



# **AKKUENERGIAVARASTO KAUPPAKESKUS- KIINTEISTÖSSÄ LCOS-laskentatyökalu**

Samppa Salovaara

OPINNÄYTETYÖ  
Huhtikuu 2024

Talotekniikan tutkinto-ohjelma  
Sähköinen talotekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Talotekniikan tutkinto-ohjelma  
Sähköinen talotekniikka

SALOVAARA, SAMPPA

Akkuenergiavarasto kauppakeskuskiinteistössä  
LCOS-laskentatyökalu

Opinnäytetyö 56 sivua, joista liitteitä 4 sivua  
Huhtikuu 2024

---

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää akkuenergiavarastojen (BESS) käyttömekanismeja ja niiden taloudellista kannattavuutta kauppakeskuskiinteistössä. Tutkimuksen keskeinen tavoite on selvittää, kuinka paljon energian säilöminen maksaa, jotta voitaisiin määrittää ne olosuhteet, joissa energian säilöminen olisi kannattavaa. Työmenetelmänä on kirjallisuusselvitys. Säilömistaloudellisten laskentamallien löytämiseksi selvitystyön myötä LCOS-laskentamenetelmä, jonka soveltuvuutta arvioidaan vertaisarvioitujen lähteiden kautta. Laskentamenetelmää ja aiempien tutkimusten tuloksia tutkiessa huomataan kuitenkin, ettei esimerkiksi käytetystä laskentakorkokannasta ole yksimielisyyttä, vaikka tarkasteltu kirjallisuuskin perustui usein vain kirjallisiin lähtökohtiin. Työssä pyritään tarkastelemaan jokaista laskentaparametria nimenomaan kauppakeskuskiinteistön näkökulmasta.

Mielenkiintoisen tutkimuksesta teki muuttuvien kustannusten selvittäminen. Tutkimuksessa havaitaan, ettei aiemmassa kirjallisuudessa ole selvitetty kauppakeskuskohteen energianhankintamekanismeja ja energian hankintaan liittyviä sähkömarkkinakäytöksiä. Myöskään erilaisia tukia ja sähköenergian verottomuutta, tietyin rajaehdoin, ei ole huomioitu aiemmissa vastaavissa selvitystyöissä.

Koska työn tuloksena ei saada tässäkään selvitystyössä tuotettua yksiselitteisiä laskentaparametreja, tutkimusongelman tarkasteluun oli tarve kehittää Excel-laskentatyökalu. Laskentatyökalulla päästään vastaaviin laskentatuloksiin kuin viitatussa kirjallisuudessa. Työn rajauksen vuoksi jouduttiin kuitenkin jättämään työkalun käyttö ja todellisen kohteen analysointi pois tämän työn sisällöstä. Tämä myös siitä syystä, että todellisen datan käyttö olisi johtanut suurella todennäköisyydellä työn osien salaamiseen, salassapitosopimuksien vuoksi.

---

Asiasanat: energiavarasto, BESS, laskentamenetelmä, LCOS, käyttökustannus.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Building Services  
Electrical Building Services

SALOVAARA, SAMPPA

Review of BESS Applications in Commercial Properties  
LCOS Calculation Tool

Bachelor's thesis 56 pages, appendices 4 pages  
April 2024

---

The objective of this thesis was to investigate the mechanisms of use and the economic viability of Battery Energy Storage Systems (BESS) in commercial properties. The central goal of the study was to determine the cost for the stored energy to identify the conditions under which energy storage would be profitable. For calculating the cost of energy storage, the Levelized Cost of Storage (LCOS) method was identified, and its applicability was assessed through peer-reviewed sources. However, in reviewing the calculation method and previously calculated results, it was noted that there is no consensus on the used calculation parameters, although they often based solely on literature review level. The work aimed to explore each calculation parameter specifically from the perspective of a large shopping center.

A key point in the study was the examination of operational expenditures. It was observed that previous literature had not precisely addressed the energy procurement mechanisms of large commercial properties and their connections to the electricity markets. Likewise, various subsidies and the tax exemption of electrical energy under certain conditions had not been considered in similar previous studies.

As a result of the work, an Excel calculation tool was developed, which achieved the energy storage cost analysis as presented in the referenced literature. Due to the scope of the work however, the use of the tool and the analysis of an actual case were excluded from this thesis. This was also because the use of real data would have led to the need to redact parts of the work for non-disclosure reasons.

---

Key words: energy storage, BESS, calculation method, LCOS, operating cost.

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
1.1	Työn tausta .....	6
1.2	Tutkimuskysymys ja tavoitteenasettelu .....	7
2	AKKUENERGIAVARASTO - BESS .....	8
2.1	Ansaintamekanismit yleisesti .....	8
2.1.1	Kysyntäjousto ja kuormansiirto .....	9
2.1.2	Omakäytön maksimointi .....	10
2.1.3	Kulutushuippujen tasaus .....	12
2.1.4	Energia-arbitraasi .....	13
2.1.5	Reservimarkkinat.....	15
2.2	BESS-järjestelmän tekniset ominaisuudet.....	16
2.3	Markkinakatsaus .....	17
3	INVESTOINTILASKENTA JA KESKEISET KÄSITTEET .....	18
3.1	Korkokanta, WACC .....	18
3.2	Annuiteettimenetelmä .....	20
3.3	Nettonykyarvonmenetelmä.....	21
3.4	Kustannustekijät.....	22
3.4.1	Kiinteät kustannukset (CAPEX).....	22
3.4.2	Muuttuvat kustannukset (OPEX) .....	22
4	LASKENTAMENETELMÄ.....	29
4.1	Painotettu energian varastointikustannus LCOS.....	30
4.2	Lähtötiedot ja oletukset laskentaan .....	32
4.2.1	Talousparametrit.....	32
4.2.2	BESS parametrit.....	33
4.3	Herkkyysanalyysi .....	37
4.4	Laskennan tuloksia kirjallisuudesta .....	38
4.5	Kannattavuuden indikaattorit.....	38
5	TULOKSET .....	39
5.1	Kirjallisuusselvitys .....	39
5.2	Excel laskentatyökalu.....	41
6	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	43
	LÄHTEET .....	45
	LIITTEET.....	53
	Liite 1. Tulostettava kansinäkyvä / Laskennan esimerkkitulo.....	53
	Liite 2. Laskentatyökalu .....	55
	Liite 3. Laskentatyökalun ohje.....	56

## LYHENTEET JA TERMIT

BESS	"Battery Energy Storage System"	Akkuenergiavarasto
BMS	"Battery Management System"	Akunhallintajärjestelmä
CAPEX	"Capital Expenditures"	Kiinteä kustannus
CAPM	"Capital Asset Pricing Model"	Pääoman hinnoittelumalli
DoD	"Depth of Discharge"	Energiavaraston purkaussyvyys 0...100 [%]
cé		Senttejä euroissa.
OPEX	"Operating Expenditures"	Muuttuvat kustannukset
SoC	"State of Charge"	Energiavaraston varausaste 0...100 [%]
WACC	"Weighted Average Cost of Capital"	Painotettu keskim. pääoman kustannus
Aggregointi	Aggregointi tarkoittaa useiden resurssien yhdistämistä yhdeksi kokonaisuudeksi.	
Arbitraasi	Liiketoimintaa, jossa hyödynnetään saman hyödykkeen eri hintoja eri markkinoilla	
Futuurit	Sopimuksia ostaa tai myydä tietty hyödyke, rahoitusinstrumentti tai indeksi tulevaisuudessa ennalta määrättyyn hintaan.	
Kirchhoffin lait	<p>1) Virtalaki (KVL), joka perustuu varauksen säilymiseen ja siten virtapiirin solmukohdassa pätee; <math>\sum I_{sisään} = \sum I_{ulos}</math></p> <p>2) Jännitelaki (KJL), joka perustuu energian säilymiseen jonka seurauksena suljetussa virtapiirissä tai silmukassa jännitteiden summa silmukan ympäri on nolla; <math>\sum U_{nousut} - \sum U_{laskut} = 0</math>.</p>	
Kvartiiliväli (IQR)	Kvartiiliväli on yksi tilastotieteen käyttämistä hajontaluvuista. Kvartiilivälillä tarkoitetaan yläkvartiiliin (75 % tapauksista jää sen alapuolelle) ja alakvartiiliin (25 % tapauksista jää alapuolelle) erotusta. Kvartiiliväli ilmoittaa muuttujan vaihteluvälin, jolle ja-kauman keskellä olevat havaintoarvot sijoittuvat (eli 50 % kaikista tapauksista).	
Optiot	Sopimuksia, jossa option myyjä antaa sitovan lupauksen kaupan tekemisestä ennalta määrättyin ehdoin. Option ostaja saa oikeuden, mutta ei ole myyjän tapaan velvoitettu tekemään kauppaa ennalta sovittuna ajankohtana.	
OTC	Tarkoittaa "Over-The-Counter" -markkinaa, joka viittaa kaupankäyntiin pörssien ulkopuolella, suoraan kahden osapuolen välillä.	
PPA	PPA, eli "Power Purchase Agreement", on sähkönostosopimus, jossa sähköntuottaja (myyjä) ja sähkönkäyttäjä (ostaja) sopivat sähkön ostamisesta ja myymisestä ennalta määritellyillä ehdoilla.	
Tukkumyyjä	Ostaa, myy tai välittää sähköä suurissa erissä sähkömarkkinoilla. Sisältää usein riskien hallintaa ja hintasuojauksen tarjoamista finanssimarkkinoiden kautta	
Volatiliteetti	Volatiliteetti on tilastollinen indikaattori, joka mittaa hinnan vaihtelua tietyllä ajanjaksolla. Korkea volatiliteetti viittaa suurempaan hintojen heilahteluun, kun taas matala volatiliteetti viittaa vakaampiin hintoihin.	
Vähittäismyyjä	Myy sähköä loppukäyttäjille, kuten kotitalouksille ja pienyrityksille.	

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Tällä hetkellä energian käyttökustannusten sekä hiilijalanjäljen arviointi ja pienentäminen ovat monella tapaa linkittyneet suurten kiinteistöjen, kuten kauppakeskusten liiketoimintaan. Kiinteistötieto (KTI) kertoo kauppakeskusvertailussa ja markkinaraportissaan kiristyvän taloustilanteen, rahoitusten saatavuuden ja kasvavan kilpailun vuokralaisista painostavan ammattimaisia vuokranantajia etenevään vauhdilla vastuullisuusponnisteluissaan (Kiinteistötieto, 2023).

Energiatehokkuuslaki velvoittaa suuret yritykset teettämään energiakatselmuksen neljän vuoden välein. Pakollisissa energiakatselmuksissa esitetään merkittävät yrityksen energiatehokkuutta parantavat toimet, joissa energian säästötoimenpiteiden ohella nousee esiin uusiutuvan energian tuotannon lisääminen, osaksi kiinteistön sisäistä sähköjärjestelmää (Laki 1429/2014). Myös Euroopan komissio pyrkii *European Solar Rooftops Initiative* -aloitteellaan tekemään katolle asennettavista aurinkovoimaloista pakollisia uusiin ja olemassa oleviin julkisiin ja liikerakennuksiin, joiden hyötypinta-ala ( $\text{hym}^2$ ) on suurempi kuin 250 neliötä vuoteen 2027 mennessä (Euroopan komissio, 2022). Suomen kanta komission antamaan aurinkoenergiastrategiaan on yleisesti ottaen positiivinen, joskin siinä jätetään pieni varaus, toteamalla että ”yksityiskohtaista ja energialähdekoh- taista sääntelyä EU-alueella tulisi välttää” (Grönlund, 2022). Joka tapauksessa uusiutuvan energian, ennen kaikkea aurinkovoiman, rakentaminen osaksi kiinteistön energijärjestelmää tulee olemaan lähitulevaisuudessa hyvinkin ajankoh- taista. Energiavarastot tarjoavat mahdollisuuden sekä energian myynti- että os- toajankohdan optimointiin, mahdollistaen samalla myös tuotetun energian oma- käytön lisäämisen. Lisäksi energiatehokkuuteen tähtäävissä hankkeissa inves- tointitukien; esimerkiksi Energiatuen myöntämisestä on linjattu, että ”etusijalla ovat investointihankkeet, joilla edistetään uutta teknologiaa ja sen kaupallista- mista ja sähköjärjestelmän säätökykyä” (TEM, 2024). Kiinteistön omistajalle tar- joutuu jouston myötä myös erilaisia ansaintamekanismeja energiamarkkinoilla.

## 1.2 Tutkimuskysymys ja tavoitteenasettelu

Tämän työn tavoite on selvittää todellisessa kauppakeskuskohteessa akkuenergiavaraston (BESS) käyttömekanismit ja arvioida niiden kannattavuutta. Selvää on, ettei akkua kannata käyttää tilanteessa, jossa latauksesta saadut hyödyt eivät ylitä lataamisesta aiheutuneita kustannuksia. Kuitenkaan kustannusten muodostuminen ei ole yksiselitteistä, eikä siitä ole aitoa julkisesti saatavilla olevaa referenssidataa realistisen kannattavuusarvion pohjaksi. Keskeisin tavoite on siis selvittää mistä latauskustannukset muodostuvat, jotta investoinnin kannattavuutta voisi arvioida mahdollisimman kattavasti ja realistisesti. Haasteellista arvioimisesta tekee se, että sekä tuotto että kustannusparametrit ovat jatkuvassa muutoksessa. Tavoitteeseen pääsemiseksi työn tarkoitus on rakentaa laskentatyökalu, jolla voidaan taloudellisesti mallintaa latauskustannus yhtä laskutusyksikköä (€/kWh) kohden. Laskentamallin on tarkoitus toimia yleisellä tasolla, saatavilla olevan kirjallisuuden pohjalta, mutta sen on tarkoitus myös mahdollistaa laskentaparametrien säätö ja joustavuus mukautumaan hankekohtaisten laskentaparametrien mukaiseksi ajasta tai kohteesta riippumatta. Latauskustannukset ovat avainasemassa sekä investoinnin kannattavuutta arvioidessa että teknisesti parasta ratkaisua valittaessa.

Jotta tavoitteisiin päästään, on ensin luotava perustavanlaatuinen ymmärrys akkuenergiavarastojen eri käyttötarkoituksista ja ominaisuuksista sekä investointilaskennasta. Lisäksi on selvitettävä, millainen kohde kauppakeskus on energiankulutukseltaan sekä miten energia ostetaan.

## 2 AKKUENERGIAVARASTO - BESS

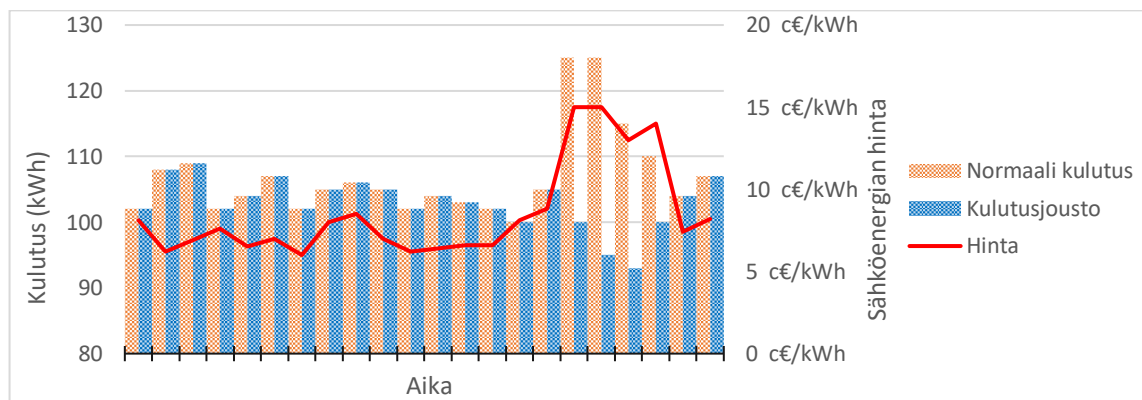
### 2.1 Ansaintamekanismit yleisesti

Energiavarastohankinnan ansaintamekanismeja voidaan arvioida karkeasti ottaen kahdelta kannalta; säästöjen (*kulutushuippujen leikkauksen ja kuormansiirron*) sekä sähköenergialla käytävän kaupan (*energia-arbitraasin*) kautta (Koskinen, 2023). Lisäksi akkuenergiajärjestelmillä voidaan osallistua Fingrid:n reservimarkkinoille. Säästö ja kaupankäynti eivät sinällään ole toisiaan poissulkevia, vaan toimivat usein yhdenaikaisesti. Tämä osaltaan monimutkaistaa ansaintamekanismien selvittämistä, sillä sekä ansainta- että säästötoimenpiteiden tehokkuus riippuvat suuresti sähköenergian ostohinnasta.

Energiavaraston ansaintamekanismit eivät toisaalta ole yksiselitteisesti sidottuna itse energiavarastolla tehtyyn liiketoimintaan tai säästöön. Energian varastointi voi mahdollistaa esimerkiksi sähköautonlatausinfraan toteuttamisen kiinteistöön; leikkaamalla liittymän hetkellisiä ja suuria tehopiikkejä, joiden toteuttaminen muuten nostaisi tehomaksuja tai olisi jopa mahdoton toteuttaa nykyisen kiinteistöverkon tehonsiirtokapasiteetilla. (Vertanen, 2023).

