

Mikael Asikainen

# OMAVARAINEN ENERGiantuotanto TEOLLISUUSHALLISSA

Diplomityö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Professori Seppo Valkealahti  
Tarkastaja: Professori Pertti Järventausta  
Toukokuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Mikael Asikainen: Omavarainen energiantuotanto teollisuushallissa  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Sähkötekniikka, DI  
Toukokuu 2021

---

Ilmaston lämpeneminen, sekä halu sen hidastamiseksi ajaa nyky-yhteiskuntaa vuosi vuodelta kohti puhtaampaa energiantuotantoa. Käytännössä tämä on tapahtunut laki- ja veroteknisin to- teutuksin, jotka kohdistuvat fossiiliseen tuotantoon, kallistaen näin tuotettua energiaa. Tästä syn- tyvän kustannuspaineen sekä uusien trendien myötä yhä useampi sektori on alkanut kiinnostua puhtaan uusiutuvan energian tuotannosta.

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tarkastella omavaraisen energiantuotannon kannatta- vuutta vanhassa teollisuusrakennuksessa, niin rahallisen säästön kuin ekologisuuden kautta. Omavaraiseksi tuotannoksi työssä on katsottu ne tuotantomuodot, joiden avulla niin sähkö- kuin lämmitysenergiaa voidaan tuottaa ilman riippuvuutta ulkopuolisesta tahosta. Näiden ajatusten pohjalta sähköntuotannollinen tarkastelu on toteutettu aurinko- sekä pientuulivoimalle ja lämmön- tuotannossa lämpöpumpuille sekä puulämmitykselle.

Sähköntuotannossa aurinko- sekä pientuulivoimalle laskettiin tuottoennusteet erilaisilla vuo- sienergiatuotannoilla, joiden pohjalta pystyttiin lopulta arvioimaan investointien taloudellista kan- nattavuutta. Laskelmien pohjalta aurinkovoimalan hankintaa kohteeseen voitiin pitää perusteltuna investointina niin rahallisesta kuin ekologisesta näkökulmasta katsottuna. Pientuulivoiman osalta hankintaa ei kuitenkaan voitu pitää kannattavana vaihtoehtona ennen tarkempia tuulimittauksia. Tuulimittausten suorittamista voidaan kuitenkin pitää perusteltuna, mahdollisen talvella saatavan energiahyödyn kautta.

Tarkasteltaviksi päälämmitysjärjestelmiksi valittiin puukeskuskattila, maalämpö sekä ilma-ve- silämpöpumppu, joiden kannattavuutta tarkasteltiin investointikustannusten sekä energiantuotan- nosta aiheutuvien vuotuisten kustannusten avulla.

Käytännöllisyyden sekä ekologisuuden kannalta tarkasteltuna järkevimpänä yhteisinvestoin- tina esimerkkikohteeseen voitiin pitää aurinkovoimaa yhdistettynä maalämpöön. Vaikka vuosi- kustannusten kannalta puukeskuslämmitys on lämmitysjärjestelmistä halvin, tuottaa se muihin lämmitysratkaisuihin nähden enemmän työtä sekä ilmansaasteita.

Avainsanat: aurinkosähkö, energiantuotanto, lämpöpumput, pientuulivoima, puulämmitys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Mikael Asikainen: Self-sufficient energy production in an industrial hall  
Master's thesis  
Tampere University  
Electrical Engineering, MSc  
May 2021

---

Global warming and the desire to slow it down are driving modern society from year to year towards cleaner energy production. In practice, this has been done with laws and taxation that are focused to energy production with fossil fuel, by making production more expensive. With the resulting cost pressures and new trends, more and more sectors are interested in clean renewable energy production.

The purpose of this master's thesis was based on to study the profitability of self-sufficient energy production in an old industrial building using both economic savings and ecology. Forms of production that can be used to produce both electricity and heat without dependence on an external party have been considered as self-sufficient production. Based on these ideas, electricity production for solar and wind power as well as heat production with heat pumps and wood heat have been considered.

In electricity generation, production forecasts for solar and wind power were calculated using different annual energy productions that could eventually be used to assess the economic profitability of the investment. Based on the calculations, on the acquisition of a solar power plant on-site could be considered a justified investment from both an economic and ecological point of view. The acquisition of wind power could not be considered a profitable option until more accurate wind measurements were made. However, wind measurements can be considered justified due to the potential energy benefits available in winter.

Based on investment costs and the annual costs of energy production profitability comparison of the main heating systems were done to wood-fired central heating boilers, ground source heat pumps and air-to-water heat pumps.

From the point of view of practicality and ecology, solar energy combined with ground source heat pumps could be considered the most sensible joint investment in the example building. Although wood-fired central heating boiler is the cheapest in the annual cost of a heating system, but it causes more labor and air pollution than other heating solutions.

Keywords: energy production, heat pumps, solar power, wind power, wood heating

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

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on pitänyt sisällään pitkiä päiviä ja nukkumattomia öitä, sillä tietotekniikan insinöörille ja valmistuvalle sähkötekniikan diplomi-insinöörille lämmöntuotanto sekä rakennustekniikka olivat hyvin vieras maailma opittavaksi. Oikeasti olemassa oleva projekti ja sen mielenkiintoisuus kuitenkin ylläpitivät jaksamista, vaikka työ toteutettiin kokopäivätyön ohella.

Haluaisin kiittää koko perhettäni tuesta, erityisesti isääni, joka tämän mielenkiintoisen projektin on mahdollistanut. Lisäksi suuri kiitos professori Seppo Valkealahdelle kannustavasta työnohjauksesta.

Helsingissä 14.5.2021

Mikael Asikainen

# SISÄLLYSLUETTELO

|  |    |
|--|----|
| 1. JOHDANTO .....  | 1  |
| 2. SÄÄSTÄ LUONTOA VAI SÄÄSTÄ RAHAA? .....                                    | 3  |
| 3. OMAVARAINEN LÄMMÖN TUOTANTO JA VARASTOINTI .....                          | 4  |
| 3.1 Lämmitys lämpöpumpuilla .....  | 4  |
| 3.1.1 Ilma-vesilämpöpumppu .....   | 5  |
| 3.1.2 Poistoilmalämpöpumppu .....  | 6  |
| 3.1.3 Ilma-ilmalämpöpumppu .....   | 7  |
| 3.1.4 Maalämpö .....   | 8  |
| 3.2 Lämminvesivaraajat .....   | 9  |
| 4. LÄMMITYSRATKAISUT .....   | 12 |
| 4.1 Teollisuushallin energiatehokkuuden parantaminen .....                   | 12 |
| 4.2 Lämmitysratkaisuiden toimintaperiaatteet .....                           | 13 |
| 4.3 Lämmitysratkaisuiden vertailu ja investointikustannukset .....           | 16 |
| 4.4 Lämmityksestä aiheutuvat päästöt .....                                   | 19 |
| 4.5 Lämmitysratkaisuiden yhteenveto .....                                    | 20 |
| 5. AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄ .....   | 22 |
| 5.1 Aurinkosähköjärjestelmän lupamenettely ja verovelvollisuus .....         | 22 |
| 5.2 Netotusmallin vaikutus omavaraisessa sähköntuotannossa .....             | 23 |
| 5.3 Sun Energia laskurin hyödyntäminen mitoituksessa .....                   | 24 |
| 5.4 Teollisuushallin aurinkosähköjärjestelmän mitoittaminen .....            | 28 |
| 5.5 Aurinkovoimalan investointikustannukset .....                            | 29 |
| 5.6 Yhteenveto aurinkosähköjärjestelmän kannattavuudesta .....               | 32 |
| 6. PIENTUULIVOIMA .....  | 33 |
| 6.1 Tuulivoiman lupamenettely ja verovelvollisuus .....                      | 33 |
| 6.2 Takojantien hallin tuulivoimapotentiaalin arviointi .....                | 35 |
| 6.3 Pientuulivoimalan tuotannon arviointi laskennallisesti .....             | 36 |
| 6.4 Investointikustannukset ja yhteenveto .....                              | 41 |
| 7. YHTEENVETO JA POHDINTA .....  | 43 |
| LÄHTEET .....  | 45 |
| LIITE 1: HALLIN POHJAPIIRUSTUS .....   | 48 |
| LIITE 2: LÄMMITYSMUOTOEJEN ENERGIANKULUTUS ENNEN<br>PERUSPARANNUKSIA .....   | 49 |
| LIITE 3: LÄMMITYSMUOTOEJEN ENERGIANKULUTUS PERUSPARANNUSTEN<br>JÄLKEEN ..... | 50 |

## KUVALUETTELO

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| <b>Kuva 1.</b>  | <i>Ilma-vesilämpöpumpun toimintaperiaate [3].</i>   | 5  |
| <b>Kuva 2.</b>  | <i>Ilma-ilmalämpöpumpppujärjestelmän toimintaperiaate [3].</i>  | 8  |
| <b>Kuva 3.</b>  | <i>Havainnekuva maalämmön maakeruuputkistosta (vasen) sekä lämpökaivosta (oikea) [4].</i>   | 8  |
| <b>Kuva 4.</b>  | <i>Periaatekuva puskurivaraajalla varustetusta lämpökaivosta [6].</i>   | 10 |
| <b>Kuva 5.</b>  | <i>Puukeskuskattilan ja ilma-vesilämpöpumpun yhteistoimintaa kuvaava havainne piirros</i>   | 14 |
| <b>Kuva 6.</b>  | <i>Ostosähköllä ja myyntisähköllä saavutettavat hyödyt.</i>   | 23 |
| <b>Kuva 7.</b>  | <i>Sähkönkulutus ja tuotanto yhden tunnin aikana.</i>   | 24 |
| <b>Kuva 8.</b>  | <i>Vuosituotto-odotukset 3,3 kWp aurinkopaneelijärjestelmälle [18][19].</i>   | 25 |
| <b>Kuva 9.</b>  | <i>Omakotitalon sähkön tuotanto ja kulutus vuonna 2020, Sun Energia arvio (ylempi) toteutunut (alempi) [19].</i>  | 26 |
| <b>Kuva 10.</b> | <i>Arvio vuotuisesta säteilyenergiasta hallin katolla, saneerausosan raja-<br/>rajaus punaisella [19].</i>  | 28 |
| <b>Kuva 11.</b> | <i>Teollisuushallin käyttösähkön kulutus sekä aurinkosähkön tuottoennuste eri järjestelmille.</i>   | 29 |
| <b>Kuva 12.</b> | <i>Eri aurinkosähköjärjestelmien takaisinmaksuajat 30 vuoden pitoajalla.</i>  | 31 |
| <b>Kuva 13.</b> | <i>Takojantien korkeuserot sekä maaston muodot paikkatietoikkuna palvelussa [28].</i>   | 35 |
| <b>Kuva 14.</b> | <i>Tuuliatlaksesta saatu tuuliruusu ja kohde kartalla (yllä) sekä mittauspisteen etäisyys kohteesta paikkatietoikkuna palvelun perusteella (alla) [28][29].</i> | 35 |
| <b>Kuva 15.</b> | <i>Laskennallisesti saatu keskituulen nopeus korkeuden funktiona Takojantien alueella.</i>  | 37 |
| <b>Kuva 16.</b> | <i>Generaattoritehot sekä tuulen nopeuksien todennäköisyydet tuulen nopeuksien funktiona 10 m korkeudessa [31][32].</i>   | 38 |
| <b>Kuva 17.</b> | <i>Pientuulivoimaloiden vuosituottoennusteet tuulen nopeuden funktiona 10 m napakorkeudella.</i>  | 39 |
| <b>Kuva 18.</b> | <i>Pientuulivoimaloiden vuosituottoennusteet tuulen nopeuden funktiona 15 m napakorkeudella.</i>  | 40 |
| <b>Kuva 19.</b> | <i>Eri vuosituotantomäärillä saavutettavat tuotot euroina 30 vuoden pitoajalla sekä tuulivoimaloiden investointikustannukset.</i>                               | 41 |

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <i>ILP</i>                           | <i>ilmalämpöpumppu</i>  |
| <i>LKV</i>                           | <i>lämmön käyttövesi</i>  |
| <i>LP</i>                            | <i>lämpöpumppu</i>  |
| <i>PILP</i>                          | <i>poistoilmalämpöpumppu</i>  |
| <i>SPF</i>                           | <i>engl. Seasonal Performance Factor, lämpöpumpun vuosihyötysuhde</i>                                     |
| <i>C</i>                             | <i>määräkerroin</i>   |
| <i>E-luku</i>                        | <i>rakennuksen laskennallinen ostoenergian kulutus vuodessa, painotettuna energiamuotojen kertoimilla</i> |
| <i>k</i>                             | <i>muotokerroin</i>   |
| <i>U-arvo</i>                        | <i>lämmönläpäisykerroin</i>   |
| <i>Q<sub>LP,lämmitys,tilat</sub></i> | <i>lämpöpumpun tuottama lämpöenergia tilojen lämmittämiseen</i>   |
| <i>Q<sub>LP,lämmitys,LKV</sub></i>   | <i>lämpöpumpun tuottama lämpöenergia käyttöveden lämmittämiseen</i>                                       |
| <i>V<sub>ka</sub></i>                | <i>tuulen nopeuden keskiarvo</i>  |
| <i>V<sub>ref</sub></i>               | <i>alkuperäinen tuulen nopeus</i>   |
| <i>W<sub>LP,lämmitys</sub></i>       | <i>lämpöpumpun sähköenergiankulutus</i>   |
| <i>z</i>                             | <i>tarkasteltava napakorkeus</i>  |
| <i>z<sub>ref</sub></i>               | <i>alkuperäinen napakorkeus</i>   |
| <i>z<sub>0</sub></i>                 | <i>tarkasteltavan pinnan rosoisuusparametri</i>   |

# 1. JOHDANTO

Käsite teollisuusrakennus kätkee sisäänsä hyvin erilaisia rakennuksia. Esimerkkejä löytyy teollisuushalleista sekä tuotantorakennuksista aina raskaan teollisuuden tehdasrakennuksiin. Tässä työssä teollisuusrakennuksella tarkoitetaan pääosin näistä ensimmäistä, eli teollisuushallia [1].

Teollisuusyritysten tuotantotapojen muuttuessa ja automaation yleistyessä erilaisten tuotantolaitosten neliöllinen tilantarve on alkanut vuosi vuodelta vähentyä. Kun tähän yhdistetään lähes jatkuva tarve tuotantojen ja toimintojen keskittämiseksi Uudellemaalle, on lopputuloksena iso määrä tyhjillään olevia teollisuusrakennuksia ympäri muun Suomen.

Viime vuosina näitä tyhjiksi jääneitä teollisuushalleja on purkamisen sijaan alettu monissa kunnissa valjastamaan uusiin käyttötarkoituksiin lisääntyneen pienyritystoiminnan, kuten pienpanimoiden, pesuloiden sekä erikoisliikkeiden muodossa. Tämä tarkoittaa käytännössä erilaisten peruskorjausten lisäksi melko isoa energiaremonttia, koska monissa kohteissa päälämmitysmuotona on edelleen öljylämmitys.

Näihin korjauksiin ja energiainvestointeihin saadaankin helposti kulumaan paljon rahaa, joten niiden oikeanlaisella suunnittelulla ja kohdentamisella on suuri merkitys. On kuitenkin muistettava, että kaikkia investoinneilla saavutettuja parannuksia ei voida mitata pelkästään rahassa. Puhtaalla energiantuotannolla sekä ylenpalttisen kulutuksen hillitsemisellä on suuri merkitys luonnon ja ilmaston kannalta, joten myös sille on hyvä laskea painoarvoa investointeja suunniteltaessa.

Tämä diplomityö on osa suurempaa kokonaisuutta, jossa kerrosalaltaan 720 m<sup>2</sup> teollisuushalli saneerataan vastaamaan 2020 luvun käyttötarkoitusta. Saneerauksen yhteydessä on haluttu antaa painoarvoa etenkin kotimaiselle uusiutuvalla energialla sekä kohteen omavaraiselle tuotannolle. Investointiratkaisuja on haluttu tarkastella niin rahallisen hyödyn, ympäristövaikutusten kuin todellisen energiahyödyn kautta.

Esimerkkikohde on vuonna 1979 rakennettu teräsrunkoinen halli, jonka seinärakenteet ovat eristettyjä puuelementtejä. Kohde koostuu 1-kerroksen autojen entisöinti-, näyttely- sekä toimistotiloista, joiden yhteispinta-ala on 720 m<sup>2</sup>, sekä 2-kerroksen 80 m<sup>2</sup> toimistotilasta (Liite 1). Saneerausta aloitettaessa kohteessa on ollut käytössä öljylämmitys ja lämmönjako on toteutettu vesikeskuskiertoisin patterein sekä puhaltimin.



Suunnittelun kannalta kohteen energiantuotanto voidaan jakaa lämpöenergian ja sähköenergian tuotantoon. Tässä jaossa ei kuitenkaan oteta kantaa siihen, kuinka lämmöntuotanto on myös riippuvainen sähköenergiasta.

Saneerauksen aloitushetkellä tilojen lämmitys on toteutettu käyttäen vesikiertoista patteriverkostoa, joka sisältää lämmityspattereita, sekä lämpökojeita. Korkean avohallisuuden lämmittämisestä vastaa kaksi vesikeskusjärjestelmään kytkettyä Wolf LH40D lämpökojetta ja toimistojen lämmittäminen hoidetaan vesikiertopattereilla. Järjestelmässä kiertävän veden lämmittäminen on toteutettu öljylämmityksellä. Koko hallin lämmitysenergian tarpeeksi on arvioitu 65 000 kWh/vuosi ja lämmitystehontarpeeksi 20 kW, sisältäen lämpimän käyttöveden osuuden.

Sähkön kulutus on jaettu tarkastelua varten kahteen osaan, käyttösähköön sekä lämmityssähköön. Hallin käyttösähköön katsotaan kuuluvaksi ilmanvaihto, kaikkien tilojen valaistus sekä pistorasiayksiköt, niin toimistossa, näyttelytilassa kuin korjaushallissa. Lisäksi käyttösähköön on laskettu mukaan korjaushallin puolella käytettävien nostureiden ja sähkökäyttöisten työkalujen ja laitteiden kuluttama sähkö. Sähkönkäytön arvio perustuu kulutus perusteiseen arvioon, joka on saatu aiemman toiminnan perusteella ja on noin 10 000 kWh/vuosi.

Lämmityssähköön puolestaan katsotaan kuuluvaksi kaikki se kulutus, joka syntyy muun muassa puhaltimissa sekä lämmitysvastuksissa. Koska mittaperusteista vertailuarvoa lämmityssähkönkulutukselle ei ole, on lämmityssähkön kulutukseksi arvioitu 5000 kWh/vuosi.

Yksityishenkilöllä tai yrityksellä on monia tapoja kiinteistön lämmöntuotantoon, mutta sähköntuotannossa yleisimmät vaihtoehdot ovat; aurinko- ja tuulivoima. Aurinkovoiman käyttö onkin vuosi vuodelta yleistynyt teknologian kehittyessä, mutta tuulivoimasta puhutaan lähinnä isojen tuulipuistojen yhteydessä. Tämän vuoksi tuulivoiman pientuotanto on haluttu ottaa mukaan tarkasteluun ja selvittää, olisiko se kannattava vaihtoehto yhdessä aurinkovoiman kanssa tai yksin.

