Tampereen yliopisto

Julius Jokinen

AURINKOA SEURAAVAN AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN RAKENTEEN SUUNNITTELU

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Professori Asko Ellman
Tenure track -tutkija Janne Juoksukangas
Kesäkuu 2024

TIIVISTELMÄ

Julius Jokinen: Aurinkoa seuraavan aurinkosähköjärjestelmän rakenteen suunnittelu
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan DI-ohjelma
Kesäkuu 2024

Uusiutuvat energianlähteet ja etenkin aurinkoenergia kasvattavat suosiotaan, kun maailma siirtyy kohti puhtaampaa energiantuotantoa. Sen takia aurinkoenergian tehokkaampaan hyödyntämiseen kehitetään jatkuvasti erilaisia ratkaisuja. Osoituksena tästä ovat aurinkoa seuraavat aurinkosähköjärjestelmät, jotka suuntaavat aurinkopaneelit kohti aurinkoa, seuraavat sen liikettä ja lisäävät aurinkopaneelien energiantuottoa.

Kuitenkin suurin osa aurinkosähköjärjestelmistä on kiinteitä järjestelmiä, jotka asennetaan paikallaan oleviin telineisiin. Vaikka aurinkoa seuraavat järjestelmät lisäävät aurinkopaneelien energiantuottoa, ovat ne etenkin Suomessa marginaalituotteita. Aurinkoa seuraavien järjestelmien keskeisin ongelma on nimittäin kiinteitä järjestelmiä suuremmat kustannukset. Siksi tämän diplomityön tavoitteena on tutkia, millainen on Suomen olosuhteisiin parhaiten soveltuvan aurinkoa seuraavan järjestelmän rakenne, ja voiko aurinkoa seuraava järjestelmä olla Suomen olosuhteissa taloudellisesti kannattavampi kuin kiinteä järjestelmä. Tavoitteena on lopulta kehittää useampi konsepti aurinkoa seuraavan järjestelmän rakenteesta, valita niistä potentiaalisin ja tutkia sen kannattavuutta suhteessa kiinteään järjestelmään.

Työn alkupuolella hankitaan tietoa aurinkoa seuraavista järjestelmistä ja niiden kannattavuudesta sekä tutustutaan asiakaslähtöisen tuotekehityksen menetelmään. Menetelmän periaatteiden mukaisesti asiakastarpeista muodostetaan aurinkoa seuraavan järjestelmän tuoteominaisuudet. Työn aikana selvitettiin, että on olemassa useita erityyppisiä aurinkoa seuraavia järjestelmiä, joista toiset soveltuvat Suomen olosuhteisiin paremmin etenkin energiantuoton kannalta. Lisäksi tietyn tyyppiset aurinkoa seuraavat järjestelmät voivat olla Suomen olosuhteissa kiinteää järjestelmää taloudellisesti kannattavampia. Aurinkoa seuraavalta järjestelmältä myös vaaditaan monia erilaisia ominaisuuksia, joista kaikki eivät kuitenkaan ole asiakkaille yhtä tärkeitä. Siksi aurinkoa seuraavan järjestelmän kehityksessä voidaan hyödyntää tuoteominaisuuksien prioriteetteja.

Työn loppupuolella kehitetään neljä konseptia aurinkoa seuraavan järjestelmän rakenteesta hyödyntäen hankittuja tietoja sekä asiakaslähtöisiä tuoteominaisuuksia. Tuoteominaisuuksien sekä niiden prioriteettien avulla valitaan Suomen olosuhteisiin soveltuvimmat järjestelmätyypit sekä potentiaalisin konsepti. Lopuksi valitun konseptin taloudellista kannattavuutta arvioidaan suhteessa kiinteään aurinkosähköjärjestelmään. Konsepti suunnitellaan pidemmälle taloudellista analyysia varten, mutta suunnitteluprosessia ei työssä käsitellä tarkemmin. Jatkokehitykseen valitusta konseptista suunniteltu järjestelmä osoittautui taloudellisessa analyysissa kilpailukykyiseksi suhteessa kiinteään järjestelmään, ja kehitysmahdollisuuksia sillä on vielä paljon pidemmälle.

Avainsanat: aurinkoenergia, aurinkoseuraaja, aurinkosähköjärjestelmä, konseptointi, laadun talo, QFD-menetelmä

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Julius Jokinen: Designing the structure of a solar photovoltaic tracking system
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering
June 2024

Renewable energy sources, and solar energy in especially, are becoming more popular as the world shifts towards cleaner energy production. Therefore, different solutions are constantly developed to utilize solar energy more efficiently. This is proven by solar photovoltaic tracking systems, which align solar panels towards the sun, follow its movement and increase the energy output of the solar panels.

However, most photovoltaic systems are fixed systems, which are installed on static mounting structures. Although solar tracking systems increase the energy yield of solar panels, they are marginal products, especially in Finland. The main problem of solar tracking systems is their higher costs compared to fixed systems. Therefore, the aim of this thesis is to research what is the most suitable structure of solar tracking system for Finnish conditions, and whether a solar tracking system can be more economically feasible than a fixed system in Finnish conditions. Eventually, the aim is to develop several concepts for the structure of a solar tracking system, select the most potential one and analyse its economic feasibility in comparison to a fixed system.

The beginning of the work includes gathering information on solar tracking systems and their economic feasibility, as well as familiarizing with the method of customer-oriented product development. According to the principles of the method, customer needs are used to form the technical requirements of a solar tracking system. During the work, it was found that there are different types of solar tracking systems, some of which are better suited to Finnish conditions, especially in terms of energy production. In addition, certain types of solar tracking systems may be more economically feasible than fixed systems in Finnish conditions. There are also many different features required of a solar tracking system, but not all of them are equally important to customers. Therefore, the development of a solar tracking system can be based on the priorities of the technical requirements.

In the latter part of the thesis, four concepts of solar tracking system structure will be developed using the acquired information and customer-oriented technical requirements. The technical requirements and their priorities will be used to select the most suitable solar tracking system types for Finnish conditions and to select the most potential concept. Finally, the economic feasibility of the chosen concept will be compared to fixed photovoltaic system. The concept will be designed further for economic analysis, but the design process will not be discussed in more detail. The system designed from the concept selected for further development proved to be competitive with the fixed system in the economic analysis and has the potential for much further evolution.

Keywords: solar energy, solar tracker, photovoltaic system, concept design, House of Quality, QFD-method

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on toteutettu yhteistyössä teräsrakennevalmistaja Ukko Worksin kanssa. Diplomityöprojekti oli todella opettavainen, sillä sen aikana pystyin kehittämään ammattitaitojani sekä oppimaan paljon uutta. Kiitos Tommi Kiviselle mahdollisuudesta diplomityön tekemiseen sekä työni ohjaajalle Harri Ojansivulle useista hyvistä vinkeistä. Kiitos myös Tampereen yliopiston puolelta Asko Ellmanille varsinkin työn alkuvaiheen etenemisen kannalta tärkeistä neuvoista sekä työni tarkastamisesta.

Lopuksi kiitos perheelleni sekä lähimmäisille, jotka ovat olleet matkassa mukana opintojen varrella.

Tampereella, 10.6.2024

Julius Jokinen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
1.1 Kohdeyrityksen esittely 2
1.2 Tutkimuskysymykset ja -menetelmät 3
2. TAUSTATIEDOT JA ONGELMAN KUVAUS 5
2.1 Uusiutuvan energian kasvu 5
2.2 Aurinkoenergia ja kiinteä aurinkosähköjärjestelmä 5
2.3 Aurinkoa seuraava aurinkosähköjärjestelmä 7
2.4 Ongelman kuvaus 10
3. SUUNNITTELUPROJEKTIN TIEDONHANKINTA 13
3.1 Aurinkoa seuraavien järjestelmien jaottelu 13
3.2 Aurinkoa seuraavien järjestelmien ominaisuudet 19
3.3 Auringon seuraamisen energiahyöty Suomessa 25
3.4 Kaupalliset aurinkoa seuraavat järjestelmät 30
3.5 Aurinkoa seuraavien järjestelmien taloudellinen kannattavuus 31
3.6 Tiedonhankinnan yhteenveto 39
4. ASIAKASLÄHTÖINEN SUUNNITTELU 42
4.1 QFD-menetelmä 42
4.2 Laadun talo 44
4.3 Aurinkoa seuraavan järjestelmän asiakastarpeet ja tuoteominaisuudet 48
4.4 Asiakastarpeiden ja tuoteominaisuuksien arviointi 50
5. RAKENTEEN KONSEPTIKEHITYS QFD-MENETELMÄN AVULLA 55
5.1 Järjestelmätyyppien arviointi 55
5.2 Konseptikehityksen lähtötiedot 58
5.3 Konseptien arviointi 59
6. KANNATTAVUUDEN ARVIOINTI 62
6.1 Järjestelmien tuotot 62
6.2 Järjestelmien kustannukset 64
6.3 Taloudelliset laskelmat 66
6.4 Tulosten analysointi 68
7. YHTEENVETO 73
LÄHTEET 75
LIITE A: ASIAKASTARPEET 78
LIITE B: TUOTEOMINAISUUDET 79
LIITE C: KEHITETYT KONSEPTIT 80
LIITE D: SUUNNITELTU JÄRJESTELMÄ 83

KUVALUETTELO

Kuva 1. Työn tutkimusstrategia. 4
Kuva 2. Aurinkoa seuraavien järjestelmien jaottelu (muokattu lähteistä Awasthi et al. 2020, s. 397; Racharla ja Rajan 2017, s. 75). 14
Kuva 3. Yleisimmät aurinkosähköjärjestelmät liikkeen vapausasteiden ja suunnan mukaan jaoteltuna (muokattu lähteestä Rodríguez-Gallegos et al. 2020, s. 1518). 15
Kuva 4. Erityyppisten aurinkosähköjärjestelmien energiantuotot kuukausittain. 27
Kuva 5. Aurinkosähköjärjestelmien vuosittaiset energiantuotot. 28
Kuva 6. Aurinkoa seuraavien järjestelmien prosentuaaliset tuottoerot kuukausittain verrattuna kiinteään järjestelmään. 29
Kuva 7. Suoritettavat vaiheet ennen asiakastarpeiden arviointia laadun talolla (muokattu lähteestä Ficalora ja Cohen 2010, luku 1.1.1). 44
Kuva 8. Laadun talon rakenne (muokattu lähteestä Ficalora ja Cohen 2010, luku 5). 45
Kuva 9. Asiakastarpeiden vertailu ja prioriteetit QFD-työkalussa. 51
Kuva 10. Valmis laadun talo. 54
Kuva 11. Tuoteominaisuuksien vertailu ja pisteytys QFD-työkalussa. 56
Kuva 12. Järjestelmätyyppien vertailu QFD-työkalussa. 57
Kuva 13. Konseptien vertailu QFD-työkalussa. 60
Kuva 14. Aurinkoa seuraavan järjestelmän parametrien muutoksen vaikutus sähkön tasoitettuun tuotantokustannukseen. 69
Kuva 15. Aurinkoa seuraavan järjestelmän parametrien muutoksen vaikutus nettonykyarvoon. 70

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Keskeiset havainnot aurinkoa seuraavista järjestelmistä. 41
Taulukko 2. Tietoja vertailtavista järjestelmistä sekä niiden tuotot..... 63
Taulukko 3. Aurinkoa seuraavan ja kiinteän järjestelmän kustannukset. 66
Taulukko 4. Sähkön tasoitetut tuotantokustannukset ja laskennan lähtöarvot. 67
Taulukko 5. Aurinkoa seuraavan järjestelmän lähtöarvojen ja laskennan tulosten erot verrattuna kiinteään järjestelmään. 68

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AADAT	engl. azimuth-altitude dual axis tracker, kaksiakselinen atsimuutti-korkeus aurinkoseuraaja
EW	engl. east-west, itä-länsi
HOQ	engl. house of quality, laadun talo
HSAT	engl. horizontal single axis tracker, horisontaalinen yksiakselinen aurinkoseuraaja
HTSAT	engl. horizontal tilted single axis tracker, horisontaalinen aurinko-seuraaja kallistetuilla moduuleilla
LCOE	engl. levelized cost of electricity, sähkön tasoitettu tuotanto-kustannus
LDR	engl. light dependent resistor, valovastus
NPV	engl. net present value, nettonykyarvo
NS	engl. north-south, pohjois-etelä
PASAT	engl. polar aligned single axis tracker, polaarisesti kohdistettu kal-teva yksiakselinen aurinkoseuraaja
PVGIS	engl. Photovoltaic Geographical Information System, Euroopan ko-mission työkalu säteilymäärän ja aurinkosähköjärjestelmän suoritus-kyvyn laskentaan
QFD	engl. quality function deployment, tuotekehityksen, tuotejohdon ja markkinoinnin menetelmä
TSAT	engl. tilted single axis tracker, kalteva yksiakselinen aurinkoseuraaja
TTDAT	engl. tip-tilt dual axis tracker, kaksiakselinen kärkikääntö aurinko-seuraaja
VOC	engl. voice of the customer, asiakkaiden tarjoamaan kohdistamat toiveet ja tarpeet
VSAT	engl. vertical single axis tracker, vertikaalinen yksiakselinen aurin-koseuraaja

C_t	investoinnin vuosittaiset kulut (€)
d	energiantuoton vähenemä (%)
E_t	vuosittainen energiantuotto (kWh)
e	sähkön hinta (€)
F_t	vuosittaiset korkomenot (€)
I_t	alkuinvestointi (€)
M_t	vuosittaiset huoltokustannukset (€)
O_t	vuosittaiset käyttökustannukset (€)
R_t	investoinnin vuosittaiset tulot (€)
r	diskonttokorko (€)
S_t	nimellinen vuosittainen energiantuotto (€)
T	projektin kesto (a)
t	vuosi

1. JOHDANTO

Aurinkoenergialla on valtava potentiaali sen runsauden ja saatavuuden takia. Lisäksi aurinkoenergian kustannukset ovat alhaiset, käyttöönotto on nopeaa ja se auttaa siirtymään kohti puhtaampaa energiantuotantoa syrjäyttämällä fossiilisia polttoaineita. Aurinkoenergiaa tuotetaan aurinkosähköpaneeleilla, joiden energiantuotto riippuu paneeliin kohdistuvasta säteilymäärästä sekä paneelin pinnan ja säteiden välisestä kulmasta. Siksi aurinkopaneeli tuottaa sitä enemmän sähköenergiaa, mitä kohtisuorempaa auringonsäteet osuvat paneeliin. Lähellä päiväntasaajaa aurinko paistaa korkeammalta ja säteilymäärät ovat suurempia, joten siellä aurinkoenergiaa voidaan tuottaa suurempia määriä kuin lähempänä maapallon napoja. Suomen leveyspiireillä säteily on siis vähäisempää, ja aurinkopaneelit ovat optimaalisessa kulmassa vain hetken ajan keskipäivällä, kun ne on asennettu kohti etelää suunnattuihin kiinteisiin telineisiin. Aurinkoenergian suurin heikkous onkin epätasainen ja vähäinen sähköntuotanto. Ratkaisu aurinkopaneelien energiantuoton kasvattamiseen ja tasaamiseen ovat aurinkoa seuraavat aurinkosähköjärjestelmät. Niiden avulla aurinkopaneelit saadaan suunnattua kohti aurinkoa päivän ja vuorokaudenajan mukaan.

Aurinkoa seuraavat järjestelmät ovat kuitenkin kokonaiskustannuksiltaan kalliimpia kuin paikallaan oleviin telineisiin asennetut kiinteät järjestelmät. Aurinkoa seuraavien järjestelmien rakenne on monimutkaisempi, ne kuluttavat energiaa auringon seuraamiseen ja niiden moottorit sekä liikkuvat osat vaativat säännöllistä huoltoa. Moni saattaakin pohtia, onko aurinkoa seuraava järjestelmä taloudellisesti kannattava hankinta verrattuna kiinteään järjestelmään. Siksi työn tutkimuskysymykset ovat seuraavat: Millainen on Suomen olosuhteisiin parhaiten soveltuvan aurinkoa seuraavan järjestelmän rakenne? Voiko aurinkoa seuraava järjestelmä olla Suomen olosuhteissa taloudellisesti kannattavampi kuin kiinteä järjestelmä? Työn tavoitteena on siis ensin selvittää Suomen olosuhteisiin soveltuvimman aurinkoa seuraavan järjestelmän tyyppi sekä tutkia aurinkoa seuraavien järjestelmien kannattavuutta verrattuna kiinteisiin järjestelmiin. Tavoitteena on lopulta kehittää hankittujen tietojen avulla aurinkoa seuraavan järjestelmän rakenteesta useampi konsepti, valita niistä asiakaslähtöisten tuoteominaisuuksien perusteella potentiaalisin ja tutkia, onko valittu konsepti kiinteää järjestelmää kannattavampi.

Työ jakautuu neljään pääosaan, jotka ovat tiedonhankinta aurinkoa seuraavista järjestelmistä, tiedonhankinta QFD-tuotekehitysmenetelmästä ja sen hyödyntäminen, konseptikehitys ja konseptien vertailu sekä taloudellisen kannattavuuden arviointi. Tiedonhankintavaiheen tarkoituksena on tutustua olemassa oleviin aurinkoa seuraaviin järjestelmiin sekä perehtyä niiden toteutuksiin, ominaisuuksiin ja kannattavuuteen. Tärkeässä osassa työssä on asiakkaiden näkökulmien sisällyttäminen aurinkoa seuraavan järjestelmän rakenteen suunnitteluun. Siksi toisessa osassa tutustutaan QFD-menetelmään, jota käytetään asiakkaiden osallistamiseen tuotekehitysprosessiin. Toisessa osassa hyödynnetään kyselyitä, joiden avulla asiakkailta saadaan selvitettyä aurinkoa seuraavaan järjestelmään kohdistuvat asiakastarpeet ja muodostettua niistä järjestelmän tuoteominaisuudet. Kaikki asiakastarpeet ja tuoteominaisuudet eivät ole kuitenkaan yhtä tärkeitä. Siksi niiden prioriteettien selvittämiseen käytetään valmista QFD-taulukkotyökalua sekä QFD-menetelmän ensimmäistä tuotekehitysmatriisia eli laadun taloa. Työn kolmannen osan tarkoituksena on kehittää tiedonhankintavaiheessa kerättyjen tietojen ja tuoteominaisuuksien avulla useampi konsepti aurinkoa seuraavan järjestelmän rakenteesta ja valita niistä yksi jatkokehitykseen. Myös kolmannessa osassa hyödynnetään QFD-taulukkotyökalua, sillä sen avulla valitaan tuoteominaisuudet parhaiten toteuttavat järjestelmätyypit sekä potentiaalisin konsepti aurinkoa seuraavasta järjestelmästä. Valitusta konseptista suunnitellaan tuote, jonka kannattavuutta tutkitaan neljännessä osassa suhteessa kiinteään aurinkosähköjärjestelmään. Tässä työssä selvitetään Suomen olosuhteisiin soveltuvimman aurinkoa seuraavan järjestelmän rakenne, tutkitaan järjestelmien kannattavuutta sekä kehitetään ja arvioidaan konsepteja hankittujen tietojen pohjalta. Siten suunnitteluprosessi, jossa konsepti suunnitellaan pidemmälle kohti valmista tuotetta, on rajattu työn ulkopuolelle.

1.1 Kohdeyrityksen esittely

Ukko Works on vuonna 2021 perustettu Sastamalan Kiikoisissa sijaitseva konepaja, joka toimii Suomen lisäksi kansainvälisillä markkinoilla. Ukko Worksin toimialana on metallirakenteiden sekä niiden osien valmistus, ja yritys työllistää Kiikoisten tehtaallaan kokonaisuudessaan 26 henkilöä. Ukko Worksin taustalla oleva konepajatoiminta on aloitettu jo vuonna 1967, joten yrityksellä on pitkä historia konepajatoiminnassa ja teräsrakentamisessa. Ukko Worksin vuoden 2023 liikevaihto oli 6,308 miljoonaa euroa, jossa kasvua edellisvuoteen oli yli 200 %. (Kauppalehti 2024; Ukko Works n.d.)

Ukko Worksin keskeiseen toimintaan kuuluvat infrarakentaminen, kuten voimalinja-, tie- ja rautatierakenteet sekä metallirakenteiden valmistaminen. Yrityksen valmistamia tuot-

teita ovat muun muassa kulmarautapylväät, sähkökenttien teräsrakenteet, putki- ja ristikkoportaalit, meluseinärakenteet, ristikkorakenteet sekä telematiikka- ja valaisinmastot. Tuotannossa voidaan myös viimeistellä tuotteita maalaamalla. Ukko Works koneistaa, hitsaa ja maalaa miehittämättömien Stone Power -kallioporakoneiden puomeja ja runkorakenteita. Lisäksi Ukko Works suunnittelee teräsrakenteita ja tekee niiden tuotekehitystä asiakkaiden toiveiden, mittojen ja ideoiden pohjalta. Ukko Worksin kautta onnistuu suunnittelun ja valmistuksen lisäksi myös asennus. (Ukko Works n.d.)

Ukko Works panostaa erityisesti kotimaisuuteen ja pieneen hiilijalanjälkeen. Yritys kehittää jatkuvasti toimintaansa hiilijalanjäljen minimoimiseksi sekä suosii kotimaisia raaka-aineita ja alihankkijoita, sillä ne eivät kuormita ympäristöä läheskään yhtä paljon kuin pitkän matkan takaa tulevat rahdit. Ukko Works panostaa lisäksi laatuun, mistä osoituksena on muun muassa EN 1090-1 -sertifikaatti, joka oikeuttaa CE-merkitsemään teräsrakenteita. Ukko Worksin toiminnalle on myönnetty myös kansainväliset laatustandardit ISO 9001 ja 14001. (Ukko Works n.d.)

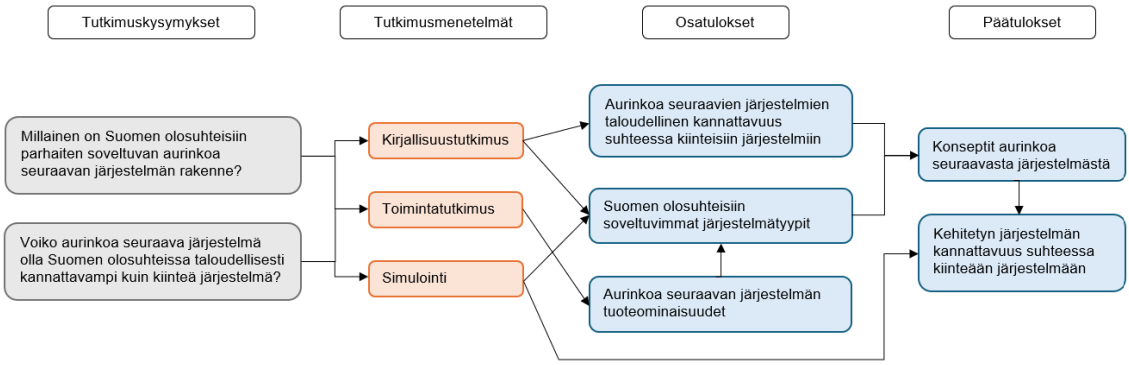
1.2 Tutkimuskysymykset ja -menetelmät

Työssä tarkasteltavan ongelman ratkaisemiseksi on löydettävä vastaukset seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Millainen on Suomen olosuhteisiin parhaiten soveltuvan aurinkoa seuraavan järjestelmän rakenne?
- Voiko aurinkoa seuraava järjestelmä olla Suomen olosuhteissa taloudellisesti kannattavampi kuin kiinteä järjestelmä?

Molempien tutkimuskysymysten selvittämiseen käytetään sekä kirjallisuus- että toimintatutkimuksen tutkimusmenetelmiä. Kirjallisuustutkimusta hyödynnetään teoriaosuuden tiedonhankintaan, eli sen avulla etsitään tietoa erilaisista aurinkoa seuraavista järjestelmistä sekä niiden ominaisuuksista. Lisäksi kirjallisuustutkimuksen avulla tutkitaan aurinkoa seuraavien järjestelmien kannattavuutta sekä selvitetään, voivatko ne teoreettisesti olla kannattavia suhteessa kiinteisiin järjestelmiin. Kirjallisuustutkimusta käytetään myös tiedon keräämiseen QFD-menetelmästä ja erityisesti sen sisältämästä laadun talo -matriisista. Teoriaosuuden lähteet on kerätty aiheeseen liittyvistä tutkimuksista ja kirjoista pääsääntöisesti Tampereen yliopiston kirjaston Andor-tietokannasta sekä Euroopan komission, aurinkosähköalan yritysten ja alaa tutkivien tahojen verkkosivuilta. Toimintatutkimusta käytetään konseptikehityksessä, jossa QFD-menetelmän mukaisesti arvioidaan aurinkoa seuraavien järjestelmien tuoteominaisuuksia, järjestelmätyyppejä sekä konsepteja. Toimintatutkimuksen aikana selvitetään kyselyn avulla asiakkaiden vaatimukset

aurinkoa seuraavalle järjestelmälle ja muodostetaan niistä tuoteominaisuudet järjestelmän rakenteen kehittämistä varten. Lisäksi toimintatutkimuksen lopussa tarkastellaan taloudellisen analyysin avulla kehitetyn järjestelmän kannattavuutta suhteessa kiinteään järjestelmään. Sekä kirjallisuustutkimuksen tiedonhankinnan tukena että toimintatutkimuksen taloudellisessa analyysissa hyödynnetään myös simulointia järjestelmien tuottamien energiamäärien selvittämiseen. Työn tutkimusstrategia on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. *Työn tutkimusstrategia.*

2. TAUSTATIEDOT JA ONGELMAN KUVAUS

2.1 Uusiutuvan energian kasvu

Energian kysyntä kehittyvässä maailmassa tulee vain kasvamaan, mikä johtaa erilaisten perinteisten uusiutumattomien energianlähteiden käytön kasvamiseen. Uusiutumattomat energianlähteet aiheuttavat kuitenkin kasvihuonekaasupäästöjä sekä muita ympäristövahinkoja. Tämän takia ympäristöä saastuttamattomien uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinko-, tuuli- ja vesivoiman sekä biopolttoaineiden käyttöä täytyy lisätä, ja siten korvata perinteiset uusiutumattomat energianlähteet. (Awasthi et al. 2020, s. 393) Uusiutuvien energianlähteiden määrän kasvattaminen on ensisijaisen tärkeää sähköenergian kasvavan tarpeen ja ilmaston lämpenemisen lisäksi öljyn hinnan vaihtelun sekä fossiilisten polttoaineiden vähenemisen takia (Bakhshi ja Sadeh 2016, s. 524).

Uusiutuvan energian käytön kasvattamiseen ja nopeuttamiseen on laadittu kansainvälisiä sopimuksia, kuten Pariisin sopimus. Eurooppa-neuvoston (2024) mukaan Pariisin sopimus on kansainvälinen sopimus, jonka tavoitteena on kääntää kasvihuonepäästöt laskuun mahdollisimman pian. Euroopan Unioni ja kaikki sen jäsenmaat ovat sitoutuneet Pariisin ilmastosopimukseen. Sopimuksen pitkän aikavälin tavoitteena on pitää maapallon keskilämpötilan nousu alle 2 ˚C:ssa verrattaessa esiteolliseen aikaan ja lopulta rajattua nousu alle 1,5 ˚C:een. Sopimus astui voimaan vuonna 2016, kun sen oli vahvistanut 55 maata, joiden päästöt ovat vähintään 55 % koko maailman kasvihuonepäästöistä. Kaikki EU-maat ovat sitoutuneet tavoitteeseen, jossa vuoteen 2050 mennessä EU:sta tulee ensimmäinen ilmastoneutraali talous. (Eurooppa-neuvosto 2024)

2.2 Aurinkoenergia ja kiinteä aurinkosähköjärjestelmä

Aurinkoenergia on energiamuoto, jota tuotetaan auringon säteilyn avulla (Racharla ja Rajan 2017, s. 72). Aurinkoenergia on saanut muihin uusiutuviin energianlähteisiin verrattuna yhä enemmän suosiota sen tarjoamien hyötyjen takia (Bakhshi ja Sadeh 2016, s. 524). Uusiutuvien energialähteiden ja etenkin aurinkoenergian suosiosta ja kasvusta on osoituksena, että esimerkiksi vuonna 2022 EU:n tuuli- ja aurinkoenergian sähköntuotanto ylitti ensimmäistä kertaa kaasulla tuotetun sähkön määrän. Tuona vuonna aurinkoenergian kapasiteetti kasvoi ennätyksellisesti 41 GW ja tuulivoiman 19 GW. Siten uusiutuvien energianlähteiden avulla tuotettiin jo 39 % EU:n sähköstä. (Euroopan komissio 2023) Lisäksi vuonna 2022 tehdyn REPowerEU-suunnitelman tavoitteena on yli kaksinkertaistaa asennetun aurinkosähkön määrä vuoteen 2025 mennessä, eli määrän tulisi

olla 320 GWh. Puolestaan vuoteen 2030 mennessä asennetun aurinkoenergian määrän tavoitteena on lähes 600 GWh. (Euroopan komissio 2022) Aurinkoenergia on uusiutuvista energianlähteistä puhtain ja runsain energiamuoto sekä sitä pidetään nopeimmin kasvavana sähköntuotantomuotona (Awasthi et al. 2020, s. 393; Musa et al. 2023, s. 1). Aurinkoenergia on myös yksi nopeimmin käyttöön otettavista uusiutuvista energianlähteistä (Euroopan komissio 2022). Muita aurinkoenergian hyötyjä ovat helppo asennus sekä alhaiset käyttö- ja ylläpitokustannukset (Bakhshi ja Sadeh 2016, s. 524). Osoituksena aurinkoenergian runsaudesta on, että maapallon auringolta vastaanottama säteilyteho on tuhansia kertoja suurempi kuin kaikkien kaupallisten energianlähteiden kulutus (Racharla ja Rajan 2017, s. 72). Osa maapallolle saapuvasta säteilyenergiasta kuitenkin heikentyy ilmamolekyyleissä tapahtuvan siroamisen ja absorboitumisen takia. Suoraksi säteilyksi kutsutaan säteilyä, joka ei heijastu tai siroa, vaan saapuu maanpinnalle suoraan. Hajasäteily puolestaan on säteilyä, joka saapuu maanpinnalle siroamalla. (Mousazadeh et al. 2009, s. 1801)

Aurinkoenergiaa tuotetaan aurinkosähköpaneeleilla, jotka vastaanottavat auringon säteilyä ja muuntavat sitä sähköksi. Tuotettu energiamäärä on suoraan verrannollinen paneelin saamaan säteilymäärään. (Musa et al. 2023, s. 1–2) Vastaanotetun säteilyn määrään vaikuttaa myös auringonsäteen ja aurinkopaneelin välinen kulma (Bakhshi ja Sadeh 2016, s. 524). Auringon säteen ja paneelin pintaa vasten kohtisuoraan olevan suoran välistä kulmaa kutsutaan tulokulmaksi. Näin ollen, mitä suurempi on tulokulma, sitä pienempi on paneelin tuottama virta. (Mousazadeh et al. 2009, s. 1802) Aurinkosähköpaneelin lähtöteho riippuu säteilyn ja tulokulman lisäksi muun muassa ympäristön lämpötilasta (Bakhshi ja Sadeh 2016, s. 524). Myös aurinkopaneelin tyyppi vaikuttaa paneelin tehoon, sillä esimerkiksi kaksipuoliset aurinkopaneelit pystyvät keräämään säteilyä sekä paneelin etu- että takapuolelta, mikä parantaa paneelin energiantuottoa (Rodríguez-Gallegos et al. 2020, s. 1514). Koska aurinkopaneelin vastaanottamaan säteilyyn vaikuttaa paneelin ja auringon välinen kulma, aurinkopaneelien tuottaman sähkön määrää vähentää auringon ja maan välisen kulman jatkuva muuttuminen. Lisäksi auringon säteilyvuo on usein kuumillakin alueilla melko alhainen, mikä vaikeuttaa aurinkoenergian hyötykäyttöä. (Racharla ja Rajan 2017, s. 72) Säteilymäärä myös vähenee siirryttäessä päiväntasaajalta kohti pohjoisempia leveyspiirejä. Erot säteilymäärässä voivat kuitenkin olla suuria samalla leveys-, mutta eri pituuspiirillä olevien sijaintien välillä. (Bahrami ja Okoye 2018) Siten auringon kulman jatkuvan muuttumisen ja säteilymäärän vaihtelun takia aurinkoenergian keskeisimmät ongelmat ovat sähköntuotannon vähäisyys sekä epätasaisuus.

Kiinteässä aurinkosähköjärjestelmässä aurinkopaneelit on asennettu paikallaan olevaan telineeseen, jossa paneelit eivät voi liikkua. Kiinteät järjestelmät ovat eniten käytetty aurinkosähköjärjestelmien tyyppi, vaikka niihin vaikuttaa moni sähköntuotantoa heikentävä tekijä. Häviöitä kiinteissä järjestelmissä aiheuttavat muun muassa varjostukset ja optimaalista huonompi suuntaus aurinkoon. Siksi kiinteä järjestelmä tuottaa sähköä maksimiteholla vain muutaman tunnin ajan keskellä päivää, kun aurinko paistaa suunnasta, jota kohti järjestelmä on asennettu. (Elahi Gol ja Ščasný 2023, s. 617) Jos ilmakehän vaikutusta ei huomioida, oletetaan päivän pituuden olevan 12 tuntia ja säteilymäärän 1100 W/m^2, voidaan laskea teoreettinen tuoton kasvu, mikäli aurinkopaneelit olisivat jatkuvasti suunnattuna kohti aurinkoa. Näillä oletuksilla auringon liikettä seuraamalla pystyttäisiin tuottamaan noin 57 % enemmän energiaa kuin kiinteällä järjestelmällä, jonka suuntaus on optimaalinen vain keskipäivällä. (Mousazadeh et al. 2009, s. 1802) Siksi auringon seuraamiseen onkin jo kehitetty useita tekniikoita ja periaatteita (AL-Rousan et al. 2018, s. 2549).

2.3 Aurinkoa seuraava aurinkosähköjärjestelmä

Kiinteät aurinkosähköjärjestelmät ovat olleet käytössä jo monia vuosia, ja pääosa nykyisistä aurinkosähköjärjestelmien asennuksista on siis kiinteitä järjestelmiä. Kuitenkin viime vuosina teknologian kehittymisen myötä järjestelmien energiantuottoa on pyritty lisäämään. Siksi kiinteiden järjestelmien asemaa on tullut haastamaan kustannuksiltaan kilpailukykyinen teknologia, joka on yksi- ja kaksiakseliset aurinkoseuraajat eli aurinkoa seuraavat aurinkosähköjärjestelmät. Ne suuntaavat aurinkopaneelit yhden tai kahden pyörimisakselin avulla kohti aurinkoa vuoden- ja vuorokaudenajan mukaan, mikä parantaa merkittävästi paneelien energiantuottoa. (Awasthi et al. 2020, s. 393; Rodríguez-Gallegos et al. 2020, s. 1514) Aurinkoseuraaja on kuitenkin vanha keksintö, sillä ensimmäinen aurinkoseuraaja esiteltiin jo vuonna 1962, ja se oli täysin mekaaninen (Mousazadeh et al. 2009, s. 1802).