### 2.1.1 Kysyntäjousto ja kuormansiirto

Kysyntäjoustolla (eng. *Demand Response*, DR) tarkoitetaan sähkönkulutuksen mukauttamista sähkömarkkinoiden hetkellisen kysynnän ja tarjonnan perusteella muodostuvan hinnan mukaan (IEC, n.d.). Kiinteistössä tietyt kuormitukset ja prosessit ovat taloudellisesti optimoitavissa niiden tuottaman hyödyn ja sähkönkustannusten perusteella. Joissakin tapauksissa, kun sähkön hinta ylittää tietyn kynnyksen, prosessin toteuttaminen ei ole taloudellisesti järkevää. Tällöin se voidaan joko jättää kokonaan toteuttamatta, säätää kulutusta pienemmälle tai siirtää kulutus halvemmalle ajankohdalle (Suomen EFi Oy, n.d.). Suoraviivaisin tapa arvioida kysyntäjouston taloudellista potentiaalia on tarkastella sähkön pörssimarkkinahintaa suhteessa mittareista kerättyyn energian kulutushistoriaan kuviossa 1 esitetyllä tavalla.



KUVIO 1. Kuvitteellinen energiankulutusprofiili SPOT-hinnan kysyntäjoustolla ja ilman.

Joustetun kulutuksen arvo saadaan selville vähentämällä joustettu kulutus ”normaalista kulutuksesta”. Jäljelle jäävä tehon ja ajan tulon määräämä pinta-ala (kWh) on suoraan pois energialaskusta (€/kWh). Tietyt kulutusprosessit ovat sellaisia, että niiden siirto toiselle ajankohdalle on hyvin helppoa, eikä siirrosta aiheudu ylimääräisiä kustannuksia. Kulutushetken siirrossa täytyy kuitenkin huomioida sähkön hinta siirrettyllä (halvemmalla) ajankohdalla ja saatu ”tuotto” on karkeasti kalliin ja halvan tunnin erotus siirretyn kulutuksen (kWh) määrällä. Toisissa prosesseissa kulutuksen siirto onnistuu, mutta siirtämiselle on kustannus. Tällöin on vertailtava, onko spot-hinnasta saatava säästö kulutuksen siirron arvoinen. Kolmantena on prosesseja, joiden siirto toiseen ajankohtaan on täysin mahdotonta ”perinteisin”, poiskytkennän ja tehonrajoituksen menetelmin.

Energiavarastolla toteutetussa kuormansiirrosta (eng. *load shifting*) kysyntäjousto voidaan toteuttaa siirtämällä näennäisesti kulutusajankohtaa halvemmille tunneille; lataamalla akkua halpojen markkinahintojen aikaan ja purkamalla akkuja silloin kun energia on kallista. Tällöin täytyy kuitenkin huomioida energian varastointiin liittyvät kustannukset, joiden määrittämistä käsitellään kappaleesta 4 alkaen. Suuren kulutuksen omaavissa kohteissa voidaan akkuenergiavarastolla hypoteettisesti saavuttaa suuriakin säästöjä, koska markkinahintojen muutoksiin voidaan reagoida suurella tehokapasiteetilla. Maksimaalinen hyöty saadaan, kun käytössä on paljon varastointikapasiteettia ja suuri pohjakulutus, joka mahdollistaa nopean reagoinnin sähkömarkkinoilla, sekä akkuja ladataksi että purkaessa. Akkuenergiavarastot mahdollistavat näin energian ostohetken siirron edullisemmille tunneille, tai verkon kannalta pienemmän kuormituksen ajalle.

### **2.1.2 Omakäytön maksimointi**

Energiavarastolla toteutettu kuormansiirto mahdollistaa myös uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinkopaneelien moniulotteisemmän hyödyntämisen. Kiinteistöissä aurinkovoimalan taloudellisessa mitoituksessa on keskeistä omakäyttöosuuden maksimointi. Tämä perustuu siihen, että ylituotanto joudutaan myymään spot-hintaisena ulos; yleensä reilusti pienempään hintaan kuin ostettu sähkö olisi samalla hetkellä (sis. energia ja verkkopalvelumaksun sekä verot). Koskela et al., 2019 mukaan tällainen mitoitusyhtiö, jossa lasketaan optimaalinen tuotto sijoitetun alkupääoman ja tuottoennusteen suhteesta sisäisen korkokannan menetelmällä (IRR), johtaa usein aurinkopaneelijärjestelmän pieneen kokoon kattopinta-alaan nähden. He tutkivat lisäksi muun muassa energiavaraston ja tuotteen vaikutusta aurinkovoimalan tuottoon ja saivat selville, että energiavarasto voi merkittävästi parantaa aurinkovoimalainvestoinnin taloudellista kannattavuutta (Koskela, et al., 2019).

Käytännössä siis energiaa varastoitaisiin silloin kun tuotanto ylittää oman kulutuksen ja puretaan myöhemmin omaan käyttöön, jolloin verojen ja verkkopalvelumaksun välttäminen on suurin kannustin energiavarastohankintaan. Tällöin ansainnan lähtökohtana on saavutettu säästö, joka perustuu tuotantokapasiteetin lisäämiseen ja omakäyttöosuuden kasvattamiseen. Jos kiinteistöön lisätään energiavarasto, omakäyttöaste ei välttämättä aseta optimaalisen kannattavuuden ylärajaa energian tuotannolle ja koko kattopinta-ala voidaan hyödyntää aurinkoenergian keräämiseen. Lisäksi varastointi mahdollistaa aurinkoisen päivän ylimääräisen energian käytön pilvisenä päivänä, lisäten energiaomavaraisuutta ja vähentäen energian ostotarvetta. Viimevuosina paneelien hinnat ovat laskeutuneet merkittävästi muihin kiinteisiin kustannuksiin nähden, joten saavutettu skaalattu €/kWp voi olla merkittävä (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, 2023; Koskela, et al., 2019).

Energiankäytön optimointi sekä energiaomavaraisuuden lisääminen ovat yleisesti erilaisten investointitukien ehtoja. Energiaremonttien ja aurinkopaneeli hankintojen yhteydessä on järkevää harkita myös energiavarastohankintaa, vaikka itse energiavaraston pääasiallinen ansainta tulisikin esimerkiksi reservimarkkinoilta. Tuet saattavat nimittäin pitää sisällään energiavarastolle varatun osuuden kokonaisinvestoinnista, tai olla tulkittavissa jopa rahoituksen ehdoksi; "etusijalla ovat investointihankkeet, joilla edistetään uutta teknologiaa ja sen kaupallistamista ja sähköjärjestelmän säätökykyä". Tällainen tukiosuus on kirjoitushetkellä esimerkiksi Energiatuessa (Business Finland, 2024 ; TEM, 2024).

### 2.1.3 Kulutushuippujen tasaus

Kulutushuippujen tasaus (eng. *peak shaving*) ansaintamekanismina liittyy verkkopalvelumaksun pienentämiseen. Verkkopalvelumaksu koostuu yleisesti perusmaksusta sekä pätötehomaksusta. Näistä voidaan energiavarastolla vaikuttaa pätötehomaksun suuruuteen, joka määräytyy huipputehon tarpeen mukaan; esimerkiksi kuukausittain. Tampereen Energialla huipputehoperusteista pätötehomaksua maksetaan 20 kV keskijänniteverkkoon liitetyn asiakkaan osalta seuraavan taulukon 1 mukaan;

TAULUKKO 1. Verkkopalveluhinnasto 01.07.2023 (Tampereen Energia, 2023. muokattu).

#### KESKIJÄNNITE-TEHOSIIRTO 1

on tarkoitettu asiakkaille, jotka ovat liittyneet 20 kV keskijännitejakeluverkkoon ja joiden **vuotuinen sähkönkäyttö alle 10 000 MWh**. Keskijänniteverkkoon liittyminen edellyttää, että asiakkaalla on oma muuntamo.

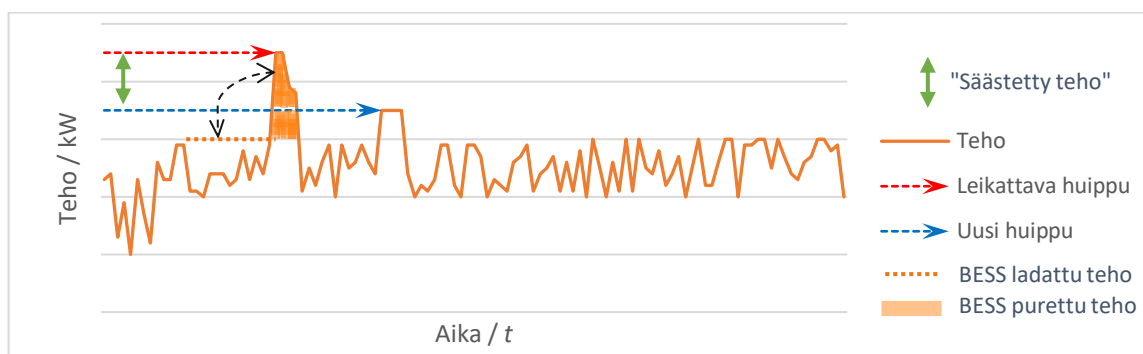
		alv 0%	alv 24%
Perusmaksu	(€/kk)	180,52	223,84
Pätötehomaksu	(€/kW/kk)	1,55	1,92
Loistehomaksu	(€/kVAr/kk)	1,25	1,55
Päiväenergiamaksu	(snt/kWh)	1,3000	1,6120
Yöenergiamaksu	(snt/kWh)	0,8100	1,0044
Sähkövero, luokka 1	(snt/kWh)	2,2530	2,79372

#### KESKIJÄNNITE-TEHOSIIRTO 2

on tarkoitettu asiakkaille, jotka ovat liittyneet 20 kV keskijännitejakeluverkkoon ja joiden **vuotuinen sähkönkäyttö yli 10 000 MWh**. Keskijänniteverkkoon liittyminen edellyttää, että asiakkaalla on oma muuntamo.

		alv 0%	alv 24%
Perusmaksu	(€/kk)	1900,00	2356,00
Pätötehomaksu	(€/kW/kk)	2,90	3,60
Loistehomaksu	(€/kVAr/kk)	1,25	1,55
Päiväenergiamaksu	(snt/kWh)	0,6100	0,7564
Yöenergiamaksu	(snt/kWh)	0,4100	0,5084
Sähkövero, luokka 1	(snt/kWh)	2,2530	2,79372

Jos oletetaan, että pätötehomaksun määrittää kuukauden laskutusjaksolla yksittäinen ja lyhytkestoinen huipputeho, tehohuippu voidaan leikata purkamalla tarvittava teho energiavarastosta. Tällöin euromääräinen säästö määräytyy seuraavalla sivulla kuviossa 2 esitetyllä tavalla. Säästö (€/kk) on suoraan säästetty teho kerrottuna pätötehomaksulla. Taulukon 1 esimerkissä ”pätötehomaksu määräytyy liukuvan 12 kuukauden aikana mitatun kahden suurimman kuukausittaisen tuntitehon keskiarvona”. Koko vuoden verkkopalvelumaksua voidaan siis pienentää, leikkaamalla kahta suurinta tehohuippua (Tampereen Energia, 2023). Hinta on alueriippuvainen ja määräytyy vielä kirjoitushetkellä jakeluverkonhaltija (DSO)-kohtaisen hinnoittelumallin mukaan, tyyppikuluttajittain. Lummi et al. mukaan siirtotariffeja tullaan kuitenkin tulevaisuudessa harmonisoimaan myös Suomessa (Lummi, et al., 2023; Energiavirasto, n.d.-b).



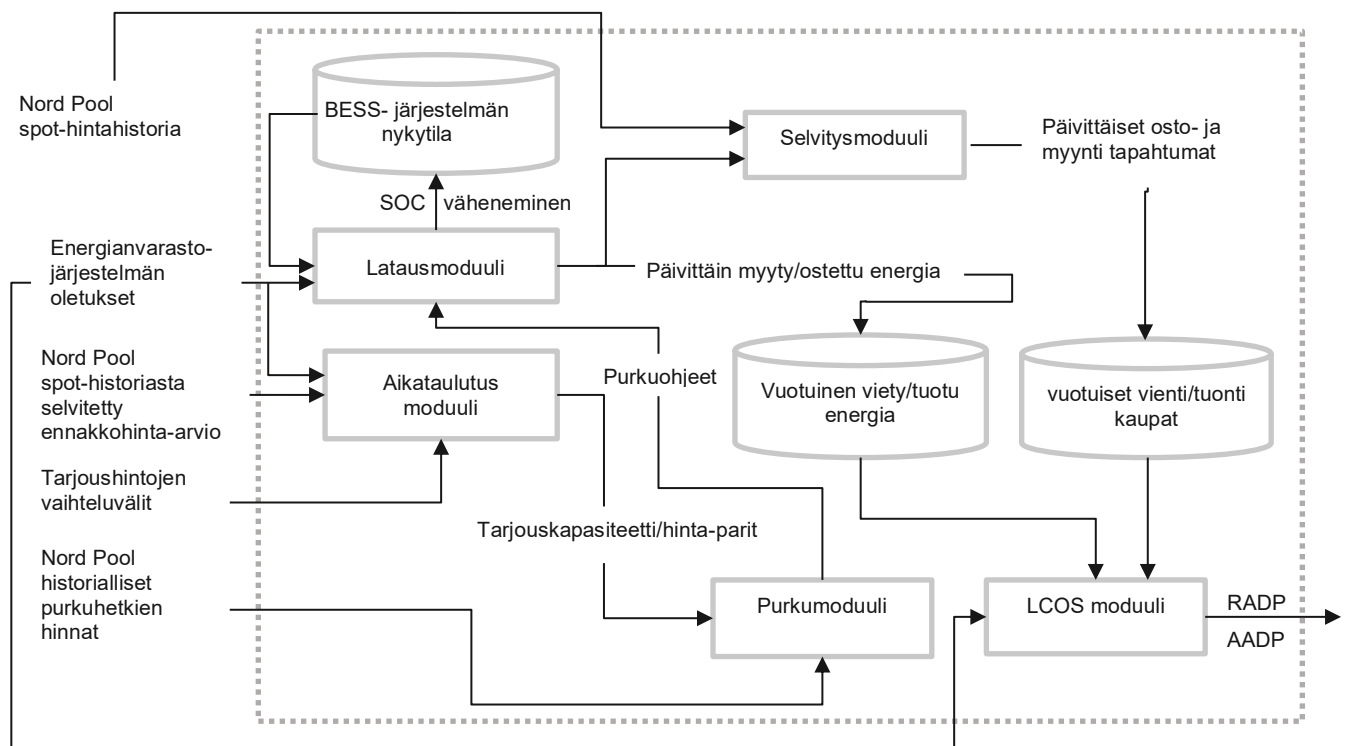
KUVIO 2. Kuvitteellinen kuukauden tehoprofiili verkon näkökulmasta.

Jos tällaisia päätötehomaksun määrittäviä huippupiikkejä halutaan leikata edelleen pienemmän huipputehon saavuttamiseksi, tulee laskennassa kuitenkin huomioida akulle ominaisen tehonsyöttökyvyn (kW) ja energian varastointikapasiteetin (kWh) lisäksi BESS-järjestelmälle ominaiset latautumis- ja purkuajat, joita rajoittaa järjestelmän sallima maksimi virta.

#### 2.1.4 Energia-arbitraasi

Energia-arbitraasin toimintaperiaate on ostaa energiaa yhdeltä markkinapaikalta ja myydä sitä toiselle. Luvussa 2.1.1 esitetty kiinteistön sisäinen kysyntäjousto voidaan nähdä kiinteistön sisäisenä energia-arbitraasina, jossa hyödynnetään ajallisesti eri markkinaa. Laajemmin ajateltuna arbitraasin ansainta syntyy kuitenkin fyysisesti eri markkinapaikkojen hintaeron hyödyntämisestä. Energia ladataan esimerkiksi aurinkovoimalasta tai ostetaan edullisesti hankintapalveluna tai kiinteähintaisella sähkösopimuksella, ja myydään sitten ulos pörssimarkkinoiden kalliille spot-tunneille. Mitä enemmän sähkömarkkinahinnat heilahtelevat, sitä tuotavampi on arbitraasi-sovellus. On kuitenkin huomioitava, ettei sähköenergian osto- ja myyntihinnan rakenne vastaa toisiaan, sillä sähköenergian ostaja maksaa verot ja siirtomaksun. Tämä tarkoittaa karkeasti ottaen sitä, että senhetkiseen nollatuottoon pääsemiseen energian myyntihinnan tulee olla ostohinnan, verojen ja siirtopalvelumaksujen summan suuruinen. Lisäksi kannattavuuden osalta on jälleen huomioitava myös mahdolliset häviöt ja varastoinnin kustannukset (Enico, n.d. ; Edina, n.d.).