Saneerauskohde sijaitsee pienellä paikkakunnalla Pirkanmaalla, joten saneerauksen investointikustannusten ei voida katsoa nostavan kohteen arvoa hankintojen täydellä arvolla. Tämän vuoksi suunnittelussa ei ole tarkoituksena minimoida kulutusta tai maksimoida tuotantoa kaikin mahdollisin keinoin, vaan pyrkiä löytämään ekologisesti ja kustannuksellisesti järkevä kompromissiratkaisu.

## 2. SÄÄSTÄ LUONTOA VAI SÄÄSTÄ RAHAA?

Jokaisessa investoinnissa, niin yritys- kuin yksityiselämässäkkin avaintekijänä on kysymys: mitä investoinnilla tavoitellaan? Yksittäinen ihminen saattaa investoinnilla tavoitella onnea tai virkistystä, kun taas erilaiset yritykset todennäköisemmin rahallista säästöä. Molempia tahoja kuitenkin yhdistää yksi asia, ympäristö.

Suunniteltaessa investointeja energiatehokkuuteen tai vaihtoehtoisesti omavaraisuuteen liittyen, väistämättä ensimmäisenä asiana tulee mieleen raha tai ekologisuus. Niin valitettavaa kuin se onkin, nämä kaksi seikkaa saattavat hyvin usein alkaa sulkea toisiaan pois. Tällöin joudutaan tekemään niin sanottuja kompromissiratkaisuja. Sääste-täänkö rahaa vai luontoa?

Tätä ongelmaa voidaan lähteä käsittelemään hyvin monelta kantilta, mutta otetaan tässä pohdinnassa aloitussuunnaksi energia. Säästömielessä energia voidaan jakaa karkeasti kahteen suuntaan: energiansäästö tai energiantuotanto. Energiansäästöön voidaan katsoa kuuluvaksi kaikki asiat, jolla energiankulutusta voidaan vähentää. Se voi tapahtua niin optimoinnin, omien käytötottumusten kuin rakenteellisten parannusten kautta.

Tuotannolla taas tarkoitetaan kaikkea sitä, jolla tuotannon kautta saadaan säästöä. Tähän lukeutuu niin tuotannon optimointi kuin tuotantotapa. Joka tapauksessa, oli kyse sitten tuotannosta tai säästöstä, näillä kahdella on vahva riippuvuus toisistaan. Esimerkiksi säästömielessä käyttökokemuksia muutettaessa, käytetyn energian määrä vähenee, jolloin tuotannon puolella tuottoa pitää vähentää ylituotannon välttämiseksi.

Säästöjä mietittäessä suunnittelun tulisi siis aina lähteä liikkeelle kulutuksen ja etenkin sen muutoksen kautta. Näin vaikutus muihin osa-alueisiin saadaan minimoitua ja säästöjä syntyy niin rahallisesti kuin ekologisestikin.

Aina kuitenkin kulutustottumusten tai sen optimoinnin toteuttaminen ei riitä ja on tarve tehdä rahaa vieviä investointeja. Etenkin vanhojen rakennusten energiatehokkuuden parantamisessa tämä tarkoittaa monesti erilaisia rakenneuudistuksia, muun muassa seinien, ovien ja ikkunoiden osalta. Näillä toimilla pyritään vähentämään rakennuksen luovuttaman lämpöenergian määrää ympäristöön ja tätä kautta saamaan säästöä hankittavan energian osalta.

Kyseisiin uudistuksiin saadaan uppoamaan rahaa, joten investointeja lähdetään monesti puimaan kannattavuuden kautta. Tällöin vaakakupissa painaa menot suhteessa saavutettavaan säästöön ja ekologisuus jää pohdinnoissa usein varjoon. Lopuksi voidaankin esittää kysymys: onko tarkoitus säästää luontoa vai säästää rahaa?

### 3. OMAVARAINEN LÄMMÖN TUOTANTO JA VARASTOINTI

Tässä työssä omavaraiseksi tuotannoksi on katsottu ne tuotantomuodot, joilla sähkö- ja lämmitysenergiaa voidaan tuottaa, ilman suoraa riippuvuutta ulkopuolisesta tahosta. Tämä ei kuitenkaan poissulje mahdollisuutta ja tarvetta ostaa energiaa ulkopuolelta, toisin kuin täysin itsenäisessä kohteessa, joka on irrallaan ulkopuolisista toimijoista.

Esimerkkinä voidaan käyttää ilmalämpöpumppua, jossa lämpöenergia tuotetaan ilmaa hyväksikäyttäen pumpun avulla. Pumppu tarvitsee toimiakseen sähköenergiaa, joka taas voidaan tuottaa itsenäisesti esimerkiksi aurinkopaneelien avulla. Omavarainen tuotanto ei kuitenkaan sulje pois mahdollisuutta, jossa pumpun tarvitsema sähköenergia ostetaankin ulkopuoliselta toimijalta.

Seuraavissa kappaleissa on pyritty tuomaan esille lyhyesti peruskäsitteet ja toimintaperiaatteet eri lämpöenergian omavaraisista tuotantotavoista ja varastoinneista, paneutumatta syvällisemmin niiden teoriaan.

#### 3.1 Lämmitys lämpöpumpuilla

Olipa kyseessä sitten ilma-ilmalämpöpumppu, ilma-vesilämpöpumppu, poistoilmalämpöpumppu tai maalämpö, toimintaperiaate on sama. Nimensä mukaisesti lämpöpumppu siirtää ilmasta tai maasta saatavan lämpöenergian rakennuksen lämmitysjärjestelmään.

Lyhyesti kuvattuna lämpöpumpun toiminta perustuu järjestelmässä kiertävään kylmäaineeseen, joka ilmasta tai maasta siirtyvän lämmön ansiosta höyrystyy. Höyrystynyt aine kuumennetaan entisestään puristamalla se pienempään tilaan kompressorilla ja ohjataan sitten lauhduttimen läpi. Lauhduttimessa kylmäaine luovuttaa lämpöenergiaa rakennuksen lämmitysverkkoon, muuttuen taas nesteeksi. Lopuksi kylmäaine palaa höyrystimeen paineentasausventtiilin kautta [2].

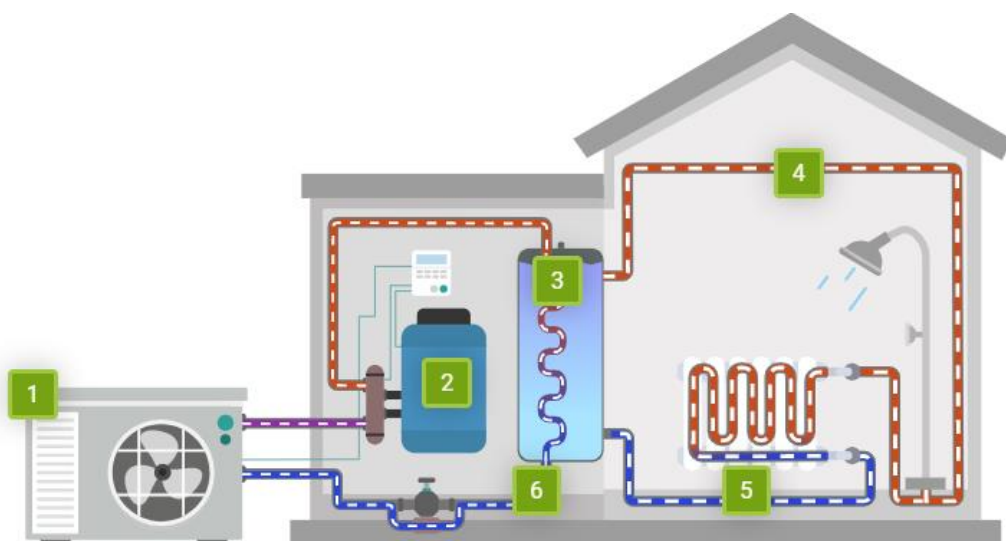
### 3.1.1 Ilma-vesilämpöpumppu

Riippuen lämpöpumpusta ja kohteesta, ilma-vesilämpöpumppu voi toimia joko rakennuksen pää- tai tukilämmönlähteenä. Käytännössä päälämmönlähteenä käytettäviä lämpöpumppeja ovat maalämpö ja ilma-vesilämpöpumppu.

Ilma-vesilämpöpumppujärjestelmä kytketään rakennuksen vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään, jossa se lämmittää järjestelmässä kiertävää vettä sekä haluttaessa myös käyttövettä. Kuvassa 1 on esitetty GreenMatch verkkosivustolta saatu periaatekuva ilma-vesilämpöpumppujärjestelmän toiminnasta [3].

Lämmitysjärjestelmän toiminta alkaa numerolla yksi merkitystä ilmavesilämpöpumpusta, jonka avulla ulkoilmasta saatava lämpö siirretään piirissä kiertävään kylmäaineeseen, aikaansaaden sen höyrystymisen. Jotta piirissä kiertävän kylmäaineen lämpötila saataisiin riittävän kuumaksi, sitä nostetaan kompressorilla tuotetun paineen avulla (numero 2).

Kompressorin jälkeen höyrystynyt kylmäaine kulkeutuu putkia pitkin lämminvesivaraajaan (numero 3), lämmittäen tämän sisällä olevaa käyttövettä tai patteriverkoston vettä. Lämmitetty vesi kierrätetään rakennuksen patteriverkoston läpi (numero 4), jossa se luovuttaa lämpöä huoneilmaan ja palaa viilentyneenä paluulinjaa pitkin takaisin varaajaan (numero 5). Mikäli varaajassa oleva vesi on lämmintä käyttövettä, johdetaan se putkilla rakennuksen käyttövesipisteille (numero 4). Lopuksi viilentynyt ja takaisin nestemäiseksi muuttunut kylmäaine palaa paluupiiriä pitkin takaisin ulkona sijaitsevalle lämpöpumpulle, josta prosessi alkaa alusta (numero 6).



**Kuva 1.** Ilma-vesilämpöpumpun toimintaperiaate [3].

Vaikka ilma-vesilämpöpumppu soveltuukin rakennuksen päälämmitysjärjestelmäksi, saattaa se monesti kylmimpinä talvikausina etenkin pohjoisissa olosuhteissa tarvita tukilämmityksen rinnalleen. Yleensä tämä toteutetaan käyttäen pumpun omia sähkövasuksia, mutta vanhemmissa kohteissa on myös mahdollista toteuttaa tukilämmitys esimerkiksi olemassa olevan öljy- tai puulämmityksen avulla.

Yhä useammassa rakennuksessa sisäilman lämmittämisen lisäksi tilojen viilentäminen on alkanut olla toivottu ominaisuus, joka on myös ilma-vesilämpöpumpulla mahdollista. Viilennystilanteessa järjestelmä toimii samankaltaisesti kuin lämmitystilanteessa, mutta vain käänteisesti. Tällä tarkoitetaan sitä, että viilennettäessä tilaa, lämmön luovuttamisen sijasta järjestelmässä kiertävä neste kerää lämmön sisäilmasta itseensä ja lämpö luovutetaan lämpöpumpun avulla ulkoilmaan. Toiminta kuitenkin edellyttää järjestelmältä tähän kykenevää kompressoria ja järjestelmäsäätöä sekä mahdollisesti kylmävesivaraajaa viilennyksen tehostamiseksi. Vaikka siis järjestelmä itsessään kykeneekin sisäilman viilennykseen, saattaa sen käyttöönotosta aiheutua lisäkustannuksia.

Laajojen käyttömahdollisuuksiensa vuoksi ilma-vesilämpöpumppu onkin melko yleinen vaihtoehto etsittäessä säästöjä vanhojen rakennusten lämmityskustannuksiin. Lisäksi sen investointikustannukset saattavat etenkin pienissä kohteissa olla huomattavasti suotuisammat verrattuna maalämpöön, joka vaatii vaakaputkistot tai lämpökaivon [2].

### **3.1.2 Poistoilmalämpöpumppu**

Poistoilmalämpöpumpun (PILP) toiminta perustuu rakennuksen poistoilmasta saatavaan lämpöenergiaan. Tätä lämpöenergiaa voidaan hyödyntää tuloilman, vesikiertojärjestelmän veden tai lämpimän käyttöveden lämmittämisessä. Järjestelmän toiminnan sekä saavutettavan hyödyn kannalta onkin siis tärkeää huomioida, että rakennuksen poistoilmavirtauksen on oltava jatkuvaa sekä riittävän tehokasta. Koska poistoilmapumpun toiminta on riippuvainen poistuvan ilman lämpöenergiasta, tarvitsee se toimiakseen jonkin tukilämmitysmuodon, jotta riittävä lämmitysenergia voidaan taata vuoden ympäri. Toiminnallisuuden sekä korkeiden investointikustannusten vuoksi poistoilmalämpöpumpun voidaankin katsoa olevan kannattava vaihtoehto lähinnä matalaenergisissä uudisrakennuksissa, sekä joissakin saneerattavissa kerrostaloissa.

### 3.1.3 Ilma-ilmalämpöpumppu

Suomessa hyvin useasti kuulee puhuttavan ilma-ilmalämpöpumpuista hieman virheellisesti, käyttäen niistä nimitystä ilmalämpöpumppu (ILP). Käytännössä kuitenkin termi ilmalämpöpumppu on pääkategoria, joka pitää sisällään niin ilma-ilmalämpöpumput, ilma-vesilämpöpumput kuin poistoilmapumput. Kaikissa näissä tapauksissa lämmön lähteenä käytetään siis ilmaa.

Toisin kuin muut lämpöpumppuratkaisut, ilma-ilmalämpöpumppu ei sovellu rakennusten päälämmönlähteeksi, sillä kovilla pakkasilla lämmitysteho heikkenee huomattavasti ja tällöin ilmaa joudutaan lämmittämään esimerkiksi pumpuissa olevien sähkövastusten avulla. Toisena syynä on se, että ilma-ilmalämpöpumpun toiminta perustuu sisäilmaan puhallettavaan lämpimään ilmaan, jonka avulla tila lämpenee. Näin ollen sitä ei voida käyttää rakennuksen lämpimän käyttöveden lämmitykseen.

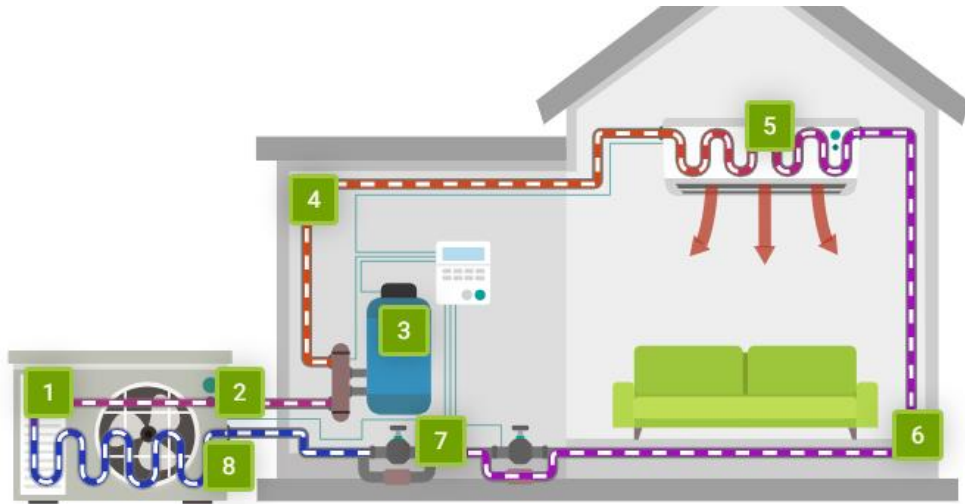
Vaikka ilma-ilmalämpöpumppu ei sovellu rakennuksen päälämmönlähteeksi, käytetään niitä hyvin yleisesti tukilämmitysmuotona esimerkiksi vanhoissa sähkö- tai puulämmitteissä taloissa. Niiden suurena etuna voidaan katsoa olevan halvat investointikustannukset, yksinkertainen asennustapa sekä viilennysominaisuus.

Mikäli lämmityskohde koostuu useista huoneista, yhtä ulkoyksikköä kohden on mahdollista olla yksi tai useampi sisäyksikkö, joiden avulla kohteen lämmitys tai viilennys kyettään hoitamaan tehokkaammin. Parhaiten ilma-ilmalämpöpumppu toimii avoimissa tiloissa, joissa puhallettava lämmin ilma pääsee leviämään tasaisesti koko tilaan.

Ilma-ilmalämpöpumppujärjestelmän toimintaperiaatetta on pyritty havainnollistamaan tarkemmin kuvan 2 avulla, johon on numeroin merkitty järjestelmän toiminnan kannalta keskeisimmät laitteet sekä prosessit [3].

Niin kuin ilma-vesilämpöpumpun tapauksessa, myös ilma-ilmalämpöpumpun toiminta alkaa järjestelmän ulkoyksiköstä, jonka avulla ulkoilmasta saatava lämpö siirretään piirissä kiertävään kylmäaineeseen (numero 1), aikaansaaden sen höyrystymisen (numero 2). Jotta piirissä kiertävän kylmäaineen lämpötila saataisiin riittävän kuumaksi, sitä nostetaan kompressorilla tuotetun paineen avulla (numero 3).

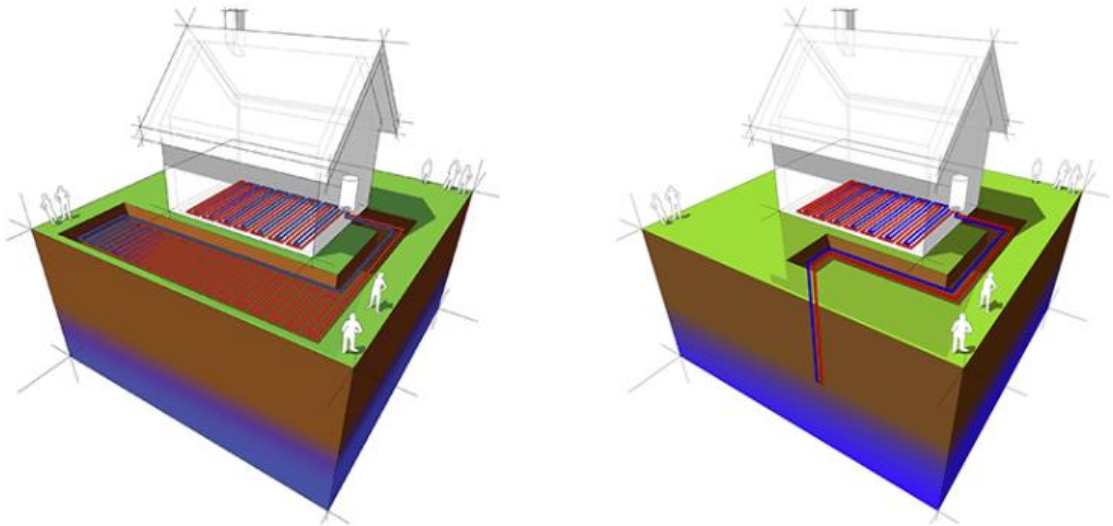
Kompressorin jälkeen höyrystynyt kylmäaine kulkeutuu putkia pitkin lämmitettävässä tilassa sijaitsevalle sisäyksikölle, jonka lauhduttimen sekä puhaltimien avulla kylmäaineen luovuttama lämpöenergiaa siirretään huoneilmaan (numero 5). Lopuksi nestemäiseksi muuttunut kylmäaine kulkeutuu paluulinjaa pitkin (numero 6) paisuntaventtiilin kautta (numero 7) takaisin ulkoyksikölle (numero 8).



