



**SÄHKÖAKUN KANNATTAVUUSARVIOINTI ÄLYKKÄÄSSÄ OHJAUKSESSA
JA SÄÄTÖMARKKINOILLA**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2022

Ville Heikkinen

Tarkastaja: TkT Antti Kosonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Ville Heikkinen

Sähköakun kannattavuusarviointi älykkäässä ohjauksessa ja säätömarkkinoilla

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2022

43 sivua, 11 kuvaa, 7 taulukkoa, 3 liitettä

Tarkastaja: TkT Antti Kosonen

Ohjaajat: Antti Pokkinen, Markku Mäki-Hokkonen, Antti Kosonen

Avainsanat: Säätömarkkina, akku, älykäs ohjaus

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia 1 MWh sähkökemiallisen energiavaraston kustannusta ja kannattavuutta Lappeenrantaan rakennettuna. Työssä pyritään huomioimaan kaikki rakentamisen ja ylläpidon kulut. Materiaalin kokoamisen jälkeen voidaan aikaisemman energiankulutusdatan ja -kustannusten pohjalta arvioida, onko sähkökemiallisista akuista koostuvaa kokonaisuutta kannattavaa rakentaa.

Työssä keskitytään nykyään saatavilla oleviin teknologioihin ja laskelmissa käytetään tämän hetken rakennus- ja huoltokustannuksia. Myös kulutus- ja hintatietoina käytetään saatavilla olevaan dataa eikä huomioida hintojen kehitystä tulevaisuudessa. Tutkimuksessa pohdittiin myös aurinkovoimalan integroimista energiavoimalaan ja sen vaikutusta kannattavuuteen sekä akkujen toimintamalliin.

Tutkimuksen aikana huomattiin sähkökemiallisten energiavarastojen mahdollistavan monenlaisten säätö- ja kulutusmallien hyödynnettävyyden. Käyttömahdollisuudet kasvavat, kun akkujen yhteyteen liitetään voimala, jonka avulla voidaan tuottaa uusiutuvaa energiaa.

Akkujen korkeiden hintojen ja lyhyen eliniän vuoksi ei tutkittuun käyttötarkoitukseen ole toistaiseksi taloudellisesti kannattavaa rakentaa ja ylläpitää 1 MWh:n kokoista sähkökemiallista energiavarastoa. Kun kestävyysominaisuudet nykyisissä tai täysin uuden tyyppisissä kennoissa paranevat ja mahdollistavat alemmat hankinta- ja ylläpitokustannukset, voidaan sähkökemiallisten energiavarastojen toiminta saada kannattavaksi.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Ville Heikkinen

Electric battery profitability evaluation in intelligent control and regulation markets

Bachelor's thesis

2022

43 pages, 11 figures, 7 tables and 3 appendices

Examiners: D.Sc. Antti Kosonen

Keywords: Regulation markets, battery, intelligent control

The objective of this thesis is to study the cost and profitability of a chemical energy storage that is sized approximately at 1 MWh. The aim of the study is to take account of all the costs of construction and maintenance. After collecting the material, it is possible to assess whether it is economical to build an electrochemical battery based on previous energy consumption data.

The work focuses on currently available technologies and uses their current construction and maintenance costs in the calculations. Consumptions and price data are also used for available data and do not consider future price developments.

The study also considered the integration of a solar power plant into an energy power plant and its impact on profitability and the operating model of batteries.

During the study, it was found that chemical energy stores allow the utilization of a variety of control and consumption models. The opportunities increase when another power plant is connected to the batteries to produce renewable energy.

Due to the high prices of batteries and their short lifespan, it is not yet economically viable for the purpose studied to build and maintain a 1 MWh chemical energy storage. As the durability properties of existing or completely new types of cells improve and allow for lower acquisition and maintenance costs, the operation of chemical energy storage can be made profitable.

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

DOD	purkaustaso / Depth of Discharge
EOL	käyttöiän loppu / End of Life
LFP	litium-rautafosfaatti / Lithium Ferrophosphate
NMC	nikkeli-mangaani-kobolttiakku / Nickel, Manganese and Cobalt battery
RFB	Redox-virtausakku / Redux Flow Battery
VRLB	venttiilisäädetty lyijyakku / Valve Regulated Lead Battery
FLOW	virtausakkus

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1.	Johdanto.....	7
2.	Akkujen hankinta- ja ylläpitokustannukset.....	9
2.1.	Hankintahinnat akkutyypeittäin.....	9
2.1.1.	Lyijyakku.....	10
2.1.2.	Redox-virtausakku.....	10
2.1.3.	Litiumioniakut	12
2.1.4.	Akkujen hankintahinnat	12
2.1.5.	Hankinnan kokonaiskustannukset	14
2.2.	Akkujen käyttö- ja ylläpitohinnat	15
2.3.	Elinkaaren loppuvaiheen kustannukset	16
2.4.	Akkujen ominaisuuksien yhteenveto	17
3.	Akustojen sijoituspaikat	19
3.1.	Rakennusten kulutuslukemat	19
3.2.	Sähkön hinnat	21
4.	Akkujen käyttö	23
4.1.	Säätömarkkinat	24
4.2.	Akkujen taloudellinen käyttö	27
4.3.	Akkujen käyttö hätätilanteissa.....	28
5.	Aurinkovoimala	29
5.1.	Aurinkovoimalan kokotarpeen määrittäminen.....	29
5.2.	Aurinkovoimalan hankintakustannus	33
5.3.	Aurinkovoimalan vaikutus akun kannattavuuteen	33
6.	Kassavirtaan vaikuttavat tekijät	36
6.1.	Kannattavuuden arvio.....	37
7.	Johtopäätökset.....	39
	Lähteet	41

Liitteet

- Liite 1. PV-mitoitus
- Liite 2. PV-kannattavuuslaskelmat
- Liite 3. PV-kustannus- ja tuottolaskelmat

1. Johdanto

Sähkön käytöstä energialähteenä on tullut lähestulkoon välttämätön osa yhteiskunnan toimintaa ja käytön jatkuvan lisääntymisen myötä sähkön hinnan nousu kulutuspiikkien aikana on väistämätöntä. Myös hätätilanteessa on erittäin oleellista pystyä takaamaan sähkön luotettava saanti elintärkeisiin toimintoihin, kuten lämmitykseen ja ruuan valmistukseen. Akkuihin varastoitunutta energiaa voidaan käyttää, kun muuta energiaa ei ole saatavilla ja näin voidaan myös korvata vanhoja dieselillä toimivia generaattoreita. Akkujen lisääminen uusiutuvien energiamuotojen yhteyteen myös parantaa huomattavasti niiden hyödyllisyyttä, koska uusiutuvilla energiamuodoilla, kuten tuuli- ja aurinkovoima, energian tuotantoajankohta ei aina kohtaa energian tarveaikaa. Tämän vuoksi on tärkeää pystyä myös varastoitmaan tuotettua sähköenergiaa, mikäli sitä ei voida hyödyntää tuotantohetkellä.

Tutkimuksen tavoite on selvittää 1 MWh kokoisen, akuista koostuvan energiavaraston rakentamisesta sekä ylläpitämisestä muodostuvia kustannuksia sekä tehdä kannattavuusarvio energiavaraston rakentamisesta. Tutkitaan myös energiavaraston riittävyyttä hätätilanteissa sekä mahdollisuuksia käyttää energiavarastoa säätömarkkinoilla. Dataa kerätään jo olemassa olevista sähkökemiallisista energiavarastoista sekä eri valmistajien tarjoamista valmiista kokonaisuuksista. Energiankulutuksen kasvaessa on kannattavaa pystyä säätelemään oman kulutuksen ajankohtaa, jotta voidaan välttää sähkön ostamista verkosta kulutuksen ollessa tuotantoon suhteutettuna korkealla ja hintojen tämän myötä noustessa. Energiavarastot mahdollistavat myös korkean kulutuksen aikana kulutuspiikkien tasaamisen ja näin välttävät verkon ylläpidon. Energiavarastoa voitaisiin myös hyödyntää hätätilanteessa aggregaatin tai muun generaattorin tavoin käyttövoimana välttämättömille sähkökäyttöisille koneille. Varastoitua sähköä on myös mahdollista myydä takaisin markkinoille, mikäli sitä ei tarvita omaan käyttöön. Siksi työssä tutkitaan myös mahdollisuutta toimia säätömarkkinoilla, jolloin voidaan ylituotannon aikana ladata akkuja ja alituotannon aikana antaa sähköverkkoon lisää kapasiteettia.

Kyseisestä aiheesta on tehty joitain aikaisempia tutkimuksia, mutta niissä on keskitytty omakotitalojen energiavarastoihin. Nyt tehtävää tutkimusta on tarkoitus soveltaa mahdollisimman tarkasti juuri Lappeenrannan kaupungin tarpeisiin akkuvoimalan sekä sen integraation avulla. Aihetta rajataan nykyään saatavilla olevaan teknologiaan eikä ole tarkoitus tutkia prototyyppeinä olevia akkuja mahdollista esittelyä tarkemmin. Myös kineettiset ja muut kuin sähkökemialliset energiavarastot rajataan pois tutkimuksesta. Tavoitteena on siis saada toimiva, varsin laaja kokonaiskäsitys siitä, onko nykyisillä akkuteknologioilla niiden nykyisten hankinta- ja ylläpitokustannusten perusteella kannattavaa rakentaa akkuvoimalaa sekä selvittää akkuvoimalan ja aurinkovoimalan integroimisen tuomat mahdolliset haitat ja hyödyt.

2. Akkujen hankinta- ja ylläpitokustannukset

Aluksi tutkittiin yleisimpien 1 MWh:n sähkökemiallisten energiavarastojen hankinta- ja käyttökustannuksia. Kustannusten pohjalta valitaan jatkotutkimuksiin ominaisuuksiltaan parhaat vaihtoehdot ja tutkitaan niiden integroimista aurinkovoimalaan. Verrattavia akkutyyppejä ovat lyijy Akku, Redox-virtausakku (RFB) sekä kaksi erityyppistä litiumakkua: litium-rautafosfaatti- (LiFePO₄) ja nikkeli-mangaani-kobolttiakku (NMC). Kaikissa tutkituissa akkutyypeissä on hyviä ja huonoja ominaisuuksia, joita tässä työssä on tarkoitus analysoida.

Tutkimuksessa käsitellään edellä mainittujen kustannusten lisäksi myös akuston kennojen ja muiden kuluvien osien elinkaaren aikaisia ja sen loppupäässä syntyviä kustannuksia, kuten kennojen kierrätyskuluja. Apuna käytetään viime vuosien aikana tehtyjä tutkimuksia ja kustannusarvioita, joissa on keskitytty juuri energiavarastojen elinkaaren aikaisiin sekä varastojen kierrätyksestä aiheutuneisiin kuluihin. Näiden kustannusten arvioiminen sekä huomiointi on tärkeä osa kokonaiskustannuksia, sillä esimerkiksi yleisessä käytössä olevista litiumioniakuista muodostuu kennojen elinkaaren aikana ympäristölle haitallista jätettä, jonka asianmukainen kierrätys aiheuttaa lisäkustannuksia.

2.1. Hankintahinnat akkutyypeittäin

Tutkimuksen aluksi analysoidaan edellä mainittujen akkutyypin, lyijy-, Redox-virtaus- ja litiumakkujen, hankintahintoja 1 MWh kokoisessa voimalassa. Hintaan sisällytetään kaikki akuston käyttöönottoon sisältyvät kustannukset. Varsinainen akuston asennustilan rakentaminen jätetään tutkimuksen ulkopuolelle, sillä voimala on tarkoitus sijoittaa joko merikonttiin käyttökohteen ulkopuolelle tai kaupungintalon alapuolella olevaan parkkihalliin. Näin uuden, asennukselle sopivan säilytyspaikan rakentamisen aiheuttamia kustannuksia ei ole tarpeellista huomioida.

2.1.1. Lyijyakku

Lyijyakut ovat olleet käytössä erilaisissa sovelluskohteissa jo useiden vuosien ajan ja niiden hinnat ovat teknologian kehityksen myötä laskeneet. Akut ovat yhä ominaisuuksiltaan sopivia useisiin käyttötarkoituksiin, joten niiden tutkimista voidaan pitää aiheellisena.