Energiaa varastoidessa täytyy myös jatkuvasti huomioida akun purkaussyvyys (DoD) ja varaustaso (SoC), myynti- ja ostoajankohtien ajoituksessa. SoC ja DoD käsitellään lyhyesti kappaleessa 2.2. Osto- ja myyntiajankohtien optimointi suhteessa akun varaustasoon voidaan toteuttaa ohjelmoimalla esimerkiksi pörsisähkönsuranta osaksi akunhallintajärjestelmää (*eng. Battery Management System, BMS*) ja asettamalla sille tuottoisat raja-arvot osto- ja myyntihetkille. Tämän logiikan ohjelmointi voi tapahtua myös esimerkiksi kiinteistön rakennusautomaatiojärjestelmän kautta. Tällaisia erilaisia lohkokaavioita ja matemaattisia malleja on esitetty laajasti akkuja käsittelevässä kirjallisuudessa. On jopa esitetty tekoälypohjaisia ja oppivia malleja, jotka ennakoivat optimaalisen myynti- ja osto hetken perustuen kuormitushistoriaan, spot-markkinahintoihin tai esimerkiksi ulkoilman lämpötilaan ja tuulisuus ennusteisiin. Seuraava kuvio 3 on yksi esimerkki energia-arbitraasin lohkokaaviosta (Wu, et al., 2024 ; Weber & Lu, 2023).



KUVIO 3. Arbitraasimallin lohkokaavio, jossa esitetty vaadittu keskimääräinen purkuhinta (RADP - *Required Average Discharge Price*) ja saatavilla oleva keskimääräinen purkuhinta (AADP - *Available Average Discharge Price*) (Weber & Lu, 2023, muokattu).

Lohkokaavio esittää miten ja missä järjestyksessä logiikkamoduulien, lohkojen, keräämä tieto ja tiedon käsittely vaikuttaa latauksen ja purun taloudellisen ajoituksen prosessissa. Tuleva kannattavaksi tulkittu purku- tai lataushetki ohjaa energiavaraston akkujen ajoa, ottaen huomioon järjestelmän nykytilan. Selvitysmoduuli arvioi osto ja myyntitapahtumat ja LCOS lohko tekee jälkiselvityksen vuotuisen kauppahetkien muodostamien RADP ja AADP-hintojen suhteella.

### 2.1.5 Reservimarkkinat

Reservimarkkinoille osallistuminen on selkein ja varmin tapa saada jatkuvaa tuottoa investoinnille (Puolakka, 2024). Ansainta perustuu akkukapasiteetin vuokraamiseen kantaverkon taajuutta tasapainottaville reservimarkkinoille. Mahdollista vuosituottoa voidaan Fingrid:n mukaan karkeasti arvioida seuraavalla laskenta-periaatteella, jossa oletuksena on, että kaikki jätetyt tarjoukset tulevat hyväksytyksi (Fingrid, n.d.-b);

$$\text{Vuosituotto (€)} = \text{Kapasiteetti (MW)} \cdot \text{KA.hinta (€/MW, h)} \cdot \text{Pysyvyys (h)}$$

Reservimarkkinoille osallistuminen edellyttää hyväksytyn säätötarjouksen. Tämän työn kirjoitushetkellä säätötarjouksen tekemisen vähimmäisehtona pidetään vähintään 1 MW tehokapasiteettia ja tunnin pysyvyyttä. Fingrid:n reservimarkkinoita koskevalla sivulla listataan seuraavat esimerkit FCR (*Frequency Containment Reserve*)-markkinoiden ansaintamalleista, käyttäen laskennassa volyymipainotettua keskihintaa;

#### FCR-N

*" 1 MW taajuusohjattua käyttöreserviä vuosimarkkinoilla, oletuksena vuoden 2020 vuosimarkkinahinta ja 7000 h pysyvyys. 1 MW × 13,2 €/MW, h × 7 000 h = 92 400 € / vuosi*

*1 MW taajuusohjattua käyttöreserviä tuntimarkkinoilla, oletuksena vuoden 2019 volyymipainotettu keskihinta ja 4 000 h tunnin pysyvyys: 1 MW × 31,4 €/MW, h × 4 000 h = 125 600 € / vuosi"*

#### FCR-D

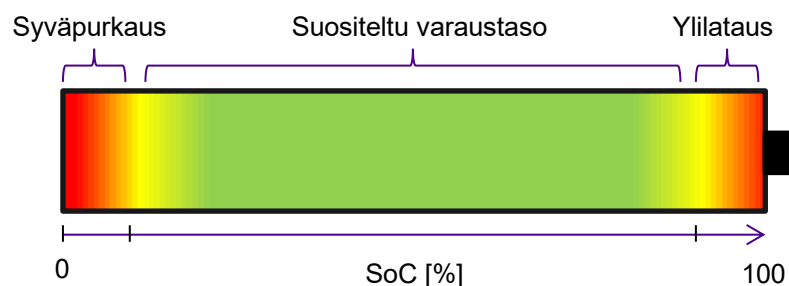
*"1 MW taajuusohjattua häiriöreserviä vuosimarkkinoilla, oletuksena vuoden 2020 vuosimarkkinahinta ja 7000 h pysyvyys: 1 MW × 1,9 €/MW, h × 7 000 h = 13 300 € / vuosi*

*1 MW taajuusohjattua häiriöreserviä tuntimarkkinoilla, oletuksena vuoden 2019 volyymipainotettu keskihinta ja 1 000 h pysyvyys.: 1 MW × 16,1 €/MW, h × 1 000 h = 16 100 € / vuosi ."*

Saman reservitoimittajan reserviresursseja voidaan myös aggregoida siten, että yhdistetyt resurssit kokonaisuutena, eli niin sanottuna reservikohteena, täyttävät reservimarkkinapaikan tekniset vaatimukset. Tällaista keskitettyä toimijaa kutsutaan aggregaattoriksi. Aggregaattori voi hallinnoida esimerkiksi useamman eri kiinteistön akustoja, yhdistäen niiden joustokapasiteetit yhdeksi tarjoukseksi reservimarkkinoilla (Fingrid, n.d.-b).

## 2.2 BESS-järjestelmän tekniset ominaisuudet

BESS-järjestelmästä puhuessa tarkoitetaan yleisesti koko energiavarasto kokonaisuutta, joka sisältää akkukennojen ja tehoelektronikan lisäksi muun muassa akunhallintajärjestelmän. Akunhallintajärjestelmä taas saattaa sisältää erilaisia akkutoimittajakohtaisia ominaisuuksia, jotka voivat olla hyvinkin hienostuneita. Silti BESS-ratkaisuja vertaillaan ensisijaisesti akustojen ominaisuuksien perusteella. Akustojen vertailussa energia- ja tehokapasiteettien lisäksi yksi oleellisimmista parametreista on akun elinkaari, joka Kim & Shin 2023 mukaan määräytyy pitkälti tietyllä purkaussyvyydellä (*Depth of Discharge*, DoD) tehtyjen lataus/purku-sykliden määrästä. Purkaussyvyyttä voidaan kuvata akkukemialle ominaisen, optimaalisen varaustason (*State of Charge*, SoC) avulla, jota havainnollistetaan kuviossa 4. Litiumioniakut on tyypillisesti suunniteltu kestävämpään, kun SoC-taso pidetään maltillisella välillä 20–80 % (Kim & Shin, 2023).



KUVIO 4. Litiumioniakkujen suositeltu varaustaso, SoC (Kim & Shin 2023, muokattu).

BESS-järjestelmän kokoa ja soveltuvuutta käyttötarkoitukseen täytyy siis suhteuttaa suositeltuun varaustasoon. Valmistajat suosittelvat käyttämään tiettyä SoC-aluetta ja lataamaan akkua vähän kerrallaan ja usein, sen sijaan että lataisi akun täysin tyhjästä tai pitäisi sitä korkeassa SoC-tasossa (Kim & Shin, 2023). Toinen elinkaaren kannalta merkittävä tekijä on käyttöolosuhteet ja lämpötila, joka osaltaan rajaa muun muassa BESS-järjestelmän sijoittelumahdollisuuksia. Sijoittelussa tulisi huomioida myös paloturvallisuus ja tuulettuvuus sekä ilkkivalta välttyminen. Tämä voi rajata sijoittelumahdollisuuksia; kauppakeskuksissa esimerkiksi parkkihalleihin, jossa mahdollista akkupaloa voidaan hallita (Pänkäläinen, 2022).

## 2.3 Markkinakatsaus

Suomessa liikekiinteistöihin sijoitettuja akkuenergiavarastoja on jo otettu käyttöön muun muassa Siemensin toimesta Espoon kauppakeskus Selloon ja Aurora pyramideille Kittilän Leville, Schneider Electric toimesta Espoon kaupunkikeskus Lippulaivaan, Swecon toimesta muun muassa Lidl Järvenpään jakelukeskukseen (Leppänen & Järventausta, 2023).

Akkuenergiavarastojen toimittajina toimii Suomessa muun muassa Cactos, Celltech, Eaton, Enico, Exiden ja Merus Power. Yhteisinä nimittäjinä mainittakoon, että markkinoilla käytetty akkuteknologia on kirjoitus hetkellä pääsääntöisesti litiumioniakkukemiaan pohjautuvaa, eikä BESS-järjestelmiä vertaillessa ole siten mielekäästä tutkia kannattavuutta eri akkukemioiden välillä. Litiumioniakut ovat eniten käytetty ja yleisin akkutyyppi energiavarastoissa, niiden energiatehokkuuden, pitkän elinkaaren ja korkean teho- ja energiatiheyden vuoksi.

Akkutoimittajista ainakin Enico:lla ja Cactos:lla on kappaleessa 2.1.5 kuvattu suora aggregointi portaali Fingrid:n reservimarkkinoille. Tällöin myös pienemmillä energiavarastoilla voidaan osallistua reservimarkkinoille kollektiivisesti riittävällä kapasiteetilla, tai omaa kapasiteettia ei välttämättä tarvitse varata kokonaisuudessaan reservimarkkinakäyttöön.

Energiavarastot pääsääntöisesti ostetaan, mutta osa toimittajista tarjoaa myös erilaisia leasingsopimusmalleja, jossa energiavarasto vuokrataan esimerkiksi kiinteään kuukausihintaan. Leasingsopimuksen myötä tyypillisen suuri alkuihinto ja käyttöön liittyvät korjaus- ja ylläpitokustannukset sisältyvät kuukausihintaan. Cactos:lla on erityinen toimitusmalli, jossa leasingsopimuksen kuukausihinta perustuu energiavarastolla tehtyjen tuottojen jakoon, siten että energiavaraston kuukausimaksu on sitä pienempi mitä suuremman osuuden Cactos saa energiavarastoilla tehdyistä tuotoista itselleen. Tällainen toimintamalli osaltaan vaikuttaa puoltavan energiavarastohankinnan kannattavuutta. Kannattavuuden tarkastelussa tulisi kuitenkin pyrkiä myös osoittamaan se numeerisesti laskeamalla.

### 3 INVESTOINTILASKENTA JA KESKEISET KÄSITTEET

#### 3.1 Korkokanta, WACC

Korkokanta  $i$  perustuu painotettuun keskimääräiseen pääomakustannukseen (eng. *Weighted Average Cost of Capital*, WACC). Painotetun pääomakustannuksen tarkoitus on määrittää rahan arvon muuttuminen ajan kuluessa arvottamalla investoidut pääomat niiden kustannuksilla seuraavan kaavan 1 mukaan (Vartiainen, et al., 2019, s. 441):

$$WACC_{nom} = [D \cdot k_D \cdot (1 - CT) + E \cdot k_E] / (D + E) \quad (1)$$

missä

$D$  on velkarahoitus

$k_D$  on velkarahoituksen korkokanta

$CT$  on yhteisövero

$E$  on oman pääoman osuus

$k_E$  on oman pääoman korko

Myöhemmin työssä ja laskentatyökalussa käytetään alla esitettyä johdettua versiota edellä kuvatusta kaavasta, jossa oman pääoman suhde koko pääomaan sekä vieraan pääoman suhde koko pääomaan ilmaistaan suoraan prosentteina, valuutan sijasta. Lisäksi kaavan termit on pyritty nimeämään mahdollisimman yksiselitteisesti;

$$i = WACC = C_E \cdot E + C_D \cdot D \cdot (1 - T) \quad (1.1)$$

missä

$C_E$  on oman pääoman kustannus [%]

$E$  on oman pääoman (sis. tukien) osuus koko investoidusta pääomasta [%]

$C_D$  vieraan pääoman kustannus [%]

$D$  on vieraan pääoman (velan) osuus koko investoidusta pääomasta [%]

$T$  on veroaste (yleisesti yhteisövero) [%]

Edellä kuvatussa WACC-yhtälössä ainut ei intuitiivinen käsite on oman pääoman kustannus, tai Vartiainen et al. 2019 nimittämä oman pääoman korko ”interest of equity financing”. Oman pääoman korkokantaa, tai toisinsanottuna tuottokustannusta (eng. *Cost of Equity*)  $C_E$  voidaan arvioida CAPM (eng. *Capital Asset Pricing Model*) -laskentamallin avulla (Bloomenthal, 2023);

$$CAPM = RFR + \beta \cdot (MR - RFR) \quad (2)$$

missä

**RFR** on oman pääoman riskitön osuus [%]

**$\beta$**  on markkinan volatiliteetin huomioiva poikkeutus kerroin

**MR** on oman pääoman tuotto [%]

Kaavassa esitetty volatiliteetti on tilastollinen indikaattori, jota käytetään kuvaamaan arvon tai tuoton vaihtelua tietyllä ajanjaksolla. Korkea volatiliteetti viittaa suurempaan hintojen vaihteluun, kun taas matala volatiliteetti viittaa vakaampiin hintoihin (Pankkiasiat.fi, 2024).

$\beta = 1$ : Sijoituksen hinta odotetaan liikkuvan markkinoiden mukana.

$\beta > 1$ : Sijoitus on volatiilimpi kuin markkinat kokonaisuudessaan.

$\beta < 1$ : Sijoitus on vähemmän volatiili kuin markkinat.

Jos  $\beta$  on esimerkiksi 1,2, odotetaan sijoituksen arvon heilahtelevan 20 % enemmän kuin markkinat. Toisin sanoen, jos markkina arvo kasvaa 10 %, sijoitus saattaa nousta 12 % (ja päinvastoin, jos markkinat laskevat). Yhteenvetona voidaan todeta, että silloin kun volatiliteetti on korkeampi, oman pääoman tuotto-odotus kasvaa vastaamaan kohonnuttua riskiä.

*”Jos yrityksellä ei ole pörssinoteerausta niin beta-kerroin pitäisi laskea tilinpäätösaineiston avulla. Siinä pitäisi arvioida yrityksen riskejä sen toimialan, operatiivisen velkaantumisen ja pääomarakenteen kautta ja täten selvittää sen riskialttiutta suhteessa muihin yrityksiin. Noteeratuilta yrityksiltä beta löytyy esim. investingin nettisivuilta.”* –Kolehmainen, 2024

### 3.2 Annuiteettimenetelmä

Annuiteettimenetelmä on talouslaskennan menetelmä, jota käytetään investoinnin kustannusten ja tuottojen vertailuun ajan kuluessa. Sen perusajatus on muuttaa investoinnin kokonaiskustannukset vuotuisiksi kustannuksiksi, eli annuiteeteiksi. Annuiteettimenetelmän tarkkuus riippuu monista oletuksista, kuten laskentakorosta ja investoinnin elinkaaren pituudesta. Elovaara & Haarla 2011 mukaan ”Vuosikuluja eli annuiteettia kannattaa käyttää arviointikriteerinä, kun verrataan toisiinsa eri investointivaihtoehtoja” ja ”Kustannusvertailussa eri ajankohtina maksetut kulut ja saadut tuotot täytyy siirtää yhteismitallisiksi haluttuun tarkasteluhetkeen korkotekijän avulla”. Korkotekijällä kertomalla voidaan laskea korkoa korolle-periaatteella esimerkiksi pankkitalletuksia (Elovaara & Haarla, 2011, s. 404-411).

$$\text{Korkotekijä} = (1 - i)^t \quad (3)$$

Missä:

- $i$  on korkokanta
- $t$  on aika (yleensä vuosissa)

Investointilaskennassa on kuitenkin yleisesti helpompi arvioida elinkaarikustannuksia nykyhetkellä, jolloin arvioidut elinkaarikustannukset voidaan jakaa tasaisesti investointiajalle vuosina, eli annuiteeteiksi. Tällöin laskenta tapahtuu käänteisen korkoa korolle -ajattelun mukaan niin sanottuna netto nykyarvoistamisena.

