



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Erkka Lempiäinen

Mikroverkkojen vertailu erikokoisilla asuinalueilla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

30.4.2020

Tekijä Otsikko	Erkka Lempiäinen Mikroverkkojen vertailu erikokoisilla asuinalueilla
Sivumäärä Aika	33 sivua 30.4.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	lehtori Jukka Karppinen
<p>Insinööriyössä tutustuttiin EU:n ilmastotavoitteisiin ja esitettiin perusteluja, miksi mikroverkko voisi olla yksi tapa pienentää hiilijalanjälkeä Suomessa. Mikroverkkojen ominaisuuksia käytiin läpi esittelemällä eri laitteita, joita mikroverkossa voi olla. Laite-esittelyissä keskityttiin laitteisiin, joita kokovertailuissa käytettiin, kuten aurinkopaneeleihin, tuulivoimaloihin sekä CHP-laitteisiin. Lisäksi selvitettiin mikroverkon rakentamiseen ja tarkemmin tuulivoimalan ja CHP-laitoksen rakentamiseen vaaditut rakennusluvat, sillä nämä saattavat vaatia erityisiä rakennus- tai toimenpidelupia.</p> <p>Työssä esiteltiin esimerkeissä käytettävä neljän asukkaan omakotitalo. Tätä omakotitalo käytettiin esimerkkeinä suunnitelluissa mikroverkoissa. Mikroverkkokokonaisuuksista laadittiin kolme erikokoista esimerkkiä, joissa oli eri määrä esimerkin mukaisia omakotitaloja. Mikroverkot pyrittiin laatimaan mahdollisimman toteutuskelpoisiksi ja ylimitoituksia pyrittiin välttämään. Mikroverkoissa käytettiin erilaisia tapoja käyttää ylituotannosta johtuva ylimääräinen sähköteho.</p> <p>Lopuksi mikroverkoista tehtyjä malleja vertailtiin keskenään ja arvioitiin niiden kustannukset ja takaisinmaksuajat. Esimerkimalleja vertailtiin keskenään niiden investointikustannusten ja takaisinmaksu osalta ja perusteltiin havaintoja. Esimerkimalleja vertailtiin myös tavanomaisempiin malleihin, kuten normaaliin maalämmöllä toimivaan lämmitysjärjestelmään.</p> <p>Lopputuloksena syntyi arvio esimerkin tapaisten mikroverkkojen kannattavuudesta Suomessa. Päätelmänä voidaan todeta, että maalämpöjärjestelmän korkean hyötysuhteen ja puupellettien hinnan takia on mikroverkko luultavasti kannattavampi rakentaa siten, että CHP-laitteella toimivan lämmityksen sijaan käytetään maalämpöjärjestelmää.</p>	
Avainsanat	Mikroverkko, CHP, uusiutuvat energialähteet

Author Title	Erkka Lempiäinen Residential Microgrid Size Comparison
Number of Pages Date	33 pages 30 April 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Electrical Power Engineering
Instructors	Jukka Karppinen, Senior Lecturer
<p>The goal of this thesis work was to present the possibilities of using microgrids to lower the carbon footprint in Finland. Various features of microgrids were reviewed by going through the possible units and appliances that there could be in a microgrid. However, the main subject was to focus on the devices that would be used in the upcoming examples: for example, solar panels, wind farms and CHP units. Also, the permits required to build a microgrid were clarified. These permits are specifically for the wind farm and CHP unit, for those are the components in a microgrid that need special building permits.</p> <p>The example town house housing four people was introduced. This house was used as an example while planning the microgrids. Three different versions were planned of the microgrid, featuring different number of town houses, which was introduced earlier. The goal was to make the plan of the microgrids to be as realistic as possible and oversizing was sought to be avoided. Different techniques were used to compensate for the surplus electrical power caused by oversizing.</p> <p>At the end, the different examples of microgrids were compared with each other and their cost and repayment time was estimated. The examples of microgrids were also compared based on the investment cost. The examples of microgrids were also compared with more traditional methods of heating. In this case, they were compared to a heating system based on geothermal heat.</p> <p>As a conclusion, an estimate was formed based on the viability of a microgrid in Finland. It was found that because of the high efficiency of heating systems based on geothermal heat and the cost of wood pellets, it might be better to build a microgrid with a heating system based on geothermal heat, instead of one with a CHP unit.</p>	
Keywords	Microgrid, CHP, renewable energy sources

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Mikroverkot	3
2.1	Mikroverkkojen tarkoitus ja tavoite	3
2.2	Mikroverkon osat	4
2.3	Mikroverkkojen hyödyt ja haitat	6
2.4	Mikroverkkojen rakentamista koskevat lait	8
3	Mallina käytettävä esimerkkitalo	8
3.1	Esimerkkitalo	8
3.2	Sähkön tuotanto esimerkkien mikroverkoissa	9
4	Rakennusten lämmitys mikroverkossa	11
5	Mikroverkkojen kokoverailu	14
5.1	Mikroverkkojen suunnittelu	14
5.2	Kahden omakotitalon mikroverkko	14
5.3	Kymmenen omakotitalon mikroverkko	18
5.4	20 omakotitalon mikroverkko	23
6	Johtopäätökset	26
7	Päätelmä	32
	Lähteet	33

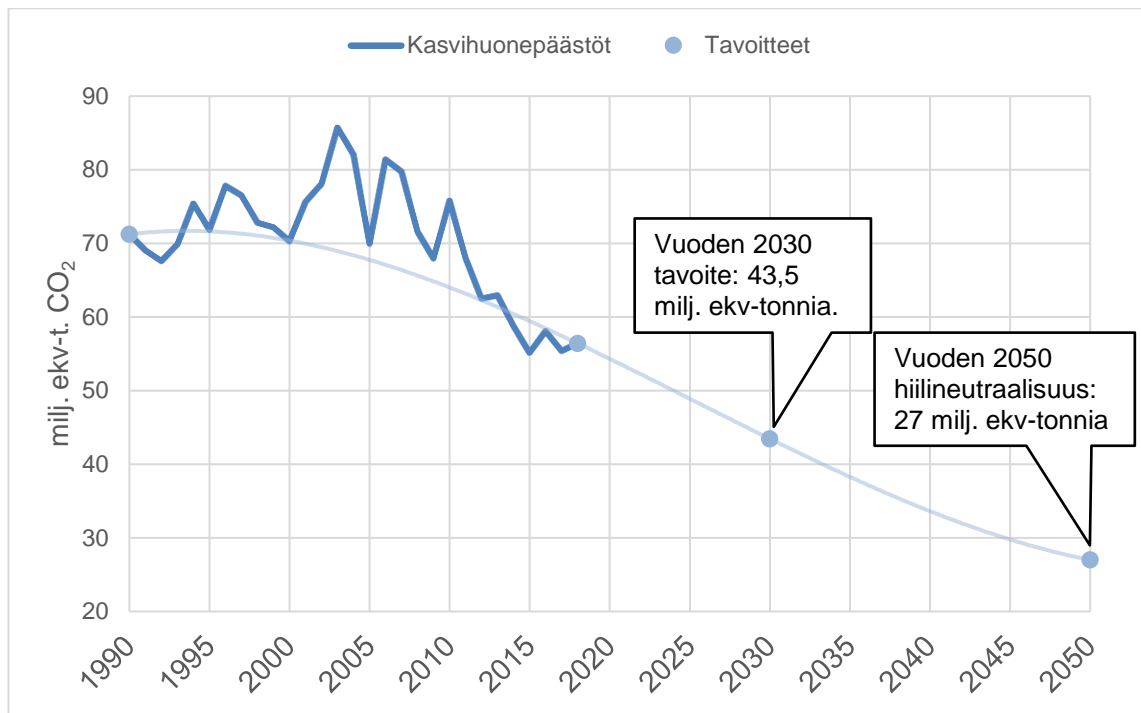
Lyhenteet

CHP	<i>Combined Heat and Power</i> . Sähkön ja lämmön yhteistuotanto, joka toteutetaan usein polttomoottorilla
CO ₂ -ekv	Hiilidioksidiekvivalentti. Ihmisten aiheuttamien kaikkien eri kasvihuonepäästöjen yhteenlaskettu arvo.
brm ²	Bruttoala. Asunnon kaikkien kerrostasojen kerrosalojen summa

1 Johdanto

Jatkuvasti kehittyvässä ja edistyvässä maailmassa, energiantarve kasvaa kovaa vauhtia. Sähkön ja yleisesti energian hinta nousee ja kiinnostus uusiutuvia energialähteitä kohtaan lisääntyy. Kansainvälisen energiajärjestön tekemän arvion mukaan vuonna 2030 tarvittu sähköenergian kapasiteetti on 40% suurempi kuin vuonna 2012 [1]. Kuluttaja on keskellä energiatuotannon käännekohtaa, jolloin saattaa olla kallista ostaa energiansa ja kannattaakin siirtyä tuottamaan sitä itse.

EU on asettanut tavoitteekseen leikata kasvihuonepäästöjä 40 prosentilla vuoden 1990 tasoista, vuoteen 2030 mennessä ja olla hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Tämä tarkoittaa siis sitä, että hiilidioksidipäästöjä tulee leikata niin paljon, että hiilinielut pystyvät sitomaan kaikki hiilidioksidipäästöt, jotka joutuvat ilmakehään. [2]. Suomen tavoitteena 2030 mennessä on saada pudotettua kasvihuonepäästöjä 39% [3]. Suomi on onnistunut pudottamaan kasvihuonepäästöjään vuodesta 1990 vuoteen 2018 mennessä noin 14,8 miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttitonnia, eli hieman yli 20%. Tosin vuodesta 2003, jolloin Suomessa oli kasvihuonepäästöjen huippu, Suomi on pystynyt pudottamaan päästöjään jopa 45%. [4]. Alapuolella esitetyssä kuvassa 1 on esitetty Suomen kasvihuonepäästöt ajalta 1990–2018, sekä vuosien 2030 ja 2050 kasvihuonepäästöjen määrälliset tavoitteet.



Kuva 1. Suomen kasvihuoneepäästöt ajalta 1990–2018, sekä vuosien 2030 ja 2050 tavoitteet. [4].

Vuonna 2018 Suomen hiilidioksidipäästöt olivat 56,4 miljoonaa ekvivalenttitonnia, josta energiasektorin aiheuttamaa oli 42,1 miljoonaa ekv-tonnia, eli noin 75% [5]. Alapuolella esitetyssä kuvassa 2 näkyy vuoden 2018 kasvihuoneepäästöt Suomessa toimialoittain.

	2018
	Päästö, tuhatta tonnia CO ₂ -ekv.
Kaasut yhteensä	
Päästöt yhteensä pl. LULUCF-sektori	56 411
1 Energiasektori	42 139
1A1 Energiateollisuus	18 679
1A3 Kotimaan liikenne	11 656
1A4b Kotitaloudet	1 348
2 Teollisuusprosessit ja tuotteiden käyttö	5 838
3 Maatalous	6 562
4 Maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous (LULUCF)	-10 268
5 Jätteiden käsittely	1 820

Kuva 2. Suomen kasvihuoneepäästöt vuonna 2018 toimialoittain [5].

Yhtenä tapana pienentää kasvihuonepäästöjä voidaankin pitää sähkön ja lämmön paikallistuotantoa mikroverkoissa, jolloin energiaa tuotetaan juuri sen verran mitä sitä kulu- tetaan ja energian kuljetusetäisyydet ovat todella lyhyet. Tämän toteutumiseksi mikroverkkojärjestelmä täytyykin suunnitella ja luoda tehokkaaksi ja taloudelliseksi, mutta pitää myös mielessä ekologisuus.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena onkin selventää ja esittää eräänlainen esimerkkirat- kaisu, kuinka uusiutuvia energialähteitä voitaisiin tehokkaasti käyttää paikallisessa ener- giantuotannossa, eli mikroverkossa. Työssä tullaan esittämään eri mittakaavassa olevia asuinalueita, jotka toimivat mikroverkkoina, vertailemaan niiden laitteistoa ja tehok- kuutta, sekä määrittelemään mahdollisimman tarkasti näiden järjestelmien takaisinmak- suaikaa sekä elinkaaren pituutta. Työn lopputuloksena on mahdollisimman toteutuskel- poinen suunnitelma asuinalueena toimivaa mikroverkon rakentamista varten. Työn tar- koituksena ei ole suunnitella mahdollisimman kilpailukykyistä tai halvinta ratkaisua, vaan tarkastella mikroverkon rakentamista ideana Suomessa.

2 Mikroverkot

2.1 Mikroverkkojen tarkoitus ja tavoite

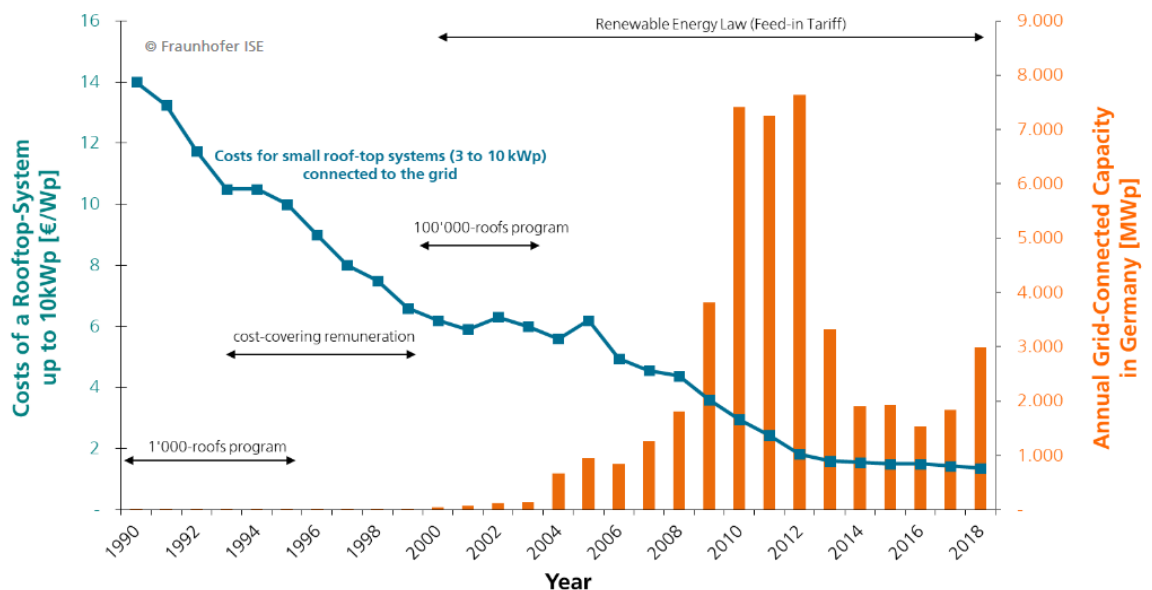
Mikroverkolla tarkoitetaan suljettua sähköverkkoa, jonka sisällä tuotetaan sekä kulute- taan sähkö. Mikroverkko voi myös olla kytkettynä yleiseen sähköjakeluverkkoon, mah- dollisen energiatarpeen kasvun, tai täydellisen tuotantokatkoksen takia. [6]. Mikrover- kossa sähkö tuotetaan usein uusiutuvia energialähteitä käyttämällä ja käytetään paikal- lisesti tai se voidaan ylituotannon sattuessa myydä sähköverkon haltijalle, mikäli mikro- verkko on kytkettynä jakeluverkkoon.