Aurinkoseuraaja on kääntyvä laite, joka pyrkii suuntaamaan aurinkopaneelit optimaaliseen asentoon kohtisuoraan auringon säteilyyn nähden, jotta aurinkopaneelien sähköenergian tuotto saadaan maksimoitua (AL-Rousan et al. 2018, s. 2549; Mousazadeh et al. 2009, s. 1802). Aurinkoseuraajassa aurinkopaneelit kiinnitetään kääntyviin rakenteisiin, jotka säätävät päivän aikana paneelien kallistuista ja suuntausta tai pelkästään jompaa kumpaa näistä, jolloin järjestelmä pystyy seuraamaan auringon liikettä (Huld et al. 2010, s. 183). Seuraamalla auringon liikettä ja sijaintia aurinkoseuraajat lisäävät paneelien vastaanottamaa säteilymäärää ja kasvattavat tuotetun aurinkosähkön määrää (Musa et al. 2023, s. 1). Aurinkoseuraajan tarkoitus on siis taata mahdollisimman suuri

auringonsäteiden intensiteetti aurinkopaneelien pintaan mahdollisimman optimaalisella tulokulmalla (AL-Rousan et al. 2018, s. 2549; Racharla ja Rajan 2017, s. 72). Aurinkoseuraaja kuvaa ennemmin yksittäistä aurinkoa seuraavaa rakennetta tai laitetta. Siksi työssä käytetään jatkossa aurinkoseuraajan sijasta pääsääntöisesti termiä aurinkoa seuraava järjestelmä, joka kuvaa paremmin aurinkoa seuraavaa kokonaisuutta, joka tuottaa sähköä ja voi koostua yhdestä tai useammasta aurinkoseuraajasta. Yleisesti pilvisissä ja hämärissä paikoissa aurinkoa seuraavan järjestelmän tuottama hyöty vuodessa voi olla 20 %:n luokkaa, mutta hyvillä paikoilla tavallinen tuottohyöty vuodessa on 30–40 % (Mousazadeh et al. 2009, s. 1802). Aurinkoa seuraavan järjestelmän energiantuotto riippuukin monista tekijöistä, joita ovat muun muassa:

- järjestelmän tyyppi, eli onko järjestelmä yksi- vai kaksiakselinen
- yksiakselisen järjestelmän akselin suunta, eli kääntyykö järjestelmä vertikaalisen, horisontaalisen vai kaltevan akselin ympäri
- maantieteelliset olosuhteet, kuten leveyspiiri
- seurantajakso, eli onko kesä vai talvi
- energiamäärä, jonka järjestelmä kuluttaa auringon seuraamiseen. (Bahrami ja Okoye 2018, s. 138)

Aurinkoa seuraavien järjestelmien yleistyminen näkyy aurinkoseuraajamarkkinan kasvussa. Precendence Researchin (2023) tutkimuksen mukaan vuonna 2022 maailmanlaajuisen aurinkoseuraajamarkkinan arvo oli 4,4 biljoonaa Yhdysvaltain dollaria. Sen odotetaan kasvavan 44,55 biljoonaan dollariin vuoteen 2032 mennessä, eli tällöin vuotuinen kasvuvauhti olisi 26,10 %. Yhdysvallat on suurin aurinkoseuraajien markkinaalue, mutta Euroopan osuuden odotetaan kasvavan voimakkaimmin vuosina 2023–2032. Markkinan kehitystä tukevat valtion kasvavat tuet aurinkoa seuraaville järjestelmille, niiden teknologian kehitys sekä kasvava painotus uusiutuvaan energiaan siirtymisestä. Vuonna 2022 yksiakselisten aurinkoa seuraavien järjestelmien osuus markkinasta oli 90 % ja kaksiakselisten osuus loput 10 %. Prosenttiosuudet johtuvat pitkälti yksiakselisten järjestelmien luotettavuudesta ja edullisuudesta verrattuna kaksiakselisiin järjestelmiin. Kaksiakselisten markkinan odotetaan kuitenkin kasvavan vahvasti vuosina 2023–2032. (Precendence Research 2023)

Aurinkoa seuraavan järjestelmän pääkomponentit ovat paneelien kiinnitysrakenne, seurantalogiikka, ohjausyksikkö, ohjausjärjestelmä, kääntömekanismi ja anturit. Seurantalogiikka määrittää, millä perusteella järjestelmä suuntautuu kohti aurinkoa. Seurantalo-

giikka voidaan jakaa matemaattiseen aika-algoritmiin ja reaaliaikaiseen valon voimakkuuden algoritmiin. Aika-algoritmi perustuu matematiikkaan ja tähtitieteellisiin viitteisiin, kun taas valoalgoritmi perustuu systeemin vastaanottamaan valon intensiteettiin ja valovoimakkuuslukemiin. Ohjausyksikkö vastaa seurantalogiikan toteutumisesta, hallitsee ohjausjärjestelmää ja ohjaa kääntömekanismia. Ohjausjärjestelmä voi olla joko elektroninen tai hydraulinen, ja se ohjaa seurantalaitetta suuntautumaan kohti aurinkoa seurantalogiikan määrittämällä tavalla. Kääntömekanismi kääntää kiinnitysrakenteen ohjausjärjestelmän määrittämään asentoon. (Racharla ja Rajan 2017, s. 73) Anturit ovat laitteita, jotka mittaavat ympäristön olosuhteita, kuten valon voimakkuutta tai kallistuskulmaa. (Rockwell Automation 2009, Racharla ja Rajan 2017, s. 73 mukaan) Jokainen aurinkoa seuraava järjestelmä sisältää kaikki tai ainakin osan seuraavista ominaisuuksista:

- yhden pylvään tai useamman rinnakkain olevan pylvään rakenne
- yksi tai kaksi käännön suorittavaa moottoria
- valon seuraamiseen tai päivään ja aikaan perustuva liike
- valoa havainnoiva laite
- jatkuva tai asteittainen liike
- auringon seuranta ympäri vuoden tai muina kuukausina paitsi talvella
- suuntauksen säätö kallistuksen säädön kanssa tai ilman kallistuksen säätöä
- omavarainen järjestelmä tai järjestelmä lisäenergian syötöllä. (Kvasznicza ja Elmer 2006, Mousazadeh et al. 2009, s. 1806 mukaan)

Aurinkoa seuraavan järjestelmän tärkeimpiin ominaisuuksiin kuuluu tarkkuus, jolla se kykenee suuntautumaan kohti aurinkoa (Kuttybay et al. 2020, s. 1). Siksi aurinkoa seuraavan järjestelmän suunnittelussa, toteutuksessa ja asennuksessa on huomioitava useita aurinkoon liittyviä parametreja, jotta paneelien suunta sekä kulma aurinkoon voidaan optimoida. Keskeisiä parametreja järjestelmän suunnan määrittämiseen ovat muun muassa leveyspiiri, pituuspiiri, säteilymäärä, tulokulma, kallistuskulma, suuntauskulma, atsimuuttikulma, deklinaatiokulma, inklinaatiokulma, korkeuskulma ja zeniittikulma. (AL-Rousan et al. 2018, s. 2549–2551; Musa et al. 2023, s. 3–4) Tulokulma esiteltiin jo luvussa 2.2, ja se on kaikista tärkein parametri aurinkoa seuraavissa järjestelmissä. Se ei silti yksin ole riittävä määrittämään järjestelmän suuntausta. Kallistuskulma kuvaa paneelien kallistusta eli se on horisontaalisen akselin ja aurinkopaneelien välinen kulma, kun taas suuntauskulma kertoo auringon suunnan. Atsimuuttikulma on etelän ja auringon välinen kulma maanpinnalla. Se on positiivinen idän suuntaan ja negatiivinen lännen suuntaan. Deklinaatiokulma on päiväntasaajan sekä maan ja auringon keskipisteiden

välille vedetyn viivan välinen kulma. Inklinaatiokulma on aurinkopaneelin ja positiivisen vaakatasossa olevan x-akselin välinen kulma. Korkeuskulma on horisontin ja auringon keskipisteen välinen kulma, kun taas zeniittikulma on pystysuoran ja auringon keskipisteen välinen kulma. (AL-Rousan et al. 2018, s. 2549–2551) Ideaalinen aurinkoa seuraava järjestelmä mahdollistaisi paneelien suuntaamisen tarkasti kohti aurinkoa riippumatta sen sijainnista. Tällöin täytyisi seurata tarkasti auringon korkeuskulman ja atsimuuttikulman muutosta päivän aikana sekä leveyspiirin suuntaista siirtymää vuodenaikojen mukaan. Silti aurinkoa seuraavan järjestelmän tehokkuus voi olla hyvä, vaikka se ei osoittaisi täysin kohtisuoraan aurinkoon. Jos tulokulma poikkeaa 10 astetta optimaalisesta, aurinkopaneelin lähtöteho on silti 98,5 % optimaalisella tulokulmalla lasketusta maksimilähtötehosta. (Mousazadeh et al. 2009, s. 1802, 1806)

Aurinkoa seuraavien järjestelmien olennaisin etu kiinteisiin järjestelmiin verrattuna on suurempi ja tasaisempi jatkuva energiantuotto, kun paneelit pystytään pitämään kohtisuorassa auringon säteilyyn nähden aamusta iltaan. Lisäksi auringon liikkeen seuraamisella saavutetaan etua pilvisinä päivinä energiantuoton kannalta. (Eldin et al. 2016, s. 228) Kuitenkin, vaikka aurinkoa seuraavat järjestelmät lisäävät aurinkopaneelien energiantuottoa, on niissä monia ratkaistavia haasteita, jotka täytyy huomioida järjestelmän suunnittelussa. Haasteena ovat esimerkiksi järjestelmän kokonaiskustannukset, energiankulutus, luotettavuus, huolto ja suorituskyky. (Mousazadeh et al. 2009, s. 1806) Kokonaiskustannukset ovat aurinkoa seuraavien järjestelmien merkittävin haaste. Ne koostuvat komponenttien ja ylläpidon kustannusten lisäksi esimerkiksi myös järjestelmän kehityksen aiheuttamista kustannuksista. (Musa et al. 2023, s. 27) Aurinkoa seuraavan järjestelmän kokonaiskustannukset ovat tärkeä arviointimittari järjestelmän käytännön toteutuksen kannattavuudelle. Puolestaan aurinkoa seuraavan järjestelmän tuoton mittaamiseen tärkein mittari on järjestelmän tuottama energia verrattuna sen kuluttamaan energiaan. (AL-Rousan et al., 2018, s. 2552)

2.4 Ongelman kuvaus

Ratkaisuja aurinkosähköprojektien kannattavuuden ja kustannuskilpailukyvyn parantamiseen tarvitaan edelleen. Kannattavuus ja kilpailukyky voivat parantua pääasiassa kolmella toimella: järjestelmän asennus- ja ylläpitokustannusten pienentämisellä, järjestelmän tuoton kasvattamisella sekä järjestelmän rahoitukseen tarvittavan pääoman kustannuksien alentamisella. (Talavera et al. 2019, s. 902) Tuottoa saadaan kasvatettua seuraamalla auringon liikettä, mutta yleinen kysymys on, onko lisäinvestointi aurinkoa seuraavaan järjestelmään kannattava verrattuna kiinteään järjestelmään (Bakhshi ja Sadeh 2016, s. 525). Kaikilla aurinkoa seuraavilla järjestelmillä on nimittäin kiinteitä järjestelmiä

suurempi hinta sekä korkeammat asennus-, käyttö- ja huoltokustannukset (Rodríguez-Gallegos et al. 2020, s. 1529–1530). Moottori ja liikkuvat osat nostavat rakenteen hinnan lisäksi myös huoltokustannuksia, sillä liikkuvat osat vaativat enemmän huoltoa. Siksi aurinkoa seuraavan järjestelmän kannattavuuteen vaikuttavat energiantuoton kasvun ohella myös järjestelmän hinta sekä huolto- ja käyttökustannukset verrattuna kiinteään rakenteeseen. (Huld et al. 2010, s. 183) Järjestelmän ylläpito ja huolto jätetään kuitenkin usein vähäisempään huomioon, vaikka se on oleellinen tekijä järjestelmän eliniän pidentämisen kannalta. Tästä syystä se on tärkeä huomioitava asia kustannustehokkaan, kiinteää järjestelmää kannattavamman aurinkoa seuraavan järjestelmän kehittämisessä. (Musa et al. 2023, s. 27) Moottorin ja kääntömekanismin lisääminen aurinkosähköjärjestelmään kasvattaa siis energiantuotantoa, mutta lisää myös kustannuksia verrattuna kiinteään rakenteeseen. Näin ollen kääntömekanismin aiheuttamien lisäkustannuksien ja tuoton kasvun tasapainottaminen on keskeinen haaste aurinkoa seuraavissa aurinkosähköjärjestelmissä. (Talavera et al. 2019, s. 902) Jos siis otetaan huomioon vain aurinkoa seuraavan järjestelmän suurempi tuottohyöty verrattuna kiinteään järjestelmään, voidaan päätyä väärään johtopäätökseen järjestelmän kannattavuudesta. Siksi on tärkeää huomioida myös taloudelliset näkökulmat, kun pohditaan aurinkoa seuraavan järjestelmän kannattavuutta. (Bahrami ja Okoye 2018, s. 138)

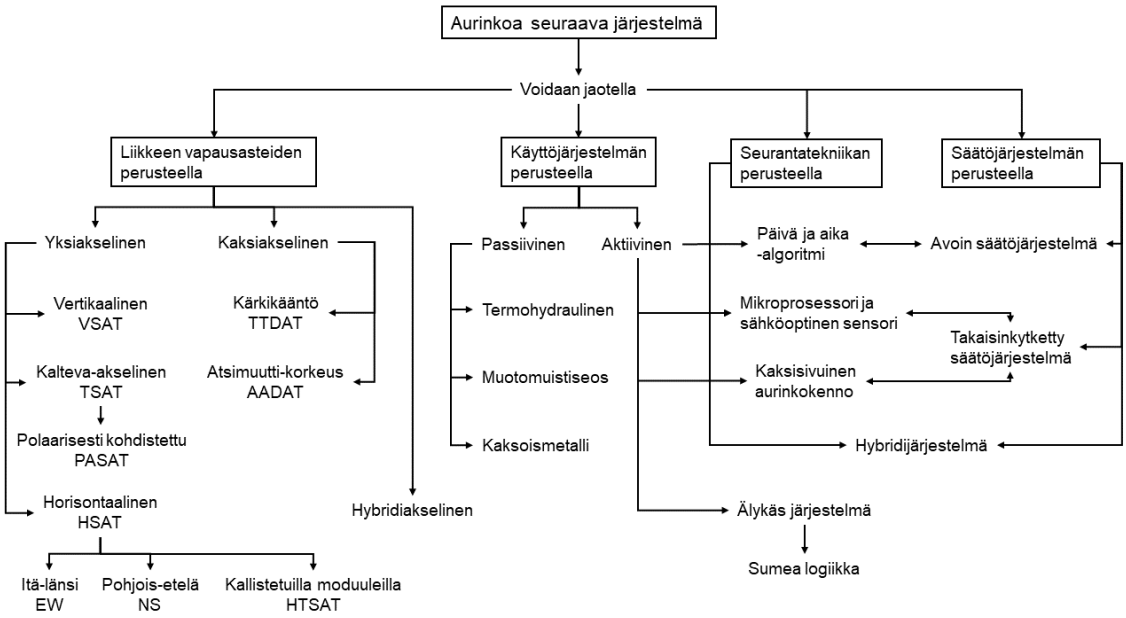
Aurinkoa seuraava järjestelmä olisi siis selvä valinta verrattuna kiinteään järjestelmään, jos huomioidaan pelkästään järjestelmien tuotot. Kuitenkin kääntömekanismista aiheutuvat kustannukset hinnassa, valmistuksessa, ylläpidossa ja huollossa herättävät kysymyksen järjestelmän kannattavuudesta. Nämä kustannukset pienentävät aurinkoa seuraavan järjestelmän suuremmasta energiantuotosta saatavaa rahallista etua. Aurinkoa seuraavaa järjestelmää suunniteltaessa on siis tärkeä pitää seurantalaitteesta, kääntömekanismista, valmistuksesta, asennuksesta, ylläpidosta ja huollosta aihetuvat lisäkustannukset pieninä, jotta hinta ei nouse liian suureksi ja kannattavuus laske huonommaksi kiinteään järjestelmään verrattuna. Järjestelmän tuotto on kuitenkin kustannuksien lisäksi erittäin oleellinen tekijä kannattavuuden kannalta. Siihen vaikuttaa moni eri asia, kuten järjestelmän rakenne, auringon seuraamiseen käytettävä energiamäärä sekä järjestelmän sijainti. Siten Suomen olosuhteissa ei välttämättä tietty järjestelmätyyppi ole yhtä kannattava kuin esimerkiksi päiväntasaajan lähettyvillä. Ratkaistavana ongelma on siis selvittää, millainen järjestelmä Suomeen soveltuu parhaiten, voiko se olla taloudellisesti kannattava hankinta suhteessa kiinteään järjestelmään ja kehittää järjestelmä siten, että energiantuoton ja kustannusten suhde on tasapainossa. Järjestelmän hinnan suhde sen tuottamaan energiaan täytyy pitää mahdollisimman pienenä huomioiden kuitenkin myös rakenteen valmistuksen jälkeen syntyvät kustannukset. Hinnan suhde tuotettuun

energiaan ei vielä suoraan kerro, onko aurinkoa seuraava järjestelmä kiinteää järjestelmää kannattavampi, vaan järjestelmien vertailuun tarvitaan lisäksi taloudellisia mittareita. Vertailu täytyy tehdä nimenomaa aurinkoa seuraavien ja kiinteiden järjestelmien kesken, sillä yleensä niiden väliltä ostaja tekee päätöksen, kumman järjestelmän hankkii.

3. SUUNNITTELUPROJEKTIN TIEDONHANKINTA

3.1 Aurinkoa seuraavien järjestelmien jaottelu

Aurinkoa seuraavia aurinkosähköjärjestelmiä on kehitetty useita erityyppisiä, ja ne voidaan jaotella eri tavoilla, kuten liikkeen vapausasteiden, käyttöjärjestelmän, seurantatekniikan tai säätöjärjestelmän perusteella. Liikkeen vapausasteiden perusteella jako tehdään yleensä yksi- ja kaksiakselisiin järjestelmiin. Jako tehdään siis sen perusteella, kuinka monen akselin suunnassa järjestelmä kääntyy. Käyttöjärjestelmän perusteella jako voidaan tehdä passiivisiin ja aktiivisiin järjestelmiin. (Awasthi et al. 2020, 395–399) Jako passiivisiin ja aktiivisiin järjestelmiin perustuu siihen, saako sähkömoottori aikaan järjestelmän liikkeen vai ei (Bakhshi ja Sadeh 2016, s. 524). Seurantatekniikan mukaan jaottelu voidaan tehdä algoritmin, sensoreiden, kaksisivuisen aurinkokennon tai näiden yhdistelmän perusteella aurinkoa seuraaviin järjestelmiin (Awasthi et al. 2020, 395–399; Mousazadeh et al. 2009, s. 1806). Säätöjärjestelmän perusteella aurinkoa seuraavat järjestelmät voidaan jakaa takaisinkytkettyihin järjestelmiin, avoimiin järjestelmiin ja hybridijärjestelmiin eli avoimen ja takaisinkytketyn yhdistelmään (Awasthi et al. 2020, 395–399). Jako säätöjärjestelmiin perustuu siihen, saako järjestelmä ulkoista informaatiota järjestelmän suuntaamiseen ja suunnan korjaamiseen, vai toimiiko järjestelmän ohjaus ilman reaaliaikaista syötettä valon määrästä. Jako seurantatekniikoihin perustuu pohjimmiltaan samaan ideaan kuin jako säätöjärjestelmiin, mutta siinä jakoperusteena on, onko auringon seuraaminen toteutettu sensoreiden vai ohjelmoidun algoritmin avulla. Erilaiset tavat jakaa aurinkoa ovat ikään kuin pääluokkia, joiden sisällä järjestelmiä voidaan jakaa edelleen. Esimerkiksi yksiakseliset järjestelmät voidaan jaotella akselin suunnan sekä käyttöjärjestelmän perusteella ja aktiiviset järjestelmät voidaan jakaa edelleen eri seurantatekniikoiden mukaan. Aurinkoa seuraava järjestelmä voi siis kuulua useampaan luokkaan samaan aikaan. Kuvassa 2 on havainnollistettu aurinkoa seuraavien järjestelmien jaottelu eri luokkiin.



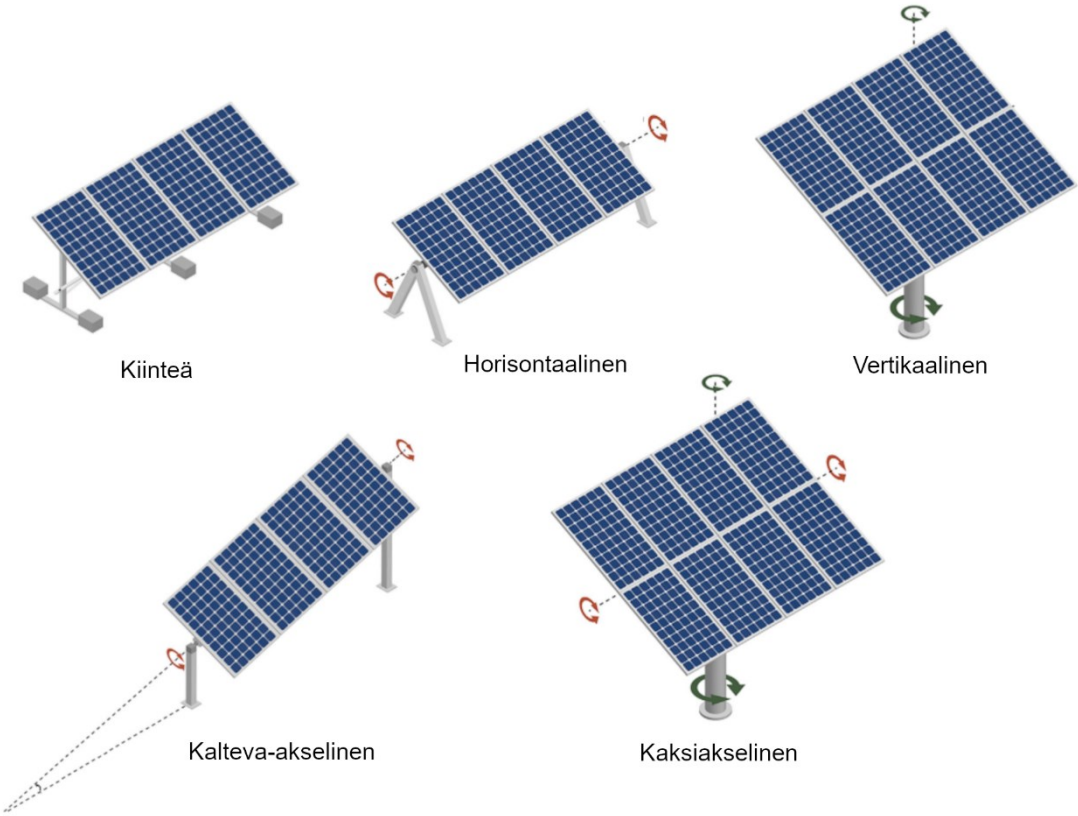
Kuva 2. *Aurinkoa seuraavien järjestelmien jaottelu (muokattu lähteistä Awasthi et al. 2020, s. 397; Racharla ja Rajan 2017, s. 75).*

Yleisin tapa jaotella aurinkoa seuraavat järjestelmät on jakaa ne liikkeen vapausasteiden perusteella yksi- ja kaksiakselisiin järjestelmiin (Kuttybay et al. 2020, s. 1). Lisäksi on kehitetty myös kolmen tai useamman vapausasteen järjestelmiä, joita voidaan kutsua hybridiakselisiksi järjestelmiksi (Musa et al. 2023, s. 11). Yleisimmin teollisuudessa käytettävät tavat suunnata järjestelmä kohti aurinkoa ovat yksiakselinen horisontaalinen, yksiakselinen vertikaalinen ja kaksiakselinen järjestelmä (Bakhshi ja Sadeh 2016, s. 525). Kuvassa 3 on havainnollistettu kiinteä järjestelmä sekä yleisimmät, liikkeen vapausasteiden ja akselin suunnan perusteella jaotellut aurinkoa seuraavat järjestelmät.

Yksiakselinen aurinkoa seuraava järjestelmä kääntyy nimensä mukaisesti vain yhden akselin ympäri seuratessaan aurinkoa. Yksiakselisista järjestelmistä on olemassa useita eri ratkaisuja akselin toteutuksen perusteella. Yksiakselisia järjestelmiä ovat vertikaalinen eli VSAT (engl. vertical single axis tracker), horisontaalinen eli HSAT (engl. horizontal single axis tracker), horisontaalinen kallistetuilla moduuleilla eli HTSAT (engl. horizontal tilted single axis tracker), kalteva-akselinen eli TSAT (engl. tilted single axis tracker) ja polaarisesti kohdistettu kalteva-akselinen eli PASAT (engl. polar aligned single axis tracker). (Awasthi et al. 2020, s. 397–398) VSAT-järjestelmän pyörimisakseli on maanpintaan nähden kohtisuora, eli järjestelmä kääntyy päivän aikana vertikaalisen akselin ympäri idästä länteen. HSAT-järjestelmä puolestaan kääntyy maanpinnan suuntaisen akselin ympäri. (Racharla ja Rajan 2017, s. 75–77) Horisontaaliset järjestelmät voidaan jakaa vielä EW-järjestelmiin (engl. east-west) eli itä-länsi suunnassa kääntyviin

ja NS-järjestelmiin (engl. north-south) eli pohjois-etelä suunnassa kääntyviin (Mousazadeh et al. 2009, s. 1816). TSAT on järjestelmä, jonka akseli pyörii vaaka- ja pystysuunnan välissä, eli akseli on kaltevassa kulmassa maanpintaan nähden. PASAT on kaltevaakselinen järjestelmä, joka on kohdistettu napatähteen. (Racharla ja Rajan 2017, s. 76–77)

Kaksiakselisissa järjestelmissä on rotaation suhteen kaksi vapausastetta, jotka ovat yleensä vertikaalinen ja horisontaalinen. Kaksiakselinen järjestelmä seuraa auringon liikettä sekä idästä länteen että auringon korkeusasemaa. Kaksi yleistä kaksiakselista järjestelmää ovat kärkikääntöjärjestelmä eli TTDAT (engl. tip-tilt dual axis tracker) sekä atsimuutti-korkeusjärjestelmä eli AADAT (engl. azimuth-altitude dual axis tracker). (Musa et al. 2023, s. 7) TTDAT-järjestelmässä paneelit sijaitsevat pylvään päässä, jonka ympäri itä-länsi-kääntö normaalisti suoritetaan. Pystysuora pylväs on usein kiinteä, jolloin järjestelmän johtoihin ei aiheudu vääntöliikettä vertikaalisuunnassa. AADAT-järjestelmä on samankaltainen kuin TTDAT, mutta se eroaa itä-länsi-käännön suhteen. Paneeleja ei käännetä pylvään päässä, vaan suuren rullien päällä olevan kehän varassa. (Racharla ja Rajan, 2017, s. 76)



Kuva 3. *Yleisimmät aurinkosähköjärjestelmät liikkeen vapausasteiden ja suunnan mukaan jaoteltuna (muokattu lähteestä Rodríguez-Gallegos et al. 2020, s. 1518).*

Toinen yleinen tapa luokitella aurinkoa seuraavat järjestelmät on jakaa ne passiivisiin ja aktiivisiin järjestelmiin. Aurinkoa seuraavissa passiivisissa järjestelmissä ei käytetä sähköllä toimivia käyttölaitteita paneelien suuntaamiseen kohti aurinkoa, vaan auringon seuraaminen perustuu aineen lämpölaajenemiseen ja muotomuistiseoksiin. Rakenne muodostuu yleensä kahdesta toisiaan vastaan toimivasta toimilaitteesta, ja niiden vastaanottamat erilaiset säteilymäärät saavat rakenteen kääntymään. Toimilaitteina käytetään esimerkiksi alhaisen kiehumispisteen omaavaa paineistettua kaasunestettä tai muotomuistiseosta. Toimilaitteet ovat tasapainossa, kun kumpikin niistä saa saman määrän valaistusta ja säteilyä. Kun toimilaitteet saavat eri määrän säteilyä, niihin vaikuttavat voimat ovat epätasapainossa, ja ne pyrkivät kääntämään järjestelmän suuntaan, jossa valaistus sekä myös toimilaitteisiin vaikuttavat voimat ovat yhtä suuret. (Awasthi et al. 2020, s. 396; Bakhshi ja Sadeh 2016, s. 524–525; Mousazadeh et al. 2009, s. 1806) Passiiviset järjestelmät voidaan jakaa edelleen liikkeen vapausasteiden perusteella (Musa et al. 2023 s. 15, 17).

Aurinkoa seuraavat aktiiviset järjestelmät hyödyntävät sähkömoottoreita ja hammasrattaita, joiden avulla järjestelmä suunnataan kohti aurinkoa. Liike tuotetaan siis ulkoisesta lähteestä ohjattavan sähkömoottorin avulla. (Bakhshi ja Sadeh 2016, s. 524) Aktiiviset järjestelmät käyttävät antureita, mikroprosessoreita ja moottoreita, jotka mahdollistavat auringon seuraamisen tarkemmin ja tehokkaammin kuin passiivisissa järjestelmissä. Aktiiviset järjestelmät tarvitsevat ulkoisen energialähteen takia kuitenkin virtaa ja kuluttavat energiaa toisin kuin passiiviset järjestelmät. (Awasthi et al. 2020, s. 396) Aktiivisessa järjestelmässä voidaan kääntämiseen käyttää esimerkiksi kierukkavaihdetta. Kierukkavaihde on luotettava vaihtoehto aurinkoa seuraavan järjestelmän kääntämiseen, sillä kääntömekanismi kestää hyvin ulkoisia dynaamisia voimia kuten tuulta. Lisäksi se sallii järjestelmän kääntymisen vain silloin, kun tasavirtamoottori pyörii. (Kuttybay et al. 2020, s. 5) Aktiiviset järjestelmät voidaan jakaa edelleen säätöjärjestelmän (Bakhshi ja Sadeh 2016, s. 525), liikkeen vapausasteiden ja seurantatekniikan perusteella (Musa et al. 2023, s. 15, 17).

Myös aktiivisia älykkäitä aurinkoa seuraavia järjestelmiä on kehitetty. Tällaisia autonomisia järjestelmiä on mahdollista ohjata etänä, ja niiden suorituskykyä pystytään valvomaan tehokkuuden maksimoimiseksi. Järjestelmän mikrokontrolleriin on integroitu kehittyneitä algoritmeja, joilla voidaan maksimoida tuotettu energia sekä sammuttaa ja nollata järjestelmä esimerkiksi öisin. Näin järjestelmän kuluttamaa energiaa saadaan säästettyä. Älykkäiden järjestelmien ohjauksessa käytetään usein sumeaa logiikkaa. Se on oppimiseen perustuva matemaattinen malli päätöksentekoon tilanteissa, joissa lähtömuuttujat eivät ole tarkkoja ja ne ovat laadullisesti epämääräisiä. Älykäs järjestelmä pystyy

oppimaan ja kehittämään itseään hyödyntäen tekoälyä tai muita älykkäitä malleja. Sumean logiikan ohjausta käytetään sekä yksi- että kaksiakselisissa järjestelmissä. Se parantaa järjestelmän tarkkuutta sekä nostaa sen tuottamaa tehoa erityisesti verrattuna takaisinkytkettyihin ja kiinteisiin järjestelmiin. Älykkäissä autonomisissa järjestelmissä korkeat kustannukset ovat ongelma, joten haasteena on kustannustehokkaan ja tarkan ohjausjärjestelmän sekä sen älykkään ohjauksen kehittäminen. (Musa et al. 2023, s. 25)

Seurantatekniikan perusteella suurin osa aurinkoa seuraavista järjestelmistä voidaan luokitella mikroprosessoriin ja sähköoptiseen sensoriin perustuviin, päivä ja aika -algoritmiin perustuviin ja kaksisivuiseen aurinkokennoon perustuviin järjestelmiin sekä näiden yhdistelmiin (Mousazadeh et al. 2009, s. 1806–1807). Sähköoptiset sensorit ovat elektronisia tunnistimia, jotka havaitsevat valomäärän muutoksia ja muuttavat ne sähköisiksi signaaleiksi. On olemassa useita erilaisia valomäärää havaitsevia sensoreita, joita käytetään aurinkoa seuraavissa järjestelmissä. (AL-Rousan et al. 2018, s. 2555) Esimerkiksi LDR-valovastukset (engl. light dependent resistor) ovat laajasti käytettyjä komponentteja aurinkoa seuraavissa järjestelmissä ja muissa sovelluksissa, jotka vaativat valon tai sen puuttumisen tarkastamista. Aurinkoa seuraavissa järjestelmissä valovastukset tunnistavat voimakkaimman valomäärän ja lähettävät siitä tiedon mikroprosessorille, joka ohjaa moottoreita kääntymään kohti voimakkainta valomäärää. (Musa et al. 2023, s. 24) Aurinkoa seuraavat sensorijärjestelmät sisältävät vähintään yhden rinnakkain kytketyn parin valosensoreita, jotka ovat sähköisesti tasapainossa, kun valaistus on tasapuolinen. Sensorit havaitsevat auringon säteilyä ja lähettävät syötteitä mikroprosessorille, joka ohjaa moottoreita kääntymään. Kun sensoreihin kohdistuva valaistus on epätasapainossa, ne lähettävät ohjaussignaalin, ja järjestelmä kääntyy kohti suuntaa, jossa molempiin sensoreihin kohdistuva valaistus samansuuruinen. (Awasthi et al. 2020, s. 398; Mousazadeh et al. 2009, s. 1806–1807)

Päivä ja aika -algoritmiin perustuvissa järjestelmissä elektroniset laitteet, kuten mikroprosessorit laskevat maantietoon, kellonaikaan sekä päivään perustuvien kaavojen ja algoritmien perusteella auringon sijainnin ja lähettävät ohjaussignaaleja sähkömoottorille (Mousazadeh et al. 2009, s. 1811; Racharla ja Rajan 2017, s. 79). Päivä ja aika -algoritmin perusteella aurinkoa seuraava järjestelmä perustuu siis matemaattisiin laskelmiin auringon sijainnista tiettyinä ajankohtina. Tällaisessa järjestelmässä ei ole takaisinkytkentää eikä antureita antamassa tietoja säteilymäärästä, vaan ennalta määritetty algoritmi määrittää järjestelmän liikkeen. (Awasthi et al. 2020, s. 398) Algoritmijärjestelmässä moottori tai toimilaite on ohjelmoitu kääntymään määritetyillä väliajoilla hitaasti tietyn kulman verran. Menetelmä on energiatehokas, sillä seurantavirheet ovat pieniä, jolloin energiaa ei menetetä seurannan kalibroinnissa. Algoritmijärjestelmä voidaan ohjelmoida

kääntymään esimerkiksi 15 astetta tunnin välein. (Musa et al. 2023, s. 18) Monissa algoritmijärjestelmissä käytetään halpoja mikroprosessoreita, kuten Arduinoa ja PIC-mikrokontrolleria (AL-Rousan et al. 2018, s. 2556).