*Kuva 2. Ilma-ilmalämpöpumpputjärjestelmän toimintaperiaate [3].*

### 3.1.4 Maalämpö

Maalämmön toiminta perustuu kallioon, maaperään tai vesistöön varastoituneeseen lämpöenergiaan, joka siirretään keruujärjestelmän avulla lämmittämään rakennuksen vesikiertoista lämmitysjärjestelmää. Maalämpöjärjestelmän peruseriaate ei siis eroa aiemmin käsitellyjen ilmalämpöpumpputjärjestelmien toimintaperiaatteesta; lämmön lähde vain on eri. Lämmön keruuta varten rakennettava keruujärjestelmä voidaan toteuttaa joko vaakatasoon asennetulla putkistolla tai niin kutsutun lämpökaivon avulla (Kuva 3).



*Kuva 3. Havainnekuva maalämmön maakeruuputkistosta (vasen) sekä lämpökaivosta (oikea) [4].*

Maalämmön keräystapaan vaikuttaa suuresti asennuskohteen sijainti, ympäristö, tontin koko sekä muut alueesta tai kunnasta mahdollisesti johtuvat rajoitteet. Sanomattakin on

selvää, että esimerkiksi vaakatasoon asennettavaa keräysjärjestelmää ei voida asentaa veteen, mikäli asennuskohde ei sijaitse vesistön lähellä.

Keruutavoista etenkin lämpökaivoratkaisut ovat hyvin yleisiä, koska ne soveltuvat hyvin pienillekin tonteille. Lisäksi lämpökaivoratkaisu on helposti toteutettavissa saneerauskohteissa, koska poraustyö tehdään pystysuunnassa eikä vaakakaivuulle ole tarvetta toisin kuin maakeruuputkistossa.

Lämpökaivon porauksen hintaan vaikuttaa porataanko reikä kallioon vai maahan. Maahan poratessa porausreikään täytyy asentaa suojaputki pitämään reikä auki, sekä estämään pintavesien pääsy pohjavesiin. Tämän vuoksi etenkin savimaisilla syrjäkohteilla vaakaputkisto saattaa olla kannattavampi asennusratkaisu.

Erilaisten maalämpöputkistojen tuottaman energian vertailuun käytetään yksikköä *kWh/m/a*, josta monesti puhekielessä käytetään ilmaisua: lämpöenergiaa putkimetrille vuodessa. Tyypillisesti vesikeruuputkistosta saatava energia on 70-80 kWh/m/a, lämpökaivosta 100 kWh/m/a ja maakeruuputkistosta savimaalla 30-60 kWh/m/a sekä hiekka- maalla 0-40 kWh/m/a. Etenkin maakeruuputkistossa kohteen maantieteellisellä sijainnilla on suuri merkitys, sillä maanpintaan varastoituvan lämpöenergian määrä on huomattavasti suurempi Etelä-Suomessa, verrattuna Pohjois-Suomeen.

Toisin kuin muissa lämpöpumppu ratkaisuisissa, maalämpöjärjestelmän rakentamista varten tarvitsee hakea maankäyttö- ja rakennuslain mukaista toimenpidelupaa. Lisäksi maalämpörakentamiselle voidaan asettaa rajoituksia pohjavesialueella ympäristönsuojelulain sekä vesilain nojalla. Näin ollen maalämpöön siirryttäessä tulee aina olla yhteydessä kunnan rakennusvalvontaan [5].

### **3.2 Lämminvesivaraajat**

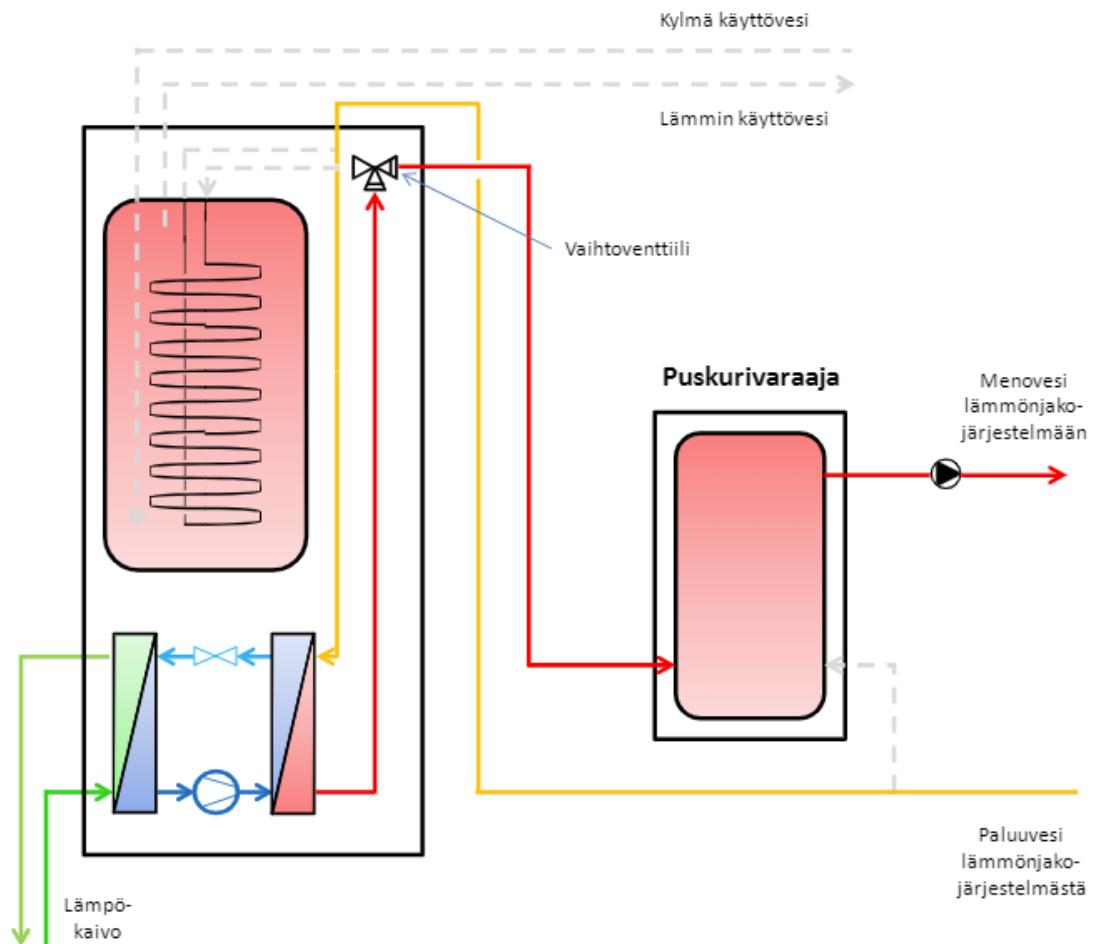
Lämminvesivaraajan tarkoituksena on lämmittää sekä ylläpitää kohteen lämmintä käyttövedettä ja näin ollen sen koko on riippuvainen lämpimän käyttöveden tarpeesta. Pienen teollisuushallin tapauksessa tämän tarpeen voidaan katsoa olevan enimmillään nelihenkisen perheen käyttömäärän verran. Kun oletetaan lämpimän käyttöveden kulutuksen olevan vuorokaudessa 60 litraa henkilöä kohden, saadaan hallin lämminvesivaraajan kooksi 300 litraa.

Puskurivaraajan käytön taustalla puolestaan on lämmönjakojärjestelmässä kiertävän vesimäärään lisäys. Tämä korostuu etenkin lämpöpumppuratkaisuiden yhteydessä. Koska lämmönjakojärjestelmässä virtaavan veden määrä on suhteellisen pieni, kykenee lämpöpumppu lämmittämään sen hyvinkin nopeasti. Tämän seurauksena on/off-pumppujen kompressorit käynnistyvät ja sammuvat useita kertoja päivässä varsinkin kesällä, joka



pitkällä aikavälillä lyhentää kompressorin käyttöikää. Kun vesimäärää piirissä kasvatetaan sopivasti, kompressorin yhtäjaksoinen käyntiaika pitenee ja sen käyttöikä saadaan pidennettyä (Kuva 4).

Näiden lisäksi etenkin vanhoissa saneerauskohteissa on havaittu putkistosta kuuluvaa napsuntaa ja pauketta lämmitysjärjestelmien uusimisen jälkeen. Kuultavien äänien taustalla on käyttövetä lämmittävän kierukan sisällä olevan nesteen siirtyminen lämmitysjärjestelmään hetkellä, jolloin tiloja tarvitsee alkaa lämmittää uudelleen. Kierukassa olevan lämpimän veden siirtyminen huomattavasti viileämpään järjestelmään aikaansaa putkistossa lämpölaajenemisesta syntyviä ääniä. Mikäli järjestelmään on asennettu puskurivaraaja, päätyy venttiilin avautumishetkellä kierukassa oleva lämmin vesi ensin varaajaan, jossa se sekoittuu lämmitysjärjestelmässä kiertävään viileämpään veteen. Näin ollen järjestelmässä ei pääse syntymään äkillisen lämpövaihtelun aiheuttamia ääniä [6].



**Kuva 4.** Periaatekuva puskurivaraajalla varustetusta lämpökaivosta [6].

Mahdollisista kohteeseen tulevista varaajista viimeisimpänä on hyvä käsitellä energia-varaaja. Energiavaraajien tarkoituksena on nimensä mukaisesti varastoida jonkin lämmitystavan avulla tuotettua energiaa myöhemmin käytettäväksi. Yleisimpinä käyttökohteina niille voidaan pitää vanhoja puu, pelletti- tai öljylämmitteisiä rakennuksia, joissa

lämmityskertojen määrä on haluttu saattaa mahdollisimman harvaksi. Tällaisissa tapauksissa varaajien koot ovat monesti saattaneet olla hyvinkin suuria, luokkaa 1500 litraa ja siitä ylöspäin.

Etenkin öljylämmitystä vaihdettaessa lämpöpumppuratkaisuun, monissa kohteissa on herännyt keskustelua vanhojen varaajien hyödyntämisestä uudessa järjestelmässä. Näiden säilyttämisellä ei kuitenkaan voida katsoa olevan hyötyä uuden järjestelmän kannalta, mikäli vanha öljylämmitysjärjestelmä poistetaan kokonaan käytöstä. Erääksi perusteluksi voidaan katsoa lämpöpumpun hyötysuhteen huonontuminen, mikäli pumpulla tuotetaan tarpeettomasti lämpöä.

Tämän vuoksi lämpöpumppujen yhteydessä varastoitavaan energiaan käytetään mieluummin hybridivaraajaa, jonka voidaan katsoa olevan energiavaraajan eräänlainen muoto. Tällöin lämpöpumpun tukena voidaan käyttää esimerkiksi aurinkokeräimiä, sillä hybridivaraajassa eri lämmönlähteistä saatavaa energiaa voidaan hyödyntää samanaikaisesti yhdessä varaajassa, niin käyttöveden kuin lämmitysveden lämmittämiseksi.

## 4. LÄMMITYSRATKAISUT

Takojantien halliin toteutettavan saneerauksen yhteydessä, pohjapinta-alaltaan 720 m<sup>2</sup> halliosa eriytetään omaksi kokonaisuudekseen muusta hallista. Eriyttämisen yhteydessä saneerattu osa irtaantuu isomman hallin lämmitysjärjestelmästä, muodostaen itsenäisen kokonaisuuden.

Irtaantumisen ja uuden lämmitysjärjestelmän toiminnallisuuksien vuoksi saneerattuun halliosaan rakennetaan kaksi uutta teknistä tilaa, joihin lämmityslaitteisto sekä mahdolliset varaajat tullaan sijoittamaan. Näistä suurempi tila sijoittuu korjaushallin yhteyteen ja pienempi alemman kerroksen toimisto-osiin.

### 4.1 Teollisuushallin energiatehokkuuden parantaminen

Vanhojen rakennusten saneerauksissa energiatehokkuuden parantamisella voidaan saavuttaa jo suuria kustannussäästöjä. Korjausinvestoinnit ovat monissa tapauksissa kalliita, mutta niiden kustannusvaikutuksia tulee tarkastella aina pitkän aikavälin sijoituksena. Tämän lisäksi on myös huomioitava, että kaikki rakennuksille tehtävät peruskorjaukset pidentävät niiden käyttöikä, sekä ylläpitävät niiden arvoa.

Energiatehokkuutta parannettaessa puhutaan monesti kahdesta termistä, U-arvo ja E-luku. Näistä ensimmäinen, eli U-arvo on lämmönläpäisykerroin, jolla kuvataan eri rakenteiden lämmöneristyskykyä. U-arvon yksikkö on wattia kelviniä ja neliometriä kohti. Tämä kuvaa sitä, kuinka monta wattia lämpötehoa siirtyy rakenteen läpi, kun sen yli on yhden celsiusasteen tai kelvinin lämpötilaero. Mitä pienempi U-arvo on, sitä parempi on rakenteen lämmöneristyskyky [7]. E-luku puolestaan kuvaa rakennuksen energiamuotojen kertoimilla painotettua ostoenergian laskennallista kulutusta lämmitettyä nettoalaa kohden vuodessa, jonka yksikkö on kWh/(m<sup>2</sup>a) [8].

Taulukkoon 1 on listattu Takojantien hallin rakenteiden alkuperäiset U-arvot ennen saneerauksen aloittamista, sekä perusparannusten avulla saavutettavat uudet arvot. Taulukkoon on myös listattu vertailuarvoiksi uuden asuinrakennuksen vastaavat U-arvot.

**Taulukko 1.** *Takojantien teollisuushallin perusparannuksilla saavutettavat U-arvot sekä ennen saneerausta olevat vastaavat arvot.*

|   | Vanha rakenne<br>U-arvo, W/(Km <sup>2</sup> ) | Uusi rakenne<br>U-arvo, W/(Km <sup>2</sup> ) | Vertailuarvo asuinrakennus<br>uusi, W/(Km <sup>2</sup> ) |
|---|---|--|--|
| <i>Toimiston ulkoseinät</i>                         | 0,325   | 0,25   | 0,17   |
| <i>Toimiston yläpohja</i>                           | 0,257   | 0,132  | 0,09   |
| <i>Toimiston ikkunat</i>                            | 2,7   | 0,8  | 1  |
| <i>Ulko-ovet (käyntiovet)</i>                       | 2   | 1  | 1  |
| <i>Maanvarainen betonilattia 80 mm + 50 mm EPS</i>  | 0,28  | ei muutosta                                  | 0,16   |
| <i>Varasto-osan seinät</i>                          | 0,325   | 0,25   |  |
| <i>Varasto-osan yläpohja</i>                        | 0,257   | 0,132  |  |
| <i>Varasto-osan yläikkunat</i>                      | 2,7   | 1  |  |
| <i>Ulko-ovet (käyntiovet)</i>                       | 2   | 1  |  |
| <i>Maanvarainen betonilattia 200 mm + 50 mm EPS</i> | 0,275   | ei muutosta                                  |  |

Koska tämän diplomityön kannalta olennaista ei ole tarkemmin perehtyä rakenteellisiin muutoksiin ja lukuihin, voidaan katsoa riittäväksi todeta lämmitysenergian kulutuksen laskevan mahdollisten peruskorjausten avulla arvosta 60000 kWh/vuosi arvoon 40000 kWh/vuosi. Käyttöveden lämmittämiseen kuluvaan energiaan voidaan olettaa pysyvän arvossa 5000 kWh/vuosi, sillä korjauksilla ei ole vaikutusta käyttöveden kulutukseen, eikä näin ollen sen lämmittämiseen kuluvaan energiaan.

## 4.2 Lämmitysratkaisuiden toimintaperiaatteet

Hallin lämmitysjärjestelmän runko muodostuu olemassa olevasta vesikiertoisesta patteriverkostosta sekä lämmitysratkaisun mukaan liitettävistä lämminvesi-, puskuri- sekä energiavaraajista. Koska kyseessä on vesikiertoinen lämmönjako, valittavalla lämmitysratkaisulla lämmitetään niin lämmin käyttövesi kuin patteriverkostossa kiertävä neste.

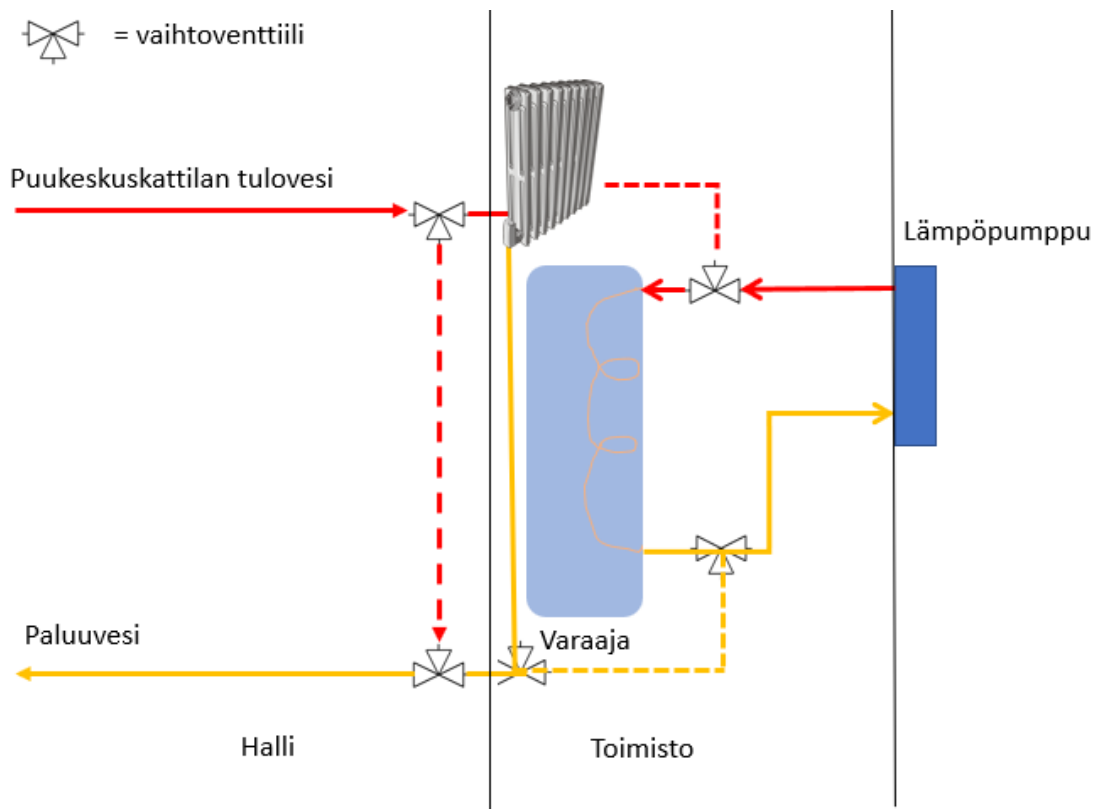
Lämmitysjärjestelmän toiminta, sekä siihen mahdollisesti liitettävät varaajat ovat vahvasti riippuvaisia käytettävästä lämmitysratkaisusta. Tämän vuoksi tarkastelu kannattaa aloittaa puukeskuskattilalla sekä ilma-vesilämpöpumpulla toteutetusta yhteisratkaisusta, koska siinä käytettävien varaajien määrä on suurin.

