää käyttäjätunnuksia, joita luodaan tarpeen mukaan. Pilotin yhteydessä tehdyistä sovellusdemoista kerrotaan luvussa 4.5



Kuva 4.3. Ohjaustoiminnan lisääminen ICT-järjestelmään.

Arkkitehtuuri on suunniteltu niin, että se tukee myös laitteiden ohjausta. Tyypillisesti ohjaussovellukset suoritettaisiin datankerääjässä tai sen yhteydessä. Datankerääjä on toteutettu siten, että se voi välittää ohjauksessa tarvittavan datan suoraan erilliselle ohjausohjelmalle. Datankeräimen ja ohjaussovelluksen väliin on tehtävä erillinen adapterikomponentti, joka muuntaa datankeräimen välittämän datan ohjaussovelluksen ymmärtämään muotoon. Datankeräimen välittämän datan lisäksi IoT-alustan ohessa toimivat sovellukset voivat lähettää parametreja ohjaussovelluksille tai luoda niille strategioita.

Kuvassa 4.3 on ICT-arkkitehtuuri, kun jotain laitetta myös ohjataan pelkän datankeräämisen lisäksi. Selvyyden vuoksi kuvaan ei ole merkitty datankeräimen suorittamaa datan tallennusta omaan tietokantaan. Kampusareenan pilotin yhteydessä toteutettu demo akkuvaraston ohjauksesta on esimerkki ohjaustoiminnan käytöstä ja siitä kerrotaan tarkemmin luvussa 4.5.3.

## 4.2 Datalähteet

Kampusareenan pilotissa tehdyllä datankeräysjärjestelmällä kerätään dataa useista eri lähteistä. Kampusareenalla sijaitsevia datalähteitä ovat kiinteistöautomaatiojärjestelmä, sähköenergiajärjestelmä, säähavaintolaitteet ja aurinkosähkövoimala. Lisäksi dataa on kerätty muutamasta ulkoisesta lähteestä. Datankeräys kustakin lähteestä on pitänyt käsitellä erikseen ja kullekin datalähteelle on tehty oma adapteriohjelmansa, joka hoitaa yhteydenottamisen ja tiedonvälityksen luvussa 4.3 esitellylle datankeräysohjelmalle. Kaikille lähteiltä kerätyille data-arvoille on merkitty aikaleima. Kampusareenan lähteiden tapauksessa aikaleima otetaan heti, kun uusi data-arvo on saatu adapteriohjelmaa ajavan koneen kellon mukaan. Ulkoisten lähteiden tapauksessa se saadaan suoraan lähteeltä. Taulukossa 4.1 on lueteltu käytetyt datalähteet sekä niiden kanssa käytetyt yhteystyypit.

Taulukko 4.1. Luettelo käytetyistä datalähteistä ja yhteystyypeistä lähteen ja adapteriohjelman välillä.

Datalähde	Laite / datan tarjoaja	Yhteys	Tiedonsiirtoprotokolla adapterille
Kiinteistöautomaatio (4.2.5)	Desigo (Siemens)	BACnet	UDP
Sähkön laatu (4.2.1)	Laatuvahti (Electrix)	Ethernet	TCP
Sähkön kulutus (4.2.2)	Mittauskeskitin (ISS Palvelut)	Ethernet	Modbus TCP/IP
Aurinkovoimala (4.2.3)	Aurinkosähköinvertterit (SMA)	Ethernet	Modbus TCP/IP
Sääasema (4.2.4)	TTY:n sääasema (mm. Vaisala ja Kipp & Zonen)	Internet	SQL-tietokanta
Akku (4.5.3)	TTY:n rakentama akku	CAN/Ethernet	Modbus TCP/IP
Sääennuste (4.2.6)	HIRLAM (Ilmatieteenlaitos)	Internet	HTTP (REST)
Sähkön pörssihinta (4.2.7)	Nord Pool	Internet	HTTP (REST)
Sähköverkon tila (4.2.8)	Fingrid	Internet	HTTP (REST)

Taulukko 4.2. Mittauksien määrä datalähteittäin esimerkkipäivänä 14.8.2018.

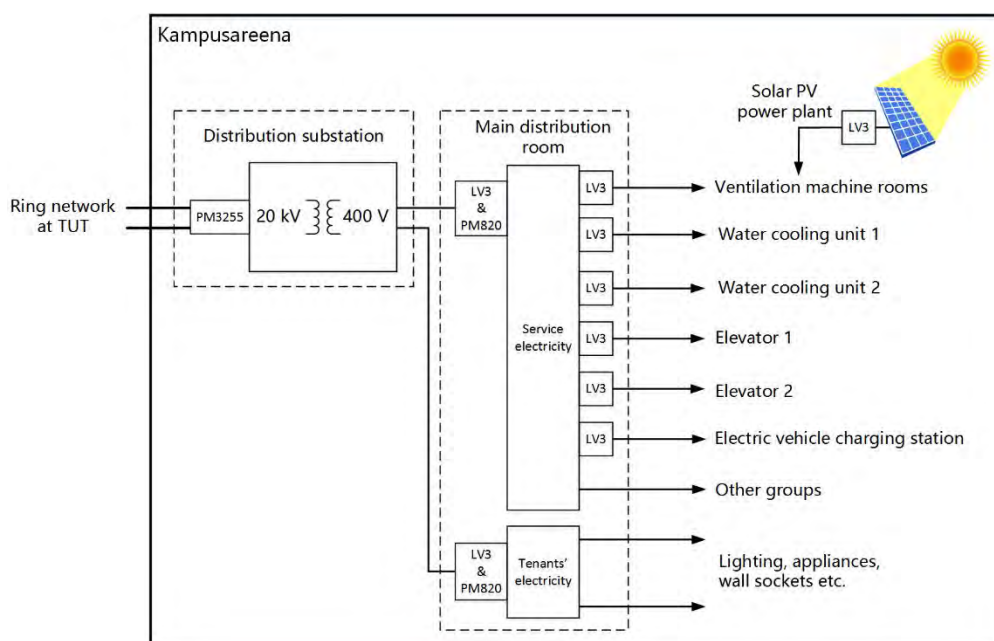
Datalähde	Muuttujien määrä	Muuttujien päivitysväli	Arvoja yhteensä vuorokaudessa	Arvoja yhteensä IoT-alustalle vuorokaudessa
Kiinteistöautomaatio	2883	vaihtelee (< 1 s – 1 d)	5 572 145	5 392 606
Sähkön laatu	1611	1 s	139 213 164	29 553 624
Sähkön kulutus	183	30 s	527 146	368 722
Aurinkovoimala	149	1 s	12 183 637	8 986 430
Sääasema	15	1 s	1 296 208	518 485
Ulkopuoliset lähteet	37	vaihtelee (3 min – 1 h)	45 366	45 366
Yhteensä	4878	vaihtelee (< 1 s – 1 d)	158 837 666 (1 838,4 / s)	44 865 233 (519,3 / s)



Eri muuttujien määriä ja eri arvojen yhteismääriä on listattu taulukossa 4.2. Luvut on laskettu 14. elokuuta 2018 tallennetusta datasta ja ne kuvaavat hyvin normaalin vuorokauden kokonaismääriä. Taulukkoon on merkitty datalähdekohtaisesti, kuinka monta eri muuttujaa lähteestä saadaan ja kuinka usein muuttujille saadaan uusia arvoja. Kiinteistöautomaatiolta saadaan uusia muuttuja-arvoja vain arvon muuttuessa, joten sen muuttujien päivitysväli vaihtelee. Muiden lähteiden kohdalla muuttujien arvoja haetaan tasaisin väliajoin. Lisäksi taulukkoon on merkitty kaikkien muuttujien arvojen kokonaismäärät yhden vuorokauden aikana sekä IoT-alustalle lähetettyjen arvojen kokonaismäärät. Yhteensä dataa saadaan keskimäärin 1 840 arvoa sekunnissa, joista reilut 500 arvoa lähetetään myös IoT-alustalle.

#### 4.2.1 Sähkön laatu

Pilotin sähköenergiajärjestelmän sähkön laatua mitataan MX Electrix Oy:n toimittamilla Laatuvahti-mittareilla, jotka on asennettu kattamaan koko Kampusareenan sähkötehojen seuranta. Yhdeksän Laatuvahti-mittaria mittaavat yhtäaikaaisesti kummankin Kampusareenan pääkeskuksen syötön muuntajalta ja monitoroivat vuokralaisten, ilmanvaihdon, jäähdytyskoneiden, hissien, sähköauton lataustolppien ja aurinkosähkövoimalan käyttäytymistä. Kuva 4.4 näyttää mittarien asennuspaikat LV3-merkinnöillä ja kuvaa yleisesti Kampusareenan sähköpääjakelun. Laatuvahti laskee laajasti jännitteen, virran ja tehon suureita mitaten myös verkon taajuuden ja siirtyneen energian. Suuret mitataan suoraan pääkeskuksen riviliittimiltä ja virtamuuntajilta nopealla 1 sekunnin intervallilla keskiarvoistamalla. Laatuvahtimittarit lähettävät mittaustulokset adapteriohjelmalle TCP-yhteydellä.



Kuva 4.4. Pilotoidun Kampusareenan sähköpääjakelu.

#### 4.2.2 Sähkön kulutus

Kampusareenan rakennusvaiheessa sähköenergiaa mittaamaan on asennettu Schneiderin energiamittareita ja tehoanalysointilaitteita. Näitä mittareita ja yleensä sähkön kulutuksen seuranta hallinnoi ISS Palvelut Oy, jonka mittauskeskittimen kautta pilotissa avautui mahdollisuus sähköenergiajärjestelmän datan keräämiseen Laatuvahtien lisäksi. Luetaan päätettiin ottaa pääkeskusten syötöt ja mitaus muuntamolta, jonne Laatuvahtia ei saatu asennettua. Loput Kampusareenan omista sähköenergiamittauksista eivät olleet tarpeellisia pilotin kannalta mm. mittarien vaatimattomien ominaisuuksien vuoksi.

sien ja vaihtelevan kuormien ryhmittelyn vuoksi. Luetut Schneiderin mittarit löytyvät kuvasta 4.4 malliniemensä (PM3255 ja PM820) perusteella. Adapteriohjelmalle mittareiden arvot saatiin kyselyä mitauskeskittimeltä sen Modbus-palvelimelta TCP-yhteyden kautta ja niitä haettiin puolen minuutin välein. Haettuja arvoja olivat oleelliset jännitteen, virran, tehon ja energian suureet.

### 4.2.3 Aurinkovoimala

Kampusareenan kaakkois-, lounais- ja länsiseinällä oleva aurinkovoimala otettiin erikseen luetaan käyttämällä voimalan neljän invertterin tallentamia muuttujia. Jokainen invertteri päivittää sekunnin välein kaikki muuttujat, joihin lukeutuu sekä sähköisiä suureita, kuten AC- ja DC-jännitteet, -virrat ja -tehot, mutta myös voimalan tila ja tuotettu energia invertterikohtaisesti. Tämän ja voimalan piirustusten avulla voitiin määrittää eri seinien tuotanto ja seurata tehon jakautumista invertterien kesken. Adapteriohjelmalle muuttujien arvot saatiin kyselyä invertterien Modbus-palvelimilta TCP-yhteyden kautta. Kukin suure haettiin 1 sekunnin välein.

### 4.2.4 Sääasema

Hetkellinen säädata mukaan lukien lämpötila, ilmankosteus, tuulen nopeus ja suunta sekä Auringon säteilyn intensiteetti kerättiin Kampusareenan viereiseltä katolta TTY:n sähköenergiatekniikan laboratorion sääasemalla. Paikalliset mittaukset kertovat sen hetkisen Kampusareenan ulkoympäristön tilan hyvällä tarkkuudella ja tarvittavan usein. Sääasema tallentaa sekä globaalin että suoran ja heijastuvan Auringon säteilyn ympäristössään. Sääinstrumentteja sääasemaan on toimittanut mm. Vaisala ja Kipp & Zonen. Sääasemaan on sen asennusvaiheessa liitetty oma datankerääjänsä, joka lähettää mittaus tulokset PostgreSQL-tietokantaan. Kampusareenan pilottia varten tehtiin adapteriohjelma, joka hakee säätiedot tuosta tietokannasta. Sääasema tarjoaa dataa 100 millisekunnin välein, mutta pilottia varten säädataa on kerätty 1 sekunnin aikavälillä.

### 4.2.5 Kiinteistöautomaatiojärjestelmä

Kampusareenaan on asennettu Siemensin Desigo kiinteistöautomaatiojärjestelmä. Järjestelmästä saadaan laajasti erilaisia eri Kampusareenan tiloihin liittyviä muuttujia. Useimmista tiloista on saatavilla mm. sisäilman lämpötilaa, ilmanlaatua ja läsnäoloa kuvaavia suureita. Lisäksi luetaan mm. Kampusareenan ilmanvaihtoon, jäähdytykseen ja lämmitykseen liittyviä suureita. Yhteensä eri suureita on 2883 kappaletta. Suureista saadaan tieto, kun niiden arvo on muuttunut, minkä takia joistakin suureista voidaan saada esim. 100 000 arvoa vuorokaudessa (keskimäärin useammin kuin kerran sekunnissa) ja toisista vain 1 tai 2 arvoa vuorokaudessa. Osa luetuista mittauksista tulee Kampusareenan vuokralaisten tiloista, joten ne pidetään luottamuksellisina eikä niitä lähetetä esim. IoT-Ticket-alustalle. Verkkoprotokollana kiinteistöautomaatiojärjestelmässä on BACnet (Building Automation and Control networks) ja dataa keräävälle adapteriohjelmalle mittaukset saadaan UDP-protokollan mukaisina viesteinä.

### 4.2.6 Sääennuste

Ilmatieteenlaitoksen tarjoamasta avoimesta sääennustusdatasta haetaan HIRLAM-säämallin (High Resolution Limited Area Model) mukaan laskettu sääennuste Kampusareenan alueelle. Sääennuste on haettavissa ilmatieteenlaitoksen tarjoaman REST-rapajapinnan kautta ja se sisältää mm. lämpötilan, ilmanpaineen, ilmankosteuden, tuulen nopeuden ja suunnan, sademäärän, pilvisuysasteen ja säteilyvoimakkuuden. Uusi ennuste lasketaan ja haetaan kuuden tunnin välein ja se ulottuu 54 tunnin ajalle. Ennustesuureet tallennetaan järjestelmään 10 minuutin välein ennusteajalta.

### 4.2.7 Sähkön pörssihinta

Sähkön tuntikohtaiset spot-markkinoiden perusteella määräytyvät pörssihinnat Suomessa haetaan Nord Pool:n verkkosivuilta. Hinnat haetaan kerran vuorokaudessa ja seuraavan vuorokauden hinnat ovat yleensä saatavilla viimeistään kello 14 Suomen aikaa (kesäaika).

### 4.2.8 Sähköverkon tila

Fingridin tarjoamasta avoimesta sähkömarkkina- ja voimajärjestelmädatasta haetaan Fingridin tarjoaman REST-rajapinnan kautta löytyviä reaaliaikatietoja (päivitetään 3 minuutin välein) Suomen sähköverkon taajuudesta ja eri tuotantomuotojen (mm. ydinvoima, vesivoima, tuulivoima ja aurinkovoima) tuotannosta sekä kokonaiskulutuksesta ja -tuotannosta. Lisäksi haetaan tunnin välein päivittyvä kokonaiskulutusennuste ja tuotantoennusteet aurinko- ja tuulivoimalle. Ennusteet ulottuvat vähintään 24 tunnin päähän.

## 4.3 Datankeräin

Datan kerääminen datalähteiltä yhdenmukaiseen muotoon tarvitsee kahta osakokonaisuutta: adapteriohjelmat, jotka sovittavat eri tietolähteiden protokollat järjestelmään, ja erillinen keskitetty datankeräinohjelma, joka kokoaa datan yhteen ja hoitaa sen tallennuksen ja lähetyksen IoT-alustalle. Projektissa datankeräyskokonaisuuden eri ohjelmat olivat kaikki ajossa TTY:n tutkimusverkossa samassa virtuaalisessa Linux-ympäristössä. Laitteistolla ei järjestelmän toiminnan kannalta ole juuri merkitystä edellyttäen kuitenkin, että tarvittavat yhteydet ajoympäristön ja mittalaitteiden sekä IoT-alustan välillä ovat toteutettavissa.

Jokaiselle datalähteelle on oma adapteriohjelmansa, joka kommunikoi datankeräinohjelman kanssa UDP-protokollan mukaisten viestien avulla. UDP-protokollan käyttö on valittu viestinvälitykseen, koska se on nopea ja lähes kaikilla ohjelmointikielillä on tuki UDP-viestien lähettämiseen. Adapteriohjelmat lähettävät keräämänsä datan datankeräinohjelman haluamassa muodossa UDP-viestinä siten, että yksi viesti saattaa sisältää useamman muuttuja-arvon. Koska UDP-protokollassa ei itsessään ole varmistusmekanismeja, on pilotin järjestelmään lisätty datan häviämisen välttämiseksi oma varmistusmekanismi varmistusviestien ja väliaikaisen tiedostotallennuksen muodossa.

Kaikki projektissa toteutetut adapteriohjelmat sekä puskurointiohjelma on kirjoitettu Python-ohjelmointikielellä, jonka etuna on melko yksinkertainen ohjelmasyntaksi. Ei ole kuitenkaan mitään estettä tehdä uudelle datalähteelle adapteriohjelma jollain muulla ohjelmointikielellä, kunhan kielellä on tuki UDP-protokollan mukaisten viestien lähettämiseen.

Varsinaisen keskitetyn datankeräinohjelman päätehtävänä on adapteriohjelmien lähettämän datan vastaanottaminen, tallentaminen ja IoT-alustalle lähettäminen. Dataa vastaanotettaessa muuttuja-arvojen järkevyyden tarkastaminen on adapteriohjelmien vastuulla eikä datankeräin enää tee erillisiä tarkistuksia. Kaikki vastaanotettu data tallennetaan puskurointiohjelman toimesta aikajärjestyksestä omaan tietokantaan, johon annetaan pääsy vain tarvittaessa. Pilotissa tämän raakadatan tallennuksessa oli käytössä hyvin yksinkertainen tietokantamalli, mutta tarvittaessa datan tallennusmuotoa on mahdollista muuttaa tarpeiden mukaan.

Ennen IoT-alustalle lähetystä datasta suodatetaan tarpeettomat yksityiskohdat sekä luottamuksellinen tieto. Datan lähetys IoT-alustalle tehdään datapaketteina mahdollisimman tehokkaasti käyttäen alustan tarjoamaa REST-rajapintaa. Tähän kohtaan on tehty erilaisia optimointimekanismeja, jotka liittyvät mm. lähetettävien pakettien kokoon, yhtäaikaisten lähetysten määrään ja datan järjestämiseen ennen lähetystä.

Edellä mainittujen tehtävien lisäksi datankeräin pitää kirjata kunkin mittauksen uusimmista arvoista, joita on mahdollista kysellä reaaliaikaisesti ohjelman ulkopuolelta (käytetään Kampusareenan lohkoketju -demossa, luku 5.3). Tarvittaessa datankeräin voi myös välittää valittua dataa suoraan ulkopuoliselle ohjelmalle (käytetään akkuvaraston ohjaus -demossa, luku 4.5.3).

Taulukossa 4.2 on listattu IoT-alustalle lähetettävien arvojen määrää yhden vuorokauden aikana. Taulukon mukaisella datamäärällä (vajaat 45 miljoonaa arvoa vuorokaudessa) yhtäaikaisten datapakettilähetysten määrä on ollut keskimäärin 4, datapakettien koko keskimäärin noin 2600 arvoa ja yhden datapaketin läpimeno on keskimäärin mennyt noin 19 sekuntia. Väliaikaisia vaihteluita ilmenee useista syistä: mm. joinakin hetkinä dataa tulee normaalia enemmän, yhteys IoT-alustaan ei hetkellisesti toimi tai toimii normaalia hitaammin tai järjestelmäympäristö toimii jostain muusta syystä normaalia hitaammin.