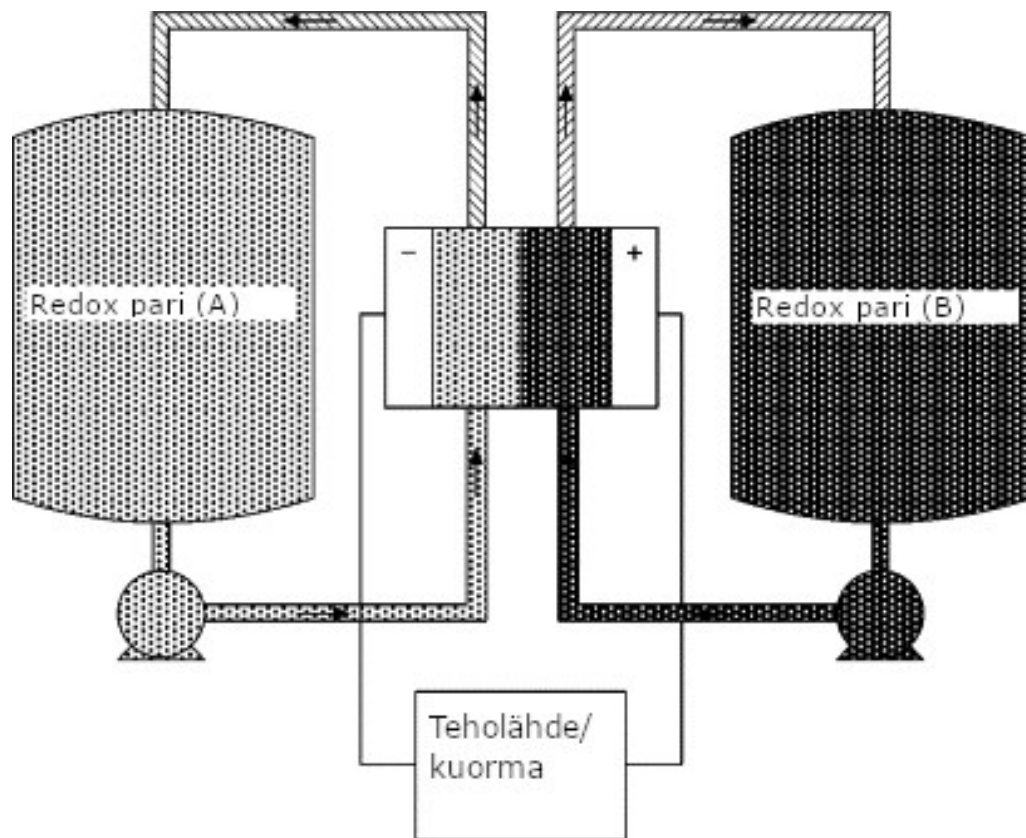
Edellä kuvatun vuoksi lyijyakujen saatavuus on erittäin hyvä ja hankintahinta alhainen. Perinteisessä muodossaan, kuten autoissa, lyijyakku ei ole paras mahdollinen energiavarastoksi. Tähän on monia syitä, kuten lyhyt käyttöikä ja huollon tarve. Akkuun muodostuu latauksen ja purkauksen aikana painetta ja se saattaa vuotaa akkuhappoa, joka on johdettava turvallista reittiä ulos akusta ja pois johtimista sekä muista komponenteista. Tätä paineongelmaa ei ole venttiilisäädetyllä lyijyakulla (VRLB), joka päästää yksisuuntaisen venttiilin avulla mahdollisen paineen pois ilman että aiheutuu vuotoa. VRLB-akuissa ei myöskään käytetä akkuhappona nestettä vaan geeliä tai lasikuituun imeytettyä happoa. Tämä mahdollistaa VRLB-akkujen sijoittamisen muuhunkin kuin pystyasentoon (May, Davidson and Monahov, 2018). Vuotamattomuus myös vähentää huollon tarvetta, kun akkuhapon määrää ei ole jatkuvasti tarkkailtava eikä ole hapon lisäystarvetta.

Lyijyakuissa energiatiheys on pienempi verrattuna uudempiin akkuihin, joten saman kapasiteetin saavuttamiseksi on varattava useampi kenno sekä enemmän tilaa akustolle. Myös latausnopeus on pienempi, joten akkujen nopea täyteen lataaminen, esim. sähkönn hinnan laskun tai muun tarpeen myötä, on hankalampaa ja akkujen lataamisen ajoittamisessa on luotettava ja turvaututtava enemmän aikaisempaan käyttödataan.

2.1.2. Redox-virtausakku

Tämä varsin uusi akkuteknologia osoittaa lupaavia ominaisuuksia juuri energianvarastointiin. Rakenne ei virtausakussa ole perinteinen kennorakenne, vaan akku koostuu kahdesta säiliöstä, joissa on elektrolyyttiliuosta (kuva 1). Tämä mahdollistaa tehon ja energian muu-

toksen toisistaan riippumattomasti ja akusto voidaan kustomoida juuri haluttuun käyttötarkoitukseen todella helposti liuosten konsentraatiota muuttamalla. Elektrolyyttiliuokset ovat käytännössä kulumattomia. Lisäksi RFB-akkujen syklinen- ja kalenterikäyttöikä on pitkä. Tämä tieto perustuu lähtökohtaisesti laboratorio-olosuhteisiin, sillä varsinaista laajempaa käyttödataa pitkän aikavälin käytöstä ei RFB:stä ole toistaiseksi saatavilla.



Kuva 1. Redox-akun rakenne (Lim, Ulaganathan and Yan, 2015)

Koska akkujen teknologia on suhteellisen uutta, ovat RFB-akut kuitenkin melko kalliita verrattuna muihin akkutyyppeihin. Tällä hetkellä RFB-akuissa käytettyä vanadiumia pyritään korvaamaan synteettisesti valmistetuilla Redox-aktiivisilla orgaanisilla molekyyleillä, jotta kustannuksia saadaan laskettua. Mikäli tulevaisuudessa akuston hinta laskee noin 100 eur/kWh tasolle, voidaan olettaa RFB-akkujen käytön energiavarastoissa kasvavan, kun huomioidaan näiden akkujen hyvät ominaisuudet, kuten modulaarisuus ja runsaat säätömahdollisuudet.

2.1.3. Litiumioniakut

Litiumioniakkuja on useampaa eri mallia, joissa käytetään litiumin lisäksi eri alkuaineita. Vaihtamalla litiumin pareina toimivia yhdisteitä, voidaan vaikuttaa esimerkiksi akun kapasiteettiin ja elinikään. Jotkin pitkään käytössä olevat yhdisteet ja alkuaineet ovat ympäristön kannalta suoraan tai epäsuoraan, esimerkiksi kaivauksien tuoman jätteen tai vaikean saatavuuden vuoksi, vähemmän suositeltavia. Näistä onkin pyritty eroon kehittämällä uusia yhdisteitä, joilla saadaan kennojen ominaisuuksia käyttötarkoituksiin sopivammaksi ja vähennettyä ympäristön kuormittuvuutta. Yksi tämän kehityksen tuloksena syntynyt akkutyyppejä on nikkeli-mangaani-kobolttiakku (NMC). NMC-kennoilla on keskimäärin litium-rautafosfaatti-kennoja (LFP) suurempi energia- ja tehotehiys, mutta ne ovat paloherkempiä. Keskimääräisesti NMC-kennoilla on myös hieman keskiverto LFP-kennoa lyhyempi käyttöaika.

2.1.4. Akkujen hankintahinnat

Analyysiin on koottu useasta lähteestä hintoja energiavaraston rakentamiselle ja näistä on muodostettu kokonaisuus, joka mahdollisimman tarkasti kuvaa kokonaiskustannuksia. Mikäli energiavarasto rakennetaan valmiina olevaan tilaan, voidaan rakennuskustannukset pääosin jättää pois laskelmista. Jotta ei päädyttäisi liian optimistiseen arvioon, otetaan laskentaan kuitenkin mukaan kustannukset, jotka syntyvät asennustilan muokkaamisesta sähkökemiallisille akuille sopivaksi.

On myös huomioitava, että joissain laskelmiin käytetyissä tutkimuksissa voimalan koko on ollut suurempi kuin tässä tutkimuksessa. Jos hinta-arvioita on jouduttu johtamaan suuremman kokoisten voimaloiden akkujen hinnoista, ovat kustannukset tämän tutkimuksen voimalassa jossain määrin suuremmat per kWh, mutta tämä on huomioitu analyysissä.

Energiavaraston hintaan vaikuttaa myös akun mitoitus. Mikäli akusta on saatava tehoa yhtäjaksoisesti täydet 1 MW useamman tunnin ajan, on sen kokonaiskapasiteettia nostettava

huomattavasti valitsemalla suuremman kokoluokan akku. Jos verrataan tutkimuksen kohteiden kulutusdataa vuosilta 2019 ja 2021, voidaan todeta, ettei valituissa kohteissa ole tarpeen normaaleissa oloissa käyttää akkuja yhtäjaksoisesti täydellä 1 MW teholla useamman tunnin ajan. Aikaisempina vuosina vuorokausikulutus on ollut keskimäärin alle 2 MWh, Lappeenrannan kaupungintalolla 1,96 MWh ja Lappeen koululla 1,87 MWh.

Akkutyypeittäin saatuja hankinta- ja käyttöönottohintoja on esitetty taulukossa 1. Taulukon hinnoissa ei ole otettu huomioon akkujen kestävyyttä eikä mahdollista kennojen uusimisesta johtuvia lisäkustannuksia. Nämä huomioidaan myöhemmin esitettävissä käyttökustannuksissa. Kuten taulukosta 1 voidaan nähdä, on litiumakku hankintakustannuksiltaan edullisin. Lyijyakuston hintaa nostaa huomattavasti tehosäätimien hinta. Tämä johtuu lyijyakkujen herkkyydestä purku- ja lataustehoon ja niiden säätäminen on tämän vuoksi oleellinen osa akun kestävästä käytöstä. Lyijyakkuja käytettäessä on erittäin tärkeää huomioida akun päivittäinen käyttöaika, sillä se vaikuttaa suuresti käyttöikänsä. Mikäli lyijyakussa ei oteta edellä mainittuja rajoja huomioon, akun käyttöikä laskee huomattavasti.

Taulukko 1. Hankinta- ja käyttöönotto hinnat akkutyypeittäin (Mongird et al., 2020)

Akkutyytit	Akuston hinta €/ kWh	Akuston hallinta €/ kWh	Tehosäätö €/ kWh	Ohjaus ja kommunikointi €/ kWh	Integrointi €/ kWh	Rakennus €/ kWh	Kehitys €/ kWh	Integrointi sähköverkkoon €/ kWh	Yht. €/ kWh
Li-ioni LFP	164	38	77	36	45	55	66	28	508
Lyijyakku	162	44	140	36	42	47	60	28	559
RFB	260	52	140	36	50	57	72	28	694

Tässä työssä tutkituista teknologioista RFB on hankintahinnaltaan kallein. Tämä selittyy teknologian uutuudella sekä toistaiseksi pienillä käyttömäärillä, jolloin akun tuotantomääriä ei vielä ole saatu optimoitua. Myös jotkin RFB:ssä käytetyt materiaalit ovat huomattavasti kalliimpia kuin muissa akuissa käytetyt (Mongird et al., 2020).

2.1.5. Hankinnan kokonaiskustannukset

Kun lasketaan kokonaiskustannukset edellä tarkastelluille kolmelle teknologialle, käytetään 1 MWh:n akkua. Optimaalisen tehotarpeen selvittämiseksi tarkastellaan saatavilla olevaa, vuosien 2021 ja 2019 käyttödataa Lappeenrannan kaupungintalolta ja vuoden 2021 käyttödataa Lappeen koululta. Kaupungintalon kohdalla koettiin tarpeelliseksi ottaa tutkimukseen mukaan vuoden 2021 lisäksi vuosi 2019, jolloin pystytään tutkimaan rakennuksen energiankulutusta etätyösuosituksen ulkopuolella.

Vuosina 2021 ja 2019 kerätystä datasta saadaan päiväajan keskimääräiseksi tuntikulutukseksi 86 kWh. Huippuarvot päiväaikaan käyvät kuitenkin lähempänä 200 kWh lukemia ja satunnaisesti jopa yli 200 kWh. Mikäli akuston tarkoitus on vain päiväajan huippujen ta-soittaminen ja näitä suhteellisen korkeita yli 200 kWh kulutuslukemia saavutetaan vain satunnaisesti, voidaan myös lyijyakun olettaa toimivan riittävän tehokkaasti päivittäisessä käytössä. Tutkittujen akkutyypin kokonaishankintahinta ja käytettävissä oleva kapasiteetti akkutyypeittäin on koottu **Virhe. Viitteen lähde ei löytynyt..**

Taulukko 2. Akkujen kokonaiskustannus 1 MWh nimelliskapasiteetilla (Mongird et al., 2020)

Akkutyypit	Kokonaiskustannus	Käytettävissä oleva kapasiteetti
Li-ioni (LFP)	507 600	800 kWh
Lyijyakku	558 900	820 kWh
RFB	693 900	900 kWh

Käytettävissä oleva kapasiteetti perustuu purkaustasolukemiin (DOD), joilla pystytään akkujen elinikää pitämään niille tyypillisissä pituuksissa. Pituudet on koottu sivun 18 **Virhe. Viitteen lähde ei löytynyt..**

2.2. Akkujen käyttö- ja ylläpito hinnat

Käyttö- ja ylläpito hintoihin otetaan mukaan kaikki akkujen käyttöiän aikaiset kulut. Mukaan otetaan sekä kiinteät että mahdolliset muuttuvat kulut, kuten kuluvien osien vaihto. Hintoja analysoidaan vuositason tasolla.

Aikaisemman kulutusdatan mukaan Lappeenrannan kaupungintalon keskekulutus tunneittain on päiväaikaan 86 kWh ja yöaikaan 52 kWh. Lappeen koulun kulutukset ovat päiväaikaan 88 kWh ja yöaikaan 62 kWh. Käytön kannalta olisi hyvä löytää systeemi, joka pystyy ylläpitämään näitä keskekulutuksia ilman tehon laskua suuremmisakkaan kulutuspiikeissä. Taulukossa 2 ilmoitetut kapasiteetit ovat molemmissa kohteissa riittävän suuria kattamaan sekä päivän että yön kulutuksen useamman tunnin ajaksi.

Käyttö- ja ylläpito hintoihin on myös otettava huomioon akkujen kennojen kapasiteetin pieneneminen ajan kuluessa (kalenteri-ikä) sekä syklinen elinkaari. Esimerkiksi ero virtausakun ja lyijyakun välillä on huomattava. Samankaltaisessa käytössä, samassa ajassa on lyijyakusto vaihdettava uuteen vähintään kerran, eikä virtausakuille ole tarvetta mihinkään näin suureen toimenpiteeseen. Akkujen kapasiteetti myös laskee ajan kuluessa ja niiden koetaan olevan elinkaarensa lopussa, kun kokonaiskapasiteetti on saavuttanut 80 % arvonsa alkuperäisestä. Kapasiteetin pienetessä pienenee myös akuista saatava taloudellinen hyöty ja onkin todettu, että energiavarastojen taloudellinen kannattavuus loppuu, vaikka kennojen ja muiden komponenttien käyttöikä on vielä jäljellä (He et al., 2020).

