



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

Laskentatyökalu lämpövaraston käytön optimoimiseksi **Calculation tool for optimizing a heat storage's usage**

Pietu Kinnunen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Pietu Kinnunen

Laskentatyökalu lämpövaraston käytön optimoimiseksi

2019

Kandidaatintyö.

25 s.

Tarkastaja: professori Jero Ahola

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tehdä laskentatyökalu sähköenergialla ladattavan lämpövaraston optimaalisen toimintamallin selvittämiseksi. Lisäksi työssä tehdään teknistaloudellisia tarkasteluja laskentatyökalua käyttäen. Työn teoriaosuudessa selvitetään lyhyesti kirjallisuustutkimuksen avulla lämpövaraston käytön optimoinnissa huomioitavia taustatekijöitä. Analyysi ja johtopäätökset perustuvat laskentatyökalua apuna käytettyihin teknistaloudellisiin tarkasteluihin, esitettyyn teoriaan ja keskusteluihin toimijoiden kanssa. Työ on toteutettu Lappeenrantalaisen Elstor Oy:n toimeksiantona.

Lisääntyvän epäsäännöllisen sähköntuotannon takia jatkossa tarvitaan enemmän energiavarastoja ja joustoa. Lämpövarastolla energiaa voidaan varastoida hyödynnettäväksi esim. teollisuuden prosessilämpönä. Lämpövarasto voisi mahdollisesti korvata osittain tai kokonaan polttamiseen perustuvan lämmön tuotannon, mikä auttaisi ylläpitämään sähköverkon tehotasapainoa sekä samalla vähentäisi paikallisia pienhiukkaspäästöjä ja myös kasvihuonekaasupäästöjä, jos sähkö on tuotettu uusiutuvasti. Investointina lämpövaraston kilpailukyky perustuu pääasiassa mahdollisuuteen ostaa sähköä halvalla ja käyttää se lämpönä silloin kun on tarve. Lämpövarastoa voisi olla mahdollista käyttää myös reservimarkkinoilla, mutta luodun laskentatyökalun oletuksena on toimiminen vain Elspot-markkinoilla.

Laskentatyökalu on toteutettu Python-ohjelmointikielellä ja siinä on tiivistetysti kaksi päätoimintoa: 1. Ohjelma analysoi historiallisia Elspot-hintatietoja ja piirtää niistä olennaisia kuvaajia laskentojen perusteella. 2. Ohjelma simuloi lämpövaraston toimintaa Elspot-markkinoilla ohjelman käyttäjän asettamilla lähtöarvoilla ja tulostaa kannattavuuden tunnuslukuja sekä optimoi varaston parametrit. Laskennassa tulot ovat säästöjä vertailukohteeseen nähden.

Kun lämpövaraston kanssa toimitaan pelkästään Elspot-markkinoilla, lataussykli kannattaa olla yksi vuorokausi, jonka aikana ladataan tilanteesta riippuvan lataustuntimäärän ja ajankohdan mukaisesti sopivalla latausteholla. Teknisesti lataustehoa rajoittaa sähköverkon ominaisuudet ja taloudellisesti verkkoyhtiön päättehomaksu. Kapasiteetti tulee olla sellainen, että se riittää seuraavan lataussyklin alkuun. Halvimmat tunnit ovat yleensä yöllä etenkin, jos käytössä olevalla verkkoyhtiöllä on voimassa halvempi yötariffi. Optimaalinen vuorokautinen lataustuntimäärä on melko epätodennäköisesti huomattavasti yli kahdeksan tunnin, jos energian hinta on merkittävä tekijä.

Elspot-markkinoilla toimiva sähköllä ladattava lämpövarasto voi olla kilpailukykyinen korvaamaan osittain tai kokonaan lämmöntuottojärjestelmän, jossa käytetään suunnilleen maakaasun hintaista polttoainetta. Lähitulevaisuudessa käynnistyvä ydinvoimalaitos Olkiluoto 3 alentaneen Suomen aluehintaa hieman ja myös lisääntyvä epätasainen sähköntuotanto aiheuttanee lisää yksittäisiä halpoja tunteja, joten on hyvin mahdollista, että lämpövaraston kannattavuus paranee ajan myötä. Myös tämän työn tarkasteluissa huomioimatta jätetty säätösähkömarkkinan käyttö voisi lisätä lämpövaraston kannattavuutta merkittävästi.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Pietu Kinnunen

Calculation tool for optimizing a heat storage's usage

2019

Bachelor's Thesis.

25 p.

Examiner: professor Jero Ahola

The aim of this Bachelor's thesis is to create a calculation tool that can be used for solving the optimal operating model of an electrically charged heat storage. Additionally, techno-economic examinations are made using the created calculation tool in this study. In the theory section of this study the background factors that should be considered are sorted out briefly with a literature research. The analysis and conclusions are based on the techno-economic examinations made with the calculation tool, the expressed theory and conversations with the Elstor Oy's representatives. The study is carried out by the commission of Elstor Oy from Lappeenranta.

Due to increasing irregular electricity production more energy storages and flexibility are needed in the future. With a heat storage, energy can be stored to be utilized for example as a heat source for industrial processes. The heat storage could potentially replace partially or entirely the heat production based on burning, which would not only help maintaining the power balance of the grid but also reducing local fine particle emissions and greenhouse gas emissions as well, if the electricity is produced renewably. As an investment, the heat storage's competitiveness is mainly based on being able to buy electricity cheap and using it as heat when needed. It could be possible to use the heat storage also in the reserve market, but the calculation tool is created only the Elspot-market in mind.

The calculation tool is created with the Python programming language and it has two main functions in short: 1. The program analyzes historical Elspot price data and draws the essential graphs based on the calculations. 2. The program simulates the heat storage's operation in the Elspot-market according to inputs given by the user. The program prints characteristics of profitability and optimizes the parameters of the storage. In the calculations incomes are savings compared to a point of reference.

When the heat storage is used only in the Elspot-market, the charging cycle should be one day during which the storage is charged with a suitable power and the number of hours depending on the situation. Technically the charging power is limited by the attributes of the power grid and economically by the grid company's active power fee. The capacity should be such that it lasts until the next charging cycle. The cheapest charging hours are usually at nighttime especially if the grid company has a cheaper night tariff in effect. The optimal daily charging hour number is quite unlikely considerably more than eight hours if the cost of energy is a significant factor.

The electrically charged heat storage used in the Elspot-market can be competitive compared to a heat production system that uses a fuel with approximately the price of natural gas. The nuclear power plant Olkiluoto 3 starting in the near future will probably reduce Finland's Elspot area price and also the increasing irregular electricity production may cause more single cheap charging hours, so it is possible that the heat storage's profitability improves by the time. Moreover, the usage of the regulating power market ignored in this study's examinations could improve the profitability significantly.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
2.	Käsitteet ja taustatekijät.....	7
2.1	Sähkön siirto ja tehotaapaino	7
2.2	Sähkön hinnan muodostuminen	7
2.3	Sähköpörssi.....	8
2.4	Lämpövarasto	8
3.	Teknitaloudelliset tarkastelut	9
3.1	Laskentatyökalu.....	9
3.2	Lämpövaraston kapasiteetti, latausteho ja lataussykli.....	11
3.3	Datojen analysointi	12
3.4	Kannattavuus	16
3.5	Simulointi ja optimointi.....	17
3.5.1	Simulointi teoriassa mahdollisimman optimaalisella sähkön ostolla.....	18
3.5.2	Simulointi todennäköisyyteen perustuvalla sähkön ostolla.....	21
4.	Yhteenveto.....	23
	Lähteet	24

Liitteet 1. Laskentatyökalun valikot

2. Laskentatyökalun funktiot ja rakenteet

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

IRR Internal rate of return, sisäinen korkokanta

JA Jäännösarvo

NPV Net present value, nettonykyarvo

H hankintakustannus

i korkokanta

k vuotuinen tuotto

p investoinnin pitoaika

Alaindeksit

t sarjan t :s alkio

1. JOHDANTO

Tässä työssä esitellään laadittu laskentatyökalu sähköllä ladattavan lämpövaraston käytön optimoimiseksi. Lisäksi esitellään esimerkkejä laskentatyökalulla saatavista tuloksista. Tarkoituksena on selvittää tapauskohtainen lämpövaraston kapasiteetti, latausteho sekä lataus-
sykli. Työ on toteutettu lappeenrantalaisen Elstor Oy:n toimeksiannosta. Elstor Oy aikoo ainakin aluksi toimia vain Pohjoismaissa.

Työn teoriaosuudessa selvitetään lyhyesti kirjallisuustutkimuksen avulla lämpövaraston käytön optimoinnissa huomioitavia taustatekijöitä sekä perehdytään hieman sähkömarkkinoiden toimintaan. Teoriaosuus auttaa ymmärtämään lämpövaraston käytön suunnittelun teknisiä ja taloudellisia lähtökohtia sekä tämän työn tutkimuskysymysten taustoja. Analyysi ja johtopäätökset perustuvat laskentatyökalua apuna käytettyihin teknistaloudellisiin tarkasteluihin, esitettyyn teoriaan ja keskusteluihin toimijoiden kanssa.

Maailmanlaajuisen Pariisin ilmastopöytäkirjan pyrkimyksenä on rajoittaa ilmaston lämpeneminen 1,5 celsiusasteeseen verrattuna esiteolliseen aikaan ja EU:n asettama Suomen kansallinen päästövähennysvelvoite vuoteen 2030 mennessä on 39 prosenttia verrattuna vuoteen 2005. Yhtenä keinona tavoitteisiin pääsemiseksi Suomi aikoo lisätä uusiutuvan energian tuotannon osuuden 50 prosenttiin loppukulutuksesta 2020-luvun aikana, kun vuonna 2016 se oli 38,7 prosenttia (Tilastokeskus 2018). Tämä merkitsee mm. vaihtelevan tuuli- ja aurinkovoiman lisääntymistä. Suomen tuulivoimakapasiteetti oli 2044 MW ja verkkoon kytketyn aurinkosähkön 69.8 MW vuoden 2017 lopussa (STY 2017, Ahola, J 2018). Nämä näyttäisivät jatkavan kasvuaan, sillä tuotantokapasiteetin lisääminen halpenee nopeasti ja energian tuottaminen tuuli- ja aurinkosähköllä on jo nyt monin paikoin halvin keino tuottaa sähköä (Ram, M. 2018). (Huttunen 2017)

Vaihtelevan tuotannon lisääntyminen aiheuttaa haasteita sähköverkon tehotasapainon ylläpitämiselle, joten jatkossa tullaan tarvitsemaan energiavarastoja ja kulutuksen joustoa. Sähkön varastoiminen lämpöenergiaksi on yksi hyvä tapa lisätä varastoja ja joustavuutta. Lämpövarastoilla voitaisiin korvata esimerkiksi teollisuuden yhteydessä olevia prosessilämpöä tuottavia lämpövoimalaitoksia.

2. KÄSITTEET JA TAUSTATEKIJÄT

Tässä kappaleessa käsitellään lyhyesti tämän työn kannalta keskeisimmät käsitteet ja taustatekijät. Sähköllä ladattavan lämpövaraston toimintamallin selvittämiseksi on tärkeää ymmärtää sopivin osin tehotasapainon merkitys, sähköverkon asettamat rajoitteet, sähkön hinnan muodostuminen, sähköpörssin toiminta sekä lämpövaraston toimintaperiaate.