## 4.4 IoT-alusta

Kampusareenan pilotin ICT-järjestelmässä käytettiin IoT-alustana Wapice Oy:n IoT-Ticket-alustaa. IoT-Ticket-alustassa jokaista tallennettavaa muuttujaa varten tehdään tietosolu. Tietosolu kuuluu aina johonkin laitteeseen ja jokainen tietosolu sisältää tiedon muuttujan tietotyypistä ja mittayksiköstä. Lisäksi tietosoluun liittyy polkutieto, jonka avulla samaan laitteeseen kuuluvat tietosolut voidaan jaotella puumaiseen rakenteeseen. Tietosoluun tallennettuihin muuttujan arvoihin liittyy aina aikaleima, joka Kampusareenan pilotin tapauksessa on peräisin adapteriohjelmilta, ja joka on otettu heti tiedon lukemisen jälkeen, pois lukien ulkoiset datalähteet, joiden datassa aikaleima tuli mukana.

Pilottijärjestelmässä kerätty data lähetettiin IoT-Ticket:iin sen tarjoaman REST-rajapinnan (Representational State Transfer) avulla. Yhdellä rajapintakutsulla voi lähettää useita arvoja. Datankeräinohjelman IoT-Ticket-lähetysosaa on pyritty optimoimaan niin, että kaikki lähetettäväksi haluttu data on mahdollisimman nopeasti näkyvillä myös IoT-Ticket:ssä. REST-rajapinnan lisäksi on myös muita tapoja saada data IoT-Ticket:iin. Wapicella on esimerkiksi tarjolla WRM 247+ -niminen laite, joka tukee useiden laitteiden käyttämiä protokollia ja tallentaa niiltä luettua dataa suoraan IoT-Ticket:iin. Pilotissa päädyttiin kuitenkin käyttämään pelkästään REST-rajapintaa, koska datalähteitä oli useita ja ulkopuolisten datalähteiden kohdalla rajapinnan käyttö olisi kuitenkin ollut pakollista.

IoT-Ticket tarjoaa useita mahdollisuuksia lukea sinne tallennettua dataa. Alustan tarjoamassa ympäristössä datalle voi luoda dashboard-sovelluksia, joiden tekeminen ei vaadi ohjelmointikokemusta ja erityisesti erilaisten datan visualisointien teko on ympäristössä melko helppoa. Pilotissa tehdyistä kodelaudoista kerrotaan luvussa 4.5.1. Pilotissa oli myös käytössä IoT-Ticket:n tarjoama Enterprise Manager -ympäristö, jonka kautta pystyy hallinnoimaan IoT-Ticket:n laitteita ja tietosoluja sekä myös helposti katsomaan tietyn muuttujan uusimman arvon tai lataamaan muuttujan historiadataa. Lisäksi datan lähetykseen käytetyn REST-rajapinnan kautta on myös mahdollista ladata IoT-Ticket:iin tallennettua dataa.

Koska IoT-Ticket:n tietosoluihin liittyy aina myös polkutieto, jolla laitteiden tietosoluja jaotellaan, on Kampusareenan pilotissa kerätylle datalle käytetty myös polkuihin perustuvaa tietomallia. Pilotissa koko Kampusareenaa on pidetty yhtenä kokonaisuutena eli yhtenä IoT-Ticket-laitteena. Usein IoT-laitteet ymmärretään pieninä laitteina ja pilotin käytäntö poikkeaa tästä (Kampusareenan datassa on yhteensä 4 841 eri suuretta, kts. taulukko 4.2). Tätä yhden laitteen mallia on käytetty erityisesti datan kirjoittamisen mutta myös datan lukemisen yksinkertaistamiseksi. Esimerkiksi yhdellä REST-rajapinnan kutsulla pystyy kirjoittamaan tai lukemaan vain yhden laitteen suureita, mutta kun kokonaisuuden data on samassa laitteessa voi useammasta datalähteestä peräisin olevaa dataa yhdistää helpommin.

Pilotissa tietosolujen polkuina on käytetty muotoa: /järjestelmä/alijärjestelmä/sijainti/tyyppi. Polun kaksi ensimmäistä tasoa koostuu järjestelmästä ja alijärjestelmästä. Niiden avulla yksilöidään datalähde sekä mahdollisesti jokin datalähteen osa. Esimerkiksi kiinteistöautomaatiojärjestelmässä on useita eri alijärjestelmiä. Sijaintitasolla kuvataan tietosoluun liittyvää fyysistä sijaintia (esim. huonenumero) ja tyyppillä tietosolun mittausyyppiä (esim. lämpötila, jännite tai teho).

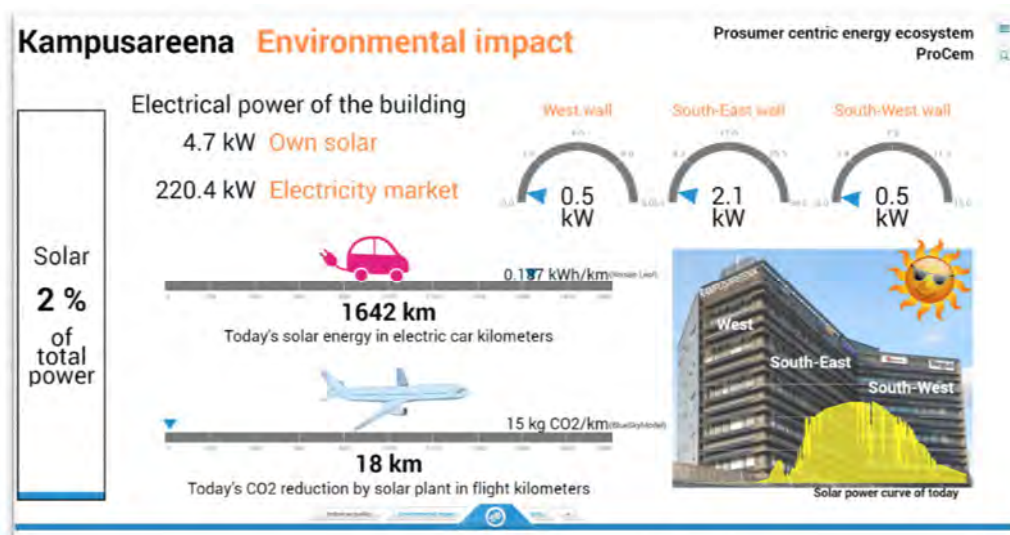
Tietosolujen nimet on valittu yksikäsitteisiksi ja ne on valittu siten, että pelkän nimen perusteella on mahdollista selvittää tarkalleen mistä suureesta on kysymys, kun käytössä on tarvittava dokumentaatio järjestelmästä. Yksikäsitteiset nimet tarjoavat lisäksi mm. sen edun, että luettaessa dataa REST-rajapinnan kautta voidaan tunnisteina käyttää pelkkiä tietosolujen nimiä ilman polkutietoja.

## 4.5 Sovellukset

Kampusareenan pilotin ICT-järjestelmää ja sen dataa käytettiin moninaisissa sovelluksissa projektin aikana, ja hyödynnetään myös sen jälkeisissä tutkimuksissa ja yhteistyöhankkeissa. Sovelluksissa käytettiin hyödyksi pilotin merkittäviä ominaisuuksia, kuten lyhyttä mittausten päivitysaikaväliä, usean mittauspisteen yhtäaikaista mittauksia, kattavaa eri mittamuuttujien määrää ja pitkällä aikavälillä kerättyä dataa. Lisäksi, ICT-järjestelmä monitoroi Kampusareenaa päivittämällä jatkuvasti uusimmat muuttujien arvot järjestelmän tietokantoihin. Sovelluksiin lukeutuu Ethereum-lohkoketjulla sähköenergian kirjanpidon demonstroiminen (luku 5.3), datasta informaation luominen koneoppimismenetelmien ja korrelaatioiden avulla, sähköenergiajärjestelmän käyttäytymisen yleinen tarkastelu, sähkötehojen keskiarvoistamisen ja loistehon suureiden tutkimukset, IoT-alustan visualisoinnit ja laskelmat sekä hissien tehon kompensoiminen akkujärjestelmällä. Keskeistä on hyödyntää rakennuksesta saatavaa dataa sovelluksissa, jalostaa dataa informaatioksi ja välittää se edelleen rakennuksen käyttäjille.

### 4.5.1 Datan visualisointi

Pilotissa ICT-järjestelmän IoT-alusta oli vahvimmillaan datan visualisoinnissa. Dashboardeja kuvissa 4.5, 4.6 ja 4.7 voi pitää eräänlaisina "näyttöinä", jotka havainnollistavat pilotissa kerättävää dataa samalla muuttaen sen yleisesti ymmärrettävään muotoon. Dashboardeissa on sekä historiallista tietoa että viimeksi päivittyneitä arvoja ja näiden perusteella tehtyjä logiikoita ja laskelmia. Esitettävistä tiedoista hyötyy jokainen Kampusareenan käyttäjä, kun rakennuksen datasta muodostetaan informaatiota, joka kertoo kiinteistön sisätilojen olosuhteista ja kiinteistön ympäristövaikutuksista sekä uusiutuvan energian taloudellisesta merkityksestä. Dashboardien toteuttamiseen riitti pelkkä looginen ajattelukyky ilman ohjelmoinnin asiantuntemusta.

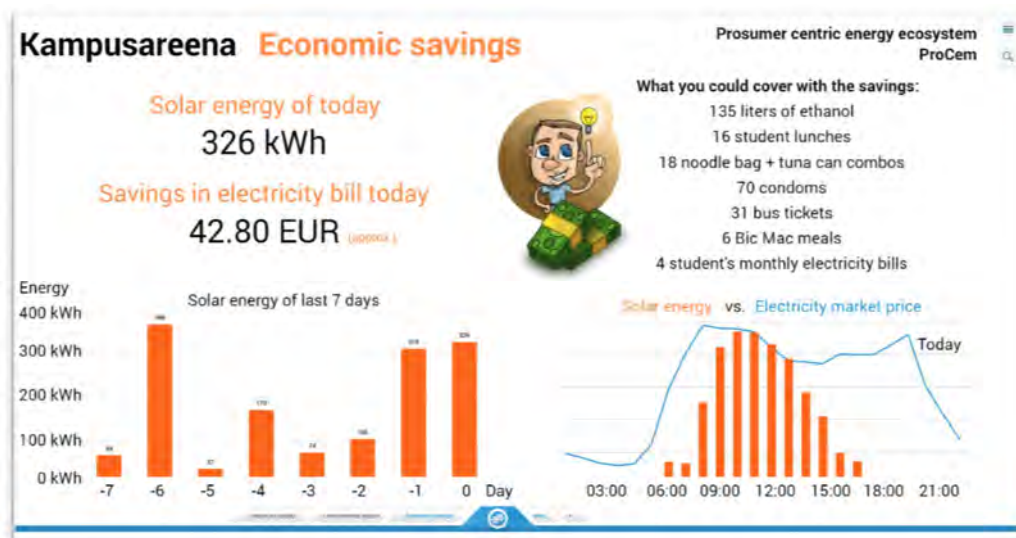


Kuva 4.5. IoT-Ticketin dashboard Kampusareenan aurinkovoiman ympäristövaikutuksista ja sähkötehon jakautumisesta ostetun ja itse tuotetun sähkön kesken. Lisäksi dashboardista näkyy talon seinien eritelty aurinkosähkön tuotanto.

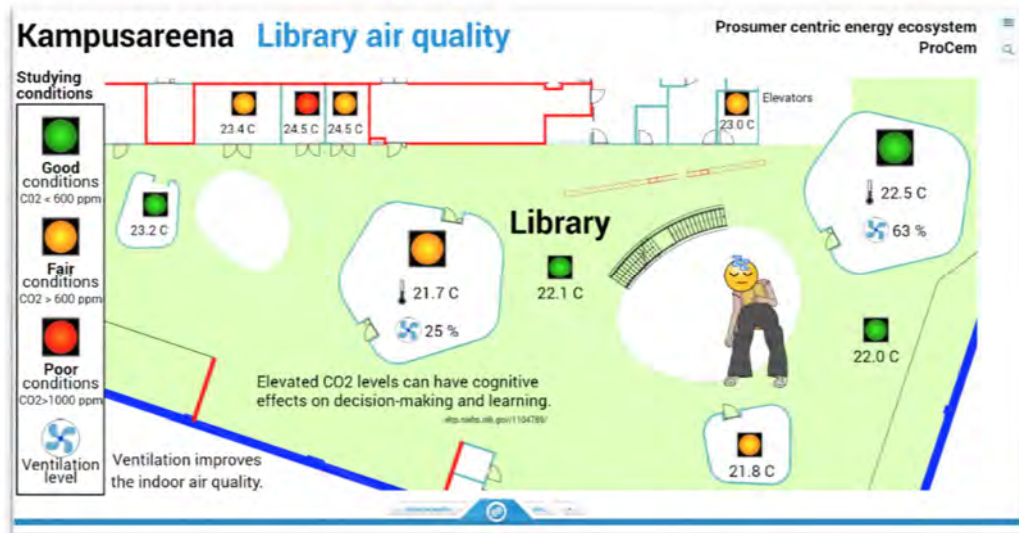
Kuvan 4.5 dashboard näyttää päivän aurinkoenergian ympäristövaikutuksen sähköautolla ajettavissa olevina kilometreinä ja CO<sub>2</sub>-päästöinä säästettyinä lentokilometreinä, kun sähköenergia tuotetaan aurinkovoimalla. Yhden matkustajakoneen kilometreissä säästetään vain vähän lentoliikenteen saastuttavuuden vuoksi, kun taas sähköautolla päästään satakertainen matka. Illalla aurinkovoima tässä tapauksessa kattaa vain 2 % Kampusareenan sähkötehosta, mutta päivällä voidaan yltää noin 30 %:iin. Paneelien jakaminen eri seinille tasaa tuotantoa päivän ajalta ja näin illemmallakin tuotetaan sähköä. Kyseinen dashboard näyttää myös Kampusareenan eri seinien aurinkovoiman tehon, ja missä paneelit sijaitsevat rakennuksen seinillä.

Dashboard kuvassa 4.6 listaa Kampusareenan aurinkovoimalan taloudellisia näkökulmia ja näyttää aurinkoenergian historian edelliseltä viikolta ja kuluvalta päivältä. Euromääräinen säästö sähkölaskussa aurinkovoimalan ansiosta on karkea arvio perustuen sähköenergian hintaan, siirtohintaan ja verotukseen. Arvio antaa suuruusluokan säästöille ja eurojen viereen onkin koottu monenlaista, mitä opiskelija voisi ostaa aurinkovoimalalla saaduilla säästöillä. Dashboardissa on myös verrattu nykyisen päivän aurinkoenergiaa sähkön pörssihintaan tunneittain.

Kolmas yleisesti ymmärrettävistä dashboardeista, kuva 4.7, kiinnittää huomion Kampusareenan kirjaston ilman laatuun käyttäen kiinteistöautomaation dataa CO<sub>2</sub>-pitoisuuksista, lämpötilasta ja ilmanvaihdon voimakkuudesta. Eri väriset merkkivalot ilmaisevat huonetilan sen hetkisen ilman laadun, ja varoittavat keskittymiskyvyn heikkenemisestä kyseisessä tilassa. Raja-arvot CO<sub>2</sub>-pitoisuuksille on poimittu kuvassa viitatussa tutkimuksesta. Tuulettimen ikoni ja viereinen prosenttiluku kertovat hetkellisen ilmanvaihdon voimakkuuden maksimista. Kiinteistöautomaatio tarjoaa laajasti muutakin tietoa rakennuksen tiloista dashboardin ollessa vain esimerkki saatavilla olevan datan mahdollisuuksista.



Kuva 4.6. IoT-Ticketin dashboard Kampusareenan aurinkovoiman taloudellisesta näkökulmasta sekä euroissa että käytännössä. Lisäksi kuvassa on edellisen viikon aurinkoenergia ja kyseisenä päivänä tuotetun aurinkoenergian vertaus sähkön pörssihinnan käyrään.



Kuva 4.7. IoT-Ticketin dashboard Kampusareenan kirjaston ilmanlaadusta ja sen yhteydestä keskittymiskykyyn.

Dashboardit tullaan asettamaan julkisesti näytille Kampusareenan rakennuksen käyttäjien tutkittaviksi. Yleisesti dashboardeja pääsee selaamaan Internet-selaimella ja ProCem-hankkeen IoT-Ticketin katselija-tunnuksilla.

#### 4.5.2 Datan analysointi

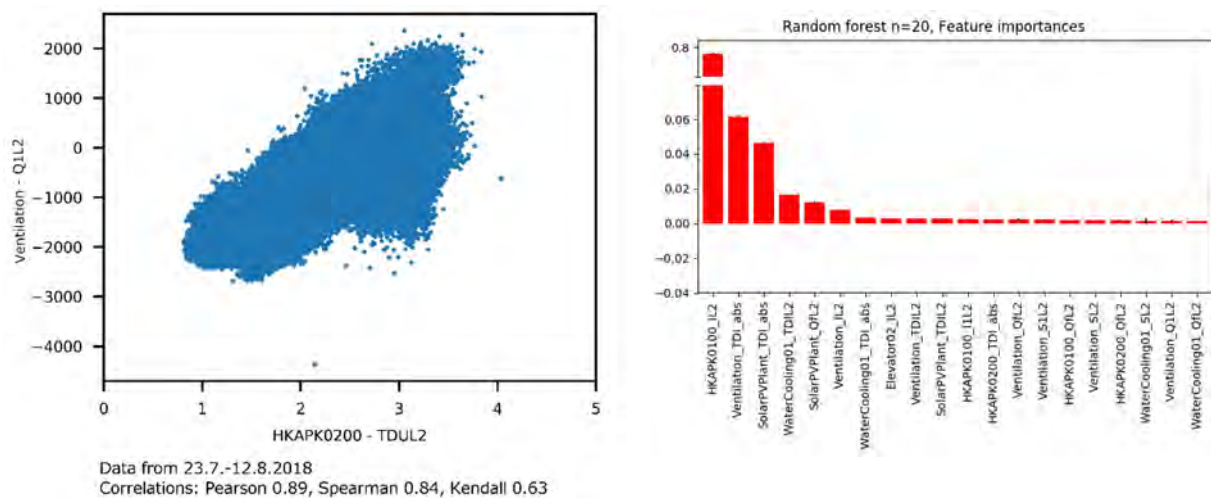
Kampusareenalta kerättävä suuri datamäärä ja datan monipuolisuus mahdollistavat datan analysoinnin useilla eri tekniikoilla. Tässä kappaleessa on esitetty joitain esimerkkejä, miten dataa voidaan muuttaa informaatioksi muun muassa MATLAB-ohjelmistoa ja koneoppimista hyödyntäen. Tässä yhteydessä koneoppimisella tarkoitetaan menetelmää, joka kykenee päättämään annetun datan perusteella arvon kiinnostavalle ominaisuudelle. Esimerkiksi valokuvasta voidaan tunnistaa ihmisen ikä. Käytännössä tämä tapahtuu antamalla menetelmälle ensin opetusdataa, johon on laitettu myös kiinnostavan ominaisuuden arvot. Datan perusteella koulutetaan algoritmilla malli, joka kykenee päättämään kiinnostavan ominaisuuden arvot myös datasta, jota sille ei ole aiemmin näytetty.