Aurinkoa seuraava järjestelmä voi perustua myös kaksisivuiseen aurinkokennoon tai olla yhdistelmä algoritmi- ja sensorijärjestelmästä. Kaksisivuiseen aurinkokennoon perustuvissa järjestelmissä kaksisivuinen aurinkokenno havaitsee säteilyä ja ohjaa järjestelmää haluttuun asentoon. Kaksisivuinen aurinkokenno on kytketty suoraan tasavirtamoottoriin, joka on liitetty aurinkoseuraajan pyörimisakseliin. Kaksisivuinen aurinkokenno voi sekä havaita säteilyä että tuottaa energiaa seurantaa varten. (Mousazadeh et al. 2009, s. 1806, 1810) Hybridijärjestelmä eli algoritmi- ja sensorijärjestelmän yhdistelmä puolestaan toimii pääsääntöisesti ennalta määritetyn algoritmin mukaan. Sensorit ovat kuitenkin varmistamassa, että järjestelmä on suunnattu algoritmin mukaan kohti aurinkoa, ja niiden lähettämä signaali saa tarvittaessa korjausliikkeen aikaan. Hybridijärjestelmä voi toimia myös päinvastaisesti. Sensorit ja mikroprosessori ohjaavat järjestelmän liikkumista, mutta esimerkiksi pilvisellä säällä ohjausalgoritmi ottaa vastuun järjestelmän suuntaamisesta. (Awasthi et al. 2020, s. 398)

Takaisinkytketyssä säätöjärjestelmässä sensorit havainnoivat auringon sijaintia, joten järjestelmä saa tiedon auringon sijainnista kaikkina kellonaikoina. Tieto sijainnista menee komparaattorille tai mikroprosessorille, joka tekee laskutoimituksia sijainnin perusteella aurinkopaneelien seuraavan suunnan määrittämiseksi. Mikroprosessori havaitsee virheen, kun auringon sijainti antureihin nähden on väärä. Tässä tilanteessa toinen antureista vastaanottaa enemmän säteilyä kuin toinen. Ne lähettävät moottoreille ohjaussignaalin virheen korjaamiseksi, jolloin järjestelmä kääntyy kohti aurinkoa. Takaisinkytketty järjestelmä saa siis tietoa auringon sijainnista säteilymäärän kautta ja reagoi siihen tarvittaessa. Avoin säätöjärjestelmä puolestaan seuraa aurinkoa ilman sensoreita. Se käyttää ohjausyksikköä, joka antaa ohjaussignaalin moottorille pelkästään syötettyjen virtatietojen sekä ohjausalgoritmin perusteella. Avoimessa järjestelmässä ei ole siis ominaisuutta havainnoida ja arvioida lähtödataa suhteessa haluttuun ulostuloon. Siihen ei sisälly korjausprosessia seurantavirheiden korjaamiseen tai järjestelmän häiriöiden kompensoimiseen, vaan algoritmin täytyy itsessään taata, että haluttu lopputulos saavutetaan. (AL-Rousan et al. 2018, s. 2558; Awasthi et al. 2020, s. 395) Sensorijärjestelmät ovat usein takaisinkytkettyjä järjestelmiä, sillä anturit lähettävät säännöllisesti tietoa säteilymäärästä, johon järjestelmän on mahdollista reagoida. Algoritmijärjestelmät ovat puolestaan on avoimia säätöjärjestelmiä, sillä niissä ei ole antureita lähettämässä säteilytietoa, ja niitä ohjataan ennalta määritettyjen kaavojen mukaan.

3.2 Aurinkoa seuraavien järjestelmien ominaisuudet

Yleisesti voidaan todeta, että aurinkoa seuraavan järjestelmän tehokkuus ja seurantatarkkuus kasvavat, kun akselien määrä kasvaa yksiakselisesta kaksiakseliseen ja edelleen hybridiakseliseen. Toisaalta myös järjestelmän monimutkaisuus ja hinta nousevat akselien määrän kasvaessa. (Musa et al. 2023, s. 5–14) Näin ollen yksiakselisen järjestelmän keskeisimpiin etuihin verrattuna kaksiakseliseen kuuluu alhaisempi hinta (Awasthi et al. 2020, s. 397–403; Kuttybay et al. 2020, s. 1–3; Vaziri Rad et al. 2020, s. 17). Muita yksiakselisten etuja ovat pidempi elinikä ja parempi luotettavuus (Vaziri Rad et al. 2020, s. 17). Lisäksi ne ovat yksinkertaisempia toteuttaa sekä halvempia asentaa ja ylläpitää kuin kaksiakseliset järjestelmät (Awasthi et al. 2020, s. 397–403; Kuttybay et al. 2020, s. 1–3). Kaksiakseliset aurinkoa seuraavat järjestelmät puolestaan tuottavat yleensä enemmän energiaa kuin yksiakseliset ja kiinteät järjestelmät. Ne vaativat kuitenkin monimutkaisemman rakenteen ja ohjausjärjestelmän sekä enemmän huoltoa johtuen suuremmasta määrästä pyöriviä ja liikkuvia komponentteja. (Awasthi et al. 2020, s. 397–403) Kaksiakselisen järjestelmän merkitys korostuu, kun suoran säteilyn määrä on suuri. Jos pilvet tai varjot estävät säteilyä, optimaalinen paneelien suunta olisi melkein suoraan kohti taivasta, jolloin aurinkopaneeleihin osuvan hajasäteilyn määrä saadaan maksimoitua. Paneelien suuntaus suoraan ylöspäin onnistuu kaksiakselisilla järjestelmillä, mutta vaatii kuitenkin kompleksisemman järjestelmän ja takaisinkytkennän säteilytiedon tulkitsemiseen. (Huld et al. 2010, s. 192) Useamman vapausasteen hybridiakselisen järjestelmän tehokkuus on korkein etenkin pilvisinä päivinä, sillä se seuraa aurinkoa missä tahansa kulmassa ja asennossa. Hybridiakselinen järjestelmä pystyy seuraamaan aurinkoa tehokkaasti riippumatta sen sijainnista, säästä ja ilmasto-olosuhteista sekä tuottamaan suurimman lähtötehon verrattuna kaksi- ja yksiakselisiin järjestelmiin. Järjestelmän suurimmat heikkoudet ovat kuitenkin kompleksisuus ja suuret toteuttamiskustannukset johtuen komponenttien suuresta määrästä. Näin ollen kustannustehokasta useamman vapausasteen hybridiakselista järjestelmää ei ole onnistuttu toteuttamaan. (Musa et al. 2023, s. 14, 25)

Myös eri tutkimuksissa on osoitettu, että kaksiakselinen tuottaa enemmän energiaa kuin yksiakseliset järjestelmät. Esimerkiksi Rodríguez-Gallegoksen et al. (2020) tekemän tutkimuksen perusteella kaksiakselinen järjestelmä tuottaa eniten energiaa verrattuna kalteva-akseliseen, horisontaaliseen ja kiinteään järjestelmään. Myös Bahrami ja Okoye (2018) ovat todenneet kaksiakselisen parhaaksi järjestelmäksi energiantuoton osalta. He ovat verranneet tutkimuksessaan eri leveyspiireillä kahta sijaintia, joista toisessa sätei-

lymäärä on leveyspiirin suurin ja toisessa pienin. Melkein kaikissa sijainneissa leveyspiireillä 20–70˚N paras vaihtoehto pelkän energiantuoton osalta on kaksiakselinen järjestelmä riippumatta leveyspiirin säteilymäärästä. (Bahrami ja Okoye 2018)

Kuitenkin huomionarvoista yksi- ja kaksiakselisten järjestelmien tuoton vertailussa on, että usein niiden tuottoero on vain muutamia prosentteja, mikä pätee yksiakselisista järjestelmistä etenkin vertikaalisiin ja kalteva-akselisiin (Bahrami ja Okoye 2018; Huld et al. 2010). Huldin et al. (2010) mukaan optimoimalla vertikaalisen yksiakselisen järjestelmän kaltevuuskulman tai kalteva-akselisen järjestelmän akselikulman on mahdollista päästä hyvin lähelle kaksiakselisen järjestelmän tuottoa Euroopassa. Etelä-Euroopassa tuottoetu on kaksiakselisen hyväksi 3 % ja Keski-Euroopassa 1,5–2 % verrattuna vertikaaliseen ja kalteva-akseliseen. Pohjoisosissa Eurooppaa kaksiakselisen tuotto on alle 2 % suurempi kuin vertikaalisella ja 4–5 % suurempi kuin kalteva-akselisella. Kaksiakselisen järjestelmän tuotto on siis vain 1–4 % parempi kuin optimoidun vertikaalisen järjestelmän, ja ero pienenee siirryttäessä Etelä-Euroopasta kohti pohjoista. Etenkin leveyspiirien 50˚N ja 70˚N välillä tuottoerot kaksiakselisen ja vertikaalisen järjestelmän välillä ovat erittäin pienet. Vertikaalinen ja kalteva-akselinen järjestelmä saattavat olla kaksiakselista parempia vaihtoehtoja, sillä tuottoerot ovat pienet ja kaksiakselinen järjestelmä on monimutkaisempi sekä siten myös kalliimpi valmistaa ja ylläpitää. (Huld et al. 2010)

Yksi merkittävä syy pieniin tuottoeroihin etenkin Pohjois-Euroopassa on kaksiakselisen järjestelmän kaltevuuskulma ja hajasäteilyn määrä. Kaksiakselisen järjestelmän kaltevuuskulma on suuren osan ajasta jyrkempi kuin yksiakselisten järjestelmien kulma, sillä se maksimoi suoran säteilyn määrän, mutta tällöin taivaalta paneeleihin tulevan hajasäteilyn määrä on pienempi. Kun hajasäteilyn osuus on suuri, ei kaksiakselisen aurinkoseuraajan liike välttämättä ole ideaalista. Aurinkoa seuraaviin järjestelmiin kohdistuvan hajasäteilyn määrä on suurta varsinkin Saksan keskiosissa sekä Pohjois-Suomessa ja sen vaikutus ilmenee etenkin talvisin. Jos järjestelmään kohdistuu paljon varjostusta, säteilyn määrä on muusta syystä vähäinen tai hajasäteilyn määrä on suurta, saattavat vertikaalinen tai kalteva-akselinen järjestelmä tuottaa jopa enemmän kuin kaksiakselinen järjestelmä. Tällainen sijainti on esimerkiksi Norjan vuoristot. (Huld et al. 2010) Koska kaksiakselisen järjestelmän merkitys korostuu suoran säteilyn määrän ollessa suurta, ja Suomessa sen osuus on pieni, joten kahden akselin merkitys Suomen olosuhteissa ei ole yhtä olennainen.

Euroopassa horisontaaliset järjestelmät eivät pärjää tuotoissa muille aurinkoa seuraaville järjestelmille. Esimerkiksi kalteva-akselinen on horisontaalista EW-järjestelmää parempi valinta energiantuoton kannalta kaikkialla muualla paitsi päiväntasaajan seudulla, jossa leveyspiiri on korkeintaan 15˚N tai 15˚E. Ero kasvaa kalteva-akselisen hyväksi

kohti pohjoista, ja esimerkiksi Suomen leveyspiireillä se on jo luokkaa 15–20 %. (Rodríguez-Gallegos et al. 2020, s. 1527) Horisontaalisen EW-järjestelmän tuottoetu kiinteään järjestelmään verrattuna on noin 20 % eteläisessä Euroopassa, 12–14 % Keski-Euroopassa ja noin 20 % Euroopan pohjoisosissa. Käännön suorittaminen pohjois-etelä sunnassa heikentää tuloksia eli horisontaalinen NS-järjestelmä pärjää vielä heikommin. Mitä pohjoisemmille leveyspiireille mennään, sitä enemmän kiinteä ja horisontaalinen järjestelmä jäävät tuotoissa kaksiakseliselle, vertikaaliselle ja kalteva-akseliselle järjestelmälle. (Huld et al. 2010) Myös Bahramin ja Okoyen (2018) tutkimuksen mukaan horisontaaliset NS- ja EW-järjestelmät ovat huonoimpia energiantuoton kannalta. Niiden paremmuusjärjestys riippuu sijainnista, mutta esimerkiksi lähellä Suomea sijaitsevissa Tukholmassa ja Kiirunassa NS-järjestelmä on parempi. (Bahrami ja Okoye 2018) Bahramin ja Okoyen (2018) mukaan siis NS-järjestelmä voisi olla energiantuoton kannalta parempi Suomen olosuhteisiin, kun taas Huldin et al. (2010) mukaan EW-järjestelmä on korkeilla leveyspiireillä parempi.

Vertikaalinen ja kalteva-akselinen järjestelmä optimaalisella kaltevuudella tuottavat noin 30 % enemmän energiaa eteläisessä Euroopassa, 20–25 % enemmän Keski-Euroopassa ja jopa 50 % enemmän Euroopan pohjoisosissa verrattuna etelään suunnattuun kiinteään järjestelmään optimaalisella kaltevuudella (Huld et al. 2010). Kalteva-akselisia järjestelmiä käytetään usein alhaisemmilla leveyspiireillä, kun taas vertikaalisia järjestelmiä korkeammilla leveyspiireillä (Elahi Gol ja Ščasný 2023, s. 617). Bahramin ja Okoyen (2018) mukaan leveyspiirin säteilymäärä vaikuttaa vertikaalisen ja kalteva-akselisen järjestelmän suoriutumiseen. Alhaisempien leveyspiireen alueilla, joilla on korkea säteilymäärä, kalteva-akselinen päihittää vertikaalisen energiantuotossa. Kuitenkin noin leveyspiiristä 50˚N ylöspäin järjestys vaihtuu, ja vertikaalinen tuottaa kalteva-akselista enemmän energiaa. Kun tarkastellaan pienemmän säteilymäärän alueita, vertikaalinen on kalteva-akselista parempi jo noin leveyspiiriltä 35˚N. Korkeammilla leveyspiireillä vertikaalinen järjestelmä on siis kalteva-akselista järjestelmää tuottoisampi. (Bahrami ja Okoye 2018) Myös Vaziri Radin et al. (2020, s. 17) mukaan vertikaaliset järjestelmät suoriutuvat yleensä paremmin pohjoisemmilla alueilla leveyspiirin ollessa yli 40˚N. Ne nimittäin soveltuvat paremmin käytettäväksi silloin, kun auringon korkeuskulma pienenee. Vertikaalinen järjestelmä voi joissain tapauksissa olla kuitenkin optimaalisin myös alhaisemmille leveyspiireille 20˚–40˚N. (Vaziri Rad et al. 2020, s. 17)

Suomessa vertikaalisen järjestelmän optimaalinen kaltevuuskulma on luokkaa 60–65˚ ja kalteva-akselisen 50–60˚ (Huld et al. 2010, s. 188). Kuitenkin isoissa aurinkoa seuraavien aurinkosähköjärjestelmien kentissä varjot voivat koitua ongelmaksi ja tilantarve kasvaa, kun yksittäiset aurinkoseuraajat kääntyessään varjostavat toisiaan, mikä vähentää

tuottoa (Huld et al. 2010, s. 191; Vaziri Rad et al. 2020, s. 17). Optimaalisin kaltevuuskulma saattaa suuressa aurinkosähkökentässä siten olla pienempi kuin yhden aurinkoseuraajan sisältävän järjestelmän tapauksessa, jotta aurinkoseuraajien korkeutta saadaan laskettua. Kaltevuuskulman ja pyörimiskulman pienentäminen voivat vähentää varjostusta, mutta tällöin myös tuotto pienenee. Jos järjestelmän kaltevuutta pienennetään korkeintaan 15 % optimaalisesta, pienenee tuotto vertikaalisella sekä kalteva-akselisella vain noin 2,5 %. Jos kaltevuutta pienennetään 20 % optimaalisesta, tuotto pienenee vertikaalisella noin 5 % ja kaltevalla noin 3 %. Optimikulman muuttaminen vaikuttaa pääsääntöisesti enemmän vertikaaliseen järjestelmään, ja sitä enemmän, mitä pohjoisempana järjestelmä sijaitsee. Puolestaan pyörimiskulman pienentäminen +-90 asteesta +-45 asteeseen pienentää tuottoa Keski- ja Etelä-Euroopassa noin 1,5–2,5 % ja aivan pohjoisessa noin 8 %. Kalteva-akselisen järjestelmän tapauksessa optimaalinen pyörimiskulma Pohjois-Euroopassa saattaa olla suurempi, mitä rakenne sallii. (Huld et al. 2010) Jos kalteva-akselisessa järjestelmässä on useampi paneeli ja suuri pyörimiskulma, on rakenteesta myös tehtävä melko korkea, jotta paneelit eivät kääntyessään osu maahan. Racharlan ja Rajanin (2017, s.76) mukaan yksiakselisen järjestelmän kaltevuuskulma on monesti tehon kannalta optimaalista pienempi korkeuden ja varjojen pienentämisen lisäksi myös rakenteeseen vaikuttavan tuulikuorman pienentämisen takia. Tuulikuorman pienentäminen on olennaista etenkin vertikaalisten järjestelmien tapauksessa, sillä haastavissa olosuhteissa järjestelmän mekaaniset osat ovat kovalla rasituksella. (Racharla ja Rajan 2017, s. 76) Jos vertaillaan saman leveyspiirin alueita, joista toisessa säteilymäärä on leveyspiiriin nähden suuri ja toisessa pieni, vertikaalisen tai kaltevan järjestelmän optimaalisin kulma on sitä pienempi, mitä pienempi on säteilymäärä. Kun säteilymäärä vähenee, optimaalinen kulma on pienempi, sillä taivaalta tulevan hajasäteilyn merkitys kasvaa. Mitä enemmän järjestelmä osoittaa kohti taivasta, sitä paremmin sieltä tulevan hajasäteilyn määrä saadaan maksimoitua. (Bahrami ja Okoye 2018)

Seurantalaitteet ja kääntömekanismi aiheuttavat merkittävän osan aurinkoa seuraavan järjestelmän kokonaiskustannuksista. Kun järjestelmän kokonaiskustannukset ovat alhaisemmat eli järjestelmä on kooltaan pienempi, seurantalaitteiden prosenttiosuus kokonaiskustannuksista on suurempi. Seurantalaitteiden kustannukset sekä myös kokonaiskustannukset ovat yleisesti suurimmat kaksiakselisissa, toiseksi suurimmat vertikaalisissa, toiseksi pienimmät kalteva-akselisissa ja pienimmät horisontaalisissa järjestelmissä. (Bahrami ja Okoye 2018, s. 142, 144) Kokonaiskustannukset horisontaalisissa ja kalteva-akselisissa järjestelmissä 25 vuoden eliniän aikana Suomessa ja ympäri maailmaa ovat noin 10 % suuremmat kuin kiinteällä järjestelmällä. Kaksiakselisella ja kiinteällä erot ovat paljon suurempia, sillä Suomessa ero on esimerkiksi 30 % luokkaa ja monessa

sijainnissa jopa noin 60 %, mikä johtuu pääasiassa kaksiakselisen rakenteen suuremmista kustannuksista. Asennuskustannukset puolestaan ovat oletettavasti kalteva-akselisissa hieman korkeammat kuin horisontaalisissa järjestelmissä, mikä johtuu muun muassa perustuksen eroista. (Rodríguez-Gallegos et al. 2020, s. 1526–1530) Näiden tietojen perusteella vertikaaliset järjestelmät ovat siis yleisesti rakenteeltaan ja oletettavasti myös asennuskustannuksiltaan hieman kalteva-akselisia järjestelmiä kalliimpia. Horisontaalisissa järjestelmissä nämä kustannukset ovat vielä kalteva-akselisiakin alhaisemmat.

Akseleiden määrän ja suunnan lisäksi myös erilaiset käyttöjärjestelmät aiheuttavat eroja aurinkoa seuraaviin järjestelmiin, eli passiivisilla järjestelmillä on aktiivisiin järjestelmiin verrattuna omat hyvät ja huonot puolensa. Passiivisten järjestelmien asennusprosessi on suhteellisen helppo ja ylläpitokustannukset ovat alhaiset. Lisäksi niiden suurin etu on kyky seurata aurinkoa ilman moottoreita, hammaspyöriä tai mikrokontrollereita. (AL-Rousan et al. 2018, s. 2553) Passiiviset järjestelmät eivät siis vaadi ulkoista energianlähdettä toisin kuin aktiiviset järjestelmät. Ne ovat lisäksi yksinkertaisempia toteuttaa, hinnaltaan alhaisempia ja ne tarvitsevat vähemmän osia, eli niiden rakenne on yksinkertaisempi. Passiivisilla järjestelmillä on kuitenkin aktiivisia järjestelmiä alhaisempi tarkkuus. Siitä huolimatta niillä voidaan saada hyviä tuloksia aikaan, ja ne pystyvät kilpailemaan suorituskyvyssä tietyissä olosuhteissa aktiivisten järjestelmien kanssa. (Awasthi et al. 2020, s. 396; Mousazadeh et al. 2009, s. 1806; Musa et al. 2023, s. 15–19)

Passiivisilla järjestelmillä on kuitenkin merkittäviä huonoja puolia. Passiiviset järjestelmät ovat hitaita auringon seurannassa aamulla, eli ne jäävät aamuisin hieman jälkeen. Siten niiden hyötysuhde on huono etenkin alhaisissa lämpötiloissa. Lämpötilan ollessa riittävän alhainen ne lakkaavat toimimasta kokonaan, mikä laskee niiden luotettavuutta. (Awasthi et al. 2020, s. 396; Mousazadeh et al. 2009, s. 1806; Musa et al. 2023, s. 15–19) Passiiviset järjestelmät ovat siis vahvasti riippuvaisia sääolosuhteista, ja ne tarvitsevat toimiakseen riittävästi jatkuvaa auringonvaloa. Siksi huonot sääolosuhteet laskevat niiden tehokkuutta. Etenkin talven kylmyys on passiivisten järjestelmien ongelma, sillä ne tarvitsevat toimiakseen apulaitteita, jotka lisäävät kustannuksia. (AL-Rousan et al. 2018, s. 2553) Passiiviset järjestelmät eivät myöskään kykene toimimaan kovan myrskyn aikana, vaan ne on sammutettava manuaalisesti (Musa et al. 2023, s. 15–19). Vaikka passiiviset järjestelmät ovat halvempia kuin aktiiviset, ei niitä alhaisemman tuoton takia käytetä laajasti teollisessa mittakaavassa (Bakhshi ja Sadeh 2016, s. 525). Passiiviset järjestelmät eivät siis sovellu kovin hyvin esimerkiksi Suomen olosuhteisiin, koska niillä on vaikeuksia toimia alhaisissa lämpötiloissa.

Mikroprosessorilla ja sähköoptisella sensorilla tai päivä ja aika -algoritmilla toimivat aktiiviset järjestelmät mahdollistavat aurinkoenergian hyödyntämisen passiivisia järjestelmiä tehokkaammin. Ne pystyvät toimimaan alhaisissa lämpötiloissa, mutta vaativat kuitenkin säännöllistä huoltoa johtuen moottoreista sekä liikkuvista osista, jotka ovat usein myös kalliita. Valosensorijärjestelmien hyviä puolia ovat suurempi tarkkuus, luotettavuus sekä tehokkuus kuin passiivisilla ja algoritmijärjestelmillä. Sensorijärjestelmät on myös mahdollista toteuttaa siten, että ne pystyvät suojautumaan tuulelta ja jatkamaan toimintaansa tuulen laantuessa. Niiden haittapuolia ovat suuremmat toteuttamiskustannukset, suurempi osamäärä sekä monimutkaisempi rakenne kuin passiivisissa ja algoritmijärjestelmissä. Sensorijärjestelmät ovat myös riippuvaisia auringonvalon voimakkuudesta. Siten tietyissä olosuhteissa, kun valon määrä on vähäistä, sensorijärjestelmät eivät välttämättä aina seuraa aurinkoa kovin tehokkaasti. (Musa et al. 2023, s. 15–19) Näin ollen epäsuotuisissa sääolosuhteissa, kuten pilvisellä, sateisella tai sumuisella säällä, valosensorijärjestelmät saattavat kuluttaa ylimääräistä energiaa. Tämä johtuu siitä, että valosensorit eivät aina tunnista siroamisen takia auringonvalon suuntaa ja saattavat osoittaa jopa vastakkaiseen suuntaan kuin missä aurinko todella sijaitsee. Siten valosensorijärjestelmän auringon seuraamiseen käyttämä energiamäärä voi nousta huomattavasti algoritmijärjestelmän vastaavaa energiamäärää suuremmaksi. Suotuisissa sääolosuhteissa algoritmin ja valosensoreiden avulla toimivien järjestelmien välillä ei kuitenkaan ole eroa. (Kuttybay et al. 2020) Kuitenkin yleensä takaisinkytketty sensorijärjestelmä on luotettavampi ja tarkempi kuin avoin algoritmijärjestelmä. Sensorijärjestelmä nimittäin kykenee eliminoimaan mahdolliset auringonseurannan virheet, sillä sensorit lähettävät jatkuvasti tietoa auringon sijainnista. (AL-Rousan et al. 2018, s. 2558) Haittapuolena takaisinkytkennässä on, että se lisää sensorijärjestelmien monimutkaisuutta ja hintaa (Mousazadeh et al. 2009, s. 1807).

Avointa säätöjärjestelmää käyttävä algoritmijärjestelmä on siis yleisesti halvempi ja yksinkertaisempi toteuttaa kuin valosensorijärjestelmä (Awasthi et al. 2020, s. 395), mutta olennainen heikkous valosensorijärjestelmään verrattuna on sen huonompi tarkkuus (Bakhshi ja Sadeh 2016, s. 525). Algoritmijärjestelmä on kuitenkin kalliimpi, monimutkaisempi ja tarkempi kuin passiivinen järjestelmä. Se soveltuu passiivista järjestelmää paremmin käytettäväksi aamuin ja illoin, mutta ei yhtä hyvin kuin sensorijärjestelmä. Algoritmijärjestelmän suorituskyky on myös yleisesti valosensorijärjestelmää heikompi pilvisellä säällä, ja se ei voi toimia kovan myrskyn aikana. Luotettavuuden osalta algoritmijärjestelmä on passiivista ja valosensorijärjestelmää heikompi. (Musa et al. 2023, s. 15–19) Algoritmijärjestelmän huonompi luotettavuus johtuu esimerkiksi siitä, että sähkökatkon sattuessa järjestelmään ohjelmoitu kello pysähtyy, jolloin sähköjen palautuessa se

on jäänyt auringon liikkeestä jälkeen. Sensorijärjestelmä löytää virran palautuessa auringon suunnan uudestaan paremmin, sillä se saa virtojen palattua takaisinkytkennän avulla tiedon valosensoreilta auringon suunnasta. Pilvisellä säällä algoritmijärjestelmän suorituskyky voi olla heikompi, sillä se ei osaa suuntautua kohti taivasta hajasäteilyn maksimoimiseksi. Edeltävien kappaleiden perusteella algoritmi- ja valosensorijärjestelmien tarkkuus ja luotettavuus riippuvat kuitenkin paljon toteutuksesta. Siinä täytyy huomioida järjestelmien toiminta vaihtelevissa sääolosuhteissa ja ratkaisut mahdollisten ongelmatilanteiden varalle. Esimerkiksi vara-akku voi olla ratkaisu virtojen katkeamisen varalle, ja valosensorin peittyminen lumella voidaan estää lisäämällä sensoriin lämmitys.

3.3 Auringon seuraamisen energiahyöty Suomessa

Aurinkosähköjärjestelmien energiantuoton simulointiin on kehitetty erilaisia sovelluksia, kuten PVGIS (engl. Photovoltaic Geographical Information System). PVGIS on Euroopan komission tarjoama ilmainen työkalu, jonka avulla voidaan selvittää ilmasto-olosuhteet, auringonsäteilyn määrä ja aurinkosähköjärjestelmän suorituskyky kaikkialla Euroopassa ja Afrikassa sekä suuressa osassa Aasiaa ja Amerikkaa. Työkalu ei kuitenkaan kata pohjois- ja etelänapoja. Työkalun avulla voidaan arvioida sähköverkkoon liitetyn kiinteän tai aurinkoa seuraavan aurinkosähköjärjestelmän keskimääräinen kuukausittainen ja vuotuinen energiantuotto. Kiinteän järjestelmän tapauksessa voidaan valita asennus rakennuksen pintaan tai maa-asennus. Energiantuotot voidaan laskea myös kiinteälle itsenäiselle järjestelmälle, jota ei ole kytketty jakeluverkkoon vaan akkuvarastoon. Työkalussa on mahdollista valita aurinkoa seuraavan järjestelmän tyypiksi vertikaalinen, kalteva-akselinen tai kaksiakselinen järjestelmä. PVGIS huomioi laskennassa auringon säteilyn, lämpötilan, tuulen nopeuden, paneelin tyypin sekä häviöiden vaikutukset. Työkalu ottaa laskentaa varten meterologiset tiedot jokaiselta tunnilta yli kymmenen vuoden ajalta käyttäjän haluamassa sijainnissa. (PVGIS 2022)

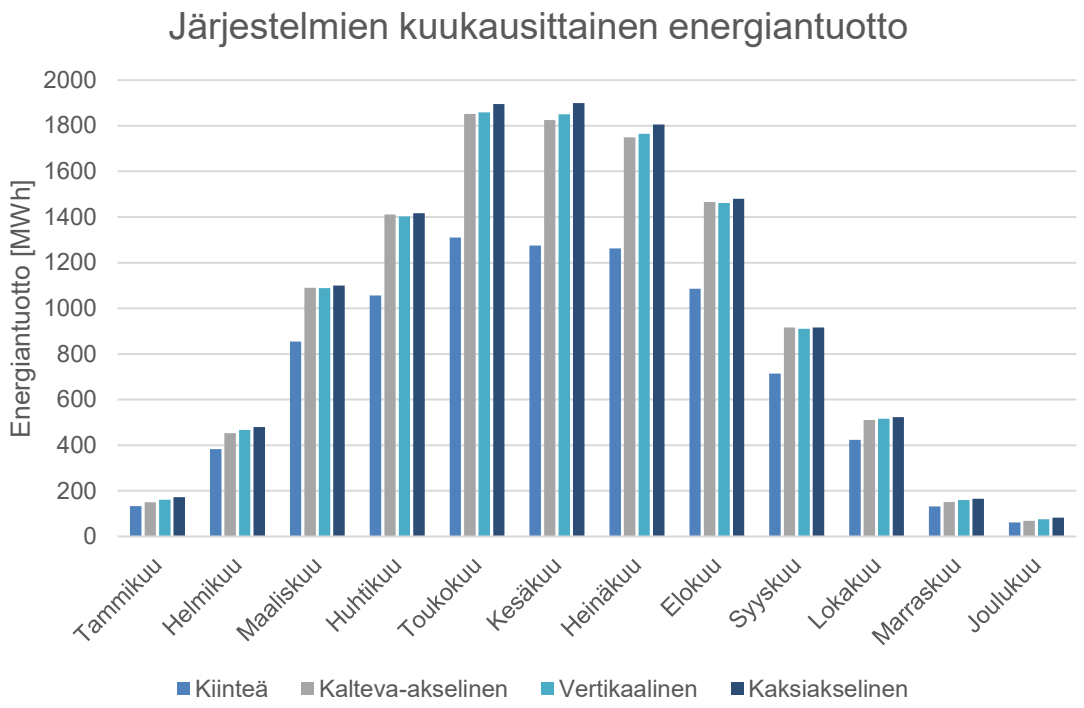
Verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän tapauksessa PVGIS-työkalu vaatii syötteinä aurinkosähköjärjestelmän sijainnin, käytettävän auringon säteilyn tietokannan, paneelin tyypin, järjestelmän huipputehon kilowattipiikkeinä ja häviöt prosentteina, mikäli työkalun antaa optimoida paneelien kulmat ja suuntaukset. Kiinteän järjestelmän tapauksessa on valittava lisäksi asennustapa. Ohjelmaan on mahdollista syöttää tiedot myös kiinteän järjestelmän kustannuksista, jolloin työkalu laskee tuotetun sähkön hinnan kilowattituntia kohden. Työkalun oletushäviönä on 14 %, joka kattaa kaikki järjestelmän tehoa ja näin ollen sähköverkkoon syötettyä virtaa pienentävät tekijät. Niitä ovat esimerkiksi häviöt kaapeleissa, aurinkosähköpaneelien likaantuminen tai peittyminen lumella ja paneelien keskimääräisen tehon heikkeneminen ajan kuluessa. Kokonaishäviöitä on

mahdollista muuttaa, jos käyttäjällä on parempaa tietoa käytössään tai esimerkiksi todella korkean hyötysuhteen omaava invertteri. (PVGIS 2022) PVGIS muodostaa käyttäjän halutessa kiinteän järjestelmän optimaalisen suuntauksen atsimuuttikulman muodossa sekä optimaaliset kaltevuudet erilaisten järjestelmien energiantuoton kannalta. Lisäksi se laskee tuloksina muun muassa järjestelmän tuottaman vuotuisen energiamäärän (kWh), vuotuisen vaihtelun energiamäärässä (kWh), vuotuisen säteilymäärän (kWh/m^2) sekä kokonaishäviöt prosentteina.

Seuraavaksi PVGIS-työkalulla simuloidaan 10 000 kWp:n eli 10 MWp:n suuruisen kiinteän, kalteva-akselisen, vertikaalisen ja kaksiakselisen järjestelmän tuottamaa energiamäärää vuoden aikana. Tarkoituksena on selvittää aurinkoa seuraavien järjestelmien potentiaalisia tuottoja Suomen olosuhteissa ja verrata niitä kiinteään järjestelmään. Sijaintina käytetään Tamperetta, jonka koordinaatit ovat noin 61N, 24E. Paikan soveltuvuutta ei arvioida tarkemmin esimerkiksi sijainnissa olevien rakennuksien kannalta. Kaikkien järjestelmien kokonaishäviöksi arvioidaan 14 %, ja säteilyn tietokantana käytetään satelliittipohjaista PVGIS-SARAH2 tietokantaa, joka vaikuttaa jonkin verran tuottomääriin. Paneelityypiksi valitaan piikidepaneeli, ja työkalun annetaan laskea optimikulmat kullekin järjestelmälle. Kiinteälle järjestelmälle PVGIS antaa optimaaliseksi kaltevuuskulmaksi valitussa sijainnissa 44˚ ja optimaaliseksi suuntaukseksi eli atsimuuttikulmaksi työkalu antaa -3˚. Kiinteä järjestelmä tulisi siis suunnata etelästä mitattuna kolme astetta idän suuntaan. Työkalun optimoima kaltevuus vertikaaliselle järjestelmälle on 60˚ ja kalteva-akseliselle 48˚.