Mikroverkon suurimpia tavoitteita tavalliseen sähköverkkoon verrattuna on pienentää sähköntuotannon aiheuttamaa hiilijalanjälkeä sekä mikroverkon sisäisen sähkönkulutuk- sen kustannuksia. Lisäksi tavoitteena voidaan pitää omavaraisuutta energian tuotan- nossa.

2.2 Mikroverkon osat

Parhaiten tunnetut pientuotannossa käytetyt laitteet ovat luultavasti aurinkopaneelit sekä tuulivoimalat. Mikroverkossa voidaan tuottaa sähköä myös muilla tavoin, kuten vesivoimalla, pelletti- ja puuhakehöyrystimillä ja CHP-laitteilla. Mikroverkossa mahdollisten sähköntuotantotapojen käyttö riippuu tosin suuresti verkon sijainnista ja sääolosuhteista.

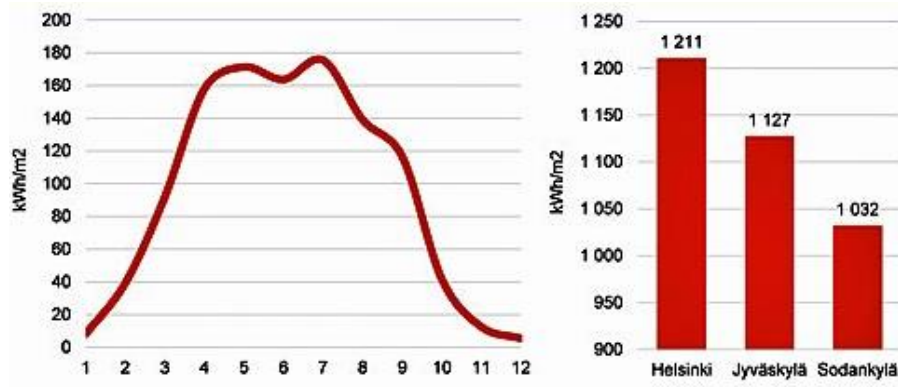
Aurinkopaneelit ovat keski- ja alivertokuluttajalle luultavasti helpoin tapa tuottaa uusiutuvaa energiaa kotona tai mökillä. Aurinkopaneelien hinta on laskenut viime vuosina kovasti samalla kun niiden tehokkuus on kasvanut. Alla olevassa kuvassa 3 on esitetty aurinkopaneelien hintakehitystä Saksassa. Hinnat perustuvat 3–10 kW:n järjestelmien asennushintoihin ja niihin ei ole lisätty arvonlisäveroa.



Kuva 3. 3–10 kW:n aurinkopaneelijärjestelmien asennushintojen kehitys Saksassa [7, s. 41].

Heikkoutena aurinkopaneeleille kokonaisuutena on niiden rajallisuus kehittyä, sillä nykyisillä p-n -tyyppisillä paneeleilla voidaan teoreettisesti saavuttaa vain noin 33 %:n hyötysuhde [8]. Uusia teknologioita tosin kehitetään, jotta tämä raja saataisiin ylitettyä.

Aurinkopaneelien kannattavuus on myös riippuvainen sääolosuhteista, vuodenaikasta sekä sijainnista. Ilmatieteenlaitos on laatinut auringon kokonaissäteilystä Suomessa testivuosia, joiden perusteella voidaan havaita, kuinka suuri ero aurinkosähkön tuottamassa energiassa on eri alueilla. Esimerkiksi Helsingissä mitattu säteily määrä on vuosittain 1 211 kWh/m², kun taas Sodankylässä luku on 1 032 kWh/m². [9.]



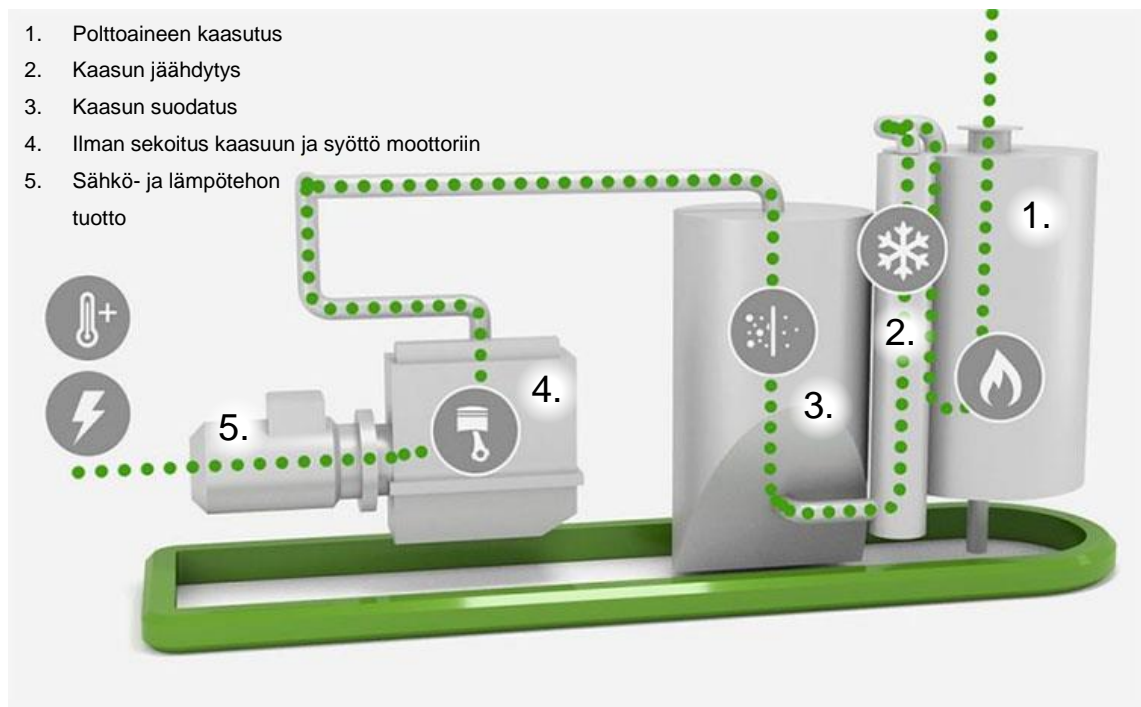
Kuva 4. Ilmatieteenlaitoksen laatima kuva auringon säteilyenergiasta Suomessa [9].

Edellä esitetystä kuvasta 4 pystyy myös toteamaan sen, että yli puolet Suomessa saatavasta säteilyenergiasta tulee touko- ja elokuun välisenä aikana, eli vain neljän kuukauden aikana.

Toinen hyvin tunnettu uusiutuvan energian lähde on tuulivoimalat. Kuluttajien omassa käytössä kyseessä on kuitenkin useimmiten pientuulivoimala. Tuulivoima on erinomainen tapa tasapainottaa mikroverkon uusiutuvan energian tuotantoa. Energia uutisten artikkelin mukaan, tuulivoimala voi tuottaa sähköenergiaa talvikuukausina jopa kolme kertaa enemmän kuin kesäkuukausina [10]. Tästä syystä tuulivoimala on hyvä lisä mikroverkkoon, jotta uusiutuvaa energiaa saadaan tuotettua myös talvella, jolloin aurinkopaneelien sähköntuotto putoaa lähelle nollaa. Tuulivoimalan valitsemisessa täytyy tosin pitää mielessä kohteen tuuliolosuhteet.

Mikäli mikroverkon rakennetaan saarekkeena, eli mikroverkolle ei tule omaa sähköliittymää ja aurinko- sekä tuulivoimalat halutaan pitää maltillisen kokoisina voi hyvänä lämmitysratkaisuna olla CHP-laite. CHP-laitteen toiminta perustuu joko nestemäisen tai kiinteän polttoaineen polttamiseen, josta saadaan lämpötehoa. Sähköntuotanto tapahtuu generaattorilla, jota pyöritetään usein polttomoottorilla tai höyryllä. [11.] Tämän työn

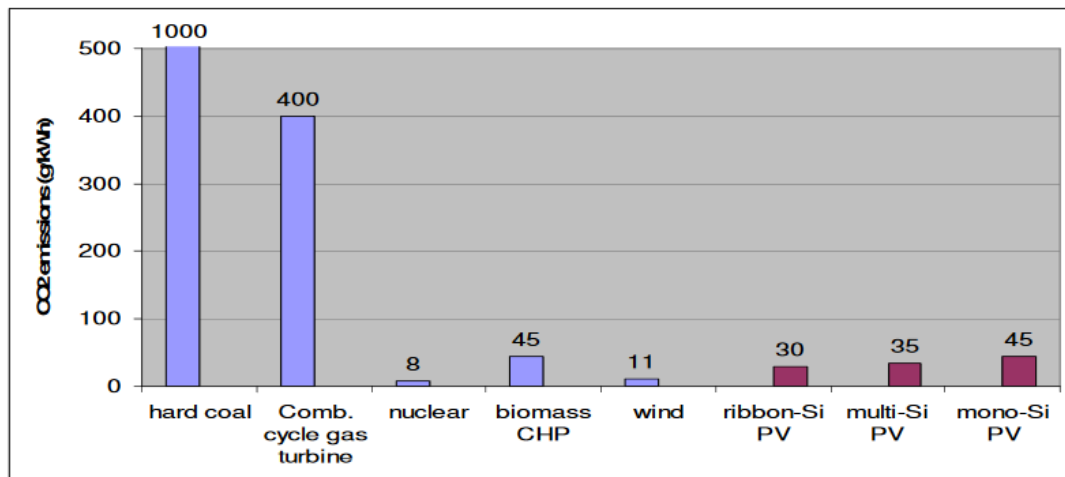
CHP-laitteet tulevat toimimaan höyrystämällä puupellettejä, jonka jälkeen jäähdytetty höyry syötetään polttomoottoriin tai polttokennoon. Muita mahdollisia polttoaineita, joita ei tässä työssä käsitellä voisi olla maa- tai biokaasu, puuhake tai nestemäiset polttoaineet. Alla olevassa kuvassa 5 on esitelty Volter 40 CHP-laitteen toiminta, jota tullaan myös käyttämään myöhemmin esitettävissä mikroverkkojen esimerkeissä.



Kuva 5. Volter 40 CHP-laitteen toiminta [12].

2.3 Mikroverkkojen hyödyt ja haitat

Sähkönjakeluverkosta irrallaan oleva mikroverkko pystyy tuottamaan itse sähkönsä uusiutuvista energianlähteistä. Tästä huolimatta aurinkopaneeleilla ja tuulivoimaloilla on hiilijalanjälki. Vuonna 2017 Suomen keskimääräinen sähköntuotannon CO₂-päästökerroin oli 158 kg CO₂/MWh, eli 158 g CO₂/kWh [13]. Tätä lukua voidaan verrata alla olevan kuvan 6 kanssa ja voidaan huomata, että hiilijalanjälkeä on silti järkevää pienentää tuottamalla energiaa paikallisesti tuuli- tai aurinkovoimalla tai sähkön ja lämmön yhteistuotannossa CHP-laitoksella.



Kuva 6. Eri energiantuotantotapojen hiilijalanjäljet niiden koko elinkaareltä. Tämä sisältää siis raaka-aineet, rakentamisen ja kuljetukset. Y-akselin suure on g/kWh. Luvut ovat Etelä-Euroopasta, jossa auringon säteily määrä on 1700 kWh/m² vuodessa. Aurinkopaneelien elinkaaren pituudeksi on annettu 30 vuotta. [14, s. 5.]

Mikroverkoissa energiaa paikallisesti tuottamalla saadaan myös kasvatettua energiaomavaraisuutta. Vaikka Suomessa sähkökatkot ovatkin harvinaisia, silti varsinkin taajaman ulkopuolella, jossa on vielä ilmakaapeleita, sähkökatkoja tapahtuu. Verrattuna tavanomaiseen verkkoon, mikroverkko parantaa sähkön ja energian saatavuuden varmuutta tuottamalla energiansa usealla eri lähteellä, taltioimalla ylimääräistä sähköä akkuihin ja pahimmassa tapauksessa tuottamalla energian varavoimalla. Tästä voisi olla apua myös sähköyhtiöille, jotka joutuvat tekemään suuria investointeja verkkojen säävarmuuden parantamiseksi. EL-Tran onkin tutkimuksessaan ehdottanut ja arvioinut verkkoyhtiön osallisuutta mikroverkkojen investoijana ja osaomistajana. Tutkimuksessa on todettu, että verkkoyhtiön ja sähkönkäyttäjän välinen mikroverkon yhteisomistus voisi olla kannattava molemmille osapuolille. [15, s. 4.] Verkkoyhtiöiden voisi olla siis tietyissä tilanteissa viisaampaa rakentaa mikroverkkoja ja tuottaa energiaa paikallisemmin, kuin korvata aiemmat ilmajohtot maakaapeleilla.