Taulukkoon 3 on koottu neljän akkutyypin vuotuiset ylläpito kustannukset 1 MWh nimelliskapasiteetilla. Vuotuisia kustannuksia verrattaessa nähdään perinteisen ja laajassa käytössä olevan LFP-akun olevan ylläpito kustannuksiltaan 2 – 49 % muita edullisempi.

Taulukko 3. Ylläpitokustannukset akkutyypeittäin 1 MWh nimelliskapasiteetilla (Mongird et al., 2020)

Akkutyypit	Kiinteät kulut [€/MWh]	Muuttuvat kulut [€/MWh]	Latauksesta muodostuvat häviöt [€/MWh]	Ylläpitokustannus yhteensä 1 MWh akustolle [€]
LFP	3960	465	5	4430
NMC	4060	465	5	4530
Pb	5345	465	8	5818
RFB	6111	465	14	6590

Tätä säästöä voidaan pitää erittäin merkittävänä, kun huomioidaan akkujen odotettavissa oleva toiminta-aika. Esimerkiksi virtausakkuihin verrattuna lähes 2000 euron vuosittaisella säästöllä voidaan kattaa useamman päivän tappio, joka syntyy, jos akkua ei taloudellisista syistä kannata ladata, kun kannattavuus on hinnanvaihtelun takia heikko.

2.3. Elinkaaren loppuvaiheen kustannukset

Erittäin tärkeänä näkökulmana on myös pidettävä akkujen elinkaaren päättymisen jälkeisiä kustannuksia. Kun kennojen käyttö alkuperäisessä tarkoituksessa ei ole enää taloudellisen kannattavaa, voidaan jossain tapauksessa kennoja hyödyntää muulla tavoin. Myös akuista kierrättämällä saatavat materiaalit on tärkeä uusiokäyttää, jotta vältytään turhalta ilmaston ja luonnon kuluttamiselta. Kierrätyksen aiheuttamat kustannukset ovat alhaisimmat lyijyjakulla, koska akkuteknologia on ollut pitkään ja laajasti käytössä. Lyijyakuissa käytetty, ympäristölle vaarallinen lyijy on monessa maassa kierrätettäväksi määrätty ja kierrätykskohteita on kyseisissä maissa runsaasti. Lyijyjakun yksinkertainen kemiallinen ja mekaaninen rakenne myös mahdollistaa laajamittaisen kierrätyksen ja usean valtion sanktiot kierrätyksen laiminlyönnistä kannustavat kierrättämään. Yhdysvalloissa tehdyn analyysiin mukaan 99 % käytetyistä lyijyakuista päätyy kierrätettäväksi. Litiumpohjaisissa akuissa kierrätykseen päätyy alle 5 %, koska kaikkia litiumakkujen sisältämiä materiaaleja ei vielä pystytä kannattavasti kierrättämään johtuen teknisistä, taloudellisista, logistisista tai sääntelytekijöistä (Jacoby, 2020). Uusien kennojen valmistamisessa on keskitytty enemmän kennojen käyttöiän ja kestävyuden parantamiseen, kuin kennojen mahdollisimman hyvän kierrätettävyyden takaamiseen. Akuissa käytettävät mineraalit ovat myös suhteellisen edullisia, joten käytetyistä

kennoista mineraalien laajamittainen kerääminen ei ole innostanut yrityksiä. Kennojen vääränlainen purkaminen aiheuttaa myös palo- ja räjähdysvaaran, koska kennoissa käytetyt yhdisteet reagoivat herkästi ilman kanssa.

Viime aikoina yritykset ovat kuitenkin alkaneet panostaa ympäristöystävällisyyteen ja kestävään kehitykseen. Muun muassa Fortum on kehittänyt ohjelman, jonka mukaan pystytään nostamaan kierrätettyjen litiumakkujen sisältämien materiaalien kierrätettävyyttä 80 %: iin (Fortum, 2013). Tulevaisuudessa akkujen suosion kasvaessa entisestään ja materiaalien hintojen kallistuessa on erittäin todennäköistä, että kierrätyksen ympärille syntyy uusia kansainväliselläkin tasolla toimivia yrityksiä. Li-ioniakuissa on kuitenkin niin paljon ominaisuuksia, jotka ovat hidastaneet suurien kierrätysketjujen muodostumista. Akuissa käytettävät materiaalit myös vaihtelevat suuresti ja käytettäviä yhdisteitä ja aineita kehitetään jatkuvasti lisää. Tämä luo haastetta laajamittaisen kierrätyksen järjestämiseen, kun uusi yhdiste saattaa korvata aikaisemmin käytetyn tai materiaaleille ei onnistuta löytämään uusiokäyttöä.

Litiumioniakkujen kierrätyksen hinnan on arvioitu olevan noin 23 euroa/kWh ja lyijyakkujen 13 euroa/kWh (He et al., 2020). Kokonaiskustannus 1 MWh kokoisen akun kierrätyksestä on näin Li-ioninakulla 23 400 euroa ja lyijyakkulla 13 000 euroa. Virtausakkujen kierrätettävyydestä ja kierrätyksen kustannuksista ei vielä löydy tutkittua tietoa.

2.4. Akkujen ominaisuuksien yhteenveto

Taulukoon 4 on koottu energiavaraston kannalta oleelliset ominaisuudet ja niiden arvot. Akkujen arvoja vertaamalla voidaan valita energiavarastoksi sopivin kennotyyppi. Sekä käyttöiän että kustannusten mukaan tarkasteltuna ominaisuuksiltaan parhaimmaksi valikoituu virtausakku (FLOW). Virtausakkujen käyttöikä on pidempi kuin perinteisillä kennoilla, niin käyttö- kuin kalenterivuosisakin. Virtausakut ovat myös käytöltään monipuolisemmat niiden tehontuoton ja energiasisällön ollessa helposti kustomoitavissa ilman ulkoisia muutoksia kokoonpanoon.

Taulukko 4. Kooste akkutyypin ominaisuuksista (Mongird et al., 2020)

Akkutyypit	LFP	NMC	Pb	FLOW
Nimelliskapasiteetti [MWh]	1	1	1	1
Käytössä oleva kapasiteetti [MWh]	0,8	0,8	0,82	0,9
Kalenteri-ikä	10	10	12	15
Käyttösyklit [DOD 80 %]	2000	2000	1750	5200**
Hankintakustannukset* [€/kWh]	508	518	556	693
Käyttökustannukset* [€/kWh]	4,4	4,5	5,8	6,6
Käytön hinta, kun ladataan päivittäin ja täysi kalenteri-ikä (Uusitaan kennot tarvittaessa) [€/sykli]	184	190	202	127

* Käyttöön liittyvät kiinteät ja muuttuvat kulut sekä häviöiden muodostamat kulut.

** Varsinaista kennojen kulumaa ei virtausakuilla ole, joten käytetään päivittäin ladatun akun käyttökertoja.

Virtausakun teknologia on kuitenkin uutta eikä sen toiminnasta suuren koon energiavarastona ole paljon pitkäaikaista dataa. Koska LFP-akuista on saatavilla runsaasti pitkäaikaista tutkittua tietoa, voidaan LFP-akkuja pitää suunniteltuun käyttötarkoitukseen turvallisimpana ratkaisuna, myös niiden alhaisen käyttökustannuksen ja suhteellisen edullisen hankintahinnan vuoksi.

3. Akustojen sijoituspaikat

Suunnitellut sijoituspaikat akustoille olisivat joko Lappeenrannan kaupungintalolla tai Lappeen koululla. Kaupungintalolla sähkönkulutusdataa on käytettävissä vuosilta 2019 ja 2021, Lappeen koululta vain vuodelta 2021. Näiden aikaisempien kulutusten ja niistä muodostuvien kustannustietojen pohjalta tutkitaan, miten akkuvoimalan lisääminen rakennuksen yhteyteen vaikuttaisi kulutuslukemiin.

Tutkimuksessa arvioidaan myös sähkökemialliseen energiavarastoon integroidun aurinkovoimalan tuomia hyötyjä ja kannattavuutta.

3.1. Rakennusten kulutuslukemat

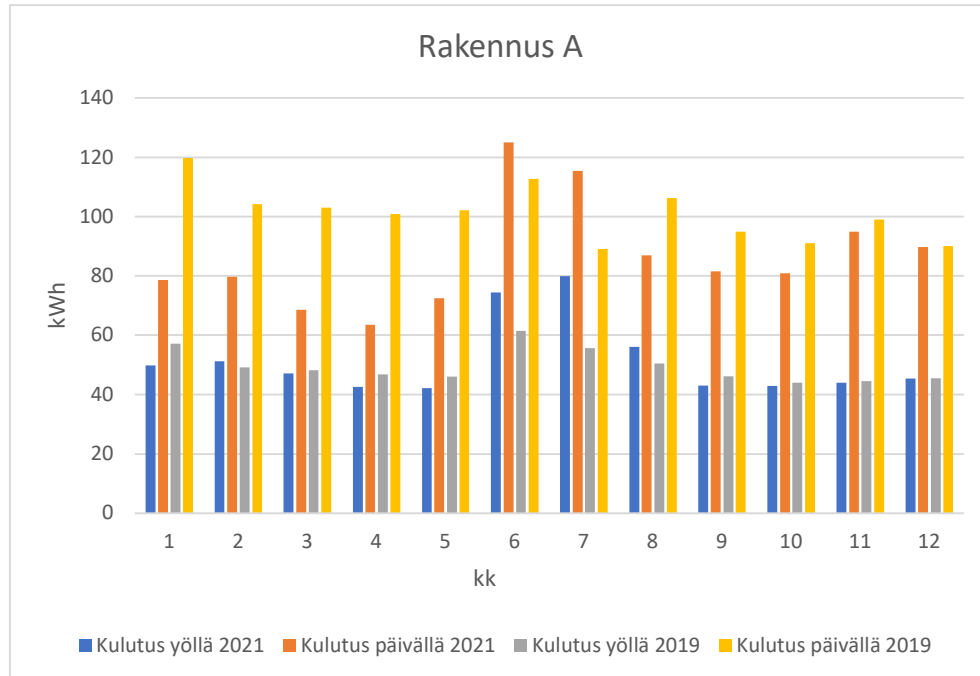
Lappeenrannan kaupungintalo sijaitsee Lappeenrannan ydinkeskustassa. Kaupungintalon alapuolella on parkkihalli, joka on mahdollinen sijoituspaikka akustolle. Kulutus- ja hintadataa on vuosilta 2019 sekä 2021. Tutkimukseen valittiin vuoden 2020 sijasta vuosi 2019, sillä maailmalla vallitsevan COVID-19 pandemian vuoksi 2020 on kulutusprofiililtaan lähestulkoon samanlainen vuoden 2021 kanssa, koska näinä vuosina olivat etätyösuositukset voimassa. Vuotta 2019 tutkimalla voidaan nähdä kuinka toimistorakennuksessa henkilökunnan suurempi läsnäolo vaikuttaa rakennuksen kulutusprofiiliin. Vuoden 2021 tiedoista voidaan kannattavuuslaskemiin kuitenkin käyttää sähkön hintatietoja. Lappeen koulun tiedot vuodelta 2021 vastaavat melko hyvin kulutukseltaankin normaalia, ennen epidemiaa vallinnutta tilannetta. Koulu on alemman asteen koulu ja nämä koulut eivät kuuluneet pitkäkestoisesti etätyöskentelyn piiriin.

Virhe. Viitteen lähdettä ei löytynyt. 5 nähdään rakennusten A (Kaupungintalo) ja B (Lappeen koulu) kulutuksien olevan suurin piirtein samansuuntaiset. Jos verrataan A-rakennuksen (lukemat vuodelta 2019 ja 2021) ja B-rakennuksen (lukemat vuodelta 2021) arvoja, voidaan olettaa, että myös B-rakennuksen osalta vuoden 2019 arvot ovat suhteellisen samankaltaiset kuin vuonna 2021.

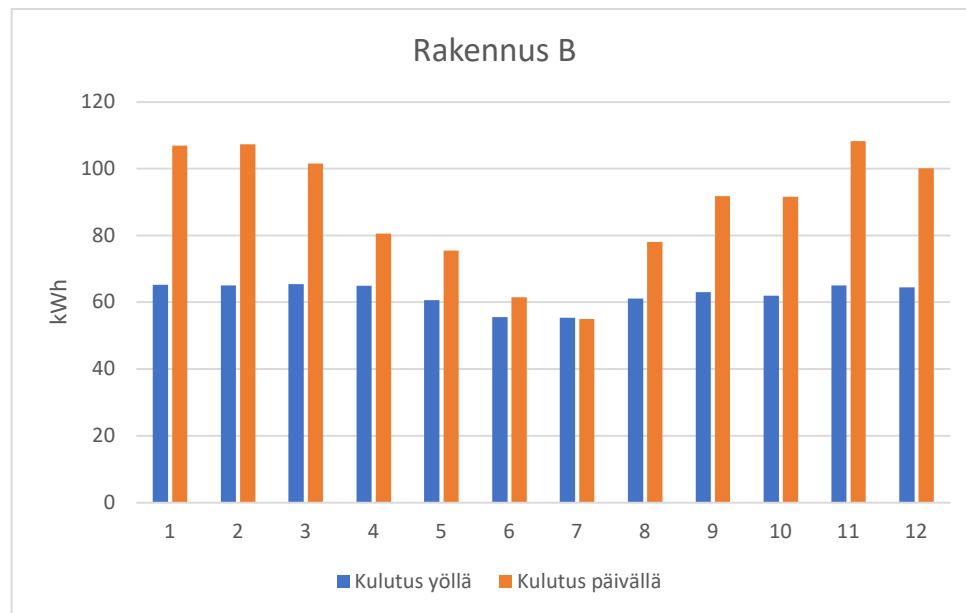
Taulukko 5. Rakennusten päivittäiset keskiarvokulutukset laskettuna mitatuista luvuista

Rakennus	2019			2021		
	Yön ka. kulutus tunneittain [kWh]	Päivän ka. kulutus tunneittain [kWh]	Päivän kokonais- kulutus [kWh]	Yön ka. kulutus tunneittain [kWh]	Päivän ka. kulutus tunneittain [kWh]	Päivän kokonais- kulutus [kWh]
A	49,6	101,0	1 961,9	51,6	86,4	1 296,6
B	-	-	-	62,2	87,7	1 874,8

Suomessa sähkönkulutukseen vaikuttaa suuresti myös vuodenaika. Talvella sähkön kulutusmäärä kasvaa ja lämmityskustannukset sähkölämmitteisissä rakennuksissa nousevat sähkön hinnan noustessa. Tällöin saadaan suurempi hyöty energiavarastosta, johon on pystytty varastoimaan huomattavia määriä energiaa ostosähköä halvemmalla.