2.1 Sähkön siirto ja tehotasapaino

Suomessa sähkönsiirron kantaverkkoa ylläpitää Fingrid Oyj. Kantaverkko muodostuu 400 kV:n, 220 kV:n ja 110 kV:n jännitetasojen verkoista. Suomi kuuluu yhteispohjoismaiseen sähköjärjestelmään Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan kanssa. Pohjoismainen järjestelmä on yhdistetty Venäjään ja Baltiaan Suomen kautta. Suomen kantaverkossa toimii n. 100 jakeluverkkoyhtiötä, jotka harjoittavat verkkoliiketoimintaa oman verkkonsa alueella. Jakeluverkkoyhtiöiden jännitetasot ovat yleisimmin suurjännite (110 kV), keskijännite (n. 20 kV) ja pienjännite (0.4 kV). (Fingrid 2018, Energiategollisuus 2014)

Sähköverkossa sähkön tuotannon ja kulutuksen on oltava yhtä suuret, jotta sähköverkon taajuus pysyy nimellisessä arvossaan, mikä on Suomessa 50 Hz. Pätöteho on voimakkaasti taajuudesta riippuvainen, joten verkon taajuutta voidaan säätää lisäämällä tai vähentämällä sähkön tuotantoa tai kulutusta. Suomessa Fingrid Oyj pyrkii pitämään taajuuden välillä 49.9-50.1 Hz säätösähkömarkkinoiden ja taajuusohjattujen reservimarkkinoiden avulla. (Partanen, J. 2015)

2.2 Sähkön hinnan muodostuminen

Sähkön hinta muodostuu energiasta, siirrosta ja veroista. Sähkön kuluttaja voi ostaa energian miltä tahansa vähittäiskauppiaalta tai suurien toimijoiden kesken suoraan pörssistä. Siirtomaksu riippuu paikallisen verkkoyhtiön hinnastoista. Yleissiirron hinta määräytyy sulakekoosta riippuvasta perusmaksusta ja energiamaksusta. Käyttäjille, joille yleissiirrolla maksimissaan siirrettävä teho ei riitä, käytetään tehosiirtohinnastoa. Tehosiirrosta hinta määräytyy kiinteästä maksusta, päto- ja loistehomaksusta sekä energiamaksusta. Taulukossa 2.1 on esimerkki Lappeenrannan Energiaverkot Oy:n keskijännitetelesiirtohinnastosta. Siirtohintoihin lisätään myös voimassa oleva sähkövero. Sähkövero on I veroluokassa 2.79372 snt/kWh ja II veroluokassa 0.8717 snt/kWh (sis. alv 24 %). (Partanen, J. 2015, Lappeenrannan Energiaverkot Oy 2018)

Taulukko 2.1 Lappeenrannan Energiaverkot Oy:n keskijännitetelesiirtohinnasto 1.12.2018 alkaen (sis. alv. 24%).

Keskijännitesierto (10 - 30 kV)	Arvo	yksikkö
Kiinteä maksu	476,59	€/kk
Pätötehomaksu	1,01	€/kW, kk
Energiamaksu, päivä	3,06	snt/kWh
Energiamaksu, yö	1,36	snt/kWh
Loistehomaksu	2,65	€/kvar, kk

2.3 Sähköpörssi

Pohjoismaiden ja Baltian maiden alueella toimiva sähköpörssi on Nord Pool Spot ja tämän alueen sähköverkko muodostaa fyysisen markkinapaikan sähkön myynnille. Nord pool:n Elspot-markkinoilla sähkön systeemihinta eli alueesta riippumaton hinta jokaiselle vuorokauden tunnille muodostuu suljettuna huutokauppana osto- ja myyntitarjousten perusteella. Kaupankäynnin kohteena ovat 0,1 MWh:n ja sen kerrannaisten kiinteä sähköntoimitus. Seuraavan vuorokauden tuntien 0-23 tarjoukset tulee jättää klo 13:00 mennessä. Systeemihinnan muodostava markkina-alue muodostuu viidestätoista tarjousalueesta, joista Suomi on yksi. Jos tietyllä alueella ei ole tarpeeksi tuotantoa ja tarjousalueiden välillä ei ole riittävästi siirtokapasiteettia, niin alueelle muodostuu systeemihintaa korkeampi aluehinta. (Partanen, J. 2015)

Elspot-markkinan jälkimarkkinana toimii Elbas-markkina, jossa käydään kauppaa kuluvan vuorokauden tunneista. Jos toimija ei saa Elspot-markkinoilta ostettua tai myytyä haluttua määrää sähköä, tilanne voidaan korjata Elbas-markkinoilla. Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla käydään kauppaa myös johdannaisista eli tuotteista (futuurit ja optiot) sähkön hinnan vaihteluun liittyvien riskien hallintaan. Johdannaiskauppaa käydään Nasdaq OMX Commodities -finanssimarkkinoilla. (Partanen, J. 2015)

2.4 Lämpövarasto

Elstor Oy:llä on kehitteillä sähköllä ladattava ja konttiin sijoitettu korkean lämpökapasiteetin lämpövarasto. Lämpövarastoa voitaisiin käyttää esimerkiksi teollisuuden prosessilämmön ja -höyryn tuottamiseen ja siksi varaston lämpötila on oltava aina käyttöä varten riittävän suuri. Investointina lämpövaraston kilpailukyky perustuu mahdollisuuteen ostaa sähköä halvalla ja käyttää se lämpönä silloin kun on tarve. Samalla se osaltaan auttaisi ylläpitämään tehotasapainoa ja siten parantaisi voimansiirtojärjestelmän toimintavarmuutta. Jos kuorma on vakio, niin sähköä tulee varastoida aina huomattavasti kuorman tehoa suuremmalla teholla. Lämpövarasto voisi toimia myös säätösähkömarkkinoilla ja mahdollisesti reservisähkömarkkinoilla.

3. TEKNISTALOUDELLISET TARKASTELUT

Tässä kappaleessa esitellään laskentatyökalu ja tehdään työkalua apuna käyttäen lämpövarastolle teknistaloudellisia tarkasteluja. Lisäksi selvitetään perusteita kapasiteetin, lataustehon ja lataussyklin määrittämiseksi sekä taloudellisen kannattavuuden arvioimiseksi. Lähtökohtana on toimiminen pelkästään Elspot-markkinoilla, eikä esimerkiksi johdannaiskaupan, säätösähkömarkkinoiden tai päästökaupan käyttöä ja merkitystä huomioida. Myöskään reservimarkkinoilla toimimista ei tarkastella.

3.1 Laskentatyökalu

Laskentatyökalu on toteutettu Python-ohjelmointikielellä ja ohjelmaa voi käyttää esim. ANACONDA-ohjelmointialustalla tai Python IDLE:llä, johon on asennettu *numpy* ja *matplotlib* kirjastot. Ohjelmassa on kaksi päätoimintoa lämpövaraston käytön ja mitoituksen optimointia varten: 1. Ohjelma lukee sähkön historialliset Elspot-tuntihinnat csv-tiedostoista ja laskee vuotuisen keskihinnan lataussyklin halvimpien käyttötuntien perusteella sekä kirjoittaa tuloksista taulukot csv-tiedostoihin. Ohjelma piirtää myös kuvaajat sähkön hinnasta vuorokautisten lataustuntien funktiona, kuvaajan todennäköisesti halvimmista latausajankohdista sekä yöllä ja päivällä tapahtuvien lataustuntien vertailusta. Halutessaan laskennassa ja halvimpien tuntien valinnassa voi ottaa huomioon muutamien eri verkkoyhtiöiden hinnat, sähköveron ja alv:n.2. Ohjelma Simuloi lämpövaraston toimintaa Elspot-markkinoilla ja tulostaa mm. korottoman takaisinmaksuajan keskimääräisellä tuotolla, nettonykyarvon ja sisäisen korkokannan, kun tulot ovat säästöjä vertailukohteeseen nähden.

Sähkön hankinta pörssistä mallinnetaan valitsemalla lataustunnit datasta ohjelman käyttäjän valinnan mukaan kolmella eri menetelmällä: Teoriassa mahdollisimman optimaalisesti, jolloin oletetaan, että saadaan aina parhaat mahdolliset tunnit tai hieman realistisemmin oletamalla, että saadaan haluttu määrä sähköä datojen analyysin perusteella todennäköisimmin halvimmillä tunneilla. Kolmannessa menetelmässä oletetaan, että saadaan haluttu määrä sähköä todennäköisimmin halvimmillä tunneilla, kun lataussyklin kaikki lataustunnit ovat peräkkäin.

Lähtöarvot voi asettaa käsin tai laittaa ohjelman etsimään iteroimalla sopivat arvot nettonykyarvon maksimoimiseksi. Ohjelmalle annettavat syötteet kirjoitetaan ”input.txt” nimiiseen tekstitiedostoon, koska tarvittavia syötteitä on paljon. Näin ohjelman käyttö on nopeampaa ja syötteet pysyvät tallessa. Tekstitiedoston saa auki ohjelman päävalikosta, jolloin ohjelma jatkaa toimintaa vasta, kun tekstitiedosto on suljettu. Taulukossa 3.1 on esitetty tekstitiedostosta löytyvät muuttujat, oletuksena olevat lähtöarvot sekä lyhyet selitteet muuttujille. Näitä oletusarvoja käytetään tämän työn esimerkkitarkasteluissa, ellei toisin mainita.

Ohjelma rakentuu valikoista, funktioista, kirjastoista ja luokista. Liitteessä 1. on kuvat ohjelman valikoista ja toiminnoista ja liitteessä 2. ohjelman funktioiden ja rakenteiden sanalliset kuvaukset. Ohjelman toiminnan kannalta tarvittavat datatiedostot ja input.txt-tiedosto on oltava samassa kansiossa kuin itse ohjelma. Alustavasti dataa on ladattu kuuden vuoden ajalta 2013-2018 ja niitä voi lisätä sitä mukaa, kun uusia julkaistaan (Nordpool 2019). Datatiedostot tulee olla nimettynä seuraavasti: esim. ”2013.csv”. Ohjelmassa ei ole aivan täysin kattavaa virheenkäsittelyä tai syötteen tarkistusta, koska ohjelma on tarkoitettu lähinnä vain rajattuun tehtävään ja oletuksena on, että ohjelman käyttäjä ymmärtää mitä on tekemässä ja käyttää ohjelmaa loogisesti. Lisäksi näin ohjelma pysyy hieman helppolukuisempana ja selkeämpänä ajatellen, jos ohjelmaan halutaan tehdä muutoksia tai lisäyksiä.

Kokeilujen perusteella ohjelma vaikuttaisi toimivan halutulla tavalla, mutta sille ei ole tehty kattavaa dokumentoitua testausta. Tässä työssä ohjelman kattavaan testaukseen ei oteta enempää kantaa. Elstor Oy:n on kuitenkin suositeltavaa toteuttaa laskentatyökalulle huolellinen testaus, mikäli laskentatyökalulla saatuja tuloksia aiotaan esimerkiksi esittää mahdollisille asiakkaille markkinointimielessä.

Taulukko 3.1 Laskentatyökalulle annettavat ”input.txt”-tekstitiedoston syötteet, oletuksena olevat lähtöarvot sekä lyhyet selitteet muuttujille.

Muuttuja	Arvo ja yksikkö	Selite
kapasiteetti_kontti	5 [MWh]	Yhden kontin nimellinen kapasiteetti.
lataustunnit_lkm	5 [kpl/vrk]	Lataustuntien lkm. vuorokaudessa.
lataus_P	2.5 [MW]	Latauksen sähköteho.
hyotysuhde	0.95	Varastoinnin hyötysuhde (0.95 = 95 %).
verrokki_hyotysuhde	0.95	Vertailukohteen lämmöntuoton hyötysuhde (0.95 = 95 %).
verrokki_hinta	66.80 [€/MWh]	Vertailukohteen energian hinta .
perus_verrokki	perus_sahko [€/kk]	Verailukohteen perusmaksu (perus_sahko = oletuksena sama kuin sähköllä).
kontin_ominaishinta	50000 [€]	Hankintakustannus/kontti, kapasiteetista riippuva osa.
kontin_pohjahinta	200000 [€]	(hankintakustannus/kontti, vakio minimiosa)
hankintakustannus_verrokki	100000 [€]	Vertailukohteen hankintakustannus. huomioidaan laskelmassa varaston hankintakustannusta pienentävänä tekijänä
vakuutus	0 [€/a]	Varaston vakuutus.
vakuutus_verrokki	0 [€/a]	Vertailukohteen vakuutus.
kaytto_kunnossapito_hallinnointi	0 [€/a]	Varaston käyttökustannukset.
kaytto_kunnossapito_hallinnointi_verrokki	0 [€/a]	Vertailukohteen käyttökustannukset.
lainan_osuus_rahoituksesta	0	Annuiteettilainan osuus hankintakustannuksen rahoituksesta (0.5 = 50 %. Kun 0, muilla lainan parametreillä ei ole merkitystä).
lainan_korko	0.03	Annuiteettilainan korko vuodessa.
lainan_takaisinmaksuaika	10 [a]	Lainan takaisinmaksuaika. Tasaerämaksujen määrä.
pitoaika	30 [a]	Investoinnin pitoaika.
vuosikorkokanta	0.05	Korkokanta NPV:n laskennassa.
JA	0 [€]	Investoinnin jäännösarvo.
alv	1	Arvonlisävero (1 = ei käytössä, 1.24 = käytössä Elspot-hinnoissa, vekko-yhtiön hinnoissa ja sähköverossa).
sahkovero	7.03 [e/MWh]	Sähkövero (7.03 veroluokka 2, alv 0 %)