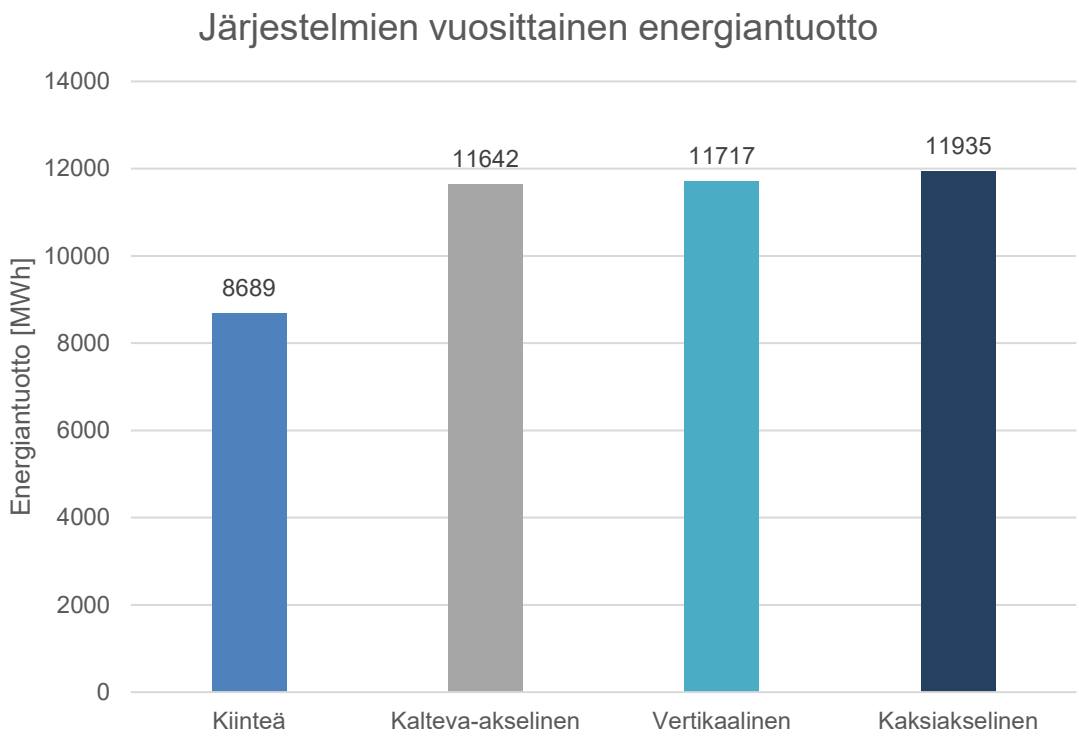
Kuvassa 4 on esitetty 10 MWp:n suuruisen kiinteän, kalteva-akselisen, vertikaalisen ja kaksiakselisen järjestelmän energiantuotto megawattitunteina eri kuukausina. Kuvan perusteella kiinteä järjestelmä tuottaa joka kuukausi selvästi vähiten energiaa, mikä johtuu sen kiinteästä kulmasta ja suuntauksesta aurinkoon nähden. Kiinteän järjestelmän tuottoerot aurinkoa seuraaviin järjestelmiin näyttäisivät kuitenkin pienenevän talvikuukausina. Syy tähän on luultavasti vähäisempi säteilymäärä, jolloin aurinkoa seuraavilla järjestelmillä ei saada tuotettua niin paljon lisähyötyä kuin kesällä. Kaksiakselinen tuottaa järjestelmistä eniten energiaa, sillä se pystyy suuntautumaan kahden akselin avulla kaikista tarkimmin kohti aurinkoa. Kalteva-akselinen ja vertikaalinen sijoittuvat edellä mainittujen järjestelmien väliin. Niiden eroja on vaikeampi nähdä, sillä tuotot ovat hyvin lähellä toisiaan, ja paremmuusjärjestys ei ole joka kuukausi sama. Tarkemmin katsottuna kalteva-akselinen tuottaa vertikaalista järjestelmää enemmän energiaa vain maalis-, huhti-, elo- ja syyskuussa, mutta muina kuukausina vertikaalinen on tuottoisampi. Kalteva-akselinen tuottaa siis vertikaalista enemmän kuukausina, jolloin säteilymäärä ei ole

suurimmillaan eikä pienimmillään, vaan keskitasoa. Syy tälle saattaa löytyä työkalun laskemista järjestelmien optimikulmista, jotka muodostuvat oletettavasti sen perusteella, että koko vuoden aikana saataisiin mahdollisimman suuri tuotto. Tämän takia 48˚:een kulma saattaa olla 60˚:tta parempi kuukausina, jolloin kalteva-akselinen päihittää vertikaalisen järjestelmän. Jos järjestelmiä käytettäisiin vain tiettyinä kuukausina vuodessa, optimikulma olisi luultavasti erisuuruinen kuin koko vuodelle optimoitu kulma.



Kuva 4. *Erityyppisten aurinkosähköjärjestelmien energiantuotot kuukausittain.*

Kuvassa 5 on esitetty järjestelmien vuotuiset energiantuotot. Siitä ilmenee, että vuosittaisella tuotolla mitattuna vertikaalinen järjestelmä tuottaa enemmän energiaa kuin kalteva-akselinen. Kuvasta voidaan todeta myös, että kiinteä todella tuottaa vähiten ja kaksiakselinen eniten energiaa. Aurinkoa seuraavien järjestelmien vuotuiset tuotot ovat hyvin lähellä toisiaan, ja myös kaksiakselinen on lähempänä yksiakselisia järjestelmiä kuin kuvan 4 perusteella olisi voinut luulla. Kun lasketaan aurinkoa seuraavien järjestelmän energiahyödyt verrattuna kiinteään järjestelmään, saadaan vuotuiseksi tuottohyödyksi kaikkien kääntyvien järjestelmien osalta noin 35 %. Tarkalleen ottaen kalteva-akselinen tuottaa 33,98 %, vertikaalinen 34,85 % ja kaksiakselinen 37,35 % enemmän energiaa kuin kiinteä järjestelmä. Verrattaessa kiinteään järjestelmään ovat erot näiden kolmen järjestelmän välillä hyvin pieniä. Kalteva-akselisen ja vertikaalisen ero on vain hieman alle 1 % ja vertikaalisen sekä kaksiakselisen vain 2,5 %. Huomioitavaa on, että järjestelmän koko ei vaikuta prosentuaalisiin eroihin, ellei PVGIS-työkalussa muuteta jotain muuta parametria kuin järjestelmän huipputehoa.

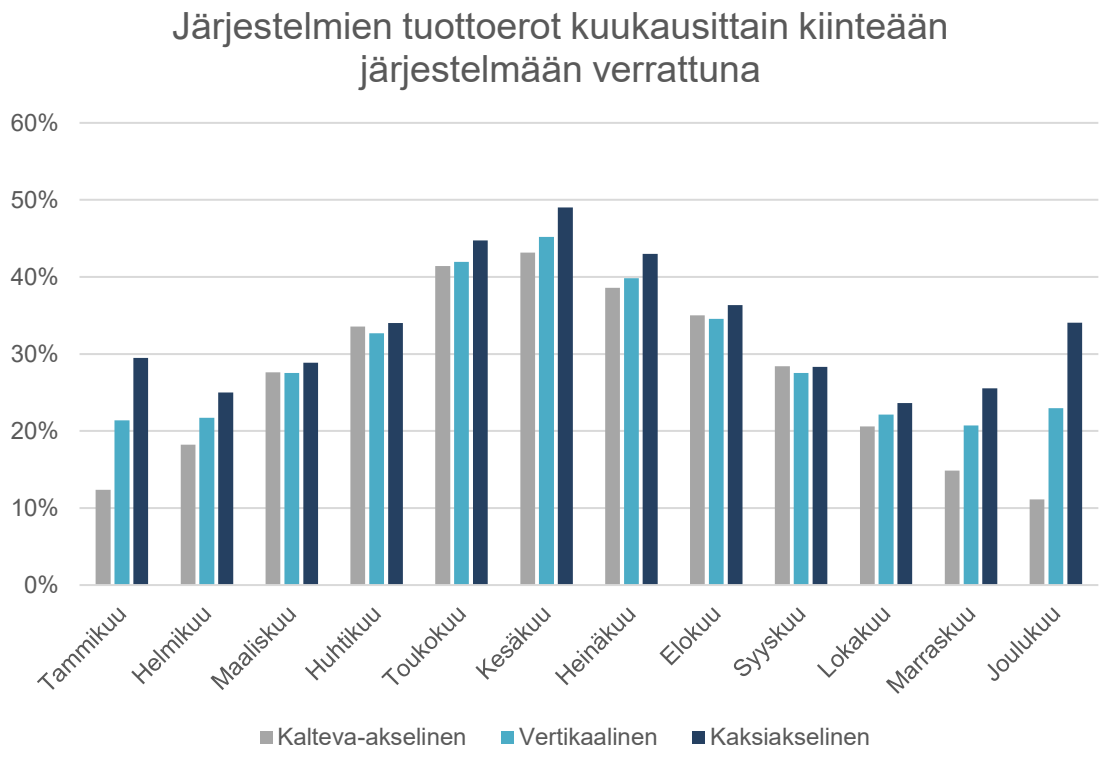


Kuva 5. *Aurinkosähköjärjestelmien vuosittaiset energiantuotot.*

Kuvassa 6 on esitetty aurinkoa seuraavien järjestelmien tuottoerot prosenteissa kuukausittain kiinteään järjestelmään verrattuna, jotta järjestelmien väliset kuukausittaiset erot tulevat selkeämmin esille. Kuvasta voidaan varmistaa, että aurinkoa seuraavien järjestelmien hyöty verrattuna kiinteään järjestelmään pääsääntöisesti todella pienenee talvikuukausina säteilymäärän ollessa alhaisempi. Touko- ja kesäkuussa kaikkien kääntyvien järjestelmien energiahyödyt ovat yli 40 % sekä huhti- ja elokuussakin vielä yli 30 %. Heinäkuussa kaksiakselisella päästään yli 40 %:iin, mutta vertikaalinen ja kalteva-akselinen jäävät hieman sen alle. Jopa maalis- ja syyskuussa tuottohyöty on vielä lähelle 30 %. Talvea kohti tuottoerot laskevat järjestelmästä riippuen kohti 10:tä tai 20 %:a. Kuvasta 6 nähdään, että etenkin joulu- ja tammikuussa aurinkoa seuraavien järjestelmien väliset erot kasvavat suureksi. Keväällä ja syksyllä erot tasoittuvat, kun taas touko- kesä- ja heinäkuussa on taas pientä eroa.

Kalteva-akselisella tuottohyöty nousee tasaisesti kohti kesäkuuta ja laskee taas tasaisesti kohti talvea. Sen tuottohyöty marraskuusta helmikuuhun on alle 20 %. Tammi- ja joulukuussa hyöty on ainoastaan hieman yli 10 %. Kalteva-akselinen järjestelmä onkin kuvan 6 perusteella kääntyvistä järjestelmistä huonoin, jos sitä käytetään talvikuukausina. Vertikaalinen ja kaksiakselinen järjestelmä tuottavat prosenteissa mitattuna huomattavasti enemmän marras-, joulu- ja tammikuussa verrattuna kalteva-akseliseen.

Tämä saattaa johtua siitä, että aurinko ei nouse kovin korkealle, joten sen itä-länsi suuntaisen liikkeen seuraaminen suuremmalla kaltevuuskulmalla korostuu. Kalteva-akselisen optimikulma on vain 48˚ eli kulma aurinkoon ei ole talvikuukausina kovin suotuisa auringon paistaessa matalalta. Kaksiakselisen järjestelmän hyöty näyttäisi korostuvan kesällä säteilymäärän ollessa korkeampi sekä talvella auringon paistaessa hyvin matalalta. Erityisesti joulu- ja tammikuussa kaksiakselinen järjestelmä tuottaa paremmin muihin järjestelmiin verrattuna. On hieman yllättävää, että kaksiakselisen tuottoero jopa kasvaa marras-, joulu- ja tammikuussa verrattuna kiinteään järjestelmään. Tämä johtuu luultavasti siitä, että kahden akselin avulla järjestelmä saadaan suunnattua myös talvikuukausina suuremmalla kaltevuuskulmalla optimaalisesti kohti aurinkoa, jolloin vähäinenkin valomäärä saadaan hyödynnettyä tehokkaasti. Myös vertikaalisella järjestelmällä tuottoero kiinteään kasvaa joulu- ja tammikuussa. Vertikaalisella järjestelmällä optimikulma on 60˚, jonka merkitys korostuu talvella, kun aurinko paistaa matalalta. Kuvaa 6 tulkitessa on kuitenkin hyvä huomata, että kesällä saadaan tuotettua määrällisesti enemmän ja talvella vähemmän energiaa johtuen säteilymääristä. Koska talvella tuotetun energian määrä on pieni, kilowattitunteina mitattuna määrät eivät ole niin merkittäviä, vaikka prosenteissa ero näyttää suurelta. Tämä voidaan myös varmistaa kuvasta 4.



Kuva 6. *Aurinkoa seuraavien järjestelmien prosentuaaliset tuottoerot kuukausittain verrattuna kiinteään järjestelmään.*

3.4 Kaupalliset aurinkoa seuraavat järjestelmät

Suomesta löytyy vain muutama aurinkoa seuraavia järjestelmiä suunnitteleva tai valmistava yritys. Järjestelmistä ei kuitenkaan löydy paljoa tietoa, sillä yritysten sivuilla ei ole juurikaan kuvia järjestelmistä tai tietoa järjestelmien sisällöstä ja ominaisuuksista. Järjestelmät, joista kuvia löytyy, ovat pääsääntöisesti yksiakselisia vertikaalisia tai kaksiakselisia järjestelmiä. Niissä vertikaalikääntö suoritetaan kiinteän pystytolpan päässä olevan kierukkavaihteen avulla. Rakenteet vaikuttavat kalliilta ja korkeilta, eli korkeuden perusteella aurinkoseuraajat on luultavasti suunniteltu käytettäväksi yksittäin tai kaukana toisistaan. Rakenteiden varjot ovat nimittäin korkeuden takia suuret, jolloin niitä ei kannata asentaa kovin lähekkäin. Esimerkiksi suurin aurinkovoimaloihin erikoistuneen Solarigo Systemsin (2023b) mukaan aurinkoa seuraavia järjestelmiä kannattaa asentaa vain paikoille, joissa tila on rajallinen, mutta energiantuotanto halutaan maksimoida. Suomesta löytyy myös yritys, joka valmistaa manuaalisesti käännettäviä aurinkosähköjärjestelmiä, jotka eivät varsinaisesti ole aurinkoa seuraavia järjestelmiä. Näiden tietojen perusteella aurinkoa seuraavia järjestelmiä ei valmisteta Suomessa teollisessa mittakaavassa, vaan ne ovat pikemminkin marginaalituotteita. Edeltävien huomioiden perusteella Suomen markkinoilla olisi siis varmasti tilaa aurinkoa seuraavien järjestelmien valmistajalle, sillä valmistajia ei ole paljoa ja järjestelmien hyötyjä suhteessa kiinteään järjestelmään ei ole perusteltu asiakkaille selkeästi. Kuvat järjestelmästä ja tiedot sen sisällöstä, ominaisuuksista, kannattavuudesta ja tuotosta verrattuna kiinteään järjestelmään voisivat myös lisätä mielenkiintoa ja kysyntää aurinkoa seuraaville järjestelmille. Myös tiedot järjestelmän toteutuneista huolto- ja ylläpitokustannuksista voisivat toimia kiinnostusta ja luottamusta herättävinä tekijöinä aurinkoa seuraaville järjestelmille. Ehkä suurin haaste aurinkoa seuraaville järjestelmille on, että niille ei juurikaan löydy toteutuneita referenssejä Suomesta varsinkaan teollisessa mittakaavassa. Kuitenkin yksittäiskäyttöön aurinkoseuraajia on toteutettu myös Suomessa.

Asennetun kapasiteetin perusteella merkittäviä toimijoita aurinkoseuraajamarkkinoilla ovat muun muassa saksalainen Ideematec, espanjalaiset Soltec, Axial Structural Solutions ja PV Hardware, kiinalaiset Archtech ja Versolsolar sekä yhdysvaltalaiset Array Technologies ja Nextracker (Blackridge Research 2024). Tutkimalla näiden suuria aurinkoa seuraavia järjestelmiä valmistavien yritysten verkkosivuja löytyy heidän tuotteistaan paljon yhteisiä piirteitä. Lähes kaikki yrityksistä valmistavat vain horisontaalisia järjestelmiä, joissa useampaa suurta aurinkopaneeliriviä käännetään vain yhdellä moottorilla. Rivit on liitetty toisiinsa esimerkiksi terästangon tai nivelakselin avulla. Koska rivejä liitetään toisiinsa, on toteutuksissa huomioitu asennusmahdollisuus myös epätasaisiin

maastoihin esimerkiksi rivien välisen liitoskappaleen nivelellä. Monella valmistajalla rivien kääntö tapahtuu rivin pyörimisakseliin liitetyn kierukkavaihteen ja tasavirtamoottorin avulla. Toinen vaihtoehto on, että käännössä hyödynnetään hammastettua puoliympyrän muotoista levyä, jota moottori kääntää. Levy on liitetty paneeliriviin akseliin, jolloin levyä kääntämällä myös paneelirivi kääntyy. Tällä toimella on pyritty suurempaan momenttivarteen, jolloin saadaan käännettyä suurempia määriä aurinkopaneeleja. Vaihde ja kääntömekanismi myös kuormittuvat tällöin vähemmän eli huoltokustannukset laskevat ja kääntömekanismin elinikä nousee. Kääntömekanismin rasituksia on pienennetty myös toisella tavalla, eli asentamalla jokaiselle riville oma kierukkavaihde, joka ottaa rivin tuulikuorman vastaan. Kuitenkin vain yhdessä vaihteessa on moottori ja vaihteet on liitetty toisiinsa liitoskappaleen avulla. Järjestelmät on suunniteltu sekä rakenteeltaan että asennukseltaan yksinkertaisiksi, ja niiden asennustapa on usein joko betoniperustus tai teräspaalu. Ohjaus tapahtuu yleensä algoritmilla, jossa monella valmistajalla on lisäksi backtracking-toiminto, jonka tarkoitus on säätää paneelirivien kulmaa aamuin ja illoin siten, että rivit eivät varjosta toisiaan. Moottorien määrän vähentäminen, yksinkertainen rakenne, helppo asennus ja mahdollisuus asentaa järjestelmä epätasaisiin maastoihin laskevat järjestelmien hintaa sekä vähentävät asennus- ja huoltokustannuksia. Näillä kaikilla keinolla pyritään siis siihen, että järjestelmien hintaerot suhteessa kiinteisiin järjestelmiin olisivat mahdollisimman pienet ja järjestelmät olisivat kilpailukykyisiä niiden kanssa. Vain jotkut näistä suurimmista yrityksistä, kuten Versolsolar, valmistavat myös kalteva- ja kaksiakselisia järjestelmiä, joiden kiinnitysrakenteessa on tietty määrä paneeleja ja rakennetta kääntävä moottori.

3.5 Aurinkoa seuraavien järjestelmien taloudellinen kannattavuus

Aurinkoa seuraavan järjestelmän taloudellinen kannattavuus sekä taloudellisesti kannattavimman järjestelmän rakennetyypin valinta riippuvat monista tekijöistä. Taloudellisen analyysin tulokseen vaikuttaa oleellisesti järjestelmän vuosittainen energiantuotto, mutta aurinkoa seuraavan järjestelmän tuottaman energiamäärä ei yksin riitä perusteeksi järjestelmän valintaan. Valintaan vaikuttavat muun muassa myös järjestelmän hinta, koko, sähkötariffit, valtion tuet, maankäytön rajoitteet, leveyspiiri ja paikalliset sääolosuhteet. (Bakhshi ja Sadeh 2016) Suosittuja menetelmiä energiajärjestelmien taloudellisen kannattavuuden analysointiin ovat esimerkiksi nettonykyarvo eli NPV (engl. net present value), sähkön tasoitettu tuotantokustannus eli LCOE (engl. levelized cost of energy), sisäinen korkokanta ja takaisinmaksuaika. LCOE:n etu verrattuna muihin taloudellisen

analyysin menetelmiin on sen kyky arvioida järjestelmän verkkopariteettia, eli järjestelmän kykyä tuottaa sähköä pienemmällä tai yhtä suurella tasoitetun sähkön hinnalla kuin sähköverkon sähkön hinta. Verkkopariteetti onkin alan kustannustehokkuuden keskeinen tavoite. Sähkön tasoitetun tuotantokustannuksen laskennassa huomioidaan aurinkosähköjärjestelmän eliniän aikana tuottama energia sekä eliniän aikana muodostuvat kustannukset. Kustannuksia aiheuttavat sekä järjestelmän alkuinvestointi että järjestelmän elinkaaren aikana tuotettavan energian aiheuttamat kustannukset. Sähkön tasoitettu tuotantokustannus kertoo, kuinka paljon maksaa tuottaa tietty määrä energiaa, eli se voidaan ilmoittaa esimerkiksi muodossa €/kWh. Toteuttamiskelpoisin ratkaisu on se, jonka LCOE-arvo on pienin. (Bahrami ja Okoye 2018) LCOE on myös mittari siihen, kannattaako hanketta viedä eteenpäin. Se kertoo, tuleeko projekti saavuttamaan kannattavuusrajan ja olemaan voitollinen. LCOE:n laskeminen on yksi ensimmäisistä olennaisista toimenpiteistä, joka kannattaa suorittaa energiaprojektien analysoinnissa. (Elahi Gol ja Ščasný 2023, s. 620) LCOE voidaan laskea kaavan (1) esittämällä tavalla

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{T} \frac{I_t + O_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{T} \frac{E_t}{(1+r)^t}}, \tag{1}$$

jossa T kuvaa projektin kestoa vuosissa, t on vuosi, I_t järjestelmän alkuinvestointi, O_t vuosittaiset käyttökustannukset, M_t vuosittaiset huoltokustannukset, F_t vuosittaiset korkomenot, E_t vuosittainen energiantuotto ja r diskonttokorko. Vuosittainen energiantuotto voidaan esittää vielä kaavan (2) mukaisesti

$$E_t = S_t(1-d)^t, \tag{2}$$

jossa S_t on nimellinen vuosittainen energiantuotto ja d energiantuoton vähenemä prosenteissa. (Branker et al. 2011, s. 4472, 4475) Kun kaavasta (1) jätetään pois vuosittaiset korkomenot ja sijoitetaan siihen kaava (2), LCOE voidaan kirjoittaa kaavan (3) muodossa

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{T} \frac{I_t + O_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{T} \frac{S_t(1-d)^t}{(1+r)^t}}. \tag{3}$$

Sähkön tasoitettu tuotantokustannus keskittyy kuitenkin vain energiantuotannon aiheuttamien kustannusten ja tuotettujen energiamäärien analysointiin eikä suoraan huomioi investoinnin tuottamaa rahallista arvoa. Siksi LCOE:n ohella on hyvä käyttää myös muita taloudellisia mittareita, kuten nettonykyarvoa. Elahi Golin ja Ščasnýn (2023, s. 620) mu-

kaan nettonykyarvo kuvaa investoinnin elinkaaren aikana toteutuvien rahavirtojen, eli tulojen ja menojen, arvoa diskontattuna nykyhetkeen. Se voidaan laskea kaavan (4) mukaisesti

$$NPV = \sum_{t=0}^{T} \left(\frac{R_t}{(1+r)^t} - \frac{C_t}{(1+r)^t} \right), \tag{4}$$

jossa T kuvaa projektin kestoa vuosissa, t on vuosi, R_t investoinnin vuosittaiset tulot, C_t investoinnin vuosittaiset kulut, ja r diskonttokorko. (Elahi Gol ja Ščasný 2023, s. 620) Jos siis aurinkosähköjärjestelmän elinkaaren ajalta nykyhetkeen diskontatut tulot ovat suuremmat kuin menot, kannattaa projekti toteuttaa. Mitä suurempi nettonykyarvo on, sitä kannattavampi on projekti.

Aurinkoa seuraavien järjestelmien taloudellista kannattavuutta on analysoitu useissa tutkimuksissa, mutta ne eivät juurikaan sijoitu Suomeen. Esimerkiksi Bakhshi ja Sadeh (2016) vertailevat nettonykyarvon, sisäisen korkokannan, takaisinmaksuajan ja energiantuoton osalta kiinteää, horisontaalista, vertikaalista ja kaksiakselista järjestelmää. Tutkimus sijoittuu leveyspiirille 36˚N, ja energiantuoton laskentaan hyödynnetään globaalin säteilymäärän tietoja. Tutkimuksessa todetaan, että erilaisilla sähkötariffeilla, verotuksella, inflaatiolla ja diskonttokoroilla ei ole vaikutusta tulokseen, kun vertaillaan järjestelmiä, joilla on yhtä suuri sähköntuotto. Siksi tutkimuksen järjestelmät on mitoitettu siten, että niiden vuotuinen sähköntuotto on yhtä suuri eli noin 255 MWh. Tällöin järjestelmien nettonykyarvohyödyt ovat yhtenäiset, joten kannattavin järjestelmä on se, jolla on alhaisimmat nettonykyarvokustannukset. Tutkimuksessa todetaan, että horisontaalinen, vertikaalinen ja kaksiakselinen voivat olla kaikki kannattavia, mutta vertikaalinen on järjestelmistä kannattavin valinta. Järjestelmien vuosittaisen tuoton perusteella suuruusjärjestys on kaksiakselinen, vertikaalinen, horisontaalinen ja kiinteä, mutta silti suurin taloudellinen hyöty saavutetaan vertikaalisilla järjestelmillä. Kaksiakselinen on kannattavuudeltaan toiseksi paras valinta ennen kiinteää ja siten horisontaalinen kannattavuudeltaan huonoin. (Bakhshi ja Sadeh 2016)

Talaveran et al. (2019) tekemässä tutkimuksessa puolestaan verrataan talous- ja kustannusanalyysin avulla kiinteää, horisontaalista sekä kaksiakselista aurinkosähköjärjestelmää. Tutkimus on suoritettu kokoluokaltaan sekä kotitalouksille että teollisuudelle tarkoitetuille järjestelmille. Taloudelliset mittarit on laskettu kotitalouksille vuosikulutuksella 5000–15000 kWh ja teollisuudelle kulutuksella 500–2000 MWh. Tutkimuksessa on huomioitu erilaisia teknisiä, rahoituksellisia ja taloudellisia tekijöitä, kuten käyttö- ja ylläpitokustannukset, alkuinvestointikustannukset sekä sähkön hinta. Yksiakselisista järjestel-

mistä horisontaalinen on valittu tutkimukseen, sillä se on Talaveran et al. mukaan markkinoilla olevista yksiakselisista järjestelmistä helppokäyttöisin, ja sillä on pienimmät asennuskustannukset. Tutkimuksessa on käytetty tiettyjä sijainteja leveyspiireillä 9˚S, 24˚N, 28˚N ja 37˚N. Syy näihin sijainteihin on niiden toisistaan paljon poikkeavat tuloksiin vaikuttavat tekijät, kuten aurinkoenergian käytettävissä olevat resurssit, velka-pääoma-osuus, inflaatio, veroprosentit, lainan korot, sähkön hinta ja oman pääoman tuottoprosentti. Näin on saatu selvitettyä kyseisten tekijöiden vaikutus kannattavimman järjestelmän valintaan. Tutkimuksen tuloksena todetaan, että kaksiakselinen järjestelmä on taloudellisesti huonoin vaihtoehto ja LCOE-arvot kiinteällä sekä horisontaalisella järjestelmällä ovat sijainnista riippuen samat tai poikkeavat hyvin minimaalisesti kiinteän hyväksi. Koska kiinteän ja yksiakselisen LCOE-arvot ovat hyvin lähellä toisiaan, kannattaa valita horisontaalinen järjestelmä sen suuremman sähköntuotantokapasiteetin takia. Muiden taloudellisten mittareiden osalta kiinteällä järjestelmällä on paras takaisinmaksuaika sekä sisäinen korkokanta. Talaveran et al. mukaan nettonykyarvo on kuitenkin investoinnin tuoton absoluuttinen mittari, ja sen perusteella yksiakselinen järjestelmä voi olla kiinteää kannattavampi valinta sijainnista ja olosuhteista riippuen sekä kotitalouksille että myös teollisessa mittakaavassa. (Talavera et al. 2019)

Elahi Gol ja Ščasný (2023) taasen suorittavat tutkimuksessaan teknistaloudellisen analyysin, jossa verrataan teollisen mittakaavan kiinteän ja yksiakselisen horisontaalisen aurinkoa seuraavan järjestelmän suoriutumista Kyproksella leveyspiirin 35˚N tuntumassa. Tutkimuksessa verrataan teollisen mittakaavan yksiakselista järjestelmää yhtä suuren sähköntuotantokapasiteetin (781 kWp) omaavaan sekä suuremman kapasiteetin (1034 kWp) omaavaan kiinteään järjestelmään. Järjestelmille lasketaan sisäinen korkokanta, takaisinmaksuaika, nettonykyarvo ja sähkön tasoitettu tuotantokustannus. Järjestelmien energiantuotto on selvitetty kolmesta eri säteilytietokannasta, jotka ovat SolarGis, PVSyst ja PVGIS. Niiden perusteella horisontaalinen järjestelmä tuottaa 20–30 % enemmän energiaa kuin samankokoinen kiinteä järjestelmä. Tutkimuksessa tarkasteltavassa horisontaalisessa järjestelmässä käytetään samankaltaisia komponentteja kuin erityyppisissä yksiakselisissa järjestelmissä, jotta osien vaikutus tuloksiin saadaan poistettua ja tuloksia sovellettua kaikkiin yksiakselisiin järjestelmiin. Tutkimuksessa käytettävässä horisontaalisessa järjestelmässä moottoria käytetään liikuttamaan toisiinsa liitettyjä paneelirivejä, joissa paneeleja on 200 kW:n edestä. Laskennassa on huomioitu monia taloudellisia tekijöitä, kuten sähkön syöttötariffi, verkkoliitännän kustannukset, järjestelmien kokonaiskustannukset, käyttökustannukset ja maan vuokrahinta. Tutkimuksen tuloksena todetaan, että aurinkoa seuraavan järjestelmän investointikustannukset ovat suuremmat kuin saman kapasiteetin kiinteällä järjestelmällä, mutta aurinkoa seuraava järjestelmä

suoriutuu silti taloudellisesti paremmin. Aurinkoa seuraavalla järjestelmällä on lisäksi parempi pääoman sisäinen korkokanta sekä sähkön tasoitettu tuotantokustannus kuin samankokoisella sekä myös noin 25 % suuremmalla kiinteällä järjestelmällä. Myös sen takaisinmaksuaika on yleisesti parempi, mutta ei kaikissa tapauksissa riippuen rahoitukseen käytettävän velan määrästä. (Elahi Gol ja Ščasný 2023) Huomioitavaa on, että tutkimuksessa on tarkasteltu järjestelmää, jossa suurta määrää aurinkopaneeleja käännetään yhdellä moottorilla. Siten moottorin kustannusten osuus kokonaiskustannuksista ja huoltokustannuksista on oletettavasti saatu alemmas. Tämä tietenkin nostaa aurinkoa seuraavan järjestelmän kannattavuutta, sillä kustannukset verrattuna kiinteään järjestelmään eivät moottorin osalta nouse kohtuuttomasti.

Joissain tilanteissa aurinkoa seuraava järjestelmä ei ole kiinteää järjestelmää parempi johtuen aurinkopaneelien ylikuumenemisesta, minkä Eldin et al. (2016) selvittävät tutkimuksessaan. Tutkimuksena tarkoituksena on tutkia auringon seuraamisen toteuttamiskelpoisuutta kuumilla ja kylmillä alueilla kaksiakselisen atsimuutti-korkeusjärjestelmän avulla. Tätä on tutkittu eteläisessä Egyptissä lähellä päiväntasaajaa sekä Saksassa Berliinissä ja Stuttgartissa. Lähellä päiväntasaajaa aurinkoa seuraavan järjestelmän energiahyöty verrattuna kiinteään on tutkimuksen mukaan vain noin 8 %, Stuttgartissa noin 17 % ja Berliinissä jo noin 40 %. Tutkimuksessa oletetaan, että auringon seuraamiseen käyttämä energia on 5–10 % järjestelmän tuottamasta energiasta. Tällöin lähellä päiväntasaajaa ei ole järkeä toteuttaa aurinkoa seuraavaa järjestelmää johtuen paneelien kuumenemisen aiheuttamista tehohäviöistä sekä auringon seuraamiseen kuluvasta energiasta. Kuitenkin tutkimuksen mukaan, kun huomioidaan sähkön syöttötariffi ja takaisinmaksuaika, on aurinkoa seuraava järjestelmä kannattava kylmemmillä ja pilvisemmillä alueilla myös taloudellisesti. Tutkimuksessa on käytetty piikidepaneeleja, joiden suorituskykyyn vaikuttaa ylikuumeneminen erityisesti kuumassa ilmastossa ja runsaassa säteilymäärässä. (Eldin et al. 2016) Kannattaa kuitenkin huomioida, että paneeliteknologia on kehittynyt vuodesta 2016, joten nykyään aurinkoa seuraava järjestelmä voi olla kannattava myös lähellä päiväntasaajaa. Lisäksi tutkimus on tehty kaksiakselisella aurinkoa seuraavalla järjestelmällä, joten yksiakselisessa järjestelmässä sekä paneelien ylikuumeneminen että järjestelmän kuluttama energia voi olla vähäisempää.