Esimerkkinä koneoppimisen hyödyntämisestä tutkittiin, miten eri mittapisteiden sähköiset suuret vaikuttavat valitun mittarin tiettyyn suureeseen. Perinteisesti ongelmaa voi lähestyä laskemalla eri piirteiden väliset korrelaatiokertoimet ja tutkimalla dataa kuvaajien kautta. Koneoppimista hyödyntävän analyysin ideana on, että dataa käyttäen koulutetaan koneoppimisalgoritmilla malli, joka päättää tutkittavan piirteen arvon mahdollisimman tarkasti muiden piirteiden perusteella. Oletuksena on, että mikäli mallin päättelykyky on riittävän hyvä, malli on oppinut jotain eri piirteiden vaikutuksesta tutkittavaan piirteeseen. Tällöin tutkimalla, mitä piirteitä koulutettu malli pitää tärkeänä, voidaan saada tietoa piirteiden välisistä suhteista. Tämä kuitenkin vaatii, että koneoppimisalgoritmi tuottaa mallin, jonka sisältämät piirteet ovat ymmärrettäviä, mikä sulkee niin kutsutut black box -menetelmät, kuten neuroverkot, käytettävien menetelmien ulkopuolelle.

Käytännössä Laatuvaadin sähkön laatu -datasta selvitettiin, miten eri mittapisteiden suuret vaikuttavat kiinteistösähkön vaihejännitteen kokonaissäröön. Kiinteistösähkö tarkoittaa Kampusareenan toista pääkeskusta, joka syöttää muun muassa hissejä, kuten kuva 4.4 näyttää. Tavoitteena oli löytää sähkön laadun kannalta merkittäviä kuormia ja tutkia aurinkovoimalan vaikutusta sähkön laatuun. Analyysimenetelmän tarkoituksena ei siis ollut ongelmien tunnistaminen, vaan auttaa uusien näkökulmien huomaamisessa ja vahvistaa tehtyjä analyyseja.

Analyysi suoritettiin kolmelle kokonaiselle heinä-elokuun viikolle vuodelta 2018. Kuvassa 4.8 havainnollistetaan korrelaatioiden ja koneoppimisen tuloksia. Vasemmalla kuvassa 4.8 oleva kuvaaja näyttää, kuinka ilmanvaihdon kolmen viikon perusaallon loistehon arvot ovat jakaantuneet suhteessa samanhetkiseen kiinteistösähkön jännitesärön mittaukseen. Korrelaatioiden kertoimet viestivät korrelaation vahvuudesta luvun yksi ollessa täysin korreloiva. Kuvan 4.8 oikeassa reunassa koneoppimismallista on listattu eri piirteiden merkitsevyydet kiinteistösähkön jännitesärölle. Huomataan, että vuokralaisten pääkeskuksen, HKAPK0100, virran tehollisarvo on merkitsevin, ja toisena on ilmanvaihdon virran absoluuttinen särö. Perinteisesti korrelaatioita katsomalla saatiin noin 40 vahvasti korreloivaa piirrettä. Tutkimalla piirteiden tärkeyksiä huomattiin, että kaikki tärkeimmät piirteet ovat myös vahvasti korreloivia, mutta että merkittävä korrelaatio ei välttämättä tarkoita piirteen olevan merkitsevä.

Tuloksista on kuitenkin huomioitava, että koneoppimismenetelmien tulokset riippuvat käytetystä datasta ja eri datalla voitaisiin saada erilaisia tuloksia. Koneoppimismenetelmiä käyttämällä voidaan kuitenkin saada tietoa, miten jotkin piirteet eivät ole yksinään merkittäviä, mutta yhdessä ne ovat merkittäviä tutkittavan piirteen kannalta. Asiaa voitaisiin tutkia myös korrelaatioita laskemalla, mutta tällöin olisi jotenkin pääteltävä kokeiltavat yhdistelmät tai kokeiltava kaikki, jolloin yhdistelmien määrä kasvaa nopeasti kohtuuttoman suureksi. Täydellisempi analyysi on luettavissa Antti Hildenin diplomityöstä (Hilden), jossa koneoppimismenetelmien lisäksi perehdytään Kampusareenan sähköenergiajärjestelmän käyttäytymiseen tehojen ja virta- ja jännitesärön kannalta, lasketaan aikakeskiarvoja tehojen suureille ja pohditaan loistehon mittaamista eri tehoteorioiden avulla erilaisten kuormatyyppien ja aurinkovoimalan tapauksissa erityisesti huomioiden verkon häiriöiden, eli jännite- ja virtasärön, mittaaminen.



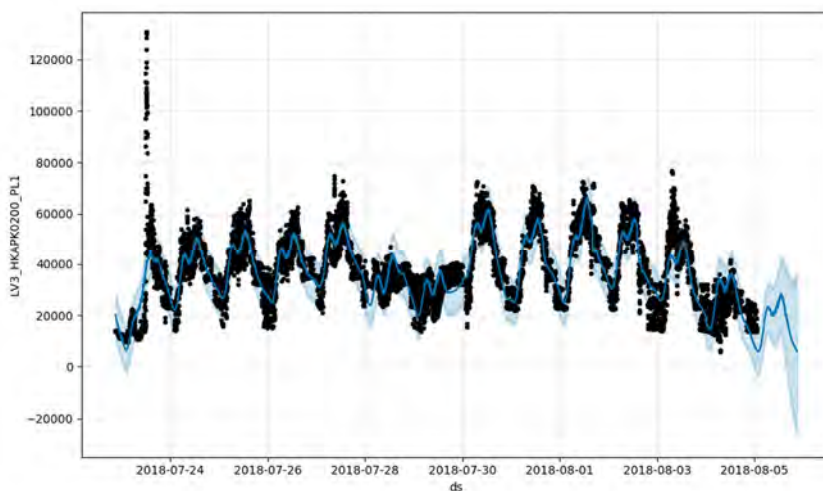
Kuva 4.8. Vasemmalla on esimerkkikuvaaja Pythonin SciPy-kirjastolla lasketuista eri suureiden välisistä korrelaatioista. Oikealla on esimerkkikuvaaja, josta näkyy Random Forest -menetelmällä koulutetun mallin piirteiden tärkeydet.

Merkittävien piirteiden tunnistukseen käytettiin Pythonin scikit-learn kirjaston toteutusta Random Forest -algoritmista. Menetelmään päädyttiin, sillä siitä saa helposti tiedon yksittäisille merkitseville piirteille. Analyysi oltaisiin voitu toteuttaa myös muita koneoppimismenetelmiä, kuten muita puumalleja tai Lassoa, käyttäen ja tällöin oltaisiin voitu saada hieman erilaisia tuloksia. Koneoppimismenetelmien lisäksi analyysissä voidaan hyödyntää piirteiden valitsemiseen tarkoitettuja algoritmeja, kuten esimerkiksi Recursive Feature Elimination (RFE). Random Forest -menetelmällä saatiin lupaavia tuloksia, koska datasta kyettiin kouluttamaan malli, joka kykenee ennustamaan jännitesärön arvoja hyvin. Tulvaisuudessa datan aikaväliä voitaisiin pidentää sekä yhdistää sähköenergiajärjestelmän dataan rakennusautomaatiodata ja säädata. Näin hyödynnettäisiin Kampusareenan dataa laajemmin ja saataisiin yleisesti merkittävämpiä tuloksia.



Koneoppimisen lisäksi mahdollinen lähestymistapa Kampusareenan datan analysointiin on aikasarja-analyysi, jossa tutkitaan, miten muuttujan arvot ovat muuttuneet ajan kuluessa. Kampusareenalta mitattu data soveltuu tällaiseen analyysiin, sillä mittaukset on tehty tasaisin väliajoin peräkkäisinä ajanhetkinä pois lukien kiinteistöautomaation mittaukset. Aikasarjoja voi hyödyntää useilla eri tavoilla ja esimerkiksi voitaisiin tehdä ennusteita siitä, miten eri suureiden arvot kehittyvät tulevaisuudessa tai koittaa ymmärtää miten eri muuttujat vaikuttavat toisiinsa. Datan aikasarjaominaisuutta on mahdollista hyödyntää myös koneoppimismenetelmissä esimerkiksi lisäämällä yhdeksi määrittäväksi piirteeksi edellisen ajanhetken päätettävän piirteen arvon. On kuitenkin huomioitava, että kaikki tuotettava data ei ole sellaisenaan tasavälein mitattua aikasarjadataa, sillä jotkut sensorit lähettävät uuden mittauksen vasta, kun arvo on riittävästi muuttunut.

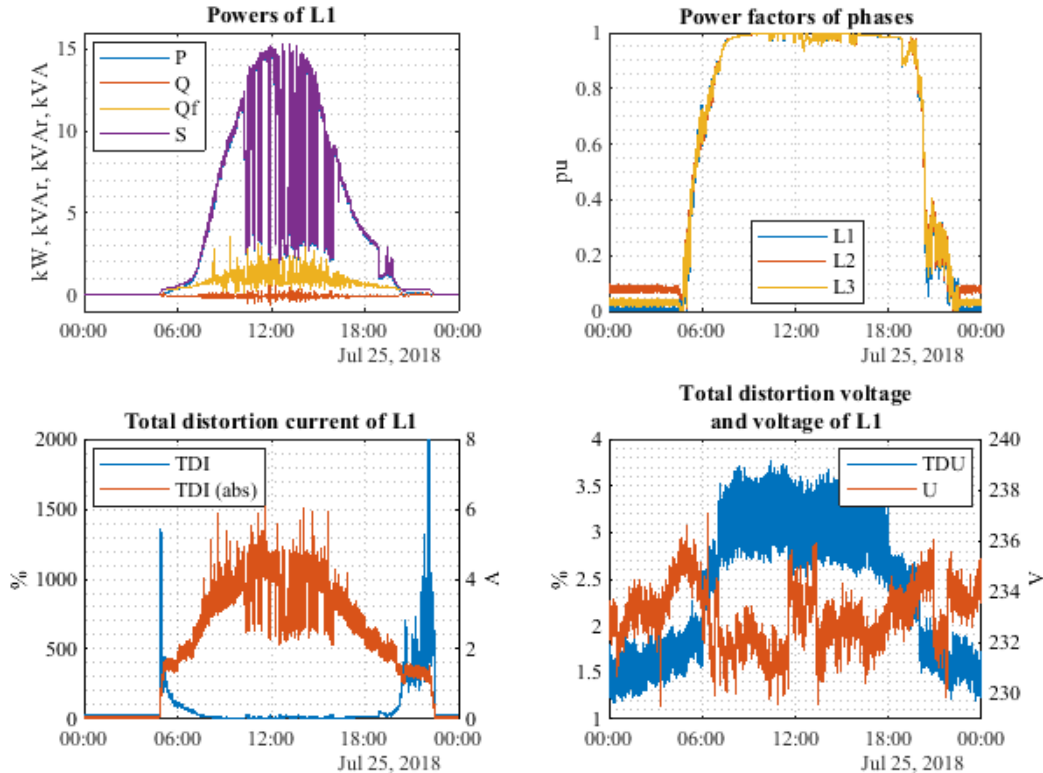
Aikasarjoilla ennustamiseen on kehitetty useita erilaisia menetelmiä. Kuvassa 4.11 on esimerkki mahdollisesta ennustuksesta. Siinä Kampusareenan kiinteistösähkön tehon kehitys on ennustettu seuraavan 20 tunnin ajaksi. Kuvassa mustat pisteet ovat mitattua dataa, sininen viiva on ennuste ja vaaleansiniset alueet luottamusväli. Malli ottaa huomioon ulkolämpötilan ja viikonlopun vaikutuksen. Ennuste on tehty Prophet-kirjastolla, joka käyttää additiivista regressiomallia ja kirjasto on tarkoitettu helppokäyttöiseksi työkaluksi ennustusten tekemiseen.



Kuva 4.9. Kampusareenan kiinteistösähkön tehon ennuste.

Kampusareena sisältää sekä nykyaikaisia että perinteisempiä sähkölaitteita, kuten taajuusmuuttajilla ohjattu ilmanvaihto, jäädytyksen kompressorit, sähköauton lataustolpat ja aurinkosähkövoimala. Pilotin aikana tutkittiin Kampusareenan sähköenergiajärjestelmää myös yleisluontoisesti tarkastelemalla erikseen kumpaakin pääkeskusta ja niiltä lähtevien kuormien ja aurinkovoimalan käyttäytymistä (Hilden). Jokaiselle mittapisteelle piirrettiin kuvan 4.10 mukaiset kuvaajat, joissa on esitetty mittauksen tehot, tehokerroin, virtasäro ja jännite ja sen säro.

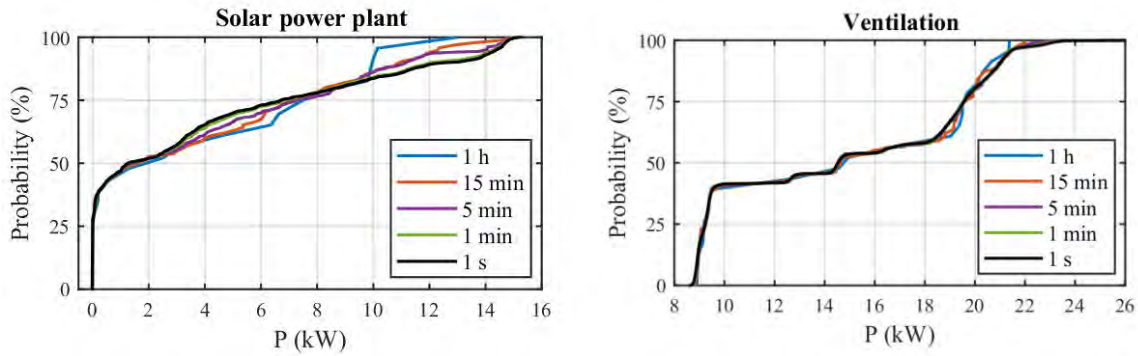
### Solar power plant



Kuva 4.10. Tarkastelu aurinkosähkövoimalan sähköisten suureiden käyttäytymisestä vaiheessa 1 (L1) 25. heinäkuuta 2018. Suureet: Pätöteho (P), perusaallon loisteho (Q), koko mittauskaistan (2 kHz) (Fryzen) loisteho (Q<sub>f</sub>), näennäisteho (S), kokonaisvirtasäro suhteessa perusaallon virtaan (TDI), absoluuttinen kokonaisvirtasäro (TDI (abs)), kokonaisjännitesäro suhteessa perusaaltoon (TDU) ja vaihejännite (U).

Kuvasta 4.10 nähdään muun muassa perusaallon ja koko mittauskaistan loistehon (Q ja Q<sub>f</sub>) selkeä ero särön ollessa reaktiivista. Särön sisällyttäminen loistehon mittaukseen voi olla yksi vaihtoehto, jos verkon häiriöistä halutaan esimerkiksi alkaa laskuttamaan tulevaisuudessa. Lisäksi huomataan, kuinka vaihtelevaa aurinkovoimalan pätöteho (P) voi olla ja miten TDI on hämäävä verrattuna absoluuttiseen virtasäeroon (TDI (abs)). Myös jännitesäro (TDU) nousee päivän aikana merkittävästi.

Yleisen sähköenergiajärjestelmän tarkastelun lisäksi pilotin rakennuksen kuormien ja aurinkovoimalan tehoille laskettiin aikakeskiarvoja hyödyntäen 1 sekunnin aikaresoluutiota. Tästä on esitetty esimerkkinä pätötehon aikakeskiarvot aurinkovoimalalle ja ilmanvaihdolle kuvassa 4.11. Aikakeskiarvot on ilmaistu kertymäfunktioina, joista selviää eri tehoarvojen todennäköisyydet siirryttäessä tunnin keskiarvosta kohti 15 minuuttia ja edelleen pilotin 1 sekunnin keskiarvoja. Tutkimusta motivoi sähkömarkkinoiden ja mittauskäytäntöjen kehittyminen. Keskiarvostuksen aikaväli voi vaikuttaa esimerkiksi tehotariffin suuruuteen, ja yleensä siihen, millaisena tehona kuorma tai tuotanto nähdään.



Kuva 4.11. Aurinkosähkövoimalan ja ilmanvaihdon pätötehon eri aikakeskiarvojen kertymät.

Kuvasta 4.11 on huomattavissa, miten 1 minuutin keskiarvon tehot mukailevat hyvin tarkasti 1 sekunnin keskiarvoa. Lisäksi, aurinkovoimalassa on selkeä merkitys maksimitehon kannalta, mitä keskiarvoa käytetään, kun taas ilmanvaihdon käyttäytyminen mallintuu hyvin myös tunnin keskiarvolla. Tarkemmat analyysit edellä esitetyistä esimerkeistä on sisällytetty Hildenin diplomityöhön (Hilden).

### 4.5.3 Akkuvaraston ohjaus

Demonstraatiossa Kampusareenan sähköverkkoon kytketyllä akkuvarastolla mallinnetaan V2G-ominaisuudella varustettua sähköautoa, joka saapuu ladattavaksi TTY:n Kampusareenan sähköautojen latauspisteelle. Samalla kun sähköauton käyttäjä kytkee auton ladattavaksi, hän mahdollistaa auton käytön joustoresurssina. Tässä yhteydessä hän ilmoittaa lähtevänsä seuraavan kerran liikkeelle klo xx:yy ja sallivansa V2G-ominaisuuden hyödyntämisen kiinteistön huipputehon hallintaan ja reservimarkkinoilla taajuusohjattuna käyttöreservinä.

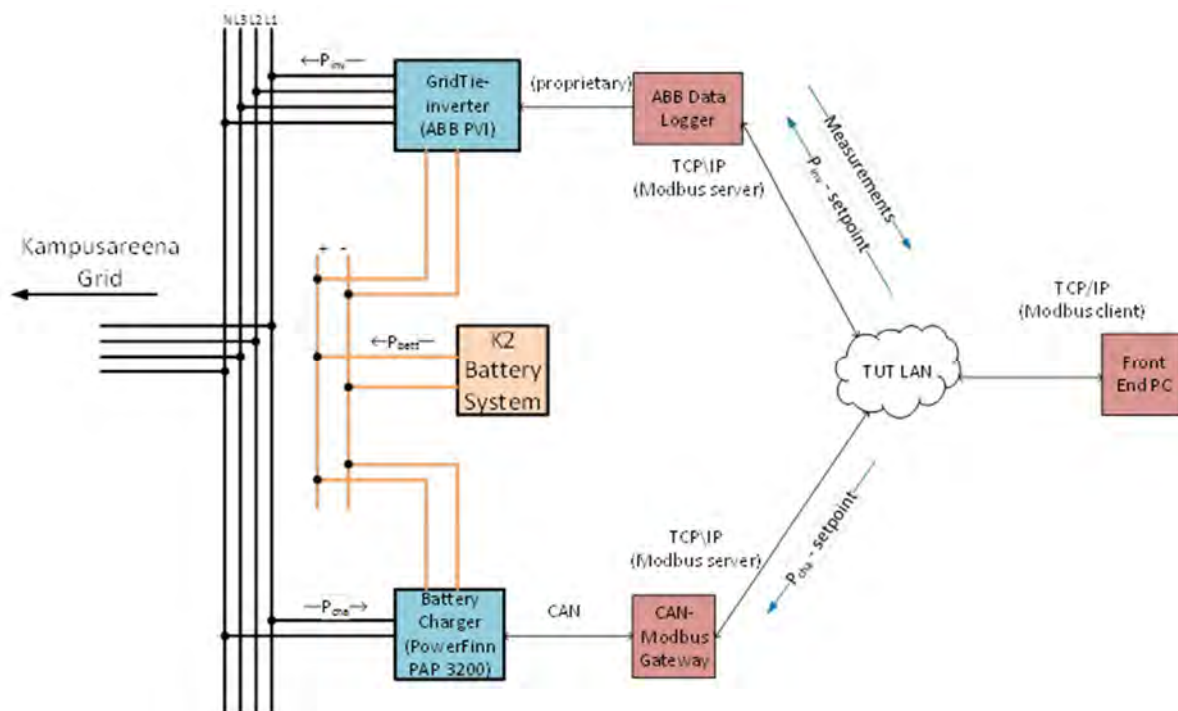
Pääasiallinen tarkoitus on ladata sähköauton akku täyteen mahdollisimman edullisesti huomioiden sähköauton lataukselle asetetut reunaehdot. Latausta ohjataan sähkön hinnan perusteella, mikä koostuu tuntipohjaisesta sähköenergiasta ja tehopohjaisesta siirtohinnasta. Mahdollisuuksien mukaan sähköauton V2G-ominaisuutta pyritään hyödyntämään avustavina toimintoina taajuusohjattuna käyttöreservinä ja tehohuipun leikkauksessa.