Kuva 2. Kaupungintalon keskiarvokulutus tunnissa kuukausittain vuosina 2019 ja 2021.



Kuva 3. Lappeen koulun keskiarvokulutus tunnissa kuukausittain vuonna 2021.

Kuva 2 nähdään epidemian aiheuttaman etätyöskentelyn vaikutus sähkönkulutukseen, etenkin talvikuukausina. Vuoden 2021 kesä oli harvinaisen lämmin, jolloin vaikutus rakennuksen jäähdytykseen on myös huomattava.

Kuva 3 huomataan Lappeen koulun yöllisen kulutuksen olevan lähestulkoon sama ympäri vuoden. Suurinta sähkön kulutus on talvikuukausina ja kesäisin päiväkulutus ei eroa paljon yön aikaisesta kulutuksesta. Rakennuksen A kulutus päivän ja yön aikana vaihtelee suuresti ympäri vuoden, tämä voi osittain selittyä rakennuksen vanhemmalla iällä (rakennettu 1983) ja tämän johdosta huonommalla eristyksellä sekä muilla vanhemmilla rakennusmenetelmillä.

3.2. Sähkön hinnat

Jotta akkujen käyttö olisi kannattavaa, on käytön tuomien hyötyjen oltava suurempia kuin käytöstä muodostuvien kustannusten summa.

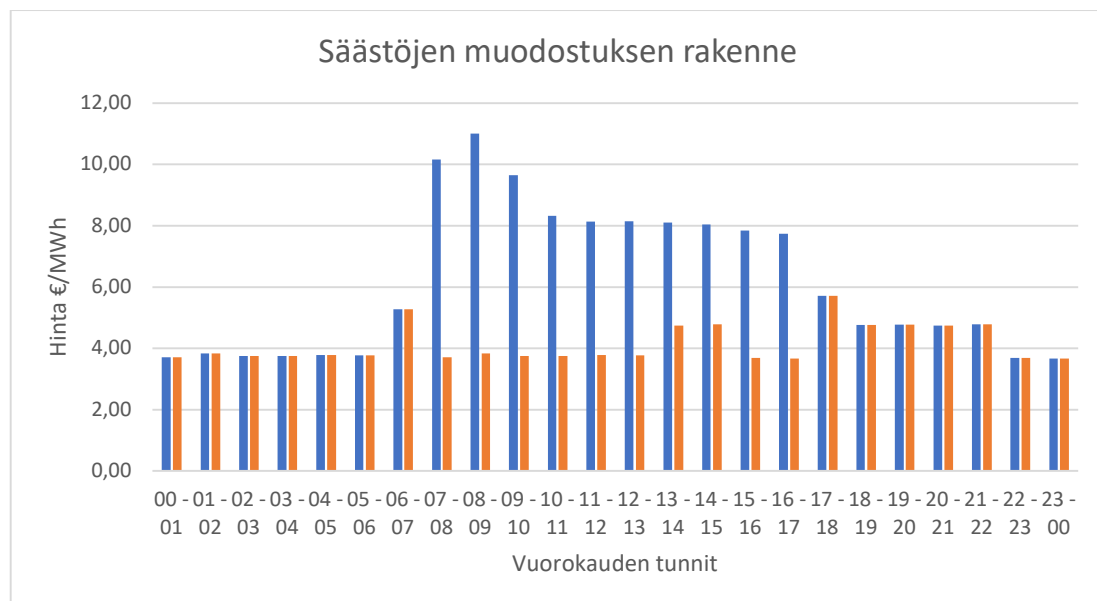
Molemmissa rakennuksissa sähkölasku muodostuu 66 % kiinteästä 4 c/kWh ja loput 33 % vaihtuvasta SPOT-hinnasta. SPOT-sähkön hinta vaihtelee tunneittain sen hetkisen verkon tuotannon ja kysynnän mukaan. Sähkön ostohintaan lisätään myös siirtomaksut sekä energiavero, jotka on otettava huomioon, kun lasketaan kannattavuutta. Myytäessä varastoitua tai tuotettua energiaa markkinoille ei tätä kustannusta saada kompensoitua.

Jos myydään verkkoon itse tuotettua tai aikaisemmin kerättyä sähköä, saadaan sähköstä sen hetkinen SPOT-hinta, jossa ei ole mukana siirto- eikä muita kuluja. Joten lähtökohtaisesti itse tuotettu sähkö on arvoltaan sama kuin markkinoilta ostettaessa, mutta siirto- ja muiden kulujen vuoksi on kannattavampaa käyttää omaa tuotantoa kuin ostaa verkosta. Suurten tuntikohtaisten hinnanmuutosten myötä on kuitenkin mahdollista, että päivisin pelkkä SPOT-hinta on kalliimpi kuin yöaikainen kokonaishinta verkko-ostolle. Tällöin on kannattavampaa myydä oma ylijäämätuotanto kuin varastoida sitä.

4. Akkujen käyttö

Aikaisempaa kulutus- ja hintadataa vuodelta 2021 käytettiin hyväksi, kun arvioitiin akkujen tuomaa säästöä ja niiden kannattavuutta. Tutkimuksessa pohdittiin akkujen käytön kannalta parasta aikaa akkujen purkamiselle ja lataamiselle. Päädyttiin tutkimaan tilannetta, jossa akut ladataan täyteen yösaikalla, jolloin saadaan päivän myötä kulutuksen kasvaessa ja hintojen noustessa käytettyä yön aikana akkuihin varastoitua energiaa ja vältetään ostamasta kallista sähköä verkosta. Kuva 4 havainnollistaa yöllä akun täyteen lataamisen ja päivällä ladatun energian käyttöä. Kun akkuihin yön aikana ladataan tarpeeksi energiaa rakennuksen päiväkulutuksen kattamiseksi, voidaan kalliimman sähkön ostamista välttää.

Kuvassa sinisellä kuvataan tilannetta, jossa sähköä ostetaan normaalisti kulutuksen mukaan verkosta ja oranssilla tilannetta, jossa sähkö on ostettu yön aikana akkua lataamalla. Näin sähköä saadaan koko päivän tarpeisiin hankittua huomattavasti halvempaan hintaan ja näin saavutetaan säästöä akkua hyväksi käyttäen.



Kuva 4. Simuloitu säästöjen havainnollistaminen.

Tässä kulutushuippujen tasaamisessa on huomioitava kuitenkin akun käytöstä muodostuvat kustannukset. Akkua ei kannata käyttää tilanteissa, joissa sähkömäärän vaihtelun tuomat hyödyt eivät ylitä akun lataamisesta, kulumisesta ja käytöstä muodostuvia kuluja.

4.1. Säättömarkkinat

Akkua voidaan myös käyttää osittain tai kokonaan pohjoismaiden säättömarkkinoilla. Säättömarkkinat muodostuvat sekä säätösähkö- että säätökapasiteettimarkkinoista. Taloudellinen hyöty muodostuu energian tarjoajan saamista korvauksista, jotka muodostuvat tarjotusta säädön koosta ja sen käytön määrästä. Hinnat muodostuvat vuosimarkkinoilla kiinteästä, koko vuoden voimassa olevasta hinnasta, joka vuonna 2021 oli 12,5 euroa/MW. Tuntimarkkinoilla jokaiselle tunnille jätetään tarjous oman säädön koosta ja hinnasta. Kaikki markkinoille esitetyt tarjoukset täytetään hintajärjestyksessä ja kaikille reservin haltijoille maksetaan kalleimman toteutuneen tarjouksen mukainen hinta tunneittain. Vuonna 2021 keskimääräinen korvaus tuntimarkkinoilla oli 14,29 euroa/MW (Fingrid, 2017).

Säättömarkkinoille reserviksi ilmoitettua kapasiteettia ei saa käyttää omaan käyttöön ja mikäli akusta käytetään säättömarkkinoilla sen koko kapasiteettia, ei akustolla ole suoraa vaikutusta suunnitellun kohteen sähkölaskuun. Hyöty muodostuu epäsuorasti säättömarkkinoille osallistumisen kestosta eli pysyvyydestä ja sen myötä maksetuista korvauksista. Olettettujen korvausten määrää käsitellään tarkemmin kappaleessa 6.

Säättömarkkinoille pääsy vaatii Fingridin taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentamis- ja hyväksymisprosessin läpäisyn sekä valitun sopimuksen allekirjoittamisen. Molemmissa tapauksissa osallistujan on kyettävä sekä alas- että ylössäätöön. Ylössäätö tarkoittaa tuotannon lisäämistä tai kulutuksen vähentämistä ja alassäätö vastakkaista toimintaa.

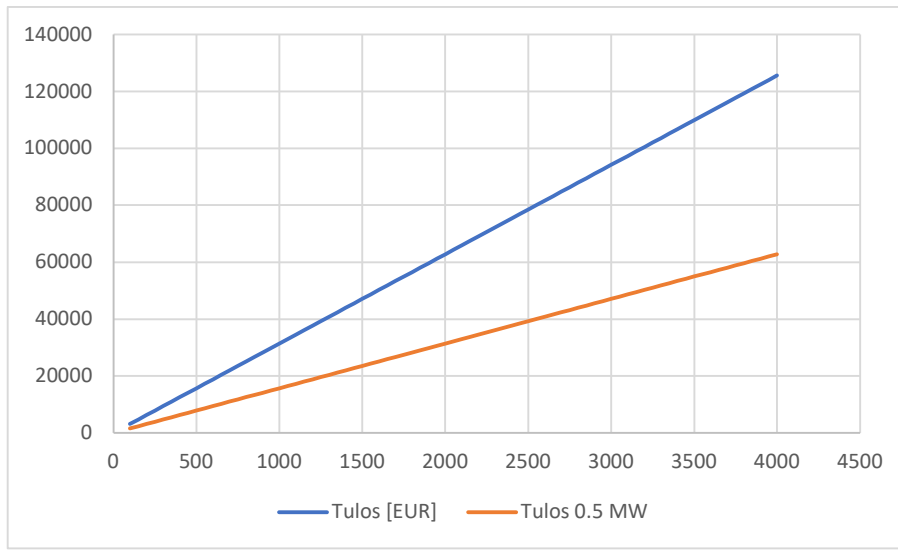
Akkujen kanssa olisi mahdollista osallistua taajuusohjattuun käyttöreserviin sekä ylös- ja alasohjattuun häiriöreserviin. Säättömarkkinoille osallistuessa ilmoitetaan tarjottavan säädön

tehollinen arvo. Teholliset vähimmäismäärät edellä mainittuihin reserveihin ovat häiriöreserveissä 1 MW ja käyttöreservissä 100 kW. Osallistuminen säätömarkkinoille kuitenkin estää akun käytön omassa käytössä säätösopimuksen mukaiselta kapasiteetilta. Muuta kapasiteettia pystytään vielä käyttämään akun varaustason hallintaan.

1 MW kokoisen akun käyttö häiriöreservissä ei ole suositeltavaa, sillä akun koko kapasiteetti joutuu nopeiden purku- ja latausjaksojen vaikutuksen alaisiksi. Akku on myös purettava vähintään 2 tunnin aikana sen täyteen lataamisesta aktivointikyvyn palauttamiseksi. Pienellä akulla sen realistinen käyttöikä pienenee huomattavasti tällaisessa käytössä, joissa sitä päivän aikana puretaan ja ladataan suurella teholla ja mahdollisesti useaan kertaan.

Esimerkiksi talvella, kun aurinkovoimalan tuotanto laskee, voitaisiin akkua hyödyntää käyttöreservissä tuntimarkkinoilla. Jos käytetään Fingridin mallia tuntimarkkinoilla loka-helmikuun aikana ja akku on käytössä täysipäiväisesti säätömarkkinoilla ja Fingridin tuntimarkkinoiden käyttöreservin ylläpitämisestä maksetut korvaukset pysyvät samalla tasolla kuin aikaisempina vuosina, voidaan saavuttaa täyttä akkua käyttäen sivun 26 kuvaajan mukaiset tuotot (kuva 5, sininen jana). Jos säätömarkkinoilla käytetään vain puolet kapasiteetista (500 kWh), jäävät saavutetut tuotot pienemmäksi kuin koko akkua käytettäessä (kuva 5, punainen jana).