Bahrami ja Okoye (2018) ovat tutkineet erilaisten aurinkoa seuraavien järjestelmien kannattavuutta sekä teknisen että taloudellisen suorituskyvyn kannalta pohjoisella pallonpuoliskolla leveysasteilla 20–70˚N. Tutkimuksessa vertailtavat järjestelmät ovat kaksiakselinen, vertikaalinen, kalteva-akselinen sekä horisontaalinen EW- ja NS-järjestelmä. Järjestelmille on laskettu energiatuotto ja sähkön tasoitettu tuotantokustannus, jotta saadaan selville optimaalisin järjestelmä eri leveyspiireille. Eri leveyspiireillä on tarkasteltu

kahta sijaintia, joista toisessa säteilymäärä on maailman säteilymääräkartan mukaan leveyspiirin alhaisin ja toisessa korkein. Näin on saatu selville säteilymäärän vaikutus leveyspiirille optimaalisimman järjestelmän valintaan. Lisäksi tutkimuksessa on tarkasteltu myös alkuinvestoinnin kokonaiskustannusten ja seurantalaitteiden kustannusten vaikutusta kannattavuuteen. Kokonaiskustannuksissa on huomioitu runkorakenteen, invertterin, aurinkosähköpaneelin ja työvoiman kustannukset sekä kannustimet ja maakohtaiset arvonlisäverot. Tarkasteltavat järjestelmät ovat kokonaiskustannuksiltaan 1700–12700 Yhdysvaltain dollaria. Tutkimuksen mukaan kannattavimman järjestelmätyypin valintaan vaikuttaa moni tekijä, ja yleisesti ei voida määrittää parasta järjestelmätyyppiä, joka kannattaisi valita missä tilanteessa tahansa riippumatta olosuhteista. (Bahrami ja Okoye 2018)

Bahramin ja Okoyen (2018) mukaan yleisesti millä tahansa leveyspiirillä järjestelmän kokonaiskustannusten eli järjestelmän koon kasvaessa kaksiakselinen ja vertikaalinen järjestelmä nousevat ja EW- sekä NS-järjestelmät laskevat LCOE:n vertailussa. Leveyspiireillä 47–70˚N vertikaalinen järjestelmä sekä EW- ja NS-järjestelmät suoriutuvat yleisesti paremmin, kun leveyspiirin säteilymäärä on pieni. Kaksi- ja kalteva-akselinen taas suoriutuvat alhaisemman säteilymäärän sijainneissa huonommin verrattuna saman leveyspiirin suuremman säteilymäärän alueeseen. Tutkimuksen LCOE-analyysin perusteella horisontaalinen EW-järjestelmä on paras vaihtoehto alhaisemmilla leveyspiireillä pienten järjestelmien tapauksessa. Kuitenkin leveyspiirin kasvaessa EW-järjestelmä tippuu vertailussa muihin järjestelmiin riippumatta järjestelmän kokonaiskustannusten suuruudesta. Leveyspiirin kasvaessa vertikaalisen ja horisontaalisen NS-järjestelmän kannattavuus paranee. Vertikaalinen järjestelmä on paras valinta leveyspiirin ja järjestelmän kokonaiskustannusten kasvaessa suureksi. Kalteva-akselinen on puolestaan paras vaihtoehto, kun leveyspiiri ja järjestelmän kokonaiskustannukset ovat keskitasoa. Kaksiakselinen on LCOE:n perusteella paras valinta vain silloin, kun säteilymäärä on suuri, leveyspiiri alhainen ja järjestelmän kokonaiskustannukset suuret. NS-järjestelmä ei ole paras vaihtoehto missään olosuhteissa. (Bahrami ja Okoye 2018)

Bahramin ja Okoyen (2018) tekemässä tutkimuksessa on käytetty sijainteina muun muassa Ruotsissa sijaitsevia Tukholmaa sekä Kiirunaa, joiden leveyspiirit ovat 59,65˚N ja 67,82˚N. Tukholmassa säteilymäärä on leveyspiiriin nähden suuri ja Kiirunassa pieni. Tutkimuksen mukaan tuotetun energian määrän kannalta järjestys molemmissa sijainneissa on kaksiakselinen, vertikaalinen, kalteva-akselinen ja viimeisenä horisontaaliset järjestelmät. Järjestys kuitenkin muuttuu, kun huomioidaan myös taloudellinen näkökulma. Järjestys riippuu kokonaiskustannusten lisäksi seurantalaitteiden kustannusten osuudesta. Kuitenkin riippumatta seurantalaitteiden kustannuksista kalteva-akselinen on

Tukholmassa aina kannattavin järjestelmä, kun kokonaiskustannukset ovat alle 5700 $. Vertikaalinen puolestaan on varmasti kannattavin, kun kokonaiskustannukset ovat yli 12700 $. Näiden lukujen välillä järjestys riippuu seurantalaitteiden kustannusten suuruudesta. Kaksiakselinen järjestelmä puolestaan nousee viimeiseltä sijalta kolmanneksi ohi horisontaalisten järjestelmien, kun kokonaiskustannukset ovat vähintään 8700 $ riippumatta siitä, että seurantalaitteiden kustannukset olisivat suurempaa luokkaa. Korkeammalla leveyspiirillä Kiirunassa vertikaalinen järjestelmä on kannattavin valinta aina, kun kokonaiskustannukset nousevat yli 8700 $:iin. Leveyspiirin kasvaessa Tukholmasta Kiirunaan vertikaalinen järjestelmä muuttuu siis yhä kannattavammaksi ja se on kannattavampi valinta myös pienempään järjestelmään. Myös Kiirunassa kokonaiskustannusten ollessa yli 8700 $ kaksiakselinen nousee kannattavammaksi ohi horisontaalisten järjestelmien. Kiirunassa kalteva-akselinen on kannattavin ja kaksiakselinen horisontaalisia huonompi varmasti vain silloin, kun järjestelmien kokonaiskustannukset ovat korkeintaan 1700 $. Järjestykseen vaikuttaa 1700 $:n ja 8700 $:n välillä seurantalaitteiden kustannusten osuus. Kiirunassa huonoimmin vertailussa pärjää horisontaalinen EW-järjestelmä ja varsinkin suurempien järjestelmien tapauksessa. (Bahrami ja Okoye 2018)

Bahramin ja Okoyen (2018) tutkimuksen mukaan paras järjestelmätyyppi leveyspiireille 60–68˚N tasoitetuilla sähkönkustannuksilla mitattuna on siis vertikaalinen tai kalteva-akselinen järjestelmä. Tähän ei vaikuta järjestelmän koko tai seurantalaitteiden hinnan suuruus. Poikkeuksena on vain sijainti Alaskassa, jossa säteilymäärä on vähäistä ja leveyspiiri noin 60 ˚N. Tällöin kaksiakselinen järjestelmä nousee kannattavuudessa toiseksi ohi vertikaalisen. Horisontaaliset järjestelmät ovat huonoin vaihtoehto leveyspiireillä 60–68˚N aina, kun järjestelmän kokonaiskustannukset nousevat yli 8700 $:iin. (Bahrami ja Okoye 2018) Leveyspiirit 60–68˚N vastaavat Helsingin ja Kittilän väliin jääviä leveyspiirejä ja edellisessä kappaleessa tarkasteltujen ruotsalaisten kaupunkien sijainnit ovat lähellä Suomea, joten tuloksia voidaan soveltaa Suomen olosuhteisiin optimaalisimman järjestelmän arviointiin. Kun huomioidaan taloudellinen ja tekninen näkökulma sekä sovelletaan edellä mainittuja tuloksia, on Suomen olosuhteissa järjestys kooltaan suuremmissa järjestelmissä vertikaalinen, kalteva-akselinen, kaksiakselinen ja viimeisenä horisontaaliset järjestelmät. Suomen leveyspiireille ja olosuhteisiin soveltuvin järjestelmä on siis vertikaalinen järjestelmä, mutta pienempien järjestelmien tapauksessa voi myös kalteva-akselinen olla kannattavin.

Rodríguez-Gallegos et al. (2020) käsittelevät tutkimuksessaan erilaisten aurinkoa seuraavien järjestelmien potentiaalia ja kannattavuutta maailmanlaajuisesti verrattuna kiinteään järjestelmään. Lisäksi he selvittävät, onko yksipuolinen vai kaksipuolinen aurinko-

paneeli kannattavampi eri järjestelmissä ja sijainneissa. Tutkimuksessa huomioidaan sijainnista riippuvat olosuhteet, kuten ilmasto sekä taloudelliset tekijät sekä selvitetään, mitkä järjestelmä-paneeli-yhdistelmät ovat taloudellisesti kannattavimpia. Tutkittavat järjestelmät ovat kiinteä, kaksiakselinen, kalteva-akselinen ja horisontaalinen, mutta taloudellisessa analyysissa yksiakselisia järjestelmiä tarkastellaan kokonaisuutena. Järjestelmien kokojen on oletettu olevan megawattien luokkaa. Eri järjestelmien saamat säteilymäärät on validoitu oikeiden järjestelmien tuottamasta datasta sekä kirjallisuudesta, ja niiden avulla on laskettu järjestelmien energiantuotto. Lisäksi järjestelmien kokonaiskustannukset on laskettu 25 vuoden käyttöiän ajalta. Näiden tietojen avulla eri järjestelmätyypeille on laskettu sähkön tasoitetut tuotantokustannukset. Tutkimuksessa ei kuitenkaan ole huomioitu muun muassa kuljetuskustannuksia, maankäytön ja johdotuksien kustannuksia, valtion politiikkaa, tai mahdollisia varjostumisia, sillä monet näistä tekijöistä vaikuttavat eri järjestelmiin samalla tavalla. Tutkimuksessa kuitenkin todetaan, että aurinkoa seuraavat järjestelmät vaativat suurella todennäköisyydellä kuitenkin isomman tilan kuin kiinteät järjestelmät, mikä nostaisi niiden maankäytön kustannuksia. (Rodríguez-Gallegos et al. 2020)

Tutkimuksen perusteella aurinkoa seuraaviin järjestelmiin kannattaa asentaa kaksipuolinen aurinkopaneeli. Kiinteissä järjestelmissä tuottoerot ovat pienempiä kaksipuolisten paneelien hyväksi, mutta erot korostuvat aurinkoa seuraavissa järjestelmissä sekä myös leveyspiirin kasvaessa. Suomen leveyspiireillä yksipuolinen aurinkopaneeli yksiakselisessa järjestelmässä tuottaa noin 30–35 % enemmän kuin yksipuolinen paneeli kiinteässä järjestelmässä. Kaksipuolinen paneeli yksiakselisessa järjestelmässä puolestaan tuottaa noin 40–45 % enemmän energiaa kuin yksipuolinen paneeli kiinteässä järjestelmässä. Kaksipuolinen aurinkopaneeli on myös taloudellisesti mitattuna lähes kaikkialla yksipuolista parempi, jos paneeli on kiinnitetty yksiakseliseen aurinkoa seuraavaan järjestelmään. Kun leveyspiiri on suurempi kuin noin 50˚, on kaksipuolinen paneeli taloudellisesti parempi valinta mihin tahansa järjestelmään. Tutkimuksen mukaan yksiakselisilla aurinkoa seuraavilla järjestelmillä, joissa on kaksipuoliset paneelit, on alhaisimmat LCOE-arvot 93,1 %:lla maapallon maa-alueista. Kaksiakseliset järjestelmät kaksipuolisilla paneeleilla ovat kannattavimpia vain syrjäisillä alueilla 3,8 %:lla maapallon maa-alasta, joissa leveyspiiri on yli 70˚. Yksiakseliset järjestelmät, joissa on yksipuoliset paneelit, ovat toiseksi kannattavin vaihtoehto 87,9 %:lla maapallon maa-alasta. Yksiakselisten menestys vertailussa johtuu niiden huomattavasti suuremmasta energiantuotosta ja vain hieman suuremmista elinkaaren aikaisista kokonaiskustannuksista kuin kiinteillä järjestelmillä. Kaksiakselisten järjestelmien tuottama suurin energiahyöty kumoutuu ra-

kenteen huomattavasti kiinteää järjestelmää suuremmilla kustannuksilla. Leveyspiirin ollessa alle 60˚, yksiakseliset järjestelmät saavuttavat keskimäärin noin 14 % paremmat LCOE-arvot kuin kiinteät järjestelmät. Korkeammilla leveyspiireillä ja kaksipuolisilla paneeleilla erot ovat jopa 20 %:n luokkaa. Kaksiakselisten LCOE-arvot puolestaan ovat keskimäärin 8 % huonommat kuin kiinteillä järjestelmillä. Kaksiakselisten järjestelmien rakenteen kustannuksia pitäisi pystyä vähentämään noin 60 %, että ne saavuttaisivat alhaisimmat LCOE-arvot leveyspiirin ollessa alle 60˚. Kuitenkin esimerkiksi Suomen olosuhteissa myös kaksiakseliset järjestelmät kaksipuolisilla paneeleilla saavat tutkimuksen mukaan noin 10 % kiinteitä järjestelmiä paremmat LCOE-arvot. (Rodríguez-Gallegos et al. 2020) Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että korkeammilla leveyspiireillä kaksipuolisista paneeleista on enemmän hyötyä ja sellaiset kannattaa asentaa aurinkoa seuraavaan järjestelmään.

3.6 Tiedonhankinnan yhteenveto

Kirjallisuustutkimuksen perusteella erilaisten aurinkoa seuraavien järjestelmien ominaisuudet poikkeavat oleellisesti toisistaan. Kaksiakselinen järjestelmä tuottaa noin 35–50 % enemmän energiaa kiinteään järjestelmään verrattuna Suomen leveyspiireillä. Vertikaalinen jää kaksiakselisesta tuotossa vain noin 2 %, ja kalteva-akselinen noin 4 %. Energiantuoton osalta nämä kolme järjestelmää ovat siis melko tasaväkisiä. Horisontaaliset järjestelmät eivät puolestaan suoriudu yhtä hyvin, vaan niiden tuottohyöty Suomen olosuhteissa kiinteään järjestelmään verrattuna on 20 %:n luokkaa. Toisaalta horisontaalisten järjestelmien kustannukset ovat yleisesti pienemmät kuin muissa aurinkoa seuraavissa järjestelmissä. Yleisesti yksiakseliset järjestelmät ovat pienen tuottoeron ja alhaisempien kustannusten takia kaksiakselisia parempia vaihtoehtoja. Kuitenkin kaksiakselisista järjestelmistä on enemmän hyötyä suoran säteilyn määrän ollessa suurta tai talvella, kun auringon liikettä täytyy pystyä seuraamaan jyrkällä kaltevuuskulmalla. Säteilymäärä sekä hajasäteilyn määrä vaikuttavatkin järjestelmien suoriutumiseen. Puolestaan aktiivisten valosensori- ja algoritmijärjestelmien suorituskyvyissä ei ole suurta eroa kirjallisuustutkimuksen perusteella. Järjestelmien suorituskyky sekä hinta riippuvat paljon siitä, kuinka järjestelmä on toteutettu ja kuinka monimutkainen ohjausjärjestelmä on. Passiiviset järjestelmät ovat aktiivisiin verrattuna kustannuksiltaan pienempiä, mutta ne eivät sovellu kovin hyvin käytettäväksi Suomen olosuhteissa. Tutkimusten perusteella voidaan myös todeta, että erilaiset hybridiakseliset ja älykkäät järjestelmät sekä hybridijärjestelmät mahdollistavat suuremman energiantuoton, mutta näiden järjestelmien hinta on myös korkeampi.

Muita kirjallisuustutkimuksessa ilmenneitä järjestelmän energiantuottoon vaikuttavia ja suunnittelussa huomioitavia tekijöitä ovat esimerkiksi korkeus ja kaltevuuskulma. Molemmat vaikuttavat järjestelmään kohdistuvaan tuulikuormaan sekä järjestelmästä syntyviin varjoihin. Varjot ovat oleellinen tekijä etenkin suurissa aurinkosähkökentissä. Pienet muutokset kaltevuus- tai pyörimiskulmassa eivät vaikuta merkittävästi järjestelmän energiantuottoon. Järjestelmän kokonaiskustannukset ovat oleellinen tekijä, ja etenkin seurantalaitteista ja kääntömekanismista syntyvät kustannukset on tärkeää pitää pieninä. Lisäksi kääntömekanismin eliniän maksimointi, vähäinen huollon tarve, yksinkertainen rakenne, helppo asennus ja moottorien määrän vähentäminen ovat keskeisiä huomioitavia seikkoja aurinkoa seuraavan järjestelmän kehityksessä. Aurinkoa seuraavissa järjestelmissä paljon käytettyjä komponentteja käännön toteuttamiseen ovat esimerkiksi kierukkavaihteet ja valosensorit.

Edellisessä alaluvussa esitettyjen taloudellisten tutkimusten perusteella aurinkoa seuraavat järjestelmät voivat myös olla taloudellisesti kannattavampia kuin kiinteät järjestelmät. Tutkimukset osoittavat, että myös Suomen olosuhteissa aurinkoa seuraava järjestelmä voi tyypistä riippuen olla kiinteää järjestelmää kannattavampi, joten aurinkoa seuraavaa järjestelmää kannattaa alkaa kehittämään. Aurinkoa seuraavien järjestelmien energiahyöty ja kannattavuus verrattuna kiinteisiin järjestelmiin voivat jopa kasvaa päiväntasaajalta kohti suurempia leveyspiirejä. Tutkimuksissa vertailtiin etenkin horisontaalisia ja kaksiakselisia järjestelmiä kiinteisiin järjestelmiin, mutta myös aurinkoa seuraavia järjestelmiä keskenään. Yksiakselisia järjestelmiä käsiteltiin joissakin tutkimuksissa myös kokonaisuutena. Yksiakseliset järjestelmät ja etenkin Suomen olosuhteissa kalteva-askelinen sekä vertikaalinen järjestelmä vaikuttaisivat olevan kiinteää järjestelmiä kannattavampia. Kaksiakselinen puolestaan ei usein suoriudu suurimmasta energiantuotostaan huolimatta taloudellisesti yhtä hyvin kuin yksiakseliset järjestelmät.

Tutkimusten perusteella Suomen leveyspiireille taloudellisesti kannattavin valinta voisi siis olla vertikaalinen tai kalteva-akselinen järjestelmä, jotka kannattaa toteuttaa kaksipuolisilla paneeleilla. Lisäksi sääolosuhteet ovat Suomessa viileät, joten aurinkopaneelien energiahäviöt ovat pienemmät kuin kuumemmilla alueilla, sillä ne eivät ylikuumene yhtä helposti. Siten auringon seuraamisen lisäämän säteilymäärän ei pitäisi aiheuttaa Suomen olosuhteissa tehohäviöitä paneeleissa samalla tavalla kuin kuumemmilla alueilla. Kuitenkin huomionarvoista on, että monessa tutkimuksessa vertailtiin kiinteää järjestelmää suureen horisontaaliseen järjestelmään, mikä ei ole lähtökohtaisesti optimaalisin valinta korkeammille leveyspiireille Suomen olosuhteisiin. Vertikaalisissa sekä kalteva-akselisissa järjestelmissä on nimittäin horisontaalista järjestelmää haastavampaa kääntää suurta määrää aurinkopaneeleja yhdellä moottorilla. Kirjallisuustutkimuksessa

ilmenneet keskeiset havainnot aktiivisista aurinkoa seuraavista järjestelmistä on koottu taulukkoon 1. Järjestelmien hintojen on oletettu olevan yli 12000 € ja sijaitsevan Suomessa tai Suomen olosuhteita vastaavassa sijainnissa. Taulukossa on esitetty järjestelmien ominaisuudet yleisellä tasolla, eli taulukossa esitettyihin tietoihin voi myös olla poikkeuksia.

Taulukko 1. *Keskeiset havainnot aurinkoa seuraavista järjestelmistä.*

Ominaisuus	**Energian-tuotto**	**Kokonaiskus-tannukset**	**Taloudellinen kan-nattavuus suh-teessa kiinteään**	**Keskeiset edut**	**Suurimmat on-gelmat**
Hybridiakselinen	Suurin	Suurimmat	Ei ole kannattava	Suurin energian-tuotto olosuhteista riippumatta	Liian suuret to-teuttamiskustan-nukset
Kaksiakselinen	2. suurin	2. suurimmat	Voi olla kannattava	Suoran säteilyn hyödyntäminen, korkea energian-tuotto talvella	Kustannukset, pieni tuottoero VSAT- ja TSAT-järjestelmiin
Vertikaalinen	3. suurin	3. suurimmat	On kannattava	Soveltuu hyvin Suomen leveyspii-reille, hyvä hinta-tuotto-suhde	Kääntömekanis-miin kohdistuva tuulikuorma
Kalteva-akselinen	4. suurin	4. suurimmat	On kannattava	Hyvä hinta-tuotto-suhde, vertikaa-lista pienemmät kustannukset	Pyörimiskulman rajoitteet, kor-keus
Horisontaalinen	Pienin	Pienimmät	Voi olla kannattava	Pienet kustannuk-set, paneelirivien liittäminen toisiinsa	Muita järjestel-miä selkeästi huonompi tuotto

4. ASIAKASLÄHTÖINEN SUUNNITTELU

4.1 QFD-menetelmä

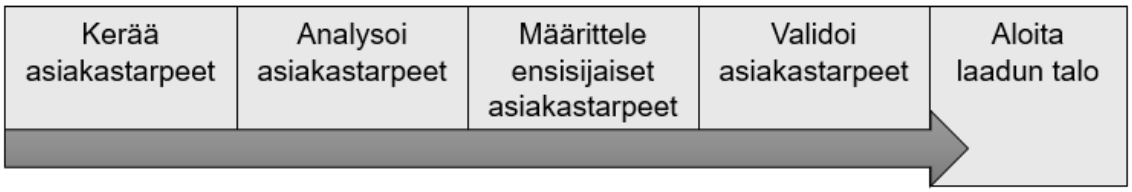
QFD (engl. quality function deployment) on tuote- ja palvelukehityksen menetelmä, jonka avulla pystytään määrittelemään selkeästi asiakkaiden toiveet ja tarpeet sekä niiden pohjalta parhaat tuote- ja palveluratkaisut (Ficalora ja Cohen 2010, luku 1.1.1). QFD-menetelmän avulla suoritetaan tuotekehitysprosessi, jossa käytetään useaa matriisia huomioimaan asiakkaiden mielipiteet koko suunnittelun, valmistuksen ja palvelun toimittamisen ajan. QFD-prosessi perustuu yrityksen usean eri osa-alueen yhteistyöhön, kuten tutkimuksen ja tuotekehityksen, valmistuksen, suunnittelun sekä markkinoinnin. (Griffin ja Hauser 1993, s. 2–3) QFD-menetelmän tarkoituksena on selvittää asiakkaiden toiveet ja tarpeet, jonka jälkeen menetelmä auttaa systemaattisesti arvioimaan, kuinka eri tuote- ja palveluratkaisut toteuttavat nämä asiakastarpeet. Tuotteen tai palvelun laatu määräytyy asiakkaiden toiveiden ja tarpeiden perusteella, joten ilman asiakkaiden tunnistamista ja heidän vaatimustensa selvittämistä, ei laadukasta tuotetta tai palvelua voi saada aikaan. Pohjimmiltaan QFD-menetelmä on siis laadun suunnittelu- ja johtamisprosessi, jonka tuloksena on tarkoitus saada parhaat mahdolliset tuote- ja palveluratkaisut. QFD:n keskeinen hyöty on, että se auttaa viestimään johdolle, mitä ollaan tekemässä, millä strategialla edetään ja ovatko tuoteratkaisut investoinnin arvoisia. (Ficalora ja Cohen 2010, luku 1.1.1) Muita QFD-menetelmän käytön hyötyjä ovat muun muassa parempi asiakaslähtöisyys, tehokkaampi tuotekehitysprosessi sekä sujuvampi tiedonvälitys ja tiimityö (Chan ja Wu 2002, s. 32–33). Lisäksi QFD-menetelmässä tulokset esitetään visuaalisessa muodossa, jota voidaan käyttää hyödyksi sekä suunnittelussa että markkinoinnissa (Griffin ja Hauser 1993, s. 3).

Kaksi yleisintä QFD:n versiota ovat Nelivaiheinen malli sekä laajempi Matriisien matriisi. Nelivaiheinen malli kattaa tuotekehityksen perusvaiheet, kun taas laajempi matriisien matriisi sisältää lisäksi monia muita vaiheita, kuten luotettavuuden suunnittelu, valmistuksen laadunvalvonta, arvonmääritys ja kustannusanalyysi. (Chan ja Wu 2002, s. 24; Ficalora ja Cohen 2010, luku 19) Näitä vaiheita ei ole Nelivaiheisessa mallissa, mutta osa niistä suurella todennäköisyydellä tehdään silti tuotekehitysprosessissa (Ficalora ja Cohen 2010, luku 19). Mallien väliset suurimmat erot ovat ennemminkin tyylissä kuin sisällössä. Nelivaiheinen malli on enemmän käytetty QFD:n versio, sillä se on yksinkertaisempi. (Chan ja Wu 2002, s. 24) Kummankin mallin tarkoituksena on esittää perusrakenne, jota voidaan yrityksen tarpeen mukaan muokata lisäämällä, vähentämällä tai muokkaamalla niissä olevia matriiseja (Ficalora ja Cohen 2010, luku 19). Nelivaiheinen

malli jakaa tuotekehitysprosessin neljään vaiheeseen, jossa jokaisessa on oma matriisinsa. Nelivaiheisen mallin vaiheet ovat järjestyksessä tuotteen suunnittelu, osien suunnittelu ja kehittäminen, valmistuksen suunnittelu ja tuotannon suunnittelu. (Chan ja Wu 2002, s. 24; Ficalora ja Cohen 2010, luku 19) Yksinkertaistettuna QFD-prosessin kulku on siis muuttaa ensimmäisessä matriisissa asiakastarpeet ja -toiveet teknisiksi tuoteominaisuuksiksi, toisessa osien ominaisuuksiksi, kolmannessa valmistussuunnitelmiksi ja neljännessä tuotantovaatimuksiksi (Park ja Kim 1998, s. 570). Siten asiakastarpeet voidaan kytkeä jokaiseen vaiheeseen, kun edellisen matriisin tuotoksia käytetään seuraavan matriisin lähtötietoina (Chan ja Wu 2002, s. 25; Griffin and Hauser 1993, s. 3–4). Ensimmäinen QFD-menetelmän matriiseista on nimeltään HOQ (engl. house of quality) eli laadun talo, ja se on matriiseista olennaisin tuotekehityksen kannalta (Chan ja Wu 2002, s. 25; Ficalora ja Cohen 2010, luku 1.1.1). Monesti yritykset hyödyntävätkin QFD-menetelmää vain siihen saakka, kun laadun talo -matriisi on valmis. Näin toimitaan yleensä jopa Japanissa, jossa QFD-menetelmä on kehitetty 1960-luvulla Yoji Akaon ja Shigeru Mizunon toimesta. (Ficalora ja Cohen 2010, luku 1.3.2, 19). Laadun talo on systemaattinen menetelmä, jossa yhdistetään asiakkaiden ja yrityksen tarpeet tuotteen teknisiksi ominaisuuksiksi, määritetään asiakastarpeille ja tuoteominaisuuksille yhteys sekä arvioidaan tuoteominaisuuksien tärkeys asiakkaalle. Tuoteominaisuudet ovat yrityksen mittareita, suunnitteluvaatimuksia, laatuominaisuuksia tai teknisiä ominaisuuksia, jotka ovat sidoksissa asiakastarpeisiin, ja joiden avulla asiakastarpeiden toteutumista voidaan mitata. (Chan ja Wu 2002, s. 29; Griffin ja Hauser 1993, s. 3) Laadun talon aikana tai sen tekemisen jälkeen tarjoaman konsepti kehitetään täysin valmiiksi (Ficalora ja Cohen 2010, luku 19).

Ennen varsinaista laadun talon avulla tehtävää arviointia täytyy kuitenkin selvittää tuotteeseen kohdistuvat asiakastarpeet ja toiveet eli VOC (engl. voice of the customer). VOC on asiakaspalautteen järjestyksellinen muoto, jossa asiakastarpeille on määritetty prioriteetit sen perusteella, kuinka tärkeä asiakastarve on asiakkaille. Tuotteiden kehittäminen asiakaspalautteen pohjalta on laadunhallinnan tärkein edellytys (Griffin ja Hauser 1993, s. 2). Siksi QFD-menetelmä vaatiikin onnistuakseen tarkkaa arviointia asiakkaiden tarpeista ja toiveista. Prosessi ennen laadun taloa alkaa asiakastarpeiden selvittämisellä, jonka jälkeen asiakkailta kerätty palaute analysoidaan. Seuraavaksi analysoitujen asiakastarpeiden joukosta määritetään ensisijaiset tarpeet. (Ficalora ja Cohen 2010, luku 1.1.1) Asiakastarpeiden priorisoinnin tarkoitus on auttaa päätöksenteossa, minkä asiakastarpeiden toteutumista painotetaan jatkossa eniten suhteessa niiden tuomaan asiakastyytyväisyyteen (Griffin ja Hauser 1993, s. 5). Lopuksi varmistetaan, pitääkö tärkeys-

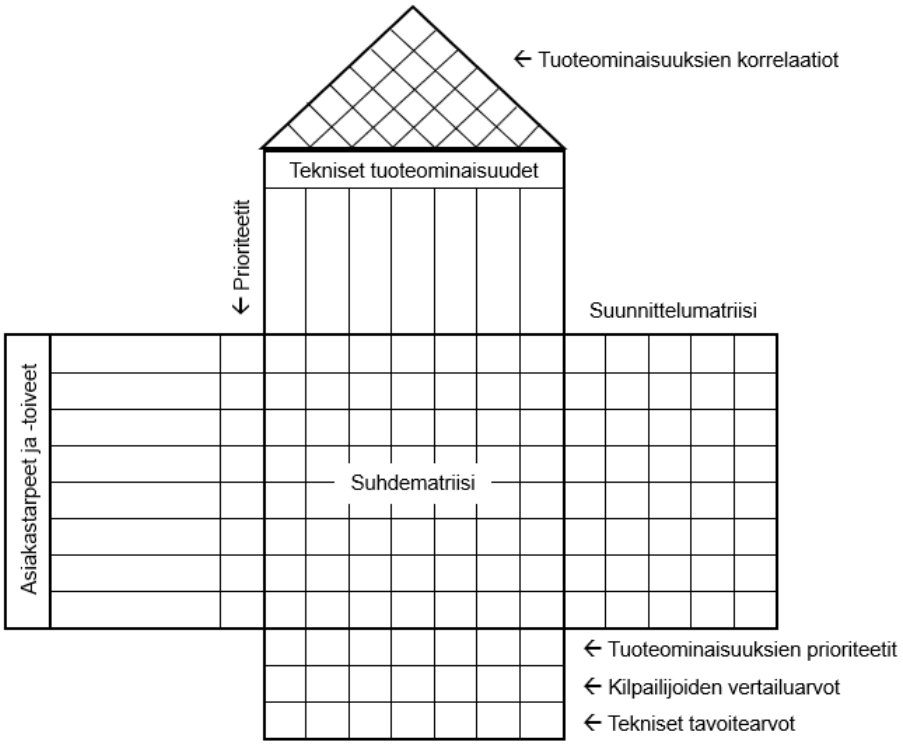
järjestys paikkaansa. Tämän jälkeen voidaan aloittaa varsinainen asiakastarpeiden arviointi laadun taloa käyttäen. (Ficalora ja Cohen 2010, luku 1.1.1) Kuvassa 7 on esitetty vaiheet, jotka täytyy suorittaa ennen laadun talon aloittamista.



Kuva 7. *Suoritettavat vaiheet ennen asiakastarpeiden arviointia laadun talolla (muokattu lähteestä Ficalora ja Cohen 2010, luku 1.1.1).*

4.2 Laadun talo

Laadun talo on QFD-menetelmän matriiseista tärkein, ja sen tarkoitus on toimia suunnittelun ja markkinoinnin tietolähteenä (Ficalora ja Cohen 2010, luku 5). Sen avulla voidaan selvittää tuoteominaisuuksien prioriteetit ja määrittää niiden tavoitearvot, helpottaa päätöksentekoa tuotekehitysprosessissa, kommunikoida yrityksen eri toimialueiden välillä sekä vertailla omia ja kilpailijoiden tuotteita (Griffin ja Hauser 1993, s. 6). Laadun talo pitää sisällään monia eri tavoin toisiinsa liitettyjä alamatriiseja tai osioita, jotka sisältävät toisiinsa liittyviä tietoja (Chan ja Wu 2002, s. 26–32; Ficalora ja Cohen 2010, luku 1.1.1, luku 5). Matriisien ja osioiden sisältö on muokattavissa yrityksen tuotekehityksen tarpeiden mukaiseksi. Laadun talon tärkeimpinä syötteinä ovat asiakastarpeet sekä niitä vastaavat tekniset tuoteominaisuudet. Muita laadun talon syötteitä voivat olla esimerkiksi tuotteiden vertailu- ja tavoitearvot. (Ficalora ja Cohen 2010, luku 5) Tavallisesti laadun talo pitää sisällään ainakin asiakastarpeet ja niiden suhteelliset prioriteetit, asiakastarpeet toteuttavat tuoteominaisuudet, tuoteominaisuuksien korrelaatiot sekä asiakastarpeiden ja tuoteominaisuuksien väliset suhteet. Laadun talo -matriisissa asiakastarpeet sijoitetaan riveille vasemmalle puolelle matriisia ja tuoteominaisuudet sijoitetaan matriisin yläpuolelle sarakkeisiin. Asiakastarpeiden ja tuoteominaisuuksien suhteet esitetään matriisin sisällä ja tuoteominaisuuksien korrelaatiot matriisin päällä tuoteominaisuuksien yläpuolella. (Chan ja Wu 2002, s. 26–32; Ficalora ja Cohen 2010, luku 1.1.1; Griffin ja Hauser 1993, s. 4–6; Park ja Kim 1998, s. 570–571) Kokonaisuudessaan laadun talo voidaan jakaa seitsemään vaiheeseen, joita voidaan kutsua myös huoneiksi (Chan ja Wu 2002, s. 28; Ficalora ja Cohen 2010, luku 5). Laadun talon rakenne ja osiot on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. *Laadun talon rakenne (muokattu lähteestä Ficalora ja Cohen 2010, luku 5).*

Ensimmäinen laadun talon vaihe on muodostaa asiakastarpeet ja -toiveet kuvan 7 mukaisesti. Asiakaspalautteen keräämiseen on useita menetelmiä, kuten haastattelut. Kerätyt asiakastarpeet asetetaan hierarkiaan siten, että yleisluontoisimmat tarpeet ovat ylemmillä tasoilla ja yksityiskohtaisimmat alemmilla tasoilla. (Chan ja Wu 2002, s. 28; Ficalora ja Cohen 2010, luku 5) Asiakastarpeille määritetään suhteelliset prioriteetit, sillä kaikki asiakastarpeet eivät ole yhtä tärkeitä asiakkaille. Merkityksettömimpiä tarpeita voidaan myös jättää huomioimatta, jotta yritys pystyy keskittymään kaikkein olennaisimpiin asiakastarpeisiin. (Chan ja Wu 2002, s. 28) Lopuksi asiakastarpeiden tärkeysjärjestys olisi hyvä vahvistaa asiakkaalta väärinymmärrysten välttämiseksi (Chan ja Wu 2002, s. 28; Ficalora and Cohen 2010, luku 5).

Toinen vaihe on nimeltään suunnittelumatriisi, ja siihen tuotekehitystiimi kirjaa vastauksia markkinointiin sekä tuotesuunnitteluun liittyen. Suunnittelumatriisi sisältää kaikista strategisimmat päätökset. Vaihe edellyttää tuote- ja asiakastyytyväisyystavoitteiden asettamista, jotta asiakkaiden ja yrityksen liiketoiminnan prioriteetit saadaan yhdistettyä. Jokaisen asiakastarpeen kohdalla määritetään vastaukset seuraaviin kysymyksiin: Kuinka tärkeä tarve on asiakkaalle? Kuinka hyvin yrityksen nykyinen tuote tai palvelu vastaa asiakastarpeeseen? Kuinka hyvin kilpailijoiden nykyinen tuote tai palvelu vastaa asiakastarpeeseen? Kuinka hyvin yritys haluaa vastata asiakastarpeeseen? Kuinka hyvin asiakastarpeen toteuttamista voitaisiin käyttää etuna markkinoinnissa? Yleensä

kolme ensimmäistä kysymystä selviävät asiakastutkimuksen perusteella ja kaksi jälkimmäistä yritys määrittelee itse. Edeltävien kysymyksien vastauksia voidaan hyödyntää asiakastarpeiden tärkeysjärjestyksen muodostamisessa. Kun suunnittelumatriisi toteutetaan heti asiakastarpeiden keräämisen jälkeen, voi tuotekehitystiimi halutessaan keskittyä jatkossa vain kaikkein tärkeimpiin asiakastarpeisiin. (Ficalora ja Cohen 2010, luku 5) Suunnittelumatriisissa voidaan siis arvioida asiakastarpeiden lisäksi myös yrityksen nykyisen tuotteen ja kilpailijoiden tuotteiden kykyä tuottaa asiakastyytyväisyyttä (Chan ja Wu 2002, s. 28–29).