Yksi suuri haitta ja ongelma mikroverkkoa suunniteltaessa on sen investointikustannukset. Verrattuna perinteisiin tavoin rakennettavaan asuinalueeseen, mikroverkon rakentamiseen voi kuluu moninkertaisesti enemmän rahaa. Tämä johtuu siitä, että mikroverkko vaatii normaalisti tarvittavien kiinteistöjen sähkön- ja lämmönjakelu, sekä kulutuskojeiden lisäksi sähkön- ja lämmöntuotantoon tarvittavat laitteet. Tämä sisältää siis aurinkopaneelit, tuulivoimalat, varavoimakoneet, akkujärjestelmät sekä ohjauslaitteet. Jos tosin mikroverkko suunnitellaan ja mitoitetaan hyvin, saadaan se maksamaan itsensä takaisin.

Tämä tarkoittaa sitä, että mikroverkko pystyy tuottamaan energiaa halvemmalla, kuin jos energia ostettaisiin sähköyhtiöltä. Mikroverkkojen kustannuksia esitellään tarkemmin myöhemmin.

2.4 Mikroverkkojen rakentamista koskevat lait

Tuulivoimalaa rakennettaessa tulee maanomistajalla aina olla joko MRL 125 §:n mukainen rakennuslupa tai MRL 126 §:n mukainen toimenpidelupa, jolla pystytään toteuttamaan yksityistä käyttöä varten tarkoitettuja tuulivoimaloita [16]. Mikroverkon sijainnista riippuen voidaan lisäksi tarvita muitakin lupia, kuten maisematyölupa, jos puita joudutaan kaatamaan.

Rakennettaessa tuulivoimalaa on noudatettava Suomen maankäyttö- ja rakennuslakia ja tuulivoimarakentamista koskevia erityissäännöksiä. Tuulivoimalaa rakennettaessa on huolehdittava siitä, että kunnan tai kaupungin yleiskaava ohjaa riittävästi rakentamista ja siitä, että suunniteltu tuulivoimarakentaminen ja muu maankäyttö sopeutuu maisemaan ja ympäristöön. Lisäksi täytyy varmistua siitä, että tuulivoimalan vaatimat huollot pystytään suorittamaan ja sähkönsiirto järjestämään. Kunta voi myös periä yleiskaavan laatisesta aiheutuvia kustannuksia. [17.]

CHP-laitosta rakennettaessa tarvittavia lupia ovat rakennuslupa, toimenpidelupa ja vesilupa, kun laitos on sähköteholtaan enintään 2 MVA:n kokoinen. Ympäristölupa tarvitaan, kun lämpötehon on yli 5 MW. [11, s. 20.] Tässä työssä CHP-laitteiden koko tosin ei ylitä näitä arvoja.

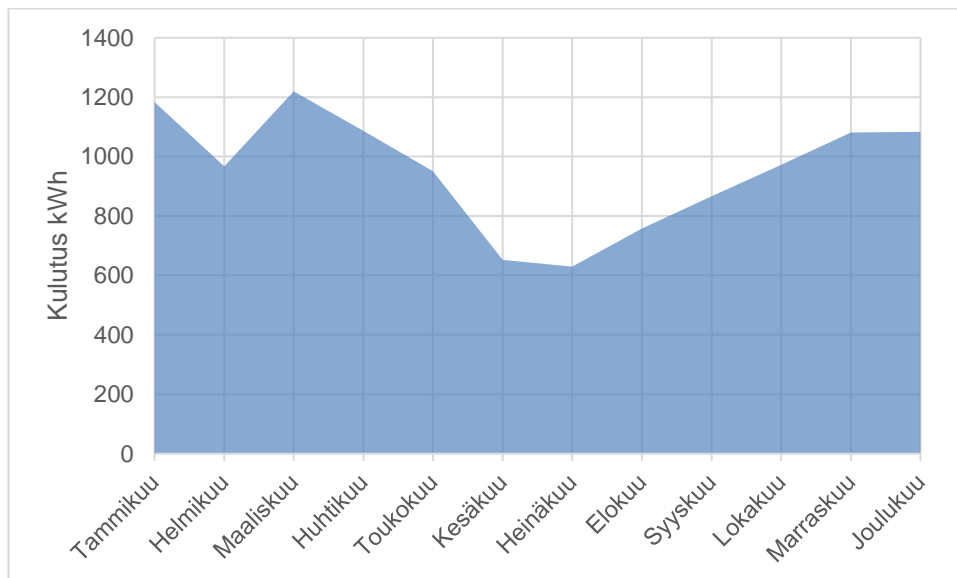
3 Mallina käytettävä esimerkkitalo

3.1 Esimerkkitalo

Työn tarkoituksena on suunnitella mahdollisimman toteutuskelpoinen malli erilaisista mikroverkoista, jotka toimivat asuinalueina. Mikroverkkoja laaditaan kolme kappaletta ja ne ovat eri kokoisia ja eri laitekoonpanolla. Mikroverkkojen asuinrakennusten määrät ovat 2, 10 ja 20. Jokainen talo on identtinen toistensa kanssa. Tätä suunnitelmaa varten

tarvitaan jonkinlainen mallikohde, jotta suunnitelmasta saataisiin mahdollisimman realistinen. Mallikohteena toimiva omakotitalo on koottu pitkälti verkkomateriaaleista, eikä kuvasta mitään aitoa kohdetta. Mallikohde on kaksikerroksinen, 180 m²:n kokoinen omakotitalo, joka sijaitsee Turussa. Sijainnilla ei käytännössä ole merkitystä suunnitelman toimivuuden kannalta, mutta tällä tavoin tuuli- ja aurinkotiedot, sekä lakiasiat ovat samasta kohteesta. Asunnon sähkön- ja lämmityksen tarve mitoitetaan neljälle asukkaalle. Asunto on matalaenergiatalo, joten tarvittava lämmitysteho on huomattavasti normaali omakotitaloa pienempi.

Mallikohteen sähkönkulutus on koottu perustuen Turussa sijaitsevan omakotitalon sähkönkulutukseen. Mallikohteen vuosittainen sähkönkulutus on 11 450 kWh. Alla olevassa kuvassa 7 näkyy mallitalon sähkönkulutus yhdeltä vuodelta.



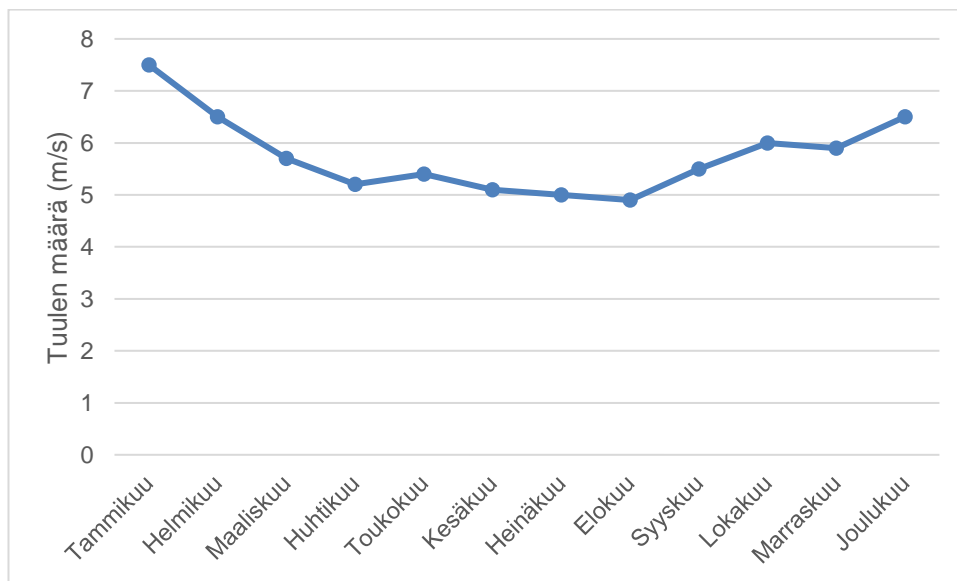
Kuva 7. Mallitalon sähkönkulutus vuodessa.

3.2 Sähkön tuotanto esimerkkien mikroverkoissa

Aurinkopaneelien määrän mitoitus tehdään Fortumin aurinkolaskurilla. Aurinkolaskurilla saa arvioitua aurinkopaneelien vuosittaisen tuoton katon pinta-alan ja suunnan avulla. Aurinkolaskurin avulla voidaan arvioida, että mallitalon aurinkopaneeleille käyttökel-poista pinta-alaa on 60 m². Aurinkolaskuri myös ehdottaa aurinkopaneelin mallin ja määrän. Tässä tapauksessa se ehdottaa 18 kappaletta Hanwha Q CELL -paneeleita, joiden

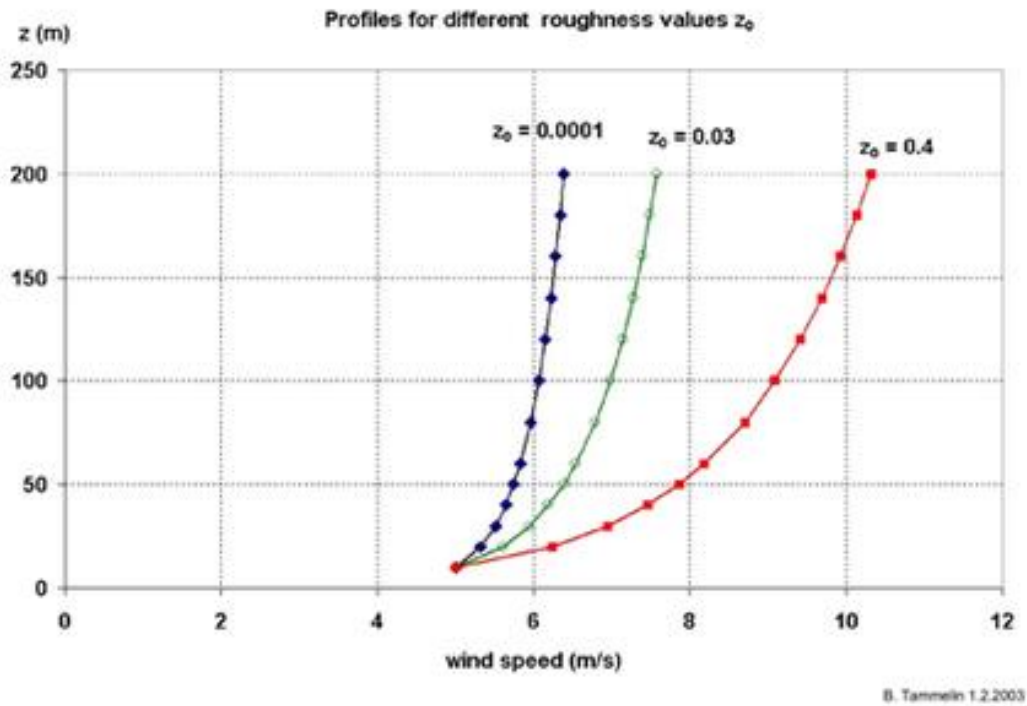
nimellisteho on 305 W. [18.] Aurinkopaneelien määrä täytyy mitoittaa siten, ettei ylituotantoa tulisi paljoa. Ylituotanto voidaan tosin varastoida akkujärjestelmään ja näin voidaan tasoittaa kulutuspiikkejä.

Mikroverkkojen tuuliturbiinien tuottojen arviointia varten käytetään Ilmatieteen laitoksen Tuuliatlasta. Tuuliatlas antaa käyttäjälle 2008 vuoden jälkeen tehtyjä ennusteita tuulennopeudesta noin kuuden neliökilometrin tarkkuudella. Tuulitiedot ovat siis pelkästään arvioita ja ennusteita. [19.] Alla olevassa kuvassa 8 on esitetty esimerkkimikroverkkojen tuulitilastot 50 metrin korkeudessa.



Kuva 8. Tuuliatlaksen arvio tuulen määrästä esimerkkimikroverkon alueella, 50 metrin korkeudessa [20].

Tuulennopeuteen vaikuttaa myös maaston muoto. Tätä kuvaa vertikaalinen tuuliprofiili. Tässä työssä käytetään tuuliprofiilin z_0 arvona 0,4. Alla olevassa kuvassa 9 on esitetty, kuinka tämä vaikuttaa tuulennopeuteen eri korkeuksissa.



Kuva 9. Tuulennopeus eri korkeuksissa, eri z_0 :n arvoilla, kun tunnetaan tuulennopeus kymmenessä metrissä. [21.]

Koska Tuuliatlaksen tuulitiedot ovat 50 metrin korkeudesta, täytyy tuulitiedot muuttaa sopivaksi esimerkkikohteiden tuulivoimaloita varten. Muunnos joudutaan tekemään, sillä pienen nimellistehon omaavat tuulivoimalat ovat usein matalampia kuin 50 metriä. Aiemmin esitetyn kuvan 9 perusteella voidaan arvioida esimerkeissä käytettävien tuulivoimaloiden sähköntuottoa, kun tunnetaan tuulivoimalan korkeus.

4 Rakennusten lämmitys mikroverkossa

Mallitalon lämmitys tullaan suorittamaan CHP-laitteilla. CHP-laitteissa pystytään lämmön lisäksi tuottamaan myös sähköä, jota voidaan hyödyntää esimerkkien mikroverkoissa. Kausittaisen lämmöntarpeen vuoksi CHP-laitteesta saatava sähköteho ajoittuu pääosin talvikuukausille, kun lämmöntarve on suurimmillaan. Kesäkuukausina saatava sähköteho CHP-laitteesta johtuu käyttöveden lämmittämisestä. Rakennusten lämmitys toteutetaan vesikiertoisena lattialämmityksenä ja lattialämmityksen vesi sekä käyttövesi lämmitetään CHP-laitteilla.