Tämän toteutuksen taustalla on idea siitä, että hallin lämmitys voidaan tilanteen mukaan jakaa kahteen lämmityspiiriin. Toimistossa huoneilman lämpötilavaatimus on noin 21 astetta ja hallin puolella 17 astetta. Koska lämpötilan ylläpitovaatimus hallin puolella on huomattavasti alhaisempi kuin toimistossa, annetaan lämpötilan sille puolen tarvittaessa viilentyä hetkellisesti enemmän.

Normaalitilanteessa lämmityspiiri on siis yhtenäinen, jolloin korjaushallin teknisessä tilassa sijaitsevalla puukeskustattilalla hoidetaan koko hallin lämmitys. Lämpöenergian varastointia varten korjaushallin tekniseen tilaan sijoitetaan puukattilan lisäksi kaksi isoa,

noin 1800 litran energiavaraajaa, joihin kattilaa lämmittäessä lämpöenergia voidaan varastoida.

Hallin puoleisesta teknisestä tilasta on linja toiseen, toimistotilojen yhteydessä sijaitsevaan pienempään tekniseen tilaan. Tähän tilaan on sijoitettu pienempi, noin 300 litran puskurivaraaja, jossa lämmitetään toimiston lämmin käyttövesi sekä mahdollisesti sen patteriverkossa kiertävä vesi. Tähän pienempään varaajaan on kytketty ilma-vesilämpöpumppu, jonka tehtävä on lämmittää varaajassa oleva käyttövesi säännösten mukaisesti yli 65 asteiseksi riittävän usein (Kuva 5). Lisäksi toimiston ollessa omana piirinään vastaa ilma-vesilämpöpumppu sekä toimiston, että käyttöveden lämmittämisestä.



**Kuva 5.** Puukeskuskattilan ja ilma-vesilämpöpumpun yhteistoimintaa kuvaava havainne piirros

Puukeskuskattilan ja siihen yhdistettyjen isojen energiavaraajien toiminta pohjautuu varaajissa kuumaksi lämmitettyyn veteen, jota kierrättämällä lämmitetään rakennusta. Normaalityössä, jolloin patteriverkostossa kiertävä vesi on esimerkiksi yli 50 asteista, toimisto sekä halliosa ovat yhteistä lämmityspiiriä. Tässä tapauksessa puukeskuskattila vastaa koko rakennuksen lämmityksestä.

Toimistoon menevään linjaan on asennettu lämpötila-anturi, jolla menoveden lämpötilaa valvotaan. Kun veden lämpötila laskee alle halutun asetusarvon, kytkeytyy toimisto irti

isosta lämmityspiiristä omaksi kokonaisuudeksi, jonka lämmityksestä vastaa ilma-vesi-lämpöpumppu.

Isoihin energiavaraajiin lämmitetyllä vedellä jatketaan hallin puolen lämmitystä siihen asti, kunnes hallin lämpötila on laskenut 15 asteeseen. Tämän jälkeen piirille on kolme vaihtoehtoista tapaa toimia.

Lämmityspiiri voidaan yhdistää jälleen yhdeksi kokonaiseksi piiriksi, jonka lämmittämisestä vastaa ilma-vesilämpöpumppu. Tässä tapauksessa isot 1800 litran varaajat kytetään irti järjestelmästä, jotta niihin ei tuhlata pumpulla tuotettua lämpöenergiaa.

Toisena vaihtoehtona on lämmittää energiavaraajissa olevilla sähkövastuksilla niissä olevaa vettä, jonka jälkeen lämmitetyllä vedellä pystytään taas ylläpitämään halliosan lämpötilaa. Päävaraajissa olevien lämmitysvastusten pääasiallisena sähkönlähteenä on tarkoitus käyttää kohteen omavaraista sähköntuotantoa, joka toteutetaan aurinko- tai tuulivoimalla. Mikäli oman tuotannon kapasiteetti ei kuitenkaan ole riittävä, tullaan tarvittava sähkö ottamaan jakeluverkosta. Kolmas vaihtoehto on aloittaa lämmittäminen jälleen puukeskuskattilaa käyttäen.

Jotta edellä esitetyn järjestelmän toiminta olisi mahdollista, täytyy sitä varten hankkia tai suunnitella erillinen ohjausjärjestelmä, jolla piirin toimintaa voidaan halutulla tavalla valvoa ja ohjata. Puukeskuskattilalla toimivan järjestelmän tavoitteena on siis päästä tilanteeseen, jossa isojen energiavaraajien vettä lämmittämällä puukeskuskattilan lämmitysväli saataisiin ajoitettua esimerkiksi kolmen päivän tai jopa viikon jaksolle.

Teollisuushallin toisena lämmitysratkaisuna on toteuttaa hallin lämmitys maalämmön tai vesi-ilmalämpöpumpun avulla. Toisin kuin puulämmitteisessä ratkaisussa, maalämpöjärjestelmään ei ole kannattavaa kytkeä isoja varaajia, vaan toteuttaa tilojen lämmitys suoraan lämpöpumpulla. Tässä tapauksessa maalämpöpumpun rinnalle asennetaan 300 litran lämminvesivaraaja hallin käyttöveden lämmittämistä varten, sekä vähintään 300 litran puskurivaraaja. Puskurivaraajan avulla tarkoitus on muun muassa pidentää lämpöpumpun käyttöikää järjestelmän vesimäärää kasvattamalla, jolloin pumpun yksittäisiä käyntijaksoja saadaan pidennettyä. Puskurivaraajan toimintaa ja hyötyjä käsiteltiin aiemmin tässä työssä luvussa 3.

### 4.3 Lämmitysratkaisuiden vertailu ja investointikustannukset

Hallin lämmitysratkaisuiksi valikoitui omavaraisuuden perusteella kaksi pääsuuntaa, puulämmitys sekä lämpöpumput. Investoinnin kannattavuuden pohjalta näitä järjestelmiä verrataan toisiinsa niin vuotuisten, kuin investointikustannusten kautta.

Puulämmitteisen järjestelmän vuotuiset kustannukset koostuvat pääosin poltetun puun määrästä, kun taas lämpöpumpun tapauksessa ne koostuvat sähköenergian kulutuksesta. Lämpöpumppujen sähköenergiankulutusta on arvioitu eri lämpöpumpuille määriteltyjen SPF-lukujen avulla hyödyntäen kaavaa (1) [9]. SPF-luku kuvaa sitä, kuinka paljon lämpöenergiaa lämpöpumppu kykenee tuottamaan, suhteessa lämpöpumpun käyttämään energiaan vuodessa.

$$W_{LP,lämmitys} = \frac{Q_{LP,lämmitys,tilat}}{SPF_{tilat}} + \frac{Q_{LP,lämmitys,LKV}}{SPF_{LKV}} \quad (1)$$

jossa,

$SPF_{tilat}$  on pumpun SPF luku tilojen lämmityksessä

$SPF_{LKV}$  on pumpun SPF luku käyttöveden lämmityksessä

$Q_{LP,lämmitys,LKV}$  on pumpun tuottama lämpöenergia käyttöveden lämmittämiseen

$Q_{LP,lämmitys,tilat}$  on pumpun tuottama lämpöenergia tilojen lämmittämiseen

$W_{LP,lämmitys}$  on lämpöpumpun sähköenergian kulutus

Koska tarkkoja laitekohtaisia SPF-lukuja ei ollut saatavilla laskelmia tehtäessä, on arvoina käytetty ympäristöministeriön energialaskentaoppaassa määritettyjä SPF arvoja. Näistä arvoista tämän työn kannalta tärkeimmät on listattu taulukkoon 2 [9]. Käytännön tilanteessa lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötila vaihtelee vuodessa 30-60 °C välillä, riippuen vuodenaajoista sekä lämmityksen säädöistä. Tässä työssä on kuitenkin katsottu saatavan riittävän tarkka arvio pumppujen kuluttamasta energiasta, olettamalla menoveden lämpötilaksi 40 °C.

**Taulukko 2.** SPF arvot eri menoveden lämpötiloilla maalämpö-, ilma-vesi- ja ilma-ilmaalämpöpumpuille [9].

|                  | $SPF_{tilat}$ Maalämpö | $SPF_{tilat}$ Ilma – vesi | $SPF_{tilat}$ Ilma – Ilma |
|------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Menovesi 30 °C   | 3,4                    | 2,8                       | -                         |
| Menovesi 40 °C   | 3                      | 2,5                       | -                         |
| Menovesi 60 °C   | 2,5                    | 2,1                       | -                         |
| Käyttövesi 60 °C | 2,3                    | 1,6                       | -                         |
| Ilma-ilma        | -                      | -                         | 2,8                       |

Taulukkoon 3 on kerätty lasketut arviot lämpöpumppuja sisältävien lämmitysratkaisuiden sähköenergian kulutuksesta vuodessa. Laskenta on suoritettu käyttäen kaavaa (1), sekä taulukon 2 SPF lukuja peruskorjatulle sekä alkuperäiskuntoiselle hallille.

**Taulukko 3.** *Tilojen sekä lämpimän käyttöveden lämmittämiseen vaadittava sähköenergia vuodessa eri lämmitysratkaisuilla.*

|  | Lämpöenergia 65000 kWh | Lämpöenergia 45000 kWh |
|--|------------------------|------------------------|
| <i>Maalämpö</i>                                | 22174 kWh              | 15507 kWh              |
| <i>Ilma-vesilämpöpumppu</i>                    | 27125 kWh              | 19125 kWh              |
| <i>Maalämpö + ilma-vesilämpöpumppu</i>         | 23725 kWh              | 16858 kWh              |
| <i>Puukeskuskattila + ilma-vesilämpöpumppu</i> | 6725 kWh               | 5525 kWh               |

Taulukossa 3 esitettyjä sähköenergian kulutuksia hyödyntäen on taulukkoon 4 laskettu lämmittämiseen kulutetusta energiasta aiheutuvat vuosikustannukset eri lämmitysratkaisuilla. Laskennassa ostosähkölle on käytetty hintaa 14 snt/kWh ja ostetulle puulle hintaa 60 € pinokuutiometrille.

**Taulukko 4.** *Tilojen sekä lämpimän käyttöveden lämmittämisestä aiheutuvat kustannukset vuodessa eri lämmitysratkaisuilla.*

|  | Lämpöenergia 65000 kWh | Lämpöenergia 45000 kWh |
|--|------------------------|------------------------|
| <i>Maalämpö</i>                                | 3 104 €                | 2 171 €                |
| <i>Ilma-vesilämpöpumppu</i>                    | 3 798 €                | 2 678 €                |
| <i>Maalämpö + ilma-vesilämpöpumppu</i>         | 3 322 €                | 2 360 €                |
| <i>Puukeskuskattila</i>                        | 2 600 €                | 1 800 €                |
| <i>Puukeskuskattila + ilma-vesilämpöpumppu</i> | 2 982 €                | 2 134 €                |

Vuodessa poltetun puun määrä on laskettu kaavan (2) avulla, jossa poltettavan puun on katsottu olevan energiasisällöltään 1,5 MWh/pinokuutiometrin koivuhalkoa [10].

$$\text{Poltetun puun määrä} = \frac{Q_{\text{Lämmitys}}}{Q_{\text{puu}}} \quad (2)$$

jossa,

$Q_{\text{lämmitys}}$  puulämmityksellä tuotetun lämpöenergian määrä  
 $Q_{\text{puu}}$  puun energiasisältö

Lisäksi yhdistelmätilanteissa (esimerkiksi puukeskuskattila ja ilma-vesilämpöpumppu), lämpöpumpun on oletettu tuottavan yksin lämpöenergia toimistotilojen sekä lämpimän käyttöveden lämmittämiseen. Tarkempia laskelmia varten piirin toimintaa tulisi tarkastella syvällisemmin tai tehdä karkeita oletuksia siitä, kuinka useasti toimistot ovat irrallaan isommasta lämmityspiiristä. Laskelmat kokonaisuudessaan peruskorjaamattomalle hallille on esitetty liitteessä 2 ja peruskorjatulle hallille liitteessä 3.



Aiemmin esitetyistä laskelmista voidaan havaita, että teollisuushalliin tehtävillä perusparrannuksilla on merkittävä vaikutus ostoenergian määrään sekä tätä kautta vuosikustannuksiin. Taulukossa 5 on esitetty eri lämmitysratkaisuille lasketut ostoenergian kustannukset 15 vuoden pitoajalla, sekä kuinka paljon säästöjä pitoaikana voidaan saavuttaa peruskorjausten ansiosta kullekin lämmitysratkaisulle.

**Taulukko 5. Peruskorjauksen vaikutus lämmitysratkaisuiden ostoenergiasta aiheutuviin kustannuksiin 15 vuoden pitoajalla.**

|                                     | Ostoenergian kustannukset<br>15 vuodessa |
|-------------------------------------|--|
| Maalämpö 65000 kWh/a                | 46 565 €                                 |
| Maalämpö 45000 kWh/a                | 32 565 €                                 |
| <b>Kustannus ero</b>                | <b>14 001 €</b>                          |
| <br>                                |  |
| Ilma-vesilämpöpumppu<br>65000 kWh/a | 56 963 €                                 |
| Ilma-vesilämpöpumppu<br>45000 kWh/a | 40 163 €                                 |
| <b>Kustannus ero</b>                | <b>16 800 €</b>                          |
| <br>                                |  |
| Puukeskuskattila 65000<br>kWh/a     | 39 000 €                                 |
| Puukeskuskattila 45000<br>kWh/a     | 27 000 €                                 |
| <b>Kustannus ero</b>                | <b>12 000 €</b>                          |

Perusparrannukset ovat siis suositeltava vaihtoehto esimerkkikohteeseen, koska niillä saavutettavia säästöjä voidaan pitää merkittävänä rahallisesta sekä ekologisesta näkökulmasta katsottuna.

Jotta lämmitysratkaisuiden vuotuisia kustannuksia pystyttäisiin tarkastelemaan kokonaisuudessaan, kunkin lämmitysratkaisun kokonaisinvestointikustannukset on jaettu 15 vuoden pitoajalle (Taulukko 6). Investoinnin lisäksi vuotuisiin kustannuksiin on otettu mukaan lämmittämisestä aiheutuva ostoenergian kustannus, joka koostuu sähkönkulutuksesta tai poltettavasta puusta. Ostoenergian kustannukset on saatu taulukosta 4, käyttäen lämpöenergian vuosikulutuksena arvo 45000 kWh.

**Taulukko 6.** Eri lämmitysratkaisuiden kustannukset 15 vuoden pitoajalla, kun lämpöenergian tarve on 45000 kWh [11].

|                      | Investointikustannus | Ostoenergian kustannukset<br>15 vuodessa (sähkö/puu) | Kustannukset<br>yhteensä | Kustannukset<br>vuodessa |
|----------------------|----------------------|--|--------------------------|--------------------------|
| Maalämpö             |                      |  |                          |                          |
| - poraukset          |                      |  |                          |                          |
| - laitteisto         |                      |  |                          |                          |
| - asennukset         | 35 000 €             | 32 565 €   | 67 565 €                 | 4 504 €                  |
| Ilma-vesilämpöpumppu |                      |  |                          |                          |
| - laitteisto         |                      |  |                          |                          |
| - asennukset         | 15 000 €             | 40 163 €   | 55 163 €                 | 3 678 €                  |
| Puukeskuskattila     |                      |  |                          |                          |
| - piippu             |                      |  |                          |                          |
| - lämmityskattila    |                      |  |                          |                          |
| - asennukset         |                      |  |                          |                          |
| - varaajat           | 15 000 €             | 27 000 €   | 42 000 €                 | 2 800 €                  |

Käytettävä tarkastelujakso perustuu järjestelmien käyttöikään, joka ilma-vesilämpöpumpun tapauksessa on noin 15 vuotta ja maalämpöpumpun tapauksessa noin 20 vuotta. Vastaavasti puukeskuskattilalle pitoajan voidaan katsoa olevan noin 30 vuotta. Vuotuisiin kustannuksiin lämpöpumpuilla ei ole huomioitu mahdollisia huoltokustannuksia, jonka vuoksi myös puulämmityksen huoltotoimenpiteet sekä mahdollisesti 10 vuoden kohdalla tehtävästä arinan vaihdosta aiheutuneet kustannukset on jätetty huomiotta laskennassa.

Lasketuista vuosikustannuksista voidaan huomata puulämmitteisen järjestelmän olevan huomattavasti edullisempi vaihtoehto lämpöpumppuihin verrattuna. Sen suurimpana heikkoutena voidaan kuitenkin katsoa olevan sen käytön hankaluus sekä mahdollisesti lämmittämättä jätetyistä kerroista aiheutuneet ostosähkön kustannukset, jotka aiheutuvat varaajissa olevien lämmitysvastuksien käytöstä. Näin ollen puulämmitteisen järjestelmän todellisten vuosikustannusten voidaan uskoa käytännössä olevan korkeammat kuin taulukossa 6 on arvioitu.

#### 4.4 Lämmityksestä aiheutuvat päästöt

Kun puhutaan polttamisesta, on hyvä muistaa, että siitä syntyy aina ilmansaastetta. Puulämmityksen näkökulmasta tarkasteltaessa tällä tarkoitetaan muun muassa palamisesta syntyviä pienhiukkasia sekä mustaa hiiltä.

Polttamisessa syntyviksi pienhiukkaskiksi katsotaan kuuluvan alle 2,5 mikrometrin halkaisijan omaavat hiukkaset, joilla on ihmisten terveydelle haitallisia vaikutuksia. Toisin sanoen pienhiukkasten lisääntyvä määrä heikentää tarkastelualueen ilmanlaatua.

Mustan hiilen vapautumisella puolestaan on katsottu olevan ilmaston lämpenemiseen vaikuttava ominaisuus, sillä se imee itseensä auringosta tulevaa säteilyenergiaa. Näiden

hiilipäästöjen kulkeutumisella jäätiköille voidaan myös katsoa olevan nopeuttava vaikutus jäätiköiden sulamista ajatellen.

Päästöjä voidaan kuitenkin pyrkiä minimoimaan esimerkiksi oikeanlaisella polttamisella. Puunpolton kannalta tämä tarkoittaa siis sitä, että poltettavan puun tulisi olla kuivaa ja puhdasta, eikä sitä saisi polttaa liian pienellä ilmamäärällä, josta käytetään myös nimeä kitupoltto. Mikäli poltto ei tapahdu oikein, savu on tummasävytteistä ja monesti kitkerän hajuista, jolloin syntyvien päästöjen määrät ovat myös suuremmat [12].