TOIMINNOT JA VALINNAT		
menetelma	0	Sähkön oston mallinnus. 0 = ideaali, 1 = tod.näk. halvimmat yksittäiset tunnit. 2 = tod.näk. halvimmat peräkkäiset tunnit.
kuvaajien_piirto	1	Analysointitoiminnon kuvaajien piirto. 1 = päällä, 0 = pois päältä
latausvali	1 [vrk]	Latausväli. Vain kokeilua varten, ei käytännöllinen (pidä normaalisti 1).
patotehomaksu_ylikirjoitus	-1 [e/MW, kk]	alv 0%. Ylikirjoittaa verkkoyhtiön päätötehomaksun. (negatiivinen arvo = toiminto ei käytössä)
loistehomaksu_ylikirjoitus	-1 [e/kk]	alv 0%. Ylikirjoittaa verkkoyhtiön loistehomaksun, osalla yhtiöistä on minimimaksu, joka on käytännössä [e/kk]. (negatiivinen arvo = toiminto ei käytössä)
perus_sahko_ylikirjoitus	-1[e/kk]	alv 0%. Ylikirjoittaa verkkoyhtiön kiinteän maksun. (negatiivinen arvo = toiminto ei käytössä)
ITEROINTI		
optimoitava	0	Optimoitava kannattavuuden tunnusluku. 0 = NPV, 1 = IRR, 2 = takaisinmaksuaika, 3 = kassavirta (säästöt pitoajan jälkeen).
kuormanylaraja	10000 [MWh/a]	Hyödyksi saatavan lämmön yläraja.
kuormanalaraja	2000 [MWh/a]	Hyödyksi saatavan lämmön alaraja.
lataustehoalaraja	2.5 [MW]	Latauksen sähkötehon yläraja.
lataustehoalaraja	0.1 [MW]	Latauksen sähkötehon alaraja.
kontinkapasiteetinylaraja	10 [MWh]	Yhden kontin nimellisen kapasiteetin yläraja.
kontinkapasiteetinalaraja	1 [MWh]	Yhden kontin nimellisen kapasiteetin alaraja.
lataustunninylaraja	16 [kpl]	Lataustuntien vuorokautisen lukumäärän yläraja (max. 24).
lataustunninalaraja	1 [kpl]	Lataustuntien vuorokautisen lukumäärän alaraja (min. 1).
askel_kapasiteetti	0.5 [MWh]	Iterointiaskel yhden kontin kapasiteetille
askel_latausteho	0.1 [MW]	Iterointiaskel latauksen sähköteholle.
askel_lataustunnit	1 [kpl]	Iterointiaskel lataustuntien vuorokautiselle lukumäärälle.

3.2 Lämpövaraston kapasiteetti, latausteho ja lataussykli

Laskentatyökalussa varaston kuormitus on oletettu vakioksi. Varaston toiminnan kannalta olennaisinta on energiataseen säilyminen tasapainossa ja lämpötilan pysyminen riittävänä sopivan ajanjakson, kuten vuorokauden aikana. Elspot-markkinoilla luontevasti toimiminen edellyttää, että varaston kapasiteetti riittää ainakin yhdeksi vuorokaudeksi, koska sähkökauppaa käydään aina seuraavan päivän tunneista. Jos varasto olisi tätä pienempi, niin jouduttaisiin ostamaan lähes varmasti joitakin kalliita tunteja, mikäli haluttaisiin toimia pelkän lämpövaraston varassa. Kapasiteetin ei kuitenkaan välttämättä tarvitse olla aivan vuorokauti-

sen energian tarpeen suuruinen, jos kuormitusta ja latausta tapahtuu yhtä aikaa. Laskentatyökalun viimeisimmässä versiossa kapasiteetti määritetään kokeilemalla tietyn ajanjakson ajan, ettei kapasiteetti ylity ladattaessa tai energia loppu kesken kuormituksessa. Näin kapasiteetti määräytyy sopivaksi myös silloin, jos latausväli ei pysy vakiona tai työkaluun lisätään eri tyyppisiä kuormitusmalleja.

Käytännössä Elspot-markkinoilta ei välttämättä aina saataisi haluttua määrää sähköä, jolloin jouduttaisiin käyttämään myös Elbas-markkinaa tai varaston kapasiteetissä pitäisi olla sopiva puskurivara tätä varten. Tällöin seuraavalle vuorokaudelle pitäisi lisätä lataustehoa tai lataustunteja. Laskentatyökalussa ei toistaiseksi ole mahdollista simuloida tällaista toimintaa.

Elstor Oy:n mukaan lämpövarastoa on ajateltu käytettäväksi enimmäkseen keskijänniteverkossa. Suurin mahdollinen latausteho määräytyy jakelumuuntajan tai siirtojohdon siirtokapasiteetin perusteella. Tässä työssä on esimerkiksi valittu rajoittavaksi tekijäksi Finn Electric Oy:n esitteen perusteella 2.5 MW (Finn Electric Oy). Lämpövaraston käyttöönotto saattaisi joissain tilanteissa aiheuttaa toimenpiteitä sähköverkon vahvistamiseksi. Oletuksena on, että lämpövarasto on sähköverkon kannalta täysin resistiivinen kuorma. Verkkoyhtiölle maksettava pätötehomaksu määräytyy huipputehon perusteella. Jos siis ladataan pienemmällä kuin huipputeholla, maksetaan turhasta. Tästä syystä laskentatyökalussa latausteho pidetään aina asetetussa huippuarvossa, vaikka todellisuudessa tehoa voi olla teknisistä syistä tarpeellista säätää.

Varastoa kannattaa ladata joka vuorokausi, koska pidemmällä lataustuntien valintasyklillä jouduttaisiin nostamaan kapasiteettia ja lataustehoa, mikä aiheuttaisi hankintakustannusten nousua ja pätötehomaksujen nousua. Tästä ei edes välttämättä koituisi lisähyötyä halvempien lataustuntien muodossa ilman edistyksellistä sähkön hinnan ennustusmenetelmää, koska kauppaa voidaan tehdä Elspot-markkinoilla vain seuraavan vuorokauden tunneista ja tulevana vuorokausina sähkö ei ole välttämättä yhtään halvempaa. Laskentatyökalussa on oletettu, etteivät mahdolliset huoltotyöt aiheuta häiriötä varaston käytölle.

Kapasiteetti, latausteho ja lataussykli riippuvat toisistaan, sovelluskohteen lämpöenergian tarpeesta, sähkön pörssihinnasta ja verkkoyhtiöiden asettamista maksuista. Lisäksi nämä tekijät vaikuttavat omilla tavoillaan hankinta- ja käyttökustannuksiin sekä hyötysuhteeseen, joten taloudellinen optimointi analyttisesti on melko haastavaa. Tästä syystä laskentatyökalulla ongelma ratkaistaan simulaatiolla, joka määrittää teknisiin ja taloudellisiin rajoitteisiin perustuvilla tiedoilla ja oletuksilla. Laskentatyökalussa hyötysuhde ja käyttökustannukset on asetettu ohjelman käyttäjän määriteltäviksi vakioksi ja hankintakustannus riippumaan konttien lukumäärästä sekä kapasiteetista.

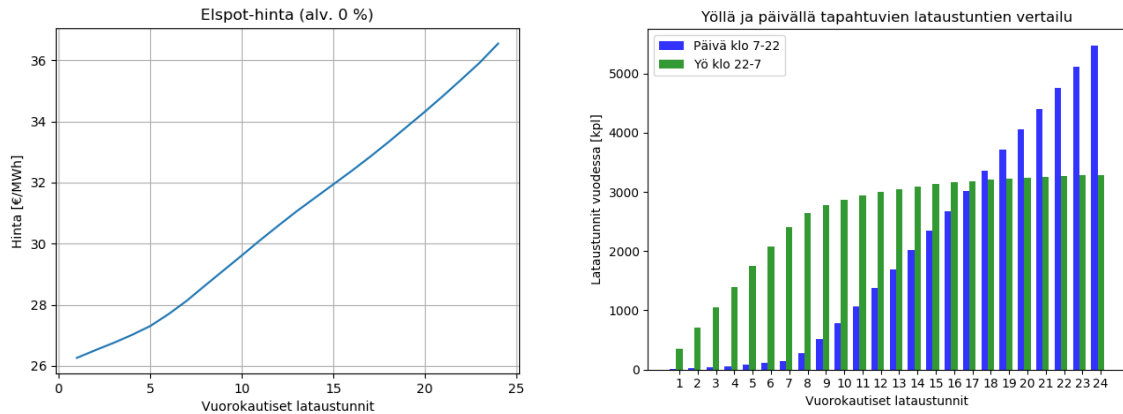
3.3 Datojen analysointi

Seuraavissa taulukoissa ja kuvissa on esimerkkejä laskentatyökalulla saatavista tuloksista, kun sähkön osto on mallinnettu hinnan kannalta ideaalisella menetelmällä. Taulukossa 3.2 on sähkön keskimääräiset Elspot-hinnat Suomen alueella eri vuosina, kun jokaisena vuorokautena valitaan tietty määrä halvimpia lataustunteja. Lataustuntimäärän 24/vrk hinnat vastaavat myös Nordpool:ssa esitettyjä vuotuisia keskihintoja (Nordpool 2019). Laskentatyökalu kirjoittaa vastaavan taulukon myös yöllä ja päivällä tapahtuvien lataustuntien vertailusta. Kuvassa 3.1 on em. tulosten keskiarvosarakkeet esitetty kuvaajina ja kuvassa 3.2 keskimääräinen Elspot-hinta kaupankäyntitunneittain. Taulukossa 3.3 ja kuvassa 3.3 hintoihin

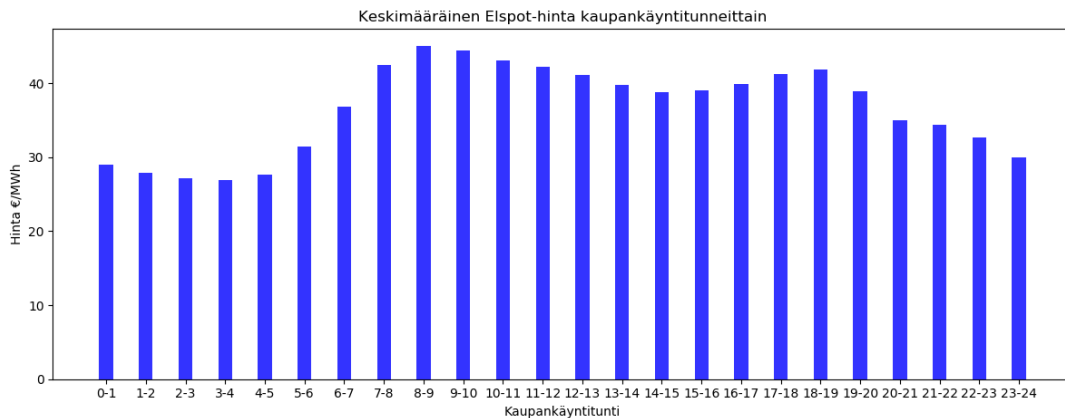
on lisätty sähkövero ja Lappeenrannan Energiaverkot Oy:n keskijännitetehtänsiirron energiamaksut (Lappeenrannan Energiaverkot Oy 2018). Kuvassa 3.4 on lisäksi kuvaajat teoreettisesta tapauksesta, jossa lataussykliksi on valittu viisi vuorokautta.