CHP-laitetta mitoitettaessa täytyy ensin tietää lämpimän veden tarve. Tähän vaikuttaa lämmitettävän tilan koko sekä asukkaiden lukumäärä. Koska rakennus on matalaenergiatalo, asunnon lämmittämiseen täytyy varata 40 W lämmitysenergiaa neliometriä kohden [22]. Näin ollen 180 m²:n kokoisessa asuintalossa lämmitystehon huipputarve on lämmityksen osalta 7,2 kW. Tämän lisäksi lämpimän käyttöveden lämmitystä varten tarvittava lämmitysteho nelihenkiselle perheelle on 3500 kW vuodessa, eli noin 0,4 kW tunnissa [23, s.4]. Yhteensä yhtä asuntoa kohden tarvitaan siis huippuhetkiä varten 7,6 kW lämmitystehoa. Asunto ei kuitenkaan kuluta koko ajan maksimimäärän verran lämmitystehoa, vaan vain kylmimpinä päivinä. Kaiken kaikkiaan matalaenergiatalo saa kuluttaa vuodessa lämmitysenergiaa maksimissaan 60 kWh/brm² [24]. Esimerkkitalossa maksimilämmitystehon tarve vuodessa on siis 10 800 kW.

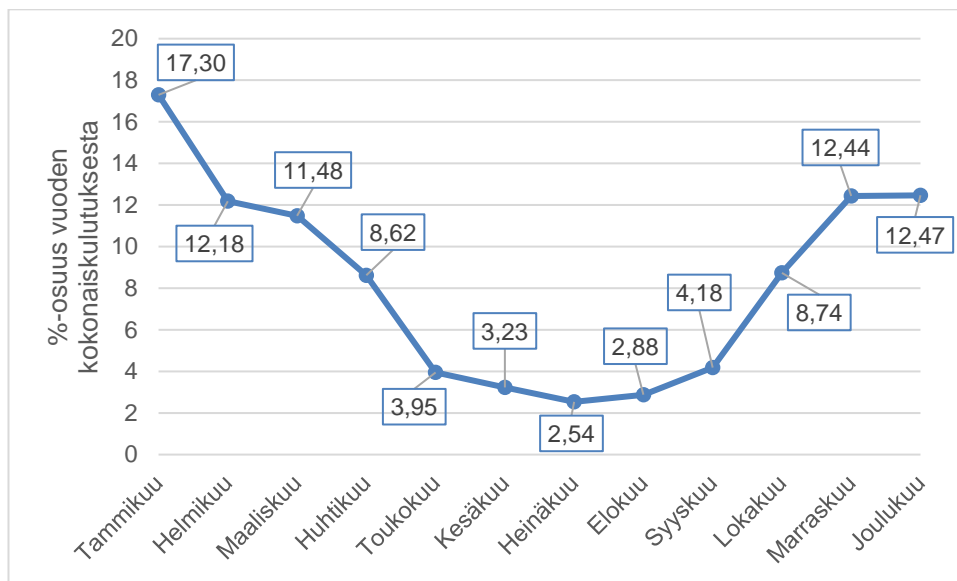
Jotta hintojen vertailuista ja takaisinmaksun määritelmästä tulisi mahdollisimman tarkka, täytyy kaikki kustannukset ottaa huomioon. Koska lämmitys tapahtuu CHP-laitteilla, suurin jatkuva kustannus lämmityksen osalta on polttoaine. Mallikohteiden CHP-laitteet tulevat toimimaan puupelleteillä. Puupelleteille käytetään hintana Tilastokeskuksen antamaa tietoa. Vuonna 2019 puupellettien kuluttajahinta oli 276,9 €/t [25]. Puupelletit ovat hyvä ratkaisu lämmitykseen niiden korkean lämpöarvon vuoksi. Esimerkeissä puupelleteille käytetään lämpöarvona 4,8 kW/kg [26].

CHP:llä tuotettua lämmitystä verrataan perinteiseen maalämmöllä tuotettuun lämmitykseen. Maalämmöllä tuotetun lämmityksen hinta koostuu asennuskuluista ja tämän jälkeen maalämpöpumpun kompressorin kuluttamasta sähköstä. Hinnan muodostamiseen käytetään Tomallen verkkosivulta saatua tietoa. Uuteen 180 m²:n omakotitaloon rakennettava maalämpöjärjestelmä maksaa noin 17 500 € ja maalämpöpumpun teho on noin 8 kW. Maalämpöpumpulle käytetään hyötysuhdetta 4:1, eli jokaista maalämpöpumpun kuluttamaa kilowattia kohden, asunto lämpenee 4 kW:n verran. [27.]

Kuten aikaisemmin mainittu, yhden esimerkkitalon vuosittainen lämmitystehon tarve maksimissaan on 10 800 kWh. Esimerkkiasunnossa on 8 kW:n maalämpöpumppu, jonka hyötysuhde on 4:1, joten jotta maalämpöjärjestelmä tuottaisi 10 800 kWh vuodessa, täytyy maalämpöpumpun pyöriä 337,5 tuntia vuodessa. Näin ollen maalämpöpumpun sähkön vuosikulutus olisi 2 700 kWh. Mikäli asuntojen lämmitys suoritettaisiin maalämpöä käyttäen, tulisi mikroverkon sähköntuotanto olla suurempi, jotta se voisi kattaa lämmön vaatiman sähkötehon. Maalämpöpumpun vuosittain vaatima sähköteho voidaan

lisätä mallitalon vuosittaiseen sähkönkulutukseen, jolloin uudeksi kokonaiskulutukseksi tulisi 14 150 kW. Koska lämmityksen tarve ei ole tasainen ympäri vuoden, lukuun täytyy vielä lisätä lämmityksen huipputehon tarve talvikuukausilta.

Koska tarkkaa tietoa eri kuukausien lämmitystehon tarpeesta ei ole, käytetään vertailukohteena Helenin kaukolämmön tehon jakautumista eri kuukausina. Alla olevassa kuvassa 10 on Helenin kaukolämmön tehon jakautuminen eri kuukausille vuodelta 2016.



Kuva 10. Vuoden 2016 kaukolämmön tehon prosentuaalinen jakautuminen kuukausittain [28].

Tätä dataa voidaan käyttää antamaan suuntaa omakotitalon lämmityksen tarpeen jakautumisesta vuodelle. Kuten aiemmin esitetystä kuvasta voidaan todeta, kylminä kuukausina yhden kuukauden lämmityksen tarve saattaa olla jopa 17% koko vuoden lämmitystarpeesta.

5 Mikroverkkojen kokoverailu

5.1 Mikroverkkojen suunnittelu

Mikroverkkojen suunnittelu aloitetaan tarkastelemalla jokaisen mikroverkon sähkön- ja lämmityksen tarvetta. Asuntojen kulutuksen perusteella voidaan suunnitella, kuinka paljon ja millaisia laitteita tarvitaan, jotta sähkön- ja lämmöntuotanto on riittävää. Laitteiden määrä täytyy suunnitella siten, että sähköä ja lämpöä riittää vuorokauden ajasta riippumatta. Esimerkiksi aurinkopaneeli ei tuota lainkaan sähköä öisin, joten aurinkopaneelien täytyy päivän aikana tuottaa akkujärjestelmään niin paljon sähkölatausta, että se riittää vähintään seuraavaan päivään asti. Asiaa monimutkaistaa tosin entisestään säätilanteet ja vuodenajat. Todella pilvisinä päivinä aurinkopaneeleista saatava teho voi jäädä hyvin matalaksi, joten tuulivoimalan täytyy tuottaa tarpeeksi tehoa tällaisessa tilanteessa ja akkukapasiteetin täytyy olla tarpeeksi suuri tasaamaan tilannetta. Akkukapasiteetin ja varavirran tarve tosin riippuu suuresti mikroverkon sijainnista ja tarpeista. Seuraavana esitettävissä esimerkkikohteissa akkujärjestelmä tullaan mitoittamaan siten, että sillä tasataan sähköenergian kulutuspiikkejä. Varavoimanlähde ei hankita, eikä akkujärjestelmää mitoiteta kestävämpään useampaa päivää, sillä CHP-laitetta voidaan käyttää myös varavoiman tuottamiseen.

5.2 Kahden omakotitalon mikroverkko

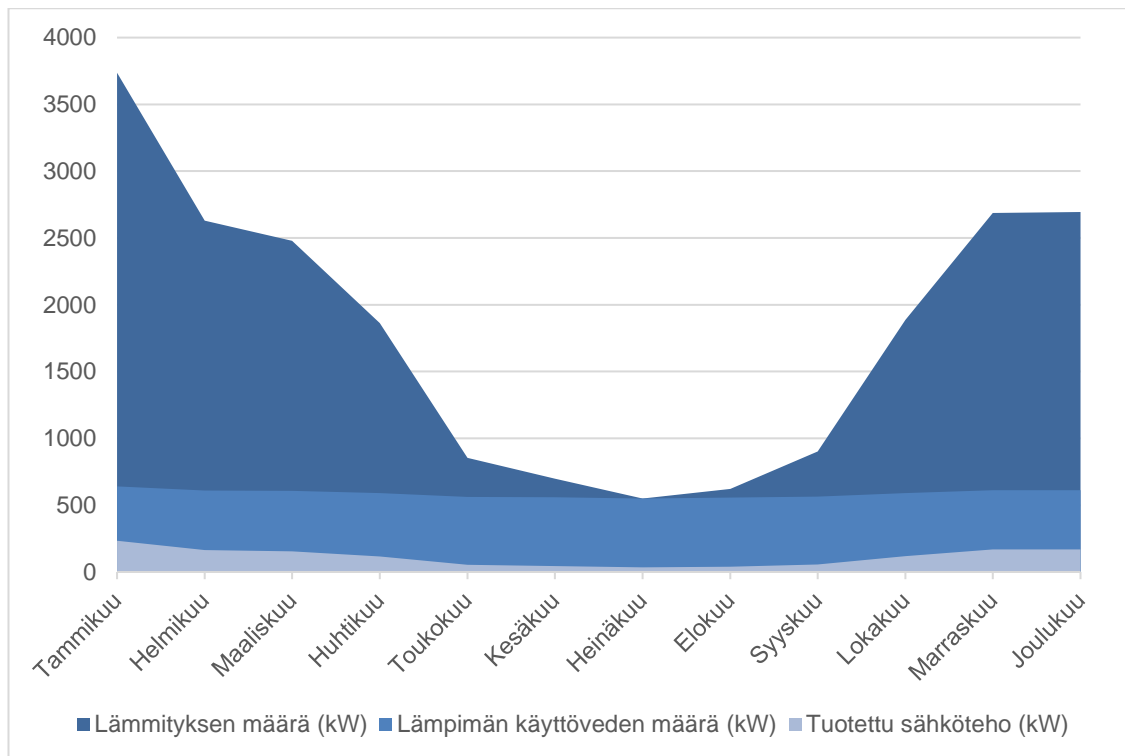
Ensimmäisenä vertailukohteena on kahden omakotitalon muodostama mikroverkko. Tämän mikroverkon sähkön kokonaiskulutus vuodessa on 22 900 kW ja lämmityksen kokonaistehon tarve vuodessa on 21 600 kW, josta 7 000 kW on lämpimän käyttöveden lämmittämistä varten, jota tarvitaan tasaisesti ympäri vuoden. Laitteiden mitoitus aloitetaan valitsemalla oikean kokoinen CHP-laite. Tämä järjestys on perusteltua, sillä CHP-laite tuottaa kaiken tarvittavan lämmitystehon, mutta myös sähkötehoa, joten tämän ympärille on hyvä mitoittaa muut uusiutuvaa energiaa tuottavat laitteet. CHP-laitteen tehoa ja kustannuksia verrataan perinteiseen maalämmöllä lämmitettävään vesikiertoiseen lattialämmitykseen. CHP-laitteeksi valitaan ÖkoFenin Pellematic Condens_e. Alla olevassa taulukossa 1 on esitelty laitteen tärkeimpiä ominaisuuksia.

Taulukko 1. Pellematic Condens_e tekniset tiedot [29].

Nimellislämmitysteho [kW]	16
Nimellislämmitysteho osateholla [kW]	5
Tilan lämmityksen kausiluonteinen energiatehokkuus [ηs]	>90
Sähkötehon tuotto [Wh]	600–1000
Polttoaine	Puupelletti
Polttoaineen lämpöarvo [kWh/kg]	≥4,6
Sähkötehon tarve [W]	827

Laite voidaan liittää mihin tahansa vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään, eikä tämän takia tarvitse lämminvesivaraajaa [29]. Laitteen hinnaksi tulee 25 000 € [30].

Käyttämällä aikaisemmin kuvassa 10 esitettyä mallia lämmityksen tarpeen jakautumisesta eri vuodenaajoille, voidaan CHP-laitteen lämmön- ja tehontuotosta tehdä arvio, joka on esitetty kuvassa 11. Koska lämpimän käyttöveden kulutus ei merkittävästi ole riippuvainen vuodenaajasta, pidetään lämpimän käyttöveden lämmitykseen tarvittavaa tehoa vakiona. Tämän esimerkin mikroverkossa lämpimän käyttöveden lämmitystehon tarve on 7 000 kW vuodessa ja 583,33 kW kuukaudessa. Koska CHP-laite tuottaa myös sähköä, voidaan sähkön tuotannosta tehdä arvio perustuen siihen, kuinka paljon CHP-laite on päällä veden lämmittämistä varten. Laite tarvitsee tosin sähkötehoa toimintaansa, kuten sytytykseen ja polttoaineen syöttöön. Tämän takia sähkötehoa ei jää niin paljon yli, että sitä kannattaisi lopullisissa laskuissa huomioida.