### 3.3 Nettonykyarvonmenetelmä

Nettonykyarvonmenetelmä on annuiteettimenetelmän käänteistoimenpide, jossa tulevaa investointia pyritään arvioimaan alkuhetken kannalta. Nettonykyarvonmenetelmässä käytetty diskonttotekijä on korkotekijän käänteisarvo, jonka avulla on mahdollista laskea tietyn ajanjakson aikana kertyneen rahamäärän arvo menneisyydessä. Kaavassa 4 esitettyä diskonttotekijää käytetään nettonykyarvon laskennassa (eng. *Net Present Value, NPV*). Nettonykyarvo-ajattelu perustuu siihen oletukseen, että euro tänään on arvokkaampi, kuin euro ensi vuonna. Investoinnin kannattavuutta laskiessa tulisi siis huomioida rahanarvon aikasidonnaisuus (kaavan 5 mukaan), ei vain inflaation vaan myös lainan kustannusten ja oman pääoman tuotto-prosentin huomioimiseksi (Elovaara & Haarla, 2011).

$$\text{Diskonttotekijä} = \frac{1}{(1 - i)^t} \quad (4)$$

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{\epsilon_t}{(1 - i)^t} \quad (5)$$

Jos laskentakorko  $i$  on määritelty tarkasti, nettonykyarvolla voidaan arvioida myös investoinnin kannattavuutta. Investoinnin kannattavuutta arvioidessa kaikki tulot ja menot lasketaan yhteen niiden maksatusajankohtana ja nykyarvoistetaan alkuhetkeen. Tällöin hankintameno oletetaan yleensä tapahtuvan kertamaksuna nollantena vuonna, ja hankintameno vähennetään sellaisenaan nykyarvoistettujen tulo- ja menoannuiteettien summasta. Pääperiaate kannattavuudelle on, että jos nettonykyarvo on nolla, niin investointi kannattaa tehdä. Tällöin voitetaan rahan aika-arvossa; euro tänään on enemmän kuin euro ensi vuonna. Korkokanta voidaan myös laskea NPV:n yhtälöstä (yhtälö 5), antamalla nykyarvon arvoksi nolla, ja ratkaisemalla yhtälö korkokannan  $i$ :n suhteen. Tätä kutsutaan sisäiseksi korkokannaksi (eng. *Internal Rate of Return, IRR*) (Sorvisto, 2020).

Toisaalta investointeja voidaan myös arvottaa keskenään nettonykyarvoa hyödyntäen. Tilanteessa, jossa investointikohteita on useita ja rajallisen pääoman puitteissa pitäisi valita sijoituskohteista paras, tulisi hanke valita suuremman nykyarvon perusteella, kuten Sorvisto 2020 esittää (Tenhunen, 2013).

### 3.4 Kustannustekijät

Kustannustekijät jaetaan tavallisesti kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin. Yleisesti talousmatematiikassa kiinteä kustannus tarkoittaa maksua, joka pysyy vakiona tarkastelun kannalta pitkällä aikavälillä, riippumatta tuotannon tai myynnin määrästä. Muuttuvilla kustannuksilla taas tarkoitetaan kustannuksia, jotka vaihtelevat suoraan tuotannon tai myyntimäärän mukaan.

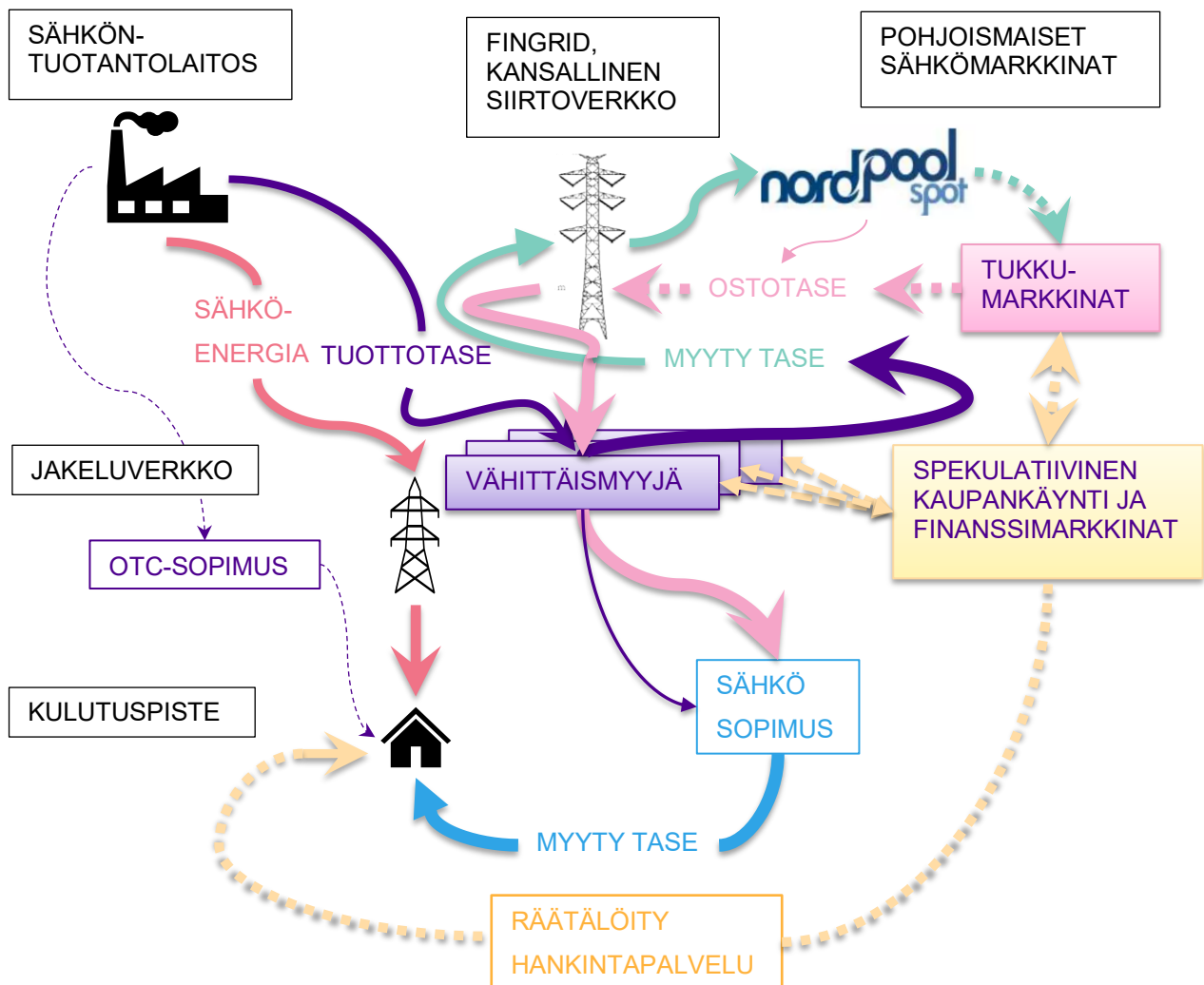
#### 3.4.1 Kiinteät kustannukset (CAPEX)

Kansainvälisessä kirjallisuudessa kiinteitä kustannuksia nimitetään yleisesti ”*Capital Expenditures*” eli lyhennettynä CAPEX. Esimerkkinä kiinteästä kustannuksesta voidaan pitää laitteistojen hankintakustannuksia. Energiavaraston hankintakustannus on yleensä suurin yksittäinen kustannus koko hankkeessa, vaikka energiavarastojen yksikköhinnat tulevat vuosi vuodelta alemmas. Litium-ioni energiavaraston hankintahinta on Cristea, et al. 2022 mukaan eri kirjallisuuslähteistä koottuna noin 568,89 €/kWh, kun keskiarvo lasketaan hintajoukon kvartiiliväliltä (eng. *Interquartile range*, IQR), hintojen vaihdellessa 233,35–2397,68 €/kWh. Tämä tarkoittaa, että 1 MWh kokoinen energiavarasto maksaisi kirjoitushetkellä keskimäärin noin 600 000 € (Cristea, et al., 2022).

#### 3.4.2 Muuttuvat kustannukset (OPEX)

Kansainvälisessä kirjallisuudessa muuttuvia kustannuksia nimitetään yleisesti ”*Operational Expenditures*” eli lyhennettynä OPEX. Esimerkkinä muuttuvista kustannuksista voidaan pitää raaka-aineita kuten energiavarastoon ladattua sähköenergiaa, joka muodostuu elinkaarilaskennassa yleensä toiseksi suurimmaksi yksilöidyksi kuluksi suuren volyymin vuoksi. Ostosähkön hinta on itsessään moniulotteinen, pitäen sisällään energiamaksun, verkkopalvelumaksun sekä sen yhteydessä maksettavan sähkö- ja arvonlisäveron.

**Energiamaksu** on edellä mainituista kaikkein moniulotteisin, varsinkin kun tarkastellaan suuren kulutuksen omaavia kiinteistöjä. Sähköenergiasta käydään kauppaa useilla eri markkinapaikoilla ja vaikka sähköenergia kulkee teknisesti *Kirchhoffin* lakeja mukailleen, lyhintä reittiä tuotantolaitokselta kulutuspiisteeseen, kaupallisessa mielessä sähköenergia saattaa kuitenkin ”kiertää” pitkänkin ketjun ennen lopullisen hinnan muodostumista (Järventausta, 2023). Seuraavassa kuviossa 5 pyritään hahmottamaan sähkömarkkinoiden toiminta pääpiirteissään. Punainen nuoli kuvaa teknistä siirtoa ja muilla väreillä pyritään hahmottelemaan kaupallisen siirron vaiheita ja osapuolia, jotka kuvataan tarkemmin seuraavilla sivuilla. Keskeisin havainto on se, että vaikka sähköyhtiö itse tuottaisikin kokonaisuudessaan sähkönsopimuksessa luvattun sähköä, se strategisesti myy suuren osan tästä tuotetusta sähköstä eteenpäin ja ostaa sen takaisin tukku- ja finanssimarkkinoilta. Tämän seurauksena kuluttajan ostamasta sähköstä yleensä yli puolet on näennäisesti muualla tuotettua (Järventausta, 2023; Kuokka, 2022).



KUVIO 5. Sähköjärjestelmän tekninen ja kaupallinen rakenne, perustuen prof. Järventausta 2023 luento- ja tässä luvussa käsiteltäviin aiheisiin.

Suomessa sähköenergian hinta määräytyy yleisesti pohjoismaisessa sähköpörssissä, Nord Poolissa, jossa hinnat lasketaan yhtenäisen laskenta-algoritmin perusteella. Tämä algoritmi ottaa huomioon kaikki sähköpörssissä tehdyt osto- ja myyntitarjoukset ja määrittää niiden perusteella sähkön hinnan. Sähkön pörssimarkkinat jaetaan kahteen yläkategoriaan; vuorokausimarkkinoihin (*Day-ahead trading*) ja päivänsäisiin markkinoihin (*Intraday trading*). Vuorokausimarkkinoiden sähkön hinnasta käytetään myös termiä pörssisähkön hinta. Teoriassa, ilman siirtoverkon kapasiteetin rajoituksia, laskenta-algoritmi tuottaa yhden ja saman hinnan yhteiseurooppalaiselle markkina-alueelle. Käytännössä kuitenkin siirtorajoitusten vuoksi sähköenergian hinta jaetaan eri alueiden mukaan. Esimerkiksi Ruotsissa on käytössä neljä eri aluehintaa (Svenska kraftnät, n.d.), kun taas Suomessa sovelletaan koko maan kattavaa yhtä ja samaa aluehintaa (Fingrid Oyj, n.d.-c; Nord Pool, n.d.; Salonen, 2021).

Sähkön vähittäismyynnissä myyjä myy sähköä loppukäyttäjälle. Vähittäismyyjillä (*Fortum, Vattenfall, Elenia, Tampereen Energia...*) on usein omaa tuotantoa, mutta suuri osa sähköstä kierrätetään spekulatiivisesti pörssin kautta, sillä pörssihintoilu aiheuttaa taloudellisia riskejä sekä sähkön tuotannon, että myynnin näkökulmasta. Petri Hyyryläinen nostaa opinnäytetyössään 2013 sähkön markkinariskeistä juuri spot-hintojen hintariskin merkittävimäksi riskienhallinnan kannalta (Hyyryläinen, 2013). Sähköä tuottaessaan vähittäismyyjä voi haluta suojautua sähkönhintakuopilta, sillä tuotannon hetkellinen alasajo, kannattamattomien tuntien ajaksi ei ole aina edes mahdollista. Toisaalta myös sähköä ostaessaan vähittäismyyjä voi haluta suojautua pörssin ajoittain suurilta hinnoilta, koska kuluttajan kanssa solmitut sopimukset ovat usein kiinteähintaisia.

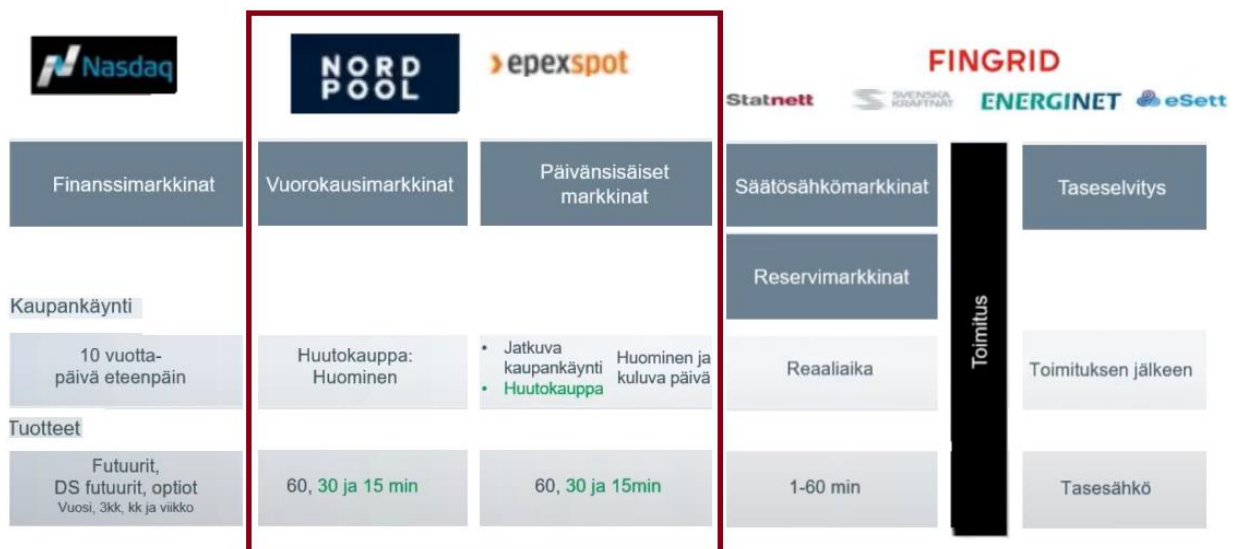
Vähittäismyyjän, toisinsanottuna sähköyhtiön hankkima ja myymä sähkö kirjataan sähkötaseeseen ja myyjä laskuttaa mittaustietojen perusteella asiakkaitaan myyntisopimusten mukaisesti. Vähittäismyyjillä on usein omaa tuotantoa, ja sähkön tuottajat ja kuluttajat voivat siten käydä myös kahdenkeskistä kauppaa, lukitsemalla kiinteän hinnan johdannaismarkkinoiden tapaan, jopa kymmeneksi vuodeksi eteenpäin (Fingrid Oyj, n.d.-a). Suurilla teollisen luokan kuluttajilla, kuten kauppakeskuksilla saattaa olla myös suoria kahdenkeskisiä sopimuksia sähköntuottajan kanssa. Tätä nimitetään yleisesti OTC (*Over-the-Counter*)-markkinaksi, joista yhtenä alaesimerkinä on PPA (*Power Purchase Agreement*)-sopimukset. PPA-sopimuksella tarkoitetaan, esimerkiksi 10–20 vuoden, pitkäaikaista kiinteää sähkönostosopimusta, joka liitetään yleensä puhtaan ja uusiutuvan energian tuotantoon (Next, 2022).

Sähköpörssissä toimivat vähittäismyyjät siis tuottavat, ostavat ja myyvät sähköä Nord Poolissa ja tarjoavat sitä sitten edelleen kuluttajille. Jos pörssimarkkinoiden tase ei täysin tasaa sähköntuotannon ja -kulutuksen suhdetta toimitushetken lähestyessä, syntyy vähittäismyyjien kesken kannattava markkinapaikka myös päivänvälisille markkinoille. Tällainen epätasapaino voi johtua esimerkiksi ennakoimattomasta kulutus päätöksestä, säästä tai vikaantuneesta siirtolinjasta tai -laitteesta (Järventausta, 2023).

Tukkumarkkinatoimijat analysoivat jatkuvasti markkinoita arvioidakseen, milloin ja miten paljon vähittäismyyntin hintoja tulisi suojata finanssimarkkinoilla, sekä mistä ja miten sähkö hankitaan kaupankäynnin ja keskinäisten tase- ja tuotantosopimusten näkökulmasta. Sähkö voidaan siis kaupallisesti toimittaa myös kokonaan finanssimarkkinoilla tehtyjen sopimusten perusteella. Finanssimarkkinat luovat edellytykset myös räätälöityihin, pitkän aikavälin sähkönhankinta- ja toimitussopimuksiin. Pelkästään tällaisilla tasesopimuksilla tehdään kohtuullista liikevaihtoa, josta esimerkkinä VENI Energy Group. ”Yhtiön liikevaihto Suomessa oli 27,2 miljoonaa ja liiketoiminnan voitto oli 18,3 miljoonaa. Tiedot perustuvat yhtiön viimeisimpään tilinpäätökseen vuodelta 2022” (Suomen Asiakastieto Oy, n.d.).