Demonstraatiossa paneudutaan pelkästään teknisiin seikkoihin, eikä hinnoittelua tai hyödyn jakamista tarkastella tarkemmin. Lisäksi oletetaan, että taajuusohjatun käyttöreservin kaupankäynnistä ja resurssien aktivoinnista toteutuneiden kauppojen perusteella huolehtii aggregaattori, joka välittää aktivoitukäskyt mikroverkko-operaattorille eli tässä tapauksessa Kampusareenan ICT-järjestelmän Linux-alustalle, jossa sähköauton ohjauksen (latauksen ja V2G-ominaisuuden hyödyntämisen) päätöksen teko tehdään. Demonstraatio pureutuukin siten pelkästään kiinteistötason toteutukseen ja sen ominaisuuksien tutkimiseen. Demonstraatiossa oletetaan, että sähköauto on demonstraation ajan taajuusohjatun käyttöreservin ja tehohuipun leikkauksen käytettävissä. Seuraavassa on kuvattu mahdollisia ohjauksen käyttötapauksia:

- Kampusareenan Linux-kone (kuvassa 4.12 Front-end PC) saa tiedon saapuneesta sähköautosta, sen lataustarpeesta (akun varaustila ja arvioidusta lähtöajasta) ja ominaisuuksista (esim. käytettävissä olevasta lataustehosta ja V2G-ominaisuus). Linux-kone optimoi sähköauton latausaikataulun edellä kuvattujen reunaehtojen, mahdollisten V2G-ominaisuutta hyödyntävien käyttötapauksien ja sähkön kokonaishinnan perusteella. Vaikka sähköauto onkin kytkettynä latauslaitteeseen, niin Linux-kone määrää lähettämänsä teho-ohjeen avulla latauksen aloitus- ja keskeytysajankohdat optimoidun aikataulun mukaisesti.
- Linux-kone hyödyntää sähköauton V2G-ominaisuutta Kampusareenan tehojen hallinnassa antamalla teho-ohjeen akun suuntaajille purkaa tai ladata akkua, kun hissi ottaa tehoa tai syöttää tehoa verkkoon. Tällä tavoin hissien tehopiikkiä voidaan madaltaa tai jopa kokonaan häivyttää riippuen luonnollisesti akun kapasiteetista tehon ja energian suhteen sekä automaatiojärjestelmän reagoitinopeudesta.

- Lisäksi sähköauton V2G-ominaisuutta voidaan hyödyntää reservimarkkinoilla aggregaattorin välityksellä. Linux-kone saa tiedon aggregaattorilta ajankohdista, jolloin sähköautoa haluttaisiin hyödyntää taajuusohjattuna käyttöreservinä. Linux-kone huolehtii optimoinnin aikataulutuksessa (ensimmäinen käyttötapaus), että sähköauton akulla kyky toteuttaa halutun suuruinen teho-ohje sekä ylös- että alassäätöä varten. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että reservimarkkinoille myytyä akkua ei voida purkaa täysin tyhjäksi tai ladata täysin täyteen. Operatiivisessa osassa Linux-kone saa jatkuvasti taajuustiedon joltakin Kampusareenan riittävän tarkalta mittalaitteelta. Akun ohjaus perustuu teho-ohjeeseen, mikä määräytyy taajuusmittauksen ja ennalta määritettyjen taajuusrajojen perusteella. Ohjauksen toteuttaminen akun tehommittauksen avulla ja tarvittaessa raportoidaan nämä tiedot aggregaattorin välityksellä kantaverkko-yhtiölle.

Demonstraatiossa hyödynnettävän akkuvaraston kytkeytymistä Kampusareenan sähköverkkoon ja ICT-järjestelmään on kuvattu kuvassa 4.12. Kuvassa siniset laatikot edustavat suuntaajia ja punaiset laatikot ICT-järjestelmää. ABB PVI toimii akkua purkavana suuntaajana ja PowerFinn PAP3200 toimii laturina. Kommunikaatioverkkona toimii TTY:n LAN-verkko ja tiedonvaihto suuntajakohtaisten gateway-laitteiden ja Linux-koneen välillä tapahtuu Modbus TCP protokollalla. Gateway-laitteet tarvitaan protokollan muuttamiseksi Linux-koneen ymmärtämään muotoon ja toisaalta muuntamaan sarjamuotoinen liikenne TCP/IP liikenteeksi. ABB:n PVI suuntaaja tarjoaa ainoastaan proprietary protokollaa, joka saadaan ymmärrettävään muotoon ABB:n data loggerin (ABB VSN 700) avulla. PowerFinn suuntaaja tukee CAN-väylää, joka tässä tapauksessa haluttiin kokonaisuuden yhtenäisyyden vuoksi muuntaa ensinäkin TCP/IP liikenteeksi ja toisaalta Modbus protokollaksi, jotta tarvittavien Linux-koneen adaptoreiden (clientien) määrää saatiin rajoitettua. Gatewaynä tässä tapauksessa toimi Anybus Communicator.



Kuva 4.12. Demonstraatiossa hyödynnettävän akkuvaraston kytkeytyminen Kampusareenan sähköverkkoon ja ICT-järjestelmään

Akkuvaraston ohjauksen demonstraatio raportin kirjoitusvaiheessa oli varsinaisten testien osalta vielä kesken. Demonstraatio tullaan viimeistelemään syksyn 2018 aikana TTY:n omalla rahoituksella ja joryhmää informoidaan lopullisista tuloksista. Demonstraation osalta valmiina olivat kommunikaatiotestit Linux-koneen ja suuntaajien välillä. Samoin tarvittavat algoritmit Linux-koneen ohjauksia varten olivat jo valmiit.

## 4.6 Kokemukset

Koska tietolähteet perustuvat eri tekniikkoihin ja ovat peräisin eri toimittajilta, kunkin lähteen liittäminen järjestelmään vaatii huomattavan määrän työtä. Sensoreita ei yleensä ole suunniteltu liitettäväksi muihin kuin toimittajien omiin järjestelmiin, dokumentointi on usein puutteellista ja eri tekniikat vaativat erilaisen lähestymistavan. Standardit kuten IEC 61850 tai BACnet auttaisivat tässä, mutta tällä hetkellä standardeja on monia, ja kukin standardi vaatii merkittävän panostuksen tutustumiseen, kokeiluun ja opiskeluun. Lisäksi jotkut datalähteet eivät noudata mitään standardia. Tähän liittyvän työn määrä oli selvästi aliarvioitu, mutta tutkimusryhmällä on nyt merkittävä määrä osaamista, jota voidaan jatkossa hyödyntää.

Tietomallien suunnittelu, dokumentointi ja metadata kannattaa tällaisissa järjestelmissä tehdä huolellisesti, jotta eri lähteistä tulevaa dataa voisi käyttää yhdessä, ja jotta data olisi tehokkaasti käytettävissä ja eri osaamistautan ihmiset voisivat tehdä tehokkaasti yhteistyötä. Toisaalta, tietomalleja on vaikea määritellä ennen kuin tiedon kerääminen on saatu alkuun. Tästä johtuen on ollut pakko edetä iteratiivisesti ja projektin lopuksi syntynyt tietomalli pitäisi vielä ainakin kerran suunnitella uudestaan.

Kehitetty tietojärjestelmä tuottaa valtavan määrän tietoa joka hetki, ja tärkeän tiedon valinta ja talentaminen luotettavasti on haastavaa. Järjestelmässä on sekä projektin itse tekemiä osia, että ulkopuolisten toimittajien järjestelmiä ja komponentteja. Koska ulkoisten järjestelmien toimintalogiikka ei ollut täysin selvillä, tehokkainta tapaa lähettää tietoa jouduttiin etsimään kokeilemalla.

Talletettavan tiedon valinta (tarpeelliset muuttujat sekä näytteenottotaajuus) on vaikea suunnittelu päätös, koska kaikkia käyttötarpeita ei voi ennustaa. Projekti valitsi "kahden kerroksen" strategian:

1. Iso joukko dataa talletettiin raakadatan mahdollisimman tiiviissä muodossa. Tätä dataa voidaan käyttää eräajomaisissa analyyseissä.
2. Pienempi joukko tietoa, muuttujien alijoukko, karkeampi näytteenotto ja vain julkisesti käytettävä tieto talletetaan IoT-alustan tietokantoihin tehokkaampaa ja helpompaa käyttöä varten. Valinnassa vaikutti saatavissa oleva tallennustila, IoT-alustan havaittu suorituskyky sekä käsityksemme tiedon käyttökohteista. Havaitsimme myös, että tarvittavaa tallennustilaa on vaikea arvioida. Klassiset peukalosäännöt eivät ole toimivia ja järjestelmän tekemä optimointi ja jälkiprosessointi voi kestää useita vuorokausia tiedon tallennuksen jälkeen.

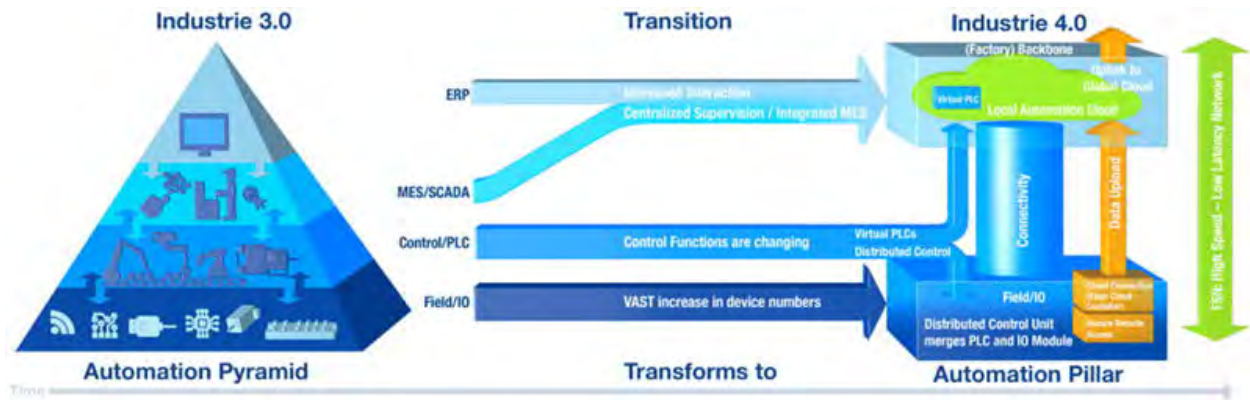
Dashboardien vaivaton luominen ilman ohjelmoinnin asiantuntijoita on käytetyn IoT-alusta (IoT-Ticket) ehdoton vahvuus. Kampusareenan datasta saatiin pienehköllä vaivalla selkeitä dashboard-esityksiä kaikille katsottavaksi. Jatkossa IoT-alustalla tulisi pyrkiä entistä soveltavampiin toteutuksiin.

Tiedon käsittelyn kaikki vaiheet keräämisestä analysointiin edellyttää monen alan asiantuntijan yhteistyötä. Tätä yhteistyötä kokeiltiin ensin sähkön laadun analysointiin, ja alustavat kokemukset koneoppimisen käyttämisestä datan analysointiin ovat lupaavia. Jatkossa samaa menetelmää tulisikin testata muiden ominaisuuksien analysointiin. Kerätyn datan käyttäminen onnistui sujuvasti myös muissa tarkasteluissa ja laskennoissa, kuten sähköenergiajärjestelmän yleisessä tarkastelussa ja tehojen aikakeskiarvojen laskennassa.

Kuvassa 4.13 on esitetty, miten ICT-tekniologioiden kehitys tulee muuttamaan yleistä tuotantoautomaation tietojärjestelmien arkkitehtuuria tulevaisuudessa. Automaattioratkaisut muodostavat luontaisesti hierarkian. Hierarkian alatasolla sähköverkon tai muun automaattisesti tarkkailtavan tai ohjattavan laitteiston liityntä liitetään tietojärjestelmään. Seuraavalla tasolla sijaitsee aikakriittiset toiminnot ja laitteet, jotka pystyvät tarjoamaan taatun vasteajan ja tarkoitukseen riittävän luotettavan toiminnallisuuden. Tätä ylemmillä hierarkian tasoilla sijaitsevat vähemmän aikakriittiset toiminnot, kuten raportointi ja pidemmän aikavälin toiminnan suunnittelu. Perinteisesti järjestelmien fyysinen rakenne on toteutettu samankaltaiseksi tämän luontaisen loogisen rakenteen kanssa.

Internetin toteutustapa on toisenlainen. Siinä verkon toiminta on hajautettu siten, että palveluja tuottavat yksiköt ovat suoraan yhteydessä palveluja hyödyntäviin yksiköihin. Tällä tavalla toteutettu verkko on skaalautuva, mutta samalla se ei pysty tuottamaan luotettavasti aikakriittisiä toimintoja.

Tiedonsiirto- ja laskentakapasiteetin parantuessa aikakriittisyysongelma on kuitenkin vähentynyt. Nykyinen kehitys myös automaatiojärjestelmissä on kohti hajautettua verkkorakennetta. Tätä voidaan kuvata siten, että perinteistä tapaa kuvataan pyramidiksi, jonka pohjatasolla on liityntä fyysiseen prosessiin. Moderneissa järjestelmissä ollaan siirtymässä kohti pylväsmäistä rakennetta, jossa pohjataso kuvaa prosessiliityntää ja pylvään pää pilveä, jossa kaikki toiminnallisuus sijaitsee. Tällä tavalla toteutuksen fyysinen rakenne on erotettu mahdollisesta loogisesta hierarkkisesta rakenteesta. ProCem-projektin arkkitehtuurissa on pyritty käyttämään teknologioita, joilla voidaan toteuttaa uutta arkkitehtuuria.



Kuva 4.13. Tuotantoautomaation tietojärjestelmien arkkitehtuurin kehittyminen (<https://www.automationworld.com/automation-networks-pyramid-pillar>)

## 5 Lohkoketjuteknologia energialiiketoiminnassa

Lohkoketjut (blockchain) ovat uusi kryptografiaan perustuva teknologia, jonka avulla voidaan hoitaa osapuolien välinen kirjanpito luotettavasti ilman keskitettyä tietokantaa. Lohkoketjujen sisältämä tieto on kopioitu kaikille ketjun osallistujille. Lohkoketjuille on oleellista se, että kirjanpitoon lisätty ja hyväksytty tieto on läpinäkyvää ja muuttamatonta, ja sitä voidaan sen vuoksi käyttää sopimuksen pohjana. Edellä mainituista syistä lohkoketjut mahdollistavat kokonaan uudenlaiset liiketoiminta-mallit. Ensimmäinen laajasti tunnettu lohkoketju oli kryptovaluutta Bitcoin.

Lohkoketjuja on useaa tyyppiä, ja käytön ja mahdollisuuksien mukaan ne voidaan jakaa eri tavoin. Kaksi merkittävintä tyyppiä on:

- Tunnetuin lohkoketjun tyyppi on avoin ja julkinen (permissionless, public) lohkoketju, joka on avoin kaikille. Tunnetuin esimerkki näistä lohkoketjuista on Bitcoin.
- Lohkoketju voi olla myös rajattu (permissioned) niin, että vain osa toimijoista voi toimia uuden tiedon varmentajina.

Eräs lohkoketjujen keskeinen tekninen innovaatio on tiedon hajautettu varmennus. Tunnetuin varmennustekniikka perustuu tietokoneen laskentateholla suoritettavaan työhön (proof-of-work), eli ns. louhimiseen (mining). Louhijat kokoavat joukon tuoreita transaktioita lohkoksi ja laskevat tästä lohkokosta sekä valitsemastaan satunnaisluvusta kryptograafisen tiivisteeseen, joka yksisuuntaisesti muuttaa minkätahansa kokoisen datan tietyn mittaiseksi tavujonoksi. Louhijan tavoitteena on luoda ensimmäisenä uusi lohko löytämällä satunnaislukua vaihtamalla tietynlainen tiiviste esim. Bitcoinissa sellainen, jossa on tietty määrä etunollia. Tämä on suhteellisen yksinkertainen ratkaisu, jonka haittapuolena tarvittava laskentateho ja sen tarvitsema energia. Myös muita varmennustekniikoita on kehitetty: mm. panokseen perustuva (proof-of-stake) ja yksityisiin lohkoketjuihin sopiva proof-of-authority. Kun proof-of-workissa todennäköisyyteen luoda uusi lohko vaikuttaa louhijan käytettävissä oleva laskentakapasiteetti, perustuu proof-of-stakessa tämä omistetun kryptovaluutan määrään. Miten tämä tarkalleen tehdään, vaihtelee eri toteutuksissa. Proof-of-authorityssä uusia lohkoja saavat lisätä vain tunnetut tahot, jotka vuorottelevat lohkojen luomisessa.

Yksinkertaisten lohkoketjutransaktioiden, joissa siirretään kryptovaluuttaa käyttäjältä toiselle, lisäksi lohkoketjun avulla on mahdollista suorittaa monimutkaisempia transaktioita älynsopimusten (smart contract) avulla. Älynsopimus on lohkoketjussa toimiva ohjelma, jonka ohjelmakoodi ja tila on tallennettuna lohkoketjuun. Älynsopimus tarjoaa erilaisia palveluita, joita käytetään tekemällä transaktioita lohkoketjuun. Tällöin älynsopimuksen ohjelmakoodia suoritetaan ja sen tila voi muuttua. Lohkoketjun hajautettu luonne ja varmennusmekanismi takaavat, että älynsopimuksen tilasta on yhteisymmärrys. Useamman tahon keskeistä vuorovaikutusta voidaan siis hoitaa älynsopimuksen välityksellä.

### 5.1 Lohkoketjusovelluksia hajautettujen resurssien hallintaan

Lohkoketjujen käyttöä sähköenergian kaupassa ja jakelussa on tutkittu maailmalla laajasti. Energia-alan lohkoketjusovelluksilla pyritään ratkaisemaan monia eri energijärjestelmän haasteita, joista suuri osa liittyy hajautettujen resurssien hallintaan. ProCem -projektin aikana löydettiin kymmenittäin tieteellisiä artikkeleita lohkoketjujen käytöstä sähköenergasovelluksissa, mm:

- Energian kauppa sekä paikallisesti että ei-paikallisesti
- "Vihreyden sertifiointi" eli ympäristöystävällisyydestä annettava takuu
- Hajautettu verkonhallinta (grid management; voltage control, loss control)
- Turvallisuuden ja yksityisyyden varmistaminen

Ratkaisuilla uskotaan olevan kysyntää, sillä pelkästään viime vuonna lohkoketjuyritykset keräsivät rahoitusta yli 300 miljoonaa dollaria. Tästä 80 prosenttia kerättiin ns. ICO-ohjelmien kautta. (Livingston

et al. 2018) ICO (initial coin offering) on rahoitustapa, jossa lohkoketjua ylläpitävä taho luovuttaa sijoituksia vastaan esilouhittuja kryptovaluuttoja. Tässä raportissa esimerkeiksi nostetaan kaksi yritystä, jotka ovat kokeilleet lohkoketjusovelluksia käytännössä.