Taulukko 3.2 Sähkön keskimääräiset Elspot-hinnat Suomen alueella eri vuosina, kun jokaisena vuorokautena valitaan tietty määrä halvimpia lataustunteja

lataust./vuosi	2013	2014	2015	2016	2017	2018	keskiarvo
1	31.7	26.04	16.77	22.22	24.86	35.96	26.26
2	32	26.24	16.95	22.39	25.1	36.39	26.51
3	32.27	26.45	17.12	22.58	25.31	36.74	26.75
4	32.6	26.68	17.32	22.81	25.55	37.09	27.01
5	32.94	26.96	17.58	23.09	25.8	37.45	27.3
6	33.33	27.34	17.98	23.46	26.11	37.89	27.69
7	33.77	27.78	18.53	23.9	26.44	38.38	28.13
8	34.26	28.28	19.15	24.38	26.81	38.88	28.63
9	34.74	28.76	19.78	24.86	27.18	39.39	29.12
10	35.2	29.24	20.43	25.38	27.55	39.89	29.61
11	35.64	29.7	21.1	25.91	27.94	40.38	30.11
12	36.05	30.13	21.75	26.42	28.33	40.86	30.59
13	36.44	30.54	22.39	26.92	28.73	41.33	31.06
14	36.81	30.92	23	27.41	29.11	41.78	31.5
15	37.17	31.3	23.61	27.88	29.48	42.23	31.94
16	37.54	31.68	24.22	28.35	29.85	42.67	32.38
17	37.92	32.12	24.85	28.83	30.23	43.12	32.84
18	38.32	32.6	25.49	29.31	30.62	43.57	33.32
19	38.76	33.12	26.15	29.81	31	44.06	33.82
20	39.2	33.64	26.82	30.3	31.4	44.56	34.32
21	39.66	34.19	27.51	30.8	31.81	45.08	34.84
22	40.12	34.77	28.21	31.31	32.24	45.61	35.38
23	40.62	35.36	28.92	31.85	32.69	46.16	35.93
24	41.16	36.02	29.66	32.45	33.19	46.8	36.55



Kuva 3.1 Vasemmalla sähkön keskimääräinen Elspot-hinta Suomen alueella vuosien 2013-2018 perusteella halvimpien vuorokautisten lataustuntien funktiona. Oikealla yöllä ja päivällä tapahtuvien lataustuntien vertailu eri lataustuntimäärillä, kun päivä on klo. 7-22 ja yö klo. 22-7.

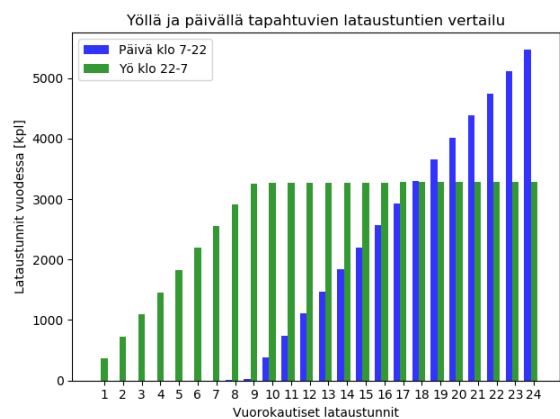


Kuva 3.2 Keskimääräinen Elspot-hinta Suomen alueella vuosien 2013-2018 perusteella kaupankäyntitunteittain.

Kuvasta 3.1 nähdään, että hinta kasvaa lähes lineaarisesti, kun lataustuntien määrä kasvaa. Viiden tunnin kohdalla kasvu näyttäisi nopeutuvan hieman. Halvimmat lataustunnit ovat useimmiten yöllä. Yöaikaan on vain kahdeksan tuntia, minkä yli mentäessä päivän lataustuntien määrä kasvaa nopeasti. Lataustuntimäärän 24/vrk kohdalla sinisen ja vihreän palkin summa vastaa vuoden kokonaistuntimäärää. Kuvasta 3.2 nähdään datojen perusteella todennäköisesti halvimmat tunnit, joihin ostotarjoukset voisi olla kannattavinta ensisijaisesti jättää.

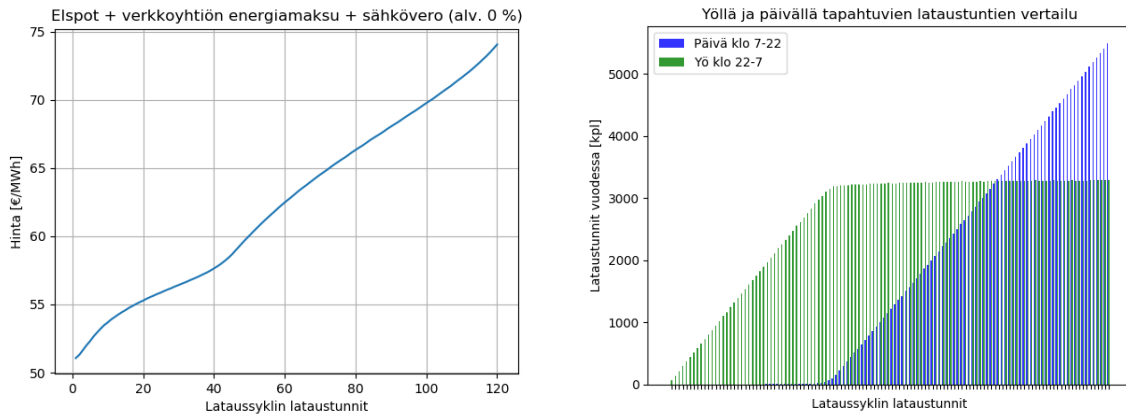
Taulukko 3.3 Suomen alueen Elspot-hinnasta, sähköverosta ja Lappeenrannan Energiaverkot Oy:n keskijännitetehtönsiirron energiamaksuista muodostuvat sähkön keskimääräiset hinnat eri vuosina, kun jokaisena vuorokautena valitaan tietty määrä halvimpia lataustunteja.

lataust./vuosi	2013	2014	2015	2016	2017	2018	keskiarvo
1	60.71	55.01	45.75	51.19	53.85	64.95	55.24
2	61.01	55.21	45.93	51.36	54.09	65.38	55.5
3	61.29	55.43	46.1	51.56	54.3	65.75	55.74
4	61.62	55.67	46.31	51.79	54.55	66.1	56.01
5	61.97	55.95	46.58	52.08	54.81	66.47	56.31
6	62.37	56.34	46.98	52.46	55.14	66.93	56.7
7	62.84	56.82	47.55	52.94	55.5	67.44	57.18
8	63.42	57.5	48.49	53.63	55.97	68.05	57.84
9	64.28	58.46	49.78	54.58	56.72	68.91	58.79
10	65.95	60.11	51.5	56.22	58.3	70.62	60.45
11	67.4	61.55	53.07	57.7	59.69	72.1	61.92
12	68.68	62.84	54.52	59.05	60.94	73.45	63.25
13	69.82	63.97	55.86	60.28	62.07	74.66	64.44
14	70.83	64.98	57.09	61.39	63.09	75.75	65.52
15	71.75	65.9	58.22	62.42	64.02	76.75	66.51
16	72.59	66.75	59.3	63.37	64.88	77.69	67.43
17	73.4	67.6	60.34	64.29	65.69	78.58	68.32
18	74.19	68.46	61.37	65.17	66.47	79.43	69.18
19	74.97	69.31	62.37	66.01	67.2	80.27	70.02
20	75.73	70.16	63.35	66.82	67.92	81.08	70.84
21	76.47	71	64.32	67.61	68.61	81.89	71.65
22	77.2	71.84	65.28	68.38	69.31	82.68	72.45
23	77.93	72.68	66.24	69.16	70	83.48	73.25
24	78.69	73.56	67.19	69.98	70.73	84.33	74.08



Kuva 3.3 Vasemmalla Suomen alueen Elspot-hinnasta, sähköverosta ja Lappeenrannan Energiaverkot Oy:n keskijännitetehtönsiirron energiamaksuista muodostuvan sähkön keskimääräinen hinta vuosien 2013-2018 perusteella halvimpien vuorokautisten lataustuntien funktiona. Oikealla yöllä ja päivällä tapahtuvien lataustuntien vertailu eri lataustuntimäärillä, kun päivä on klo. 7-22 ja yö klo. 22-7.

Kuvasta 3.3 havaitaan kuvaan 3.1 verrattuna, että verkkoyhtiön yötariffi suuntaa parhaat lataustunnit vieläkin voimakkaammin yölle. Verkkoyhtiön energiamaksu ja sähkövero nostaa hintaa myös merkittävästi.



Kuva 3.4 Vasemmalla Suomen alueen Elspot-hinnasta, sähköverosta ja Lappeenrannan Energiaverkot Oy:n keskijännitetehtönsiirron energiamaksuista muodostuvan sähkön keskimääräinen hinta vuosien 2013-2018 perusteella halvimpien lataussyklin lataustuntien funktiona, kun lataussykli on 5 vuorokautta. Oikealla yöllä ja päivällä tapahtuvien lataustuntien vertailu eri lataustuntimäärillä, kun päivä on klo. 7-22 ja yö klo. 22-7.

Kuvan 3.4 perusteella voidaan todeta, että sähkön hintaa voitaisiin teoriassa pienentää suuremalla lataussykellä, mutta tämä ei ole käytännössä mahdollista aiemmin käsiteltyjen seikkojen takia.

Laskentatyökalulla saatuja tuloksia tulkittaessa on syytä pitää mielessä, että tulokset perustuvat historiallisiin Elspot-hintoihin. Mahdollisesti lähiaikoina käynnistyvä ydinvoimalaitos Olkiluoto 3 todennäköisesti alentaa Suomen aluehintaa hieman (KL 2017). Myös lisääntyvä epätasainen sähköntuotanto aiheuttanee lisää yksittäisiä halpoja tunteja.

3.4 Kannattavuus

Laskentatyökalussa lämpövaraston taloudellisen kannattavuuden arviointia varten lasketaan koroton takaisinmaksuaika, nettonykyarvo, sisäinen korkokanta ja tilille kertyvä rahamäärä. Tuotot muodostuvat säästöistä vertailukohteeseen nähden. Säästöjä voi tulla halvemmasta energiasta, pienemmistä perusmaksuista, vakuutuksesta ja käyttökuluista. Verkkoyhtiölle maksettavat pätehomaksut ja mahdolliset minimiloistehomaksut ovat kuukausittaisia kuluja. Mahdollisella lämpövaraston hankkijalla on suurella todennäköisyydellä ollut jonkinlainen muusta sähkön käytöstä johtuva pätehomaksu ja sähkön perusmaksu jo entuudestaan, joten tämän huomioimiseksi laskentatyökalussa on toiminnot näiden maksujen ylikirjoittamiseksi. Laskentatyökalulla voidaan tarkastella olemassa olevan järjestelmän osittain tai kokonaan korvaamisen kannattavuutta tai investoinnin kannattavuutta, missä aikaisempaa lämmöntuottojärjestelmää ei ole tai se on vanhentunut. Jälkimmäisessä tapauksessa vertailukohteen hankintakustannus huomioidaan laskelmassa lämpövaraston hankintakustannusta pienentävänä tekijänä.

Laskentatyökalussa koroton takaisinmaksuaika lasketaan keskimääräisten tuottojen perusteella seuraavasti:

$$\text{koroton takaisinmaksuaika} = \frac{H \cdot p}{\sum_{t=1}^p k_t}, \quad (3.1)$$

missä H on hankintakustannus, p investoinnin pitoaika ja k vuotuinen tuotto. Takaisinmaksuaika kertoo missä ajassa säästöt ylittävät investointikustannuksen, mutta se ei ota huomioon mm. rahan arvon kehitystä tai takaisinmaksuajan jälkeisiä tuottoja, joten se ei sovellu yksinään kannattavuuden mittariksi. Nettonykyarvoa laskettaessa verrataan tulevia tuottoja ja kustannuksia nykyisiin kustannuksiin diskonttaamalla tulevat rahavirrat nykyarvoon:

$$NPV = -H + \sum_{t=1}^m \frac{k_t}{(1+i)^t} + \frac{JA}{(1+i)^t}, \quad (3.2)$$

missä i on korkokanta ja JA jäännösarvo. Investoinnin voidaan ajatella olevan kannattava, kun nettonykyarvo on suurempi kuin nolla. Sisäinen korkokanta (IRR) on korkokanta, jolla nettonykyarvo on nolla. Investointi on kannattava, jos IRR on suurempi kuin pääomalle asetettu tuottoprosentti. NPV:n nollakohdat voidaan laskea numeerisesti. Laskentatyökalussa NPV ja IRR on laskettu *numpy*-kirjaston funktioilla. IRR:n laskentafunktiota on muokattu siten, että se antaa vain suurimman reaalisen ratkaisun. (Motiva OY 2018)

Pitoajan aikana tilille kertyvä rahamäärä saadaan summaamalla jokaisen vuoden tuotot. Lisäksi laskentatyökalulla voidaan asettaa rahoituksen osuudeksi halutunlainen annuiteettilaina ja tarkastella sen vaikutusta.