Kaiken kaikkiaan voidaan siis olettaa, että suuren tasaisen kulutuksen omaava kiinteistö tai teollisuuslaitos voi saada halpaa energiaa sähkömarkkinoilta jo pelkästään sähkön tuotantolaitoksissa tehtyjen investointien turvaamiseksi tehdyistä pitkän aikavälin sopimuksista ja toisessa ääripäässä hehtisen finanssitreidauksen tuloksena.

Energian hinnan muodostuminen tulee jatkossa vielä monimutkaistumaan, sillä pörssimarkkinat on kokemassa muutoksen lähitulevaisuudessa. Pohjoismaat siirtyvät tarjousalueiden välisessä päivänsisäisessä kaupankäynnissä 15 minuutin kaupankäyntijaksoon, vuoden 2024 toisella vuosineljänneksellä. Vuorokausimarkkinoilla siirtyminen 15 minuutin kaupankäyntijaksoon tapahtuu eurooppalaisen aikataulun mukaan vuonna 2025. (Fingrid Oyj, 2023). Alla esitetyssä Fingrid:n julkaisemassa kuviossa 6 on esitetty markkinapaikat, kaupankäynnin muoto sekä myytävät tuotteet. Kuviossa on esitettynä myös ylläkuvatut muutokset markkinoiden rakenteeseen. *Vuorokausimarkkinoilla* muutokset käsittävät 30 ja 15 min tuotteet. *Päivänsisäisillä markkinoilla* muutoksena nykytilanteeseen on huutokaupankäynti, myös päivän sisäisillä markkinoilla sekä 30 ja 15 min kauppatuotteet (Korhonen, 2022).



KUVIO 6. Sähkömarkkinoiden rakenne ja markkinapaikat (Korhonen, 2022).

**Verkkopalvelumaksu** perustuu sähkön siirrosta aiheutuviin kustannuksiin. Verkkopalvelua tarjoavien yhtiöiden markkinamonopoliaseman vuoksi verkkopalvelumaksun määräytyminen on tarkasti säänneltyä ja valvottua. Sääntely perustuu kohtuullisen voiton ehtoihin ja kohtuullinen voitto on siis voitava esittää verkkopalveluita tarjoavan yhtiön, verkonhaltijan, toimesta. Kohtuullinen voitto tarkastellaan verkonhaltija kohtaisesti. Maksu voi siten vaihdella merkittävästikin maantieteellisen sijainnin mukaan (Järventausta, 2023; Lummi, et al., 2023).

Valvonnan ansiosta verkkopalvelumaksun määräytyminen on hyvin läpinäkyvää ja tietoa on saatavilla jokaisen alueellisen jakeluverkonhaltijan osalta. Velvoitus läpinäkyvyydelle tulee suoraan Sähkömarkkinalaista (Laki 588/2013, 27 §).

Verkkopalvelumaksua voidaan tarkastella Energiaviraston sivuilta sähköenergian kulutukseen suhteutettuna jokaisen verkonhaltijan osalta tyyppikuluttajittain. Sähkön hintatilastot ulottuvat pitkälle ja ajantasainen tiedosto on helposti ladattavissa Excel-muodossa. Samalta sivustolta on ladattavissa myös sähköenergian keskihintatilastot tyyppikäyttäjittäin. Keskiarvodata rajoittuu kuitenkin kerrostalo- huoneistoihin, pientaloihin sekä maatilatalouksiin, eikä edellä kuvatun sähkömarkkinamekanismin vuoksi edelleenkaan vastaa energian hinnan arvoon keski- jänniteliittymällä liittyneen ja tehonkulutukseltaan keskiuuteen teollisuuteen verrattavan kauppakeskuskiinteistön energian ostohintaan (Energiavirasto, n.d.-b).

**Sähkö- ja arvonlisävero** maksetaan taseselvityksen yhteydessä. Sähköveroa maksetaan sähkön kulutuksen perusteella sähköveroluokan 1 mukaan (2,253 c/kWh), ellei sähköveroon ole erikseen haettu alennettua veroluokkaa 2. Alennettuun veroluokkaan pääsemiseksi täytyy kuluttajan harjoittaa käytännössä valtiontasolta tuettavaa liiketoimintaa ja rekisteröidytävä tuen saajaksi. Sähkön verotuksesta säädetään yleisesti sähköverolaissa (Laki 1260/1996 ; Verohallinto, 2022). Arvonlisävero maksetaan luonnollisesti koko sähkön hinnasta, joka pitää sisällään edellä mainitut energian, verkkopalvelun ja sähköveron.

Verohallinnosta voidaan kuitenkin anoa lupaa sähkön verottomaan varastointiin. Sähkön verottomasta varastoinnista on säädetty sähköverolain 9 § seuraavasti;

9 a § (19.12.2018/1226)

*”Verohallinto voi antaa hakemuksesta luvan toimia verottoman sähkövaraston varastonpitäjänä sekä luvan verottoman sähkövaraston pitämiseen. Luvan on oltava voimassa toiminnan alkaessa ja sen aikana. (13.11.2020/768)*

*Verottoman sähkövarastonpitäjän lupa voidaan myöntää sille, joka ansiotoiminnassaan harjoittaa sähkön varastointia kiinteässä toimipaikassa sijaitsevassa sähkövarastossa.*

*Verottoman sähkövaraston lupa myönnetään sellaista tilaa, aluetta tai koneistoa varten, joka on luvanhaltijan hallinnassa ja toimivaltaisen viranomaisen valvottavissa ja johon hakijalle on myönnetty tai myönnetään verottoman sähkövarastonpitäjän lupa.*

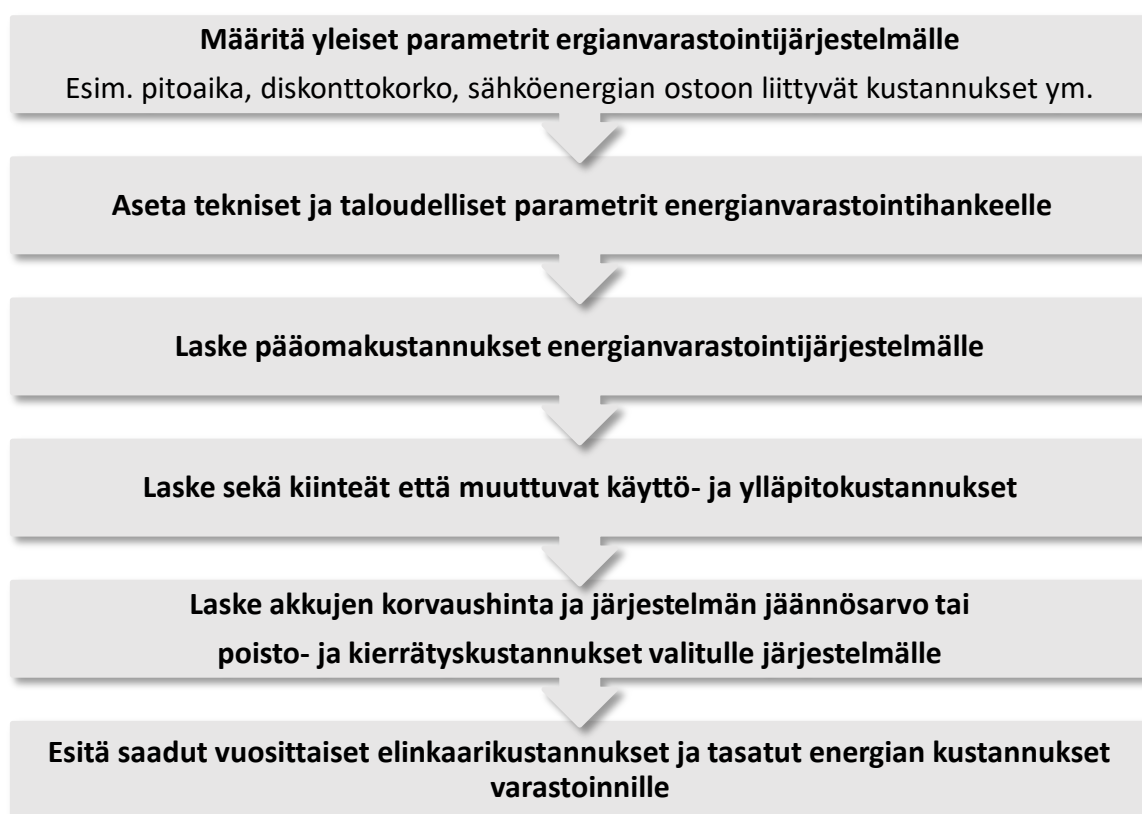
*Hakemuksessa on mainittava verovelvollisen nimi, osoite ja yhteystiedot. Sähkövarastosta on lisäksi ilmoitettava teho ja kiinteistötunnus. Hakemus on tehtävä jokaisesta sähkövarastosta erikseen. Verohallinto voi antaa tarkempia määräyksiä ilmoitettavista tiedoista verotuksen toimittamista, valvomista ja kehittämistä varten. Lisäksi sovelletaan, mitä valmisteverotuslain 26–30 §:ssä säädetään.”*

Nopealla laskuharjoituksella voidaan verottomuutta pitää merkittävänä tekijänä sähkön varastoinnin muuttuviin kuluihin, ottaen huomioon elinkaaren aikana varastoidun sähköenergian määrä. Jos ajateltaisiin esimerkiksi 1 MWh kokoista litiumioni varastoa, jonka syklejä elinkaaren aikana olisi noin 6000 kpl, saatu verottomuus etu ( $1000 \text{ kWh} \cdot 6000 \cdot 0,0253 \text{ €}$ ) on karkeasti arvioituna 150 000 €. Ansiotoiminnalle ei kuitenkaan löydetä yksiselitteistä määritelmää lain sisältä. Voidaan siis kysyä, onko kulutusjousto ansiotoimintaa kiinteistöliiketoiminnassa, vai kattaako verottomuusetu vain energian arbitraasin ja reservimarkkinatoimintaan ladatun energian. Energia-arbitraasi ja reservimarkkinoille osallistuminen ovat ansaintamalliltaan nimenomaan tuottoon, eivätkä varastoinnilla tehtyyn säästetyn ostoenergian arvoon perustuvia BESS-käyttötapoja.

Joka tapauksessa, mahdollinen ostosähkön veroton osuus on pystyttävä mittaamalla todentamaan, sillä etu koskee nimenomaan energian varastointia ”ansiotoiminnassa”.

## 4 LASKENTAMENETELMÄ

Tässä luvussa pyritään arvioimaan energian varastoinnin kustannuksia pääasiassa *Journal of Energy Storage*-lehdessä julkaistujen artikkeleiden perusteella. Lehti on ”tieteellinen julkaisu, joka keskittyy energianvarastoinnin tieteen teknologian ja tekniikan näkökohtiin”. Kesäkuussa 2020 julkaistu artikkeli tarjoaa kuviossa 7 esitetyn lähestymistavan energian varastointikustannusten selvittämiseen; elinkaarikustannusten annuiteetin ja tasattujen energiankäyttökustannusten kautta.



KUVIO 7. Ehdotus kustannusmallista energianvarastointiteknologioille (Mostafa, et al., 2020, muokattu).

Ehdotus sinällään vaikuttaa ensisilmäyksellä jopa ylivoimaiselta tehtävältä, ottaen huomioon sen, että suuri osa laskentaparametreista on toisistaan riippuvaisia. Riittävällä määrällä alustavia yksinkertaistuksia, on kuitenkin viime vuosina saatu laskettua useampia yksittäisiä tuloksia energiavaraston kannattavuudesta eri käyttötarkoituksissa, myös Suomessa tehdyissä opinnäyte- ja diplomitöissä.

#### 4.1 Painotettu energian varastointikustannus LCOS

Painotetun energian varastointikustannuksen (eng. *Levelized Cost of Storage*, LCOS) laskennassa pyritään määrittämään varastoinnin yksikkökustannus (esim. c€/kWh). Käytännössä varastoinnin yksikkökustannusta pyritään arvioimaan koko elinkaaren aikana muodostuvien kustannusten annuiteettien perusteella. Tällöin latauksen ja purkamisen taloudellinen ajoittaminen kuormansiirtoon ja energia-arbitraasiin on jokseenkin mahdollista. Jos varastoinnin hinta tunnetaan, tai se voidaan määrittää kohtuullisella tarkkuudella, sitä voidaan käyttää myös arvioidessa BESS kannattavuutta uusiutuvan energiantuotannon rinnalla.

Varastointikustannusten selvittämiseksi investoinnin kokonaiskustannukset jaetaan koko elinkaaren aikana varastoidun energian määrällä, kaavassa 6 esitetyllä tavalla (Cristea, et al., 2022). Painotuksella tarkoitetaan LCOS-laskenta-kaavassa elinkaaren aikana syntyvien kustannusten annuiteetin selvittämistä ja sen nykyarvoistamista, käyttäen yhteistä diskonttotekijää sekä akuista purettavalla energialla että käyttökustannusten kassavirralla. Energiaa voidaan tässä yhteydessä diskontata, kun sen oletetaan olevan suoraan verrannollinen varastoinnilla tehtyyn tuottoon. Tarkalla laskentakoron määrittämisellä voidaan myös arvioida eri käyttökustannusten (OPEX) suhdetta käytettyyn teknologiaan ja vuotuisten lataussykliin määrään ( $W_{out}$ ). Hoff käyttää kaavan tästä muodosta nimeä LCUS ”*Levelized Cost of Using Storage*”, joka alleviivaa edellistä johtopäätöstä energian diskontattavuudesta (Hoff, 2022, s.241-244).

$$LCOS = \frac{CAPEX_0 + \sum_{t=1}^n \frac{OM_t + C_t}{(i+1)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{W_{out}}{(i+1)^t}} \quad (6)$$

missä:

$CAPEX_0$  on BESS investointikustannus

$OM_t$  on käyttö- ja ylläpitokustannukset vuonna t

$C_t$  on lataukseen liittyvät kustannukset vuonna t

$W_{out}$  on purettu energiamäärä vuodessa

$n$  on BESS:n elinkaaren pituus vuosina

$i$  on laskentakorkokanta.

Edellä mainitut julkaisut eivät suoraan perustelleet tulevien vuosien energiankäytön diskonttausta, joka vähemmän taloustieteitä opiskelleelle tuntuu haastavalta käsittää. ChatGBT pyrki selittämään asian seuraavalla tavalla.

*”Tässä yhteydessä diskonttaamisella ei siis tarkoiteta energiamäärän fyysistä vähenemistä ajan kuluessa, vaan sen taloudellisen arvon muuttumista nykyhetken näkökulmasta katsottuna. Diskontatut energiamäärät  $W_{out}$  edustavat järjestelmästä kunkin vuoden aikana saatavaa käyttökelpoista energiaa, joka on diskontattu sen nykyarvoon”* (ChatGPT3.5, 2024).

Kirjassaan esittämässään LCOS kaavassa Hoff ei kuitenkaan diskonttaa elinkaaren aikaista energiaa, ilmeisesti siitä syystä, ettei hän jaa elinkaaren aikana tuotettua energiaa alun perinkään annuiteeteiksi. Tällöin ei tosin voitaisi arvioida elinkaarienergiaan liittyvien BESS-muuttujien herkkyyksiä annuiteettitasolla. Tästä syystä tässä työssä halutaan käyttää Cristea et al. esittämää LCOS mallia, joka on siis Hoff:n esittämän LCUS (*”Levelized Cost of Using Storage”*)-kaava, sillä poikkeamalla ettei  $W_{out}$  ole kuitenkaan tarkka aikasarja  $W_{out,t}$ , vaan arvioitu vuotuinen keskiarvo. Tämä vuotuinen keskiarvo perustuu BESS-kapasiteettiin ja keskimääräisiin käyttösykleihin vuodessa (Cristea, et al., 2022 ; Hoff, 2022). Energiamäärän  $W_{out}$ , Cristea et al., 2020 määrittävät seuraavan kaavan 7 mukaan.

$$W_{out} = E_r \cdot DoD \cdot cyc \cdot \mu \quad (7)$$

missä:

$E_r$  on BESS:n kapasiteetti [kWh]

$DoD$  on rajattu purkaussyvyys [%]

$cyc$  on syklien määrä vuonna t [kpl]

$\mu$  on hyötysuhde [%]

## 4.2 Lähtötiedot ja oletukset laskentaan

### 4.2.1 Talousparametrit

**Laskentakorkokantaan** voidaan hakea viitteellinen arvo kirjallisuudesta. Kansainvälisessä kirjallisuudessa laskentakorkokantana Mongrid et al. 2019 käyttävät 7,6 %, kun taas Mostafa et al. 2020 käyttävät 8,5 %. Korhonen, J-P 2022 on diplomityössään pyrkinyt määrittämään korkokannan WACC perusteella, ja käyttää laskelmassaan 5 % WACC-arvoa. Mitä riskialttiimpi sijoitus on, sitä suuremmaksi oman- ja vieraan pääoman kustannukset nousevat. Tämä nostaa laskentakoron määrää, ja sitä kautta vaikuttaa myös varastoinnin tasattuun käyttökustannukseen LCOS. Yritystulkki.fi -sivusto listaa tuottojen lisäämiseen perustuvaksi korkokannaksi ”markkina-aseman turvaamiseksi” tehtyihin investointeihin 6 %. Toisaalta ”kustannusten alentaminen” ja ”tuottojen lisäämiseen” pyrkivissä investoinneissa suositellaan 12–20 %. Tässä kohtaa on todettava, että korkokanta tulisi määrittää WACC:n kautta, jota määrittäessä tulisi mahdollisesti käyttää CAPM:a (BusinessOulu, n.d. ; Korhonen, J-P, 2022. s.57 ; Mongird, et al., 2019. s.5.1 ; Mostafa, et al., 2020. s.9).