Kolmas vaihe on muodostaa tuotteen tekniset tuoteominaisuudet, jotka ovat ryhmä tuote- tai prosessiominaisuuksia yrityksen teknisillä mittareilla ilmaistuna. Tekniset tuoteominaisuudet ovat yrityksen konkreettinen, mitattavissa oleva vastine asiakastarpeille, jotka eivät ole mitattavissa olevia asioita. Tuoteominaisuudet siis ilmaisevat, mitä asioita kehitettävässä tuotteessa täytyy toteutua, jotta myös asiakastarpeet toteutuvat. Tuoteominaisuuksia voidaan kutsua yrityksen odotuksiksi, sillä ne vastaavat yrityksen tuotekehitystiimin tarpeisiin. Tuoteominaisuuksien muodostamisen avulla laadun taloon ja tuotteen kehitykseen saadaan myös yrityksen näkemys asiakkaiden toiveiden ja tarpeiden lisäksi. Yleisiä tietoja, joita kolmannessa vaiheessa käsitellään, ovat lopputuotteesta riippumattomat mittarit, tuote- ja palveluvaatimukset tai tarjoaman ominaisuudet ja suorituskyky. Myös teknisten tuoteominaisuuksien määrää voidaan hallinnoida asettamalla ne hierarkiaan, jossa alaspäin mentäessä yksityiskohtien määrä kasvaa. (Ficalora ja Cohen 2010, luku 5) Kolmannessa vaiheessa jokaisesta asiakastarpeesta muodostetaan yksi tai useampi asiakastarpeen toteuttava tekninen tuoteominaisuus. Tuoteominaisuuksien täytyy olla riittävän yleisellä tasolla, jotta niillä voidaan mitata tarjoamaa riippumatta siitä, miten se on toteutettu. (Ficalora ja Cohen 2010, luku 8)

Neljäs vaihe on kaikkein laajin ja suuritöisin. Siinä luodaan matriisin avulla suhteet asiakastarpeille ja teknisille tuoteominaisuuksille eli määritetään, mihin asiakastarpeisiin eri tekniset ominaisuudet vaikuttavat ja kuinka paljon. (Chan ja Wu 2002, s. 30; Ficalora ja Cohen 2010, luku 5) Kun asiakastarpeet asetetaan laadun talo -matriisin vasemmalle puolelle ja tuoteominaisuudet sen yläpuolelle, voidaan systemaattisesti arvioida niiden välisiä suhteita. Kehitystiimi syöttää suhdematriisin jokaiseen soluun arvon, joka kuvaa, kuinka hyvin tuoteominaisuus edistää asiakastarpeen toteutumista. Asiakastarpeen ja tuoteominaisuuden suhteen kuvaamiseen on yleensä neljä vaihtoehtoa:

- ei suhdetta, tuoteominaisuus ei vaikuta asiakastarpeen toteutumiseen

- heikko tai mahdollinen suhde, tuoteominaisuus vaikuttaa mahdollisesti asiakastarpeen toteutumiseen, eli tuoteominaisuuden muuttuessa paljon, asiakastyytyväisyys muuttuu vähän tai ei muutu lainkaan
- kohtalainen suhde, tuoteominaisuus vaikuttaa kohtalaisesti asiakastarpeen toteutumiseen, eli tuoteominaisuuden muuttuessa kohtuullisen paljon, asiakastyytyväisyys muuttuu huomattavasti, mutta ei suuria määriä
- vahva suhde, tuoteominaisuus on vahvasti sidoksissa asiakastarpeeseen, eli tuoteominaisuuden muuttuessa vähän, asiakastyytyväisyydessä tapahtuu merkittäviä muutoksia. (Chan ja Wu 2002, s. 30; Ficalora ja Cohen 2010, luku 9)

Näitä vaihtoehtoja vastaavat pisteet ovat perinteisessä laadun talossa yleensä järjestyksessä 0–1–3–9 tai 0–1–5–9 (Ficalora ja Cohen 2010, luku 9; Park ja Kim 1998, s. 571). Erot lukujen välillä ovat suuret, jotta kontrasti huonompien ja parhaiden ominaisuuksien välillä muodostuu myös suureksi, jolloin parhailla ominaisuuksilla on enemmän vaikutusta priorisointiin. Koska QFD-menetelmän tavoite on selvittää ja asettaa tuotekehityksen prioriteetit asiakasarvon perusteella, on parempi käyttää edellä mainittuja lukuja kuin lineaarista asteikkoa. Monesti suhteiden kuvaamiseen käytetään myös symboleita suorituskykymittareina. Symbolit voidaan ajatella jatkuvina muuttujina, jotka kuvaavat asiakastyytyväisyyden ja tuoteominaisuuden suhdetta jyrkästi kaltevalla suoralla, kaltevalla suoralla tai lähes vaakatasoisella suoralla. (Ficalora ja Cohen 2010, luku 9) Suhteiden pisteyttäminen on kuitenkin haastavaa, koska aina ei ole helppoa määritellä, kuinka paljon tuoteominaisuus vaikuttaa asiakastarpeeseen (Park ja Kim 1998, s. 570).

Kun kaikki matriisin solut on pisteytetty, tuoteominaisuuksien prioriteetit lasketaan kertomalla jokainen matriisin pistesolu riviä vastaavan asiakastarpeen painoarvolla, minkä jälkeen sarakkeen pisteet lasketaan yhteen. Lisäksi summat voidaan normalisoida. Mitä suuremman summan sarakkeessa oleva tuoteominaisuus saa, sitä paremmin se vaikuttaa asiakastyytyväisyyden toteutumiseen. Kun kaikkien tuoteominaisuuksien vaikutukset on laskettu, pisteytyksen perusteella nähdään tärkeimmät tuoteominaisuudet. Tämä pisteytys on QFD:n ja laadun talon tärkeimpiä tuloksia, sillä siitä nähdään, millä tuoteominaisuuksilla on eniten vaikutusta asiakastyytyväisyyteen. Lopullista pisteytystä voidaan hyödyntää tuotekehityksen tietolähteenä, mutta järjestystä ei kannata pitää lopullisena päätöksenteon perusteena. Tuoteominaisuuksien prioriteettien olennaisin tulos on nimittäin näyttää, mitkä ovat keskeisimpiä ominaisuuksia, joita tuotteelta vaaditaan. (Ficalora ja Cohen 2010, luku 5, 8, 9)

Jotkut yritykset lopettavat laadun talon hyödyntämisen neljännen vaiheen jälkeen, sillä siihen mennessä saatuja tuloksia voidaan hyödyntää jatkossa tuotekehitysprojektissa.

Loput vaiheet tarjoavat kuitenkin hyödyllistä lisätietoa tuotekehitykseen. Ne kattavat vertailuanalyysin, tavoitearvojen määrittämisen ja tuoteominaisuuksien korrelaatioiden määrittelyn. Viidennen vaiheen vertailuanalyysissä määritetään kilpailijoiden tuotteiden tekniset vertailuarvot tuoteominaisuuksille. Kuudennessa määritetään tuoteominaisuuksille tekniset tavoitteet, jotka ovat mitattavissa samalla tavoin kuin kolmannessa vaiheessa määritetyt tuoteominaisuudet. Tällöin voidaan mitata, kuinka hyvin yrityksen tuote toteuttaa sille asetetut tekniset tavoitteet ja pärjää vertailussa suhteessa muihin vastaaviin tuotteisiin. (Ficalora ja Cohen 2010, luku 5) Seitsemäs vaihe on katon muodostaminen eli teknisten tuoteominaisuuksien korrelaatioiden määrittäminen matriisiin. Korrelaatiot auttavat havainnollistamaan, kuinka tuoteominaisuudet edistävät tai rajoittavat toisiaan. Korrelaatioiden muodostaminen auttaa lisäksi tunnistamaan suunnittelun rajoitetekijöitä. (Chan ja Wu 2002, s. 30; Ficalora ja Cohen 2010, luku 5)

4.3 Aurinkoa seuraavan järjestelmän asiakastarpeet ja tuoteominaisuudet

Kirjallisuustutkimuksen avulla saatiin kerättyä jo paljon tietoa aurinkoa seuraavista järjestelmistä, minkä pohjalta tuotetta voitaisiin alkaa kehittämään. Kuitenkin kerätyn tiedon tueksi ja laadun takaamiseksi tuotteeseen tarvitaan myös asiakkaiden näkemyksiä. Siten tiedonhankinnan jälkeen aurinkoa seuraavan järjestelmän rakenteen suunnittelun seuraavana vaiheena on selvittää asiakastarpeet ja -toiveet QFD-menetelmän mukaisesti. Niistä muodostetaan asiakastyytyväisyyteen sekä tuotteen laatuun vaikuttavat tuoteominaisuudet, joiden täytyy toteutua mahdollisimman hyvin aurinkoa seuraavassa järjestelmässä. Asiakastarpeiden selvittämiseen on erilaisia keinoja, mutta tässä työssä ne selvitetään kyselyn avulla. Asiakastarpeiden kerääminen osoittautui kuitenkin haasteelliseksi, sillä aurinkoa seuraavat järjestelmät eivät ole kovin yleisiä ja tunnettuja Suomessa. Projektin tarkoituksena ei myöskään ollut suunnitella tuotetta vain tietylle asiakkaalle vaan laajemmalle asiakasryhmälle, mutta käynnissä olevasta tuotekehitysprojektista ei haluttu paljastaa liikaa. Siten kysely päätettiin teettää kahdelle taholle, eli aurinkoa seuraavan järjestelmän omistavan yrityksen edustajille ja kiinteitä aurinkosähköjärjestelmiä toimittavan yrityksen edustajille. Näin saatiin näkemyksiä taholta, jolla on kokemusta järjestelmän asentamisesta, käytöstä ja ominaisuuksista sekä taholta, jolla on tietämystä suurista kiinteistä aurinkosähkökentistä sekä ylipäätään aurinkosähköalasta. Siten saatiin kerättyä tietoja aurinkoa seuraavalta järjestelmältä vaadittavista ominaisuuksista sekä myös ominaisuuksien suhteesta kiinteään järjestelmään. Tämä tehtiin

siksi, että aurinkoa seuraavat järjestelmät kilpailevat markkinoilla sekä toisiaan että kiinteitä järjestelmiä vastaan. Asiakastarpeiden selvittämiseksi asiakkaille esitettiin kyselyn avulla seuraavat kysymykset:

- Mitä hyviä puolia on aurinkoa seuraavissa aurinkosähköjärjestelmissä?
- Mitä ongelmia on aurinkoa seuraavissa järjestelmissä?
- Mitä ominaisuuksia aurinkoa seuraavalla järjestelmällä tulisi olla?
- Milloin valitsisit aurinkoa seuraavan järjestelmän kiinteän järjestelmän sijasta?
- Mitä hyviä ja huonoja puolia on kiinteissä aurinkosähköjärjestelmissä?
- Miten aurinkosähköjärjestelmiä voitaisiin kehittää?

Asiakastarpeiden keräämisen jälkeen kyselystä saadut tulokset täytyy analysoida, jotta palautteen joukosta tunnistetaan rakenteen kehityksen kannalta olennaiset asiakastarpeet. Asiakastarpeet jaetaan kahteen tasoon, eli 1. tason ensisijaisiin ja 2. tason täydentäviin asiakastarpeisiin, jotta tietoa on helpompi käsitellä ja jatkossa pystytään keskittymään olennaisimpiin asiakastarpeisiin. Ensisijaisista asiakastarpeista muodostetaan tuoteominaisuudet, kun taas 2. tason täydentävät asiakastarpeet sisältyvät ensimmäisen tason tarpeisiin ja antavat niihin täydentävää tietoa. Jotkut täydentävät tarpeet ovat myös sellaisia tarpeita, jotka eivät ole niin konkreettisia tai liittyvät enemmän kääntölogiikkaan kuin rakenteeseen ja kääntömekanismiin, jotka ovat tuotekehityksen kohteena. Asiakastarpeet on esitetty käsiteltynä ja analysoituna liitteessä A. Asiakastarpeille täytyy määrittää tärkeysjärjestys, mutta ennen sitä muodostetaan asiakastarpeista aurinkoa seuraavalta järjestelmältä vaadittavat tekniset tuoteominaisuudet. Asiakastarpeista muodostetut tuoteominaisuudet ovat seuraavat:

- energiantuotto
- hinta
- luotettavuus
- huolto- ja käyttökustannukset
- yksinkertaisuus
- asennuskustannukset
- korkeus
- paino
- hiilijalanjälki.

Liitteessä B on esitetty, mistä asiakastarpeista eri tuoteominaisuudet on muodostettu. Kun suunniteltavassa tuotteessa toteutetaan nämä tuoteominaisuudet, saadaan asiakkaiden näkemykset mukaan aurinkoa seuraavan järjestelmän tuotekehitykseen, sillä ne toteuttavat asiakkaiden tuotteeseen kohdistamat tarpeet ja toiveet. Kaikkien muodostettujen tuoteominaisuuksien toteutuminen mahdollisimman hyvin on tärkeää myös suhteessa kiinteisiin järjestelmiin. Ensimmäiset seitsemän tuoteominaisuutta ovat vähemmän yllättäviä, sillä ne vastaavat hyvin tiedonhankintavaiheessa esille tulleita aurinkoa seuraavilta järjestelmiltä vaadittavia ominaisuuksia. Ensimmäinen tuoteominaisuus eli energiantuotto kuvaa järjestelmän tuottamaa energiaa vuoden aikana. Järjestelmän elinkaaren aikana syntyviä erilaisia kustannuksia kuvaavat hinta, asennuskustannukset sekä huolto- ja käyttökustannukset. Hinta pitää sisällään tuotteen hankkimisesta aiheutuvat kustannukset, eli alkuinvestoinnin kustannukset lukuun ottamatta asennuskustannuksia. Asennuskustannukset on erillinen tuoteominaisuus, joka kuvaa järjestelmän asentamisesta syntyvät kustannuksia. Huolto- ja käyttökustannukset kuvaavat huollosta, korjauksista, komponenttien vaihdosta, ylläpidosta sekä järjestelmän käytöstä, kuten sen kuluttamasta energiasta, aiheutuvia kustannuksia. Luotettavuus kuvaa järjestelmän kykyä toimia ilman häiriötä sekä pysyä suuntautuneena kohti aurinkoa. Luotettavuus liittyy olennaisesti esimerkiksi myös järjestelmän energiantuottoon sekä huolto- ja käyttökustannuksiin. Yksinkertaisuus kuvaa järjestelmän rakennetta sekä sen käytön helppoutta ja vaikuttaa siten esimerkiksi järjestelmän hintaan. Yksinkertaisuus kuvaa myös sitä, että aurinkoa seuraava järjestelmä ei saa olla liian monimutkainen, työläs ja kallis kiinteään järjestelmään verrattuna. Korkeus kuvaa järjestelmän vaatimaa tilaa, ja se saattaa vaikuttaa ensin hieman yllättävältä, mutta myös se tuli esille jo kirjallisuustutkimuksen aikana. Korkeus on tärkeä tuoteominaisuus etenkin suurempien aurinkosähkökenttien tapauksessa, jos maa-ala halutaan käyttää energiantuottoon mahdollisimman optimaalisesti. Paino ja hiilijalanjälki ovat hieman yllättäviä ominaisuuksia, mutta toisaalta paino vaikuttaa etenkin yksinkertaisuuteen sekä hieman myös kaikkiin kustannuksiin. Hiilijalanjälki koettiin parhaaksi ominaisuudeksi kuvaamaan tuotteen kotimaisuutta ja sen valmistamista Suomessa, sillä monesti esimerkiksi raaka-aineiden ja osien kuljetuksen kasvattavat hiilijalanjälkeä paljon.

4.4 Asiakastarpeiden ja tuoteominaisuuksien arviointi

Koska kaikki asiakastarpeet ja tuoteominaisuudet eivät ole asiakkaille yhtä tärkeitä, ei niitä QFD-menetelmän mukaisesti tule painottaa tuotekehityksen aikana yhtä paljon. Siksi täytyy määritellä, miten eri asiakastarpeet ja tuoteominaisuudet vaikuttavat asia-

kastyytyväisyyden toteutumiseen. Asiakastarpeiden keräämisen ja analysoimisen jälkeen täytyy siis kuvan 7 mukaisesti määrittää ensisijaiset asiakastarpeet eli asettaa asiakastarpeille prioriteetit. Asiakastarpeet priorisoidaan sen perusteella, kuinka paljon ne vaikuttavat asiakastyytyväisyyteen eli tuottavat laatua asiakkaille. Prioriteettien kuvaamiseksi jokaiselle asiakastarpeelle lasketaan painokertoimet. Asiakastarpeiden tärkeyden vertailuun ja painokertoimien laskentaan käytetään apuna valmista QFD-taulukkotyökalua. Työkalu helpottaa asiakastarpeiden priorisointia, sillä se tarjoaa järjestelmällisen menetelmän vertailun tueksi ja laskee automaattisesti asiakastarpeiden prioriteettien painoarvot. Työkalussa asiakastarpeet pisteytetään vertaamalla vuorotellen asiakastarpeiden tärkeyttä toisiinsa, jonka jälkeen työkalu laskee painoarvon ja normalisoidun painoarvon jokaiselle asiakastarpeelle. Vertailu ja pisteytys tapahtuu taulukossa, jossa vaakarivillä olevaa asiakastarvetta verrataan pystysarakkeessa olevaan asiakastarpeeseen. Taulukon pisteytyksien merkitykset ovat seuraavat:

- sarakeominaisuus on tärkein, 0
- sarakeominaisuus on hieman tärkeämpi kuin vaakariviominaisuus, 1
- sarake- ja vaakariviominaisuudet ovat yhtä tärkeät, 2
- vaakariviominaisuus on hieman tärkeämpi kuin sarakeominaisuus, 3
- vaakariviominaisuus on tärkein, 4.

Asiakastarpeiden vertailun toteutus taulukkotyökalussa on esitetty kuvassa 9. Kuvasta näkyvät myös normalisoidut painokertoimet asiakastarpeille, joita käytetään myöhemmin laadun talo -matriisin prioriteetit-kohdassa.

TUT/MEI
QFD-tool

	Järjestelmällä on huo	Järjestelmällä on mah	Järjestelmän sähköntuotto	Järjestelmän tuoton ja	Järjestelmässä on ma	Järjestelmän kustann	Kääntömekanismi ei	Kääntömekanismi ja	Huollon sekä ylläpide	Järjestelmän esikoko	Asentaminen on mah	Järjestelmä ei aiheuta	Järjestelmää on helpp	Järjestelmä ei vie pal	Rakenne ei ole raskas	Järjestelmä on valmis	Priority	Normalised Priority
Järjestelmällä on huomattavasti par		4	4	1	4	2	3	3	2	4	4	4	4	3	4	4	50	0,83
Järjestelmällä on mahdollisimman tasainen			1	0	1	0	0	0	1	2	1	1	3	1	3	3	17	0,28
Järjestelmän sähköntuotto on suuri etenkin aamu				0	1	1	1	0	1	3	2	3	3	1	3	3	25	0,42
Järjestelmän tuoton ja hinnan suhde on mahdollisimmar					4	3	3	3	3	4	4	4	4	3	4	4	54	0,90
Järjestelmässä on mahdollisimman monta paneelia moottoria k						3	0	1	1	3	1	2	3	1	3	4	28	0,47
Järjestelmän kustannukset eivät ole suuret kiinteään järjestelmään ve							3	3	3	4	3	3	4	3	4	4	45	0,75
Kääntömekanismi ei maksa liikaa								1	1	4	2	3	4	3	4	4	40	0,67
Kääntömekanismi ja -logiikka ovat toimivia ja luotettavia									2	4	3	4	4	3	4	4	45	0,75
Huollon sekä ylläpidon tarve on mahdollisimman pieni ja ennakoitu										4	3	3	4	3	4	4	43	0,72
Järjestelmän esikokoonpano ja asennus on helppoa											2	2	2	0	3	3	16	0,27
Asentaminen on mahdollisimman halpaa suhteessa kiinteään järjestelmään												2	3	0	3	4	27	0,45
Järjestelmä ei aiheuta liikaa työtä ja vaivaa suhteessa kiinteään järjestelmään													3	0	3	3	22	0,37
Järjestelmää on helppo käyttää														0	1	2	10	0,17
Järjestelmä ei vie paljoa tilaa															4	3	38	0,63
Rakenne ei ole raskas																2	11	0,18
Järjestelmä on valmistettu Suomessa																	9	0,15

Kuva 9. *Asiakastarpeiden vertailu ja prioriteetit QFD-työkalussa.*

QFD-työkalun avulla tehdyn vertailun perusteella tärkeimmiksi asiakastarpeiksi osoittautuivat:

- järjestelmän tuoton ja hinnan suhde on mahdollisimman hyvä
- järjestelmällä on huomattavasti parempi vuosituotto kuin kiinteällä järjestelmällä
- järjestelmän kustannukset eivät ole suuret kiinteään järjestelmään verrattuna
- kääntömekanismi ja -logiikka ovat toimiva ja luotettavia
- huollon sekä ylläpidon tarve on mahdollisimman pieni ja ennakoitu.

Kolme tärkeintä asiakastarvetta liittyvät joko energiantuottoon, hintaan tai molempiin. Näiden asiakastarpeiden saamat suurimmat prioriteetit eivät ole yllättäviä, sillä aurinkoa seuraavan järjestelmän täytyy pystyä tuottamaan mahdollisimman paljon sähköä ilman, että sen kustannukset nousevat suureksi. Kääntömekanismin ja -logiikan luotettavuus on keskeisessä osassa järjestelmän toiminnan ja jatkuvan tuoton kannalta, joten on tärkeää, että ne ovat toimivia ja luotettavia. Hyvä toimintakyky vähentää myös huolto- ja käyttökustannuksia. Tuottoon sekä myös kustannuksiin vaikuttaa olennaisesti järjestelmän toimiminen häiriöttä, eli huollon ja ylläpidon määrän tulee olla tiedossa ja mahdollisimman alhainen. Tällöin järjestelmän huoltoon ja ylläpitoon ei kulu paljon energiaa, rahaa sekä aikaa. Näiden syiden takia myös pieni huollon ja ylläpidon tarve on korkealla hierarkiassa. Kaikki asiakastarpeet ovat olennaisia aurinkoa seuraavissa järjestelmissä, joten vertailun suorittaminen oli haastavaa. Lopulta kuitenkin keskeisimmät ratkaisevat tekijät ovat, että aurinkoa seuraavan järjestelmän kustannukset eivät nouse suureksi ja tuotto on mahdollisimman suuri kiinteään järjestelmään verrattuna, mikä näkyy myös vertailun tuloksista.

Kun ensisijaiset asiakastarpeet on saatu määritettyä QFD-työkalun avulla, järjestyksen oikeellisuus olisi hyvä varmistaa asiakkailta, jotta jatkossa painotetaan varmasti asiakkaille tärkeitä tuoteominaisuuksia. Järjestyksen oikeellisuus päätettiin tällä kertaa kuitenkin tuotekehitystiimin sisäisesti. Järjestelmän tuotekehitykseen ei haluttu liikaa muutaman asiakkaan näkemystä, joille kysely aiemmin suoritettiin, sillä tuote ei tule kohdistumaan vain heille, vaan laajemmalle joukolle. Myöskään järjestyksen vahvistuksen teettämistä laajemmalle asiakasryhmälle ei pidetty hyvänä vaihtoehtona, sillä tuotekehitysprojektista haluttiin vielä tässä vaiheessa pitää pienempää profiilia. Asiakastarpeiden merkitys ei siis projektissa ole toimia ainoana tuotteen kehitystä ajavana tekijänä. Asiakastarpeet toimivat pikemminkin aurinkoa seuraavan järjestelmän tuotekehitystä tukevana tekijänä, tietolähteenä kirjallisuustutkimuksen ohella sekä tuotteen laadun varmistajana.

Seuraavaksi voidaan aloittaa laadun talon muodostaminen sekä asiakastarpeiden ja tuoteominaisuuksien välisten suhteiden määrittäminen sen avulla, jotta saadaan selville tärkeimmät tuoteominaisuudet konseptikehitystä varten. Laadun talo on muokattavissa yrityksen tarpeiden mukaiseksi, joten tässä työssä laadun taloon sisällytetään asiakastarpeet ja niiden prioriteetit, tuoteominaisuudet, suhdematriisi sekä tuoteominaisuuksien prioriteetit. Tuoteominaisuuksien vaikutus asiakastarpeiden toteutumiseen pisteytetään laadun talon suhdematriisiin asteikolla 0–1–3–9, mutta pisteytyksen 0 saaneet ruudut jätetään tyhjäksi selkeyden vuoksi. Valmis laadun talo on esitetty kuvassa 10, ja siitä nähdään, mitkä tuoteominaisuudet vaikuttavat eri asiakastarpeiden toteutumiseen ja kuinka paljon. Kuvasta nähdään myös laadun talon keskeisin tulos eli tuoteominaisuuksien prioriteetit. Suunnittelumatriisiin liittyvät strategiset tiedot päätettiin jättää pois laadun talosta, vaikka niitä tietenkin pohdittiin projektin aikana. Strategisista päätöksistä on kuitenkin hyvä tuoda esille, että tuotekehityksessä haluttiin keskittyä yksittäisten aurinkoseuraajien sijasta suurempiin aurinkosähkökenttiin, joiden kokonaisteho on luokkaa 100–1000 kWp. Niissä varjot eivät saa kasvaa suureksi, joten korkeutta painotettiin projektin aikana enemmän kuin yksittäisten aurinkoseuraajien tapauksessa, joissa se ei ole niin tärkeä ominaisuus.

Laadun talon perusteella tuoteominaisuuksista tärkeimmät ovat järjestyksessä energiantuotto, hinta sekä huolto- ja käyttökustannukset. Tuoteominaisuuksien tärkeysjärjestys vaikuttaa suurelta osin oikealta ja järkevältä, mutta tuotekehitystiimissä tärkeimmiksi tuoteominaisuuksiksi koettiin energiantuotto, hinta ja kolmantena luotettavuus ennen huolto- ja käyttökustannuksia. Tosin luotettavuus sekä huolto- ja käyttökustannukset liittyvät vahvasti toisiinsa. Keskikastissa olevat yksinkertaisuus, korkeus ja asennuskustannukset ovat myös vertailussa järkevillä sijoilla. Vähiten tärkeimmät tuoteominaisuudet ovat hiilijalanjälki ja paino. Todellisuudessa hiilijalanjälki koettiin tätä tärkeämmäksi, mutta sille ei tietoisesti annettu suurta painoarvoa tässä projektissa. Tämä johtuu siitä, että kaikki projektin aikana kehitettävät konseptit oletetaan valmistettavan yrityksen toimesta, joten erot hiilijalanjäljessä olisivat luultavasti todella pieniä. Lisäksi tarkka arvio eri konseptien hiilijalanjäljestä vaatisi niiden kehittämistä pidemmälle sekä kokonaan erillisen projektin hiilijalanjäljen laskentaan. Paino on selkeästi näiden ominaisuuksien joukosta vähiten tärkeä myös laadun talon perusteella. Muodostettu laadun talo ja tuoteominaisuuksien painoarvot toimivat jatkossa aurinkoa seuraavan järjestelmän rakenteen konseptikehityksen tietolähteenä kirjallisuustutkimuksessa hankittujen tietojen ohella. On hyvä muistaa, että laadun talon tulokset ovat kuitenkin vain suuntaa antavia eikä tärkeysjärjestystä tule välttämättä pitää lopullisena, vaan suunnittelua helpottavana ja tukeva tietolähteenä.

		← Prioriteetit	Tekniset tuoteominaisuudet								
			Energiantuotto	Hinta	Luotettavuus	Huolto- ja käyttökustannukset	Yksinkertaisuus	Asennuskustannukset	Korkeus	Paino	Hiilijalanjälki
Asiakastarpeet ja -toiveet	Järjestelmällä on huomattavasti parempi vuosituotto kuin kiinteällä järjestelmällä	0,83	9			1			3		
	Järjestelmällä on tasainen sähköntuotanto koko päivän ajan	0,28	9								
	Järjestelmän sähköntuotto on suuri etenkin aamuin ja illoin	0,42	9								
	Järjestelmän tuoton ja hinnan suhde on mahdollisimman hyvä	0,90	9	9		3	1	3	3		
	Järjestelmässä on mahdollisimman monta paneelia moottoria kohden	0,47	3	9		9	1				9
	Järjestelmän kustannukset eivät ole suuret kiinteään järjestelmään verrattuna	0,75		9		3	3	3		1	
	Kääntömekanismi ei maksa liikaa	0,67		9							
	Kääntömekanismi ja -logiikka ovat toimivia ja luotettavia	0,75	9		9	9	1				
	Huollon sekä ylläpidon tarve on mahdollisimman pieni ja ennakoitu	0,72	3		9	9	1			1	3
	Järjestelmän esikokoonpano ja asennus on helppoa	0,27					9	9	3	3	
	Asentaminen on mahdollisimman halpaa suhteessa kiinteään järjestelmään	0,45					9	9	1	1	
	Järjestelmä ei aiheuta liikaa työtä ja vaivaa suhteessa kiinteään järjestelmään	0,37		3	9	3	9	3			1
	Järjestelmää on helppo käyttää	0,17			1	1	9				
	Järjestelmä ei vie paljoa tilaa	0,63							9		
	Rakenne ei ole raskas	0,18		3		1	3	1	9	9	3
	Järjestelmä on valmistettu Suomessa	0,15			9						9
	Tuoteominaisuuksien prioriteetit →		32,2	26,8	18,1	24,7	17,0	12,7	13,7	4,4	8,7
	Normalisoidut tuoteominaisuuksien prioriteetit →		0,20	0,17	0,11	0,16	0,11	0,08	0,09	0,03	0,05

Kuva 10. *Valmis laadun talo.*

5. RAKENTEEN KONSEPTIKEHITYS QFD-MENETELMÄN AVULLA

5.1 Järjestelmätyyppien arviointi

Aurinkoa seuraavalta järjestelmältä vaadittavat tuoteominaisuudet ja niiden prioriteetit saatiin selville QFD-menetelmän ja laadun talon avulla, joten priorisoituja tuoteominaisuuksia voidaan seuraavaksi hyödyntää tietolähteenä Suomen olosuhteisiin parhaan järjestelmätyypin valintaan. Vertailussa on mukana kolme yksiakselista aktiivista järjestelmää eli horisontaalinen, vertikaalinen ja kalteva-akselinen järjestelmä sekä kaksiakselinen aktiivinen järjestelmä. Lisäksi vertailuun otetaan mukaan passiivinen järjestelmä kiinnittämättä tarkemmin huomiota järjestelmän vapausasteiden määrään ja suuntaan, jotta nähdään, kuinka se pärjää vertailussa aktiivisiin järjestelmiin. Horisontaalisessa järjestelmässä ei oteta kantaa akselin suuntaan, sillä horisontaalisten järjestelmien suorituskyvystä Suomen olosuhteissa löytyi ristiriitaista tietoa, ja erot järjestelmien ominaisuuksissa ovat ylipäätään hyvin pienet. Hybridiakselinen järjestelmä on jätetty vertailusta suoraan pois suurten toteuttamiskustannustensa takia. Vertailussa keskitytään aurinkoa seuraaviin järjestelmiin, jotka on jaoteltu liikkeen vapausasteiden, akselin suunnan ja käyttöjärjestelmän perusteella, sillä ne liittyvät olennaisemmin järjestelmän rakenteen suunnitteluun. Muut jakotavat liittyvät enemmän kääntölogiikan toteutukseen, ja esimerkiksi valosensori tai aika-algoritmi on toteutettavissa mihin tahansa aktiiviseen järjestelmään.

Järjestelmätyyppien arviointiin käytetään samaa QFD-taulukkotyökalua, jolla asiakastarpeita vertailtiin keskenään. Työkalun avulla voidaan nimittäin keskinäisen vertailun lisäksi arvioida myös eri järjestelmätyyppien kykyä toteuttaa tuoteominaisuudet. Tuoteominaisuudet täytyy kuitenkin ensin pisteyttää työkaluun, minkä perusteella työkalu laskee niille painoarvot. Tuoteominaisuuksia vertaillaan keskenään, ja ne pisteytetään samalla idealla sekä asteikolla 0–4, kuin asiakastarpeet aiemmin. Tuoteominaisuuksien pisteyttäminen ja vertailu on kuitenkin helpompaa kuin asiakastarpeiden tapauksessa, sillä siinä voidaan hyödyntää laadun talossa selvitettyä tuoteominaisuuksien tärkeysjärjestystä. Kuvassa 11 on esitetty tuoteominaisuuksien vertailu ja pisteytys laadun talon tuloksia hyödyntäen. Tuoteominaisuuksien järjestystä ei ole otettu kuitenkaan täysin suoraan laadun talon tuloksista, vaan siinä on myös painotettu tuotekehitystiimin näkemyksiä tärkeimmistä ominaisuuksista.