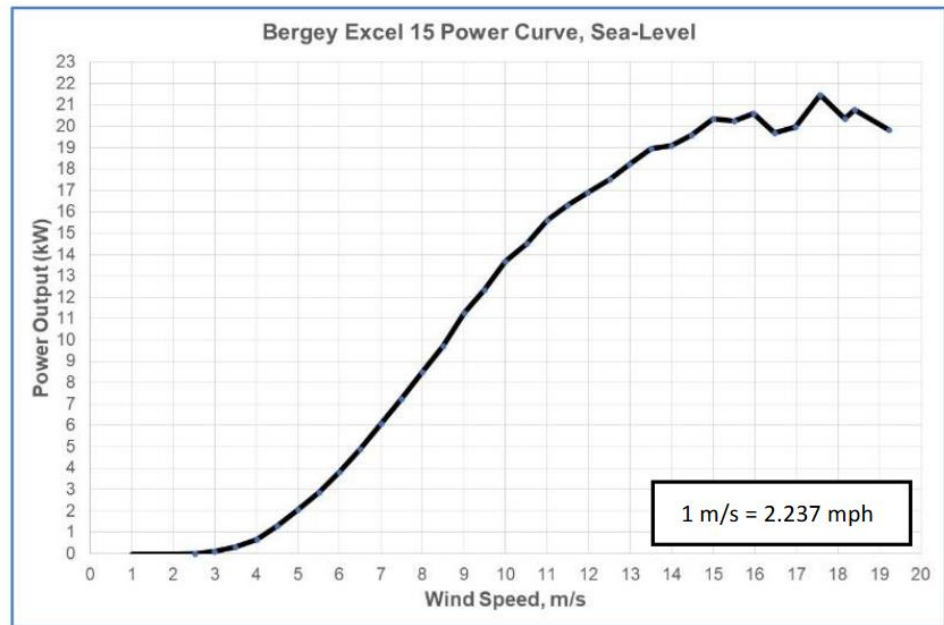


Kuva 11. CHP-laitteen tuottaman lämmön käytön jakautuminen, sekä tuotetun sähkötehon määrä.

Kuten aiemmin mainittu, aurinkopaneelien määrän valinnassa käytetään pohjana Fortumin aurinkolaskurista saatuja tietoja. Aurinkolaskuri arvioi, että yhden esimerkkiasunnon katolle saisi asennettua 18 aurinkopaneelia, joten kokonaismääräksi tulee 26 paneelia. Aurinkopaneelit ovat Hanwha Q CELL Q.PEAK BLK G5.1 -paneeleita, joiden nimellisteho on 305 W. Yhteensä paneelit tuottavat arviolta 10 826 kW vuodessa, joka on hienan alle puolet vuotuisesta kokonaistarpeesta. Paketissa tulee mukana myös kaksi SMA STP 3.0-3AV-40 -kolmivaihe vaihtosuuntaaja. Yhteishinta koko aurinkopaneelijärjestelmälle on 17 800 €. [18.]

Tuulivoimalaksi valitaan Yhdysvaltalainen Bergey Excel 15 -tuuliturbiini. Tuuliturbiinin valintaan vaikuttaa sen sopivuus Suomen oloihin ja hyvä tuottavuus matalillakin tuulennopeuksilla. Excel 15:n nimellisteho on 15 kW, joka saavutetaan tuulennopeuden ollessa 11 m/s. Tuuliturbiinin toimintaväli on 2,5–60 m/s ja sen lapojen halkaisija on 9,2 m. [31, s. 5.] Tuuliturbiinin hinnaksi tulee arviolta 67 000 € [32]. Alapuolella olevassa kuvassa 12 on esitelty tuuliturbiinin tehokäyrä.

**Power
Output
(AC kW)**

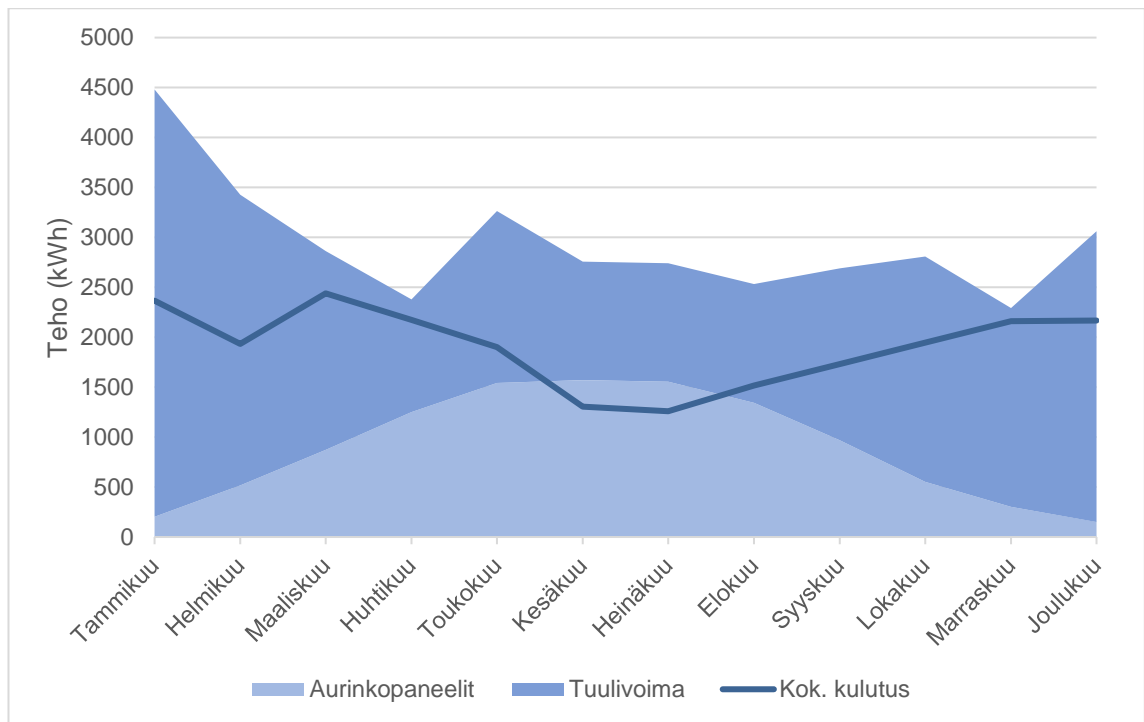


Wind Speed (m/s) at Hub Height

Kuva 12. Bergey Excel 15:n tehokäyrä. [31, s. 5]

Jokaisen omakotitalon yhteyteen lisätään myös kaksi Teslan Powerwall 2 -akkujärjestelmää, tasaamaan sähkön kulutusta, sekä toimimaan sähkövarastona. Akkujärjestelmän käyttökelpoiseksi kokonaiskapasiteetiksi tulee näin 27 kWh, eli yhteensä 54 kWh [33].

Kun laitteet ovat valittu, voidaan alkaa arvioida, ovatko valinnat hyviä ja millainen kokonaisuus niistä tulee. Tämä tapahtuu parhaiten arvioimalla energialähteiden tehontuotto vuoden aikana. Alla olevassa kuvassa 13 on esitetty sekä vuoden kulutus että energialähteistä saatava tehon tuotto. Koko järjestelmän hinnaksi tulee noin 146 840 €.



Kuva 13. Kahden asunnon vuosittainen sähkön kokonaiskulutus, sekä tuotettu sähköteho aurinkopaneeleista ja tuuliturbiinista.

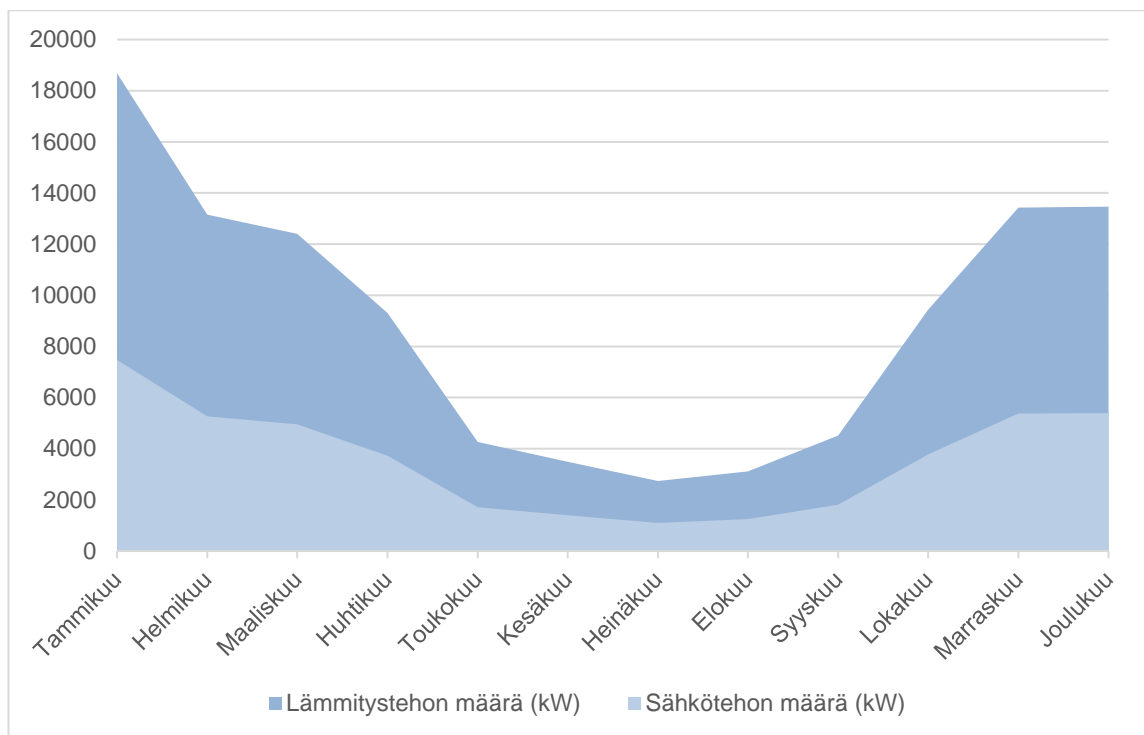
5.3 Kymmenen omakotitalon mikroverkko

Toisena vertailukohteena on isompi, kymmenen omakotitalon mikroverkko. Järjestelmä on jo huomattavasti suurempi. Tämäkin esimerkkikohteeseen aloitetaan samalla tapaa kuin edellinenkin, eli mitoittamalla sopivan kokoinen CHP-laite. Kohteen lämmitystehon tarve on 108 000 kW koko vuodelta ja 76 kW tunnissa huippuhetkinä. Tämän lisäksi sähkötehon tarve on 114 500 kWh. CHP-laitteeksi valitaan tässä esimerkkikohteessa suomalainen Volter 40. CHP-laitteen hinnaksi tulee 200 000 € [34, s. 43]. Alapuolella olevassa taulukossa 2 on esitelty laitteen tärkeimmät tekniset ominaisuudet.

Taulukko 2. Volter 40:n tekniset tiedot.

Nimellislämmitysteho [kW]	100 + 20
Sähkötuoton nimellisteho [kW]	40
Yhteenlaskettu hyötysuhde (Lämpimän veden- ja sähköntuotto) [ηs]	80,1
Polttoaineen kulutus [kg/h]	38
Polttoaine	Puupelletti tai puuhake
Polttoaineen lämpöarvo [kWh/kg]	≥4,6
Sähkötehon tarve [kW]	1,7

Kuten aiemmassakin esimerkissä, lämmöntuotantoon kuluva energia pystytään tekemään arvio. Tämä esimerkkikohde eroaa aiemmasta siten, että ylijäävää sähköenergiaa käytetään hyväksi lämmittämään vettä. Tällä tavoin ylijäävää energiaa syntyy vähemmän ja CHP-laitteen polttoaineeseen ei kulu niin paljoa rahaa. Jotta vettä saadaan lämmitettyä myös sähköllä, täytyy tähän esimerkkikohteeseen lisätä myös lämminvesivaraaja. CHP-laitteen yhteyteen tulee 5 000 litran AKVA Solar -lämminvesivaraaja, jonka avulla CHP-laitteella tuotettua lämmintä vettä pystytään säilömään ja lämmittämään sähköllä [35]. Lisäksi jokaiseen asuntoon tulee 150 litran Hajdu-lämminvesivaraaja. Tällä tavoin saadaan luotua puskuria lämpimän veden varastoinnille ja CHP-laitetta pystytään käyttämään energiatehokkaasti [36]. Lämminvesivaraajien yhteishinnaksi tulee 12 019 €. Alla olevassa kuvassa 14 on arvio 10 omakotitalon esimerkkikohteen CHP-laitteen tuottamasta lämpö- sekä sähkötehosta.



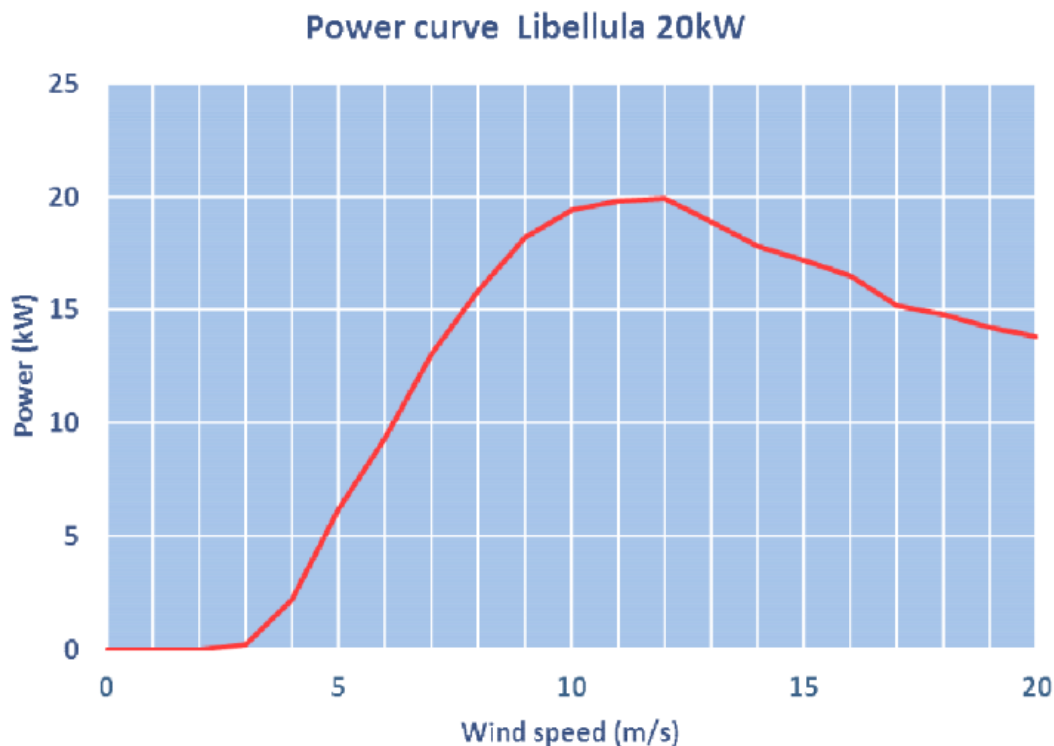
Kuva 14. CHP-laitteen lämpimän veden tuotto sekä tuotettu sähköteho.