Talvikuukausina, mikäli akkua ajettaisiin vain omaan käyttöön, sen muodostamat säästöt ovat hieman yli 7 000 euroa. Mikäli akkua käytetään säätömarkkinoilla 300 tuntia, päästään jo suurempiin säästöihin. Jos akkua halutaan käyttää talvisin myös omaan käyttöön, saadaan 0,5 MW teholla 600 tunnin säätömarkkina pysyvyydellä ylitettyä tämä 7.000 euron raja. (Fingrid, 2017).



Kuva 5. Säättömarkkinoilla mahdollinen tulos pysyvyyden mukaan (Fingrid, 2017)

Aurinkovoimalan tuotanto voidaan myös yhdistää kesäisin säättömarkkinoille. Jätetään akusta riittävästi kapasiteettia yöaikaiseen rakennuksen peruskulutukseen ja ajetaan loppua säättömarkkinoilla. Näin verojenkin jälkeen on mahdollista saavuttaa tuntuvat säästöt säättömarkkinoista saatujen tuottojen ansiosta. Mikäli saadaan 0,5 MW säättöteholla pidettyä akkua markkinoilla 4 000 tuntia, verojenkin jälkeen jää positiiviseksi kassavirraksi 45 000 euroa. Voimalan tuoma positiivinen kassavirta saadaan näin tuplattua.

Säättömarkkinoille osallistuminen vaikuttaa mahdollisesti akkujen käyttöikään jatkuvan säädön tuodessa akuille suurempaa käyttöä, sillä muuttuvan markkinatilanteen vuoksi akkua saatetaan purkaa tai ladata useastikin saman päivän aikana. Jos akkua hyödynnetään vain omassa käytössä, voidaan akun käyttöä säädellä erittäin tarkkaan. Säättömarkkinoille ilmoittautumisen jälkeen akun latauksiin ja purkamisiin ei sopimuksen aikana voida puuttua. Säättömarkkinat mahdollistavat kuitenkin suuremman kassavirran luomisen akkujen avulla. Mikäli koko akkua käytetään säättömarkkinoilla, on mahdollista päästä omalla käytöllä saavutettavia säästöjä vastaaviin vuosituloihin jo noin 600 tunnin markkinapysyvyydellä.

4.2. Akkujen taloudellinen käyttö

Akkujen kapasiteetti on siis riippuvainen akkujen täyteen lataamisesta ja purkamisesta muodostuvista kierroksista. Käyttöikään vaikuttavat myös muut tekijät eikä esimerkiksi käyttämätönkään akku kestä loputtomasti. Suurimmaksi yksittäiseksi kuluksi akkujen kohdalla muodostuvat itse akkukennot. Kokonaishankintahintaan suhteutettuna pelkkien kennojen osuus on teknologiasta riippuen noin 30 % luokkaa. Ne ovat myös sähkökemiallisessa energiavarastossa kaikista komponenteista nopeimmin kuluvia. Kun ajatellaan akkujen kuluman jakautuvan tasaisesti sen rajallisen käyttöiän ja latausten mukaan, saadaan laskettua latauksen hinta. Akkuja ei siis ole taloudellisesti kannattavaa ladata ollenkaan, jos latauksesta saatava hyöty on pienempi kuin akun täyteen lataamisen muodostuvien kustannusten kokonaishinta. Kun huomioidaan tämä tutkituissa hinta- ja kulutustiedoissa, saadaan laskettua aikaisemmasta datasta taloudellisesti kannattavien päivien lukumäärät. Tätä voidaan pitää suuntaa antavana mallina tulevaisuuden kannalta, kun arvioidaan, onko kannattavaa ja järkevää investoida sähkökemialliseen energiavarastoon.

Taulukosta 6 voidaan lukea akkujen käytöstä muodostuvien kulujen perusteella yhden latauksen hinta, kun akkuja ladataan päivittäin täyteen. Hinta sykleittäin saadaan laskemalla summa Taulukko 1 mainituista hinnoista ja saatu summa jaetaan kullekin akulle ominaisella eliniän aikaisella kestävyydellä seuraavasti.

$$Hinta_{sykleittäin} = \frac{h}{x} * 1000 \quad (1)$$

Kaavassa h on taulukossa 1 esitettyjen hintojen summa ja x on kullekin akulle ominainen lataussykli.

Kennoille kustannuslaskenta suoritetaan samaan tapaan, mutta jätetään huomiotta kaikki muut paitsi kennojen ja kennojen hallintaan liittyvät hinnat. Huomataan, että kennojen hinnat muodostavat suuren osan koko akkujen hankintahinnasta.

Näin laskettuna vuonna 2021 oli keskimäärin 60 päivää, jolloin akkujen lataaminen olisi taloudellisesti kannattavaa. Suurin osa näistä taloudellisesti kannattavista päivistä sijoittui loppuvuodelle, jolloin sähkön hintojen vaihtelu kasvoi suuresti verrattuna saman vuoden alkupuoliskoon. Mikäli akkuja ladataan vain näillä taloudellisesti kannattavilla päivillä, kasvaa akkujen käyttöikä huomattavasti.

Taulukko 6. Käytöstä aiheutuvat kulut kennoille

Akkutyypit	Hinta kennoille per sykli [€]	Hinta koko energiavarastolle per sykli [€]
Li-ion LFP	112	254
Li-ion NMC	115	259
Lyijy	132	319
RFB	76	133

4.3. Akkujen käyttö hätätilanteissa

Akkuja on käytetty jo pitkään varavirtalähteinä useissa eri käyttökohteissa, niin arkielämän puhelimen ja tietokoneen varavirtalähteenä kuin suuremman kokoluokan varastoissa. Akut ovat siis todistetusti toimiva ratkaisu lyhytaikaiseen verkosta irtautumiseen. Jotta akku toimisi tehokkaana varavirtalähteenä, on sen oltava täyteen ladattu, sillä varsinaisen yllättävän hätätilanteen sattuessa ei sitä ole enää mahdollista ladata.

Akun käyttö hätätilanteessa edellyttää, että ainakin osaa sen kapasiteetista on pidettävä jatkuvasti ladattuna ja valmiina hätätilanteiden varalle. Hätätilanteen sattuessa akulla olisi mahdollista syöttää virtaa tutkimuskohteessa selviytymiselle tärkeisiin laitteisiin, esimerkiksi ruokahuoltoon tai talvella rakennuksen lämmitykseen. Akun hyödynnettävä käyttöaika on riippuvainen akusta kyseisenä hetkenä otetun tehon määrästä ja akun kapasiteetista. Akku on hätätilanteessa todella tarpeellinen, kun nykymaailmassa lähestulkoon kaikki toimii sähköllä. Verkkovirran katketessa voidaan siis akkuun varastoitua sähköenergiaa käyttää monipuolisesti moniin eri laitteisiin ja tarpeisiin.

5. Aurinkovoimala

Akkuvaraston suuria lataamiskustannuksia voidaan kompensoida liittämällä akkuvaraston rinnalle jokin toinen energiantuotantolaitos, tässä tapauksessa aurinkovoimala. Aurinkovoimalalla saadaan tuotettua energiaa suhteellisen tehokkaasti, kun siihen liitetään energiavarasto, jolloin voidaan varastoida päivisin tuotettua energiaa myöhempää tarvetta varten. Tässä tutkimuksessa ei keskitytä syvällisesti aurinkovoimalan eri ominaisuuksiin ja tyyppeihin, vaan valitaan käyttötarkoitukseen sopivan kokoinen voimala ja tarkastellaan kuinka sen integrointi mahdollisesti edesauttaa energiavaraston toimintaa.

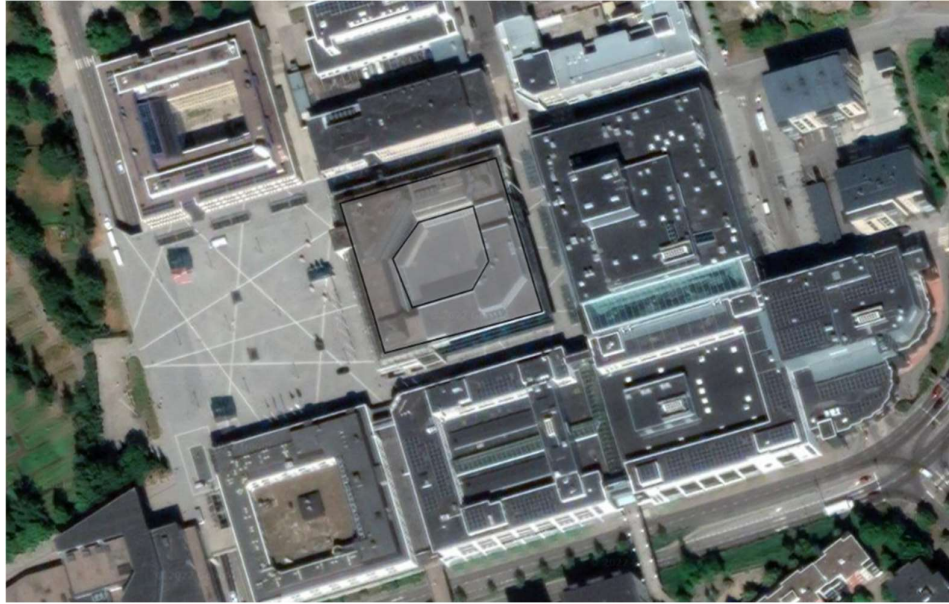
Aurinkovoimalan koko määritetään vertailemalla muutamaa eri kokoista ratkaisua ja vertailemalla niiden ominaisuuksia toisiinsa. Vaihtoehtoista valitaan energiavarastoon integrointiin ominaisuuksiltaan paras ja tutkitaan sen toimintaa energiavaraston rinnalla.

5.1. Aurinkovoimalan kokotarpeen määrittäminen

Aurinkovoimala voidaan sijoittaa akkukennoston läheisyyteen kaupungintalon tai Lappeen koulun katolle. Voidaan myös käyttää hieman kauempana olevaa aurinkovoimalaa ja siirtää kennojen lataamiseen käytettävä energia verkkoa pitkin. Kun huomioidaan säätila, vuoden ajat ja muut muuttuvat ominaisuudet, voi voimalan pieni ylimitoitus olla aiheellinen ja kannattava toimenpide, jotta voimalasta saadaan mahdollisimman suuri hyöty myös epäihanteellisissa olosuhteissa. Voimalan tuottama ylimääräinen energia voidaan joko käyttää itse akkujen lataukseen tai se voidaan myydä takaisin verkkoon.

Aurinkovoimalan määrittelyä varten tutkimuksessa mukana olevien rakennusten kattojen pinta-alat määritetään suuntaa antavasti satelliittikuvien avulla (kuvat 6 ja 7). Näitä pinta-aloja ei voi pitää tarkkoina ja niitä käytetään vain havainnollistamaan, minkä kokoisia aurinkovoimaloita katoille pystytään asentamaan. Pinta-ala-arvioksi saadaan kaupungintalolle 2400 m² ja Lappeen koululle 2500 m². On kuitenkin huomioitava, että Lappeen koulun

katto ei ole tasainen vaan harjakatto, joten varsinaista paneeleille soveltuvaa pinta-alaa on tästä vain katon itäinen osa eli 1250 m². Sijaintinsa puolesta molemmat rakennukset ovat soveliaita paneelien asennukseen. Kaupungintalon tasaiselle ja laajalle katolle on asennettava telineet, joilla paneelit saadaan suunnattua ihanteelliseen asentoon.



Kuva 6. Kaupungintalon katon rajat satelliittikuvaan piirrettynä (Google maps 2022)



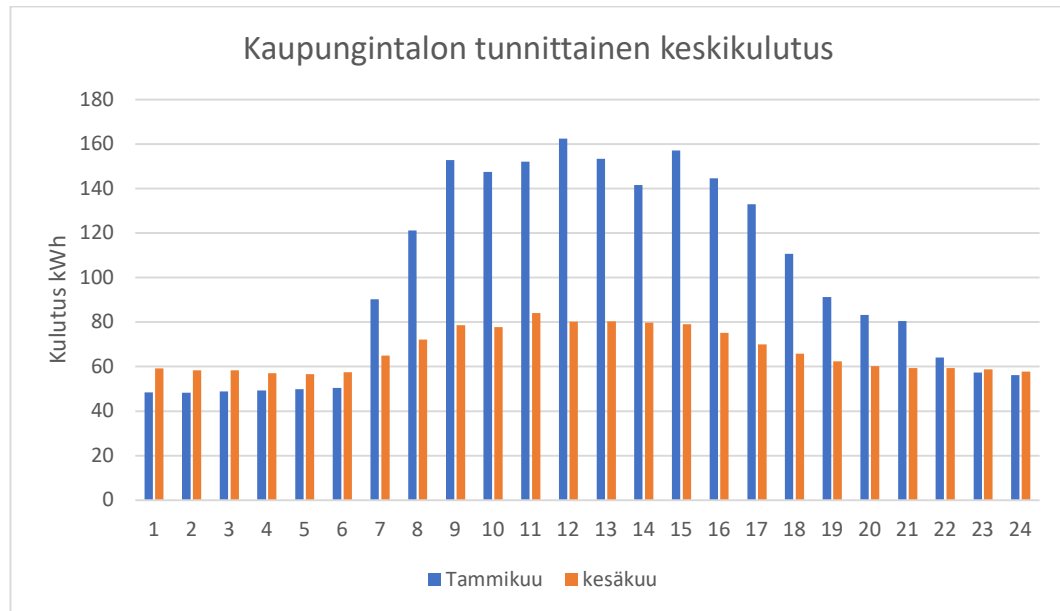
Kuva 7. Lappeen koulun katon pinta-alan määrittäminen satelliittikuvaan (Google maps 2022).