Saksalaisen innogy-energiayhtiön yhteydestä noussut Share&Charge tarjoaa sähköautojen latauspalvelua, joka mahdollistaa oman yksityisen latauspisteen jakamisen Airbnb-tyylisesti maksua vastaan. Start-up käynnisti vuonna 2017 sovelluksen, joka toimi julkisella Ethereum-pohjaisella lohkoketjulla, ja parhaimmillaan sillä oli noin 1500 latausasemaa Saksassa ja Hollannissa. Kokeilu oli opettavainen, sillä se toi esiin tiettyjä lohkoketjuteknologian käytännön haasteita. Ethereumin-alustan ja esimerkiksi latauspisteitä hallinnoivien yritysten teknologioiden yhteensovittaminen oli esimerkki hajautetun tietokannan luomisen ongelmista. Sen sijaan, että sama älykontrakti olisi hallinnut asiakkaan latausprosessin hakutoiminnosta latauksen lopettamiseen ja maksamiseen, toiminnot jaettiin erilleen älykontraktien ja latausoperaattorien API:en välille. Samoin julkisen lohkoketjun operointi tuotti yllättäviä kustannuksia ja transaktiot viivästyivät ajoin merkittävästi. (Garcia 2018) Yritys hakee nyt uutta lähestymistapaa konsortio-lohkoketjun avulla, jonka pitäisi laskea transaktioiden kustannuksia. Uusi sovellus on myös Ethereum-pohjainen, mutta käyttää Proof of Authority –konsensusmekanismia. Protokollan avulla latauspisteoperaattorit, sähköverkkoyhtiöt ja muut palveluntarjoajat voivat luoda integroitua ratkaisuja, jotka mahdollistavat sen, että asiakas ei ole riippuvainen vain tietystä latausoperaattorista, vaan voi käyttää eri operaattoreiden latauspisteitä (Share&Charge 2018).

Toinen esimerkki käytännön kokemusta omaavista yrityksistä on Yhdysvalloista lähtöisin oleva LO3 Energy, joka pilotoi p2p-markkina-alustaa eri puolilla maailmaa. Sen pääpilottissa Brooklynissa on noin 60 prosumeria, jotka kauppaavat keskenään omaan aurinkoenergiatuotantoon perustuvia sertifikaatteja LO3:n kehittämällä alustalla. Järjestelmä toimii huutokauppamekanismilla eli mukana olevat prosumerit voivat asettaa sovelluksessa hinnan, jolla haluavat ostaa ja myydä paikallistuotantoa. Alustan pohjana on yksityinen lohkoketju, joka toimii Tendermint-protokollalla. Mukana projektissa on mukana myös Siemens, joka on osallistunut etenkin lohkoketjun ja mittaroinnin yhteensovittamiseen. Lohkoketjun kanssa kommunikoivat mittarit ovat tällä hetkellä ainoa fyysinen lisä infrastruktuuriin, sillä alusta toimii vain virtuaalisena järjestelmänä varsinaisen verkon ohessa. Pilotin lyhyen aikavälin tähtäimenä on osoittaa lohkoketjun toimivuus ja todistaa paikallisten markkinoiden kysyntä. Pidemmällä aikavälillä tarkoitus on kehittää yhteisöä omavaraiseksi mikroverkoksi, joka voi toimia myös sähkökatkojen aikana. (Mengelkamp et al. 2017) Tämä edellyttää verkon teknistä laajentamista sekä yhteistyötä paikallisen energiayhtiön ja viranomaisten kanssa, sillä tällä hetkellä paikallisella energiayhtiöllä ConEdisonilla on monopoli sähkönmyyntiin asiakkaille. (Livingston et al. 2018)

## **5.2 Lohkoketjut mikroverkoissa ja energiayhteisöissä -työpaja**

Lisääntyvistä pilottikokeiluista huolimatta lohkoketjuteknologia ja siihen liittyvien toimintamallien rooli energijärjestelmässä on vasta muotoutumassa. Lohkoketjuteknologia voisi kuitenkin potentiaalisesti mahdollistaa erilaisia uusia innovatiivisia hajautettuja liiketoimintamalleja erityisesti energian peer-to-peer jakamiseen ja myyntiin prosumereiden kesken, energiayhteisöissä ja niiden välille. Lohkoketjuihin liittyy myös haasteita, jotka liittyvät sekä sen teknologian soveltuvuuteen energian jakamisen alustaksi sekä regulatiivisiin rajoitteisiin. Projektin johtoryhmän kokouksen yhteydessä toteutettiin työpaja, jossa lohkoketjuihin liittyviä mahdollisuuksia ja haasteita tarkasteltiin kolmessa eri tapauksessa: 1) Virtuaalimikroverkossa, 2) Kerrostalon mikroverkkoyhteisössä ja 3) Suljetussa erillisverkossa. Esimerkiksi kerrostalomikroverkon lohkoketju nähtiin taloyhtiölle helposti toteutettavana kauppapaikkana, jonka avulla yhtiö ja sen asukkaat voivat innovoida uusia tulonlähteitä. Lisäksi yhteisten ja yksityisten energiaresurssien hyödyntämistä pidettiin tehokkaana toimintamallina ja lohkoketjun nähtiin myös lisäävän taloyhtiön yhteisöllisyyttä. Yleisesti lohkoketju nähtiin mahdollistajana mm. resurssien tehokkaammalle käytölle, sisäiselle kaupankäynnille ilman välikäsiä, kuormien tasaamiselle ja joustoille, uusille liiketoimintamahdollisuuksille, toimintojen automatisoinnille, erilaisten energiamuotojen yhdistämiselle ja hyödyntämiselle. Hyödyiksi ja vahvuuksiksi nousivat:

- Omavaraisuus ja riippumattomuus



- Tapahtumien ja resurssien validointi
- Nopeus ja muokattavuus
- Kevyt riskinhallintamekanismi
- Investointi- ja osallistumiskynnyksen madaltuminen

Suurimmat haasteet ja uhkat olivat:

- Lohkoketjupohjainen hajautettu ratkaisu uhkaa nykyisiä toimijoita, esimerkiksi heikentää sähkömyyjän asemaa ja rikkoo monopoleja tuomalla markkinoille kilpailevan järjestelmän
- Tiedon saatavuus: lohkoketjun sisäinen tieto lisääntyy, mutta ulos välitetään vähemmän tietoa
- Valinnan vapaus; onko yksittäisten yhteisöjen jäsenten (prosumerien) mahdollista olla osallistumatta lohkoketjulla toteutettuun toimintamalliin?

Lohkoketjujen teknistä arviointia, olemassa olevien pilottien esimerkkejä ja työpajatuloksia käytettiin Kampusareenan lohkoketju –demon suunnittelussa ja toteutuksessa.

### 5.3 *Kampusareenan lohkoketju -demo*

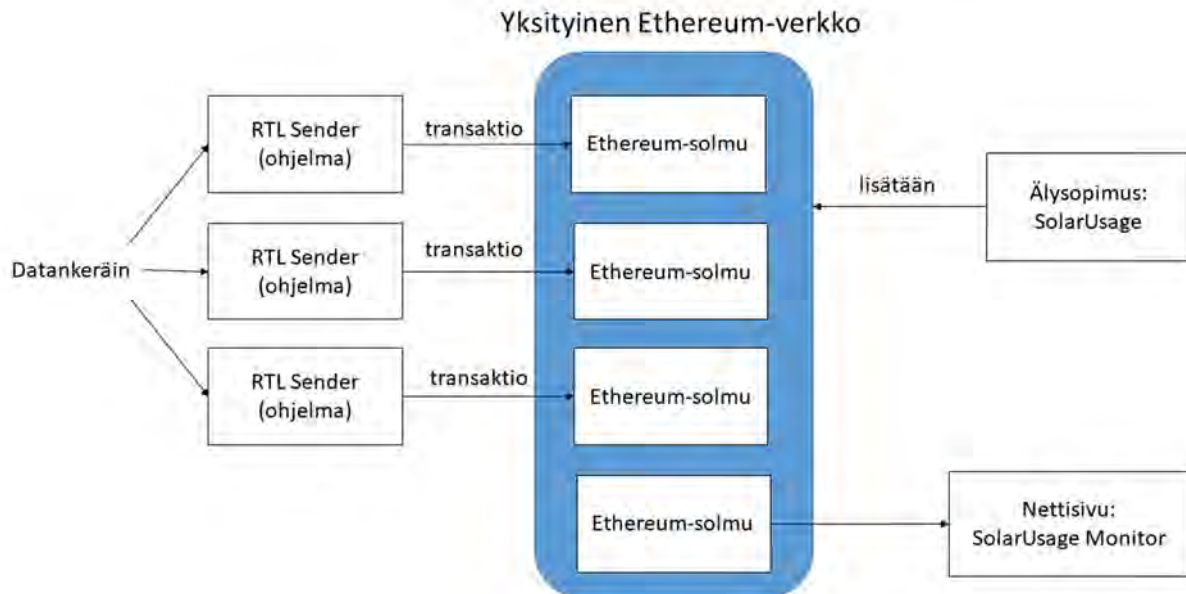
Tutustuaksemme konkreettisemmin lohkoketjuteknologiaan projektissa tehtiin pieni lohkoketju-demo. Demon tarkoituksena oli saada kokemuksia käytännön työskentelystä jonkin lohkoketjuteknologian kanssa sekä tarjota koko projektiryhmälle konkreettinen esimerkki lohkoketjun käytöstä. Demo on rakennettu Kampusareenan pilottialustan päälle, jolloin siinä voitiin hyödyntää oikeita reaaliaikaisia mittauksia. Samalla voitiin kokeilla pilottialustan kykyä toimia erilaisten lisäsovellusten pohjana.

Demon pohja-ajatuksena on kuvitteellinen skenaario, jossa Kampusareenan aurinkovoimalan tuottama sähköä käyttävät paikallisesti vain kaksi Kampusareenan hissiä, joille energia halutaan jakaa tasapuolisesti. Tästä sähkön käytöstä halutaan pitää kirjaa tietyn ajanjakson välein (esim. tunti). Aikajaksolta halutaan tietää paljonko aurinkovoimala on tuottanut sähköä, paljonko hissit ovat sähköä kuluttaneet ja miten tuotettu sähkö jaetaan tasan kuluttajien kesken. Tarvitut energiat saadaan laskettua kutakin kohdetta seuraavan Laatuvahtin mittaamasta kumulatiivisesta energiasta. Vaikka skenaario onkin keinotekoinen, on siinä kuitenkin pohjaa todellisille käyttötapauksille; esimerkiksi tapaus, jossa tuottaja ja kuluttajat ovat eri paikoissa olevia itsenäisiä toimijoita ja kirjanpidon pohjalta veloitetaan sähkön käytöstä.

Lohkoketjuteknologiaksi demoon valittiin Ethereum. Ether-kryptovaluuttansa puolesta Ethereum on Bitcoinin jälkeen maailman toiseksi arvokkain lohkoketju. Ethereumin tarkoitus ei ole ensisijaisesti olla kryptovaluutta vaan alusta älysovimuksiin pohjautuville hajautetuille sovelluksille (decentralized application, DApp). Koska kyseessä oli vain pieni demo, perinpohjaista selvitystä "parhaan" älysovimus-alustan löytämiseksi ei tehty.

Kuvassa 5.1 on demoa havainnollistava kuva sen arkkitehtuurista. Demo koostuu kolmesta osasta:

- SolarUsage-älysovimus: lohkoketjussa toimiva sähkönkäytöstä kirjaa pitävä ohjelma
- RTL Sender -ohjelma: lähettää datankeräinohjelmalta haettuja osallistujan energiatietoja älysovimukseen
- SolarUsage Monitor -nettisivu: internet selaimella toimiva käyttöliittymä älysovimuksen tilan tarkasteluun



Kuva 5.1. Kampusareenan lohkoketju -demon arkkitehtuuri.

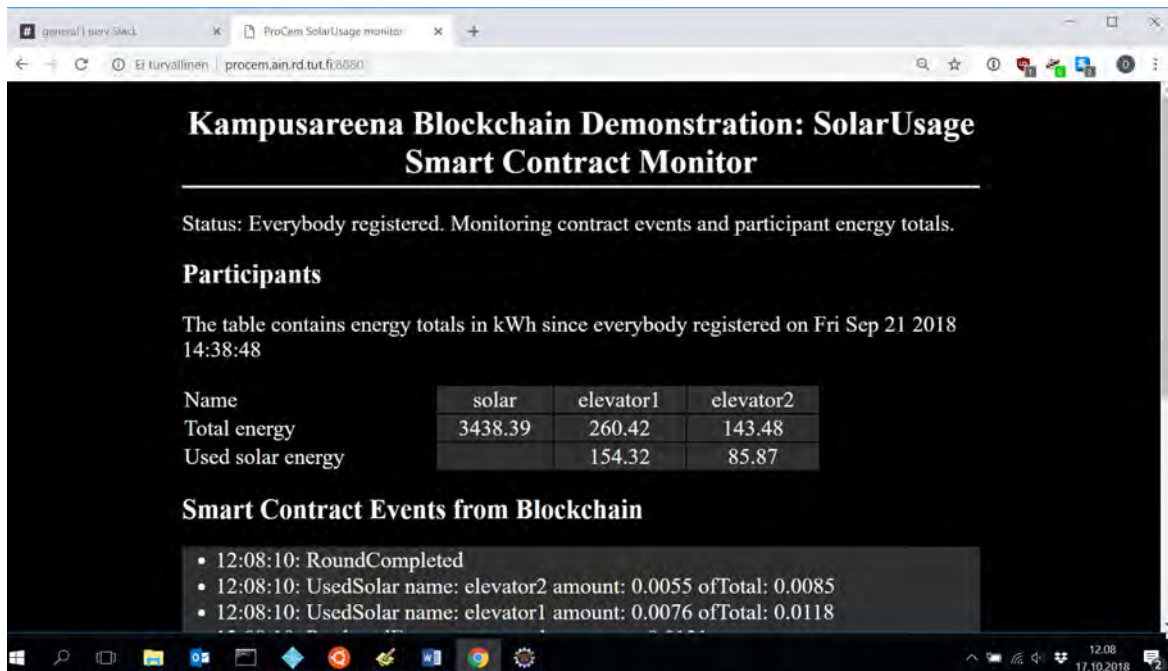
Demoa varten pystytettiin pieni yksityinen Ethereum-lohkoketju. Konsensumekanisminä käytettiin proof-of-authorityä eli vain tietyt tunnetut tahot pystyvät vahvistamaan uusia lohkoja. Testilohkoketjussa näitä tahoja eli solmuja oli neljä. Demossa jokaista osallistujaa (aurinkovoimala ja hissi) edustaa instanssi RTL Sender -ohjelmasta, joka hakee tietyn ajan välein datankeräimeltä<sup>2</sup> osallistujan kumulatiivisen energian laskien siitä ja edellisellä kerralla haetusta energiasta ajanjakson energian. Tämä energia raportoidaan aiemmin lohkoketjuun lisätylle SolarUsage-älysoipimus instanssille. Raportoinnin jokainen RTL Sender -instanssi tekee oman Ethereum-solmunsensa kautta käyttäen omaa Ethereum-tiliään. Kun kaikki kierroksen energiat on raportoitu, laskee SolarUsage-sopimus tuotetun energian jakautumisen käyttäjille. Esimerkiksi, jos aurinkovoimala tuottaa 0.2 kWh, hissi 1 kuluttaa 0.3 kWh ja hissi 2 0.1 kWh, laskee SolarUsage hissien 1 saavan 0.15 kWh ja hissien 2 0.05 kWh eli molemmat hissit saavat tällöin puolet energiastaan aurinkovoimalasta.

Ethereum-älysoipimus koostuu kolmesta osasta: tila, funktiot ja tapahtumat. SolarUsage-sopimuksen tila eli lohkoketjuun tallennettava tieto koostuu jokaista osallistujaa edustavasta osallistujan tietorakenteesta. Osallistujasta tallennetaan nimi, tyyppi (kuluttaja / tuottaja) koko sopimuksen aikainen kokonaisenergian käyttö / kulutus, paikallinen energia sekä viimeisimmän aikajakson energia. Aurinkovoimalan kohdalla paikallinen energia kertoo paljonko kokonaistuotosta kuluttajat ovat käyttäneet. Hissillä se kertoo kuinka paljon hissi on aurinkovoimaa käyttänyt. Nämä tilatiedot voi lukea milloin tahansa lohkoketjusta. Älysoipimusta käytetään sen tarjoamien funktioiden kautta, jotka voivat muuttaa sen tilaa. SolarUsagen funktioita ovat osallistujien rekisteröityminen, joka tehdään ennen energioiden lähettämisen aloitusta, sekä osallistujan jakson aikaisen energian raportointi, joka huolehtii myös aurinkoenergian käytön laskemisesta jakson viimeisen energiaraportin saatuaan. Tilan lukemisen lisäksi älysoipimuksen toimintaa voi tarkkailla sen lähettämiä tapahtumia seuraamalla. SolarUsage lähettää tapahtumia, kun kaikki osallistujat ovat rekisteröityneet, osallistuja raportoi energiansa, kuluttajalle on laskettu aurinkovoiman käyttö ja raportointikierron on päättynyt.

SolarUsagen tilan ja tapahtumien tarkastelemiseksi toteutettiin yksinkertainen selainkäyttöliittymä, joka löytyy osoitteesta <http://procem.ain.rd.tut.fi:8080/>. Kuvassa 5.2 on ruutukaappaus sivusta. Avauttuuaan SolarUsage Monitor -sivu hakee ja näyttää jokaisen osallistujan tilan sekä kuusi viimeisintä

<sup>2</sup> Keskitetyn tietolähteen käyttö tässä on vain toteutusyksityiskohta. Jos demosta olisi haluttu tehdä täysin hajautettu, olisi tietolähteenä pitänyt käyttää suoraan eri Laatuvahti-mittareita.

älysolimuksen tapahtumaa. Tämän jälkeen se jää seuraamaan sopimusta näyttäen uusia tapahtumia niiden syntyessä ja päivittäen näytettyjä osallistujien tietoja aina jakson päättymisestä kertovan tapahtuman tullessa. SolarUsage Monitor on yhteydessä lohkoketjuun oman Ethereum-solmunsa kautta, joka ei kuitenkaan ole yksi lohkoja vahvistavista solmuista.



Kuva 5.2 Ruutukaappaus SolarUsage Monitor sivusta.

Ethereum-solmujen ohjelmistona käytettiin Gethiä (<https://geth.ethereum.org/>). SolarUsage-älysolimus toteutettiin Ethereumin Solidity -ohjelmointikielillä (<https://github.com/ethereum/solidity>). RTL Sender ja SolarUsage Monitor on molemmat toteutettu JavaScriptillä, mutta RTL Sender toimii palvelimella Node.js ympäristössä (<https://nodejs.org/>) ja SolarUsage Monitor nettiselaimessa. Vuorovaikutukseen älysolimuksen kanssa molemmissa käytettiin Truffle-kehystä (<https://truffle-framework.com/>), joka tarjoaa ohjelmakirjastoja ja työkaluja helpottamaan Ethereum-älysolimusten kehittämistä. Trufflea käytettiin myös mm. älysolimuksen koodin kääntämisessä ja sopimuksen lähettämässä Ethereum-verkkoon.