TUT/MEI
QFD-tool

	Energiantuotto	Hinta	Luotettavuus	Huolto- ja käyttökust	Yksinkertaisuus	Asennuskustannukse	Korkeus	Paino	Hiilijalanjälki	Priority	Normalised Priority
Energiantuotto		4	4	4	4	4	3	4	4	31	0,97
Hinta			2	4	3	4	4	4	4	25	0,78
Luotettavuus				3	4	4	4	4	4	25	0,78
Huolto- ja käyttökustannukset					4	3	3	4	4	19	0,59
Yksinkertaisuus						3	3	4	4	15	0,47
Asennuskustannukset							1	3	4	10	0,31
Korkeus								4	4	14	0,44
Paino									1	2	0,06
Hiilijalanjälki										3	0,09

Kuva 11. *Tuoteominaisuuksien vertailu ja pisteytys QFD-työkalussa.*

Tuoteominaisuuksien pisteyttämisen jälkeen voidaan arvioida, kuinka ne toteutuvat eri järjestelmätyypeissä. Näin saadaan selville potentiaalisimmat järjestelmätyypit, joista aletaan kehittämään konsepteja. Vertailu työkalun avulla myös auttaa käsittelemään järjestelmätyypeistä hankittua tietoa, sillä eri järjestelmillä on toisiinsa verrattuna omat hyvät ja huonot puolensa. Ilman työkalussa tehtävää vertailua olisi vaikeampi päättää, minkä tyyppistä järjestelmää lähdetään suunnittelemaan. Lisäksi konseptikehityksestä saadaan suljettua pois huonoimmat järjestelmätyypit ja saadaan selkeä visuaalinen esitys, millä perusteella päätökset on tehty. Järjestelmätyyppien vertailu tapahtuu taulukkomuodossa, jossa vaakariveillä ovat tuoteominaisuudet sekä niiden painoarvot ja sarakkeissa järjestelmätyypit. Jokaisen tuoteominaisuuden toteutuminen eri järjestelmien kohdalla pisteytetään asteikolla 0–4. Arvosana 0 tarkoittaa, että tuoteominaisuus toteutuu järjestelmätyypin kohdalla huonosti ja vastaavasti 4 tarkoittaa, että tuoteominaisuus toteutuu erittäin hyvin. Hinta, paino, korkeus, hiilijalanjälki, asennuskustannukset sekä huolto- ja käyttökustannukset pisteytetään periaatteella, että pienempi tuoteominaisuuden arvo saa suuremmat pisteet. Näin tehdään siksi, että järjestelmän pienet kustannukset ja pieni hiilijalanjälki sekä alhainen paino ja korkeus ovat tavoiteltuja ominaisuuksia. Työkalu kertoo jokaisen järjestelmätyypin saamat pisteet riviä vastaavalla painokertoimella, summaa sarakkeen arvot ja normalisoi summan. Rivien painokertoimet muodostuvat edeltävässä vaiheessa suoritetun tuoteominaisuuksien vertailun pohjalta. Jokaisen sarakkeen järjestelmätyypille lasketusta normalisoidusta summasta saadaan tieto, kuinka hyvin kukin järjestelmätyyppi toteuttaa tuoteominaisuudet kokonaisuudessaan. Tuloksesta nähdään siis järjestys, kuinka hyvin asiakastarpeet toteutuvat eri järjestelmätyypeissä. Kuvassa 12 on esitetty järjestelmätyyppien pisteytys QFD-työkalussa.

TUT/MEI
QFD-tool

	Horisontaalinen	Vertikaalinen	Kalteva-akselinen	Kaksiakselinen	Passiivinen	Normalised Priority
Energiantuotto	0	4	4	4	0	0,97
Hinta	3	2	2	1	4	0,78
Luotettavuus	4	4	4	3	0	0,78
Huolto- ja käyttökustannukset	3	2	2	1	4	0,59
Yksinkertaisuus	3	2	2	1	4	0,47
Asennuskustannukset	3	1	2	0	3	0,31
Korkeus	4	4	2	4	4	0,44
Paino	3	1	2	0	4	0,06
Hiilijalanjälki	2	2	2	1	4	0,09
System char. priorities	11,72	13,00	12,50	9,91	10,69	
Normalised system char. priorities	0,90	1,00	0,96	0,76	0,82	

Kuva 12. *Järjestelmätyyppien vertailu QFD-työkalussa.*

Kuvasta 12 nähdään, että pisteytyksessä ei tule merkittäviä eroja järjestelmien välille. Tämä johtuu osittain siitä, että pisteytysasteikko on suppea, jolloin suuria eroja ei saada aikaan. Esimerkiksi energiantuotossa kaksiakselinen, vertikaalinen ja kalteva-akselinen täytyi arvioida samalle tasolle, vaikka todellisuudessa järjestelmien välillä on pieniä eroja. Tiedonhankintavaiheessa hankittujen tietojen perusteella vertikaalinen ja kalteva-akselinen ovat myös pisteytyksessä oikeilla sijoilla. Ne suoriutuvat muutenkin hyvin tasaisesti keskenään sekä myös horisontaalisen järjestelmän kanssa. Vertikaalisen asennuskustannukset ja paino on kuitenkin arvioitu vertailussa hieman suuremmiksi kuin kalteva-akselisella. Kalteva-akselinen puolestaan häviää korkeudessa verrattuna muihin järjestelmiin, sillä järjestelmän korkeus kasvaa helposti suureksi, jos siihen asennetaan useita paneeleja. Tämä johtuu kaltevan akselin pyörimisliikkeestä, jolloin alimmainen paneelirivi ei voi olla kovin leveä, ettei se osu maahan. Siksi useamman paneelin tapauksessa paneeleja täytyy asentaa päällekkäin useaan riviin, jolloin järjestelmän korkeuskin kasvaa. Kaksiakselisen ja passiivisen järjestelmän järjestyksen kuuluisi olla kirjallisuustutkimuksen perusteella toisin päin johtuen passiivisen järjestelmän heikosta toimintakyvystä Suomen olosuhteissa. Pisteasteikoilla ei kuitenkaan saada skaalattua tarpeeksi suuria eroja tietyissä tuoteominaisuuksissa. Kaksiakselinen on passiivista paljon parempi energiantuotoltaan ja luotettavuudeltaan, jotka ovat tuoteominaisuuksista tärkeimmässä päässä. Kaksiakselinen kuitenkin pärjää tasaisen huonosti ja passiivinen tasaisen hyvin muissa kategorioissa, joten passiivinen saa lopulta paremmat pisteet. Horisontaalisen ja kaksiakselisen järjestelmän välinen järjestys voisi myös olla toisinkin päin, sillä molempien järjestelmien eduksi löytyy perusteet.

5.2 Konseptikehityksen lähtötiedot

Luvussa 3 selvitettyjen tietojen sekä järjestelmien vertailun perusteella konseptikehityksestä rajataan pois Suomen leveyspiireillä ja olosuhteissa huonommin tuottavat horisontaaliset sekä passiiviset järjestelmät. Passiivisissa myös epäluotettavuus eli huono toimintakyky etenkin viileissä olosuhteissa vaikuttaa niiden rajaamiseen pois konseptikehityksestä. Lisäksi horisontaaliset järjestelmät eivät tutkimusten mukaan ole taloudellisesti yhtä kannattavia Suomessa kuin muut vertailun aktiiviset järjestelmät. Myös kaksiakseliset järjestelmät voidaan rajata pois suurempien kustannuksiensa sekä tutkimuksien perusteella varsinkin korkeammilla leveyspiireillä monia yksiakselisia huonompien LCOE-arvojensa takia. Lisäksi niillä ei saavuteta merkittävää tuottohyötyä Suomen olosuhteissa verrattuna vertikaaliseen ja kalteva-akseliseen järjestelmään.

Sen sijaan voidaan keskittyä kahteen yksiakseliseen järjestelmätyyppiin, eli kalteva-akseliseen ja vertikaaliseen aurinkoa seuraavan aurinkosähköjärjestelmään. Ne ovat järjestelmätyyppien vertailun perusteella tuoteominaisuudet ja siten myös asiakastarpeet parhaiten toteuttavat järjestelmätyypit. Ne ovat lisäksi tutkimuksien mukaan sekä energiantuoton että LCOE-arvojen perusteella korkeimmilla sijoilla eri järjestelmien välisissä vertailuissa myös Suomen olosuhteissa. Niiden energiantuotto on noin 35 % suurempi kuin kiinteillä järjestelmillä, ja lisäksi tuotto on lähes kaksiakselisen tasolla, mutta kustannukset silti reilusti sitä alhaisemmat. Molemmissa järjestelmissä voidaan käyttää joko takaisinkytkettyä valosensoriseurantaa tai aika-algoritmin avulla toimivaa avointa järjestelmää, joten ne eivät vaikuta valintaan järjestelmien välillä. Vertikaalisia tai kalteva-akselisia aurinkoseuraajia ei ole myöskään hyödynnetty suuressa mittakaavassa toisin kuin horisontaalisia järjestelmiä. Jos onnistutaan kehittämään suurempaan aurinkosähkökenttään soveltuva vertikaalinen tai kalteva-akselinen järjestelmä, voidaan sen avulla mahdollisesti saavuttaa kilpailuetua ja erottua markkinassa. Tietämättömyys, kilpailun vähäisyys ja varsinkin toteutuksen haasteet ovat saattaneet vaikuttaa siihen, että kyseisiä aurinkoseuraajia käytetään yleensä vain yksittäisinä tai pienemmän kokoluokan aurinkosähkökentissä. Aurinkoa seuraavat järjestelmät vaikuttaisivat myös olevan yleisempiä alhaisemmilla leveyspiireillä, johon horisontaaliset järjestelmät soveltuvat paremmin. Lisäksi ei ole selkeästi ja konkreettisesti osoitettu, että aurinkoa seuraavat järjestelmät ovat kannattavia ja toimivia Suomen olosuhteissa. Kuitenkin tutkimusten perusteella tämä ei vaikuttaisi pitävän paikkaansa.

Konseptien kehittäminen aurinkoa seuraavan järjestelmän rakenteesta perustuu siis vertikaalisiin ja kalteva-akselisiin aktiivisiin aurinkoa seuraaviin järjestelmiin, sillä niillä on lähtökohtaisesti parhaat edellytykset ja eniten potentiaalia menestyä kilpailussa kiinteitä

aurinkosähköjärjestelmiä vastaan Suomen olosuhteissa. Lisäksi konseptien suunnittelussa voidaan hyödyntää kirjallisuustutkimuksessa sekä QFD-menetelmän avulla hankittuja tietoja. Konseptien suunnittelun tavoite on luoda hankittujen tietojen ja tuoteominaisuuksien pohjalta aurinkoa seuraava järjestelmä, joka tuottaa mahdollisimman paljon enemmän energiaa kuin kiinteä järjestelmä, mutta ilman kustannuksien nousemista suureksi suhteessa kiinteään järjestelmään. Konseptikehityksessä pyritään huomioimaan, että järjestelmällä olisi mahdollisimman alhainen hinta sekä pienet kuljetus-, asennus- ja huoltokustannukset. Järjestelmän täytyy myös olla mahdollisimman yksinkertainen ja korkeus ei saa nousta suureksi, jotta aurinkoseuraajia saadaan asennettua mahdollisimman lähelle toisiaan. Yksinkertainen rakenne mahdollistaa hinnan pitämisen matalana, mutta myös helpottaa kuljetusta ja asennusta. Rakenteen tulee asiakastarpeiden mukaisesti olla osista kasattava, joten se täytyy pystyä jakamaan pienempiin kokonaisuuksiin, jotka voidaan liittää esimerkiksi pulttiliitoksilla toisiinsa. Kääntömekanismin ja moottorin kustannusten osuus hinnasta on myös tärkeä pitää matalana, eli moottorin tulee kääntää mahdollisimman monta aurinkopaneelia. Lisäksi kääntömekanismin huoltokustannusten täytyy olla alhaiset. Näiden periaatteiden ja hankittujen tietojen pohjalta kehitetyt konseptit on esitetty liitteessä C.

5.3 Konseptien arviointi

Konseptien arvioinnin tarkoituksena on valita yksi kehitetyistä konsepteista jatkokehitykseen tuoteominaisuuksien toteutumisen perusteella. Konseptien systemaattiseen vertailuun ja jatkokehitykseen valittavan konseptin päättämiseen voidaan jälleen käyttää QFD-taulukkotyökalua. Tällä kertaa työkalussa arvioidaan, kuinka eri konseptit toteuttavat tuoteominaisuudet. Tuoteominaisuuksia ei tarvitse enää pisteyttää työkaluun, sillä konseptien vertailussa käytetään samoja painoarvoja kuin järjestelmätyyppien vertailussa aiemmin. Konseptien pisteytys tapahtuu samalla periaatteella kuin järjestelmätyyppien pisteytys. Konseptien vertailu tehdään työkalussa suuremman kentän eikä yksittäisten aurinkoseuraajien näkökulmasta, ja kenttien on oletettu olevan suunnilleen yhtä suuret jokaisen konseptin osalta. Työkalu helpottaa jälleen vertailua sekä päätöksentekoa, sillä eri konseptien vahvuudet ja heikkoudet toisiinsa nähden tulevat selkeästi esille. Konseptien pisteytys QFD-työkalussa on esitetty kuvassa 13.

TUT/MEI

QFD-tool

	Konsepti 1	Konsepti 2	Konsepti 3	Konsepti 4	Normalised Priority
Energiantuotto	3	3	1	4	0,97
Hinta	2	3	4	1	0,78
Luotettavuus	2	3	3	4	0,78
Huolto- ja käyttökustannukset	4	3	3	1	0,59
Yksinkertaisuus	2	3	4	1	0,47
Asennuskustannukset	2	3	4	1	0,31
Korkeus	4	4	1	0	0,44
Paino	2	2	4	1	0,06
Hiilijalanjälki	4	3	3	2	0,09
System char. priorities	12,22	13,88	12,31	9,41	
Normalised system char. priorities	0,88	1,00	0,89	0,68	

Kuva 13. *Konseptien vertailu QFD-työkalussa.*

Vertailun perusteella konsepti 1 on optimaalisin valinta huolto- ja käyttökustannusten, korkeuden ja hiilijalanjäljen osalta. Huolto- ja käyttökustannukset ovat konseptin 1 suurin etu. Ne ovat konseptissa 1 pienimmät, sillä moottorilla saadaan käännettyä suurinta määrää aurinkopaneeleja. Kuitenkin konseptissa 1 toteutuu keskinkertaisesti usea tuoteominaisuus, joista merkittävimpinä hinta sekä luotettavuus. Konsepti 1 on siis kalliimpi kuin konseptit 2 ja 3, eikä se ole myöskään yhtä luotettava. Isoin ongelma konseptissa 1 onkin vaihteen suuri hinta, ja myös vaihteen kiinnitysrakenne nostaa hintaa ja lisää asennuskustannuksia.

Konsepti 2 on vain painon osalta keskinkertainen, mutta muissa kategorioissa se pärjää tasaisen hyvin. Konseptissa 2 yhdistyvät kaikki tärkeät aurinkoa seuraavalta järjestelmältä vaadittavat tuoteominaisuudet, minkä takia se saakin vertailusta parhaat pisteet. Sen energiantuotto on korkea, mutta kustannukset alhaiset ja rakenne on lisäksi yksinkertainen sekä matala. Etenkin kääntömekanismin toteutuksen osalta konsepti 2 on yksinkertaisempi ja halvempi kuin konsepti 2. Sen luotettavuus on myös hyvä, sillä esimerkiksi moottorin vikaantuessa yhtä suuri määrä paneeleja ei lakkaa seuraamasta aurinkoa kuin konseptissa 1.

Konseptissa 3 toteutuu parhaimmin suurin määrä tuoteominaisuuksia, jotka ovat hinta, yksinkertaisuus, asennuskustannukset ja paino. Moni näistä tuoteominaisuuksista ei ole kuitenkaan prioriteetiltaan tärkeimmästä päästä. Konsepti 3 pärjää näiden lisäksi myös monessa muussa kategoriassa hyvin. Merkittävimmät heikkoudet konseptissa 3 ovat

kuitenkin muita konsepteja huonompi energiantuotto sekä korkeus, minkä takia se ei saa vertailussa parhaita pisteitä.

Konsepti 4 on optimaalisin energiantuoton sekä luotettavuuden osalta, jotka ovat erittäin tärkeitä tuoteominaisuuksia. Konseptissa 4 yhteen aurinkoseuraajaan saadaan eniten aurinkopaneeleja, mikä tarkoittaa suurempaa energiantuottoa. Tämä kuitenkin nostaa rakenteen monimutkaisuutta, painoa, asennuskustannuksia ja korkeutta. Lisäksi hiilijalanjälki sekä huolto- ja käyttökustannukset ovat suurimmat johtuen pitkälti moottorien suuresta määrästä isossa aurinkosähkökentässä. Konsepti 4 onkin selkeästi kaikista konsepteista huonoin valinta pisteytyksen perusteella.

Kuvasta 13 nähdään, että vertailu oli hyvin tiukka kolmen ensimmäisen konseptin kohdalla eikä tuloksiin muodostu suuria eroja. Tulosten perusteella konsepti 2 on kuitenkin paras valinta, ja siinä toteutuu kaikista parhaiten tuoton ja kustannusten tasapainoisuus. Konsepti 2 vaikutti myös tuotekehitystiimin mielestä parhaalta vaihtoehdolta. Siten konseptia 2 päätettiin lähteä jatkokehittämään pidemmälle kohti valmista tuotetta, mitä ei kuitenkaan työssä käsitellä. Pidemmälle suunniteltu järjestelmä on esitetty liitteessä D. Seuraavassa luvussa tarkastellaan taloudellisen analyysin avulla, onnistuttiinko konseptista 2 lopulta kehittämään kiinteää järjestelmää taloudellisesti kannattavampi aurinkoa seuraava järjestelmä.

6. KANNATTAVUUDEN ARVIOINTI

6.1 Järjestelmien tuotot

Taloudellista analyysia varten täytyy selvittää konseptista 2 kehitetyn aurinkoa seuraavan järjestelmän ja kiinteän järjestelmän vuosittaiset energiantuotot. Tarkka tuottojen määritys vaatisi järjestelmien fyysisen toteutuksen vähintään pienoiskoossa sekä tuottojen tarkkailun ainakin vuoden ajalta, joten tähän ei diplomityön puitteissa ryhdytä. Siksi järjestelmien tuotot simuloidaan PVGIS-työkalun avulla. Tarkasteltavan aurinkosähköjärjestelmän koko määritetään sen perusteella, montako aurinkoseuraajaa mahtuu suhteellisen tasaiselle yhden hehtaarin alueelle. Yhden aurinkoseuraajan tarvitsema pinta-ala lasketaan sen rakenteen sekä varjon vaatiman alueen perusteella. Siten aurinkoa seuraavan järjestelmän kokonaistehoksi laskettiin 517,5 kWp, jolloin järjestelmän teho on myös välillä 100–1000 kWp, mikä oli järjestelmän kapasiteetin tavoite.

Myös vertailuun tarvittavan kiinteän järjestelmän huipputeho lasketaan sen perusteella, montako aurinkopaneelia mahtuu maa-asennuksena hehtaarin alueelle. Kiinteän järjestelmän paneelimääräksi saadaan teoreettisesti laskettuna paneelien koon ja kaltevuuskulman eli paneelin ja sen varjon tarvitseman pinta-alan perusteella noin 1350 kpl. Kaltevuuskulma sekä myös suuntaus optimoidaan PVGIS-työkalun avulla. Kun tarkastellaan suuria toteutettavia aurinkosähkökenttiä, päästään samoihin paneelimääriin kuin teoreettisesti laskettuna. Esimerkiksi Pertunmaalle suunnitellussa 15 MWp:n aurinkovoimalassa on noin 28000 paneelia noin 20 hehtaarin alueella (Solarigo Systems 2022), mikä tarkoittaa noin 1400 paneelia hehtaarin alueelle. Puolestaan Hirvensalmelle rakennettavassa noin 5 MWp:n aurinkovoimalassa on 9200 paneelia noin 8,6 hehtaarin alueella (Solarigo Systems 2023a), mikä tarkoittaa noin 1070 paneelia hehtaarin alueelle. Lisäksi aurinkopaneelien koko edeltävissä hankkeissa vastaa niiden tehon perusteella tutkimuksessa käytettävien paneelien kokoa. Edeltävien tietojen perusteella arvioidaan paneelien määräksi hehtaarin alueelle 1250 kpl.

Järjestelmien sijainniksi PVGIS-työkaluun syötetään Tampere ottamatta tarkemmin kantaa aurinkosähköjärjestelmän soveltuvuuteen kyseiseen paikkaan. Kiinteän järjestelmän häviöiden oletetaan olevan 12 %, sillä paneelien tehon heikkeneminen huomioidaan erillisenä tekijänä. Lumipeitteen ja mahdollisesti myös lian aiheuttamat häviöt ovat jyrkemmän kaltevuuskulman takia aurinkoa seuraavassa järjestelmässä oletettavasti pienemmät, joten konseptin 2 tehohäviönä käytetään 11 %:a. Kun työkalu lisää häviöihin tulo-

kulman, lämpötilan sekä alhaisen säteilymäärän aiheuttamat häviöt, muodostuu kokonaishäviöiksi kiinteälle järjestelmälle noin 18,4 % ja aurinkoa seuraavalle noin 16,2 %. Aurinkoa seuraavassa järjestelmässä kaikkien edeltävien tekijöiden aiheuttamat häviöt ovat siis työkalun mukaan hieman pienemmät kuin kiinteässä järjestelmässä.

Molemmissa järjestelmissä oletetaan käytettävän kaksipuoleisia aurinkopaneeleja, joiden nimellisteho on 575 Wp. Koska PVGIS-työkalussa ei voi valita kaksipuoleisia paneeleja, täytyy työkalun laskemaan vuotuiseen nimelliseen energiantuottoon lisätä kaksipuolisten paneelien tuottama lisäenergia. Kaksipuolinen paneeli asennettuna aurinkoa seuraavaan järjestelmään tuo enemmän etua suhteessa kiinteään järjestelmään, joten kaksipuolisten paneelien tuoma lisäenergia arvioidaan suuremmaksi konseptille 2. Yksi syy suurempaan energiantuottoon on aurinkoa seuraavan järjestelmän suurempi kaltevuuskulma, jolloin se vastaanottaa enemmän maasta heijastuvaa säteilyä eikä omalla varjollaan estä säteilyn heijastumista paneelin takapuolelle. Myös heijastavaa maa-alaa on enemmän vapaana aurinkoa seuraavassa kentässä, sillä rakenteet ovat harvemmassa. Valmistaja on ilmoittanut paneelien tehon vuotuiseksi heikkenemäksi 0,4 % vuosina 2–30. Ensimmäisen vuoden heikkenemäksi on ilmoitettu alle 1 %, mutta yksinkertaisuuden vuoksi käytetään arvoa 0,4 % myös ensimmäisenä vuonna. Järjestelmien lähtötiedot ja niiden perusteella lasketut tuotot on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2. *Tietoja vertailtavista järjestelmistä sekä niiden tuotot.*

Järjestelmätyyppi	**Konsepti 2**	**Kiinteä**
Aurinkopaneelien määrä	900	1250
Järjestelmän teho (kWp)	517,5	718,75
Kaltevuuskulma (˚)	60	44
Häviöt (%)	11	12
Nimellinen vuosittainen energiantuotto (kWh)	627503	639073
Kaksipuolisten paneelien tehonlisäys (%)	8	5
Nimellinen vuosittainen energiantuotto kaksipuolisilla paneeleilla (kWh)	677703	671026
Energiantuoton vuosittainen vähenemä (%)	0,4	0,4

6.2 Järjestelmien kustannukset

Aurinkoa seuraavan järjestelmän alkuinvestointi sisältää kustannuksia monesta eri lähteestä. Kustannuksia aiheuttavat esimerkiksi aurinkopaneelit, invertterit, rakenteet, elektroniikkakomponentit, asennustyöt, logistiikka, luvat, verkkoon liittäminen, suunnittelu ja työnjohto (Ramasamy et al. 2023, s. 18, 28–30). Aurinkosähköinvestoinnin kaikkien kustannuksien huomiointi vaatisi laajaa tietämystä koko projektin sisällöstä, mihin on vaikea diplomityön puitteissa syvällisesti perehtyä. Koska kaikki kustannukset on hankala selvittää erikseen, ja niiden arviointi lisäisi huomattavasti muuttujia laskelmiin, jaetaan kustannukset viiteen luokkaan. Ne ovat aurinkopaneelit, invertterit, rakenteet, asennustyöt sekä muut kustannukset. Muut kustannukset kattavat kaikki loput aurinkosähköjärjestelmään kustannuksia aiheuttavat tekijät. Neljä ensimmäistä kustannuksia aiheuttavaa tekijää pystytään nimittäin melko tarkasti arvioimaan aurinkoa seuraavalla järjestelmälle.

Konseptin 2 rakenteen ja sen eri osien kustannukset ovat melko tarkasti tiedossa, sillä niihin on kysytty tarjoukset eri toimittajilta, kuten myös invertterreihin ja aurinkopaneeleihin. Rakenteiden kustannukset sisältävät kaikki rakenteiden aiheuttamat kustannukset, kuten perustuksien, teräsrakenteiden, rakenteiden valmistuksen ja kaikkien kääntämiseen tarvittavien komponenttien kustannukset. Asennuskustannuksiin huomioidaan maatyöt, sähköjen veto sekä rakenteiden kasaus ja asennus. Konseptin 2 asennuskustannukset arvioidaan maa- ja sähkötöiden osalta samankaltaisen perustuksen omaavan aurinkosähkökentän kuluista. Kasaus- ja asennustyön kustannukset puolestaan arvioidaan niihin kuluvan ajan ja työn tuntihinnan kautta. Muiden kustannusten oletetaan muodostuvan samassa €/kWh-suhteessa sekä aurinkoa seuraavalle että kiinteälle järjestelmälle.

Kiinteällä järjestelmälle rakenteen kustannuksia ei voida arvioida samalla tavalla, sillä se vaatisi ensin kiinteän järjestelmän rakenteiden suunnittelun, jotta niihin voitaisiin kysyä tarjoukset. Suurten teollisten kiinteiden järjestelmien keskimäärinen hinta Yhdysvalloissa oli vuoden 2023 neljännellä kvartaalilla noin 950 €/kWp (SEIA 2024). Teollisen mittakaavan järjestelmistä puhutaan yleisesti järjestelmän ollessa vähintään yhden megawatin kokoinen. Puolestaan Hirvensalmelle rakennettavan 5 MW:n aurinkopuiston investointikustannuksiksi on ilmoitettu noin 3,5 miljoonaa euroa (Solarigo Systems 2023a), mikä tarkoittaa noin 700 €/kWp. Vastaavassa tutkimuksessa on puolestaan käytetty näitä korkeampaa arvoa, joka on noin 1290 €/kWp (Talavera et al. 2019, s. 907). Investointikustannuksissa voi olla suuria eroja riippuen aurinkosähköjärjestelmän koosta, ja mittakaavaetujen vaikutusta kustannuksiin on hankala tarkasti arvioida. Koska tutkimuksen kiinteä järjestelmä on alle yhden megawatin kokoinen, arvioidaan kiinteän järjestelmän alkuinvestoinnin kokonaiskustannuksiksi Suomessa 950 €/kWp. Kustannukset arvioidaan

Hirvensalmelle rakennettavaa järjestelmää suuremmiksi, sillä mittakaavaetuja ei voida hyödyntää yhtä tehokkaasti noin 700 kWp:n tarkasteltavassa järjestelmässä kuin esimerkiksi 1–10 MW:n kokoisissa tai vielä suuremmissa järjestelmissä.

Invertterien ja paneelien kustannukset lasketaan kiinteälle järjestelmälle samalla €/kWp suhteella kuin aurinkoa seuraavalle järjestelmälle olettaen, että niiden mahdollisesti hieman suurempi määrä kiinteässä järjestelmässä ei aiheuta merkittäviä eroja. Kiinteän järjestelmän asennuskustannuksille saatiin järjestelmiä asentavalta yritykseltä hinta-arvio 50 € paneelia kohden, mihin sisältyy paalutus, rakenteiden kasaus, paneelien asennus, sekä sähköjen asennus paneeleille ja invertereille. Kiinnitysrakenteisiin ei saatu arvioita, joten ne arvioidaan toisella tapaa. 1 MW:n kokoisessa kiinteässä järjestelmässä rakenteiden hinnan osuus kokonaiskustannuksista on 15–17 % (ESFC 2024). Toisen lähteen mukaan aurinkopaneelien kiinnitysrakenteiden hinta on 0,1–2 MW:n järjestelmissä noin 100–170 €/kWp (Ramasamy et al. 2021, s. 14). Kyseisten osuuksien ja edellä määritetyn järjestelmän kokonaishinnan perusteella arvioidaan rakenteiden kustannusten suuruudeksi 170 €/kWp. Kun tiedetään järjestelmän kokonaishinta sekä aurinkopaneelien, invertterien, rakenteiden ja asennuksen kustannusten osuus kokonaishinnasta, voidaan laskea muille kustannuksille jäävä osuus. Samaa €/kWh-suhdetta käytetään siis myös aurinkoa seuraavan järjestelmän muiden kustannusten laskemiseen.

Järjestelmille täytyy taloudellisia analyyseja varten arvioida vielä vuotuiset huolto- ja käyttökustannukset. Vastaavissa taloudellisissa analyyseissa vuosittaisten huolto- ja käyttökustannusten suuruudeksi on arvioitu teollisen mittakaavan kiinteille järjestelmille noin 15–24 €/kWp, aurinkoa seuraaville yksiakselisille järjestelmille noin 28–31 €/kWp ja kaksiakselisille noin 32–36 €/kWp (Talavera et al. 2019, s. 905–906). Uusiutuvien energianlähteiden tutkimukseen erikoistunut NREL on puolestaan arvioinut 100 MW:n yksiakselisten aurinkoa seuraavien järjestelmien huolto- ja käyttökustannuksiksi noin 15 €/kWp (Ramasamy et al. 2023, s. 32–33). Kyseessä on kuitenkin paljon konseptia 2 suurempi kokoluokka ja luultavasti horisontaalinen järjestelmä, joissa huoltokustannukset ovat yleisesti pienemmät johtuen suurista aurinkopaneeliketjutuksista. Näiden tietojen perusteella arvioidaan kiinteälle järjestelmälle huolto- ja käyttökustannuksiksi 18 €/kWp ja aurinkoa seuraavalle järjestelmälle 30 €/kWp. Kustannusten oletetaan yksinkertaisuuden vuoksi pysyvän samoina järjestelmien koko elinkaaren ajan, vaikka todellisuudessa elinkaaren alussa kustannukset saattaisivat olla pienemmät ja kasvua tapahtua kohti eliniän loppua. Huolto- ja käyttökustannuksien oletetaan pitävän sisällään kaiken huoltoon ja käyttöön liittyvän sekä aurinkoa seuraavan järjestelmän tapauksessa myös moottorin käytön aiheuttamat kustannukset. Moottorin kuluttama virta riippuu paljon myös kääntölogiikan toteutuksesta, joten moottorin käytön kuluja ei työn puitteissa

tarkemmin arvioida, vaan ne sisältyvät arvioituihin huolto- ja käyttökustannuksiin. Kääntömekanismin ja etenkin moottorin takia konseptin 2 huolto- ja käyttökustannukset on arvioitu kiinteää järjestelmää suuremmiksi. Toisaalta konseptin 2 jyrkempi kaltevuuskulma vähentää esimerkiksi lumen ja mahdollisesti myös lian kertymistä paneeleihin, mikä vähentää niiden puhdistamisesta aiheutuvia kustannuksia. Lisäksi kiinteä järjestelmä on konseptia 2 suurempi, joten esimerkiksi invertereitä saatetaan tarvita enemmän, jolloin niiden vaihtamisen aiheuttamat kustannukset ovat suuremmat. Kiinteässä järjestelmässä myös mahdollisesti rikkoutuvia ja huollettavia aurinkopaneeleja on enemmän. Taulukossa 3 on esitetty järjestelmien kustannusten osuuksia, järjestelmien alkuinvestoinnit sekä vuosittaiset huolto- ja käyttökustannukset.

Taulukko 3. *Aurinkoa seuraavan ja kiinteän järjestelmän kustannukset.*

Järjestelmätyyppi	**Konsepti 2**	**Kiinteä**
Rakenteet (€/kWp)	710	162
Invertterit (€/kWp)	33	33
Aurinkopaneelit (€/kWp)	157	157
Asennustyöt (€/kWp)	116	87
Muut kustannukset (€/kWp)	511	511
Järjestelmän alkuinvestointi (€/kWp)	1528	950
Järjestelmän alkuinvestointi (€)	790709	682813
Vuosittainen huolto- ja käyttökustannus (€/kWp)	30	18
Vuosittainen huolto- ja käyttökustannus (€)	15525	12938

6.3 Taloudelliset laskelmat

Jotta aurinkoa seuraavan järjestelmän kannattavuus suhteessa kiinteään järjestelmään saadaan selville, täytyy tuottoja ja kustannuksia arvioida järjestelmien koko eliniän ajalta. Pelkkä suurempi energiantuotto tai pienemmät kustannukset eivät vielä kerro kannattavuudesta. Tässä työssä kannattavuuden arviointi tehdään laskemalla sähkön tasoitettu tuotantokustannus sekä nettonykyarvo molemmille järjestelmille ja vertaamalla tuloksia. Järjestelmien eliniäksi oletetaan 30 vuotta, joka on tavallinen tehotakuu tai sen yläraja aurinkopaneeleille. 30 vuoden elinikää on käyttänyt myös uusiutuvan energian tutkimi-

seen erikoistunut tutkimuslaboratorio NREL (NREL 2023). Diskonttokorko aurinkosähköinvestoinneissa on useilla markkinoilla 5 %:n luokkaa (Breyer ja Gerlach 2013, s. 123), ja vastaavissa aurinkosähköprojektien tutkimuksissa on käytetty tätä luokkaa olevia arvoja (Ramasamy et al. 2021, s. 45–46; Ramasamy et al. 2023, s. 31). Valitaan siten diskonttokoroksi 5 %, joka vastaa yleisesti käytettyjä arvoja. LCOE:n laskennassa ei kuitenkaan huomioida vuosittaisia korkomenoja, ja esimerkiksi alkuinvestointia pienentäviä tukia tai kannustimia ei ole huomioitu laskuissa. Tarvittavat lähtöarvot sähkön tasoitetun tuotantokustannuksen laskemiseen kaavan (3) avulla on koottu taulukkoon 4, jossa on esitetty myös laskennan tuloksena järjestelmille saadut LCOE-arvot.

Taulukko 4. *Sähkön tasoitetut tuotantokustannukset ja laskennan lähtöarvot.*

Järjestelmätyyppi	**Konsepti 2**	**Kiinteä**
Nimellinen vuosittainen energiantuotto kaksipuolisilla paneeleilla (kWh)	677703	671026
Järjestelmän alkuinvestointi (€)	790709	682813
Vuosittainen huolto- ja käyttökustannus (€)	15525	12938
Energiantuoton vuosittainen vähenemä (%)	0,4	0,4
Järjestelmän elinikä (a)	30	30
Diskonttokorko (%)	5	5
LCOE (€/kWp)	0,0970	0,0839

Koska LCOE keskittyy energiantuotannon kustannusten ja tuotettujen energiamäärien analysointiin eikä suoraan huomioi investoinnin tuottamaa rahallista arvoa, vertaillaan järjestelmiä vielä niiden tuottaman rahallisen arvon näkökulmasta nettonykyarvon avulla. Nettonykyarvoon voidaan huomioida myös projektien jäännösarvot, mikä saattaisi olla konseptilla 2 suurempi etenkin moottoreiden takia. Tässä työssä niitä ei kuitenkaan oteta analyysiin mukaan. Nettonykyarvon kaavaan (4) sijoitettavat investoinnin vuosittaiset tulot arvioidaan tässä työssä kertomalla aurinkosähköjärjestelmän vuosittainen energiantuotto arvioidulla sähkön hinnalla, joka sähköstä täytyisi maksaa suoraan sähköverkosta ostettuna. Kaavaan (4) sijoitettavat investoinnin vuosittaiset kulut puolestaan saadaan järjestelmän alkuinvestoinnista sekä vuosittaisista huolto- ja käyttökustannuksista. Jos sähkön hintaa euroissa merkitään tunnuksella *e* ja kaavaan (4) sijoitetaan alkuinvestointi, huolto- ja käyttökustannukset sekä vuosittainen energiantuotto kaavan (2) muodossa, voidaan nettonykyarvo aurinkosähköjärjestelmälle laskea kaavan (5) mukaisesti:

$$NPV = \sum_{t=0}^{T} \left(\frac{S_t(1-d)^t}{(1+r)^t} * e - \frac{I_t + O_t + M_t}{(1+r)^t} \right). \quad (5)$$

Sähköenergian kokonaishinta Suomessa vuonna 2023 vaihteli kuukausittain noin välillä 8,1–10,6 c/kWh, kun tarkastellaan yritys- ja yhteisöasiakkaita, joiden vuosikulutus on välillä 500–1999 MWh (Tilastokeskus 2024). Valitaan vuosittaisten tulojen laskentaan sähkön hinnaksi kiinteälle järjestelmälle 8,5 c/kWh ja aurinkoa seuraavalle 10 c/kWh, sillä aurinkoa seuraavalla järjestelmällä saadaan tuotettua enemmän sähköä lähempänä aamua ja iltaa, jolloin sähkö on yleensä kalliimpaa. Sijoittamalla sähkön hinta ja lähtöarvot taulukosta 4 kaavaan (5) saadaan aurinkoa seuraavan järjestelmän nettonykyarvoksi 31938 € ja kiinteälle järjestelmälle 11527 €.