3.5 Simulointi ja optimointi

Simuloinnissa käydään läpi ladattuja vuoden jokaisen tunnin Elspot-hinnan sisältäviä data-tiedostoja, joiden hintoihin on lisätty sähkövero ja valitun verkkoyhtiön energiamaksut. Jos data loppuu ennen kuin investoinnin pitoaika on loppunut, datan läpikäynti aloitetaan alusta. Kuukausi- ja vuosimaksut huomioidaan aina kuukauden ja vuoden vaihtuessa. Simuloinnissa valitaan aina voimassa olevan vuorokautisen lataustuntimäärän mukaan seuraavan päivän lataustunnit ja verrataan sähköllä tuotetun lämpöenergian hintaa asetettuun vertailukohteen hintaan. Samalla seurataan varaston lämpöenergiaa. Varaston tilan seurannan avulla määritetään varastolle sopiva kapasiteetti, mutta se voisi olla tarpeellinen myös, jos työkaluun halutaan mallintaa esimerkiksi satunnaisesti käyttäytyvä kuorma, jolloin lataustuntien määrää tai lataustehoa voitaisiin muuttaa lennosta varaston energian perusteella.

Tämän työn esimerkkitarkekselussa on käytetty vertailuhintana Lappeenrannan Energia Oy:n 1.4.2019 voimassa olevaa maakaasun hintaa 66.80 €/MWh (alv. 0%), joka sisältää energian, siirron, energiasisältöveron, hiilidioksidiveron ja huoltovarmuusmaksun (Lappeenrannan Energia Oy). Maakaasun perusmaksu on asetettu oletuksena yhtä suureksi kuin sähköllä, jolloin perusmaksusta koituvat säästöt menevät laskennassa aina nollaksi. Maakaasun hintaa ei ole määritelty läheskään yhtä tarkasti kuin sähkön hintaa. Esimerkkitarkekselujen ensisijainen tarkoitus on esitellä laskentatyökalun toimintoja, joten tarkkuus on riittävä tätä työtä varten. Tuloksista ei siis kannata tehdä täysin suoria johtopäätöksiä kannattavuuden suhteen. On myös huomioitava, että maakaasuverkko on hyvin rajallinen verrattuna sähköverkkoon, mikä tuo sähköllä ladattavalle varastolle hieman lisäetua markkinoilla. Lämmöntuottopolttoaineita on kuitenkin useita, eikä niihin oteta enempää kantaa tässä työssä.

Aiemmin todettiin, että lämpövaraston optimoitavien parametrien riippuvuuksia on hieman hankala käsitellä analyttisesti, joten laskentatyökaluun on tehty näiden etsimistä varten ”brute-force”-periaatteellinen iterointitoiminto. Iteroinnissa ajetaan simulaatiota kokeilemalla eri lataustehon, vuorokautisten lataustuntien määrän ja varaston kapasiteetin arvoja

ohjelman käyttäjän asettamalla raja-arvoilla ja iterointiasteleilla. Iteroinnissa pyritään maksimoimaan käyttäjän valitsema investoinnin kannattavuuden tunnusluku. Esimerkkitarkasteluissa optimointi tehdään nettonykyarvon suhteen. Myös kuorman vuosienergialle tulee asettaa yläraja, koska lämpöä ei ole tarkoitus tuottaa yli tarpeen. Jos taloudellisen optimipisteen mukainen tuotettu energiamäärä on pienempi kuin sovelluskohteen tarve, niin lämpövarastoa voidaan harkita käytettävän rinnakkain toisen lämmöntuottomenetelmän kanssa tai mahdollisesti hieman optimialueen ulkopuolella. Halutessaan vuosienergialle voidaan asettaa myös alaraja. Vuosienergia saadaan kertomalla lataustehon, hyötysuhteen ja vuorokautisten lataustuntien perusteella saatu vuorokautinen energia vuorokausien määrällä vuodessa.

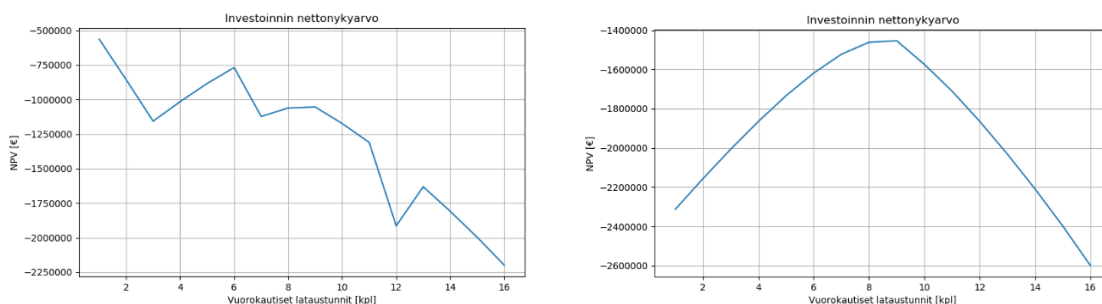
Laskentatyökalulla voidaan valita kolmesta muuttujasta samanaikaisesti iteroitavaksi yksi tai useampi, jolloin valitsematta jääneitä pidetään vakiona. Useamman kuin yhden muuttujan iterointi voi olla melko hidasta. Kappaleen 3.5.1 simulaatioissa sähkön pörssistä ostaminen on mallinnettu valitsemalla datasta aina mahdollisimman halvat tunnit ja kappaleen 3.5.2 simulaatioissa valitsemalla analysoinnin perusteella todennäköisimmin halvimmat tunnit.

3.5.1 Simulointi teoriassa mahdollisimman optimaalisella sähkön ostolla

Mahdollisimman halpojen tuntien valinta antaa teoriassa halvimmalla mahdollisimman hinnan, mutta menetelmä ei ole realistinen. Menetelmästä koituva epäsäännöllinen latausväli aiheuttaa myös tarvittavan kapasiteetin nousua, koska valitut lataustunnit voivat osua nykyisen vuorokauden alkuun ja seuraavan vuorokauden loppuun.

Seuraavissa kuvissa on esimerkkejä laskentatyökalulla saatavista iterointituloksista. Siirtohinnoiksi on valittu Lappeenrannan energiaverkot Oy:n keskijännitesierto. Kuvissa 3.5, 3.6 ja 3.7 on vuorokautisten lataustuntien, lataustehon sekä kontin kapasiteetin vaikutukset nettonykyarvoon. Näiden lisäksi taulukossa 3.4 on kerättyä laskentatyökalun tulosteita tehdyistä yhden kontin kapasiteetin, lataustehon ja lataustuntien iterointitarkasteluista eri lähtöarvoilla.

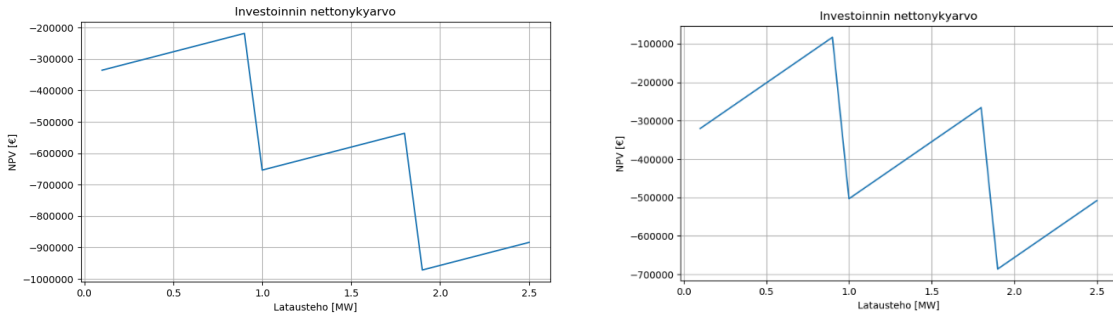
Kuvan 3.3 hintakäyrästä nähdään, että pelkän energian hinnan perusteella on mahdollisuuksia toimia kannattavasti maksimissaan viidellätoista lataustunnilla vuorokaudessa, kun lähtökohdat ovat kuten taulukossa 3.1. Suuremmalla lataustuntimäärällä sähkön hinta ylittää vertailukohteen hinnan.



Kuva 3.5 Laskentatyökalun iterointitoiminnolla saatu investoinnin nettonykyarvo vuorokautisten lataustuntien funktiona, kun yhden kontin kapasiteetti on asetettu arvoon 5 MWh (vasemmalla) ja 40 MWh (oikealla).

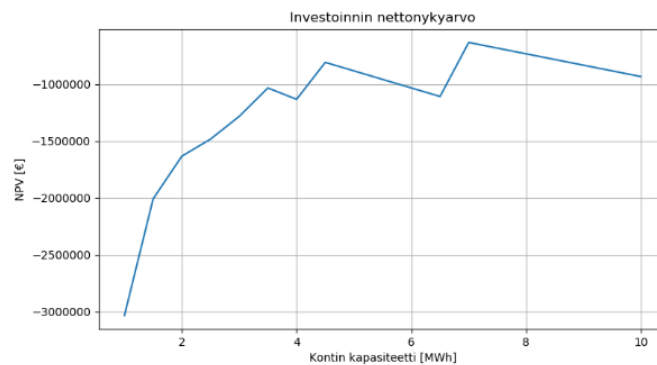
Kuvassa 3.5 nettonykyarvon kuvaaja kontin kapasiteetin arvolla 5 MWh käyttäytyy hieman epämääräisesti, koska lataustuntien lisääminen, lataustehon pysyessä samana, kasvattaa tuo-

tetun energian määrää, jolloin tarvitaan enemmän kapasiteettia. Kun yhden kontin kapasiteetti pysyy vakiona, ohjelma lisää konttien lukumäärää, mikä nostaa hankintakustannusta. Oikeanpuolisessa kuvaajassa yhden kontin kapasiteetti on asetettu arvoon 40 MWh, jotta nettohyötyarvon riippuvuus lataustuntien määrän energian hintavaikutuksesta on havaittavissa paremmin. Käytetyssä siirtohinnoittelussa on halvempi yötariffi, mikä näkyy kuvaajissa kahdeksan lataustuntin kohdalla. Oikeanpuolisessa kuvaajassa vakiolatausteholla kannattavuus paranee lataustuntien ja samalla tuotetun energian määrän kasvaessa, kunnes sähköenergian hinta alkaa olla liian suuri.



Kuva 3.6 Laskentatyökalun iterointitoiminnolla saatu investoinnin nettohyötyarvo lataustehon funktiona. Oikeanpuolisessa kuvaajassa päätöteho- ja perusmaksu on asetettu nolliksi.

Kuvasta 3.6 nähdään, että NPV kasvaa lineaarisesti lataustehon funktiona, kunnes tarvitaan yksi kontti lisää ja NPV romahtaa kasvaneen hankintakustannuksen takia. Oikeanpuolisen kuvaajan pienimuotoisessa herkkyytestissä päätöteho- ja perusmaksu on asetettu nolliksi, jolloin käyrä kasvaa jyrkemmin, koska suurempi päätöteho ei enää aiheuta suurempia kuluja. Tämä vastaisi tilannetta, jossa mahdollisella lämpövaraston hankkijalla olisi valmiiksi suuria harvinaisia tehopiikkejä, jotka voitaisiin ajoittaa lämpövaraston latauksen kanssa eri ajanhetkille.



Kuva 3.7 Laskentatyökalun iterointitoiminnolla saatu investoinnin nettohyötyarvo kontin kapasiteetin funktiona.

Ohjelmaan mallinnetun hinnan muodostumisen mukaan kontin lisääminen nostaa tiettyyn pisteeseen asti hankintakustannusta enemmän kuin yhden kontin kapasiteetin kasvattaminen. Yhden kontin lisääminen voi kuitenkin nostaa kokonaiskapasiteettia kerralla suuremaksi kuin on tarve. Käytännössä voisikin olla eri suuruisia kontteja käytössä samanaikaisesti, mutta laskentatyökalussa tällaista mahdollisuutta ei ole. Kuvassa 3.7 yhden kontin kapasiteetin kasvattaminen lisää aluksi kannattavuutta jatkuvasti n. pisteeseen 3.5 MWh asti, koska tarvittavien konttien määrä pienenee. Tämän jälkeen pieni kapasiteetin nosto aiheuttaa turhaan lisäkustannuksia, koska se ei aivan riitä konttien määrän vähentämiseen.