Demon avulla saatiin konkreettisia kokemuksia yleisesti lohkoketjuteknologian käytöstä ja erityisesti Ethereumista. Ethereumista opittiin esimerkiksi, että teknologiaan liittyy yllättäviä teknisiä rajoitteita, kuten puuttuva tuki desimaaliluvuille ja rajoituksia siihen, kuinka paljon aikaan järjestelmässä voi luottaa, kun kaikki verkon solmut eivät välttämättä ole täsmälleen samassa ajassa. Lohkoketjun pohjaajatuksena olevasta tiedon muuttumattomuudesta seuraa, että älysolimusta ei voi lohkoketjuun lähettämisen jälkeen päivittää vaan siitä on luotava uusi versio, jolloin tiedon säilyvyys ja käyttäjien siirtyminen uuteen versioon vaatii erityisiä toimenpiteitä verrattuna esim. keskitettyyn web-pohjaiseen järjestelmään, joihin tämän demon puitteissa ei perehdytty. Demo havainnollistaa myös hyvin, että lohkoketjupohjaiseen järjestelmään liittyy itse lohkoketjuosan lisäksi myös muita komponentteja, ja näiden ja lohkoketjun välinen vuorovaikutus on mietittävä tarkkaan. Demon nykyisessä versiossa esimerkiksi yksinkertaisesta toteutuksesta johtuen yhden osallistujan energiaraportin puuttuminen kierrokselta lamauttaa tällä hetkellä koko järjestelmän, kun seuraavalle kierrokselle ei voida edetä ennen kaikkien raportointia. Lohkoketjun ulkopuoliseen toimintaan liittyen tärkeää on myös huomioida, että lohkoketju yksinään ei tietenkään takaa sinne saapuvan tiedon luotettavuutta. Lohkoketju vain varmistaa, että tiedon tallentamisen jälkeen tieto ei muutu.

Demon yksinkertaisuudesta, yhden teknologian käytöstä ja skenaarion osittaisesta keinotekoisuudesta johtuen siitä ei voi vetää kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä lohkoketjuteknologian yleisestä

soveltavuudesta energia-alalle. Sen avulla kuitenkin onnistuttiin parantamaan projektiryhmän ymmärrystä lohkoketjuteknologiasta, josta on hyötyä esimerkiksi mahdollisissa jatkoprojekteissa. Projektin lohkoketjukokemuksista, liiketoimintamalleista ja demon rakentamisesta on tarkoitus koota vielä julkaisu vuoden 2018 aikana.

## 6 Marjamäen energiaomavarainen teollisuuskäyttöverkko

### 6.1 Yleiskuvaus

Marjamäen teollisuusalue sijoittuu Lempäälän kuntaan, Helsinki – Tampere moottoritien viereen kauppakeskus Ideaparkin pohjoispuolelle. Teollisuusalueelle rakenteilla olevan käyttöverkon ja siinä toimivan energiayhteisön tarkoituksena on lisätä uusiutuvan energian tuotantoa ja käyttöä, mikä heijastaa Lempäälän kunnan yleisempää tavoitetta, eli olemaan energiaomavarainen ja toimimaan ympäristövastuullisesti. Käyttöverkon toteutuksesta vastaa Lempäälän Energia Oy Lempäälän energiayhteisö- eli LEMENE-hankkeen kautta, jolle Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM) myönsi energiakärkihankesuissa tammikuussa 2017 noin 4,7 miljoonaa euroa investointitukea. Lisäksi Lempäälän kunnanvaltuusto on myöntänyt 9,7 miljoonan euron rahoituslainan takauksen.

Käyttöverkon tavoite on olla energiaomavarainen ja hetkellisesti jopa teho-omavarainen. Lisäksi tavoite on, että kuuluminen energiayhteisöön on taloudellisesti kannattavaa. Kannattavuuteen pyritään energian säilymisperiaatetta hyödyntäen energiayhteisön korkealla kokonaisenergiatehokkuudella ja uusiutuvilla energianlähteillä. Koska energiayhteisön teollisuusjäsenet ovat kytkettyinä toisiinsa sähkö-, lämpö- ja kaasuverkkojen kautta on mahdollista luoda energian kiertotaloutta ja resurssien jakamistaloutta, joissa hyödynnetään tuotannot ja kuormat siten, että energiahäviöt kokonaisuudessaan minimoituvat. Esimerkiksi kompressoritekniikan avulla voidaan hyödyntää sekä kylmä- ja lämpöenergia yhteisössä tehokkaasti, vaikka kulutuspaikat eivät olisi samassa yrityksessä. Vastaavasti toisen yrityksen hetkellinen ylijäämäaurinkosähkö voidaan hyödyntää toisessa yrityksessä. Hetkellisen energiatasapainon helpottamiseksi otetaan myös energiavarastoja käyttöön. Teho-omavaraisuuskäytös ansiosta yhteisö pysyy toiminnassa myös julkisen sähköverkon häiriötilanteissa ja jopa mahdollistaa julkisen sähköverkon tukemista suurissa tehoaihtelutilanteissa. Lempäälän Energian rooli LEMENE-hankkeessa on toimia paitsi sähkön ja lämmön tuottajana myös operaattorina energiayhteisössä toimivien yritysten välillä.

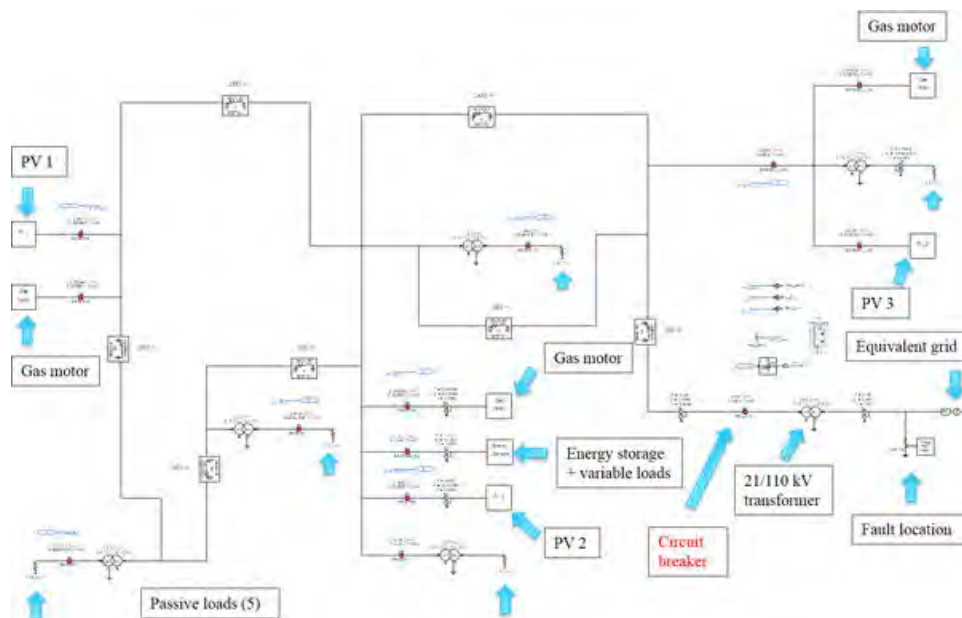
Marjamäen teollisuuskäyttöverkko koostuu yhteisteholtaan 4 MW aurinkopaneelientistä, kuudesta yhteisteholtaan 8,4 MW kaasumoottorista suuntaajineen, 2,4 MW-/1.6 MWh akkuvarastosta ja kahdesta 65 kW polttokennosta. Lisäksi alueella on lämpö- ja kylmävarastoja sekä ohjattavia resursseja ja kuormia. Ohjattavina resursseina on kiinteistöjen sähkö- ja lämpökuormien lisäksi mm. kylmävarasto, energiavarastot sekä suunnitteilla olevat sähköautojen latausasemat. Käyttöverkolla on keskijänniteyhteys paikalliseen jakeluverkonhaltijaan. Tuotantoyksiköt liitetään eri osiin käyttöverkkoa omilla, tyyppillisesti 0,4/21 kV –jakelumuntajilla. Kuva 6.1 havainnollistaa käyttöverkon energiaresursseja ja niiden liittymistä eri energiaverkkoihin.



Kuva 6.1. Marjämäen mikroverkkoon liittyvät energiasurssit ja -verkot (<http://www.lempaalanenergia.fi/content/fi/1/20126/LEMENE.html>)

## 6.2 Sähköverkon mallintaminen

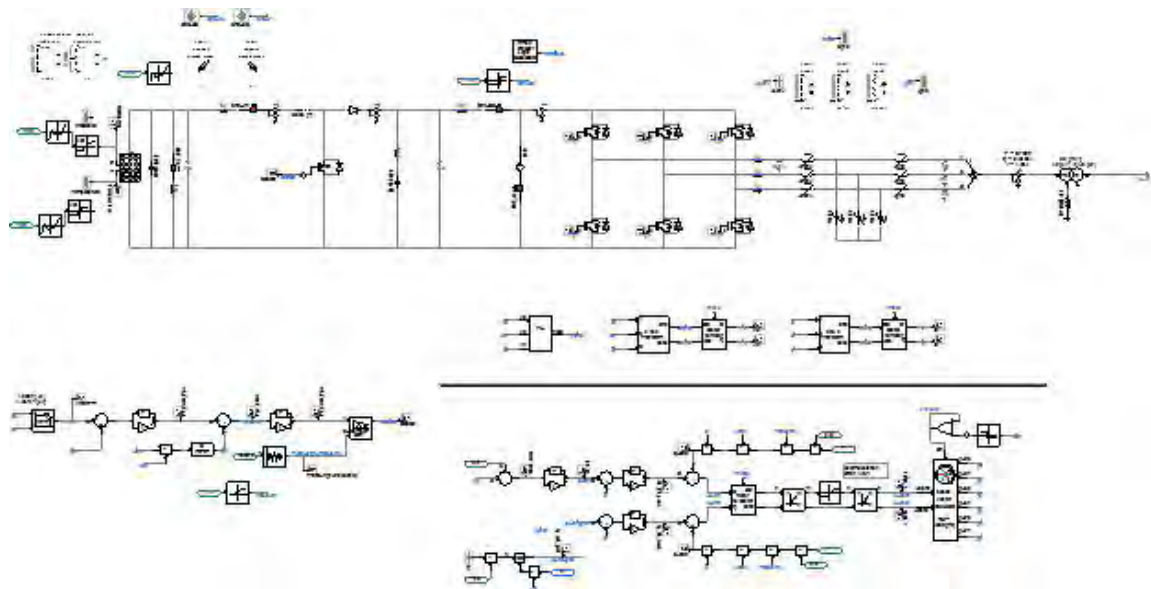
ProCem-projektissa mallinnettiin Marjämäen teollisuusmikroverkon koko sähköverkko PSCAD-transienttisimulointiohjelmalla. Kuvassa 6.2 on PSCAD-ohjelmalla rakennettu Marjämäen mikroverkon yleiskuva verkkotopologiasta ja tuotantoyksiköiden sijoittelusta.



Kuva 6.2. Marjämäen mikroverkon yleiskuva.

Kaikkia tuotantoyksiköitä ei kuvassa 6.2 ole suoraan näkyvissä, koska osa yksiköistä on rakennettu alamoduulien sisään hierarkisesti. Tuotantoyksiköiden malleihin kuuluvat primäärienergiälähde, tehoelektronikka- ja säätöpiireineen sekä mahdolliset verkkosuotimet. Primäärienergiälähteestä

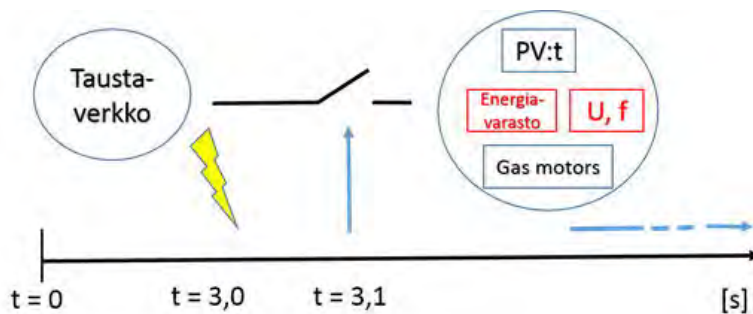
(aurinko, kaasumoottori, akkuvarasto) mallinnetaan lähtökohtaisesti lähinnä tehonmuutosnopeudet ja -rajoitukset. Aurinkopaneelien yhteydessä tämä tarkoittaa auringon säteilyteho- ja lämpötilamuutosten vaikutusta paneelienten ulostulotehoon. Kaasumoottoreiden sallimat tehonmuutosnopeudet otetaan huomioon antamalla kestonmagneettitahtikonemallille vääntömomentti, jossa moottorin tehorojoitukset on otettu huomioon. Tasa- ja vaihtosuuntaajat sekä hakkurit mallinnetaan tarkasti käyttäen IGBT-kytkimiä, jossa jokainen kytkentätapahtuma otetaan mallin laskennassa huomioon. IGBT-kytkimiä ohjataan jokaiseen tuotantoyksikön yhteyteen erikseen mallinnettujen ohjaus- ja säätöpiiri- lohkojen avulla. Kuvassa 6.3 on yksityiskohtaisempi malli aurinkovoimalasta, tehoelektroniikkakomponenteista ja säätöpiireistä.



Kuva 6.3. Aurinkovoimala ohjaus- ja säätöpiireineen.

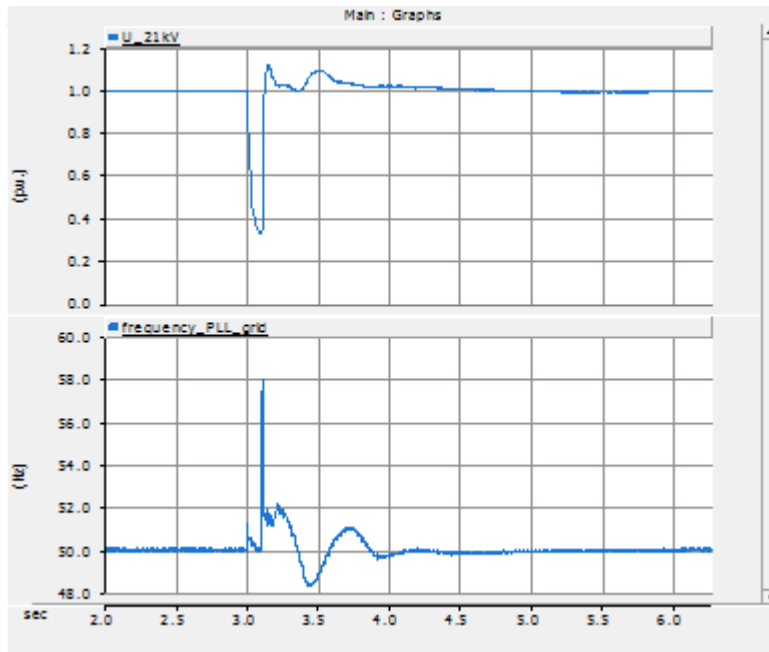
On huomattava, että kuva 6.3 pitää sisällään kaikki komponentit ja ohjauspiirit, joita kuvassa 6.2 näkyi kuvattuna alamoduulin sisällä. Verkkosuotimet ja johdot mallinnetaan passiivisten, resistiivisten, induktiivisten ja kapasitiivisten komponenttien avulla. Muuntajissa on mahdollista ottaa magneettinen kyllästyminen huomioon, joka vaikuttaa etenkin yliaaltotarkasteluissa. Yhteys 110 kV –alueverkkoon mallinnetaan ekvivalenttijännitelähteenä.

Marjamäen verkosta rakennetulla PSCAD-mallilla saatiin ensimmäiset transienttisimuloinnit tehtyä. Kaikkia tietoja esim. tuotantoyksiköiden säätöpiireistä ei ollut vielä käytössä, joten näissä tapauksissa käytettiin geneerisiä malleja. Seuraavassa esimerkissä simuloitu tapahtumasekvenssi kuvaa saarekointumista, jossa syöttävän verkon vian seurauksena saareke (Marjamäki) irtoaa syöttävästä verkosta ja jatkaa toimintaansa saarekkeena energiavaraston säätäessä taajuutta ja jännitettä. Kuva 6.4 havainnollistaa tapahtumaketjua.



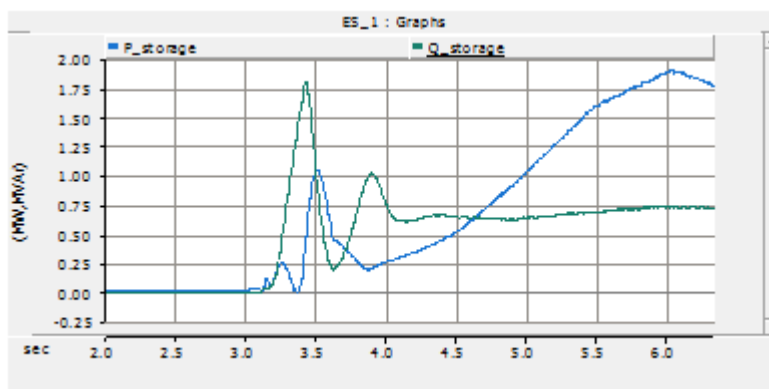
Kuva 6.4. Vikasekvenssi.

Kuvassa 6.5 näkyy Marjamäen liityntäpisteen kokema jännitekuoppa ja taajuusmittauksen käyttäytyminen syöttävän verkon kolmivaiheisen vian aikana. Jännitekuopan syvyys riippuu mm. vikapaikasta, vikatyypistä sekä vikavastuksesta. Taajuuden mittaus vian aikana, erityisesti lähellä vikapaikkaa, on tyyppillisesti erittäin haastavaa. Verkon jännitetransienteista johtuen myös verkon vaihekulmaa voi olla mahdotonta mitata. Tämä aiheuttaa ongelmia erityisesti tuotanto- tai kuormitusyksiköiden vaihtosuuntaajille, jotka käyttävät verkon vaihekulmaa pysyäkseen tahdissa.



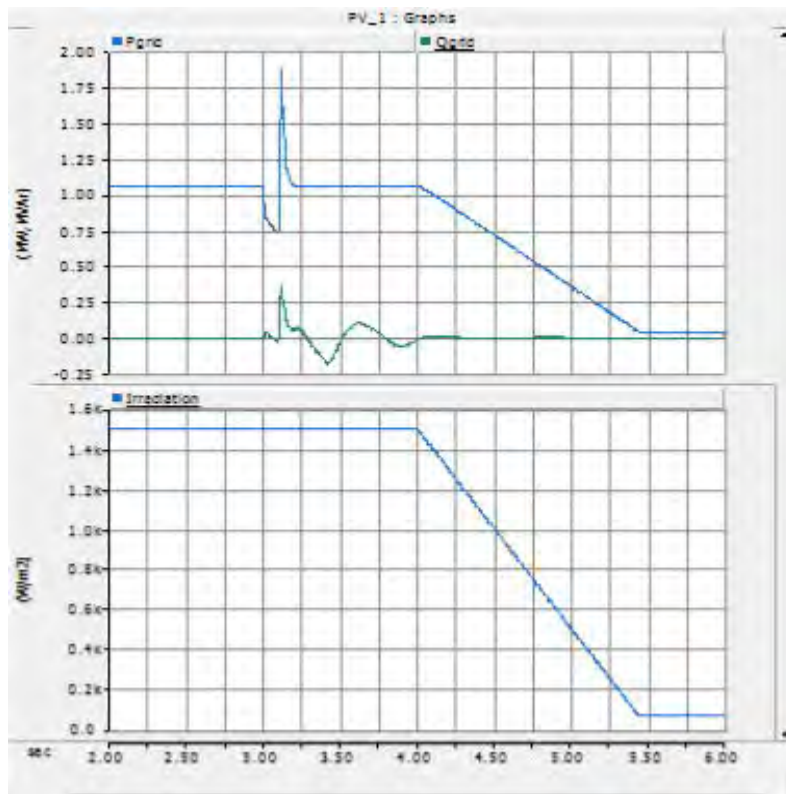
Kuva 6.5. Liityntäpisteen jännite ja mitattu taajuus.