6.4 Tulosten analysointi

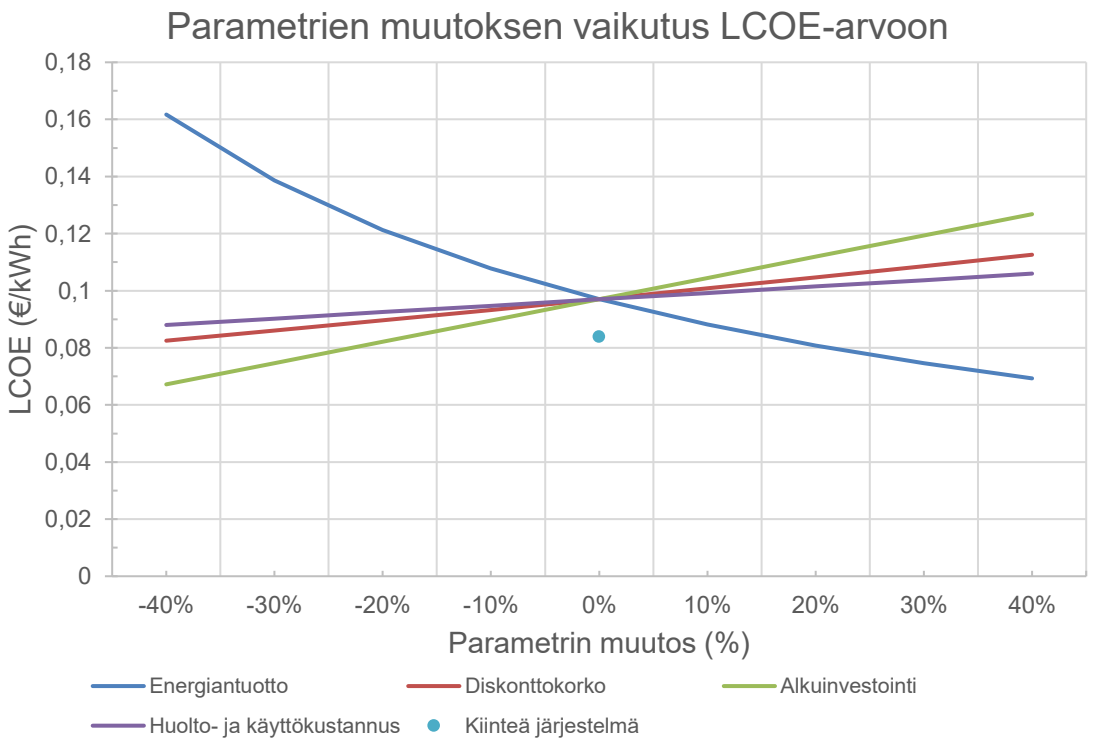
Taloudellisen analyysin perusteella sähkön tasoitettu tuotantokustannus on kiinteällä järjestelmällä hieman pienempi kuin aurinkoa seuraavalla järjestelmällä, eli se on LCOE:lla mitattuna taloudellisesti kannattavampi valinta. Nettonykyarvomenetelmän mukaan puolestaan aurinkoa seuraava järjestelmä saa hieman suuremman eli paremman tuloksen. Taulukossa 5 on esitetty lähtöarvojen ja tulosten eroja, kun aurinkoa seuraavaa järjestelmää verrataan samansuuruisen maa-alan vaativaan kiinteään järjestelmään.

Taulukko 5. *Aurinkoa seuraavan järjestelmän lähtöarvojen ja laskennan tulosten erot verrattuna kiinteään järjestelmään.*

Parametri	Ero laskentayksikössä	Ero prosenteissa
Järjestelmän teho	-201,25 kWp	-28 %
Nimellinen vuotuinen energiantuotto kaksipuolisilla paneeleilla	6875 kWh	1 %
Vuosittainen huolto- ja käyttökustannus	2588 €	20 %
Järjestelmän alkuinvestointi	107896 €	15,8 %
LCOE	0,013 €/kWp	15,6 %
NPV	20411 €	177 %

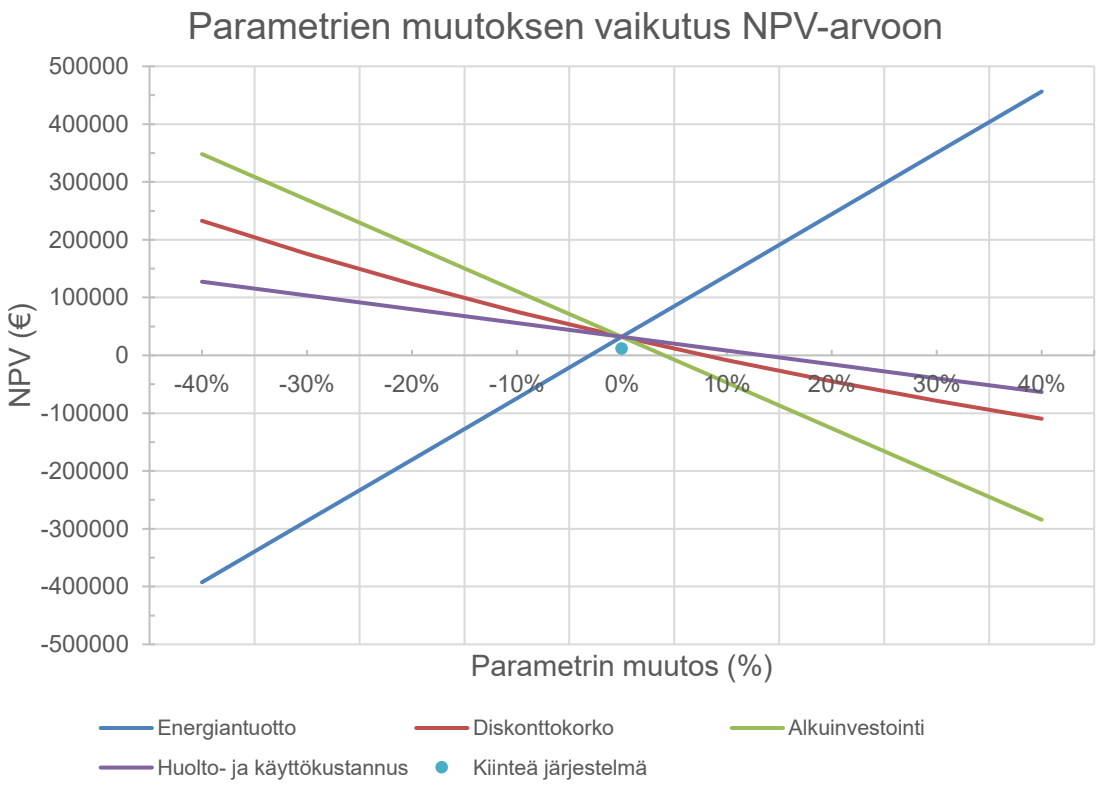
Taulukosta 5 nähdään, että samansuuruisella maa-alalla aurinkoa seuraavan järjestelmän teho on 28 % pienempi kuin kiinteällä järjestelmällä, sillä suureen kiinteään aurin-

kosähkökenttään saadaan asennettua enemmän paneeleja pienemmän kaltevuuskulman takia. Tehon ja paneelimäärän erosta huolimatta konseptin 2 nimellinen vuotuinen energiantuotto kaksipuolisilla paneeleilla on käytännössä sama kuin kiinteällä tai jopa hieman parempi eli noin 7000 kWh. Huolto- ja käyttökustannukset ovat aurinkoa seuraavassa järjestelmässä huoltokustannusten lähtöarvoihin nähden vain noin 2600 € eli 20 % suuremmat, mikä johtuu kiinteän järjestelmän suuremmasta määrästä huollettavia aurinkopaneeleja. Alkuinvestointien prosentuaalinen ero ei ole suuri kiinteän järjestelmän hyväksi, mutta rahallinen ero on huomattava. Aurinkoa seuraavan järjestelmän alkuinvestointi tulee kuitenkin oletettavasti laskemaan kehitettäessä järjestelmää pidemmälle. Sähkön tasoitettu tuotantokustannus on vain hieman kiinteän järjestelmän hyväksi johtuen etenkin sen pienemmästä alkuinvestoinnista. Nettonykyarvo puolestaan on aurinkoa seuraavalla järjestelmällä prosenteissa mitattuna huomattavasti parempi, mutta rahallisesti ero ei ole merkittävä järjestelmien kokoluokkaan nähden. Taloudellisessa analyysissa tehtiin kuitenkin paljon arvioita, joten esimerkiksi alkuinvestoinnin, energiantuoton, diskonttokoron tai huolto- ja käyttökustannusten muutokset vaikuttavat tuloksiin oleellisesti. Vielä on siis syytä tarkastella edeltävien lähtöarvojen muutoksien vaikutusta tuloksiin, mikä tehdään herkkyysanalyysin avulla. Kuvassa 14 on esitetty, miten konseptin 2 lähtöarvojen prosentuaaliset muutokset vaikuttavat sähkön tasoitettuun tuotantokustannukseen. Keskikohta on määritetty taulukon 4 LCOE-arvojen perusteella.



Kuva 14. *Aurinkoa seuraavan järjestelmän parametrien muutoksen vaikutus sähkön tasoitettuun tuotantokustannukseen.*

Herkkyysanalyysi on tehty muuttamalla vain yhtä parametria kerrallaan ja pitämällä muut lähtöarvot alkuperäisinä. Jos useampi tekijä muuttuu samaan aikaan parempaan tai huonompaan suuntaan, on vaikutus lopputulokseen tietenkin suurempi. Kuvasta 14 nähdään, että energiantuotolla on suurin vaikutus sähkön tasoitettuun tuotantokustannukseen. Huolto- ja käyttökustannuksella on puolestaan kaikista pienin vaikutus, ja sen pitäisi laskea ainakin yli 40 %, jotta LCOE-arvo konseptilla 2 olisi sama kuin kiinteällä. Alkuinvestoinnin osalta laskun pitäisi olla noin 20 % ja energiantuoton täytyisi puolestaan kasvaa noin 15 %, jotta LCOE laskisi samaan arvoon kiinteän järjestelmän kanssa. Diskonttokorkojen muutoksen vertailu ei ole yhtä olennaista, sillä se oletettavasti muuttuu molempien järjestelmien tapauksessa. Diskonttokoron osalta kuvasta kannattaa huomioida ennemminkin sen muutoksen vaikutus konseptin 2 LCOE-arvoihin. Kuvassa 14 on esitetty vertailun tueksi myös taulukon 4 lähtöarvoilla laskettu kiinteän järjestelmän LCOE-arvo. Tarkastellaan vielä lähtöarvojen muutoksen vaikutusta konseptin 2 nettonykyarvoon. Nettonykyarvon herkkyysanalyysi tehdään samalla idealla kuin LCOE-arvon tapauksessa, ja myös kiinteälle järjestelmälle laskettu nettonykyarvo esitetään samalla tavalla. Lähtöarvojen muutoksen aiheuttamat vaikutukset konseptin 2 nettonykyarvoon on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. *Aurinkoa seuraavan järjestelmän parametrien muutoksen vaikutus nettonykyarvoon.*

Kuvasta 15 nähdään, että paljon pienemmät prosentuaaliset muutokset lähtöarvoissa vaikuttavat siihen, kummalla järjestelmistä on parempi nettonykyarvo. Jo muutaman prosentin lasku aurinkoa seuraavan järjestelmän energiantuotossa tai nousu alkuinvestoinnissa riittää laskemaan sen nettonykyarvon alle kiinteän järjestelmän nettonykyarvon. Huolto- ja käyttökustannuksissa puolestaan vaaditaan noin 10 %:n nousu, jotta nettonykyarvo laskee alle kiinteän järjestelmän vastaavan arvon. Toisaalta lähtöarvojen muutokset toimivat myös toiseen suuntaan, eli esimerkiksi 10 %:n nousu konseptin 2 energiantuotossa tai lasku alkuinvestoinnissa parantaa nettonykyarvoa huomattavasti. Lisäksi kuvaa tulkitessa on hyvä tiedostaa, että sähkön hinnan ja energiantuoton samansuuruiset prosentuaaliset muutokset vaikuttavat nettonykyarvoon samalla tavalla. Esimerkiksi sähkön hinnan 30 %:n nousu vastaa samansuuruista energiantuoton nousua eli noin nettonykyarvoa 350000 €. Sekä kuvan 14 että kuvan 15 esittämistä kuvaajista voidaan arvioida suuntaa antavasti myös parametrien muutosten vaikutusta kiinteään järjestelmään, sillä sen kuvaajat käyttäytyvät melko samalla tapaa varsinkin pienten muutosten tapauksessa. Esimerkiksi 5 %:n nousu kiinteän järjestelmän energiantuotossa vastaa noin 50000 €:n nettonykyarvoa ja 0,08 €/kWh:n sähkön tasoitettua tuotantokustannusta. Kannattaa huomioida, että taloudellisissa laskelmissa ei huomioitu mahdollisia tukia, jotka pienentävät järjestelmien alkuinvestointeja, ja parantavat siten taloudellisia mittareita.

Taloudellisessa analyysissa täytyi tehdä paljon arvioita lähtöarvoista etenkin kiinteän järjestelmän osalta. Siten todellisuudessa järjestelmä voi olla esimerkiksi kalliimpi tai halvempi, mikä vaikuttaa tietenkin oleellisesti tuloksiin. Myös aurinkoa seuraavan järjestelmän energiantuotto, alkuinvestointi tai huolto- ja käyttökustannukset voivat todellisuudessa poiketa taloudellisen analyysin arvioista. Herkkyysanalyysin avulla saatiin kuitenkin havainnollistettua lähtöarvojen muutosten vaikutusta taloudellisiin mittareihin. Sen perusteella alkuinvestoinnilla ja energiantuotolla on suurin vaikutus sähkön tasoitettuihin tuotantokustannuksiin ja nettonykyarvoon. Siten niiden muutokset ovat olennaisimpia järjestelmien välisessä vertailussa. Herkkyysanalyysin avulla voidaan myös jatkossa lähtöarvojen mahdollisten muutosten ilmetessä arvioida niiden vaikutusta järjestelmän kannattavuuteen.

Sähkön tasoitettujen tuotantokustannuksien, nettonykyarvojen ja herkkyysanalyysien perusteella voidaan todeta, että konseptin 2 pohjalta suunniteltu aurinkoa seuraava järjestelmä on kilpailukykyinen suhteessa kiinteään järjestelmään. Pelkästään taloudellisten mittareiden perusteella ei voida suoraan sanoa kumpi järjestelmistä on parempi, sillä tulokset ovat hyvin tasaiset. Siksi kannattavamman järjestelmän osoittaminen vaatisi tarkempia tietoja laskennan lähtöarvoista. Kuitenkin aurinkoa seuraavalla järjestelmällä on

paljon sen valintaa puoltavia tekijöitä sekä enemmän potentiaalia ja etuja kiinteään järjestelmään verrattuna. Suunniteltu järjestelmä on nimittäin vasta varhaisessa kehitysvaiheessaan toisin kuin pitkälle kehittyneet kiinteät järjestelmät. Silti jo tässä vaiheessa aurinkoa seuraava järjestelmä osoittautui taloudellisessa analyysissa nettonykyarvoltaan paremmaksi kuin kiinteä järjestelmä. Tosin herkkyysanalyysin perusteella lähtöarvojen muutokset vaikuttavat tuloksiin voimakkaasti, mutta toisaalta muutos on voimakas huonomman suunnan lisäksi myös parempaan suuntaan. Vaikka aurinkoa seuraavan järjestelmän LCOE-arvo on analyysin perusteella hieman kiinteän järjestelmän vastaavaa arvoa alhaisempi, on tulos pienen eron takia erittäin lupaava. Useamman lähtöarvon muuttuessa ei lähtöarvojen prosentuaalisten muutosten tarvitse välttämättä olla suuria, jotta aurinkoa seuraava järjestelmä saavuttaa paremmat arvot. Esimerkiksi, jos kiinteän järjestelmän energiantuotto ja aurinkoa seuraavan järjestelmän alkuinvestointi laskevat noin 7 %, vastaavat jo tasoitetut sähkönkustannukset toisiaan.

Aurinkoa seuraavassa järjestelmässä on lisäksi vielä paljon tekijöitä, joita saadaan optimoitua sekä kehitettyä, ja siten parannettua järjestelmän taloudellisia mittareita. Esimerkiksi alkuinvestoinnin suuruutta saadaan pienennettyä, kun rakennetta optimoidaan ja osia kilpailutetaan useammalla toimittajalla sekä tilataan suuria määriä. Myös kaksipuolisten paneelien vaikutus energiantuottoon voi olla vielä suurempi ja toimia merkittävänä etuna aurinkoa seuraavalle järjestelmälle. Lisäksi suurempi kaltevuuskulma voi laskea huoltokustannuksia arvioitua enemmän, kuten myös pienempi määrä huollettavia tai vaihdettavia aurinkopaneeleja ja mahdollisesti siten myös inverttereitä. Toisaalta taas kääntömekanismi aiheuttaa järjestelmään huoltokustannuksia, mutta sen vaikutusta saatiin konseptin 2 rakenteen avulla pienennettyä. Aurinkopaneelien kaltevuuskulman sekä rakenteiden määrän ja sijoittamisen optimointi suureen aurinkosähkökenttään voivat myös tuoda lisäetuja aurinkoa seuraavalle järjestelmälle. Rakenteita ei tarvitse esimerkiksi sijoittaa itä-länsi suunnassa samaan riviin, jolloin varjostukset aamuisin ja iltaisin vähenevät ja hehtaarille voi mahtua enemmän aurinkoseuraajia kuin työssä arvioitiin. Aurinkoa seuraavan järjestelmän taloudellinen kannattavuus suhteessa kiinteään saattaa myös nousta, jos sen koko ei ole rajoitettu hehtaarin alueelle. Jos järjestelmät mitoitetaan teholtaan yhtä suuriksi, saadaan myös aurinkoa seuraavassa järjestelmässä hyödynnettyä mittakaavaetuja paremmin, jolloin sen kustannukset laskevat. Lisäksi aurinkoa seuraavan järjestelmän mahdollisuudet ovat kiinteää järjestelmää suuremmat etenkin nettonykyarvoon samalla tavalla vaikuttavien energiantuoton ja sähkön hinnan osalta. Tämä johtuu aurinkoa seuraavan järjestelmän kyvystä tuottaa enemmän energiaa aamuin ja illoin sähkön ollessa kalliimpaa. Työssä arvioitiin, että rahallinen ero on 1,5 c/kWh, mutta todellisuudessa ero voi olla myös paljon suurempi.

7. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli tutkia, millainen on Suomen olosuhteisiin parhaiten soveltuvan aurinkoa seuraavan järjestelmän rakenne sekä selvittää, voiko aurinkoa seuraava järjestelmä olla kiinteää järjestelmää taloudellisesti kannattavampi Suomen olosuhteissa. Tavoitteena oli myös hankittuja tietoja sekä asiakaslähtöisiä tuoteominaisuuksia hyödyntäen kehittää aurinkoa seuraavan järjestelmän rakenteesta useampi konsepti, valita niistä potentiaalisin ja tutkia sen kannattavuutta suhteessa kiinteään järjestelmään. Tutkimusprojekti aloitettiin hankkimalla tietoa erilaisista aurinkoa seuraavista aurinkosähköjärjestelmistä ja niiden ominaisuuksista sekä kannattavuudesta kirjallisuustutkimuksen avulla. Tutkimuksien perusteella osoittautui, että on olemassa monia erilaisia aurinkoa seuraavia järjestelmiä. Niiden ominaisuuksissa ja kannattavuudessa on eroja, joten toiset niistä soveltuvat paremmin Suomen olosuhteisiin. Kirjallisuustutkimuksen perusteella selvisi myös, että aurinkoa seuraavat järjestelmät voivat olla kiinteitä järjestelmiä taloudellisesti kannattavampia. Seuraavaksi tutustuttiin QFD-menetelmään, jota käytetään asiakkaiden osallistamiseen tuotekehitysprosessiin. Menetelmän mukaisesti asiakkailta kerättyjen tietojen pohjalta muodostettiin aurinkoa seuraavalta järjestelmältä vaadittavat tuoteominaisuudet sekä niiden prioriteetit, jotka vastasivat hyvin kirjallisuustutkimuksen aikana kerättyjä tietoja.

Työn loppupuolella konseptikehityksessä hyödynnettiin sekä kirjallisuustutkimuksessa hankittuja että asiakkailta kerättyjä tietoja. Tavoitteena oli tietojen avulla kehittää aurinkoa seuraavasta järjestelmästä useampi konsepti, joilla olisi potentiaalia olla kiinteä järjestelmää kannattavampia. Tässä onnistuttiin, sillä konsepteja kehitettiin neljä kappaletta, ja niistä potentiaalisin valittiin jatkokehitykseen tuoteominaisuuksien toteutumisen perusteella QFD-menetelmän mukaisesti. Valittu konsepti suunniteltiin työn ulkopuolella pidemmälle, jotta työn lopuksi voitiin vertailla suunnitellun järjestelmän kannattavuutta suhteessa kiinteään järjestelmään. Taloudellisen analyysin perusteella konseptista kehitetty järjestelmä osoittautui jo varhaisessa kehitysvaiheessaan kilpailukykyiseksi kiinteän järjestelmän kanssa, joten työ onnistui kokonaisuudessaan hyvin. Lisäksi suunnitellulla aurinkoa seuraavalla järjestelmällä on kehitysmahdollisuuksia vielä paljon pidemmälle kuin rakenteiltaan jo vakiintuneilla kiinteillä järjestelmillä.

Työssä keskityttiin kehittämään konsepteja Suomen olosuhteisiin ja leveyspiireille soveltuvista aurinkoa seuraavien järjestelmien rakenteista sekä tutkimaan niiden kannattavuutta suhteessa kiinteään järjestelmään. Työssä ei käsitelty suunnitteluprosessia konseptista pidemmälle kohti valmista tuotetta. Lisäksi taloudellisessa analyysissa tehtiin

arvioita ja oletuksia, joten jatkotutkimuksessa järjestelmä voitaisiin toteuttaa fyysisesti, mutta pienemmässä mittakaavassa kuin taloudellisessa analyysissa. Siten voitaisiin selvittää järjestelmän todelliset vuotuiset tuotot, huoltokustannukset sekä muut asiat, jotka eivät diplomityön puitteissa tarkasti selvinneet.

LÄHTEET

AL-Rousan, N., Isa, N.A.M., Desa, M.K.M. (2018). Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol.82, s.2548–2569.

Awasthi, A., Shukla, A.K., S.R., M.M., Dondariya, C., Shukla, K.N., Porwal, D., Richhariya, G. (2020). Review on sun tracking technology in solar PV system. Energy Reports. Vol.6, s.392–405.

Bahrami, A., Okoye, C.O. (2018). The performance and ranking pattern of PV systems incorporated with solar trackers in the northern hemisphere. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol.97, s.138–151.

Bakhshi, R., Sadeh, J. (2016). A comprehensive economic analysis method for selecting the PV array structure in grid–connected photovoltaic systems. Renewable Energy. Vol.94, s.524–536.

Blackridge Research (2024). Top 10 Global Solar PV Tracker Companies. Verkkosivu. Viitattu 7.3.2024. https://www.blackridgeresearch.com/blog/top-solar-pv-photovoltaic-panel-single-dual-axis-tracker-system-manufacturers-makers-companies-firms-suppliers

Branker, K., Pathak, M.J.M., Pearce, J.M. (2011). A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol.15(9), s.4470–4482.

Breyer, C., Gerlach, A. (2013). Global overview on grid-parity. Progress in Photovoltaics. Vol.21(1), s.121–136.

Chan, L.-K., Wu, M.-L. (2002). Quality Function Deployment: A Comprehensive Review of Its Concepts and Methods. Quality Engineering. Vol.15(1), s.23–35.

Elahi Gol, A., Ščasný, M. (2023). Techno-economic analysis of fixed versus sun-tracking solar panels. International journal of renewable energy development. Vol.12(3), s.615–626.

Eldin, S.A.S., Abd-Elhady, M.S., Kandil, H.A. (2016). Feasibility of solar tracking systems for PV panels in hot and cold regions. Renewable Energy. Vol.85, s.228–233.

ESFC Investment Group (2024). Solar power plant construction costs. Verkkosivu. Viitattu 26.4.2024. https://esfccompany.com/en/articles/solar-energy/solar-power-plant-construction-cost/

Euroopan komissio (2022). Komission tiedonanto Eurooppa Parlamentille, Eurooppa-Neuvostolle, Neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. REPowerEU-suunnitelma. COM (2022) 230 final, 18.5.2022. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230

Euroopan komissio (2023). REPowerEU. Verkkosivu. Viitattu 4.3.2024. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_fi

Eurooppa-neuvosto (2024). Pariisin ilmastosopimus. Verkkosivu. Viitattu 4.3.2024 https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/climate-change/paris-agreement/

Ficalora, J.P., Cohen, L. (2010). Quality function deployment and Six Sigma: a QFD handbook, 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.

Griffin, A., Hauser, J.R. (1993). The Voice of the Customer. Marketing Science. Vol.12(1), s.1–27.

Huld, T., Cebecauer, T., Šúri, M., Dunlop, E.D. (2010). Analysis of one-axis tracking strategies for PV systems in Europe. Progress in Photovoltaics. Vol.18(3), s.183–194.

Kauppalehti (2024). Kiikoisten Konepaja Oy. Verkkosivu. Viitattu 12.4.2024. https://www.kauppalehti.fi/yritykset/yritys/kiikoisten+konepaja+oy/31956259

Kuttybay, N., Saymbetov, A., Mekhilef, S., Nurgaliyev, M., Tukymbekov, D., Dosymbetova, G., Meiirkhanov, A., Svanbayev, Y. (2020). Optimized Single-Axis Schedule Solar Tracker in Different Weather Conditions. Energies. Vol.13(19), 5226.

Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K., Sharifi, A. (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol.13(8), s.1800–1818.

Musa, A., Alozie, E., Suleiman, S.A., Ojo, J.A., Imoize, A.L. (2023). A Review of Time-Based Solar Photovoltaic Tracking Systems. Information 14(4), 211.

NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2023). 2023 Annual Technology Baseline. Verkkosivu. Viitattu 27.4.2024. https://atb.nrel.gov/

Park, T., Kim, K. (1998). Determination of an optimal set of design requirements using house of quality. Journal of Operations Management. Vol.16(5), s.569–581.

Precedence Research (2023). Solar Tracker Market. Verkkosivu. Viitattu 5.3.2024. https://www.precedenceresearch.com/solar-tracker-market

PVGIS (2022). Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Verkkosivu. Viitattu 15.2.2024 https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en

Racharla, S., Rajan, K. (2017). Solar tracking system - a review. International journal of sustainable engineering. Vol.10(2), s.72–81.

Ramasamy, V., Feldman, D., Desai, J., Margolis, R. (2021). U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks: Q1 2021. PDF-dokumentti. Viitattu 25.4.2024. https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/80694.pdf

Ramasamy, V., Zuboy, J., Woodhouse, M., O'Shaughnessy, E., Feldman, D., Desai, J., Walker, A., Margolis, R., Basore, P. (2023). U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks, With Minimum Sustainable Price Analysis: Q1 2023. PDF-dokumentti. Viitattu 25.4.2024. https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/87303.pdf

Rodríguez-Gallegos, C.D., Liu, H., Gandhi, O., Singh, J.P., Krishnamurthy, V., Kumar, A., Stein, J.S., Wang, S., Li, L., Reindl, T., Peters, I.M. (2020). Global Techno-Economic Performance of Bifacial and Tracking Photovoltaic Systems. Joule. Vol.4(7), s.1514–1541.

SEIA (Solar Energy Industries Association) (2024). Solar Market Insight Report 2023 Year in Review. Verkkosivu. Viitattu 25.4.2024. https://www.seia.org/research-resources/solar-market-insight-report-2023-year-review

Solarigo Systems (2022). Pertunmaan aurinkopuisto. Verkkosivu. Viitattu 25.4.2024. https://www.solarigo.fi/pertunmaa

Solarigo Systems (2023a). Hirvensalmen aurinkopuisto. Verkkosivu. Viitattu 25.4.2024. https://www.solarigo.fi/hirvensalmi

Solarigo Systems (2023b). Vaihtoehdot Aurinkopaneeleissa. Verkkosivu. Viitattu 19.4.2024. https://www.solarigo.fi/solarigon-k%C3%A4ytt%C3%A4m%C3%A4t-aurinkopaneelit

Talavera, D.L., Muñoz-Cerón, E., Ferrer-Rodríguez, J.P., Pérez-Higueras, P.J. (2019). Assessment of cost-competitiveness and profitability of fixed and tracking photovoltaic systems: The case of five specific sites. Renewable Energy. Vol.134, s.902–913.

Tilastokeskus (2024). Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin, 2008M01-2023M12. Verkkosivu. Viitattu 27.4.2024. https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehi/statfin_ehi_pxt_13rb.px/

Ukko Works (N.d.). Verkkosivu. Viitattu 12.4.2024. https://ukkoworks.fi/

Vaziri Rad, M.A., Toopshekan, A., Rahdan, P., Kasaeian, A., Mahian, O. (2020). A comprehensive study of techno-economic and environmental features of different solar tracking systems for residential photovoltaic installations. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol.129, 109923.

LIITE A: ASIAKASTARPEET

Ensisijaiset asiakastarpeet, 1. taso	Täydentävät asiakastarpeet, 2. taso
Järjestelmällä on huomattavasti parempi vuosituotto kuin kiinteällä järjestelmällä	Järjestelmä on suunnattuna aurinkoon päin mahdollisimman hyvin
Järjestelmällä on mahdollisimman tasainen sähköntuotanto koko päivän ajan	
Järjestelmän sähköntuotto on suuri etenkin aamuin ja illoin	
Järjestelmän tuoton ja hinnan suhde on mahdollisimman hyvä	
Järjestelmässä on mahdollisimman monta paneelia moottoria kohden	
Järjestelmän kustannukset eivät ole suuret kiinteään järjestelmään verrattuna	
Kääntömekanismi ei maksa liikaa	
Kääntömekanismi ja -logiikka ovat toimivia ja luotettavia	Järjestelmässä on AC-moottori, joka toimii Suomen olosuhteissa Järjestelmällä on toteutuneita referenssejä Suomessa
Huollon sekä ylläpidon tarve on mahdollisimman pieni ja ennakoitu	
Järjestelmän esikokoonpano ja asennus on helppoa	Rakenne on osista kasattava Asennettavuus on huomioitava suunnittelussa
Asentaminen on mahdollisimman halpaa suhteessa kiinteään järjestelmään	
Järjestelmä ei aiheuta liikaa työtä ja vaivaa suhteessa kiinteään järjestelmään	Järjestelmän suunnittelu on mahdollisimman helppoa Kääntölogiikan toteutus ja käyttöönotto on helppoa Järjestelmää ei tarvitse käydä säätämässä asennuksen jälkeen
Järjestelmää on helppo käyttää	Kääntösykliä pystyy säätämään
Järjestelmä ei vie paljoa tilaa	
Rakenne ei ole raskas	
Järjestelmä on valmistettu Suomessa	

LIITE B: TUOTEOMINAISUUDET

Ensisijaiset asiakastarpeet, 1. taso	Tuoteominaisuudet
Järjestelmällä on huomattavasti parempi vuosituotto kuin kiinteällä järjestelmällä	Energiantuotto, Huolto- ja käyttökustannukset, Korkeus
Järjestelmällä on mahdollisimman tasainen sähköntuotanto koko päivän ajan	Energiantuotto
Järjestelmän sähköntuotto on suuri etenkin aamuin ja illoin	Energiantuotto
Järjestelmän tuoton ja hinnan suhde on mahdollisimman hyvä	Energiantuotto, Hinta, Huolto- ja käyttökustannukset, Yksinkertaisuus, Asennuskustannukset, Korkeus
Järjestelmässä on mahdollisimman monta paneelia moottoria kohden	Energiantuotto, Hinta, Huolto- ja käyttökustannukset, Yksinkertaisuus, Hiilijalanjälki
Järjestelmän kustannukset eivät ole suuret kiinteään järjestelmään verrattuna	Hinta, Huolto- ja käyttökustannukset, Yksinkertaisuus, Asennuskustannukset, Paino
Kääntömekanismi ei maksa liikaa	Hinta
Kääntömekanismi ja -logiikka ovat toimivia ja luotettavia	Energiantuotto, Luotettavuus, Huolto- ja käyttökustannukset, Yksinkertaisuus
Huollon sekä ylläpidon tarve on mahdollisimman pieni ja ennakoitu	Energiantuotto, Luotettavuus, Huolto- ja käyttökustannukset, Yksinkertaisuus, Paino, Hiilijalanjälki
Järjestelmän esikokoonpano ja asennus on helppoa	Yksinkertaisuus, Asennuskustannukset, Korkeus, Paino
Asentaminen on mahdollisimman halpaa suhteessa kiinteään järjestelmään	Yksinkertaisuus, Asennuskustannukset, Korkeus, Paino
Järjestelmä ei aiheuta liikaa työtä ja vaivaa suhteessa kiinteään järjestelmään	Hinta, Luotettavuus, Huolto- ja käyttökustannukset, Yksinkertaisuus, Asennuskustannukset, Hiilijalanjälki
Järjestelmää on helppo käyttää	Luotettavuus, Huolto- ja käyttökustannukset, Yksinkertaisuus
Järjestelmä ei vie paljoa tilaa	Korkeus
Rakenne ei ole raskas	Hinta, Huolto- ja käyttökustannukset, Yksinkertaisuus, Asennuskustannukset, Korkeus, Paino, Hiilijalanjälki
Järjestelmä on valmistettu Suomessa	Luotettavuus, Hiilijalanjälki