**Laskentajakso** voidaan määrittää BESS elinajan mukaan. Kirjallisuudessa on esitetty litiumioniakkujen eliniäksi 7–20 vuotta (Cristea, et al., 2022. s.3). Akkujen uusiminen voi tarkoittaa koko energiavaraston kannalta alkuinvestointiin verrattavaa lisäkustannusta, jos BESS-runko ja akunhallintajärjestelmä haluttaisiin säilyttää. Voidaan kuitenkin olettaa, että elinkaaren aikana on tapahtunut sekä akkukennojen, akunhallintajärjestelmän että akun sisältämän muun tehoelektronikan osalta merkittävää teknologista kehitystä ja energiavarasto olisi hyvä päivittää kokonaisuudessaan. Akkukennojen elinikään vaikuttaa kalenteri-iän lisäksi purkaussyvyys ja lataus/purku syklien määrä sekä lämpöolosuhteet kuten tämän työn kappaleessa 2.2 todetaan. Laskentajakso määrittää myös käyttökustannusannuiteettien suuruuden, kun laskentaa varten arvioitavat kokonaiskustannukset jaetaan vuosille. Jos myös energia jaetaan vuosille Cristea et al. 2022 esittämällä tavalla, täytyy laskentajaksoa muuttaessa huomioida myös käyttösykliä vuotuinen määrä. Sykliä määrän tulisi siis kasvaa laskenta-ajan lyhentyessä. Käyttösykliä ja laskenta ajan keskinäinen riippuvuus on karkeasti elinkaaren aikaisten syklien määrä jaettuna laskenta-ajalla vuosina (Cristea, et al., 2022).

#### 4.2.2 BESS parametrit

**Kapasiteetti** määräytyy käyttötarkoituksen mukaan. Määrittäminen voidaan tehdä tarkastelemalla energiankulutusta ja tehoprofiileja, sillä sekä kapasiteetti (kWh), että järjestelmästä saatava hetkellinen teho (kW) määrittävät yhdessä BESS järjestelmän lopullisen käyttötarkoituksenmukaisen suorituskyvyn.

Esimerkiksi kysyntäjoustosovelluksessa, tämän kirjallisuustyön ohessa tarkasteltavassa kauppakeskuksessa olevan yhden pääkeskuksen tehot vaihtelevat, läpi vuoden tarkasteltuna, vuorokauden sisällä 25 kW tasaisissa kuuden tunnin sykleissä ( $25 \text{ kW} \cdot 6 \text{ h} = 150 \text{ kWh}$ ). Päivän sisäiseen kysyntäjoukseen soveltuisi mahdollisesti suurikokoinen Enico, Compact ESS (50–250 kWh, 40–200 kW) tai kahdesta Cactos One Classic yksiköstä koostuva BESS järjestelmä (100 kWh, 45 kW / yksikkö). Ottaen huomioon suositellun SOC-tason (esimerkiksi 80 %), riittäisi nämä esimerkeiksi valitut energiavarastot juuri ja juuri täyttämään nuo päivittäiset energiahuiput tämän keskuksen osalta, jolloin käyttösyklejä kertyisi kulutusjoustossa vuodessa 365. Hoff, 2022 suosittelee kirjassaan mitoittamaan energiavaraston 40 % yli alkuperäisen tarpeen, jolloin tällaiseen pienen kokoluokan varastointisovellukseen (150 kWh, 25 kW) olisi hyvä miettiä keskikokoista energiavarastoa tai suurempaa moduulaarista BESS:ia, jotta varmistetaan kapasiteetin riittävyys käytetyssä ansaintamallissa koko elinkaaren ajaksi (Hoff, 2022. s.247). Puhtaasti kirjallisuusarvioon perustuvassa laskennassa käytetään usein 1 MWh energiavarastoa yksinkertaisuuden vuoksi. Tällöin kapasiteettiin verrattu BESS:in hankintahinta ja sitä kautta laskettu LCOS:a ei voi suoraan verrata edelläkuvattuun esimerkkiin.

**Kiinteät kustannukset** ilmoitetaan kirjallisuudessa usein €/kWh arvona. Cristea et al. 2022 ovat tutkineet BESS-järjestelmän hankintahintoja, selvittäessään LCOS-kustannusta Romanian viitekehyksessä. Osaselvityksen tuloksena he havaitsivat BESS hintojen vaihtelevan 233,35–2397,68 €/kWh. Keskiarvohinnaksi he selvittivät 568,89 €/kWh, käyttäessään keskiarvon määrittämiseen hintajoukon kvartiiliväliä (*Interquartile range*, IQR) (Cristea, et al., 2022).

On kuitenkin huomioin arvoista, että akkukennojen ja BESS sisältämän muun tekniikan hintasuhde vaikuttaa hintaan; suuremman energiavaraston voi saada halvemmalla €/kWh hinnalla, koska akunhallintajärjestelmään voidaan liittää useita moduuleita, kennoja ja akkuja. Toisaalta myös akunhallintajärjestelmissä voi olla valmistajien välillä suuria eroja. Näin lopullinen hinta ja toimitettavan järjestelmän tekninen laajuus tulisi selvittää suoraan BESS-toimittajilta. Hoff 2022 mainitsee tämän lisäksi kirjassaan LCOS laskennan kannalta kiinteiksi kuluiksi laskettaviksi menoeriksi myös muun muassa paloviranomaisen tarkastukset, lupaprosessit, BESS sijoituspaikan valmistelemisen rakenteellisesti sekä muun muassa kaapelointi-, asennus- ja käyttöönotto-työn (Hoff, 2022. s. 245).

**Muuttuvat kustannukset** koostuvat käyttö ja huoltokustannuksista (*Operation and maintenance*, OM), sekä muista kustannuksista  $C_t$ . Käyttö ja huoltokustannukset Cristea et al. 2022 arvioivat laskelmissaan yksinkertaistettuna BESS-hankintahintaan perustuen. Laskennan kannalta voidaan tehdä siis valistunut arvaus käyttö ja ylläpitokustannuksien osalta, jossa vuotuiset kustannukset  $OM_t$  on 0,25 % BESS hankintahinnasta ( $OM_t \approx CAPEX_0 \cdot 0,0025$ ) (Martinez-Bolanos, et al., 2020, s. 6). Muut kustannukset  $C_t$  käsittävät muun muassa häviöiden rahallisen menetyksen, jota voidaan arvioida käyttösykleihin, kapasiteettiin ja purkaus-syvyyteen perustuvan  $W_{out}$ :n syklisellä (RTE, *Round Trip Efficiency*)-hyötysuhteella. Tällöin lataukseen liittyvät kustannukset lasketaan kaavan 8 mukaan;

$$C_t \approx C_{RTE} = W_{in_t} \cdot (1 - \eta) \cdot C_{säh} \quad (8)$$

$$C_{RTE} = cyc \cdot DoD \cdot E_r \cdot (1 - \eta) \cdot C_{säh} \quad (8.1)$$

missä:

$C_t$  on lataukseen liittyvät kustannukset vuonna t [€]

$C_{RTE}$  on syklisten "round trip"-häviöiden hinta vuodessa [€]

$W_{in_t}$  on ladattu energiamäärä vuodessa [kWh] (vrt. kaava 6 ja 7:  $W_{out_t} = W_{in_t} \cdot \eta$ )

$\eta$  on energiavaraston hyötysuhde [%]

$cyc$  on syklien määrä vuonna t [kpl]

$DoD$  on rajattu purkaussyvyys [%]

$E_r$  on BESS:n kapasiteetti [kWh]

$C_{säh}$  on sähkön sisäänostohinta (verkkopalvelu + energianhinta) vrt. kappale 3.4.2.

Jos taas halutaan tutkia tarkemmin BESS-parametrien vaikutusta varastoinnin kustannuksiin, voidaan  $C_t$ :nä käyttää suoraan arviota vuotuisista latauskustannuksista kaavan 9 mukaan;

$$C_t \approx W_{in_t} \cdot C_{säh} \quad (9)$$

$$C_t \approx cyc \cdot DoD \cdot E_r \cdot C_{säh} \quad (9.1)$$

missä:

$C_t$  on lataukseen liittyvät kustannukset vuonna t [€]

$cyc$  on syklien määrä vuonna t [kpl]

$DoD$  on rajattu purkaussyvyys [%]

$E_r$  on BESS:n kapasiteetti [kWh]

$C_{säh}$  on sähkön sisäänostohinta (verkkopalvelu + energianhinta) vrt. kappale 3.4.2.

Tällöin lasketaan käyttökustannus elinkaaren aikana ladatun sähköenergian perusteella. Tähän vaikuttaa edellä kuvatut vuotuiset käyttösyklit ja energiakapasiteetti sekä kappaleessa 3 kuvattu sähköenergian hinta. Tämän analyysin heikkous on se, että sähkön hinta täytyy olettaa vakioksi. Lopputuloksena lasketaan suoraan arvio purettavan energian tasatuista latauskustannuksista, jossa energiavarastoon ladatun energian hinta ja latauksen häviöt tulee huomioitua (vrt. KUVIO 3). Tällaista absoluuttista purettavan energian kustannusta voidaan käyttää myöhemmin investointi simulaatioissa, joista lyhyesti kappaleessa 4.5 Kannattavuuden indikaattorit.

Kauppakeskuskohteessa voidaan haluta mahdollisesti arvioida myös esimerkiksi pysäköintihalliin sijoitettavan energiavaraston viemää parkkitilaa tai muita vastaavia ”menetettyjen tulojen” jaksollisia kustannuksia. Nämä kustannukset huomioidaan laskennassa samalla periaatteella, kuin muutkin jaksolliset kustannukset.

Edellä esitetyissä laskentamenetelmissä ei kuitenkaan huomioida sähköenergian itsenäistä purkautumista tai muita passiivisia häviöitä, kuten jäähtytystä ja akunhallintajärjestelmän virrankulutusta. Näitä passiivisia häviöitä voidaan pitää vähäisinä, ellei energiaa ole tarkoitus säilöä pitkiä aikoja. Laskennassa ei myöskään huomioida suoraan purkaussyvyyden vaikutusta akkuenergiavaraston käyttöikänsä tai muita elinkaarenaikaiseen hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä, sillä tarkkuudella kuin esimerkiksi Yan et al. ehdottavat monimutkaisilla matemaattisilla malleillaan. (Yan, et al., 2018, s. 316–325). Yleisesti vastaavassa LCOS-laskennassa näitä tekijöitä pyritään huomioimaan hyötysuhdeprosenttien ja suositellun purkaussyvyyden kautta, koska parametrien keskinäisten vaikutusten monimutkaisuus tekisi LCOS-laskennasta lähes mahdotonta.

Laskennassa on välttämätöntä tehdä alustavia oletuksia ja pyöristyksiä suuntaa antavan varastointihintatason selvittämiseksi. Laskentaa tulisi kuitenkin iteroida jälkikäteen, jotta se vastaisi paremmin valittua käyttömekanismia; etenkin käyttösykliensä osalta. Alkuellettamusten vaikutusta voidaan myös arvioida tekemällä herkkyyssanalyysi laskennassa käytetyille muuttujille.

### 4.3 Herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysi on työkalu, jolla voidaan havainnollistaa ja kuvittaa monitasoisessa laskennassa käytettyjen yksittäisten parametrien painoarvoa lopputulokseen. Saltelli, et al., 2019 korostavat, että herkkyysanalyysi ja epävarmuusanalyysi ovat erillisiä-, mutta toisiaan tukevia prosesseja. ”Epävarmassa asetelmassa (herkkyysanalyysin) tyypillisin tarkoitus on tunnistaa mitkä tekijät vaikuttavat eniten laskentamallin epävarmuuteen, jotta voitaisiin vähentää epävarmuustekijöitä alkuperäistä tietoa tarkentamalla”. Tätä herkkyysanalyysin tarkastelua he nimittävät muuttujien priorisoinniksi (*“factor prioritisation”*) ja siitä seuraavaa toimenpidettä muuttujien tarkentamiseksi (*“factor fixing”*) (Saltelli, et al., 2019, s. 30).

Tarkastelu voidaan tehdä esimerkiksi nimellisellä 10 % herkkyysarvolla, jossa tutkitun muuttujan painoarvo laskennan lopputulokseen selvitetään muuttamalla parametriä  $\pm 10$  %. Tällöin voidaan arvioida esimerkiksi käytetyn laskentakoron vaikutus lopputulokseen. Kun tämä tarkastelu tehdään kaikille muuttujille erikseen, voidaan havaita millä parametrillä on suurin painoarvo lopputuloksen kannalta. Saltelli et al. 2019 nimittävät tällaista lähestymistapaa *“one at a time”* OAT-lähestymistavaksi. OAT-herkkyden pohjalta voidaan tehdä myös johtopäätöksiä tuloksen yleisestä herkkydestä. Tällöin tarkastellaan laajemmin lasketun tuloksen ”globaalia varianssia” eri OAT-herkkyyksillä. Jos laskentamallissa on epälineaarisuutta, pitäisi yleisen tason johtopäätöksissä olla kuitenkin varovainen ja selvittää jokaisen parametri muutosten sisäinen varianssi tarkastellussa herkkydessä (Saltelli, et al., 2019).

Herkkyysanalyysi esitetään usein tornado diagrammina, joka on käytännössä kylljelleen käännetty pylväsdiagrammi. Tornodidiagrammissa ylimpänä esitetään yleensä merkittävin ja alimpana vähiten merkityksellinen tutkittava parametri, kuten liitteessä 2 esitetään. Origona voidaan käyttää esimerkiksi alkuperäisillä parametreillä laskettua tulosta, jolloin plusmiinus tarkastelusta voidaan lukea suoraan vaikuttavuus alkuperäiseen tulokseen.

#### 4.4 Laskennan tuloksia kirjallisuudesta

Cristea et al. 2022 simuloivat raportissaan LCOS arvoja eri parametreilla, he saivat keskimääräiseksi käyttökustannukseksi noin 45,6 c€/kWh, laskiessaan keskiarvon kvartiiliväliltä 25,95–76,57 c€/kWh, absoluuttisenvaihteluvälin ollessa 18,68–157,62 c€/kWh. Toisessa simulaatiossa he ottivat Romanian kansallisen ElectricUp-ohjelman kautta saatavat tuet mukaan laskelmaan ja laskivat uudeksi keskiarvoksi 33,63 c€/kWh, kvartiiliin ollessa 19,7–55,54 c€/kWh ja absoluuttisenvaihteluvälin ollessa 14,5–112,9 c€/kWh (Cristea, et al., 2022, s. 4 ja 5).

#### 4.5 Kannattavuuden indikaattorit

Laskentaa voidaan ja pitäisi pyrkiä iteroimaan käyttötarkoituksen ja herkkyysanalyysin tulosten perusteella. Kun varastoinnin kustannukset saadaan laskettua käyttötarkoituksen mukaisiksi ja kohtuullisilla epävarmuus ja riskitekijöillä, voidaan kannattavuus arvioida ottamalla arvioitu tuotto euromääräisenä mukaan nettonykyarvon laskentaan; muun muassa Sorvisto, 2020 esittämällä tavalla. Elinkaari-investointia voidaan näin analysoida käyttämällä *Monte Carlo*-simulaatiota. *Monte Carlo*-simulaatio perustuu suureen määrään satunnaistettuja skenaarioita, jolloin simulaation pohjalta voidaan todeta kannattavuus todennäköisyyslaskennan menetelmin. Skenaario analyysissä voidaan asettaa sisäänotohinnalle satunnaisvarianssi sähkönostosopimukseen (esimerkiksi 63 % kiinteä, 33 % spot) perustuen. Energia-arbitraasia arvioidessa voidaan myyntihinnalle hakea varianssi spot-hintahistoriasta arvioitujen potentiaalisten myyntihetkien perusteella. Monte Carlo-simulaatio sopii juuri tällaisiin ongelmiin, joita on vaikea, jopa mahdoton, laskea suoraan absoluuttisina lukuarvoina (Investopedia, 2023).

Toisaalta voidaan yksinkertaisesti tutkia mikä LCOS laskennassa käytetty parametri tulisi muuttumaan ajansaatossa sellaiseen asentoon, että tietystä varastoinnin ansaintamekanismista tulee kannattavaa; esimerkiksi muutoksessa olevan sähkömarkkinan tai kehittyvän akkuenergiavarastoteknologian osalta.