Voidaankin siis todeta, että ekologisuutta ja ympäristöä silmällä pitäen puun polttamiseen pohjautuvaa lämmitysratkaisua ei voida pitää täysin päästöttömänä. Vaikkakin verrattuna fossiilisten polttoaineiden polttamiseen, on se huomattavasti ekologisempi vaihtoehto.

Lämpöpumppujen osalta lämmityksestä aiheutuvien päästöjen syntyminen ei ole niin yksinkertaista, sillä päästöt syntyvät muualla kuin itse kohteessa. Tämä johtuu siitä, että itse lämpöpumpun ei voida katsoa tuottavan ympäristöön saastetta, vaan sen mahdollinen syntyminen tapahtuu pumpulle sähköä tuottaneessa sähköntuotantolaitoksessa.

Kohteessa vaikuttavana tekijänä on siis vain pumpun kuluttama sähkö, jonka kulutukseen vaikuttaa kohteen energian kulutus. Tästä esille voidaan nostaa esimerkiksi turhien päästöjen osalta hukkalämmön tuottaminen. Nämä seikat vaikuttavat kuitenkin myös kaikkiin muihin lämmitysmuotoihin, eikä näin ollen voida vedota pelkästään lämpöpumpuihin.

## 4.5 Lämmitysratkaisuiden yhteenveto

Luvussa 4 lasketusta ja esitetyistä tuloksista voitiin havaita puukeskuslämmitteisen järjestelmän olevan vuosikustannuksiltaan halvin ratkaisu verrattuna lämpöpumppuratkaisuihin. Lisäksi piirin toiminnan kannalta merkittävänä huomiona voidaan pitää sitä, ettei hallin osia kannata erottaa erilaisiksi piireikseen muussa, kuin puukeskuskattilan tapauksessa tai kesäaikaan. Tällöin vuotuiset lämmityskustannukset puukeskuskattilalla jäävät hieman alle maalämpöjärjestelmän kustannusten.

On kuitenkin hyvä muistaa, että edellä esitetyjä tuloksia voidaan pitää vain suuntaa antavina ja lopullisten järjestelmien mitoituksessa on huomattavasti enemmän huomioitettavia seikkoja.

Lämmitysjärjestelmien mitoituksen kannalta voidaan yleisesti todeta, että etenkin teollisuusrakennuksille on hyvin vaikeaa mitoittaa kaikkia käyttötarkoituksia riittävästi palveleva lämmitysratkaisu, jota ei siis tarvitsisi muuttaa aina toiminnan vaihtuessa.

Edellä esitetyissä luvuissa muun muassa maalämmölle mainitun järjestelmätehon 20 kW voidaan arvioida riittävän hallin ympärivuotiseen lämmittämiseen, silloin kun tiloihin ei tuoda useasti sisäilmaa viilentäviä esineitä. Tällaista toimintaa voidaan katsoa olevan esimerkiksi autokorjaamoilla, joissa rakennukseen tuodaan pakkasessa seissectä ajoneuvoja. Kun kylmä ajoneuvo tuodaan pakkasilmasta lämpimään sisätilaan, sen voidaan katsoa viilentävän ympärillään olevaa sisäilmaa useiden tuntien ajan. Tämä voi siis johdtaa siihen, että mitoitettun lämmitysjärjestelmän lämmöntuotantokyky ei enää riitä etenkin kovilla pakkasilla.

Sisätiloihin tuotavien kylmien materiaalien aiheuttamaa vaikutusta hallin lämmitykseen on pyritty minimoimaan Takojantiellä niin sanotulla sulatustilalla, johon kylmä auto tuodaan ensin. Näin saadaan minimoitua kylmän ilman vaikutus muuhun halliosaan ja halliosan lämpötila voidaan säätää halutunlaiseksi.

Hallin lämmitykseen vaikuttaa myös nosto-ovien avaaminen useita kertoja päivässä. Kylmän ilmassa tunkeutumista sisätiloihin pyritään toki monesti, niin kuin tämänkin hallin osalta, estämään ovien yläpuolille asennettavilla puhaltimilla. Puhaltimen käyttö edellyttää kuitenkin toimiakseen sähköä, joten sen jatkuva käyttö tulee näkymään lisääntyneenä kulutuksena sähkölaskun puolella.

Näiden seikkojen lisäksi rakennuksen ilmanvaihdolla ja monissa tapauksissa sen lämmöntalteenotolla on suuri merkitys. Tilanteessa, jossa ilmanvaihdon voidaan katsoa olevan hyvin nopeaa saattaa syntyä helposti hukkalämpöä, mikäli sinne ei ole asennettu lämmöntalteenottojärjestelmää. Kohteen käyttötarkoituksella on siis suuri merkitys lämmitysratkaisun suunnittelun osalta [11].

## 5. AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄ

Aurinkosähköjärjestelmän toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön, jossa auringosta saatava säteilyenergia muunnetaan aurinkokennojen avulla sähköenergiaksi. Aurinkokennot ovat tyypillisesti pieniä, puolijohdemateriaaleista valmistettuja laitteita. Kun yksittäistä kennoa valaistaan, aikaansaadaan siitä valosähköisellä ilmiöllä ulos jännite, jonka suuruus on luokka 0,5 V. Jotta yksittäisestä kennosta saatavaa jännitettä voitaisiin hyödyntää käytännössä, kytketään näitä yleensä 30-70 kappaletta sarjaan riittävän suuren jännitteen saavuttamiseksi. Kun kennojen sarjankytkentä liitetään yhteen metallikehyksen kanssa, jonka päälle asennetaan lasi suojaamaan kennoja, muodostuu tästä niin kutsuttu aurinkopaneeli.

Samaa periaatetta noudattamalla kuin kennojen kohdalla, kytkettäessä useampi aurinkopaneeli joko sarjaan tai rinnan, saadaan niistä muodostettua niin kutsuttu aurinkopaneelisto. Tästä muodostelmasta saadaan paneelien määrästä ja kytkentätavasta riippuen tietyn suuruista tasajännitettä, joka voidaan invertterin avulla vaihtosuunnata ja hyödyntää vaihtosähköä käyttävissä laitteissa [13].

### 5.1 Aurinkosähköjärjestelmän lupamenettely ja verovelvollisuus

Aurinkosähköjärjestelmien osalta maankäyttö- ja rakennuslakia on muutettu vuonna 2017, jonka myötä toimenpidelupa tarvitaan sellaisiin aurinkopaneeli- ja keräinjärjestelmiin, joiden katsotaan merkittävästi vaikuttavan kaupunkikuvaan tai ympäristöön [14]. Vaikka edellä esitetyn perusteella voidaan katsoa aurinkopaneeli- ja keräinjärjestelmien olevan vapautettu toimenpide- ja rakennusluvasta, on lupamenettelyt aina hyvä varmistaa oman kunnan rakennusvalvonnasta.

Verkkoon liitettävien järjestelmien osalta voidaan yleisesti todeta, että 230 V vaihtojännitöiden tekeminen edellyttää aina oikeanlaisia sähkötyölupia. Tämän lisäksi järjestelmälle on tehtävä käyttöönottotarkastus ja pääsulakekoon ollessa yli 35 A myös ulkopuolisen yrityksen tekemä varmennustarkastus [15].

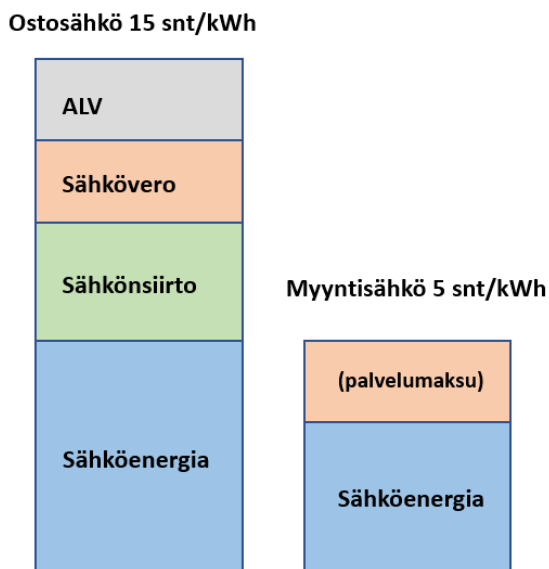
Verotuskäytäntöjen osalta yritys- ja yhteisöverotuksessa sähkön tuotannon verotuksesta on säädetty seuraavan suuntaisesti: voimalaitokset, joiden nimellisteho on enintään 100 kVA luetaan mikrovoimalaitoksiksi ja täten vapautettu kaikista sähköverotuksen velvollisuuksista. Tuottajan ei siis tarvitse rekisteröityä verovelvolliseksi, eikä antaa sähköntuotannosta veroilmoitusta [16].

## 5.2 Netotusmallin vaikutus omavaraisessa sähköntuotannossa

Niin aurinkosähköjärjestelmän kuin minkä tahansa muun sähkö- tai lämpöenergiaa tuottavan järjestelmän mitoittamisen perustana on se, kuinka paljon energiaa kulutetaan ja milloin. Omavaraisessa tuotannossa idea on siis tuottaa energiaa mahdollisimman lähelle oman tarpeen.

Sähköverkkoon kytketyillä tuotantojärjestelmillä on mahdollista myydä ylituotettu sähkö verkkoon. Täysin ylimitoitettun tuotannon ylijäämäsihköön myynnin ei kuitenkaan voida katsoa olevan kannattavaa tällä hetkellä. Syytä tähän voidaan tarkastella esimerkin avulla.

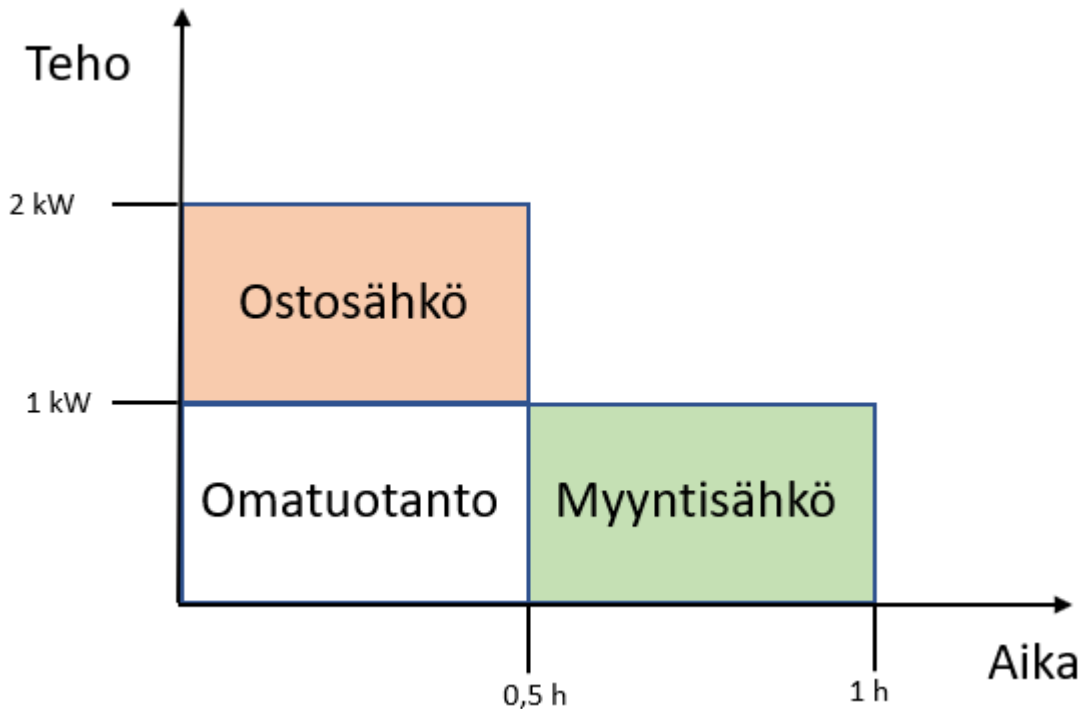
Aurinkosähköjärjestelmän kannattavuuden pohjana voidaan pitää ajatusta siitä, kuinka paljon rahaa säästetään silloin, kun sähköä ei tarvitse ostaa verkosta. Kuvalla 6 on pyritty havainnollistamaan kilowattitunnilta saavutettua säästöä sähkön osto- ja myyntitilanteissa.



**Kuva 6.** Ostosähköllä ja myyntisähköllä saavutettavat hyödyt.

Voidaan siis havaita, että ostotilanteessa varsinaisen sähköenergian lisäksi ostaja joutuu maksamaan myös sähkönsiirrosta sekä erilaisista veroista. Tämä tarkoittaa siis sitä, että sähkönmyynnillä saavutetut tuotot ovat vain kolmannes siitä, mitä ostamatta jätetyllä sähköllä olisi voitu saavuttaa säästöjä.

Oman tuotannon hyödyntäminen ei kuitenkaan ole ollut täysin suoraviivaista, sillä vuoden 2021 asti sähkönkulutusta ja tuotantoa on tarkkailtu tuntitasolla, vaikka itse kulutuksen ja tuotannon mittaaminen on suoritettu huomattavasti tarkemmin. Tämä on johtanut siihen, että tarkasteltavan tunnin aikana on sekä ostettu että myyty sähköä, vaikka tuotannon ja oston määrä tunnin aikana on ollut yhtä suuri. Tähän liittyvää ongelmallisuutta on pyritty havainnollistamaan kuvan 7 avulla. Vaikka siis sähköä myydään energiana saman verran kuin sitä ostetaan, jää pientuotannon omistaja tästä kuitenkin tappiolle.



*Kuva 7. Sähkönkulutus ja tuotanto yhden tunnin aikana.*

Edellä mainittu epäkohta on kuitenkin pyritty korjaamaan valtioneuvoston uudella asetusmuutoksella, joka on astunut voimaan 1.1.2021. Asetusmuutoksen avulla sallitaan niin kutsuttu tuntinetotus. Tällöin tarkastelutunnin aikana tuotettu ja kulutettu sähkö summataan yhteen, aikaansaaden vain ostoa tai myyntiä tarkasteluajalle [17]. Näin ollen jatkossa kuvan 6 mukaisessa tilanteessa myynti- ja ostoenergian summa on nolla, eikä tästä synny erillistä myyntiä tai ostoa.

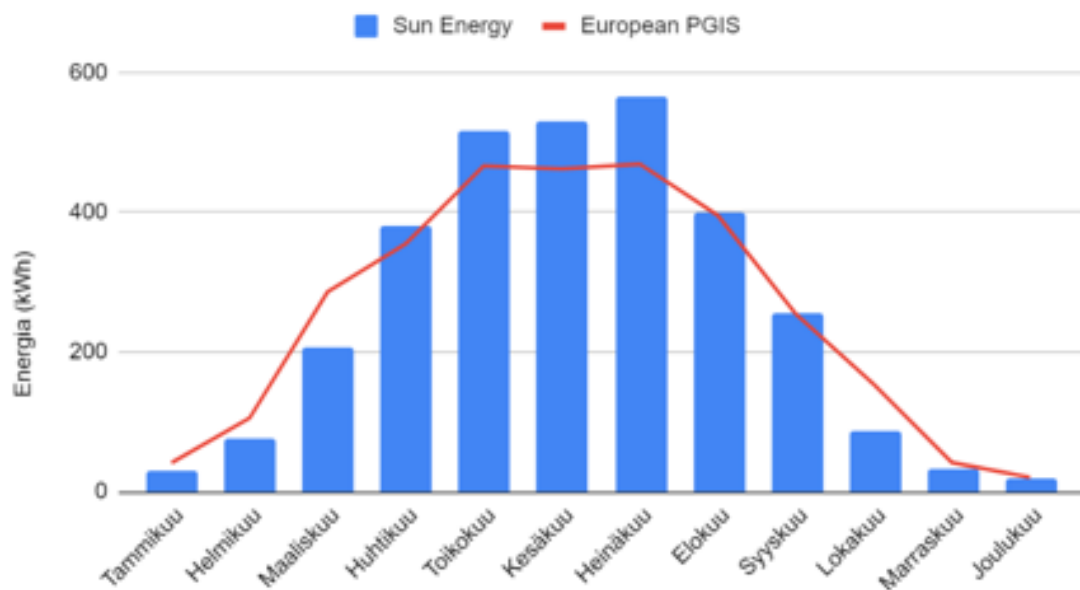
### 5.3 Sun Energia laskurin hyödyntäminen mitoituksessa

Nykypäivänä aurinkosähköjärjestelmiä myy sekä asentaa hyvin moni yritys. Kysynnän ja kilpailun kasvun myötä monet yritykset ovatkin halunneet erottua verkkosivuillaan muista. Yhtenä tällaisena keinona on käytetty verkkosivuille integroitua, kuluttajaystävällistä tuotantolaskuria.

Tutkimustyötä tehdessä näistä monista laskureista erottui eräs 3D-mallinnusta, sijaintia sekä monia aineistoja hyödyntävä web-applikaatiosivu, jonka on toteuttanut Sun Energia Oy. Kyseisen sivuston tarjoama data aurinkopaneelijärjestelmien vertailuun osoittautui erityisen toimivaksi, jonka vuoksi sitä haluttiin kokeilla saneerauskohteen paneelien mitoituksessa.

Sun Energian laskurin luotettavuudesta haluttiin kuitenkin varmistua, joten siitä saatuja tuloksia verrattiin kahteen muuhun lähteeseen. Ensimmäinen lähde oli hyvin yleisesti käytetty Euroopan komission säteilytietojärjestelmä, jonka avulla pystytään arvioimaan koordinaattien, asennuskulmien sekä muiden parametrien avulla säteilyenergiaa eri kohteissa.

Vertailutulosten hankinnassa Euroopan komission sivustolta järjestelmäksi on valittu 3,3 kWp piipohjainen aurinkopaneelijärjestelmä kattoasennuksena, jonka kallistuskulman arvo on  $42^\circ$ , atsimuuttikulma  $-3^\circ$  ja järjestelmähäviöt 0 %. Tietolähteenä toimi PVIGS-SARAH tietokanta. Kuvaan 8 on piirretty sekä Sun Energia laskurilla että Euroopan komission sivulta saadut vuosituotto-odotukset 3,3 kWp aurinkosähköjärjestelmälle [18].