Varsinainen aurinkovoimalan rakentamiseen tarvittava pinta-ala riippuu sen käyttötarkoituksesta sekä käytettävissä olevasta budjetista. Aurinkovoimaloiden hankintakustannukset ovat pienille voimaloille suhteessa suuremmat kuin isommille. Suuri aurinkovoimala myös luonnollisesti kykenee tuottamaan enemmän hyödynnettävää energiaa. Aurinkovoimaloiden mitoituksista tehdyssä tutkimuksessa (Simola et al., 2018) tutkittiin elintarvikekauppaa, jonka vuotuinen energiankulutus oli 485 MWh. Tutkimuksen mukaan aurinkovoimalan ylimitoitus kasvattaa riskiä investoinnin hinnan nousun vuoksi, eikä ylimitoitus tuo merkittävää hyötyä verrattuna pienemmäksi mitoitettuun, suuremman käyttöasteen voimalaan. Tutkimuksen mukaan aurinkovoimala kannattaa mitoittaa siten, että tuotetulla energialla voidaan kattaa osa sen hetkisestä kulutuksesta ja näin saadaan kaikki tuotettu energia käyttöön mahdollisimman monena päivän. Näin investoinnin suuruuden ja hyötyjen suhde saadaan mahdollisimman suureksi. (Simola et al., 2018)

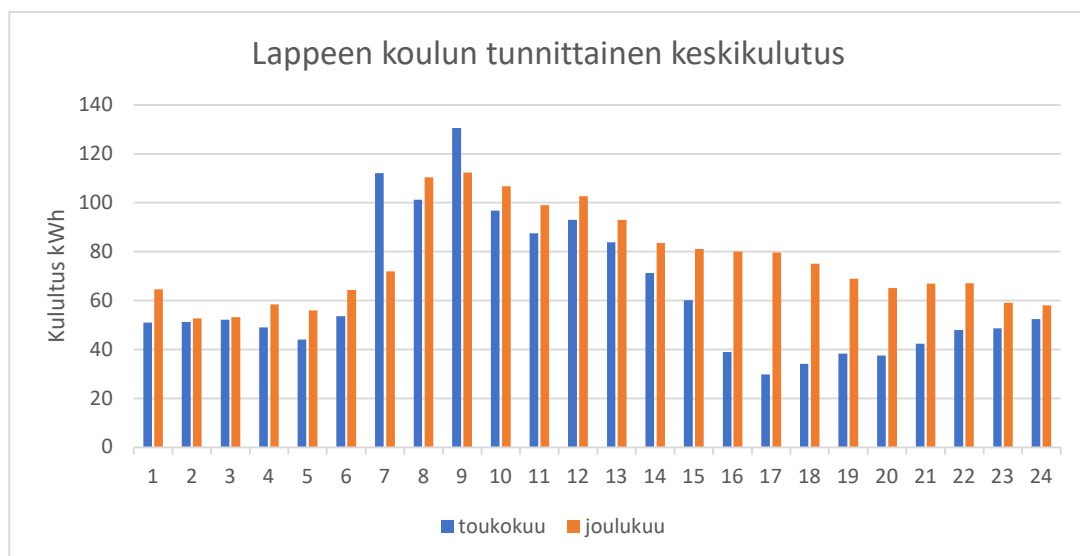
Aurinkovoimala on kuitenkin kannattavaa ylimitoittaa hieman kulutusta suuremmaksi, jotta saadaan mahdollisimman suuri hyöty mahdollisimman pitkälle syksyyn ja voimala alkaa myös tuottaa aikaisin keväällä. Kuva 8 ja Kuva 9 havainnollistavat kulutusten määrää kesä- ja talvikuukausina. Aurinkovoimalan tuotanto on kesäkuukausina huipussaan, mutta rakennusten tarvitsema kulutus useimmiten alhaisin lämmitystarpeen ollessa alhainen. Lappeen koululla kulutus on kuitenkin talvella lähestulkoon sama kuin kesällä.

Taulukko 5 ilmoitettujen kulutuslukemien perusteella molempien kohteiden keskimääräinen päiväkulutus on noin 2 MWh luokkaa. Aurinkovoimalat kuitenkin mitoitetaan kesäkuukausien mukaisesti, koska suurin osan tuotannosta ajoittuu Suomessa juuri kesäkuukausiin. Rakennusten keskikulutukset tuntitasolla nähdään Kuva 8 ja Kuva 9. Lappeen koululla käytetään vuoden 2021 ja kaupungintalolla vuonna 2019 mitattuja arvoja, eikä vuoden 2021, jolloin etätyösuosituksen vuoksi kulutus on ollut normaalia pienempää. Molemmissa kohteissa kesäkuukausien kulutus on noin 80 kWh suuruinen. Aurinkovoimalaa ei kannata ylimitoittaa kulutusta suuremmaksi, jottei investoinnin hinta kasva turhaan. Simolan tutkimuksessa todettiin ylimitoituksen olevan jopa haitaksi koska tulevaisuuden hintoja ja olosuhteita on vaikea ennustaa (Simola et al., 2018). Mitoitetaan aurinkovoimalat liitteiden 1 ja 2 mukaisesti,

jolloin aurinkovoimalan kooksi saadaan 150 kWp. Tällöin aurinkovoimalalla pystytään kattamaan aikaisemman datan perusteella rakennusten kokonaiskulutuksesta noin 20 % omakäyttöasteella 99 %. Tällöin tuotetusta energiasta saadaan suurin osa hyödynnettyä omalla käytöllä.



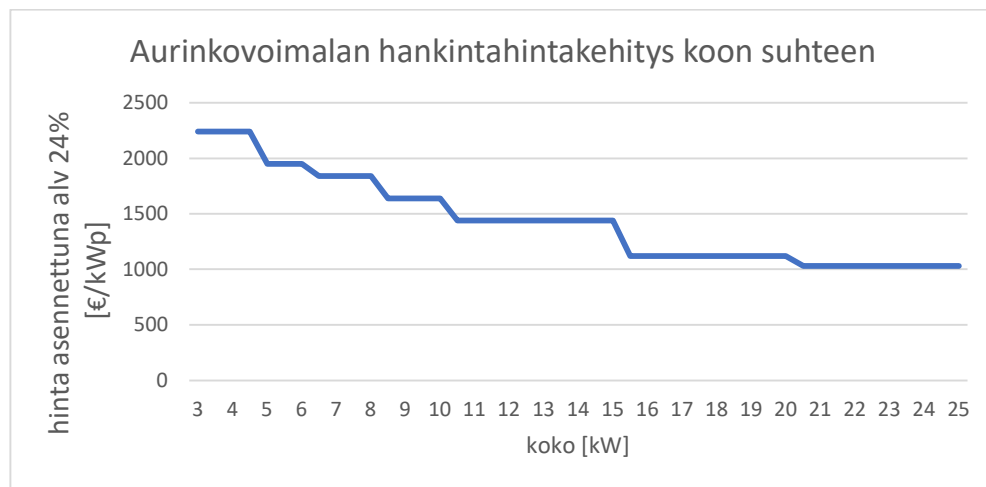
Kuva 8. Kaupungintalon kulutus tunneittain tammi- ja kesäkuussa 2019



Kuva 9. Lappeen koulun kulutus tunneittain touko- ja joulukuussa 2021

5.2. Aurinkovoimalan hankintakustannus

Nykyään suurempien, yli 20 kWp voimaloiden hankintakustannukset ovat madaltuneet verrattuna kymmenen vuoden takaiseen hintatasoon. Kustannus kasvaa reilusti Kuva 10 mukaisesti, kun siirrytään pienempiin, alle 20 kWp kokoisiin voimaloihin.



Kuva 10. Aurinkovoimaloiden hinnan kehitys koon kasvaessa (Eskelinen 2018)

5.3. Aurinkovoimalan vaikutus akun kannattavuuteen

Miten aurinkovoimalan lisääminen vaikuttaa energiavaraston kannattavuuteen ja takaisinmaksuaikaan? Aikaisemmin on jo todettu akkujen latauksen yösaikalla vain ylijäämäisen energian jälleenmyynnin takia olevan taloudellisesti kannattamatonta. Akustosta saadaan paras hyöty, kun edullisemmalla sähköllä ladattua akkua käytetään oman käytön kompensoimiseen sähkön hinnan noustessa päivisin. Akkujen käyttökustannukset tekevät siitä kuitenkin nykyisillä akkujen hinnoilla pitkälti kannattamatonta. Siksi tutkitaan, onko järkevämpää ladata akku päivän aikana aurinkovoimalan avulla ja käyttää akkuun varastoitua energiaa aikoina, kun aurinkovoimalan tuotanto on alhaista.

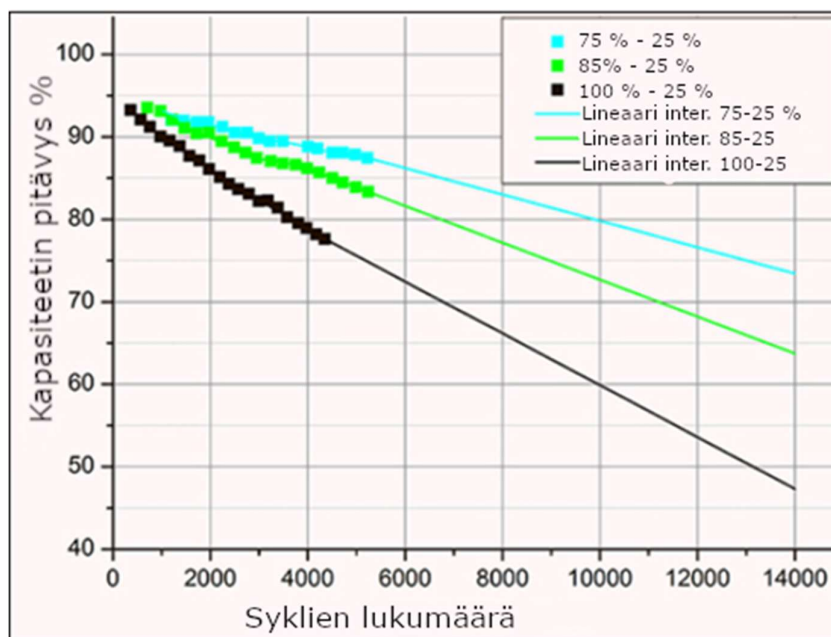
Suomessa aurinkovoimaloiden tuotantopotentiaali on vuoden aikana keskimäärin noin 850 kWh/kWp (Kosonen et al., 2014). Tuotanto vaihtelee kuitenkin vuodenaikojen mukaan suuresti: talvikuukausina tuotanto on lähes nollassa ja kesäisin, pitkien päivien myötä, tuotanto kasvaa huomattavasti.

Vaihtoehtoinen ratkaisu voisi olla pienemmän aurinkovoimalan integrointi akustoon, jolloin akkua voitaisiin ladata verkosta yöaikaan edullisemmalla sähköllä. Päiväaikaan voimalaan ladattu ja akun päivällä kehittämä sähkö kattaisi rakennuksen energiatarpeet. Tämä vaihtoehto tasaisi yöaikaan verkon käyttöä ja päivällä aurinkovoimalan tuotantoon vaikuttavilla tekijöillä ei olisi niin suurta vaikutusta kokonaistuotannon määrään. Myös alkuinvestoinnin suuruus olisi pienempi, kun rakennetaan pienempikokoinen aurinkovoimala integroitavaksi akkujen pariin.

Mikäli aurinkovoimalan ylimäärätoiminnalla ladataan akkua päivisin, on myös otettava huomioon sähkön hinnan vaihtelu. Mikäli sähkön hinta on päivisin todella korkealla, saa myös sen myymisestä verkkoon hyvän korvauksen. Mikäli tämä sähkön myyntikorvaus on korkeampi kuin sähkön öinen ostohinta, tehdään akkua päivällä lataamalla tappiota. Akun lataaminen myös maksaa, vaikka sitä omalla sähköntuotannolla ladattaisiinkin.

Mikäli akkuja ladataan normaalitilanteissa vain yön kulutuksen tarpeisiin, saadaan DOD-arvoa laskettua huomattavasti. Tämä pidentää kennojen eliniän oletusta huomattavasti kaikissa tapauksissa. Latauskiertojen kasvun myötä myös puhtaasti kennojen kulumisesta johdettu lataushinta alenee ja akustosta saadaan kannattavampi. Kuva 11 verrataan Li-ioni akun kokonaiskapasiteetista käytettyä prosentuaalista määrää ja sen vaikutusta akun elinikään kapasiteetin pitävyyden kannalta. Huomataan, että akut, joita ladataan vain osalla kokonaiska-

pasiteetista, kestävät käyttöä huomattavasti enemmän kuin akut, joilla käytetään kapasiteetista suurempaa osaa. Tämä on ominaista kaikille sähkökemiallisille kennoille: kun kennojen kokonaiskapasiteetista käytetään vain pientä osaa kasvaa kennojen elinikä huomattavasti.



Kuva 11. Purkusyvyyden vaikutus Li-ioniakkuun (Xu et al., 2016)

Purkusyvyyden puolittaminen käyttämällä vain 50 % akkujen kokonaiskapasiteetista, voidaan akkujen kalenteri-ikää pidentää kaksinkertaiseksi, joissain tapauksissa jopa enemmän. Käytetyn kapasiteetin pienentäminen vaikuttaa pienentävästi kierrätettyyn energiaan kokonaisuutena ja saman energiamäärän saamiseksi olisi akkuja ladattava useammin. Samassa Bolun Xu:n tekemässä tutkimuksessa todettiin myös akun aloitus- ja lopetuskapasiteetilla olevan merkitystä kennojen kestävyteen. Mikäli akkujen kapasiteetista käytetään 50 % ikkunaa, on latauksen ja purkamisen aloituskohdilla merkitystä akun kestävyden kannalta. Jos kennon varauksen purkaminen aloitetaan 100 % ja latauksen 50 % kapasiteetin kohdalla, on kennon kuluma suurempaa kuin vastaavasti 85–25 % välisellä syklillä. (Xu et al., 2016)

6. Kassavirtaan vaikuttavat tekijät

Energiavaraston hankintaa tutkittiin myös sen ilmastoon ja yhteiskuntaan vaikuttavien tekijöiden kannalta. Myös hätätilanteissa on hyötyä suuresta energiavarastosta, jolla pystytään ylläpitämään toiminnoille välttämättömiä laitteita ilman ulkopuolista energianlähdettä.