Aurinkopaneelien valitsemista varten käytetään jälleen Fortumin aurinkolaskuria. Aurinkopaneelien määrä yhdessä omakotitalossa ei muutu, joten aurinkopaneelien tuotto ja hinta skaalataan suoraan kymmenelle asunnolle. Näin ollen aurinkopaneeleja tulee olemaan 180 kappaletta ja niiden kokonaishinnaksi tulee 89 000 €.

Tuuliturbiinin valintaan vaikuttaa jälleen kohteen tuuliolosuhteet. Suurimpana ongelmana tosin on, että tämän esimerkkikohteen sähkötehon tarve kasvaa huomattavasti verrattuna edelliseen. Tästä aiheutuu suurempi sähkötehon tarve talvikuukausina, jolloin aurinkopaneelit eivät tuota käytännössä lainkaan sähköä. Tämän takia sähköntuotannon vastuu siirtyy lähes kokonaan tuuliturbiinin vastuulle. Koska esimerkkikohteen tuulen vuotuinen keskinopeus on noin 5,8 m/s, ei esimerkkikohteeseen voida hankkia korkealla nimellisteholla olevaa tuuliturbiinia. Ongelma tulisi vastaan siinä, kun matalilla tuulennopeuksilla tuuliturbiini ei välttämättä tuottaisi lainkaan sähköä, mutta korkeammilla nopeuksilla tulisi ylituotantoa. Tämän takia esimerkkikohteeseen suunnitellaan kaksi keskikokoista tuuliturbiinia, joilla on hyvä tehontuotto matalissa tuulennopeuksissa.

Tuulivoimala koostuu kahdesta italialaisesta 20 kW:n Aria Libellula -tuuliturbiinista. Tuuliturbiinit pystyvät tuottamaan hyvin sähköä matalissakin tuulennopeuksissa. Turbiinille

ei suoraan löytynyt hintaa internetistä, joten hinnan muodostamiseksi käytetään keskiarvoja. Windustryn mukaan yksityiseen käyttöön rakennettujen tuulivoimaloiden hinnaksi tulee noin 5000–8000€ jokaista asennettua nimellistä kilowattia kohden [37]. Hinta asetetaan hieman yläkanttiin, sillä kyseistä tuuliturbiinia ei ilmeisesti ole myynnissä Suomessa ja rakennuskustannuksiin täytyy lisätä varaa. Turbiinien yhteishinnaksi oletetaan siis 320 000 €. Alla olevassa kuvassa 15 on yhden 20 kW:n Aria Libellulan tehokäyrä.



Kuva 15. 20 kW:n Aria Libellula -tuuliturbiinin tehokäyrä [38].

Kuten aiemmassakin esimerkissä, jokaisen asunnon yhteyteen tulee Teslan Powerwall-akkujärjestelmä antamaan sähköverkolle säätötehoa ja tasoittamaan eri vuorokaudenajoista johtuvia tehopiikkejä. Kymmeneen omakotitaloon asennettuna akkujärjestelmä maksaa yhteensä 87 500 € [33].

Kun kaikki laitteet on valittu, voidaan tutkia mikroverkon toimintaa. Esimerkkikohteen sähkötehon tarve on 114 500 kW vuodessa. Aurinkopaneelit tuottavat vuodessa yhteensä 54 130 kW, tuuliturbiinit noin 140 733 kW ja CHP-laite 43 204 kW. Lämmitystehoa tuotetaan 108 010 kW:n verran. Alla olevassa taulukossa 3 on esitelty tämän esimerkin

tehon tuotto ja tehon kulutus sekä sähkön että lämmityksen osalta tilanteessa, kun ylijäämäsähköä ei käytetä veden lämmittämiseen.

Taulukko 3. 10 omakotitalon sähkö- ja lämmitystehon tuotto ja kulutus.

Kulutus / tuotto (kW)	Sähkötehon kulutus	Aurinko- paneelit	Tuuli- voima	CHP tuottama sähkö	CHP tuottama lämpö	Sähkötehon yli-/alijäämä	CHP polttoaineen hintaa (€)
Tammikuu	11834	1020	18176	7474	18684	7363	1966
Helmikuu	9666	2580	14731	5262	13154	7645	1384
Maaliskuu	12196	4370	11672	4959	12398	3846	1305
Huhtikuu	10865	6250	9593	3724	9310	4978	980
Toukokuu	9504	7710	10633	1706	4266	8838	449
Kesäkuu	6527	7850	8554	1395	3488	9877	367
Heinäkuu	6296	7770	8554	1097	2743	10027	289
Elokuu	7580	6720	8554	1244	3110	7693	327
Syyskuu	8664	4840	10633	1806	4514	6809	475
Lokakuu	9726	2760	12712	3776	9439	5745	993
Marraskuu	10810	1510	12192	5374	13435	2892	1414
Joulukuu	10831	750	14731	5387	13468	4650	1417
Summa	114500	54130	140733	43204	108011	80363	11365

Kuten taulukosta 3 huomataan, ylijäämätehoa on paljon. Tämä tilanne voidaan optimoida paremmin ja se tehdään käyttämällä ylijäämä sähköä lämmittämään vettä. Tällä tavoin saavutetaan kaksi asiaa. Ensinnäkin CHP-laitteen ei tarvitse olla päällä niin paljon, sillä se ei ole enää ainoa lämpimän veden tuottaja. Tästä seuraa se, että CHP-laitteen polttoainetta, eli puupellettejä ei kulu enää yhtä paljon. Toiseksi yli jäänyt sähkö voidaan käyttää hyödyksi lämmittämällä vettä. Alla olevassa taulukossa 4 esitetään, kuinka ylijäämätehon hyödyntäminen vaikuttaa.

Taulukko 4. 10 omakotitalon sähkö- ja lämmitystehon tuotto ja kulutus, kun ylijäämäteho käytetään hyväksi.

Kulutus / tuotto (kW)	Sähkötehon kulutus	Aurinko- paneelit	Tuuli- voima	CHP	CHP	Sähkötehon yli-/alijäämä	CHP
				tuottama sähkö	tuottama lämpö		polttoaineen hintaa (€)
Tammikuu	11834	1020	18176	3235	8087	0	851
Helmikuu	9666	2580	14731	1574	3935	0	414
Maaliskuu	12196	4370	11672	2444	6109	0	643
Huhtikuu	10865	6250	9593	1238	3094	0	326
Toukokuu	9504	7710	10633	0	0	4572	0
Kesäkuu	6527	7850	8554	0	0	6388	0
Heinäkuu	6296	7770	8554	0	0	7284	0
Elokuu	7580	6720	8554	0	0	4583	0
Syyskuu	8664	4840	10633	0	0	2294	0
Lokakuu	9726	2760	12712	1055	2638	0	278
Marraskuu	10810	1510	12192	3012	7531	0	792
Joulukuu	10831	750	14731	2519	6298	0	663
Summa	114500	54130	140733	15077	37692	25122	3966

Kuten vertailusta huomataan, optimoimalla sähkötehon ylijäämä pienenee ja tämän lisäksi CHP-laitteen käyttöikä pitenee, kun sitä ei käytetä yhtä usein. Koko järjestelmän laitteiden hinnaksi tulee noin 708 519 €.

5.4 20 omakotitalon mikroverkko

Viimeisessä esimerkissä järjestelmän suunnittelu tehdään alusta alkaen tavoitteena mahdollisimman pieni sähkötehon ylijäämä. Tämä saadaan tehtyä miettimällä tarkemmin laiteratkaisut ja tuntemalla paremmin eri uusiutuvaa energiaa tuottavien laitteiden ominaisuudet. Kaikki järjestelmän osat ovat riippuvaisia vuodenaajoista ja tämä täytyy ottaa huomioon optimointiprosessissa. Aikaisemmassa, 10 omakotitalon mikroverkossa-kin optimointi tehtiin käyttämällä ylijäämä sähköenergiaa käyttöveden lämmittämiseen, mutta tämä tehtiin vasta kun laitteet oli jo valittu. Tästä aiheutuu se, että ylijäämää tulee edelleen, optimoinnista huolimatta.

Tämän esimerkin 20 omakotitalon mikroverkossa sähkötehon vuosittainen tarve on 229 000 kW ja lämmityksen vaatima teho 216 000 kW. Eri laitekoonpanoista tehdään malli Microsoftin Excel-sovelluksella ja laitekoonpanoa muunnellaan siten, että saavutetaan mahdollisimman pieni sähkötehon ylijäämä. Optimointia pystyisi viemään vielä

pidemmälle ottamalla huomioon esimerkiksi eri laitekoonpanojen käyttöiän, energiatehokkuuden ja suhteuttamalla laitteen hintaa sen tuottamaan tehoon. Tämän työn tavoitteena ei kuitenkaan ole mikroverkkojen optimointi, vaan tavoitteena on esittää suunnitelma tällaisesta järjestelmästä.

Kuten aiempaankin, myös tähänkin mikroverkkoon valitaan Volter 40 CHP-laite, mutta tähän esimerkkiin niitä tulee 2. Valinnan syynä on se, että laitteessa on todella hyvä hyötysuhde verrattuna muihin samankaltaisiin ja saman kokoluokan laitteisiin. CHP-laitteiden yhteishinnaksi tulee 400 000 € [34, s. 43]. Alla olevassa taulukossa 5 on esitelty kahden laitteen yhteenlasketut ominaisuudet.

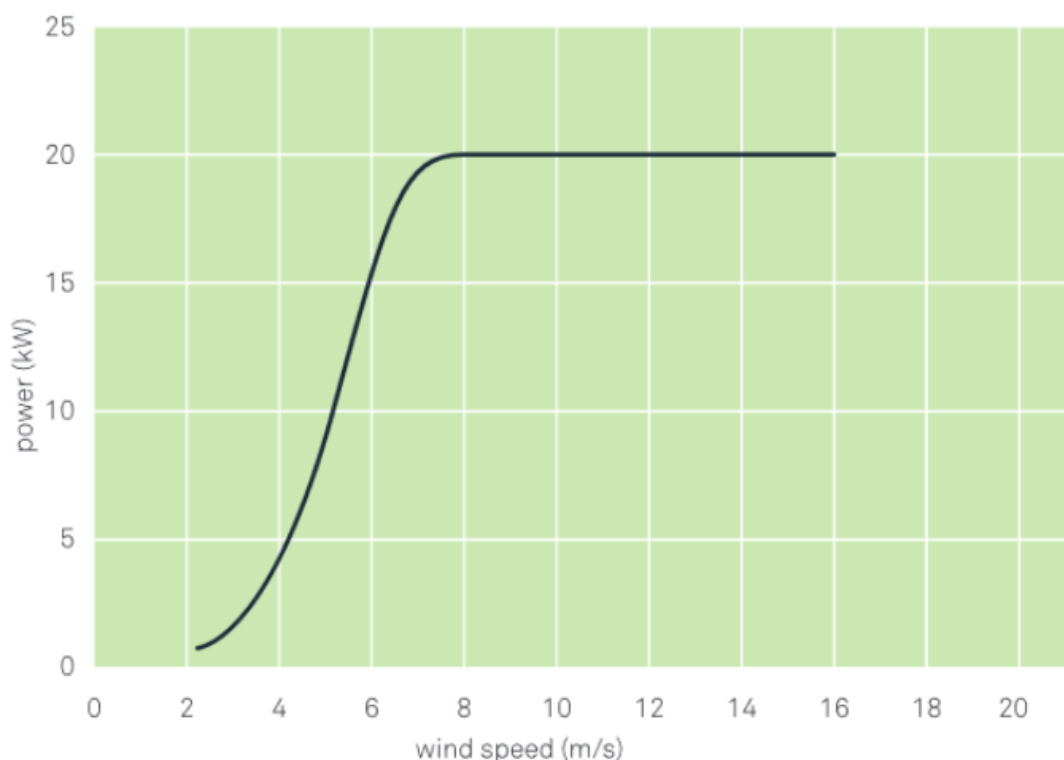
Taulukko 5. Kahden Volter 40 -CHP-laitteen ominaisuudet.

Nimellislämmitysteho [kW]	200
Sähkötuoton nimellisteho [kW]	80
Yhteenlaskettu hyötysuhde (Lämpimän veden- ja sähköntuotto) [η_s]	80,1
Polttoaineen kulutus [kg/h]	76
Polttoaine	Puupelletti
Polttoaineen lämpöarvo [kWh/kg]	$\geq 4,6$
Sähkötehon tarve [kW]	3,4

Tässäkin esimerkissä tullaan käyttämään hyödyksi lämminvesivaraajia, joilla saadaan varastoitua ja lämmitettyä käyttövetä ylijäävällä sähköteholla. CHP-laitteen yhteyteen tulee kaksi 5 000 litran AKVA Solar -lämminvesivaraajaa, joita pystytään lämmittämään ylijääneellä sähköteholla [35]. Tämän lisäksi kuten aiemmassakin esimerkissä, jokaiseen asuntoon tulee 150 litran Hajdu-lämminvesivaraaja. Näin saadaan tasoitettua veden lämmittämisen tarvetta. [36]. Lämminvesivaraajien yhteishinnaksi tulee 24 038 €.

Kuten aiemmassakin esimerkissä, aurinkopaneelijärjestelmä skaalataan suoraan tähän järjestelmään. Näin ollen aurinkopaneeleita tulee 360 kappaletta ja niiden kokonaishinnaksi asennettuna tulee 178 000 €.

Tuulivoimalaksi valitaan italialainen Tozzi Victory 19-20 -tuulivoimala, jonka nimellisteho on 19,9 kW ja se saavutetaan jo 6,6 m/s tuulennopeudessa. Laitteen valintaan vaikutti sen hyvä tehontuotto matalissakin tuulennopeuksissa. Laitteen hinta laaditaan samalla tapaa kuin aikaisemmassakin mallissa Windustryn antamien tietojen perusteella ja näin ollen hinnaksi saadaan 160 000 €. Tuulivoimalan tehokäyrä on kuvattu alla olevassa kuvassa 16.