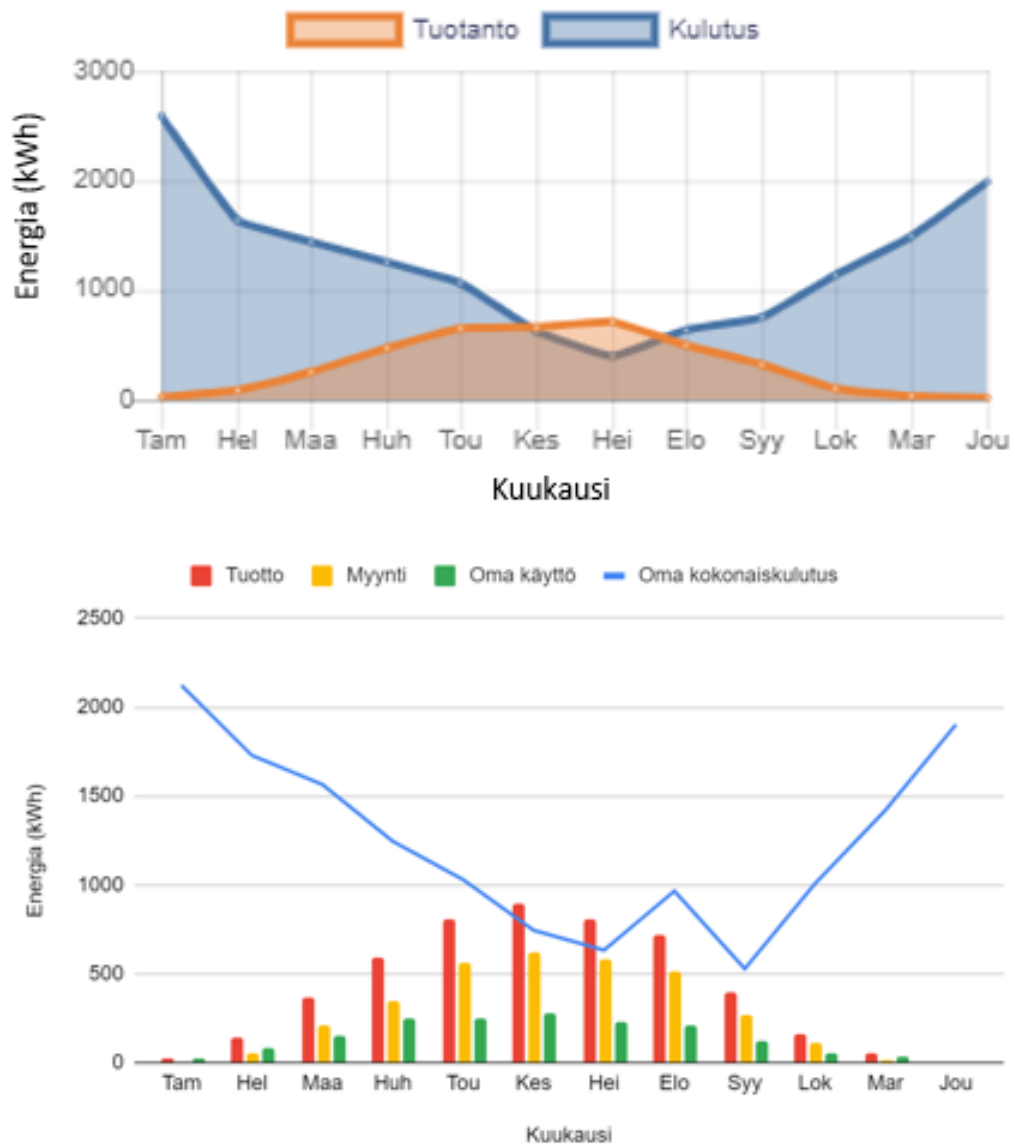
**Kuva 8.** Vuosituotto-odotukset 3,3 kWp aurinkopaneelijärjestelmälle [18][19].

Edellä esitettyjen kuvaajien perusteella voidaan todeta Sun Energia laskurin antamien ennusteiden oleva samansuuntaisia kuin Euroopan komission tietojärjestelmä sivulta saadut ennusteet. Koska molempien sivustojen tapauksessa arviot energian tuotannosta perustuvat erilaisiin tietolähteisiin ja saadut tulokset tukevat toisiaan, voidaan molempia sivustoja pitää mitoituksen kannalta riittävän luotettavina lähteinä.



Sun Energian luomaa kulutusmallia sekä tuotantoennustetta haluttiin tutkimusmielessä verrata myös johonkin olemassa olevaan kohteeseen ennen sen käyttöä. Tähän valikoitui eräs Pirkanmaalla sijaitseva sähkölämmiteinen omakotitalo, jonka vuoden 2020 sähkönkulutus sekä aurinkopaneelien tuotantotiedot olivat saatavissa (Kuva 9).

Kuvan 9 kaavioista voidaan havaita Sun Energian tekemien tuotantoennusteiden sekä kulutusprofiilin mallintamisen olevan hyvin tarkkaa verrattuna esimerkkinä käytetyn omakotitalon toteutuneisiin tuloksiin.



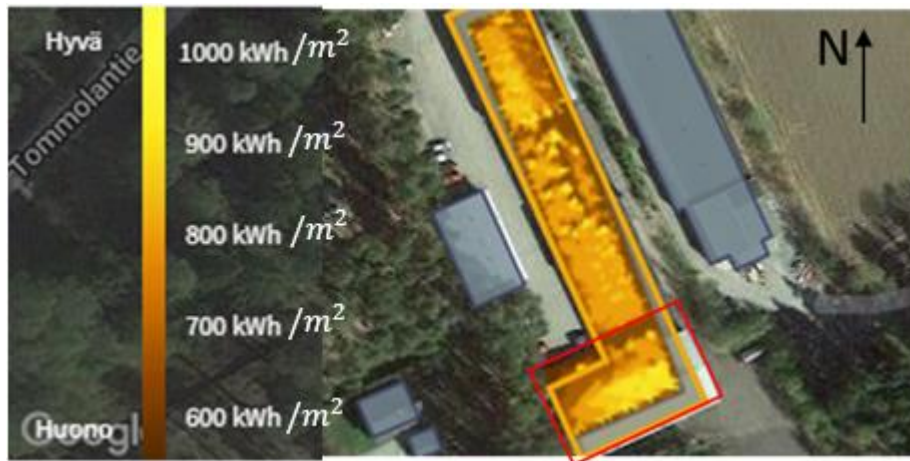
**Kuva 9.** Omakotitalon sähkön tuotanto ja kulutus vuonna 2020, Sun Energia arvio (ylempi) toteutunut (alempi) [19].

Sun Energia verkkosivuille integroidun laskurin voidaan siis todeta olevan erittäin käytökelpoinen aurinkopaneelijärjestelmää mitoitettaessa ja tuotto-odotuksia arvioitaessa. On kuitenkin syytä huomioida, että saatujen tulosten pohjalta laskurin voidaan olettaa laskevan tuotto-odotukset käyttäen optimaalista asennuskulmaa paneeleille. Näin ollen arviossa saattaa syntyä eroavaisuutta, mikäli asennus tehdään muuhun kuin optimikulmaan.

## 5.4 Teollisuushallin aurinkosähköjärjestelmän mitoittaminen

Niin kuin jo aiemmin tässä työssä on todettu, sähkö- tai lämpöenergiaa tuottavan järjestelmän mitoittamisen tulisi perustua kohteessa tapahtuvaan energian kulutukseen sekä sen ajankohtaan. Takojantien kohteen käyttösähkön tarve vuodessa on 10 000 kWh sekä arvio lämmityssähkön kulutukseksi on 5000 kWh/vuosi. Lämmityssähkön kulutusta ei kuitenkaan oteta huomioon aurinkopaneeleita mitoitettaessa, koska sen käytön katsotaan tapahtuvan pääosin aurinkosähkön tuotannon ulkopuolella.

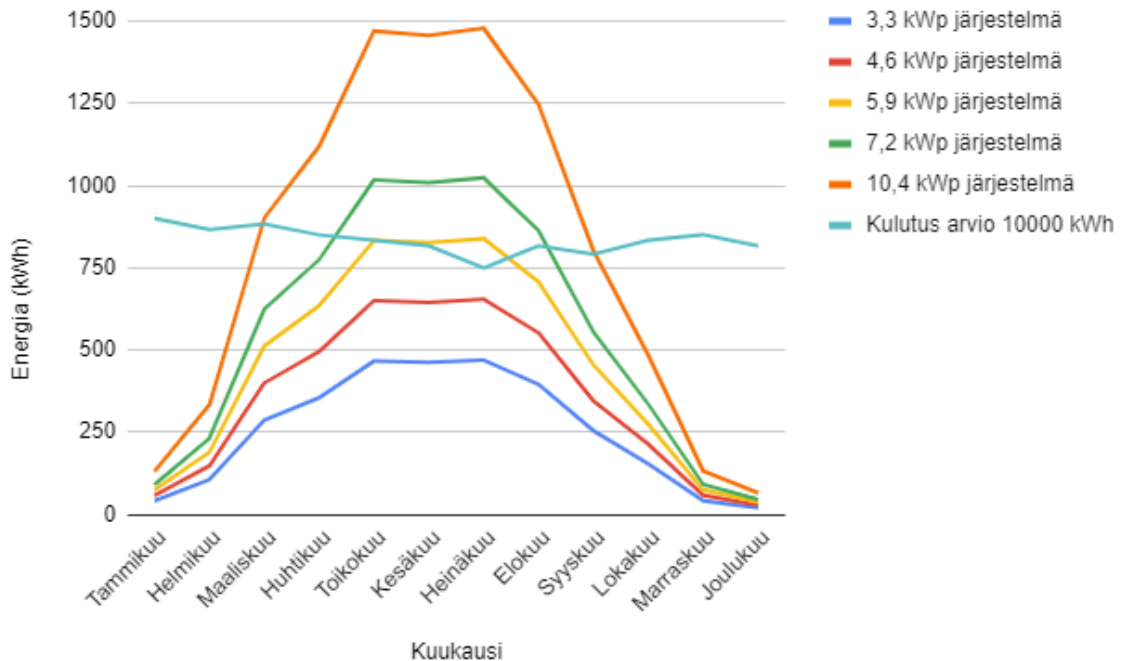
Aurinkosähköjärjestelmän tarkastelu ja mitoitus lähtee liikkeelle vuotuisen säteilyenergian arvioinnilla, sekä paneelien sijoituspaikan suunnittelulla. Tähän on käytetty apuna aiemmin tässä työssä mainittua Sun Energian laskuria, jonka karttatietoihin yhdistetyn datan pohjalta voidaan helposti arvioida näitä keskeisiä seikkoja (Kuva 10).



**Kuva 10.** Arvio vuotuisesta säteilyenergiasta hallin katolla, saneerausosan rajaus punaisella [19].

Kuvan 10 väreistä voidaan ensiarviolta havaita vuotuisen säteilyenergian olevan hyvä, etenkin katon kaakkoon suuntaisella lappeella, jonne aurinkopaneelit kannattaa sijoittaa. Takojantien katon kaltevuuskulma on noin  $11^\circ$ , joten parhaan vuosituotannon saavuttamiseksi voidaan katsoa asennustelineiden hankinnan olevan kannattavaa kohteessa. Näin taataan paneeleille mahdollisimman optimaalinen asennuskulma, jonka voidaan katsoa olevan lähellä  $45^\circ$ . Satelliittikuvan perusteella atsimuuttikulman voidaan arvioida olevan  $-22^\circ$  jonka lisäksi oletetaan, ettei se ainakaan ole sitä suurempi, eikä näin ollen vaikuta negatiivisesti vuosituotantoon.

Kuvassa 11 on esitetty Sun Energia sivuston laskurilla saadut vuosituotto-odotukset viidelle erikokoiselle aurinkosähköjärjestelmälle, sekä Takojantien käyttösähkön vuosiarvion kuvaaja. Koska järjestelmä tulisi mitoittaa vastaamaan mahdollisimman hyvin kohteen kulutusta, kuvan perusteella voidaan sanoa 5,9 kWp järjestelmän olevan Takojantielle järkevin ratkaisu.



**Kuva 11.** Teollisuushallin käyttösähkön kulutus sekä aurinkosähkön tuottoennuste eri järjestelmille.

Jotta Takojantien hallin omavarainen sähköntuotanto pystyttäisiin mahdollistamaan ympärivuotisesti, on sinne kaavailtu aurinkovoiman lisäksi pientuulivoimatuotantoa. Mikäli kohteessa suoritettavilla tuulivoimamittauksilla voidaan katsoa pientuulivoiman olevan kannattavaa, tulee mahdollinen tuulivoimatuotanto huomioida myös aurinkovoiman tuotannossa. Tämän vuoksi ylimääräisten kustannusten välttämiseksi, aurinkosähköjärjestelmän hankinta on syytä ajoittaa hetkeen, jolloin pientuulivoimanhankinnasta on tehty päätös.

## 5.5 Aurinkovoimalan investointikustannukset

Tässä luvussa käydään lävitse itse tuotetun sähköenergian kannattavuutta, niin investointi kustannusten, kuin ostosähkön kautta. Laskennan runkona on käytetty FinSolar-hankeessa toteutettua kannattavuuslaskuria sekä hankkeeseen liittyvää aineistoa [20].

Taulukossa 7 on esitetty kohteen ostosähkön hintarakenne, josta koostuu arvio ostosähkön kokonaishinnasta. Saatua ostosähkön kokonaishinta 14,2 *snt/kWh* sisältää arvonlisäveron 24%.

**Taulukko 7. Ostosähkön hinta Takojantien kohteessa [21][22].**

|                                      |                     |
|--------------------------------------|---------------------|
| Sähköenergian ostohinta              | 5.0 snt/kWh         |
| Energiaperusteinen sähkön siirtohint | 4.2 snt/kWh         |
| Sähkövero ja huoltovarmuusmaksu      | 2.253 snt/kWh       |
| Ostosähkön arvonlisävero             | 24 %                |
| <b>Ostosähkön hinta</b>              | <b>14.2 snt/kWh</b> |
| Arvio ostosähkön hinnan noususta     | 2.0 %/vuosi         |

Laskennassa käytettävä ostohinta on saatu kohteen olemassa olevasta sähkösovimuksesta ja siirtohinnot siirtoyhtiö Elenian verkkopalveluhinnastosta käyttäen yleissiirtoa [21]. Arvio ostosähkön hinnan noususta puolestaan perustuu Energiaviraston sivuilta saataviin hintakehitystilastoihin vuodesta 1997 alkaen [22]. Sähköhinnan kehityksessä ei ole otettu huomioon vuodesta 2019 alkaneen koronapandemian vaikutuksia hintakehitykseen.

Puhuttaessa kumulatiivisesta tuotosta investoinnille, tärkein hetki on se, jolloin investointi on maksanut itsensä takaisin. Tästä hetkestä eteenpäin sijoituksen voidaan siis katsoa tuottavan voittoa. Ensiaskel investoinnin kannattavuuden arvioinnissa onkin se, voidaanko tällä saavuttaa säästöjä tai tuottoja investoinnin oman käyttöiän aikana.

Taulukossa 8 on esitetty investointikustannukset viidelle eri aurinkosähköjärjestelmälle, joiden vuosituottoarviota käsiteltiin aiemmin luvussa 5. Kustannusarviot järjestelmille perustuvat Finnwind Oy:n verkkosivuilta löytyviin hinnastoihin, jotka sisältävät arvonlisäveron 24 % [23]. Taulukossa esitetyt hinnat järjestelmien asennuksille ovat alkaen-hintoja ja ne saattavat muuttua asennuskohteen mukaan.

**Taulukko 8. Aurinkosähköjärjestelmien hintaerittelyt [23].**

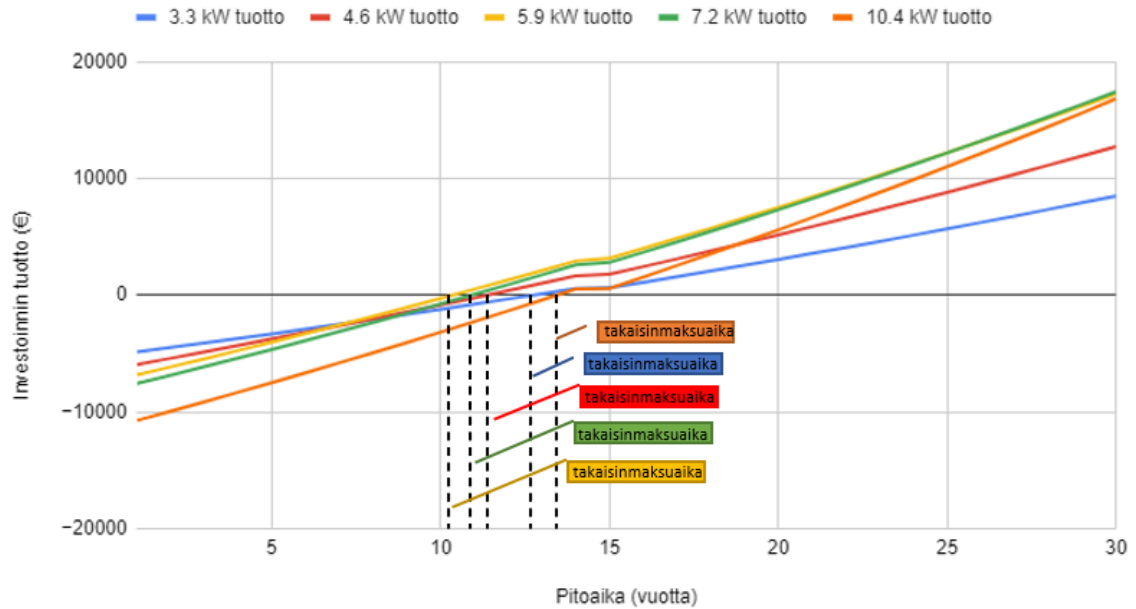
|                      | Järjestelmä | Asennus | Yhteenshinta | Hinta/kWp |
|----------------------|-------------|---------|--------------|-----------|
| 3.3 kWp järjestelmä  | 2 990 €     | 2 250 € | 5 240 €      | 1 588 €   |
| 4.6 kWp järjestelmä  | 3 650 €     | 2 800 € | 6 450 €      | 1 402 €   |
| 5.9 kWp järjestelmä  | 4 490 €     | 3 000 € | 7 490 €      | 1 269 €   |
| 7.2 kWp järjestelmä  | 4 890 €     | 3 360 € | 8 250 €      | 1 146 €   |
| 10.4 kWp järjestelmä | 7 590 €     | 3 900 € | 11 490 €     | 1 105 €   |

Yksi vaikeimpia arvioitavia asioita omavaraisen tuotannon tapauksessa on se, kuinka paljon tuotettua energiaa voidaan todellisuudessa hyödyntää. Tämän vuoksi investointikustannusten takaisinmaksuaikojen laskennassa on jouduttu hyödyntämään seuraavia oletuksia. Aurinkosähkön ylijäämäosuutena 5,9 kW järjestelmässä, sekä kaikissa sitä pienemmissä järjestelmissä on käytetty 15 % vuosituotannosta.

Tätä suuremmissa järjestelmissä 15 % ylijäämäosuuden lisäksi kaiken tuotannon, joka ylittää 5,9 kW järjestelmän tuottoennusteen on katsottu myytävän suoraan verkkoon.

Näin ollen 7,2 kW järjestelmän ylijäämäosuus on 30% ja 10,4 kW järjestelmän ylijäämäosuus 50 %.

Kuvassa 12 on esitetty jo aiemmin mainituille viidelle erikokoiselle aurinkosähköjärjestelmälle lasketut investointikustannusten takaisinmaksuajat. Hetki, jolloin mikäkin investointi on maksanut itsensä takaisin, on merkitty kuvaan katkoviivoin.