Uusitut energiamuodot sekä energiavarastot ovat vielä varsin uutta ideologiaa ja näin ollen kustannukset ovat vielä melko korkeat. Tämän vuoksi voimaloiden rakentamista tuetaan rahallisesti. Teknologian kalliin hankintakustannuksen sekä ympäristölle aiheutuvien hyötyjen vuoksi hankintaan voi saada jopa 40 % energiatuen, mikäli kyseessä on demonstraatio uudesta teknologiasta. Tukea on kuitenkin mahdollista hakea energiavarastolle vain, mikäli investoidaan myös energian tuotantolaitokseen. Tukea myönnetään, mikäli energiavarastoon liittyvien kustannusten enimmäismäärä on hankkeessa 50 %. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020).

Toimiva energiantuotanto aurinkovoimaloilla ja muilla uusiutuvilla keinoilla mahdollistaa oman energiantuotannon lisäksi mahdollisen ylituotannon myynnin sähkönjakelijoille ja siitä saatavan myyntituoton. Rahallisen korvauksen määrä on kuitenkin huomattavasti sähkön ostohintaa pienempi ja mikäli on mahdollista itse hyödyntää oman voimalan tuotanto, taloudellinen kannattavuus kasvaa.

Oma energiantuotanto mahdollistaa myös osallistumisen säätömarkkinoille. Tämä tarkoittaa osallistumista sähköverkon tuotannon ja taajuuden säätelyyn oman tuotantokapasiteetin sallimissa rajoissa. Säätömarkkinoille osallistuminen edellyttää säätösopimuksen luomista Fingridin kanssa.

6.1. Kannattavuuden arvio

Työ- ja elinkeinoministeriön mukaan, mikäli sähköakkuihin liittyviä hankkeita tuetaan, on niissä myös investoitava uusiutuvan energian tuotantokapasiteettiin tai energiatehokkuutta parantaviin laitteisiin. Akkujen kokonaissumma koko investoinnista ei saa ylittää 50 % kokonaiskustannuksista. Jotta tutkimuksessa voidaan arvioida parhaan mahdollisen tilanteen kannattavuutta, oletetaan että näihin vaatimuksiin päästään. Oletetaan siis tuen olevan 20 % hankintahinnasta. Tämä laskee akkutyypin hankintahintaa tuen verran, esimerkiksi LFP akun kohdalla 507 600 eurosta 410 000 euroon (Taulukko 7).

Taulukko 7. Energiatuen vaikutus hankintahintoihin ja käytön kustannuksiin 1 MWh akulle

Akkutyypä	Tuettu hankintahinta [€]	Käyttöhinta sykleittäin ilman huoltokuluja [€/MWh]	Huoltokulut per sykli [€/MWh]	Hinta yhteensä sykleittäin [€]
LFP	410 000	203	13	216
NMC	415 000	207	13	220
Pb	450 000	255	7	263
RFB	560 000	107	19	126

Myönnettävä hankintatuki ei vaikuta huoltokuluihin, joita akuston käyttämisestä muodostuu, joten niiden suuruus pysyy samana. Huoltoon liittyvien kulujen kanssa, kun oletetaan akkua ladattavan kerran päivässä, nousevat akun käyttökustannukset taulukko mukaisesti.

Kannattavana voidaan pitää investointia, jolla sen käyttöaikana saadut hyödyt ovat suurempia kuin investoinnista aiheutuneiden kulujen summan. Akuille olisi siis saatava huomattavasti pidempi käyttöaika, jolloin kokonaiskäyttökustannukset olisivat pienemmät. Keston myötä kustannukset yksittäisten latausten suhteen pienenevät ja akun käyttökynnys alenee, kun akkuja voitaisiin käyttää monipuolisemmin ja useammin ilman pelkoa, että käyttökustannukset ylittävät saadut hyödyt. Jos sähkökemiallisten akkujen kestävyys saataisiin nousemaan 6 000 sykliin, jolloin ilman kennojen uusimista voitaisiin akkuja ladata päivittäin 15 vuotta, ja hankintahinta laskettua alle 75 €/kWh, voitaisiin sähkökemiallisia energiavarastoja pitää taloudellisesti kannattavana investointina.

Vaikka energiavarastoon integroitaisiin myös aurinkovoimala, eivät sen tuomat taloudelliset hyödyt pysty kompensoimaan akkujen kallista hankinta- ja käyttöhintaa. Nykyisin olemassa olevista teknologioista ominaisuuksiltaan sähkökemialliseksi energiavarastoksi soveltuvimpana voidaan pitää virtausakkuja, joiden ominaisuudet ja skaalattavuus ovat omaa luokkaansa. Teknologia on kuitenkin varsin uutta ja epävakaa. Käyttö rajoittuu suppealle lämpötila-alueelle ja luotettavien testitulosten puuttuessa pitkäaikaista toimintaa on vaikea arvioida.

7. Johtopäätökset

Tutkimuksessa saatiin selville tämänhetkinen kannattavuus sähkökemiallisille energiavarastoille ja aurinkovoimalan vaikutus kannattavuuteen. Tutkimuksen mukaan sähkökemialliset energiavarastot nykyisellä akkuteknologian ominaisuuksilla ja hinnoilla ovat tutkittuihin kohteisiin taloudellisesti kannattamattomia. Kannattavuus ei merkittävästi parantunut, vaikka akkuun liitettäisiin aurinkovoimalaa. Akkujen käyttö- ja hankintakustannukset ovat niin korkeat, että vaikka akkuja ladattaisiin itse aurinkovoimalla tuotetulla energialla, saadaan parempi taloudellinen hyöty, jos myydään suoraan ylijäämäinen tuotettu energia verkkoon ja oman tarpeen vaatiessa ostetaan energia takaisin verkosta.

Kustannuslaskentaan tuo epävarmuutta vaikeus arvioida tarkasti kaikkia muodostuvia kustannuksia ja rakennusprojektin aikaisten kustannusten kasvaminen. Tutkimuksesta saatiin kuitenkin nykyistä tilannetta varsin kattavasti kuvaava kokonaisuus, jonka avulla pystytään tämän hetken kannattavuutta arvioimaan.

Tutkimuksen mukaan ei toistaiseksi yksityisellä sektorilla ole mahdollista saada suurta taloudellista hyötyä akkujen käytöstä energian varastointiin, koska akuston ylläpitämisen kustannukset ylittävät siitä mahdollisesti saatavan hyödyn.

Aikaisemmissa tutkimuksissa on päästy samantapaisiin tuloksiin ja joitain yksityisen sektorin sähkökemiallisen energiavaraston rakennusprojekteja on jouduttu perumaan kannattamattomana. Sähkökemiallisella energiavarastolla varustettuja voimaloita on kuitenkin rakennettu Suomeen ja esimerkiksi Yhdysvaltoihin, mikä on erittäin tärkeä uuden teknologian kehittymiselle, koska teknologiaa ei ole mahdollista parantaa, ellei energiavarastoja rakenneta. Myös fossiilisista energiamuodoista pois siirtyminen edellyttää energiantuotannon huippuaikojen ylituotannon varastointia, koska uusiutuvilla energiamuodoilla ei toistaiseksi pystytä kaikkina aikoina turvaamaan energian saantia.

Jatkotutkimusta voitaisiin tehdä muiden kuin sähkökemiallisten energiavarastojen kannattavuudesta ja palata jo tutkittuun aiheeseen, kun akkuteknologia kehittyy edullisemmaksi ja ominaisuuksiltaan kestävämmäksi. Myös suurten sähkökemiallisten energiavarastojen kiertäystä on tarpeellista tutkia tarkemmin.

Ympäristön kannalta energiavarastot helpottavat ja nopeuttavat yhteiskunnan siirtymistä uusiutuvien energiamuotojen pariin. Uusiutuvat energiamuodot ovat tällä hetkellä riippuvaisia tekijöistä, jotka eivät ole ihmisen hallittavissa, kuten auringonpaiste tai tuuli. Kun tuotettua energiaa voidaan varastoida myöhempää käyttöä varten, ei olla täysin vallitsevien luonnonvoimien armoilla. Tuotantoa voidaan myös ylimitoittaa, sillä ylijäämäinen tuotanto voidaan varastoida. Häätätilanteet myös lisäävät tarvetta energiavarastoille. Ja häätätilanteissa tarve on monesti merkittävämpi tekijä kuin kustannus. Katkeamaton verkkovirran jakelu on nykyisellen toimivalle yhteiskunnalle elintärkeä, kun lähes kaikki laitteet toimivat sähköllä. Yhteiskunnalle elintärkeisiin laitoksiin, kuten sairaaloihin ja moniin tehtaisiin, on pystyttävä takaamaan ongelmaton virransyöttö myös ongelmatilanteissa.

Lähteet

Fan, X., Liu, B., Liu, J., Ding, J., Han, X., Deng, Y., Lv, X., Xie, Y., Chen, B., Hu, W. and Zhong, C. (2020). Battery Technologies for Grid-Level Large-Scale Electrical Energy Storage. *Transactions of Tianjin University*, [online] 26(2), pp.92–103. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12209-019-00231-w> [Viitattu 16.1.2022].

Nordpoolgroup.com. (2021). *See market data for all areas*. [online] Available at: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/#/nordic/table> [Avattu 16 tammi. 2022].

NordSolar. (2020). *Energiavarastot arkistot*. [online] Available at: <https://nordsolar.fi/tuotteet/aurinkosahkoa-kotiin/energiavarastot/> [Viitattu 16.1.2022].

Medium Voltage Products. (2022). *Energiavarastot*. [online] Available at: <https://new.abb.com/medium-voltage/fi/muuntamoratkaisut/energiavarastot> [Viitattu 16.1.2022].

Alfenelkamo.fi. (2022). *Energiavarastot | Alfen Elkamo*. [online] Available at: <https://alfenelkamo.fi/fi/energiavarastot> [Viitattu 16.1.2022].

Mongird, K., Viswanathan, V., Alam, J., Vartanian, C., Sprenkle, V., Northwest, P., Baxter, R. and Gov (2020). *2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment*. [online] Available at: <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Final%20-%20ESGC%20Cost%20Performance%20Report%2012-11-2020.pdf>. [Viitattu 19.4.2022]

Jacoby, M. (2020). *It's time to recycle lithium-ion batteries*. [online] Chemical & Engineering News. Available at: <https://cen.acs.org/materials/energy-storage/time-serious-recycling-lithium/97/i28> [Viitattu 19.4. 2022].

Tietoa Fortumista (2013). *Fortumin ratkaisu vähentää sähköautoilun ympäristövaikutuksia – innovaatio nostaa akkujen kierrätysasteen yli 80 prosenttiin | fortum.fi*. [online] fortum.fi. Available at: <https://www.fortum.fi/media/2019/03/fortumin-ratkaisu-vahentaa-sahkoautoilun-ymparistovaikutuksia-innovaatio-nostaa-akkujen-kierratysasteen-yli-80-prosenttiin> [Viitattu 19.4.2022].

Fingrid. (2017). *Kuinka osallistua reservimarkkinoille*. [online] Available at: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/> [Viitattu 19.4. 2022].

Europa.eu. (2016). *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission*. [online] Available at: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#api_5.1 [Viitattu 19.4.2022].

Kosonen, A., Ahola, J., Breyer, C., Aug. 2014. Large scale solar power plant in nordic conditions. In: 16th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe). Lappeenranta, Finland [Viitattu 19.4.2022].

Battery University (2010). *Battery University*. [online] Battery University. Available at: [https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries#:~:text=DoD%20constitutes%20a%20full%20charge,SoC\)%20level%20in%20the%20table.&text=A%20partial%20discharge%20reduces%20stress,currents%20also%20affect%20cycle%20life.](https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries#:~:text=DoD%20constitutes%20a%20full%20charge,SoC)%20level%20in%20the%20table.&text=A%20partial%20discharge%20reduces%20stress,currents%20also%20affect%20cycle%20life.) [Viitattu 19.4.2022].

Xu, B., Alexandre Oudalov, Ulbig, A. and D.s. Kirschen (2016). *Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment*. [online] ResearchGate. Available at: https://www.researchgate.net/publication/303890624_Modeling_of_Lithium-Ion_Battery_Degradation_for_Cell_Life_Assessment [Viitattu 20.4.2022].

Työ- ja elinkeinoministeriö. (2020). *Energiatuki - Työ- ja elinkeinoministeriön verkkopalvelu*. [online] Available at: <https://tem.fi/energiatuki> [Viitattu 19.4.2022].

May, G.J., Davidson, A. and Monahov, B. (2018). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, [online] 15, pp.145–157. Available at: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2352152X17304437?token=8C37E4378A594290641C87241A5A764A865939824E34B2CFBE7C1DC174EDED A3871E1621A23D1AD4C628C249C8387ECA&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220419120907> [Viitattu 19.4.2022].

Lim, T.M., Ulaganathan, M. and Yan, Q. (2015). Advances in membrane and stack design of redox flow batteries (RFBs) for medium- and large-scale energy storage. *Advances in Batteries for Medium and Large-Scale Energy Storage*, [online] pp.477–507. Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/redox-flow-battery> [Viitattu 19.4.2022].