Taulukko 3.4 Laskentatyökalun iterointitoiminnolla saadut tulokset, kun iteroitaviksi muuttujiksi on valittu samanaikaisesti latausteho, vuorokautiset lataustunnit ja yhden kontin kapasiteetti. Sähkön osto on mallinnettu valitsemalla aina halvimmat tunnit.

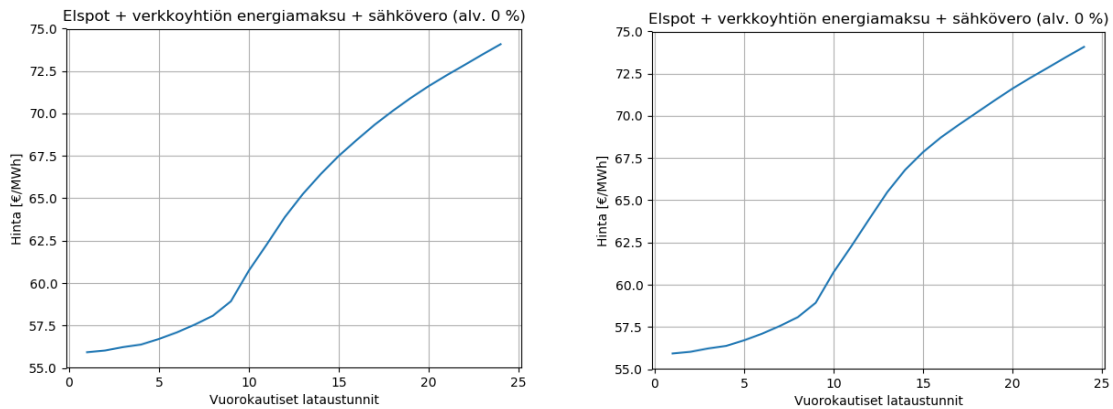
Tilanne	1.	2.	3.	4.
Vertailukohteen energian hinta [€/MWh]	66.80	66.80	60.00	66.80
Vertailukohteen hankintakustannus [€]	100000	100000	100000	100000
Kontin hinta [€]	200000 + 50000/MWh	200000 + 50000/MWh	200000 + 50000/MWh	150000 + 30000/MWh
Pätötehomaksu [€/MW,kk]	1483.87	0.00	0.00	0.00
Sähkön perusmaksu [€/kk]	384.35	0.00	0.00	0.00
Vertailukohteen perusmaksu (ei perustu todellisiin hinnastoihin) [€/kk]	384.35	384.35	384.35	384.35
Tilillä säästöä pitoajan jälkeen (kassavirtojen summa ilman hankintakustannusta) [€]	400137.49	1318882.83	355206.35	2100530.77
Hankintakustannus (vähennetty mahdollisen vertailukohteen hankintakustannus) [€]	400000.00	600000.00	400000.00	740000.00
Koroton takaisinmaksuaika keskimääräisellä tuotolla [a]	29.99	13.65	33.78	10.57
NPV (5 %) [€]	-192097.65	80910.30	-215234.80	345121.33
IRR [%]	0.0	6.16	-0.77	8.81
Kuorman vuosienenergia [MWh]	2185.52	3885.37	2081.45	6938.17
Varaston kapasiteetti [MWh]	6.00	10.00	6.00	18.00
Yhden kontin kapasiteetti [MWh]	6.00	10.00	6.00	9.00
Konttien lukumäärä [kpl]	1.00	1.00	1.00	2.0
Latausteho [MW]	0.90	1.60	1.00	2.50
Lataustunnit vuorokaudessa [kpl]	7.00	7.00	6.00	8.00

Taulukossa 3.4 Iterointi on tehty yhden kontin kapasiteetille, latausteholle ja lataustunneille samanaikaisesti. Tilanne 1. vastaa tapausta, jossa ollaan hankkimassa uutta lämmöntuottojärjestelmää ja lämpövaraston hankkiminen aiheuttaisi taulukon mukaisen pätötehomaksun ja perusmaksun. Tilanne 2. vastaa puolestaan tapausta, jossa kyseiset maksut ovat joka tapauksessa maksettavana, mutta vertailukohteen käyttäminen aiheuttaisi kuitenkin erillisen maakaasuverkkoliitynnästä johtuvan perusmaksun. Tilanteessa 3. kokeillaan vertailukohteen hinnan putoamisen vaikutusta ja tilanteessa 4. lämpövaraston hankintakustannuksen pienentämisen vaikutusta. Kohdassa ”tilillä säästöä pitoajan jälkeen” ei huomioida lämpövaraston hintaa, vaan pelkästään tuotot. Jos em. arvo on negatiivinen, varasto tuottaa vain tappiota.

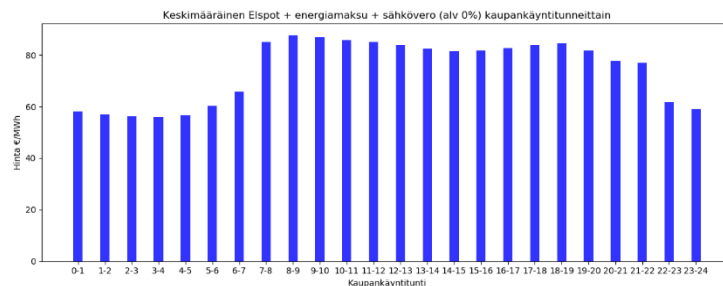
Tilanteesta 3. nähdään ensisijaisesti, että n. 7 €/MWh:n lasku vertailukohteen hinnassa huonontaa kannattavuutta hyvin merkittävästi ja samalla parametrien optimipiste siirtyy lähelle vuosienenergian alarajan 2000 MWh tuottavia arvoja. Tilanteista 2 ja 4 nähdään, että asetetuilla määritteillä sähköllä ladattava lämpövarasto on kilpailukykyinen lämmöntuottomenettelmä. Tilanteesta 4. nähdään lisäksi, että hankintakustannus vaikuttaa merkittävästi kannattavuuteen sekä käytön optimipisteeseen ja laskentatyökalua voidaan jossain määrin käyttää myös lämpövaraston sopivan myyntihinnan arviointiin.

3.5.2 Simulointi todennäköisyyteen perustuvalla sähkön ostolla

Realistisemmalla sähkön oston mallinuksella laskentatyökalun iterointitoiminnolla saatavat kuvaajat eivät poikkea kovinkaan merkittävästi olennaisten havaintojen suhteen teoriassa energian hinnan kannalta mahdollisimman optimaalisesta tilanteesta. Nyt tuloksista esitetään vain hintakäyrät yksittäisten tuntien ja peräkkäisten tuntien valintamenetelmillä kuvassa 3.8, todennäköisesti halvimmat kaupankäyntitunnit verkkoyhtiön energiamaksujen kanssa kuvassa 3.9 ja taulukon 3.4 tuloksiin verrattavat tulokset taulukossa 3.5. Todennäköisesti halvimpien yksittäisten tuntien ja peräkkäisten tuntien menetelmillä tulee tässä tapauksessa valituksi täysin samat tunnit, joten tulokset esitetään vain yhdessä taulukossa.



Kuva 3.8 Suomen alueen Elspot-hinnasta, sähköverosta ja Lappeenrannan Energiaverkot Oy:n keski-jännitetehtänsiirron energiamaksuista muodostuvan sähkön keskimääräinen hinta vuosien 2013-2018 perusteella halvimpien vuorokautisten lataustuntien funktiona, kun valitaan todennäköisesti halvimmat tunnit (vasemmalla) ja todennäköisesti halvimmat peräkkäiset tunnit (oikealla).



Kuva 3.9 Keskimääräinen Suomen alueen Elspot-hinnasta, sähköverosta ja Lappeenrannan Energiaverkot Oy:n keski-jännitetehtänsiirron energiamaksuista muodostuvan sähkön hinta kaupankäyntitunteittain.

Vertaamalla kuvaa 3.8 kuvaan 3.3 havaitaan, että todennäköisesti halvimpien tuntien käyttäminen tuottaa vain hieman ideaalitulannetta suuremman hinnan etenkin pienillä ja suurilla lataustuntimäärillä. Lataustuntimäärän kahdeksan kohdalla hinta lähtee kasvamaan hieman nopeammin, mikä johtunee päiväajan suuremmasta hinnan hajonnasta. Kun kuvan 3.8 kuvaajia verrataan keskenään, nähdään, että energian hinta on sama pienillä lataustuntimäärillä, kun valitaan todennäköisesti halvimmat yksittäiset tai peräkkäiset tunnit. Ainakin lataustuntimäärän 15 kohdalla on nähtävissä pientä eroa.

Simulaatiossa jokaisen vuorokauden lataustunnit on valittu hintajärjestyksessä alkaen pienimmästä suurimpaan kuvan 3.9 kaupankäyntituntien perusteella. Kuvasta 3.9 nähdään myös, että tietyillä lataustuntimäärillä yksittäiset todennäköisesti halvimmat tunnit sattuvat olemaan peräkkäin.

Vertailuista voidaan todeta, että valitsemalla todennäköisesti halvimmat lataustunnit voidaan päästä energian hinnan suhteen kohtalaisen lähelle ideaalitulannetta. Näin ollen johdannaiskaupan hyödyntäminen lämpövaraston kanssa ei luultavasti olisi kannattavaa, mutta on kuitenkin muistettava, että sähkön hinnan ennustamiseen liittyy paljon epävarmuutta.

Taulukko 3.5 Laskentatyökalun iterointitoiminnolla saadut tulokset, kun iteroitaviksi muuttujiksi on valittu samanaikaisesti latausteho, vuorokautiset lataustunnit ja yhden kontin kapasiteetti. Sähkön osto on mallinnettu valitsemalla todennäköisesti halvimmat yksittäiset tunnit, mikä tuottaa tässä tapauksessa saman tuloksen kuin peräkkäisten tuntien valinta.

Tilanne	1.	2.	3.	4.
Vertailukohteen energian hinta [€/MWh]	66.80	66.80	60.00	66.80
Vertailukohteen hankintakustannus [€]	100000	100000	100000	100000
Kontin hinta [€]	200000 + 50000/MWh	200000 + 50000/MWh	200000 + 50000/MWh	150000 + 30000/MWh
Pätötehomaksu [€/MW,kk]	1483.87	0.00	0.00	0.00
Sähkön perusmaksu [€/kk]	384.35	0.00	0.00	0.00
Vertailukohteen perusmaksu (ei perustu todellisiin hinnastoihin) [€/kk]	384.35	384.35	384.35	384.35
Tilillä säästöä pitoajan jälkeen (kassavirtojen summa ilman hankintakustannusta) [€]	579087.67	1625949.34	329174.70	1625949.34
Hankintakustannus (vähennetty mahdollisen vertailukohteen hankintakustannus) [€]	425000.00	600000.00	325000.00	350000.00
Koroton takaisinmaksuaika keskimääräisellä tuotolla [a]	22.02	11.07	29.62	6.46
NPV (5 %) [€]	-123641.47	239852.14	-153522.13	489852.14
IRR [%]	2.18	8.3	0.08	15.48
Kuorman vuosienergia [MWh]	3746.61	5099.55	2081.45	5099.55
Varaston kapasiteetti [MWh]	6.50	10.00	4.50	10.00
Yhden kontin kapasiteetti [MWh]	6.50	10.00	4.50	10.00
Konttien lukumäärä [kpl]	1.00	1.00	1.00	1.0
Latausteho [MW]	1.20	2.10	1.00	2.10
Lataustunnit vuorokaudessa [kpl]	9.00	7.00	6.00	7.00

Kun taulukon 3.5 tuloksia verrataan taulukkoon 3.4, huomataan, että optimipiste vuorokautisten lataustuntien osalta muuttui kaikissa tilanteissa hieman ja nyt tilanteiden 2. ja 4. optimipiste on sama. Kannattavuus parani kauttaaltaan pienemmän kapasiteetin tarpeen takia.

4. YHTEENVETO

Työn tuloksena valmistunut laskentatyökalu täyttää ja osittain myös ylittää sille asetetut tavoitteet, koska sitä voidaan käyttää lataustehon, lataussyklin ja kapasiteetin määrittämisen lisäksi sähkön Elspot-hintatietojen analysointiin yhdessä verkkoyhtiöiden hinnastojen kanssa, investoinnin kannattavuuden sekä jossain määrin myös lämpövaraston myyntihinnan arviointiin. Python-ohjelmointikielellä toteutetun työkalun rakenne on sellainen, että mahdollinen jatkokehitys ja toimintojen lisääminen on melko helppoa. Työkalu toimii keulujen perusteella halutulla tavalla, mutta sille ei ole suoritettu kattavaa dokumentoitua testausta.