Kuvassa 6.6 näkyvät energiavaraston päto- ja loistehot tapahtumaketjun aikana. Saarekoitumisen alussa energiavarasto paikkaa saarekkeen tehovajeen (0,5 MW). Kohdan  $t = 4$  s jälkeen energiavarasto tasaa saarekkeen päto- ja loistehomuutokset, jotka johtuvat aurinkovoimalaitoksen tehonalenemasta aurin- gon säteilyintensiteetin laskiessa huomattavasti. Nämä näkyvät kuvassa 6.7.



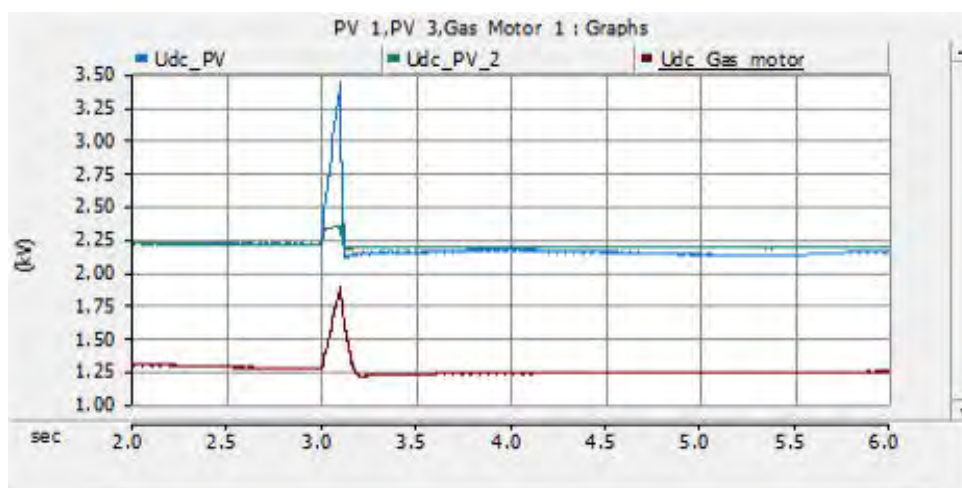
Kuva 6.6. Energiavaraston päto- ja loistehovaste.





Kuva 6.7. Aurinkovoimalaitoksen verkkoon syöttämät päto- ja loistehot sekä auringon säteilyintensiteetti.

Kuvassa 6.8 näkyy kahden aurinkovoimalaitoksen ja yhden kaasumoottorin välijännitepiirien vasteet vian aikana. Vian aiheuttamasta jännitekuopasta johtuen voimalaitosten kyky syöttää tehoa verkkoon romahtaa. Primäärienergiälähde ei usein pysty reagoimaan muuttuneeseen verkon tilanteeseen tarpeeksi nopeasti ja jatkaa tehon syöttöä välijännitepiiriin. Tästä johtuen välijännitepiirien kondensaattorien jännitteet nousevat. Kyseisen tilanteen aiheuttama vaaratilanne pystytään hoitamaan esimerkiksi kondensaattorin rinnalle kytketyllä vastuskuormalla, johon ylimääräinen teho ohjataan. Tässä tarkasteluissa vastusta ei mallinnettu, koska näin kondensaattoreiden jännitteenousu saatiin selkeämmin esille.



Kuva 6.8. Kahden aurinkovoimalaitoksen ja yhden kaasumoottorin välijännitepiirien käyttäytyminen vian aikana.

Tapahtumaketju osoittaa, miten energiavarasto pystyy pitämään saarekkeen stabiilina. Saarekoitumisen lisäksi dynaamiset ilmiöt pitävät sisällään mm. eri vikatapaukset mikroverkon sisällä ja tuotantoyksiköiden odottamattomat irtikytkennät tai tehovasteet. Mallinnusten ja näitä tukevien mittausten avulla pystytään arvioimaan mikroverkon stabiiliuutta eri toimintapisteissä, säätötapojen ja –parametrien vaikutuksia mikroverkon vasteeseen sekä mikroverkon potentiaalia toimia kantaverkon taa-juusohjattavana reservinä.

## 6.3 Mikroverkon tehotasapaino

Marjamäen mikroverkkoa kutsutaan älykkääksi, mikä tehotasapainon näkökulmasta tarkoittaa, että mikroverkon kaikkia resursseja voidaan hyödyntää energiayhteisön kannalta optimaalisella tavalla. Optimaalisen toiminnan ennustamiseksi rakennettiin tehopohjainen malli resursseista ja optimoitiin niiden käyttöä mitattujen ja ennustettujen kulutusdatojen kanssa.

### 6.3.1 Tehotasapainon mallinnus

Mikroverkko mahdollistaa resurssien optimaalisen käytön energiayhteisön sisällä. Jotta energia voidaan hyödyntää yhteisöllisesti sen eri muodoissa, mikroverkko koostuu Marjamäen tapauksessa kolmesta energiaverkosta; sähkö-, lämpö-, ja kaasuverkoista ja paikallisesti jopa neljännestä verkosta eli kylmäverkosta. Kuva 6.1 havainnollistaa mikroverkossa olevia energiaresursseja ja niiden kytkeytymistä eri energiaverkkoihin.

Marjamäen teollisuusmikroverkko on tällä hetkellä rakentumassa ja energiajärjestelmän tehopohjaiseen dynaamiseen rakenteeseen on voitu ottaa mukaan tiedossa olleet resurssit:

- Aurinkovoimaloiden yhteisteho 4 MW
- Kuuden kaasumoottorin yhteissähköteho 8,1 MW
- Kahden polttokennon yhteissähköteho 130 kW
- Sähköakuston teho 2,4 MW ja kapasiteetti 1.6 MWh

Tarkasteluhetki on vuosi 2017 ja sen takia kulutus on mallinnuksessa kuvattu mitatuilla ja ennustetuilla aikasarjoilla:

- Sähköenergian kulutus, LEMENE-hankkeen toimittama ennuste pohjautuen vuoden 2015 mittauksiin. Lisäksi data on aikaistettu kolmella vuorokaudella siten, että viikkorytmi olisi samanlainen kuin vertailuvuonna 2017.
- Lämpöenergian kulutus, LEMENE-hankkeen toimittama mitattu aikasarja vuodelta 2017, missä muutama puuttuva vuorokausi on korvattu vastaavilla vuorokausilla.

Lisäksi laskentamalli tarvitsee seuraavat aikasarjat:

- Nord Pool Elspot Day-ahead Suomen alueen tuntienergiat hinnat
- Auringon säteilykerroin, Kari Lappalaisen toimittama raakadata TTY:llä sijaitsevalla säteilymittarilta. Tarkastelussa oletetaan, että säteily on sama Marjamäellä kuin Hervannassa.

Laskentamallin rakenne on toistaiseksi yksinkertainen, koska dynamiikka löytyy ainoastaan sähköakusta. Muuten malli on staattinen. Laskentamallissa yhtälöillä kuvataan seuraavia tekijöitä:

- Hetkellinen tehotasapaino; tuotanto ja kulutus tasapainossa
- Sähköakun uusi varaustila on edellinen varaustila muutettuna aikajakson varausmuutoksella
- Kustannusfunktiossa on mallinnettu ostosähkön sekä polttokennojen ja kaasumoottoreiden kaasun kustannus.

Toiminnan reunaehdot ovat:

- Sähköakun varaustilanne 30 – 90 % varauskapasiteetista
- Tuotantoresurssien tehojen ylärajat

Tällä mallirakenteella saadaan vapaiksi muuttujiksi:

- Ostosähkön teho

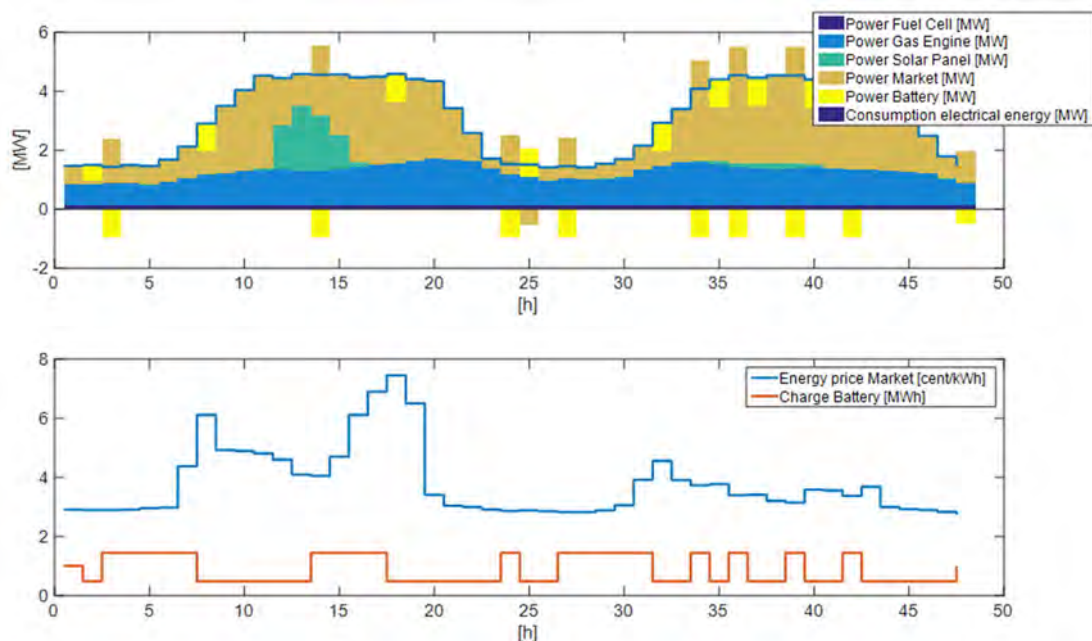
- Sähköakun teho; purkaus positiivinen ja lataus negatiivinen
- Sähköakun varaustilanne
- Muuttuvien kustannusten summa

Laskentamalli ohjelmoitiin General Algebraic Modeling System (GAMS)-kielellä. Mallia on seuraavassa luvussa käytetty Marjamäen mikroverkon vertailuvuoden 2017 tarkasteluun.

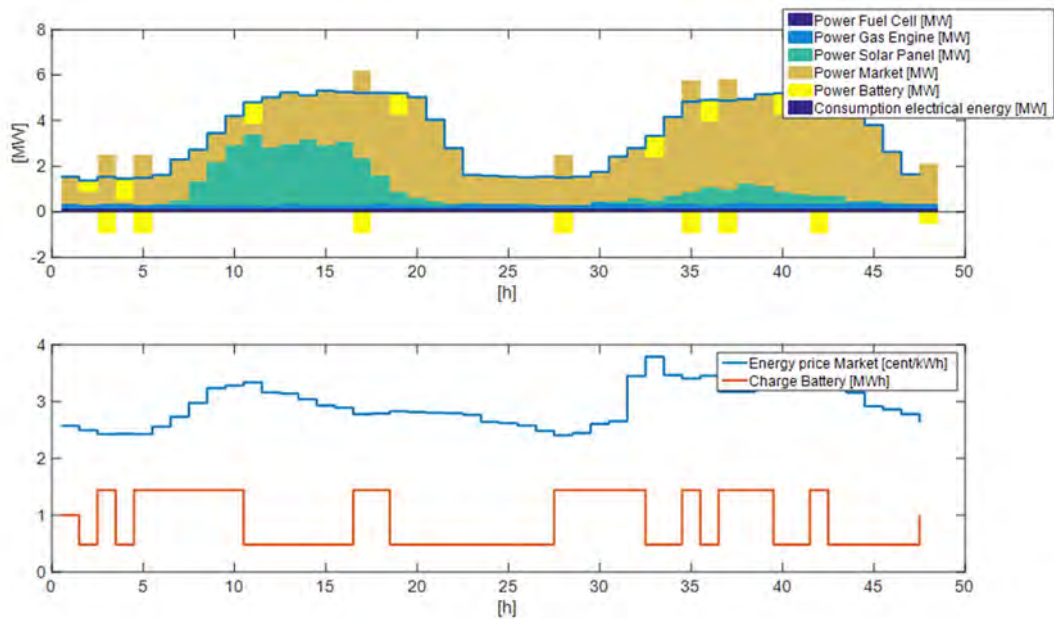
### 6.3.2 Energialähteiden käytön optimointi

Simuloidun Marjamäen teollisuusmikroverkon ajostrategia on tällä hetkellä suoraviivainen, koska teollisuusalueen toimijoiden omat resurssit eivät ole tiedossa ja osittain vielä vasta suunnittelussa. Polttokennoja ajetaan jatkuvasti täydellä teholla ja puuttuva lämmöntarve tuotetaan kaasumoottoreilla. Sähkötase täytetään aurinkovoimalla, polttokennojen ja kaasumoottoreiden sähköntuotannolla, ja epätasapaino tasataan ostamalla tai myymällä sähköä verkkoon symmetrisellä hinnalla. Tässä mallissa sähköakku lataa ja purkaa itsensä ilman häviökustannuksia siten, että tasauksesta syntyy sähkömarkkinatoiminnassa mahdollisimman matalat kustannukset. Varsinainen toiminnan optimointi suoritettiin GAMS-ohjelmistoon liitettyllä optimointialgoritmilla, IBM ILOG CPLEX.

Optimoidun toiminnan havainnollistamiseksi esitetään mikroverkon toiminta kylmän vuodenajan peräkkäisiltä vuorokausilta, missä on vuodenaikaan nähden paljon ja vähän auringonpaistetta. Vastaavat lämpimän vuodenajan päivät on myös esitetty. Voidaan olettaa, että kaikkien muiden vuoden päivien toiminnot ovat näiden neljän ääripäivän välissä. Lisäksi esitetään koko vuoden toiminta eri resurssien histogrammina. Kuvassa 6.9 on esitetty kylmän vuodenajan päivät ja vastaavasti kuvassa 6.10 lämpimän vuodenajan päivät.



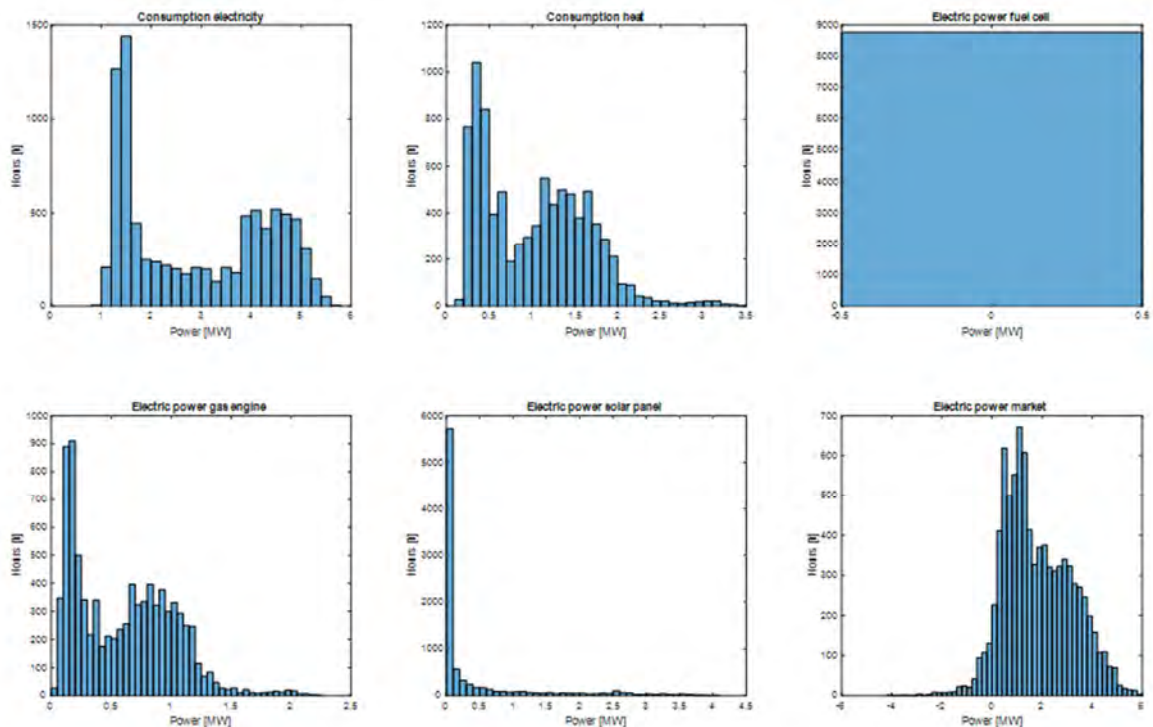
Kuva 6.9. Marjamäen mikroverkon optimointitulokset 24.-25.1.2017 (ti-ke).



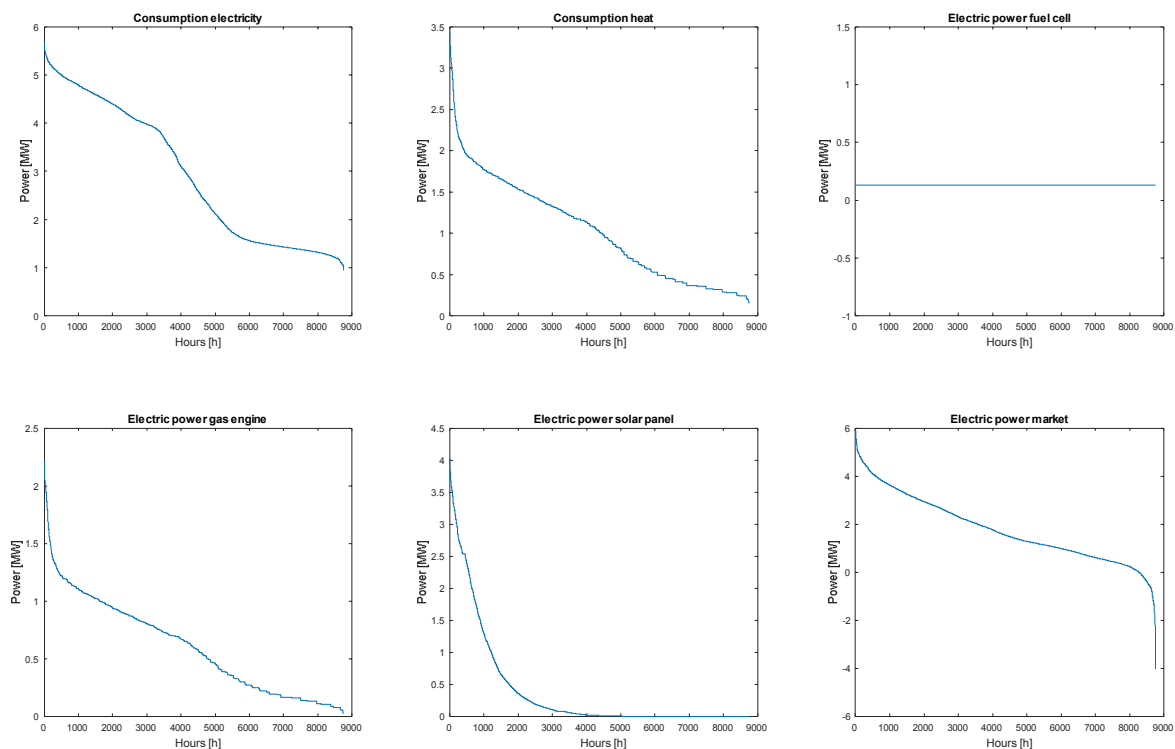
Kuva 6.10. Marjamäen mikroverkon optimointitulokset 18.-19.7.2017 (ti-ke).