He, G., Ciez, R., Moutis, P., Kar, S. and Whitacre, J.F. (2020). The economic end of life of electrochemical energy storage. *Applied Energy*, [online] 273, p.115151. Available at: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0306261920306632?token=A31B82939BFFA581A6B2A79DE654F4D137FC428AEFDE8B385C4AD8243269F4000E24DC8B6926D1B0090C8EBB925831A&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220419122604> [Viitattu 19.4.2022].

Finsolar. (2020) <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1VEzwSvQAHUVtlhCYhL4WoBajY5KUXyuC9WRRuuc2VM/edit#gid=279239804> [Viitattu 30.5.2022].

He, G., Ciez, R., Moutis, P., Kar, S. and Whitacre, J.F. (2020). The economic end of life of electrochemical energy storage. *Applied Energy*, [online] 273, p.115151. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115151. [Viitattu 30.5.2022]

Liite 1. PV-mitoitus

Kiinteistön aurinkosähköjärjestelmän mitoitus

Aurinkosähköjärjestelmän mitoituksen arvioimiseksi täytyä lähtötiedot punaisiin soluihin:

Aurinkosähköjärjestelmän koko tehona Wp	150000	Wp
Aurinkosähköjärjestelmän hyötysuhde % (sunde, jolla säteily määrä saadaan talteen)	13	%
Kiinteistön vuorokausikohtaisesta sähkönkulutuksesta maksimiosuus, jonka voi järjestelmän koko paneelien pinta-alana m ²	40	%
	1020	neliometriä

Kuukaudet	Päivien määrä kuukaudessa	Kiinteistön kuukausikohtainen sähkönkulutus kWh/kk	Auringon säteily kWh/m ² /pv sijainnin mukaan	Sähkön ostohinta €/MWh/kk	Aurinkosähkö n ylijäämän myyntihinta €/MWh/kk	Aurinkosähkö n tuotanto kWh/kk	Aurinkosähkö käyttöön kWh	Aurinkosähkö myyntiin kWh	Sähkön ostotarve kWh	Omaan käyttöön tuotetun aurinkosähkö n arvo €	Sähkön myyntitulot €	KK säteily kWh/m ²
Tammikuu	31	55800	0,28	228,8	20,0	1131	1131	0	54669	258,77 €	0,00 €	8,53
Helikuu	28	50400	0,78	206,6	20,0	2907	2907	0	47493	600,62 €	0,00 €	21,92
Maaliskuu	31	55800	2,27	228,8	20,0	9318	9318	0	46482	2 131,73 €	0,00 €	70,27
Huhtikuu	30	54000	3,62	221,4	20,0	14402	14402	0	39598	3 188,53 €	0,00 €	108,61
Toukokuu	31	55800	5,56	228,8	20,0	22875	22320	555	33480	5 233,30 €	11,10 €	172,51
Kesäkuu	30	54000	5,46	221,4	20,0	21711	21600	111	32400	4 806,73 €	2,21 €	163,73
Heinäkuu	31	55800	4,44	228,8	20,0	18248	18248	0	37552	4 174,87 €	0,00 €	137,62
Elokuu	31	55800	3,56	228,8	20,0	14651	14651	0	41149	3 351,85 €	0,00 €	110,49
Syyskuu	30	54000	2,27	221,4	20,0	9033	9033	0	44967	1 999,84 €	0,00 €	68,12
Lokakuu	31	55800	0,97	228,8	20,0	3978	3978	0	51822	910,09 €	0,00 €	30
Marraskuu	30	54000	0,28	221,4	20,0	1120	1120	0	52880	248,07 €	0,00 €	8,45
Joulukuu	31	55800	0,12	228,8	20,0	497	497	0	55303	113,76 €	0,00 €	3,75
Yhteensä	365	657000				119870	119205	665	537795	27 018,2 €	13,3 €	

Aurinkosähköjärjestelmän vuosituotto 119870 kWh/v

Aurinkosähkön myyntin tai ylijäämän osuus 1 %

Liite 2. PV-kannattavuuslaskelmat

Kiinteistön aurinkosähköjärjestelmän kannattavuuslaskuri (versio 4/2020)

Lisenssi: CC 4.0

Tiedot kiinteistön ostosähkön kustannuksista (aurinkosähköjärjestelmän vertailukustannukset):

Sähköenergian ostohinta	4,1	snt/kWh
Energiaperusteinen sähkön siirtohint	0,5	snt/kWh
Ostosähkön arvonlisävero	0 %	
<i>Välitulos: aurinkosähkön vertailuhinta eli aurinkosähkön</i>	6,9	snt/kWh
Arvio ostosähkön hinnan noususta %/v	2,0%	/vuosi

Tiedot hankittavasta aurinkosähköjärjestelmästä:

Aurinkosähköjärjestelmän koko tehona kWp	150,0	kWp
<i>Välitulos: järjestelmän koko paneelien pinta-alana noin m2</i>	1020	neliometriä
Aurinkosähkön vuosituotto järjestelmän sijainnin mukaan	880	kWh/kWp
<i>Välitulos: aurinkosähköjärjestelmän vuosituotto alussa</i>	132000	kWh
Aurinkovoimalan vuosittainen sähköntuotannon vähenemä %/v	-0,5%	%
Aurinkosähkön ylijäämän osuus % vuosituotannosta	1 %	
Aurinkosähkön ylijäämän myyntihinta verkkoon snt/kWh	2,0	snt/kWh

Tiedot aurinkosähköjärjestelmän hankinta-, ylläpito- sekä rahoituskustannuksista:

Aurinkosähköjärjestelmän avaimet käteen -investointikustannus €	€135 000	euroa
<i>Välitulos: Järjestelmän vertailuhinta ilman tukia</i>	900 €	euroa/kWp
Mahdollinen investointituki, kotitalousvähennys tms.	20 %	
Oma mainos-, brändi- tai ympäristötuki investoinnille €	€0	euroa
<i>Välitulos: Järjestelmän investointikustannus sisältäen mahdolliset</i>	108 000 €	euroa
Lainan tai ulkopuolisen rahoituksen määrä	€14 400	
Laina-aika tai rahoitussopimuksen pituus	10	vuotta
Lainan tai rahoituksen korko	1,5%	
<i>Välitulos: Lainan tai ulkopuolisen rahoituksen maksuerät/vuosi</i>	€1 440,0	euroa/vuotta
Investoinnin tuottovaatimus	0,0%	
Invertterin vaihdon kustannus, osuus alkuiinvestoinnista. Oletettu	8 %	
Vuotuiset ylläpitokulut (vakuutukset, huolto tms. kulut)	€100	euroa

(Finsolar 2020)

Liite 3. PV-kustannus- ja tuottolaskelmat

Aurinkosähkön kustannus- ja tuottolaskelmat järjestelmän elinkaaren aikana:

Aurinkosähkijärjestelmän pitkäaikainen tuotanto vuosina kWh/v	Aurinkosähkön investointi		Aurinkosähkön tuotanto		Aurinkosähkön ylläpito- ja huoltokulut		Aurinkosähkön ylläpito- ja huoltokulut		Aurinkosähkön ylläpito- ja huoltokulut		Aurinkosähkön tuotto		Aurinkosähkön tuotto- ja talouslaskelmat	
	Ostosähkön hankintakustannus	Ostosähkön tuotannon vastausmaksu	Aurinkosähkön tuotanto	Aurinkosähkön ylläpito- ja huoltokulut	Aurinkosähkön ylläpito- ja huoltokulut	Aurinkosähkön ylläpito- ja huoltokulut	Aurinkosähkön ylläpito- ja huoltokulut	Aurinkosähkön ylläpito- ja huoltokulut	Aurinkosähkön ylläpito- ja huoltokulut	Aurinkosähkön ylläpito- ja huoltokulut	Aurinkosähkön ylläpito- ja huoltokulut	Aurinkosähkön ylläpito- ja huoltokulut	Aurinkosähkön ylläpito- ja huoltokulut	Aurinkosähkön ylläpito- ja huoltokulut
1	132000	0,07 €	€9 068,4	€1 440	€215,9	€100,0	€0,02	€26,4	€9 004,1	€7 348	€7 348	€14 774	€7 348	1
2	131340	0,07 €	€9 203,5	€1 440	€172,8	€100,0	€0,02	€26,8	€9 138,3	€7 425	€7 425	€14 774	€7 425	1
3	130683	0,07 €	€9 340,7	€1 440	€151,2	€100,0	€0,02	€27,2	€9 274,4	€7 583	€7 583	€22 357	€7 583	1
4	130030	0,07 €	€9 479,8	€1 440	€129,6	€100,0	€0,02	€27,6	€9 412,6	€7 743	€7 743	€30 100	€7 743	1
5	129380	0,07 €	€9 621,1	€1 440	€108,0	€100,0	€0,02	€28,0	€9 552,9	€7 905	€7 905	€38 005	€7 905	1
6	128733	0,08 €	€9 764,4	€1 440	€86,4	€100,0	€0,02	€28,4	€9 695,2	€8 069	€8 069	€46 074	€8 069	1
7	128089	0,08 €	€9 909,9	€1 440	€64,8	€100,0	€0,02	€28,8	€9 839,7	€8 235	€8 235	€54 309	€8 235	1
8	127449	0,08 €	€10 057,6	€1 440	€43,2	€100,0	€0,02	€29,3	€9 986,3	€8 403	€8 403	€62 712	€8 403	1
9	126811	0,08 €	€10 207,4	€1 440	€21,6	€100,0	€0,02	€29,7	€10 135,1	€8 573	€8 573	€71 285	€8 573	1
10	126177	0,08 €	€10 359,5	€1 440	€0,0	€100,0	€0,02	€30,2	€10 286,1	€8 746	€8 746	€80 031	€8 746	1
11	125547	0,09 €	€10 513,9		€0,0	€100,0	€0,02	€30,6	€10 439,4	€10 339	€10 339	€89 371	€10 339	1
12	124919	0,09 €	€10 670,5		€0,0	€100,0	€0,02	€31,1	€10 594,9	€10 495	€10 495	€98 865	€10 495	1
13	124294	0,09 €	€10 829,5		€0,0	€100,0	€0,03	€31,5	€10 752,8	€10 653	€10 653	€108 813	€10 653	1
14	123673	0,09 €	€10 990,9		€0,0	€100,0	€0,03	€32,0	€10 913,0	€10 813	€10 813	€118 867	€10 813	0
15	123054	0,09 €	€11 154,7		€0,0	€8 540,0	€0,03	€32,5	€11 075,6	€2 536	€2 536	€124 867	€2 536	0
16	122439	0,09 €	€11 320,9		€0,0	€100,0	€0,03	€33,0	€11 240,6	€11 141	€11 141	€136 007	€11 141	0
17	121827	0,09 €	€11 489,5		€0,0	€100,0	€0,03	€33,4	€11 408,1	€11 308	€11 308	€147 316	€11 308	0
18	121218	0,10 €	€11 660,7		€0,0	€100,0	€0,03	€33,9	€11 578,1	€11 478	€11 478	€158 794	€11 478	0
19	120612	0,10 €	€11 834,5		€0,0	€100,0	€0,03	€34,5	€11 750,6	€11 651	€11 651	€170 444	€11 651	0
20	120009	0,10 €	€12 010,8		€0,0	€100,0	€0,03	€35,0	€11 925,7	€11 826	€11 826	€182 270	€11 826	0
21	119409	0,10 €	€12 189,8		€0,0	€100,0	€0,03	€35,5	€12 103,4	€12 003	€12 003	€194 273	€12 003	0
22	118812	0,10 €	€12 371,4		€0,0	€100,0	€0,03	€36,0	€12 283,7	€12 184	€12 184	€206 457	€12 184	0
23	118217	0,11 €	€12 555,7		€0,0	€100,0	€0,03	€36,6	€12 466,7	€12 367	€12 367	€218 824	€12 367	0
24	117626	0,11 €	€12 742,8		€0,0	€100,0	€0,03	€37,1	€12 652,5	€12 552	€12 552	€231 376	€12 552	0
25	117038	0,11 €	€12 932,7		€0,0	€100,0	€0,03	€37,6	€12 841,0	€12 741	€12 741	€244 117	€12 741	0
26	116453	0,11 €	€13 125,4		€0,0	€100,0	€0,03	€38,2	€13 032,3	€12 932	€12 932	€257 049	€12 932	0
27	115871	0,11 €	€13 321,0		€0,0	€100,0	€0,03	€38,8	€13 226,5	€13 127	€13 127	€270 176	€13 127	0
28	115291	0,12 €	€13 519,4		€0,0	€100,0	€0,03	€39,4	€13 423,6	€13 324	€13 324	€283 500	€13 324	0
29	114715	0,12 €	€13 720,9		€0,0	€100,0	€0,03	€39,9	€13 623,6	€13 524	€13 524	€297 023	€13 524	0
30	114141	0,12 €	€13 925,3		€0,0	€100,0	€0,04	€40,5	€13 826,6	€13 727	€13 727	€310 750	€13 727	0
YHTEENSÄ	3685857		€339 893		€993,5	€11 340,0		€989,5	€337 483,3					13

Yhteenveto	
Kumulatiivinen tuotto	337 483 €
Takaisinmaksuaika	13 vuotta

Kannattavuuslaskurin v1.0 tekijät: Juntunen Joumi, Jales Mikko ja Auvinen Karoliina. 2015, FinSolar-hanke, Aalto-yliopisto.
Kannattavuuslaskurin v1.1 tekijät: Auvinen Karoliina ja Rummukainen Mikka. 2020, Canemure-hanke, Suomen ympäristökeskus SYKE.

(Finsolar 2020)