## 5 TULOKSET

### 5.1 Kirjallisuusselvitys

Kirjallisuuskatsauksen perusteella havaitaan, että akkuenergiajärjestelmistä on kirjoitettu laajasti ja monesta eri näkökulmasta. Voidaan todeta myös, että akkuenergiajärjestelmien hankinnasta on tehty selvityksiä, jotka ovat johtaneet virtuaalivoimalahankintoihin liikekiinteistöissä. Suomalaisissa energiavarastoinvestoinneista tehdyssä opinnäytteissä ja diplomitöissä päästään yleensä lopputulokseen, jossa tutkimuslähtökohtien perusteella ei päästä taloudellisesti kannattavaan tulokseen. Tässä muutamia poimintoja viimevuosilta;

Aurinkovoimala ja akkuenergiavarasto:

*”Teollisen kokoluokan aurinkovoimalan kannattavuutta ei voida itessään parantaa akkuenergiavaraston avulla sähkömarkkinoilla, siten että tuotettu energia siirretään halvimmilta tunneilta kalliimmille tunneille” –Korhonen, JP, 2022.*

*Tutkimuksen mukaan sähkökemialliset energiavarastot nykyisellä akkuteknologian ominaisuuksilla ja hinnoilla ovat tutkittuihin kohteisiin taloudellisesti kannattamattomia. Kannattavuus ei merkittävästi parantunut, vaikka akkuun liitettäisiin aurinkovoimala.*  
– Heikkinen, 2022

Sähköenergiavarastot kiinteistöissä:

*”Taloudellista kannattavuutta arvioitiin esimerkkilaskelmien avulla. Vaikka esimerkkilaskelmissa käytettiin karkeita hinta-arvioita energiavarastojen hintatasosta, ovat hinnat kuitenkin oikeansuuntaisia. Nykyisellä hintatasolla energiavarastoon investointi ei ole taloudellisesti kannattavaa.” –Ahonen, 2023*

*”Pelkästään reservimarkkinassa BESS:i järjestelmän käyttö voisi taata tasaiset tuotot investoinnilleen. Tämä takaisi selvän ja helpon ennustettavuuden tuotoille ja takaisinmaksu olisi helpompi taata. Viideltä vuodelta keskiarvon hinnoilla takaisinmaksaisi noin 18 vuodessa. Nykyisellä kehityksellä energiamuotojen lisääntyessä todennäköisesti myös uusiutuvien energiamuotojen myötä reservimarkkinoiden kapasiteettia tarvitsee nostaa.” –Mikerov, 2023*

Taloudellisesti kannattavaan investointiin ei kirjallisuudessa päästä lukuun ottamatta reservimarkkinatoimintaa. Laskelmissa esitetään kuitenkin vain harvoin tarkat parametrit, joilla laskelmat on tehty. Voidaan siis olettaa, että laskennassa käytetään yleisesti aiempaan kirjallisuuteen perustuvia keskiarvoja (CAPEX, OPEX ja laskentakorko). Laskelmien voidaan siis yleisesti ottaen olettaa pohjautuvan kumulatiiviseen kirjallisuusselvitystyöhön, joka voi olla kaukana todellisuudesta, etenkin nopeasti kehittyvän akkuteknologian kohdalla.

Myös Cristea et al. 2022 toteavat käyttökustannusten ylittävän kannattavan liiketoiminnan Romanian energiamarkkinoilla, koska varastoinnin kustannus ylitti ostoenergian keskimääräisen hinnan 17,34 c€. Varastoinnin kokonaiskustannus (osto + varastointi) on siis korkeampi, kuin sähkön reaaliaikaisilla markkinahinnoilla ostettuna keskimäärin. Tutkimuksessaan he simuloivat LCOS arvoja eri parametreilla ja laskivat käyttökustannukseksi 14,5–157,62 c€/kWh. He kuitenkin huomauttavat, ettei tulosten laskemisessa ole huomioitu esimerkiksi Romanian valtion myöntämiä tukia BESS hankintaan (Cristea, et al., 2022, sivut 4 ja 5).

Energiavarastoihin investoidaan laajasti, joten mahdollisten maakohtaisten tukien (esim. Energiatuen) sekä ostoenergian hinnan (verottomuuden ja hankintamekanismien) huomioimatta jättäminen voivat helposti johtaa kirjallisuudessa tehtyihin kannattamattomuusarvioihin. Toisaalta tukien huomioimisessa täytyy olla tarkkana. Tuet voidaan huomioida kahdella, toisensa poissulkevalla tavalla;

- [1.] Vähennä tuet suoraan CAPEX:sta
- [2.] Säilytä CAPEX ennallaan ja ota huomioon tukien taloudellinen vaikutus säätämällä diskonttokorkoa alaspäin CAPM- ja WACC-mallien avulla (oman pääoman riskitön osuus).

Tästä syystä on selvä tarve pystyä arvioimaan hankkeen kannattavuutta paikka ja aika sidonnaisesti ja selvitystyötä tehdessä päädyttiin tekemään muuntojoustava työkalu, jolla näitä muuttujia voidaan tarkastella ”oikean” ja ajankohtaisen datan valossa, jatkuvasti muuttuvissa kustannusolosuhteissa.

## 5.2 Excel laskentatyökalu

Laskentatyökalun kehittäminen kirjallisen työn rinnalla pakotti osaltaan kyseenalaistamaan viitattujen tutkimustöiden sisältöä, parametrejä ja laskentatapaa. Referenssi parametrien etsiminen ja esimerkiksi WACC osalta laskeminen kerrytti ymmärrystä laskentamenetelmien heikkouksista ja vahvuuksista. Laskentatyökalulla saatiin laskettua kappaleessa 4.4 kuvattujen referenssitulosten mukaisia LCOS-hinta-arvioita kaavan 6 mukaan, kun laskentaan syötetään yleisen tason lähtöparametrit. Seuraavassa kuvassa 1 on esitettyinä lähtötietojen syöttö laskenta Exceliin.

### LÄHTÖTIEDOT

#### Talousparametrit

Laskentakorkokanta $i$	%	5,00 %	WACC vertailuarvo 0,00 %
Laskentajakso $t$	vuosi(a)	15	
<b>WACC</b>			
Oman pääoman osuus OPO	%		}
Vieraan pääoman osuus VPO	%	100 %	
Oman pääoman kustannus $R_e$	%		
Vieraan pääoman kustannus $R_v$	%		
Verokanta $vero\%$	%	20 %	
<b>CAPM</b>			
Oman pääoman riskitön osuus RFR	%		}
Oman pääomatuoton odotettu tuotto MR	%		
Volatiliteetin huomioiva beetta kerroin $\beta$		1	
Oman pääoman kustannus $R_e$	%	0,00 %	

#### BESS parametrit

<b>Kiinteät kulut, CAPEX</b>			
BESS kapasiteetti $E_r$	kWh	1 000	}
BESS hinta	€/kWh	568,89	
Rakennuskulut, selvitykset ym.	€	0	
CAPEX (avaimetkäteinen)	€	568 890,00	
<b>Muuttuvat kulut, OPEX</b>			
Käyttökustannukset koko elinkaarelta $OM_t$	€	1 422,23	}
Verkkopalvelumaksu (+vero)	c/kWh	4,61	
Energian hinta	c/kWh	5,00	
Energian sisäänotohinta BESS käytössä $C_{säh}$	€/kWh	0,10 €	
Häviöiden hinta (round-trip efficiency) $C_{RTE}$	€/a	560,97 €	
Arvio vuosittaisista latauskustannuksista $C_t$	€/a	560,97	
Muut jaksolliset kulut (valinnainen) $C_{opt}$	€/a	0	
<b><math>W_{out}</math></b>			
Lataus ja purkusyklien määrä $cyc$	kpl/a	365	}
Purkaussyvyys $DoD$	%	80 %	
Varastoinnin hyötysuhde $\eta$	%	98 %	
$W_{out}$	kWh/a	286 160	

$$LCOS = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OM_t + C_t}{(i+1)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{W_{out}}{(i+1)^t}}$$

Selitteet

<span style="background-color: #d9ead3; border: 1px solid #d9ead3; display: inline-block; width: 20px; height: 10px;"></span>	= täytettävä kenttä
<span style="background-color: #d9ead3; border: 1px solid #d9ead3; display: inline-block; width: 20px; height: 10px;"></span>	= täytettävä kenttä (valinnainen)
<span style="background-color: #d9ead3; border: 1px solid #d9ead3; display: inline-block; width: 20px; height: 10px;"></span>	= tulokenttä
<span style="background-color: #d9ead3; border: 1px solid #d9ead3; display: inline-block; width: 20px; height: 10px;"></span> OTSIKKO	= sarakkeen alaotsikko

Sisällytä myös purettavan energian hinta laskentaan (LCUS - Levelized Cost of Using Storage)

**cyc/t vertailuarvo**  
400

KUVA 1 LCOS-laskentatyökalun lähtötiedot.

Työkaluun sisällytettiin sekä LCOS-tarkastelu varastoinnin kustannusten selvittämiseen, jossa  $C_t$  määräytyy kaavan 8 perusteella että LCUS (Levelized Cost of Using Storage)-tarkastelu, jossa  $C_t$  määräytyy kaavan 9 mukaan. Laskutapa vaihdetaan valintaruudulla, jonka rastittamalla laskuri laskee LCUS arvon. Laskuriin voidaan syöttää myös valinnaiset ”muut jaksolliset kustannukset”  $C_{opt}$ .

Julkisen opinnäytetyön osalta kannattavuustarkastelu kauppakeskuskohteen osalta päätetään tähän, sillä tarkempi tarkastelu tulisi välttämättä johtamaan työn osien salaukseen. Työkalulla pystytään kuitenkin tekemään asiakastyönä hankekohtaisilla parametreilla analyysi Cristea et. al. 2022 esittämässä laajuudessa. Tämän laajuuden saavuttamiseksi täytyy kuitenkin kerätä laajasti ajankohtaista dataa energiavarastojen hankintakustannuksista Suomessa, huomioiden markkinoilla olevien energiavarastojen yksilölliset ominaisuudet sekä BESS-kokonaisuuteen sisältyvät oheispalvelut, kuten aggregointi reservimarkkinoille.

Tarkkaan analyysiin tarvitaan edellä mainitun lisäksi todelliset energian hankintakustannukset suoraan BESS selvityksen tilaajalta, varsinkin kun kyseessä on Energiaviraston määritelmien mukaan teollisenluokan energiankulutuksen omaava kiinteistö. Lisäksi täytyy tuntea laskentakorkokantaan vaikuttavat oman pääoman tuottotavoitteet; tukien ja oman pääoman osuus sijoitettavassa pääomassa (CAPM), lainarahan hinta ja suhde koko sijoitettavaan pääomaan sekä ”oman pääoman hinta” ja suhde koko sijoitettavaan pääomaan (WACC) (Energiavirasto, n.d.-b).

Työkalusta tulostettava laskuesimerkin tulokset esitetään liitteessä 1. Laskenta työkalun ulkoasu sekä ohjeet esitetään liitteissä 2 ja 3.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn alkuperäiseen tavoitteeseen: ”selvittää teollisen luokan sähkönkuluttajan sähkönhankintaan liittyvät erot perinteiseen pörssihintaan perustuvaan hankintaan ja arvioida sen perusteella akkuenergiavaraston kannattavuutta mahdollisimman realistisesti ja moniulotteisesti” ei saavutettu, koska teollisen luokan sähkönkuluttajan sähkönhankintaan vaikuttavat niin monet tekijät. Työ kuitenkin luo edellytykset ymmärtää kauppakeskuksen energiaympäristöä ja sähkömarkkina-kytköksiä sekä sähkön hankintamekanismeja, vaikka konkreettiset sähköenergian hankintahinnat ja mekanismit pysyvät edelleen liikesalaisuutena. Työssä löydettiin varastoinnin kustannuslaskentamalli (LCOS). Tämän mallin avulla voidaan tehdä johtopäätöksiä investoinnin kannattavuudesta akkuenergiavaraston eri käyttösovelluksissa. Löydetyistä laskentamallista kehitettiin edelleen Excel -laskentatyökalu, joka mahdollistaa tutkimusongelman teknistaloudellisen tarkastelun.

Laskentatyökaluun pyrittiin sisällyttämään kattavat ohjeet sekä yleiset viitearvot, jotka mahdollistavat viitatussa kirjallisuudessa esitettyjen tulosten saavuttamisen. Ohjeet sisältävät työn kannalta keskeisiä kirjallisuudesta poimittuja viitteellisiä parametrejä, joiden tarkoitus on ohjata laskurin käyttäjää kohti oikeasuuntaista tulosta, myös ilman pääsyä alkuperäiseen viitattuun tekstiin. Kirjallisuudesta poimittujen laskentaparametrien, laskentatapojen ja käyttökustannusten määrityksen osalta havaittiin kuitenkin myös merkittäviä eroja, joita tässä työssä pyrittiin avaamaan ja arvioimaan.

Koska työn tarkoitus oli luoda joustava laskentamalli, joka mahdollistaa hankkeiden yksilöllisen arvioinnin, oli työssä myös selvitettävä näiden keskeisten laskentamenetelmien taustoja ja arvioitava niiden soveltuvuutta todelliseen kauppakeskuksiinteistöön. Työssä havaittiin, että toimintaympäristön tarkka kartoitus vaikuttaa laskennan tulokseen, vastaavalla vaikuttavuudella, kuin käytetty laskentamenetelmä. Voidaankin kysyä, mitä hyötyä on laskea investointi teknisesti oikein, jos laskentaparametrit eivät vastaa todellista kohdetta tai erilaisten parametrien huomiotta jättäminen ja vaikuttavuus puuttuu käytetystä laskentatavasta. Tällai-

nen tilanne saattaa siis helposti syntyä myös yleisesti hyväksytyä ja vertaisarvioitua laskentamallia käyttäessä. Esimerkkinä edellä kuvatusta voisi nostaa energian diskonttaamisen tai erilaisten tukien huomioimisen, joiden vaikutus LCOS kustannukseen on jopa yli kymmenen senttiä yhtä varastoitua kilowattituntia kohden.

Myös herkkyyssanalyysi riippuu siitä, mitä tekijöitä laskennassa on otettu huomioon, sekä siitä minkä suhteen herkkyyttä tarkastellaan. Energiavaraston käyttötarkoitusta laskiessa tulisi siis tuntea ja selvittää laajasti kaikkien ansaintamallien yksittäisiä ominaisuuksia ja vaikuttavuutta - toisin sanottuna herkkyyttä - omaan selvitystyöhön liittyen. Näin myös päällekkäiset, erikseen tarkasteltuna kannattamattomat ansaintamallit voivat lopulta yhdessä johtaa kannattavaan investointiin. Tämän opinnäytetyön laajuuden puitteissa tätä ei kuitenkaan tarkasteltu, mutta siitä voisi saada useampia jatkotutkimuksia eri kohteisiin, eri aikoina.

Työssä löydettiin liikekiinteistöihin tehtyjä akkuenergiavarastoinvestointeja, jotka osaltaan puoltavat investoinnin kannattavuutta realistisessa markkinaympäristössä, ainakin reservimarkkinatoiminnan osalta. Jatkotutkimuksen kannalta olisi mielekästä saada tietoa muun muassa kappaleessa 2.3 kuvatuista toteutuneista investoinneista, esimerkiksi kyselytutkimuksen muodossa. Kyselytutkimuksen tarkoituksena voisi olla selvittää akkuenergiavarastoinvestointeihin johtaneita tekijöitä ja taloudellista kannattavuutta, kokemukseräisesti. Tutkimuksella vahvistettaisiin käsitystä siitä miten todelliset investoinnit vastaavat lähiaikoina kirjallisuudessa käsiteltyjä johtopäätöksiä ja millainen laskelma toteutuneen investointipäätöksen tukena on ollut.

Lopuksi haluan kiittää A-Insinöörit Teollisuus ja Talotekniikka Oy:tä taloudellisesta tuesta opinnäytetyöprojektille. Lisäksi haluan kiittää Sähköyksikön johtajaa Teemu Simosta ja ohjaavaa opettajaa Aki Kortetmäkeä, joiden kanssa käydyistä keskusteluista oli suuri apu opinnäyteprojektin läpiviemisessä. Suuri kiitos myös lehtori Matti Kolehmaiselle laskentamenetelmän kommentoinnista ja investointilaskennan menetelmien selventämisestä, joskin varsinaiset laskelmat eivät enää mahtuneet tämän työn laajuuteen.

## LÄHTEET

Ahonen, A., 2023. *Sähköenergiavarastot kiinteistöissä. Insinööriyö (YAMK). Talotekniikan tutkinto-ohjelma. Metropolia Ammattikorkeakoulu.* Verkkosivu. Viitattu 15.3.2024. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202304114990>

Bloomenthal, A., 2023. *How Do I Use the CAPM to Determine Cost of Equity.* *Investopedia.* Verkkosivu. Viitattu 22.2.2024.

Saatavilla: <https://www.investopedia.com/ask/answers/022515/how-do-i-use-capm-capital-asset-pricing-model-determine-cost-equity.asp>

Business Finland, 2024. *Energiatuki.* Verkkosivu. Viitattu 15.3.2024.

Saatavilla: <https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/energiatuki>

BusinessOulu, n.d.. *Investoinnin laskentaohjelma. Yritystulkki.fi.* Verkkosivu.