Kun lämpövaraston kanssa toimitaan pelkästään Elspot-markkinoilla, lataussykli kannattaa olla yksi vuorokausi, jonka aikana ladataan tilanteesta riippuvan lataustuntimäärän ja ajankohdan mukaisesti sopivalla latausteholla. Kapasiteetti tulee olla sellainen, että se riittää seuraavan lataussyklin alkuun. Lataustehon teknisen ylärajan asettaa sähköverkon osalta todennäköisesti jakelumuuntaja tai siirtojohton siirtokapasiteetti ja taloudelliselta kannalta verkkoyhtiön päätötehomaksu. Lataustuntimäärien alentaminen pienentää sähkön hintaa, mutta samalla se myös pienentää maksimissaan sähköllä tuotettavan energian määrää, jos tehoa ei voida nostaa rajoitteiden takia. Halvimmat tunnit ovat yleensä yöllä etenkin, jos käytössä olevalla verkkoyhtiöllä on voimassa halvempi yötariffi. Optimaalinen vuorokautinen lataustuntimäärä on melko epätodennäköisesti huomattavasti yli kahdeksan tunnin, jos energian hinta merkittävä tekijä. Laskentatyökalulla optimaaliset arvot määritetään simulaation ja iteroinnin avulla ohjelman käyttäjän asettamilla lähtöarvoilla.

Laskentatyökalulla tehtyjen suuntaa antavien esimerkkitarkastelujen perusteella voidaan sanoa, että Elspot-markkinoilla toimiva sähköllä ladattava lämpövarasto voi olla kilpailukykyinen korvaamaan osittain tai kokonaan lämmöntuottojärjestelmän, jossa käytetään suunnilleen maakaasun hintaista polttoainetta. Tulokset perustuvat historiallisiin Elspot-hintoihin ja Lappeenrannan Energia Oy:n 1.4.2019 voimassa olevaan maakaasun hintaan, joten käytettyihin hintoihin liittyy epävarmuutta. Maakaasun perusmaksua ei myöskään määritetty todellisiin arvoihin perustuen.

Lämpövaraston kannattavuus saattaa parantua ajan myötä, koska todennäköisesti lähitulevaisuudessa käynnistyvä ydinvoimalaitos Olkiluoto 3 alentaneekin Suomen aluehintaa hieman ja myös lisääntyvä epätasainen sähköntuotanto aiheuttaneekin lisää yksittäisiä halpoja tunteja. Lämpövaraston kannattavuus riippuu voimakkaasti hankintakustannuksesta sekä sähkön pörssihinnasta ja verkkoyhtiön hinnastoista verrattuna polttamiseen perustuviin lämmöntuottomenetelmiin.

Selkeänä etuna lämpövaraston käytössä on polttamiseen perustuvaan lämmöntuotantoon verrattuna, ettei käytöstä koidu paikallisia pienhiukkaspäästöjä eikä myöskään juurikaan välillisiä kasvihuonepäästöjä, jos sähkö on tuotettu esim. aurinko- tuuli- vesi- tai ydinvoimalla. Jatkotutkimuksena voisi olla hyvä tarkastella päästökaupan merkitystä, johdannaiskaupan hyödyntämisen kannattavuutta ja lämpövaraston käyttöä Fingrid Oyj:n ylläpitämällä reservi- tai säätösähkömarkkinoilla. Erityisesti säätösähkömarkkinan hyödyntäminen voisi lisätä lämpövaraston kannattavuutta huomattavasti verrattuna pelkkään Elspot-markkinan käyttöön. Laskentatyökalua voisi kehittää edelleen esimerkiksi lisäämällä erilaisia kuormitusmalleja, tarkempia vertailukohteiden hintojen muodostumisen malleja, lisäämällä verkkoyhtiöiden hinnastoja sekä optimoimalla laskennan tehokkuutta.

LÄHTEET

Ahola, J. 2018. National Survey Report of Photovoltaic Applications in Finland 2017. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. [viitattu 24.4.2019]. Saatavissa <http://www.iea-pvps.org/>

Energiateollisuus 2014. Sähköverkkoyhtiöt. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.4.2019]. Saatavissa https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/sahkoverkot/sahkoverkkoyhtiot

Fingrid 2018. Sähkönsiirtoverkko. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.4.2019]. Saatavissa <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/fingridin-sahkonsiirtoverkko/>

Finn Electric Oy. Öljyeristeiset jakelumuuntajat. [verkkodokumentti]. [viitattu 12.4.2019]. Saatavissa https://www.finnelectric.fi/wp-content/uploads/sites/2/2017/01/Esite_Finn-Electric_Oljyeristeiset-jakelumuuntajat_fi_0315.pdf

Huttunen R. 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö, Lönnberg Print & Promo, 2017. 119 s. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 4/2017. ISBN 978-952-327-189-0

KL 2017. Valmistuessaan Olkiluoto 3 heiluttaa sähkön hintaa. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.4.2019]. Saatavissa <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/valmistuessaan-olkiluoto-3-heiluttaa-sahkon-hintaa/5385a800-f332-3a28-a9f0-b300e2a46ad7>

Lappeenrannan Energia Oy 2019. Maakaasuhinnasto. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.4.2019]. Saatavissa <https://www.lappeenrannanenergia.fi/sites/default/files/2019-04/1904-LRE-A4-Maakaasuhinnasto-Web.pdf>

Lappeenrannan Energiaverkot Oy 2018. Sähkön siirtohinnasto. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.4.2019]. Saatavissa https://www.lappeenrannanenergia.fi/sites/default/files/2018-10/sahkon_siirtohinnasto_1.1.2018_alkaen.pdf

Motiva Oy 2018. Toimenpiteen taloudellinen kannattavuus. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.4.2019]. Saatavissa https://www.motiva.fi/files/14771/Toimenpiteen_taloudellinen_kannattavuus_laskurin_ohje_2018.pdf

Nordpool 2019. Elspot Day-ahead prices. [verkkodokumentti]. [viitattu xx.x.2018]. Saatavissa <https://www.nordpoolgroup.com/historical-market-data/>

Partanen, J. 2015. Sähkömarkkinat: opetusmoniste. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Ram M, Child M, Aghahosseini A, Bogdanov D, Lohrmann A, Breyer C. 2018. A comparative analysis of electricity generation costs from renewable, fossil fuel and nuclear sources in G20 countries for the period 2015-2030. Elsevier. 18 s. Journal of Cleaner Production. ISSN 0959-6526

Suomen tuulivoimayhdistys, STY 2017. Tuulivoima Suomessa 2017. [verkkodokumentti]. [viitattu 12.11.2018]. Saatavissa <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-suomessa>

Tilastokeskus 2018. Tilastokeskuksen PX-Web-tietokannat [verkkodokumentti]. [viitattu 12.11.2018]. Saatavissa http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ene_ehk/statfin_ehk_pxt_014_fi.px/table/tableViewLayout2/?rxid=201f664b-74fa-4eeb-860c-8d6232a6f63e

Liite 1. Laskentatyökalun valikot

Päävalikko:

Anna haluamasi toiminnon numero seuraavasta valikosta:

- 1) Valitse verkkoyhtiö
- 2) Lue hintatiedot
- 3) Analysoi data
- 4) Kirjaa analysoiduista datoista saadut tulokset tiedostoon
- 5) Laske käsin asetetuilla lähtöarvoilla
- 6) Aja iterointi
- 7) Muuta lähtöarvoja
- 0) Lopeta

Siirtohinnaston valinta:

Valitse verkkoyhtiö

- 1) Lappeenrannan energiaverkot, Pienjännitetehtänsiirto
- 2) Lappeenrannan energiaverkot, Keskijännitesiirto (10 - 30 kV)
- 3) Lappeenrannan energiaverkot, Suurjännitesiirto (110 kV)
- 4) Helen sähköverkko, Pienjännitetehtänsiirto
- 5) Helen sähköverkko, Keskijännitesiirto (10 - 20 kV)
- 6) Tampereen sähköverkko, Pienjännitetehtänsiirto yli 250 MWh/a
- 7) Tampereen sähköverkko, Keskijännitesiirto 1 (10 - 20 kV) alle 10000 MWh/a
- 8) Tampereen sähköverkko, Keskijännitesiirto 2 (10 - 20 kV) yli 10000 MWh/a
- 9) Tampereen sähköverkko, Suurjännitesiirto (110 kV)
- 0) Älä ota verkkoyhtiötä käyttöön tai poista nykyinen verkkoyhtiö käytöstä

Iterointitoiminnon valinta:

Valitse iteroitavat muuttujat (muissa käytetään tällöin asetettuja lähtöarvoja):

HUOM. useamman kuin yhden muuttujan iterointi on hidasta. Aseta suuret askeleet tai pienet välit.

- 1) Latausteho
- 2) Yhden kontin kapasiteetti
- 3) Vuorokautiset lataustunnit
- 4) Latausteho ja yhden kontin kapasiteetti
- 5) Latausteho ja vuorokautiset lataustunnit
- 6) Yhden kontin kapasiteetti ja vuorokautiset lataustunnit
- 7) Latausteho, yhden kontin kapasiteetti ja vuorokautiset lataustunnit
- 0) Palaa takasin

Liite 2. Laskentatyökalun funktiot ja rakenteet

Tässä kuvataan sanallisesti ohjelman funktiot ja rakenteet järjestyksessä, jossa ne esiintyvät, kun koodia selataan ylhäältä alaspäin.

Kirjastot:

subprocess: Input-tekstitiedoston avaamista varten. Tarvitaan, jotta ohjelman saa pysäytettyä syötteiden muokkaamisen ajaksi.

warnings: Käytetään yhden numpy-kirjastosta aiheutuvan varoituksen ohitukseen. Ei ole välttämätön.

numpy: Hyödynnetään laskennassa (mm. NPV:n laskenta).

matplotlib: Kuvaajien piirto.

Luokat:

elspot: Tarvitaan jokaisen tunnin hintatiedon keräykseen datasta. Helpottaa käsittelyä, kun hintatiedolla pysyy tallessa tarkat aikamääritteet: vuosi, kuukausi, vuorokausi, viikonpäivä ja tunti.

verkkoyhtio: Käytetään verkkoyhtiön hinnastojen valinnassa. Luokkaan otetaan talteen kiinteä maksu, päätötehomaksu, loistehomaksu (mahdollinen minimi, koska varasto on resistiivinen) ja energiamaksut tariffit huomioiden.

Funktiot

paaohjelma: Pääohjelma, joka kutsuu paavalikko-ohjelmaa. Käyttäjän valinnan mukaan siirrytään ohjelman eri toimintoihin tai sammutetaan ohjelma. Verkkoyhtiön maksut alustetaan nolliksi. Pääohjelmassa on periaatteeltaan boolean-tyyppiset ns. ”flag”-muuttujat, joilla ohjataan ohjelman käyttöä oikeassa järjestyksessä. Verkkoyhtiön vaihdon jälkeen datatiedostot on luettava uudestaan ja mahdolliset analysoinnit on tehtävä uudestaan, jotta saadaan tiedot mm. tod.näk. halvimmista tunneista. Data on luettava ennen, kuin sitä voidaan analysoida tai voidaan tehdä laskentoja. Data on myös analysoitava, ennen kuin analysoinneista voidaan kirjoittaa tulokset csv-tiedostoon. Sähkön oston mallinnusmenetelmiä 1 ja 2 varten tarvitaan myös tiedot todennäköisesti halvimmista tunneista.

Input-tiedostoon tehdyt muutokset eivät vaikuta ohjelman käytön ohjauksen muuttujiin, joten jos käyttäjä muuttaa ALV:ta tai ylikirjoitustoimintoja, tulee käyttäjän olla tarkkana ja tehdä verkkoyhtiön valinta, datojen luku ja analysointi uudestaan, jotta muutokset tulevat voimaan. Sähkön oston menetelmät 1 ja 2 vaativat analysoinnin halvimpien aikojen selvittämiseksi

iteroi: Kokeilee eri arvoja latausteholle, kapasiteetille ja lataustunneille sisäkkäisissä loopeissa, tekee laskennan kutsumalla laskentaohjelmaa ja palauttaa optimaaliset arvot. Lukee aluksi lähtöarvot input-tiedostosta ja pyytää käyttäjää valitsemaan iteroitavat muuttujat tai palaamaan päävalikkoon kutsumalla iterointivalikko-ohjelmaa. Ohjelma ilmoittaa, jos valituilla raja-arvoilla asetettua kuorman vuosien energian alarajan vaatimusta ei pystytä täyttämään.