**Kuva 12.** Eri aurinkosähköjärjestelmien takaisinmaksuajat 30 vuoden pitoajalla.

Investoinnin takaisinmaksuajan laskennassa on hyödynnetty taulukossa 7 annettua ostosähkön vertailuhintaa, sekä 2 % sähkönhinnan nousua niin osto- kuin myyntisähkölle. Lisäksi investoinnissa on otettu huomioon järjestelmälle mahdollisesti tehtävä invertterivaihto 15 vuoden kohdalla, jonka kustannusten on arvioitu olevan 8 % järjestelmän ostohinnasta.

## 5.6 Yhteenveto aurinkosähköjärjestelmän kannattavuudesta

Lopputulemana luvussa 5 esitetyille esimerkeille, laskelmille sekä pohdinnoille voidaan aurinkosähköjärjestelmän hankintaa Suomessa pitää tällä hetkellä hyvinkin kannattavana investointina. Vaikka vuoteen 2021 asti sähköyhtiöiden tapa mitata ja laskuttaa pientuotannolla varustettuja sähkönkäyttäjiä onkin asettanut sähkönkäyttäjät eriarvoiseen asemaan, voidaan uuden netotusmallin katsoa tuovan tasa-arvoa tälle sektorille.

On kuitenkin hyvä muistaa, että muutoksia ja uudistuksia sähkömarkkinoille kaavaillaan jatkuvasti. Näistä yhtenä uutisoinnin aiheena on ollut pohjoismaisten sähköverkkojen siirtyminen neljännestuntimalliin vuoden 2023 aikana. Muutoksella voidaan siis katsoa olevan vaikutuksia myös piensähköntuottajiin, sillä tuotannon ja oston tarkasteluväli tarkentuu tunnista viiteentoista minuuttiin.

Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että mitä pienempi mittausväli on, sitä tarkemmin kulutuksen ja tuotannon on kohdattava tarkasteluhetkellä muun muassa kannattavuusmielessä. Mitoitusta tehtäessä on siis ensiluokkaisen tärkeää ottaa aina huomioon kulutuksen ajankohta, ei vain määrää.

Takojantien hallia voidaan sähkönkulutuksellisessa mielessä pitää hyvänä kohteena aurinkosähkölle, sillä sähkönkulutus kohdistuu tämän kaltaisissa rakennuksissa yleensä päiväsaikaan, jolloin aurinkosähkön tuotanto on parhaimmillaan.

## 6. PIENTUULIVOIMA

Lyhyesti sanottuna tuulivoimalla tarkoitetaan tuulesta saatavan liike-energian muuttamista sähköenergiaksi. Yksinkertaistettu tuulivoimala koostuu siis roottorin lavoista, roottorista sekä generaattorista. Tuulisella säällä ilmavirtaus osuu roottorin lapoihin, aikaansaaden pyörimisliikkeen ja tätä kautta synnyttää roottorissa liike-energian. Tämä liike-energia muunnetaan generaattorilla sähköenergiaksi ja aurinkovoiman tavoin invertteriä käyttäen vaihtosuunnataan sähkölaitteille sopivaksi [24].

Tuulivoimaa suunniteltaessa ja sen kannattavuutta arvioitaessa tärkein tekijä on tuulen voimakkuus ja suunta. Yleisesti ottaen näitä voidaan arvioida mittaus perusteisesti tai laskennallisesti, esimerkiksi hyödyntäen Ilmatieteenlaitoksen Tuuliatlasta.

Pientuulivoimaloiden tapauksessa etenkin sisämaassa, tuuliolosuhteiden arviointi laskennallisella menetelmällä on kuitenkin hyvin hankalaa. Tämä johtuu siitä, että pientuulivoimaloiden asennuskorkeus on yleensä välillä 10-30 metriä, mutta Tuuliatlaksesta saatavat tuulitiedot ilmoitetaan 50 metristä ylöspäin.

Tämä aiheuttaa epävarmuustekijöitä kannattavuuden arviointiin ja sillä saadaankin yleisesti vain suuntaa antavia tietoja kohteen tuulioloista. Tämän vuoksi pientuulivoimaa suunniteltaessa on suositeltavaa suorittaa kohteessa tuulimittauksia, joiden avulla tuulivoimalan kannattavuutta voidaan arvioida luotettavasti. Tuulivoimamittaukset kestävät yleensä 2-12 kuukautta, riippuen siitä halutaanko mittausdataa kohdennetusti tietyltä ajanjaksolta vai laajasti koko vuodelta.

Mikäli mittauslaitteistoa ei halua ostaa itselleen, on se monissa tapauksissa mahdollista vuokrata tuulivoimaloita myyvilta yrityksiltä, sisältäen itse mittalaitteen sekä maston. Vuokraus tapahtuu yleensä kuukausiveloituksella, joka saattaa olla hyvitetävissä pientuulivoimalan hankintahinnasta.

### 6.1 Tuulivoiman lupamenettely ja verovelvollisuus

Tuulivoimala, niin pieni kuin isokin rinnastetaan maankäyttö- ja rakennuslain nojalla rakennuksiin tai rakennelmiin [14]. Tästä syystä kaava-alueella tuulivoimalan rakentamista varten tarvitaan aina joko rakennus- tai toimenpidelupa, johon vaikuttaa muun muassa voimalan maston korkeus. Kaava-alueen ulkopuolella pientuulivoimaloille riittää monesti toimenpidelupa. Lupamenettelyissä on kuitenkin eroja kuntien välillä, joten lopullinen menettelytapa selviää aina kunnan rakennusvalvonnasta.



Koska pientuulivoimalan rakentaminen edellyttää rakennus- tai toimenpideluvan hakemista, on rakennushankkeeseen ryhtyvän maankäyttö- ja rakennuslain 133 §:n nojalla ilmoitettava hakemuksen vireilletulosta naapureille. Viranomaistaho voi myös edellyttää naapurien kuulemista lupa-asiaan liittyen [25].

Pientuulivoimaloista aiheutuneiksi haitoiksi voidaan katsoa melu ja vilkkuminen. Meluhaitalla tarkoitetaan voimalan siipien pyörimisestä aiheutuvaa ääntä ja vilkkumisella ilmiötä, jolloin siipien liike saa voimalan takaa paistavan auringonvalon vilkkumaan. Kansainväliset tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että etenkin nykyaikaisissa pientuulivoimaloissa siipien suunnittelun ja pyörimisnopeuden ansiosta voimalat ovat hyvin hiljaisia eikä meluhaittaa juurikaan synny.

Pientuulivoimalasta aiheutuva vilkkuminen puolestaan on melko harvinainen ilmiö, sillä voimaloiden pyyhkäisyypinta-ala on melko pieni ja siipien pyörimisnopeus suhteellisen nopea, toisin kuin isoilla voimaloilla. Vilkkumisen havaitsemiseen voidaan kuitenkin vaikuttaa voimalan sijoittamisella ja etenkin kiinnittämällä huomiota sen varjoon. Voimala tulisi sijoittaa siten, ettei sen varjo osu rakennukseen, tai ainakaan sen ikkunoihin, jolloin ilmiö saatetaan havaita [26].

Mikäli sähköntuotantolaitos liitetään jakeluverkkoon, tulee tästä solmia tuotantosopimus paikallisen sähköverkonhaltijan kanssa. Tämän lisäksi verkkoon syötetylle sähkölle tulee aina olla ostaja, joka toimii sähkömarkkinoilla. Sähkömarkkinoilla toimivalla ostajalla tarkoitetaan vähittäismyymää, joka myy tuotetun sähkön muille sähkön käyttäjille. Sopimusta sähkön myynnistä ja ostosta ei tarvitse tehdä saman yhtiön kanssa, mutta se on yleensä kannattavin vaihtoehto ja jotkin yhtiöt saattavat vaatia sitä [27].

Verkkoon liitettävien järjestelmien osalta voidaan yleisesti myös todeta, että 230 V vaihtojännitteiden tekeminen edellyttää aina oikeanlaisia sähkötyölupia. Tämä lisäksi järjestelmälle on tehtävä käyttöönottotarkastus ja pääsulakekoon ollessa yli 35 A myös ulkopuolisen yrityksen tekemä varmennustarkastus [15].

Sähköntuotannon verotuksesta yritys- ja yhteisöverotuksessa sivuttiin jo luvussa 5.1 aurinkosähköjärjestelmän lupamenettely ja verovelvollisuus. Voimme siis tässä kohti todeta myös pientuulivoiman tuottajan olevan vapautettu näistä veroista.

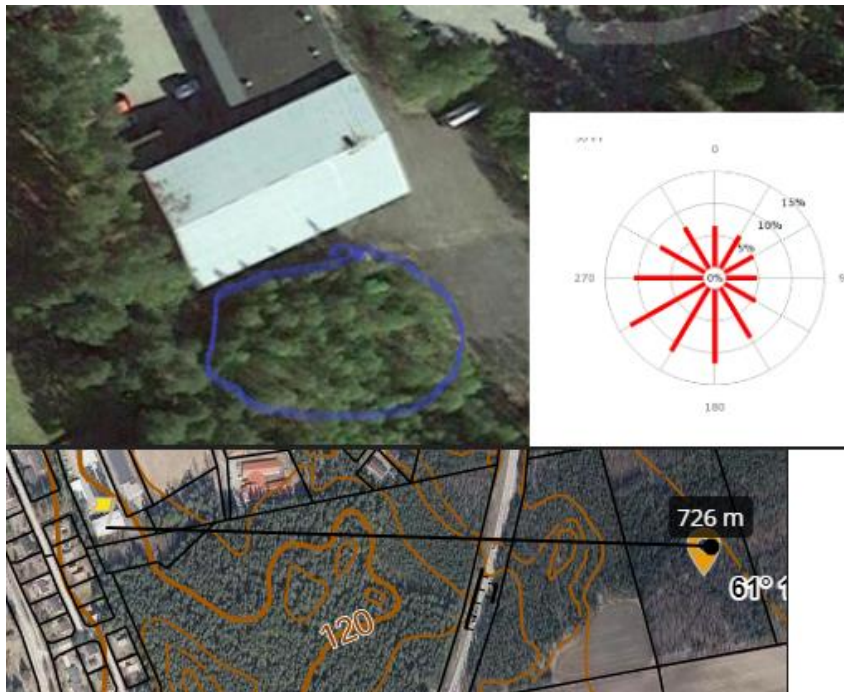
## 6.2 Takojantien hallin tuulivoimapotentialin arviointi

Takojantien kohteen tuulivoimakartoitus aloitettiin tarkastelemalla korkeuskäyriä maanmittauslaitoksen paikkatietoikkuna palvelussa. Kuvaan 13 on rajattu punaisella Takojantien hallin saneerausosa, jonka lisäksi kuvasta on havaittavissa alueen korkeuserot sekä maasto [28].



**Kuva 13.** Takojantien korkeuserot sekä maaston muodot paikkatietoikkuna palvelussa [28].

Maastonmuotojen kartoituksen jälkeen tehtiin karkeaa tarkastelua alueen tuuliolosuhteista hyödyntäen Ilmatieteen laitoksen Tuuliatlasta. Koska Tuuliatlaksen tuulennopeustiedot koskevat korkeuksia 50 metristä ylöspäin, kartoituksen kannalta tärkeimpänä tietona kyseisestä tietolähteestä pidettiin arviota tuulen suunnasta (Kuva 14).



**Kuva 14.** Tuuliatlaksesta saatu tuuliruusu ja kohde kartalla (yllä) sekä mittauspisteen etäisyys kohteesta paikkatietoikkuna palvelun perusteella (alla) [28][29].

Jotta tuulensuuntien analysointi olisi mahdollisimman visuaalista, on kuvan 14 Google Maps satelliittikuvaan liitetty Tuuliatlaksesta saatu tuuliruusu kohdetta lähimmästä mitauspisteestä. Tämän lisäksi samaan kuvaan on liitetty karttanäkymä mitauspisteen ja Takojantien hallin välisestä etäisyydestä paikkatietoikkuna palvelussa mitattuna.

Kuvaan on myös korostettu sinisellä värillä hallin takaosassa sijaitseva metsäalue. Kyseisellä alueella on suoritettu raivaustöitä, jotka näkyvät maanmittauslaitoksen satelliittikuvissa, mutta eivät ole päivittyneet Google Maps palvelun satelliittikuviin.

Pientuulivoimalan suunnittelun kannalta sinisellä rajattu alue on avainasemassa, koska se on kuvissa näkyvän harjualueen korkein kohta. Verrattaessa Tuuliatlaksen tuuliruusu mallia kohteen satelliittikuviin, voidaan havaita tuulisimman suunnan olevan lounas. Näin ollen pientuulivoiman sijoittamisen raivatulle harjualueelle voidaan katsoa olevan tontin potentiaalisin vaihtoehto.

Koska raivattu alue on selvästi vallitsevaa ympäristöä korkeammalla, voidaan sen katsoa antavan riittävä etu siihen, ettei lounaisrajalle jäävä puusto aiheuta suurta turbulenssia tuuleen ja näin heikennä tuulioloja. Mikäli puusto kuitenkin osoittautuisi liialliseksi rasitteeksi voimalan tuotannolle on oletettavaa, että niiden harventamisesta voitaisiin keskustella tontinomistajan kanssa.

Vaikka alustavien tutkimusten perusteella voidaan uskoa tuulivoiman olevan potentiaalinen vaihtoehto Takojantiellä, tulee kohteessa suorittaa paikallisia tuulimittauksia asian varmistamiseksi. Koska Takojantielle on suunniteltu niin kutsuttua hybridi järjestelmää sähkön tuotantoon, on tärkeää varmistua mahdollisen tuulivoiman realistisista hyödyistä. Tämän vuoksi voimalan paikalliset tuulivoimamittaukset tulevat sijoittumaan vuoden 2021 heinäkuusta, ainakin vuoden 2021 joulukuuhun saakka. Tämän avulla pystytään kartoittamaan tuulivoiman ja aurinkovoiman yhteistuotanto mahdollisuuksia kesäaikaan, sekä tuulivoimapotentiaalin nousua talvea kohden.

### **6.3 Pientuulivoimalan tuotannon arviointi laskennallisesti**

Aiemmassa luvussa 6.2 todettiin, että diplomityössä käsiteltävän saneerauskohteen tuulivoimamittaukset tulevat sijoittumaan heinäkuusta 2021 ainakin joulukuuhun 2021 asti. Jotta tuulivoimalan kannattavuudesta saataisiin mitään arviota ennen mittausten loppumista, on tässä kappaleessa haluttu laskennallisesti pyrkiä arvioimaan pientuulivoimalla tuotettavan sähköenergian määrää vuodessa.

Niin kuin aiemmin mainittiin, Ilmatieteenlaitoksen Tuuliatlaksesta saatavat tuulitiedot ovat saatavilla vain 50 metrin korkeudesta ylöspäin. Tämän vuoksi joudutaan muun muassa tuulen nopeudet alle 50 metrin korkeudessa laskemaan käsin.

Kaavassa (3) on esitetty yksinkertaistettu muoto logaritmisesta tuulennopeuden muutoksesta pintakerroksessa, jota hyödyntäen voidaan arvioida tuulennopeuksia alle 50 metrin korkeuksissa [30].

$$v(z) = v_{ref} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (3)$$

jossa,

$v_{ref}$  on alkuperäinen tuulennopeus

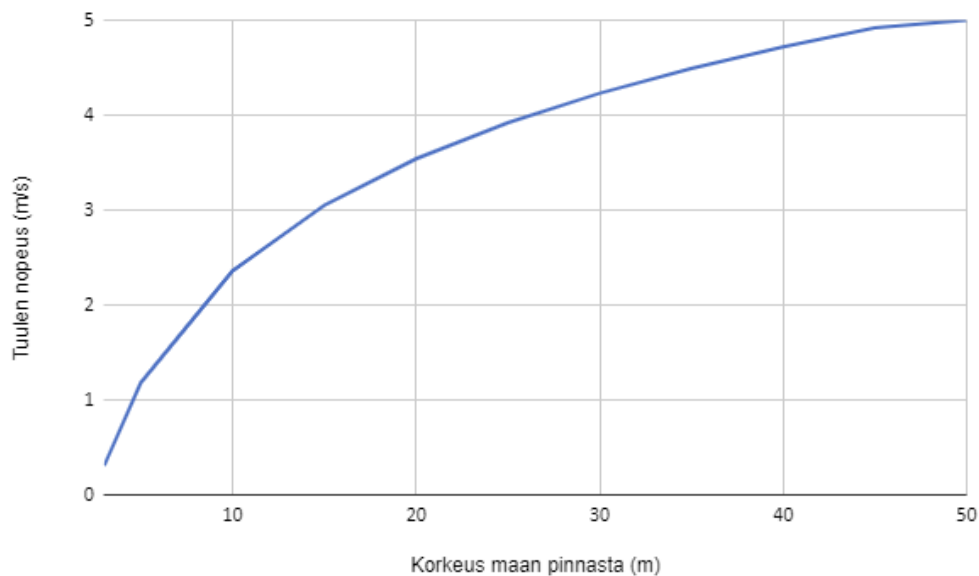
$z$  on tarkasteltava napakorkeus

$z_{ref}$  on alkuperäinen napakorkeus

$z_0$  on tarkasteltavan pinnan rosoisuusparametri

Koska mahdollinen pientuulivoimalan sijoituspaikka sijaitsee lähellä metsää sekä rakennuksia, arvioitiin rosoisuusparametrin arvoksi 2,5. Alkuperäisenä napakorkeutena laskennassa käytettiin 50 metriä ja alkuperäisenä tuulennopeutena tälle korkeudella tuuliatlaksesta saatua keskituulennopeutta 5,1 m/s [29].

Kuvassa 15 on esitetty tuulennopeusmuutoksen kaavaa hyödyntämällä lasketut arviot keskituulennopeuksista alle 50 metrin korkeudessa.