Viitattu 1. 4. 2024. Saatavilla: <https://www.yritystulkki.fi/fi/alue/oulu/toimiva-yrittaja/investoinninkannattavuuslaskentaohjelma/>

ChatGPT3, 2024. *Is it correct to discount the energy (Wout) in this formula for LCOS calculation?  $LCOS = \sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+i)^t} W_{out,t} CAPEX_0 + \sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+i)^t} OMT + Ct.$*

Verkkosivu. Viitattu 1.4.2024.

Saatavilla: <https://chat.openai.com/>

Cristea, M., Tîrnovan, R.-A., Cristea, C. & Făgărășan, C., 2022. *Levelized cost of storage (LCOS) analysis of BESSs in Romania. Sustainable energy technologies and assessments. Volume 53, Part C.* Verkkosivu. Viitattu

15.3.2024. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102633>

Edina, n.d.. *Battery Energy Storage System (BESS); BESS Applications.*

Verkkosivu. Viitattu 4. 9. 2024.

Saatavilla: <https://www.edina.eu/power/battery-energy-storage-system-bess>

Elovaara, J. & Haarla, L., 2011. *Sähköverkot 1. Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta.* Toinen painos toim. ISBN 978-951-672-360-3 s.l.:Gaudeamus Oy / Otatieto.

Energiavirasto, n.d.-a. *Sähkön mittaus.* Verkkosivu. Viitattu 1.2. 2024.  
Saatavilla: <https://energiavirasto.fi/sahkon-mittaus>

Energiavirasto, n.d.-b. *Tilastot ja julkaisut; Sähkön hintatilastot.* Verkkosivu.  
Viitattu 1.2.2024. Saatavilla: <https://energiavirasto.fi/sahkon-hintatilastot>

Enico, n.d.. *Sähkövaraston käyttökohteet.* Verkkosivu. Viitattu 4. 9. 2024.  
Saatavilla: <https://enico.fi/fi/energian-varastoinnin-kayttokohteet/>

Euroopan komissio, 2022. *Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of the Regions EU Solar Energy Strategy.* Verkkosivu. Viitattu 21.2 2 2024. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A221%3AFIN>

Fingrid Oyj, 2023. *Varttitaseen käyttöönotto 22.5.2023.* Verkkosivu. Viitattu 20.3.2024. Saatavilla:  
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/varttitase/varttitaseen-kayttoonotto-suomessa-22.5.2023--paivitetty-17.3.2023.pdf>

Fingrid Oyj, n.d.-a. *Markkinapaikat.* Verkkosivu. Viitattu 22.1.2024.  
Saatavilla: [www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/](http://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/)

Fingrid, n.d.-b. *Reservimarkkinat.* Verkkosivu. Viitattu 22.1.2024.  
Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/>

Fingrid, n.d.-b. *Yleistietoa sähkömarkkinoista.* Verkkosivu. Viitattu 22.1.2024.  
Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/yleistietoa-sahkomarkkinoista/?tag=3462&pageSize=5&page=1&language=fi>

Fortum Oyj, n.d. Sähkön johdannaismarkkinat. Verkkosivu. Viitattu 18.4.2024. Saatavilla: [www.fortum.fi/tietoa-meista/uutiset-ja-julkaisut/tietopakettimedialle/sahkon-johdannaismarkkinat](http://www.fortum.fi/tietoa-meista/uutiset-ja-julkaisut/tietopakettimedialle/sahkon-johdannaismarkkinat)

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, 2023. *Photovoltaics Report*. Verkkosivu. Viitattu 6.4.2024. Saatavilla: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>

Grönlund, P., 2022. *Komission tiedonanto EU:n aurinkoenergiastrategiaksi. Työ ja elinkeinoministeriö (TEM)*. Verkkosivu. Viitattu 21.2.2024. Saatavilla: <https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/Liiteasiakirja/Documents/EDK-2022-AK-36410.pdf>

Heikkinen, V., 2022. *Sähköakun kannattavuusarviointi älykkäässä ohjauksessa. Sähkötekniikan kandidaatintyö. Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT.* Verkkosivu. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2022061647004>

Hoff, C. M., 2022. *Energy Storage Technologies and Applications. Kappale 7: The Value and Costs of Energy Storage. ISBN 13: 978-1-63081-908-8.* Lontoo: Artech House.

Hyyryläinen, P., 2013. *Sähkökaupan riskien hallinnointi. Opinnäytetyö. Liiketalouden koulutusohjelma. Laurea-ammattikorkeakoulu*. Verkkosivu. Viitattu 8.3.2024. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2013112017589>

IEC, n.d. Electropedia: Area: 617: Organization/Market of electricity. Verkkosivu. Viitattu 20.4.2024. Saatavilla: <https://www.electropedia.org/>

Investopedia, 2023. *Creating a Monte Carlo Simulation Using Excel*. Verkkosivu. Viitattu 16.4.2024. Saatavilla: <https://www.investopedia.com/articles/investing/093015/create-monte-carlo-simulation-using-excel.asp>

Järventausta, P., 2023. *Sähömarkkinat ja sähkönhinnan muodostuminen. Asiantuntijaesitys*. Tampere: Tampereen yliopisto. Luentotallenteella 27.9.2023. TAMK.

Kiinteistötieto, 2023. *Markkinaraportit ja katsaukset: KTI Markkinakatsaus | Syksy 2023. Viitattu 23.1.2024.* Verkkosivu.

Saatavilla: <https://kti.fi/markkinaraportit-ja-katsaukset/>

Kim, S. H. & Shin, Y.-J., 2023. *Optimize the operating range for improving the cycle life of battery energy storage systems under uncertainty by managing the depth of discharge*, s.l.: Journal of energy storage, 2023-12, Vol.73, p.109144, Article 109144.

Kolehmainen, M. lehtori, 2024. *Sähköpostiviestissä 7.4.2024.* Haastattelu.

Korhonen, J.-P. J.-P., 2022. *Teollisen kokoluokan aurinkovoimalan ja akkuenergiavaraston kannattavuus ja hyödyntäminen sähkömarkkinoilla. Sähkötekniikan Diplomityö. Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT.* Verkkosivu. Viitattu 12 3 2024.

Saatavilla: <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/164768>

Korhonen, N., 2022. *Varttitaan tuomat muutokset pörssikaupankäyntiin. Youtube-video. Fingrid Oyj..* Verkkosivu. Viitattu 20 1 2024.

Saatavilla: [https://www.youtube.com/watch?v=lpa3JABq\\_L4](https://www.youtube.com/watch?v=lpa3JABq_L4)

Koskela, J. Rautiainen, A. Järventausta, P., 2019. *Using electrical energy storage in residential buildings – Sizing of battery and photovoltaic panels based on electricity cost optimization.* Elsevier. Verkkosivu. Viitattu 21.4. 2024.

Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.021>.

Koskinen, L., 2023. *Akkukäyttöisten sähkövarastojen (BESS) tekniikat ja markkinatilanne.* Verkkosivu. Viitattu 15.1.2024.

Saatavilla:

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/800990/Koskinen\\_Lari.pdf?sequence=2](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/800990/Koskinen_Lari.pdf?sequence=2)



Mikerov, E., 2023. *Akkuenergiavaraston kartoitus. Opinnäytetyö, AMK. Energia- ja ympäristötekniikka. SAMK. Verkkosivu. Viitattu 12 3 2024.*

Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2023102628012>

Mongird, K. et.al, 2019. *Energy Storage Technology and Cost Characterization Report. Technical Report. USDOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), Renewable Power Office. Water Power Technologies Office.. Verkkosivu. Viitattu 1. 4. 2024.*

Saatavilla: <https://doi.org/10.2172/1573487>

Mostafa, . H. M. et.al, 2020. *Techno-economic assessment of energy storage systems using annualized life cycle cost of storage (LCCOS) and levelized cost of energy (LCOE) metrics. s.l.:Journal of Energy Storage. kesäkuussa 2020. numero 29.*

Next, 2022. *Power Trading in the Wholesale Electricity Markets. Verkkosivu. Viitattu 27.2.2024].*

Saatavilla: <https://www.next-kraftwerke.be/en/knowledge-hub/power-trading#otc-markets>

Nord Pool, n.d.. *Trading. Verkkosivu. Viitattu 22.1.2024.*

Saatavilla: <https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/>

Pankkiasiat.fi, 2024. *Investointilaskuri. Excel tiedosto.. Verkkosivu. Viitattu 7 3 2024. Saatavilla: <https://pankkiasiat.fi/investointilaskuri>*

Puolakka, A., 2024. *Myyntipäällikkö, Enico Oy. Haastattelu 9.2.2024. Jyväskylä.*

Saltelli, A. et.al, 2019. *Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices. Environmental modelling & software : with environment data news.. Verkkosivu. Viitattu 15 3 2024.*

Saatavilla: [DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.01.012](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.01.012)

Pänkäläinen, M., 2022. *Kiinteistöjen akkuvarastot : turvallisuusnäkökohdat suunnittelussa, asentamisessa ja käytössä. Diplomityö. LUT. Verkkosivu. Viitattu 21.4.2024.Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2022052338193>*

Sorvisto, M., 2020. *Tietopaketti ja laskentatyökalu Rakennusalan koulutustehtaan konseptointi -hankkeelle. Opinnäytetyö. Centria-ammattikorkeakoulu. Liiketalouden koulutusohjelma*, Verkkosivu. Viitattu 9.4.2024. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020052212905>

Suomen Asiakastieto Oy, n.d.. *VENI Energia Oy*. Verkkosivu. Viitattu 14.1.2024. Saatavilla: <https://www.asiakastieto.fi/yrietykset/fi/veni-energia-oy/28407128/taloustiedot>

Suomen ElFi Oy, n.d.. *Sähkökäytön kysyntäjousto*. Verkkosivu. Viitattu 19.4.2024. Saatavilla: <https://www.elfi.fi/sahkomarkkinat/sahkonkayton-kysyntajousto/>

Svenska kraftnät, n.d.. *Operations and Electricity Markets; Four bidding areas in Sweden..* Verkkosivu. Viitattu 24. 3. 2024. Saatavilla: <https://www.svk.se/en/national-grid/operations-and-electricity-markets/>

Tampereen Energia, 2023. *Tehopohjaiset tuotteet. Verkkopalveluhinnasto*. Verkkosivu. Viitattu 8 3 2024. Saatavilla: <https://www.tampereensahkoverkko.fi/sahkon-jakelu-ja-kulutus/verkkopalvelutuotteet-hinnat-ja-sopimusehdot/>

TEM, 2024. *Energiatuen linjaukset vuodelle 2024. Työ- ja elinkeinoministeriö* Verkkosivu. Viitattu 23. 3. 2024. Saatavilla: <https://tem.fi/tuettavat-hankkeet>

Tenhunen, M.-L., 2013. *Johdon laskentatoimi eri laskentatilanteissa – osa 4. Johdon laskentatoimen koulu*. Verkkosivu. Viitattu 6 3 2024. Saatavilla: <https://tilisanomat.fi/koulut/johdon-laskentatoimen-koulu-koulut/johdon-laskentatoimi-eri-laskentatilanteissa>

Vartiainen, E. et.al, 2019. *Impact of weighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelised cost of electricity*. Verkkosivu. Viitattu 2024.

Saatavilla: <https://doi.org/10.1002/pip.3189>

Verohallinto, 2022. *Sähkön veroluokat ja verotuksen korjaaminen. Syventävät ohjeet.* Verkkosivu. Viitattu 8.3.2024.

Saatavilla: <https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/107822/s%C3%A4hk%C3%B6n-veroluokat-ja-verotuksen-korjaaminen/#1.1-s%C3%A4hk%C3%B6n-verotus-ja-veroluokat-i-ja-ii>

Vertanen, V., 2023. *Sähköautojen latauskonsepti pysäköintitaloihin. Sähkötekniikan diplomityö. Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT.*

Verkkosivu. Viitattu 22. 3. 2024. Saatavilla:

<https://lutpub.lut.fi/handle/10024/165896>

Weber, T. & Lu, B., 2023. *An Open-Source Energy Arbitrage Model Involving Price Bands for Risk Hedging with Imperfect Price Signals.* Verkkosivu. Viitattu 9.4.2024. Saatavilla:

<https://doi.org/10.3390/en17010013>

Wu, K.-Y., Tai, T.-C., Li, B.-H. & Kuo, C.-C., 2024. *Dynamic Energy Management Strategy of a Solar-and-Energy Storage-Integrated Smart Charging Station*. Verkkosivu. Viitattu 9.4.2024].

Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/app14031188>

Yan, X. et.al, 2018. *Multi-objective Chance-constrained Optimal Day-ahead Scheduling Considering BESS Degradation. CSEE Journal of Power and Energy Systems.* Verkkosivu. Viitattu 13.3.2024.

## LIITTEET

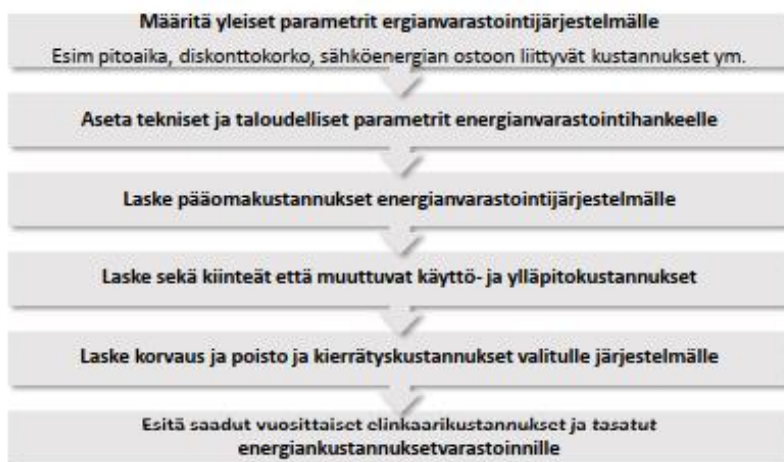
### Liite 1. Tulostettava kansinäkyä / Laskennan esimerkkitulo

Opinnäytetyö 2024  
Samppa Salovaara

1 / 2

#### LASKENTAMENETELMÄN KUVAUS

Journal of Energy Storage on tieteellinen julkaisu, joka keskittyy energianvarastoinnin tieteen teknologian ja tekniikan näkökohtiin. Lehdessä kesäkuussa 2020 julkaistu artikkeli (Mostafa et al. 2020) tarjoaa esitetyn lähestymistavan energian varastointikustannusten selvittämiseen; elinkaarikustannusten annuiteetin ja tasattujen energiankäyttökustannusten kautta. Vastaavaa lähestymistapaa on sovellettu useissa kirjallisuusarvioihin perustuvassa tutkimuksessa, erilaisin lähtöarvoin. Tämän laskentatyökalun tarkoitus on tuoda läpinäkyvyyttä sekä joustavuutta erityyppisten energianvarastoinvestointien kannattavuusarvion pohjaksi.



Tämä laskentatyökalu laskee varastoidun energian hinnan, alla esitetyn LCOS laskentakaavan avulla.

$$LCOS = \frac{CAPEX_0 + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t}{(i+1)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{W_{out}}{(i+1)^t}}$$

,missä

**CAPEX<sub>0</sub>** on BESS investointikustannus  
**OPEX<sub>t</sub>** on käyttö- ja ylläpitokustannukset vuonna *t*  
**W<sub>out</sub>** on purettu energiamäärä vuodessa  
*n* on BESS:n elinkaaren pituus vuosina  
*i* on laskentakorkokanta.

Laskenta perustuu annuiteettien selvittämiseen ja niiden diskonttaamiseen investointihetkeen *t* = 0. Keskeiset laskennassa käytetyt parametrit on esitetty alla.

#### Talous parametrit

Laskentakorkokanta *i* : 5,00 %  
 Laskentajakso *t* : 15 vuotta  
 CAPEX<sub>0</sub> : 568 890 €  
 OPEX<sub>t, NNA</sub> : 6 483 €

#### BESS parametrit

Kapasiteetti: 1,0 MWh  
 Syklejä vuodessa: 365 kpl  
 Käytetty purkausvyvyys **DOD** : 80 %  
 Käytetty hyötysuhde **η** 98 %  
 Elinkaaren aikana purettu energia **W<sub>out</sub>** : 4292,4 MWh

#### TULOS

Varastoinnin tasattu käyttökustannus LCOS 20 c€/kWh

#### HUOM

-Korkokanta ei perustu laskettuun WACC arvoon.

kommentit päivittyvät korkokannan  
määrittäjästarkkuuden mukaan

## Herkkyyssanalyysin parametrit

	Vaihteluväli	-%	+	Arvot	MIN	MAKS
Laskentakorkokanta <i>i</i>	10 %	10 %			4,50 %	5,50 %
Laskentajakso <i>t</i>	10 %	10 %			13	16
Energian sisäänostohinta <i>C<sub>säh</sub></i>	10 %	10 %			0,09 €	0,11 €
Muut jaksolliset kustannukset	10 %	10 %			- €	- €
Lataus ja purkusyklien määrä <i>cyc</i>	10 %	10 %			329	402
Suosittelun purkausyvyys <i>DoD</i>	10 %	10 %			72 %	88 %
Varastoinnin hyötysuhde <i>η</i>	10 %	10 %			88 %	100 %

Seuraavassa kaaviossa esitetään herkkyyssanalyysin tulokset poikkeamana edellisen sivun tuloksesta.