Kuva 16. Tozzi Victory 19-20 -tuuliturbiinin tehokäyrä [39].

Tässäkin esimerkissä jokaisen asunnon yhteyteen tulee Teslan Powerwall -akkujärjestelmä tasaamaan kulutuspiikkejä ja antamaan puskuria sähköntuotannolle. Akkujärjestelmän kokonaishinnaksi tulee 175 000 € [33]. Tulevaisuutta ajatellen mikroverkossa pystyttäisiin myös käyttämään sähköautoja hetkellisenä energiavarastona ja ohjaamaan ylijäävä sähköenergia niihin. Tehokas ja luotettava latausjärjestelmä, jolla pystyttäisiin lataamaan pahimmassa tapauksessa 20 sähköautoa samanaikaisesti tosin vaatisi mikroverkon uudelleenmitoituksen tai vähintään uusiutuvaa energiaa tuottavien laitteiden lisäämisen.

Lopuksi järjestelmän kokonaisuutta voidaan arvioida. Alla olevassa taulukossa 6 on esitelty 20 omakotitalon mikroverkon kokonaisuus.

Taulukko 6. 20 omakotitalon mikroverkon sähkö- ja lämpöenergian tuotto ja kulutus.

Kulutus / tuotto (kW)	Sähkötehon kulutus	Aurinko- paneelit	Tuuli- voima	CHP tuottama sähkö	CHP tuottama lämpö	Sähkötehon yli-/alijäämä	CHP polttoaineen hinta (€)
Tammikuu	23667	2040	11880	13461	33654	0	3541
Helmikuu	19333	5160	10098	8681	21703	0	2284
Maaliskuu	24392	8740	8019	9266	23164	0	2437
Huhtikuu	21730	12500	6089	6217	15544	0	1636
Toukokuu	19009	15420	7128	1426	3566	0	375
Kesäkuu	13054	15700	5049	0	0	719	0
Heinäkuu	12593	15540	5049	0	0	2510	0
Elokuu	15161	13440	5049	826	2066	0	217
Syyskuu	17328	9680	7128	2728	6821	0	718
Lokakuu	19452	5520	8910	6829	17072	0	1796
Marraskuu	21619	3020	8019	10700	26751	0	2815
Joulukuu	21662	1500	10098	10571	26428	0	2781
Summa	229000	108260	92516	70707	176768	3228	18600

Verrattuna 10 omakotitalon malliin, tässä mallissa CHP-laitteelle tulee suurempi vastuu veden lämmittämisessä ja tämän takia polttoaineen hintakustannukset nousevat suhteessa paljon. Toisaalta sähkötehon ylijäämä jää huomattavasti pienemmäksi, koska laitteiden valinta on tehty optimointi mielessä. Tästä voidaan päätellä, että laitevalinnoilla saadaan tehtyä mikroverkosta tilanteeseen ja sijaintiin sopiva. Tässäkin esimerkissä voitaisiin valita suurempi tuulivoimala, jotta CHP-laitteen polttoainetta kuluisi vähemmän, mutta tämä aiheuttaisi sähkön ylituotantoa kesäkuukausina, jolloin tuulenopeus on kaikkein matalimmillaan.

6 Johtopäätökset

Lopuksi tarkastellaan aiemmin esiteltyjä esimerkkikohteita. Esimerkkikohteina olivat 2, 10 ja 20 omakotitalon mikroverkot, jotka tuottavat sekä lämpö- ja sähköenergiansa oma-varaisesti. Tarkastelussa on mikroverkkojen takaisinmaksukyky ja vertailu tavanomaisiin lämmitysmenetelmiin. Tarkasteltaessa esimerkkikohdetta, jossa lämmitys suoritetaan

maalämmöllä, otetaan huomioon maalämpöjärjestelmän asennushinta, sekä se kuinka paljon mikroverkkoa pitäisi kasvattaa, jotta maalämpöpumpulle riittäisi sähkötehoa. Mikroverkon laajennuksen kustannusarvio tehdään sen kuukauden mukaan, jolloin maalämpöön menisi eniten sähköenergiaa. Tarkasteluissa otetaan huomioon energian hinnan nousut. Sähkön hinnannousu kuluttajalle on ollut noin 3,5% vuodessa, joten tätä pidetään myös ennusteena. Sähkön hinta vuonna 2019 taloudelle, jonka vuosikulutus oli 10 000 kWh, oli 17,11 €. [40.] Puupellettien hintakehitystä on seurattu vähemmän aikaa, mutta viimeisen kymmenen vuoden aikana hintakehitys on ollut maltillisempaa kuin sähköllä. Puupellettien vuotuisen hintakehityksen keskiarvo on noin 2,08%. Puupellettien kuluttajahinta vuonna 2019 oli 276,9 €/t. [25.] Kustannusarvioissa ei ole otettu huomioon rakennuskustannuksia, sillä ne riippuvat todella paljon kohteen ominaisuuksista.

Alla olevassa taulukossa 7 on esitelty kahden omakotitalon mikroverkon takaisinmaksuajan arvio sekä kustannusarvio ja vertailu maalämmöllä toimivaan järjestelmään. Mikroverkon alkuperäinen investointi oli 146 840 € kun lämmitysteho otettiin CHP-laitteesta ja 158 631,05 € kun lämmitysteho saatiin maalämmöstä. Kun laskelmat tehtiin maalämpöjärjestelmästä, laskuista poistettiin CHP-laitteen osuus ja lisättiin maalämpöjärjestelmän investointikustannukset ja sähköntuoton kasvattamiseen vaadittava investointi. Tässä esimerkissä investointisummaa pitäisi kasvattaa 18,9%.

Taulukko 7. Arvio kahden omakotitalon mikroverkon takaisinmaksuajasta.

Vuosi	Sähkön		Sähkö ostetaan + sähkölämmitys	Lämmitys CHP-laitteella	Lämmitys maalämmöllä
	hinta €/kWh	Puupelletti hinta/t			
0	0,180	276,00 €	-8 010 €	-140 126 €	-166 641 €
1	0,186	281,74 €	-16 300 €	-133 159 €	-158 351 €
2	0,193	287,60 €	-24 881 €	-125 929 €	-149 770 €
3	0,200	293,58 €	-33 762 €	-118 427 €	-140 889 €
4	0,207	299,69 €	-42 953 €	-110 643 €	-131 698 €
5	0,214	305,92 €	-52 467 €	-102 566 €	-122 184 €
14	0,291	368,20 €	-154 558 €	-14 826 €	-20 093 €
15	0,302	375,85 €	-167 978 €	-3 172 €	-6 673 €
16	0,312	383,67 €	-181 867 €	8 916 €	7 216 €
25	0,425	461,77 €	-330 918 €	139 967 €	156 267 €
26	0,440	471,37 €	-350 510 €	157 346 €	175 859 €
27	0,456	481,18 €	-370 788 €	175 364 €	196 137 €
28	0,472	491,19 €	-391 776 €	194 045 €	217 124 €
29	0,488	501,40 €	-413 498 €	213 412 €	238 847 €
30	0,505	511,83 €	-435 980 €	233 491 €	261 329 €

Kuten taulukosta 7 nähdään, esimerkin mikroverkon laitteet maksaisivat itsensä takaisin noin 15 vuoden jälkeen oli lämmityksen tehollisena sitten CHP-laite tai maalämpö. Maalämpöjärjestelmällä kuitenkin saadaan tämän kokoisessa järjestelmässä suurempi hyöty ja lopullinen takaisinmaksu on parempi kuin CHP-laitteella lämmittäessä. Etuna CHP-laitteella olisi alkuperäisen investoinnin suuruus, joka on huomattavasti pienempi.

Seuraavana tarkastellaan kymmenen omakotitalon mikroverkkoa. Alla olevassa taulukossa 8 on esitelty kymmenen omakotitalon mikroverkon takaisinmaksun arvio sekä kustannusarvio ja vertailu maalämmöllä toimivaan järjestelmään. Tässä esimerkissä mikroverkon investointisumma on 708 519 €. Investointisumma kasvaa 7,05%, noin 758 500 euroon, jos järjestelmästä poistetaan CHP-laite ja se korvataan maalämpöjärjestelmällä.

Taulukko 8. Arvio kymmenen omakotitalon mikroverkon kustannuksista ja takaisinmaksuajasta

Vuosi	Sähkön		Sähkö ostetaan + sähkölämmitys	Lämmitys CHP-laitteella	Lämmitys maalämmöllä
	hinta €/kWh	Puupelletti hinta/t			
0	0,180	276,00 €	-40 050 €	-672 422 €	-798 544 €
1	0,186	281,74 €	-81 502 €	-635 006 €	-757 092 €
2	0,193	287,60 €	-124 404 €	-596 223 €	-714 190 €
3	0,200	293,58 €	-168 808 €	-556 023 €	-669 785 €
4	0,207	299,69 €	-214 767 €	-514 358 €	-623 827 €
5	0,214	305,92 €	-262 334 €	-471 172 €	-576 260 €
13	0,282	360,69 €	-707 963 €	-64 042 €	-130 631 €
14	0,291	368,20 €	-772 792 €	-4 487 €	-65 802 €
15	0,302	375,85 €	-839 890 €	57 227 €	1 296 €
25	0,425	461,77 €	-1 654 590 €	811 534 €	815 996 €
26	0,440	471,37 €	-1 752 550 €	902 743 €	913 956 €
27	0,456	481,18 €	-1 853 940 €	997 241 €	1 015 346 €
28	0,472	491,19 €	-1 958 878 €	1 095 143 €	1 120 284 €
29	0,488	501,40 €	-2 067 488 €	1 196 572 €	1 228 894 €
30	0,505	511,83 €	-2 179 900 €	1 301 654 €	1 341 306 €

Kymmenen omakotitalon esimerkissä takaisinmaksu saavutetaan 14 vuoden jälkeen. Järjestelmän optimoinnista huolimatta CHP-laite ei saavuta yhtä suurta kannattavuutta kuin maalämpöjärjestelmä. Jälleen tosin CHP-laitteella toteutetun järjestelmän investointisumma on huomattavasti pienempi.

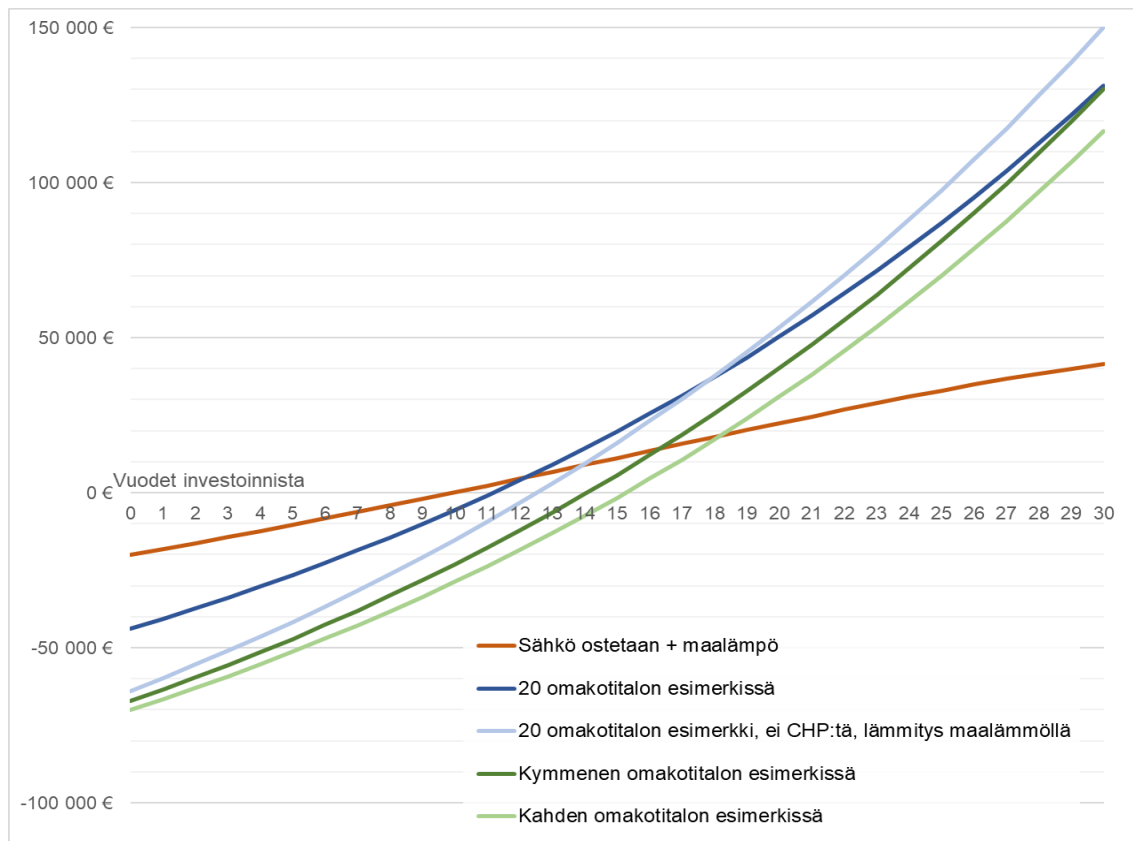
Viimeisenä tarkastellaan 20 omakotitalon mikroverkkoa. Tämän esimerkin mikroverkon investointisumma on 937 038 €. Jos CHP-laitteella tuotettu lämpöteho korvataan maalämpöjärjestelmällä investointikustannukset kasvavat 27,77%. Tähän tarkasteluun otetaan mukaan myös vaihtoehto, että sähkö ostetaan ja lämmitys toimii maalämmöllä. Alla olevassa taulukossa 9 on esitelty 20 omakotitalon mikroverkon takaisinmaksun arvio sekä kustannusarvio ja vertailu maalämmöllä toimivaan järjestelmään.