Ensimmäinen laskentakierros tehdään loopin ulkopuolella alustusta varten, jotta iterointi lähtee varmasti toimimaan. Myös optimoitavaksi valittu tunnusluku alustetaan. Lataustuntien ja kapasiteetin lähtöarvot otetaan muistiin, koska ne ovat sisemmissä loopeissa ja ne pitää palauttaa loopin päätyttyä ylärajalta alarajalle. Loopeissa on ”...”-merkkien tulostukset, jotta voidaan seurata iteroinnin etenemistä. Jokaisella iterointikierröksellä saatua uuden optimoitavan suureen arvoa verrataan tähän mennessä parhaaseen (takaisinmaksuajalla pienempi on parempi, muilla suurempi) ja jos uusi on parempi, niin uudet optimaaliset arvot otetaan talteen. Samalla huomioidaan, että vuosienenergia vaatimukset täyttyvät. Ohjelmaa voisi nopeuttaa esim. ohittamalla vuosienenergia vaatimukset täyttämättömät arvot suoraan toiminnoissa, joissa kuvaajia ei piirretä. IRR:llä ”ei ratkaisua” on asetettu negatiiviseksi äärettömäksi. Jos iterointi tehdään vain yhden muuttujan suhteen, tulostetaan kuvaaja optimoituva suure iteroitavan muuttujan funktiona.

laske: Simuloidaan toimintaa Elspot-markkinoilla olemassa olevien hintatietojen ja käyttäjän asettamien (tai iterointitoiminnon asettamien) lähtöarvojen perusteella. Aluksi luetaan lähtöarvot input-tiedostosta. Lähtöarvojen perusteella lasketaan toteutettavissa oleva kuorman teho, vuosienenergia ja vuorokautinen energia. Vertailukohteen teho lasketaan verrokin hyötysuhteen perusteella siten, että vertailukohde tuottaa saman hyötytehon kuin lämpövälasto.

Varaston kapasiteetti määritetään riittämään pisimmän latausvälin yli `maarita_kapasiteetti`-funktiolla. Konttien lukumäärä valitaan asetetun yhden kontin kapasiteetin perusteella pyöristäen ylöspäin. Valitun verkkoyhtiön mukaan määritetään siirtohinnat ja varaston hankintakustannus määritetään pohjahinnan, ominaishinnan ja konttien lukumäärän perusteella. Vertailukohteen hankintakustannus vähennetään varaston hankintakustannuksesta tunnuslukujen laskentaa varten. Mahdollinen annuitettilaina lasketaan kuitenkin käytännössä tapahtuvan hankintakustannuksen perusteella.

Simulointi tehdään käymällä dataa läpi sisäkkäisissä loopeissa, jolloin datojen ajalta jokainen tunti käsitellään. Jokaisena tuntina varastosta vähennetään vakiokuorman tuntienenergia. Aina tunnin 13 kohdalla valitaan seuraavan vuorokauden lataustunnit kutsumalla `valitseElspot`-ohjelmaa valitulla menetelmällä. Jos käsittelyssä oleva tunti on lataustunniksi valittu tunti, niin lasketaan energiasta koitua säästö ja lisätään varastoon ladattu energia. Kuukausien ja vuosien vaihdossa lisätään tai vähennetään kuukausi- ja vuosimaksuista koituvat säästöt tai kulut. Jokaisen vuoden kassavirrat otetaan talteen ja niillä lasketaan kannattavuuden tunnusluvut. Dataa on aluksi kuuden vuoden ajalta ja niiden läpikäynti aloitetaan alusta, kunnes asetettu investoinnin pitoaika saavutetaan.

valitseElspot: Valitsee seuraavan vuorokauden lataustunnit valitulla menetelmällä. Simuloinnin aloitusta varten valitaan datojen ensimmäisen vuorokauden tunneista, muutoin aina seuraavan vuorokauden. Tämä tehdään lisäämällä listan vuorokausi-indeksiä yhdellä ja jos ollaan kuukauden tai vuoden lopussa, niin lisätään kyseistä indeksiä ja valitaan ensimmäinen vuorokausi. Datan loputtua valitaan taas ensimmäinen vuorokausi.

Hinnan kannalta ideaalisessa menetelmässä järjestetään valitun vuorokauden tunnit aluksi hinnan mukaan, valitaan lataustuntien lukumäärän perusteella halvimmat tunnit listan alusta ja lopuksi järjestetään valitut tunnit aikajärjestykseen.

Todennäköisesti halvimpien tuntien menetelmässä lataustunnit kerätään datan analysoinnin perusteella saadun halvimmat_ajat -listan indeksin mukaan todennäköisesti halvimhasta alkaen.

Todennäköisesti halvimpien peräkkäisten tuntien menetelmässä ideana on saada aikaan kerran vuorokaudessa todennäköisesti halvin putkeen ladattava jakso. Latauksen alku- ja loppuajankohdat määritetään minBlokki-ohjelmalla. Paras yhtenäinen jakso osuu usein jatkumaan keskiyön yli, joten menetelmässä on if-lause-logiikka, joka selvittää tämän sujuumaan oikein.

maarita_kapasiteetti: Kapasiteetin määrittäminen. Määritetään varastolle kokeilemalla 0.1 MWh:n välein sellainen kapasiteetti ja alkutila, ettei latauksessa kapasiteetti ylitä tai kuormituksessa energia lopu kesken. Ajetaan nopeutukseksi vain yhden kuukauden ajan, kun valitaan aina samaan aikaan olevat tunnit (menetelmät 1 ja 2) ja jos lataussykli on epä-säännöllinen (menetelmä = 0), niin ajetaan kaikki data läpi. Menetelmällä 0 tarvitaan suurempi kapasiteetti, koska latausväliksi voi tulla esim. viidellä lataustunnilla vuorokaudessa 38 h, mikäli lataustunnit osuvat edes yhdesti nykyisen vuorokauden alkuun ja seuraavan loppuun.

lue: Datatiedostojen luku ja tietojen keräys. Tehdään datasta sisäkkäisistä listoista muodostuva paketti `datat[kuukaudet][vuorokaudet][tunnit][elspot-objekti]`, eli esim. `datat[vuosi][kuukausi][vuorokausi][tunti].hinta` antaa halutun tunnin hinnan. Hintoihin lisätään myös verkkoyhtiön energiamaksut ja alv., jos ne ovat valittuina. Datan lukemisen yhteydessä, tietoihin lisätään viikonpäivämääritteet mahdollisia verkkoyhtiöiden tariffeja varten.

Kun tiedostot on nimetty esim. seuraavasti: "2013.csv" ohjelma lukee vuodesta 2013 alkaen kaikki kansiossa olevat datatiedostot. Ohjelma etsii tiedostosta Suomen aluehinnan ja kerää tiedot talteen. Lukujen pilkut muutetaan pisteiksi. Kesäaikaan siirryttäessä ohitetaan tyhjä rivi ja talviaikaan siirryttäessä jätetään tuplatunti pois. Lukemisen lopuksi kesäaikaan siirtymisen kohdalle lisätään yksi vierekkäisen tunnin hintainen kopio. Näin saadaan jokaiselle vuorokaudelle 24 h, mikä helpottaa käsittelyä huomattavasti ja aiheuttaa vain häviävän pienen virheen. Funktiossa lasketaan myös keskimääräinen tuntimäärä vuodessa karkausvuoden takia. Tällä ei kuitenkaan ole kovinkaan suurta merkitystä.

kirjoita: Kirjoitetaan analysoidusta datasta csv-tiedostoon taulukko, jossa on vuosien keskihinnat eri lataustunneilla. Lisäksi kirjoitetaan vastaavat taulukot valituista yö- ja päivätunneista, kun yö = klo 22-07. Tämän lisäksi kirjoitetaan tiedosto todennäköisesti halvimista peräkkäisistä lataustunneista muodostuvista latausjaksoista eri lataustuntien määrillä. Tiedostot luodaan ohjelman sijaintikansioon. Ohjelma ilmoittaa, jos kirjoitettavan niminen tiedosto on auki eikä siihen voida siitä syystä kirjoittaa.

analysoi: Analysoi datan keskihintojen, sekä todennäköisesti halvimpien lataustuntien selvitystä varten ja piirtää kuvaajat hinnasta lataustuntien funktiona, päivä- ja yötuntien vertailusta sekä todennäköisesti halvimista kaupankäyntitunneista. Kuvaajien piirron saa pois käytöstä input-tiedostosta. Kuvaajien piirtoa varten hintoihin voi lisätä sähköveron. Tämä vaikuttaa vain kuvaajien piirtoon ja esimerkiksi laske-ohjelmassa sähkövero lisätään erikseen joka tapauksessa. Todennäköisesti halvimmat tunnit määritetään kutsumalla `analysoi2`-ohjelmaa. Datan käsittelyn logiikka on samankaltaista kuin laske-ohjelmassa ja `valitseElspot`-ohjelmassa, mutta nyt myös vuorokautisille lataustunneille on oma looppi, jotta

saadaan tiedot lataustuntien funktiona. Analysoinnin lopussa lasketaan keskiarvot kaikkien vuosien ajalta hinnalle sekä yöllä ja päivällä tapahtuville lataustunneille.

analysoi2: Selvittää, millä kellonajalla on todennäköisesti halvimmat lataustunnit. Funktio luo halvimmat_ajat-listan, jossa on aikajärjestyksessä datan perusteella laskettu keskihinta jokaiselle kaupankäyntitunnille. Data käydään läpi neljän sisäkkäisen loopin avulla, samalla lasketaan hintojen summat kaupankäyntitunneille ja lopuksi summat jaetaan summattujen termien määrällä.

siirto: Verkkoyhtiön valinta. Otetaan tiedot talteen verkkoyhtio-objektiin. Valinta tehdään kutsumalla siirtovalikko-ohjelmaa. Alustavasti ohjelmaan on kirjoitettu Lappeenrannan, Tampereen ja Helsingin siirtohinnat. Hinnat tulee tarkastaa silloin tällöin. Tarkastettu viimeksi 29.3.2019. Aluksi tarkastetaan input-tiedostosta ylikirjoitustoimintoihin kirjoitetut arvot sekä alv. Hinnat on kirjoitettu ohjelmaan alvillisina, joten jos alv. ei ole käytössä, niin hinnat jaetaan alv:lla. Huomattavaa on, että osalla yhtiöistä on minimiloistehomaksu ja yhtiöiden tariffit poikkeavat toisistaan. Tariffien hallinta on toteutettu, siten, että jokaisella verkkoyhtiöllä on kaikkien ohjelmassa olevien yhtiöiden tariffit, mutta hinnastoista puuttuvat tariffit on asetettu nolliksi. Kun uusia verkkoyhtiöitä lisätään, voi olla tarpeen lisätä myös funktioon "lue" uusia tariffin mukaisia if-else-rakenteita.

irr: Numpy-kirjaston viallinen irr-funktio korjattuna siten, että se palauttaa kaikki reaaliset ratkaisut. Pääohjelmassa tulostetaan vain suurempi NPV:n nollakohta.

minBlokki: Etsii summaltaan pienimmän vierekkäisistä alkioista muodostuvan halutun kokoisen "alilistan". Tämä tapahtuu tehokkaasti käymällä kaikki vaihtoehdot läpi siten, että uudessa kokeilussa vähennetään edellisen kokeilun ensimmäinen alkio ja lisätään seuraava alkio. Halvimman yhtäjaksoisen latausajanjakson etsinnässä tähän funktioon syötetään halvimmat_ajat -lista kaksinkertaisena, jotta saadaan selvitettyä keskiyön yli menevän latausjakson hinta.

analysointiPlot: Datojen analysoinnista saatavien tulosten kuvaajien piirto.

siirtovalikko: Valikko siirtoyhtiön valintaan. Palauttaa käyttäjän antaman valinnan.

iterointivalikko: Valikko iterointitoiminnon valintaan. Palauttaa käyttäjän antaman valinnan.

paavalikko: Ohjelman päävalikko. Palauttaa käyttäjän antaman valinnan.