Tulokset näyttävät, että sähkön kulutus on hyvin samankaltainen molemmissa kuvissa, oma tuotanto ei ylitä sähkötarvetta ja myyminen verkkoon on tapahtunut ainoastaan kerran edullisen sähkön hinnan muutoksen takia. Talvella kaasumoottorit tuottavat suuren osan sähkötarpeesta, kun taas aurinkoisten päivien aikana kesällä aurinkoenergia dominoi keskipäivällä.

Kuvassa 6.11 on esitetty vuositason energian käyttö ja sähköenergian hankinta histogrammeina ja kuvassa 6.12 pysyvyykäyrinä. Kuvassa 6.11 näkyy jakaumien kaksoishuippuluonne, joka suoran ajostrategiakytken kautta näkyy myös kaasumoottoreiden sähköntuotannossa. Aurinkosähkön tuotanto on eniten jakautunut, kun taas polttokennojen tuotanto on täysin tasainen. Lisäämällä kuluja sähköakun toiminnalle sen aktiviteetti vähenee ja sitä myöten myös sähkön myynti verkkoon vähenee.



Kuva 6.11. Marjamäen mikroverkon simuloitu energian käyttö ja hankinta vuonna 2017 histogrammeina.



Kuva 6.12. Marjamäen mikroverkon simuloitu energian käyttö ja hankinta vuonna 2017 pysyvyyskäyrinä.

Myös kuvassa 6.12 näkyy yhtäläisyys lämmön kulutuksen ja kaasumoottoireiden sähköntuotannon välissä johtuen suorasta ajostrategiakytkenästä. Aurinkosähkön tuottokäyrästä näkyy, miten suuren osan ajasta tuotanto on hyvin vähäistä Suomessa.

## 6.4 Energiayhteisön mahdollisuuksia

Energiayhteisön sisäisellä yhteistyöllä on mahdollista hyödyntää energian säilymisen periaatetta ja luoda kustannustehokas energian kiertotalous. Energian säilymisperiaatteen mukaisesti energia ei häviä vaan muuttaa vain muotoaan ja täten yhteisön toisen jäsenen jäte-energia voi olla toisen jäsenen raakaenergia. Periaate on ennestään tunnettu ja hyödynnetty saman talousyksikön sisällä, mutta energiayhteisö avaa laajempia mahdollisuuksia säilymisperiaatteen hyödyntämiseen.

Mikroverkon energiaverkot mahdollistavat eri talousyksiköiden kytkeytymisen energiayhteisöön, mutta tämä ei sinänsä takaa kustannustehokasta energian kiertotaloutta. Vasta jäsenten investoiminen yhteisön kannalta hyödyllisiin energiaresursseihin ja niiden tuominen yhteiseen käyttöön avaa todelliset mahdollisuudet kustannustehokkaan energian kiertotalouteen. Investoiminen yleishyödyllisiin energiaresursseihin tapahtuu vapaassa markkinataloudessa ainoastaan, jos yhteisön energiayhteistyön yhteishyödyn jakomalli on kannustava yhteisön jäsenille. Lisäksi yhteishyödyn jakomalli kannattaisi olla sellainen, että samalla kun koko yhteisön yhteishyöty optimoituu, myös yhteisön jäsenten oma energiatalous optimoituu. Tällä tavalla energiayhteisö saavuttaa mahdollisimman korkean kustannustehokkuuden energian kiertotaloutta hyödyntäen ja synnyttää taloudellista kannattavuutta eri kustannusyksiköiden pysymiseen jäsenenä energiayhteisössä.

Marjamäen tapauksessa luodaan hyvät mahdollisuudet taloudelliseen kannattavuuteen, koska investoidaan kolmeen verkkoon; sähkö-, lämpö-, ja kaasuverkkoihin ja paikallisesti jopa neljänteen verkkoon eli kylmäverkkoon. Energiakärkihankkeen investointituen turvin LEMENE-hankkeella on myös hyvät mahdollisuudet luoda kannustava yhteishyödyn jakomalli, joka kannustaa energiaintensiivisiä yrityksiä investoimaan alueeseen, koska jakomalli takaa edullisen raakaenergian hankkimisen ja jäte-energian kaupallisen hyödyntämisen.

## 7 Yhteenveto ja johtopäätökset

Seuraavassa esitettyyn taulukkoon 7.1 on koottu tutkimusprojektin keskeisiä tutkimuskohteita ja niihin liittyviä tuloksia ja johtopäätöksiä jaoteltuna raportin päälukujen mukaan. Kaikkia raportissa ja projektin aikana tehdyissä muissa julkaisuissa esitettyjä tuloksia ei luonnollisesti pysty kuvaamaan yhdessä taulukossa. Koska yhteenvetotaulukko on haluttu pitää tiiviinä, ei tietyn toimijan tai näkökulman kannalta oleellisia tuloksia ole taulukossa välttämättä esillä, vaikka niitä olisikin käsitelty raportissa.

Taulukko 7.1. Yhteenveto keskeisistä tuloksista

Tutkimuskohde	Keskeiset tulokset ja johtopäätökset	Raportin kappale / Julkaisu (nro)
Prosumer ja energiayhteisö osana energijärjestelmän ja –liiketoiminnan murrosta		
Prosumer ja energiayhteisön käsitteet ja käyttötapaukset	Kokonaisymmärrys erilaisista energiayhteisöistä ja mikroverkkotyypeistä ja niiden resurssien hallinnasta.	Kpl <a href="#">2.1</a> , <a href="#">2.3</a> [1]
Skenaariot prosumerin roolin kehityksestä Suomen energijärjestelmässä	Haastattelujen perusteella tärkeimmät prosumerin rooliin liittyvät suuren epävarmuuden tekijät: politiikka ja regulaatio, kuluttajan roolin kehitys, uusien teknologioiden kehitys.  Merkitykselliset trendit: digitalisaatio, toimialojen konvergenssi, uudet liiketoimintamallit.	Kpl <a href="#">2.2</a>
Prosumer-ekosysteemin toimintaympäristö ja sen vuorovaikutus ympäröiviin järjestelmiin	Hajautettu energijärjestelmä on kiinteästi yhteydessä digitalisaation ja liikenteen sähköistymisen (sähköautojen) yleistymiseen. Uudet osaamisvaatimukset, ja vaikutus sähkömarkkinoihin luovat kilpailua keskitetyn ja hajautetun järjestelmän välille. Tietoturvan ja akkujen käyttötapojen muodostuminen tulee lähentämään toimialoja.	Kpl <a href="#">2.2</a> [7]
Uusien liiketoimintamallien kartoittaminen, mm. työpajat akkuvarastoihin, sähköautoiluun, lohkoketjuihin liittyen	Lisäarvon tuottoon paljon mahdollisuuksia. Teknologian kypsyys, regulaatio ja tulo- ja kustannusmallit vaativat kehitystä.	Kpl <a href="#">2.2</a> ja <a href="#">5.2</a> [18]
Prosumerien potentiaali lisäarvontuottajina energiainnovaatioiden kehittämisessä (co-creation)	Kiinnostus kohdistuu demonstraatio- ja kaupallistamisvaiheeseen (testaus, palaute, liiketoimintamallit). Erityisesti aikaiset omaksujat (early adopter) arvostavat luontaisiin (intrinsic) motivaatioihin perustuvia kannusteita.	[2], [3], [4], [6]
Prosumer-aktiiviteetteihin liittyvien politiikkatoimien kartoitus: hajautettu tuotanto, energian myynti- ja varastointi, kysyntäjousto, sähköautot	Politiikkatoimet edelleen ”siiloissa”. Prosumereille suunnattuja kannusteita Suomessa niukasti. Politiikkatoimet voisivat paremmin tukea prosumerin asiakaspolkua poistamalla pullonkauloja esimerkiksi luvitusvaiheessa tai tukemalla kysynnänjoustoa käyttövaiheessa.	Kpl <a href="#">2.1.2</a> [8], [14], [23], [25]
Politiikkatoimien vaikutus kuluttajien kiinnostukseen ottaa käyttöön uusiutuvaan energiaan perustuvaa teknologiaa	Sekä taloudelliset että ei-taloudelliset tukitoimet ovat merkityksellisiä. Kuluttajat odottavat erityisesti kokonaisratkaisuja.	Kpl <a href="#">2.1.2</a> [16]
Eri omistusrakenteisten mikroverkkojen lainsäädännöllisiä haasteita	Suurimpia haasteita ovat puuttuvat selkeät määrittelyt ja mikroverkkoja koskeva lainsäädäntö. Verkkoyhtiöiden mukanaolo projekteissa on lyhyellä aikavälillä tärkeä prosessien sujuvoittamiseksi, mutta lainsäädännön vakiintuessa kolmansien osapuolten omistamien mikroverkkojen potentiaali kasvaa.	Kpl <a href="#">2.1.2</a> [13]

Prosumerin resurssien kannattavuus		
Pienasiakkaan (prosumer) omien resurssien kannattavuus, erityisesti akkuvarasto ja aurinkosähköjärjestelmä	Tehopohjainen siirtotariffi parantaa pienasiakkaan sähkövaraston kannattavuutta, erityisesti aurinkosähkön ja akun yhdistelmä olisi jo nykyisellään monessa kohteessa kannattava, mutta vaatii oikein mitoitettuja ratkaisuja ja kehittyneitä ohjausta. Varaston ohjauksessa on tärkeä huomioida erilaiset hinnoitteluun liittyvät kannusteet sekä akun häviöt ja kuluminen. Aurinkopaneelien ja akkujen hinnan laskiessa, kannattavuus paranee tulevaisuudessa edelleen.	Kpl <a href="#">3.1</a> [9], [15]
Kerrostalon energiayhteisö	Energiayhteisömallilla, jossa kiinteistön yhteiset resurssit ja huoneistojen kuormitukset yhdistyvät kokonaisuudeksi, omien resurssien kannattavuutta kerrostalossa saadaan parannettua. Energiayhteisössä aurinkopaneelit voidaan mitoittaa huomattavasti suuremmiksi kuin perinteisessä ratkaisussa, erityisesti jos akku on käytössä. Sähkövaraston käyttö voidaan saada kannattavaksi kerrostalossa energiayhteisömallilla.	Kpl <a href="#">3.2</a> [19]
Mikroverkon verkkopalvelumaksu	Mikroverkoille voidaan muodostaa sellaisia verkkopalvelutariffeja, jotka sekä takaavat riittävän kustannusvastaavan tulon verkkoyhtiölle että mikroverkon omien tuotanto- ja muiden energiaressurssien mahdollistaman kustannussäästön mikroverkon operaattorille.	Kpl <a href="#">3.3</a> [12]
Kampusareenan pilotti		
Älykkään kiinteistön monitorointi ja hallinta – case Kampusareenan pilotti	Projektissa syntyi pilotin pohjalta tutkimusalusta kokonaisuudessaan sisältäen ICT-järjestelmän datalähteineen. Keskeinen havainto on se, että useasta lähteestä kerättävän tiedon yhdistäminen on ennakoituakin hankalampaa. Tiedon tehokas käyttäminen edellyttää usean eri osaamisalueen yhteistyötä, sekä hyvin mietittyjä tietomalleja.	kpl <a href="#">4.1</a> ja <a href="#">4.6</a>
Datan keräys eri lähteistä	Pilotissa onnistuttiin keräämään dataa useasta sekä Kampusareenalla sijaitsevasta että ulkopuolisesta datalähteestä. Toteutuksessa korostui se, että jokainen datalähde jouduttiin käsittelemään erikseen erilaisten datamallien ja yhteystekniikoiden vuoksi. Lisäksi tarvitaan tarkkaa tietoa kunkin lähteen datasta, että voidaan päättää, mitkä valtavasta määrästä saatavilla olevista arvoista kannattaa ottaa talteen.	kpl <a href="#">4.2</a>
Kerätyn datan tallennus	Eri lähteistä kerätty data tallennettiin sekä omaan tietokantaan että valituilta osin IoT-Ticket alustalle. Käsitellyn datan suuri määrä aiheutti tutkimusalustan suunnittelussa ja toteutuksessa huomattavia haasteita.	kpl <a href="#">4.3</a> ja <a href="#">4.4</a>
Kampusareenan datan visualisointi	IoT-Ticketin dashboardit, eli näytöt, joilla havainnollistetaan Kampusareenalta kerättyä dataa ja siitä sovellettua informaatiota rakennuksen käyttäjille.	kpl <a href="#">4.5.1</a>
Koneoppimisen ja korrelaatioiden vertailu käyttäen Kampusareenan sähköenergiajärjestelmän dataa.	Korrelaatiot ja koneoppimisen menetelmät paljastivat samoja sähkön laadulle merkittäviä suureita ja sähköjärjestelmän osia. Koneoppimisella kolmen viikon datasta saatiin eroteltua merkittävät piirteet hyvin suoraviivaisesti järjestelmää tai sähkön perusteita enempiä tuntematta. Toteutuksen pohjalta voidaan jatkaa koneoppimisen hyödyntämistä Kampusareenan datan analyyseissa jatkoprojekteissa ja uusissa pilottikohteissa.	kpl <a href="#">4.5.2</a> [26]
Sähköenergiajärjestelmän käyttäytymisen yleinen tarkastelu, sähkötehon aikakeskiarvojen laskenta ja tehon suureiden vertailu	Sähköenergiajärjestelmän yleinen käyttäytyminen selvitettiin päivä- ja kuormakohtaisilla tehon, virran ja jännitteen kuvaajilla. Tehon keskiarvoistuksen aikavälin merkitystä pätö- ja loisteholle tarkasteltiin eri kuormatyyppien ja aurinkovoimalan mittaustauksilla. Perusaallon loistehoa verrattiin, myös yliaallot sisältävään, koko mittauskaistan loistehoon (Fryze) sähköverkkoon tuotettujen häiriöiden mittaamisen näkökulmasta.	kpl <a href="#">4.5.2</a> [24], [26]

Eri kuormatyyppien vaikutus kokonaiskuormitukseen ja kuormien joustopotentialiaali	Mittausten avulla voidaan tarkastella eri kuormatyyppien vaikutusta kokonaiskuormitukseen ja kuormitushuippujen muodostumiseen sekä niiden joustopotentialiaalia. Esimerkiksi ympäri vuoden käytössä olevat ilmanvaihtokoneet muodostavat merkittävän kokoluokan kuorman, joka olisi suhteellisen helposti hyödynnettävissä myös joustoressurssina ilman, että lyhytaikaiset kuormituksen muutokset vaikuttaisivat kiinteistön käyttäjien mukavuuteen huomioimalla myös käytettävissä olevat sisäilman laadun mittaukset. Vastaavasti jäähdytyskoneet muodostavat merkittävän joustopotentialin, mutta ovat käytettävissä ainoastaan jäähdytyskaudella. Hissien muodostama kuormitus, joka käytön mukaisesti on nopeasti vaihtelevaa, on merkittävästi edellä mainittuja kuormituksia pienempi.	
<b>Lohkoketjuteknologia</b>		
Lohkoketju energialiiketoiminnassa	Tämän hetken sovellukset ovat vielä pilot-vaiheessa, ja yritykset yrittävät yhteistyön kautta luoda standardeja. Uusia konsensusmekanismeja kehitetään, mutta julkisen lohkoketjun haasteista ei olla päästy eroon.	Kpl <a href="#">5.1</a> ja <a href="#">5.2</a>
Lohkoketjuteknologian käyttäminen	Kampusareenan pilottialustassa toimiva Ethereum-lohkoketjuteknologiaa käyttävä demo. Toteutuksessa huomattiin valittuun teknologiaan liittyvän yllättäviä teknisiä rajoitteita. Demo havainnollistaa lohkoketjupohjaisen sovelluksen koostuvan muistakin osista kuin itse lohkoketjusta, mikä vaatii eri osien ja lohkoketjun välisen vuorovaikutuksen tarkkaa suunnittelua.	kpl <a href="#">5.3</a>
<b>Marjamäen teollisuusmikroverkon mallintaminen</b>		
Mikroverkon taajuuden ja tehotasapainon hallinta sekä resurssien käytön optimointi – case Marjamäki	<p>Marjamäen PSCAD-simulointimalli, joka mahdollistaa transientitason ilmiöiden simuloinnin. Esimerkiksi pilvien aiheuttamat nopeat säteilyintensiteetti- ja tehomuutokset PV-kentille saattavat aiheuttaa haastavia tilanteita mikroverkolle ja mm. näitä voidaan simuloida PSCAD-mallin avulla.</p> <p>Marjamäen tehotasapainon malli, jonka avulla voi optimoida mikroverkon resurssien käyttöä ja on nähtävissä, että teknisesti voi syntyä kustannustehokas energijärjestelmä.</p> <p>Energiaverkot (sähkö, lämpö, kylmä, kaasu) mahdollistavat energian säilymisperiaatteen hyödyntämisen energian kiertotaloudessa energiayhteisössä, mutta vasta tasapuolisesti kannustava hyötyjen jakomalli toteuttaa mahdollistavat resurssi-investoinnit vapaassa markkinataloudessa. Energian kiertotaloudessa toisen kustannuspaikan jäännösenergia voi olla toisen kustannuspaikan hyötyenergia, joka mahdollistaa hyvin korkean kokonaisenergiatehokkuuden yhteisössä.</p>	Luku <a href="#">6</a>



## 8 Lähteet

Kappaleessa 1.3 on listattu projektiin liittyvät kansainväliset julkaisut ja opinnäytetyöt, jotka ovat myös tämän raportin lähteitä. Seuraavassa on listattu muut loppuraportissa käytetyt lähteet.

Eduskunta S (2013) 11 § - Suljetun jakeluverkon sähköverkkolupa. In: Sähkömarkkinalaki. Finlex.

Energiavirasto, Ohje suljetun jakeluverkon menetelmien laatimiseksi. 1673/402/2018

European Commission (2017a) Proposal for a Directive on common rules for internal market in electricity. 380:124.

European Commission (2017b) Proposal for a Directive on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). 382:116.

Garcia H (2018) The next Share&Charge. In: Medium. <https://medium.com/share-charge/the-next-share-charge-bc5f6807ddd6>. Accessed 28 Aug 2018

Honkapuro S., Haapaniemi J., Haakana J., Lassila J., Partanen J., Lummi K., Rautiainen A., Supponen A., Koskela J., Järventausta P., (2017) "Jakeluverkon tariffirakenteen kehitysmahdollisuudet ja vaikutukset," LUT Scientific and Expertise Publications, No. 65.

Livingston D, Sivaram V, Freeman M, Fiege M (2018) Applying Blockchain Technology to Electric Power Systems.

Marnay C, Chatzivasileiadis S, Abbey C, Iravani R, Joos G, Lombardi P, Mancarella P, von Appen J (2015) Microgrid Evolution Roadmap. Paper presented at the International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), IEEE, Vienna, Austria, 8-11 September 2015 <https://doi.org/10.1109/SEDST.2015.7315197>

Mengelkamp E, Gärttner J, Rock K, et al (2017) Designing microgrid energy markets. A case study: The Brooklyn Microgrid. Applied Energy. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.054

Plancke G, De Vos K, Belmans R, Delnooz A (2015) Virtual power plants: Definition, applications and barriers to the implementation in the distribution system. Conference European Energy Markets EEM. doi: 10.1109/EEM.2015.7216693

Share&Charge (2018) The Share&Charge Solution. <https://shareandcharge.com/solution/>. Accessed 23 Aug 2018

Toffler A (1981) The third wave. Bantam books, New York

Ympäristöministeriö (2017) Valtioneuvoston selonteko keskipitkän aikavälin ilmastopoliitiikan suunnitelmasta vuoteen 2030.