Taulukko 9. Arvio 20 omakotitalon mikroverkon kustannuksista ja takaisinmaksusta

Vuosi	Sähkön		Sähkö ostetaan + sähkölämmitys	Sähkö ostetaan + maalämpö	Lämmitys CHP-laitteella	Lämmitys maalämmöllä
	hinta €/kWh	Puupelletti hinta/t				
0	0,180	276,00 €	-80 100 €	-400 940 €	-875 477 €	-1 277 399 €
1	0,186	281,74 €	-163 004 €	-363 662 €	-811 499 €	-1 194 495 €
2	0,193	287,60 €	-248 809 €	-325 639 €	-745 012 €	-1 108 690 €
3	0,200	293,58 €	-337 617 €	-286 884 €	-675 925 €	-1 019 882 €
4	0,207	299,69 €	-429 534 €	-247 415 €	-604 139 €	-927 965 €
9	0,245	332,18 €	-939 685 €	-40 227 €	-201 098 €	-417 814 €
10	0,254	339,09 €	-1 052 674 €	2 940 €	-110 887 €	-304 825 €
11	0,263	346,14 €	-1 169 617 €	46 579 €	-17 194 €	-187 882 €
12	0,272	353,34 €	-1 290 654 €	90 632 €	80 108 €	-66 845 €
13	0,282	360,69 €	-1 415 927 €	135 034 €	181 152 €	58 428 €
25	0,425	461,77 €	-3 309 179 €	658 382 €	1 741 197 €	1 951 680 €
26	0,440	471,37 €	-3 505 101 €	696 720 €	1 905 455 €	2 147 602 €
27	0,456	481,18 €	-3 707 879 €	733 276 €	2 075 912 €	2 350 380 €
28	0,472	491,19 €	-3 917 755 €	767 764 €	2 252 794 €	2 560 256 €
29	0,488	501,40 €	-4 134 976 €	799 873 €	2 436 335 €	2 777 477 €
30	0,505	511,83 €	-4 359 801 €	829 264 €	2 626 779 €	3 002 302 €

Tässä esimerkissä CHP-laitteella toimiva järjestelmä saavuttaa takaisinmaksun aikaisemmin kuin maalämmöllä toimiva järjestelmä, mutta sen pidemmän ajan takaisinmaksu on heikompi. Suurena hyötynä tosin CHP-laitteella toimivalle järjestelmällä on alkuperäisen investointisumman suuruus, joka on huomattavasti pienempi kuin maalämmöllä toimivassa järjestelmässä. Näitä kustannusarvioita vertailemalla voidaan todeta, että mitä suurempi mikroverkko on kyseessä, sitä nopeammin se maksaa itsensä takaisin.

Lopuksi takaisinmaksuaikoja vertaillaan alla olevassa kuvassa 17 keskenään yksittäisen omakotitalo-omistajan näkökulmasta. Kuvasta on poistettu suoralla sähkölämmityksellä toimiva omakotitalo.



Kuva 17. Vertailu kaikkien esimerkkien välillä

Kuvasta voidaan todeta, että mitä suuremmaksi mikroverkon mitoittaa, sitä kannattavampi se on myös yksittäisen omakotitaloasukkaan osalta. Tässä täytyy tosin pitää myös mielessä se, että mikroverkon kasvaessa, investointikustannukset kasvavat sen mukana.

Johtopäätöksenä voidaan tästä työstä todeta se, että vaikka Suomi ei sijaintina ole välttämättä kaikkein ihanteellisin paikka mikroverkolle, pystytään sellainen kuitenkin Suomeenkin rakentamaan siten, että se on kannattavaa. Yksi yllättävimmistä havainnoista tutkimuksen aikana oli se, kuinka kustannustehokasta asuntojen lämmittäminen voi olla CHP-laitteella.

Mikroverkot eivät ainakaan vielä ole suosittu malli Suomessa. Tähän luultavasti suurimpana syynä on se, että uusiutuvan energian laitteiden kustannukset ovat todella korkeat. Investointeja ja mahdollisesti jopa tukia tarvittaisiin yritysten, yhteisöjen ja valtion osalta, jotta järkevän kokoisia mikroverkoja pystyttäisiin rakentamaan.

7 Päätelmä

Työn tavoitteena oli saada aikaan saada aikaan suunnitelma siitä, minkälaisena kokonaisuutena mikroverkon voisi rakentaa Suomeen. Tavoitteena oli myös saada arvio mikroverkon kannattavuudesta ja sen takaisinmaksuajasta. Työn päätteeksi saatiin koottua melko kattava määrä tietoa mikroverkon suunnittelusta ja vertailutietoa erilaisten järjestelmien kustannuksista ja takaisinmaksuajoista.

Työn aikana suurimpana vaikeutena tuli esiin tiedon saatavuuden hankaluus. Eri laitteiden hintatietoja oli melko vaikea löytää ja joissain tapauksissa jopa laitteiden tietojen oikeellisuudesta ja laitevalmistajien luotettavuudesta oli epäilyksiä. Lisäksi työn lopputuloksen tarkkuuteen vaikuttaa se, että esimerkiksi työssä käytetyt säätilastot ovat menneiden vuosien keskiarvoja, joiden perusteella ei pystytä tekemään tarkkaa ennustetta.

Mielestäni työn tavoitteisiin päästiin, mutta joitain asioita olisi voinut tehdä paremminkin. Suoraan laitevalmistajilta kysymällä laitteista olisi saanut luultavasti paremmin tietoa ja lisäksi hintatiedot olisivat varmasti olleet tarkempia.

Lähteet

1. Pehkonen, Eero. 2019. Teollinen mikroverkko kysyntäjoustoa hyödyntävän energianhallintajärjestelmän osana. Verkkoaineisto. <https://www.sahkoala.fi/ammattilaiset/artikkelit/energiatehokkuus/fi_FI/Teollinen_mikroverkko_energianhallintajärjestelman_osana/>. 1.2.2019. Luettu 23.3.2020.
2. Mitä hiilineutraalius tarkoittaa ja miten se saavutetaan 2050 mennessä? 2019. Verkkoaineisto. Euroopan parlamentti. <<https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20190926STO62270/mita-hiilineutraalius-tarκοittaa-ja-miten-se-saavutetaan-2050-mennessa>>. Luettu 24.3.2020.
3. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen: kansalliset tavoitteet vuodeksi 2030. 2018. Verkkoaineisto. Euroopan parlamentti. <<https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20180208STO97442/kasvihuonekaasupaas-tojen-vahentaminen>>. Luettu 24.3.2020.
4. Kasvihuonekaasupäästöt Suomessa vuodelta 1990–2018. PxWeb-tietokanta. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <<http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/sq/29646637-d145-422f-9da0-26e150a7bf7d>>. Luettu 26.3.2020.
5. Kasvihuonekaasupäästöt Suomessa. PxWeb-tietokanta. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <<http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/sq/b25e7263-a7d2-4438-983f-bc71d93aff65>>. Luettu 23.3.2020.
6. Tieteen termipankki. Verkkoaineisto. <<http://tieteentermipankki.fi/wiki/Nimitys:mikroverkko>>. Luettu 18.3.2020.
7. Photovoltaic Report. 2019. Verkkoaineisto. Fraunhofer. <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>>. Luettu 14.4.2020.
8. Solar efficiency limit. Verkkoaineisto. Solar Cell Central. <http://solarcellcentral.com/limits_page.html>. Luettu 14.4.2020.
9. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. 2019. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa>. Luettu 18.3.2020.
10. Sallinen, Petri. 2019. Tuuli jyrää kivihiilen. Verkkoaineisto. <<https://www.energi uutiset.fi/tilastouutiset/tuuli-jyraa-kivihiilen.html?p488=2>>. 31.10.2019. Luettu 29.4.2020.

11. Takalo, Heidi. 2013. Mikro- ja pien-CHP. Verkkoaineisto. < http://www.greenpolis.fi/wp-content/uploads/004_13-Mikro-ja-pien-CHP-Teknologia-ja-laitekantaselvitys-sek%C3%A4-kannattavuuden-tarkastelu-tapausesimerkin-avulla.pdf>. Toukokuu 2019. Luettu 29.4.2020.
12. Volter 40 Technology. Verkkoaineisto. Volter. <<https://volter.fi/technology/>>. Luettu 29.4.2020.
13. CO₂-päästökeroimet. 2019. Verkkoaineisto. Motiva. < https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energiankulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan/co2-paastokertoimet >. Luettu 31.3.2020.
14. Alsema, Wild-Scholten. 2006. Environmental Impacts of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production. Verkkoaineisto. < <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.491.3389&rep=rep1&type=pdf>>. 31.5.2006. Luettu 31.3.2020.
15. Uski, Aalto, Forssén Holttinen, Kojo, Repo, Rosqvist, Sarsama, Talus. 2018. Mikroverkkojen mahdollisuuksista sähkön toimituksen luotettavuuden parantajana. Verkkoaineisto. < <https://tt.eduuni.fi/sites/EL-TRAN/Julkiset%20tiedot/Sanna%20Uski%20et%20al.,%20Mikroverkkojen%20mahdollisuuksista%20s%C3%A4hk%C3%B6n%20toimituksen%20luotettavuuden%20parantajana.pdf> >. 3.2018. Luettu 28.3.2020.
16. Lupamenettelyt. 2018. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/lupamenettelyt>. Luettu 29.4.2020.
17. Laki maankäyttö- ja rakennuslain muuttamisesta. 2011. Verkkoaineisto. Finlex. <<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110134>>. Luettu 29.4.2020.
18. Fortum Aurinkolaskuri. 2020. Verkkoaineisto. Fortum. <<https://aurinkolaskuri.fortum.fi/>>. Luettu 2.4.2020.
19. Mallinnuksen tarkkuudesta. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<http://www.tuuliatlas.fi/tarkkuus/index.html>>. Luettu 18.4.2020.
20. Suomen Tuuliatlas. 2020. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. < <http://tuuliatlas.fmi.fi/fi/>>. Luettu 18.4.2020.
21. Vertikaalinen tuuliprofiili. Verkkoaineisto. Suomen tuulivoimayhdistys. <<https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/mita-tuuli-on/tuuli-maanpinnalla/vertikaalinen-tuuliprofiili>>. Luettu 23.4.2020.
22. Matalaenergiatalon lämmitys. Verkkoaineisto. Pistesarjat. <<https://pistesarjat.fi/fi/ajankohtaista/Matalaenergiatalon-lammitys>>. Luettu 6.4.2020

23. Lappalainen, Markku. 2011. Rakennusten lämmöntuotantotavat. Verkkoaineisto. <<https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK110301.pdf>>. 2011. Luettu 6.4.2020
24. Matalaenergiatalon määritelmiä. 2018. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/koti_ ja_ asuminen/ rakentaminen/ millainen_ on_ energiatehokas_ pientalo/ matalaenergiatalon_ maaritelmiä>. Luettu 12.4.2020
25. Puupellettien kuluttajahinta lämmöntuotannossa, PxWeb-tietokanta. 2019. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <<http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/sq/5787149d-ba94-44be-8b4d-ea1891add2bc>>. Luettu 28.4.2020.
26. Energia-arvo ja muuntokertoimet. Verkkoaineisto. Bioenergianeuvoja. <<http://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/pelletti/pelletti/>>. Luettu 28.4.2020.
27. Maalämmön asennushinta ja käyttökustannukset. 2020. Verkkoaineisto. Tomallen, Senera. <<https://www.tomallensenera.fi/maalampo/maalampo-hinta>>. Luettu 10.4.2020.
28. Kaukolämmön tuntiteho 2016. 2016. Verkkoaineisto. Helen Oy. <<https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/avoindata>>. Luettu 15.4.2020.
29. Pellematic Condens tuotesivu. Verkkoaineisto. ÖkoFen. <<https://www.oekofen.com/en-gb/pellematic-condens/>>. Luettu 17.4.2020.
30. ÖkoFEN: Modelle, Preise und Unternehmen. Verkkoaineisto. Kesselheld. <<https://www.kesselheld.de/oekofen/>>. Luettu 29.4.2020.
31. Excel 15 owner's manual. 2018. Verkkoaineisto. Bergey. <http://bergey.com/wp-content/uploads/Excel-15S-Owners-Manual_August-2018_Rev-0.pdf>. Luettu 21.4.2020.
32. Bergey Windpower Windturbines. Verkkoaineisto. Kansas Windpower. <https://www.kansaswindpower.net/bergey_wind_generators.htm>. Luettu 29.4.2020.
33. Tesla Powerwall tuotesivu. Verkkoaineisto. Tesla. <https://www.tesla.com/fi_FI/powerwall#design>. Luettu 21.4.2020.
34. Justander, Tuomo. 2013. Sähköntuotanto Enon energiaosuuskunnan lämpölaitoksissa. Opinnäytetyö. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/59429/Justander_Tuomo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Huhtikuu 2013. Luettu 27.4.2020.

35. AKVA Solar 5000 tuotesivu. Verkkoaineisto. Taloon.com. <<https://www.taloon.com/aurinkoenergiavaraaja-akva-solar-5000-2-x-lk35-ak-1-5-bar>>. Luettu 26.4.2020.
36. Hajdu 150 tuotesivu. Verkkoaineisto. Taloon.com. <<https://www.taloon.com/lamminvesivaraaja-hajdu-515x1215-mm-1800w-150-l>>. Luettu 26.4.2020.
37. How much do wind turbines cost. Verkkoaineisto. Windustry. <http://www.windustry.org/how_much_do_wind_turbines_cost>. Luettu 25.4.2020.
38. Libellula 20 kW -tuote-esite. Verkkoaineisto. Aria. <<http://www.aria-srl.it/aria-staging/wp-content/uploads/2015/11/Depliant-20kW-2015-ENG.pdf>>. Luettu 25.4.2020.
39. Product line. Verkkoaineisto. Tozzi Nord. <<https://www.tozzinord.com/contrib/uploads/Small-Wind-Turbines-Brochure.pdf>>. Luettu 27.4.2020.
40. Sähkön hinnat kuluttajatyypeittäin, PxWeb-tietokanta. 2019. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <<http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/sq/d77678bb-9dd1-4acd-856e-b460cd968dfe>>. Luettu 28.4.2020.