**Kuva 15.** Laskennallisesti saatu keskituulen nopeus korkeuden funktiona Takojan tien alueella.

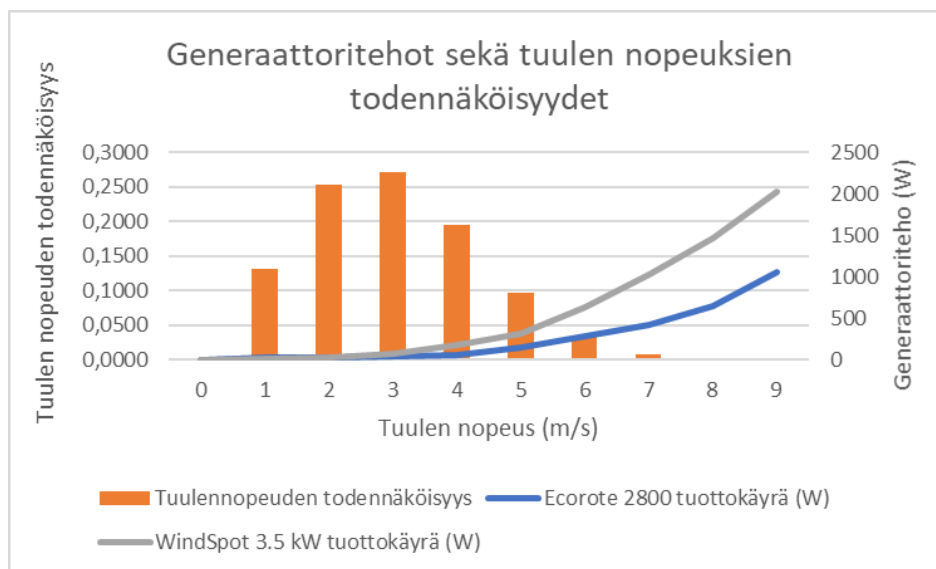
Keskituulen nopeuksien laskennan jälkeen saaduille arvoille laskettiin esiintymistodennäköisyydet käyttäen Excelistä löytyvää kaavaa Weibull-jakaumalle. Tätä varten määritettiin määräkerroin  $C$  kaavalla (4), hyödyntäen aiemmin laskettuja keskituulen nopeuksia 10 m ja 15 m korkeudessa. Muotokerroin  $k$  käytettiin Tuuliatlaksesta saatua arvoa 50 m korkeudessa, joka oli 2,3 [30].

$$C = \frac{V_{ka}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4)$$

*jossa,*  
 $v_{ka}$  on tuulen nopeuden keskiarvo  
 $C$  on määräkerroin  
 $k$  on muotokerroin

Pientuulivoimaloiden tuotantovertailuissa on käytetty markkinoilta löytyvää vaaka-akselista WindSpot 3,5 kW voimalaa sekä pystyakselista Ecorote 2800 voimalaa. Jotta tuotokäyriä olisi mahdollisimman helppo verrata keskenään on niiden kuvaajat siirretty valmistajien datalehdiltä Excel ohjelmaan. Siirrossa on hyödynnetty Matlab ohjelmistoon saatavilla olevaa Grabit laajennusta, jolla on mahdollista kerätä datapisteitä kuvista. Ecorote 2800 voimalalle ilmoitettu käynnistymisnopeus on 1,25 m/s ja WindSpot 3,5 kW voimalalle 3 m/s [31][32].

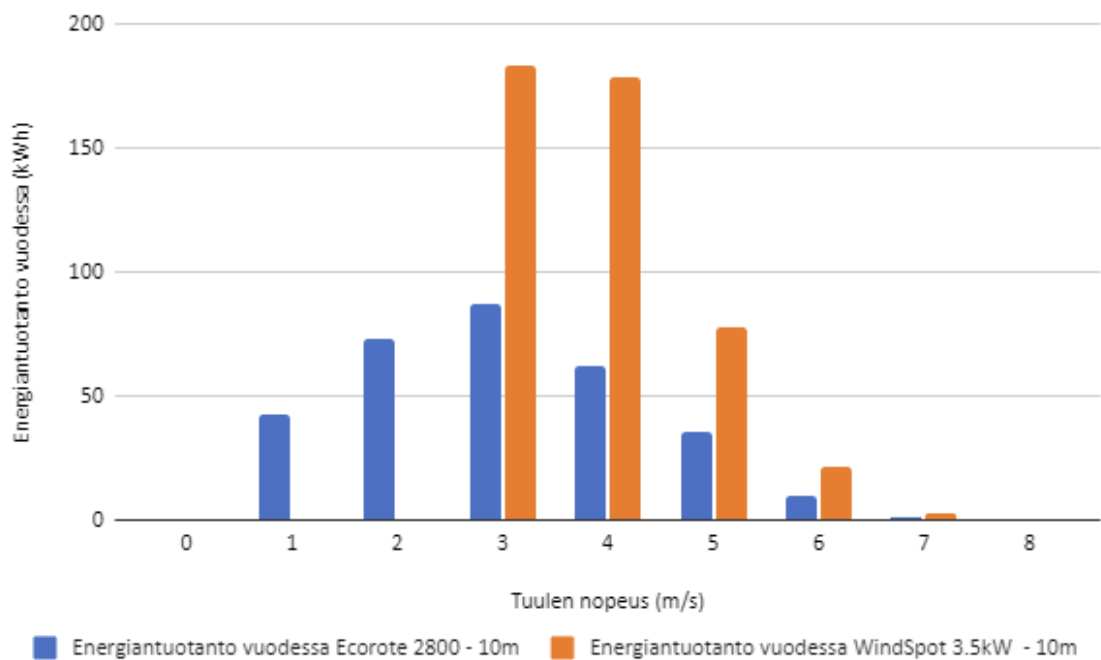
Datalehdistä saadut tehokäyrien jäljitelmät molemmille pientuulivoimaloille, sekä tuulen nopeuksien Weibull-jakauma 10 metrin korkeudessa on esitetty kuvassa 16.



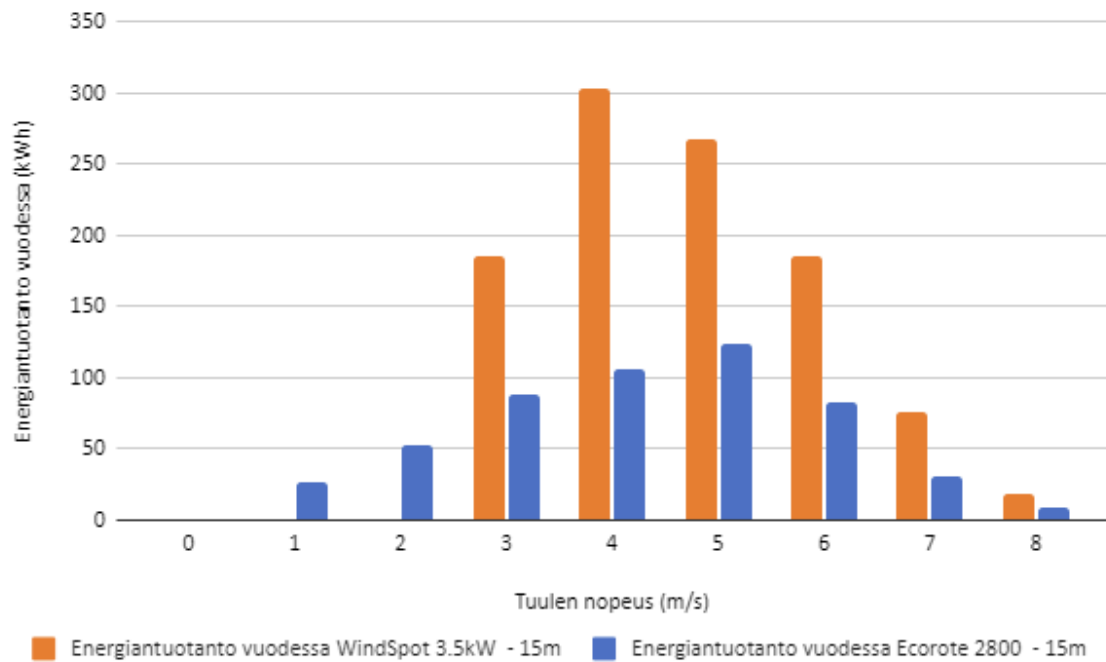
**Kuva 16.** Generaattoritehot sekä tuulen nopeuksien todennäköisyydet tuulen nopeuksien funktiona 10 m korkeudessa [31][32].

Vaikka pystyakseliselle Ecorote 2800 voimalle ilmoitettu käynnistymisnopeus on huomattavasti alhaisempi kuin WindSpot voimalalle, on sen tuottokäyrä huomattavasti loivempi. Näin ollen kuvan perusteella voidaan jo tässä vaiheessa arvioida sen tuottoennusteen olevan vaaka-akselista WindSpot voimalaa heikompi tuulen nopeuden kasvaessa.

Lopuksi molemmille voimaloille on laskettu vuosituoennusteet 10 m (Kuva 17) ja 15 m (Kuva 18) napakorkeudessa, sekä piirretty näitä vastaavat kuvaajat. Kuvaajista voidaan havaita Ecorote voimalan tuoton olevan huomattavasti tasaisempaa kuin WindSpot voimalalla, sen alhaisen käynnistymisnopeuden ansiosta. Tuotantomielessä voidaan kuitenkin todeta sen kokonaistuotannon olevan molemmilla korkeuksilla huonompi.



**Kuva 17.** Pientuulivoimaloiden vuosituoennusteet tuulen nopeuden funktiona 10 m napakorkeudella.



**Kuva 18.** Pientuulivoimaloiden vuosituottoennusteet tuulen nopeuden funktiona 15 m napakorkeudella.

Edellä esitetyillä kuvaajilla havainnollistetut tuotto-odotukset on lopuksi laskettu molemmilla voimaloilla yhteen ja tulokset listattu taulukkoon 9. Lasketuista vuosituotanto arvioista voidaan havaita selkeästi voimaloiden tehokäyrien eroavaisuudet, joita pohdittiin jo aiemmin.

**Taulukko 9.** Tuulivoimaloiden vuosituotantoarvio 10 m ja 15 m korkeudessa.

|                        | Vuosituotanto (kWh) |              |
|------------------------|---------------------|--------------|
|                        | Korkeus 10 m        | Korkeus 15 m |
| <b>Ecorote 2800</b>    | 310                 | 516          |
| <b>WindSPot 3.5 kW</b> | 463                 | 1036         |

Alhaisen käynnistymisnopeuden ja loivan tehokäyrän ansiosta Ecorote kykenee tuottamaan tasaista tehoa hyvin alhaisillakin tuulen nopeuksilla, mutta tämä vaikuttaa negatiivisesti kovemmillä tuulen nopeuksilla saavutettavaan tuotantoon. Vaaka-akselinen WindSpot puolestaan alkaa toimimaan vasta korkeammilla tuulen nopeuksilla, mutta jyrkemmän tehokäyränsä ansiosta tuotantoennusteet kasvavat suuremmiksi.

Vaikka edellä lasketut arviot tuulivoimatuotannosta saneerauskohteessa ovat lievästi sanottuna heikot on hyvä muistaa, että ne eivät ole täysin absoluuttisia. Jo pienet muutokset keskituulen nopeudessa ja rosoisuusparametrissa vaikuttavat huomattavasti kokonaistuotantoon. Tuloksista voidaan kuitenkin havaita selvästi tuulen nopeuksien vaikutus molempien voimaloiden tuotantoon, joten näitä tietoja voidaan hyödyntää jatkossa, mikäli kohteessa suoritettavat tuulimittaukset osoittautuvat positiivisiksi.

## 6.4 Investointikustannukset ja yhteenveto

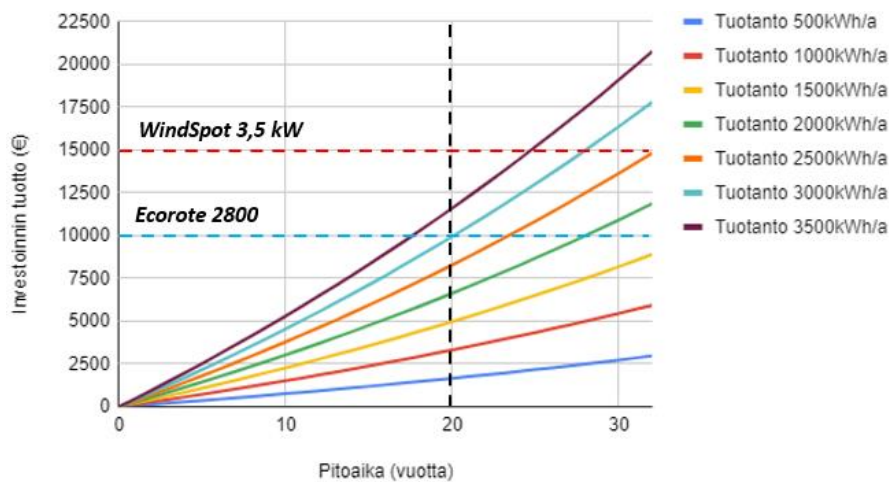
Taulukossa 10 on esitetty kustannusarviot molemmille voimaloille perustuen verkosta saataviin jälleenmyyjien hinnastoihin. Ecorote 2800 voimalan kustannuksiin on laskettu 1000 € investointivara, johon katsotaan kuuluvaksi turvakytkimet ja mahdollinen ohjauslaitteisto. Oletuksena siis on, että edellä mainitut tarvikkeet eivät sisälly tuulivoimalan hintaan.

Lisäksi molemmille voimaloille on laskettu 600€ vara asennustarvikkeisiin, joita ovat muun muassa johdot sekä liittimet. Taulukossa esitetyt kustannusarviot ovat siis vain suuntaa antavia ja niitä tullaan tarkentamaan, mikäli kohteessa tehtävät tuulimitaukset osoittautuvat positiivisiksi.

**Taulukko 10.** Arvio pientuulivoimaloiden investointikustannuksista [23][33].

|                            |               |                       |                |
|----------------------------|---------------|-----------------------|----------------|
| Ecorote 2800               |               | WindSpot 3.5 kW       | 11900 €        |
| Ecorote 2800 tuulivoimala  | 3708 €        | tuulivoimala          |                |
| Jarruvastus 12000W HIPAR   | 200 €         | ohjausyksikkö + jarru |                |
| Invertteri 3 kW            | 1475 €        | 3.6 kW invertteri     |                |
| Investointivara            | 1000 €        | turvakytkimet         |                |
| Alumiiniristikkomasto 10 m | 2678 €        | Masto (arvio)         | 2500 €         |
| Asennustarvikkeet          | 600 €         | Asennustarvikkeet     | 600 €          |
| <b>Yht:</b>                | <b>9661 €</b> | <b>Yht</b>            | <b>15000 €</b> |

Jotta tuulivoimatuotannon kannattavuutta voitaisiin järkevästi arvioida investointikustannusten kannalta, katsottiin viisaimmaksi tavaksi muodostaa kuvan 19 mukaisesti tuototeennusteet seitsemälle eri vuosituotantomäärälle. Kuvaan on myös merkitty pientuulivoimaloille tyypillinen pitoaika 20 vuotta, sekä molempien esimerkkivoimaloiden investointikustannukset.



**Kuva 19.** Eri vuosituotantomäärillä saavutettavat tuotot euroina 30 vuoden pitoajalla sekä tuulivoimaloiden investointikustannukset.



Ennusteita muodostaessa vaihtoehtoisena kustannuksena on käytetty ostosähkön hintaa 14 snt/kWh, joka on pyöristetty arvo luvussa 5 lasketulle hinnalle. Tämä kustannus voidaan nähdä saavutettuna säästönä, joka olisi jouduttu maksamaan kolmannelle osapuolelle sähköä ostettaessa. Ostosähkön hinnan nousun on arvioitu olevan 2 % vuodessa ja tuulivoimalan sähköntuotannon on arvioitu vähenevän 0,25 % vuodessa.

Laskelmien helpottamiseksi on oletettu, että kaikki tuotettu sähkö käytetään itse. Huomiota ei myöskään ole otettu mahdollisesta invertterin vaihdosta aiheutuvia kustannuksia eikä tuulivoimaloille tehtäviä huoltoja, joita suositellaan tehtäväksi kahden vuoden välein. Edellä esitettyjen kuvaajien tärkein merkitys on siis tuoda esille suuntaa antavasti, millaisia tuotto-odotuksia voimalalla tulee olla suhteessa investointikustannuksiin ja pitoaikaan.

Tässä luvussa laskettujen investointikustannusten, sekä tuotto-odotusten perusteella voidaan erityisesti WindSpot voimalan kohdalla todeta investointikustannusten olevan liian korkeat saavutettaviin vuosituottoihin nähden. Vaikka luvussa 6.3 saatuja laskennallisia tuloksia voidaan pitää vain suuntaa antavina, on epätodennäköistä, että kummallakaan voimalalla pystyttäisiin Takojantiellä saavuttamaan yli 2000 kWh vuosituotanto. Mikäli voimalat pääsisivätkin tähän vuosituotantoon, on syytä huomata, että Ecorote voimalalla kestäisi noin 23 vuotta ja WindSpot voimalalla yli 30 vuotta saavuttaa edes omat investointikustannuksensa.

Kustannusten sekä vuosituoton näkökulmasta Ecorote voimalaa voidaan siis pitää kannattavampana vaihtoehtoina kuin WindSpot voimalaa. On kuitenkin muistettava, että kyseisen voimalan vuosituotantoennuste on huomattavasti huonompi kuin WindSpot voimalalla. Mikäli kohteessa suoritettut tuulivoimamittaukset eivät paranna tuotto-odotuksia merkittävästi, ei kummankaan tuulivoimalan hankintaa investointimielessä voida pitää kannattavana.

## 7. YHTEENVETO JA POHDINTA

Tässä diplomityössä läpikäytiin pääpiirteittäin erilaisia omavaraiseen sähkön- ja lämmöntuotantoon suunniteltuja järjestelmiä sekä niiden kannattavuutta saneerattavan teollisuushallin yhteydessä. Sähköntuotannon kannalta perusajatuksena oli tuoda kohteeseen sekä aurinko- että tuulivoimaratkaisu, joiden yhteistuotannolla pystyttäisiin kattamaan mahdollisimman suuri osa kohteen vuotuisesta sähköenergian tarpeesta. Näitä tapoja arvioitaessa pystyttiin hyvin helposti toteennäyttämään aurinkovoiman kannattavuus, koska erinäisten tuotanto ja harrastehallien sähkönkäyttö ajoittuu yleensä päiväsaikaan. Tällöin myös auringon säteilyenergiasta saatava energia on suurimmillaan ja näin myös investoinnin voidaan katsoa olevan kannattava.

Tuulivoiman osalta suurimpana ongelmana voidaan pitää pientuulivoiman investointikustannuksia suhteessa tuotettuun energiaan. Siinä missä 3,3 kW aurinkovoimalan investointikustannukset ovat noin 5000 €, saattaa saman tehoisen pientuulivoimalan kustannukset olla jopa 15000 €. On kuitenkin hyvä muistaa, että tuulivoiman suurena etuna on tuotannon ajoittuminen talvikauteen, jolloin lämmitysenergian tarve on suurin. Mikäli siis tuulivoiman tuotanto saataisiin talvikaudella samalle tasolle, kuin aurinkovoimalla kesäkaudella, voitaisiin tällä katsoa olevan suuri merkitys ostosähkön kannalta talvikaudella. Kysynnän ja tarjonnan vuoksi sähkön hinnat ovat nimittäin talvikaudella korkeammat kuin kesäkaudella, jonka lisäksi moni lämmityslaitteisto vaatii toimiakseen sähköä.

Siinä missä kohteen sähköntuotantojärjestelmän valinnasta saatiin melko suoraviivaiset tulokset, lämmöntuotantojärjestelmän valinnan voidaan katsoa olevan huomattavasti moninaisempi prosessi.

Lämmityksen osalta eri järjestelmien kannattavuutta on järkevää tarkastella kolmelta eri suunnalta; kustannukset, ekologisuus ja käytännöllisyys. Luvussa 6 laskettujen kustannusten pohjalta pystyttiin jo aiemmin toteamaan, että puulämmitteistä järjestelmää voidaan pitää taloudellisesta näkökulmasta kannattavimpana järjestelmänä.

Vaikka puulämmitys olisi kustannustehokkain ratkaisu, on hyvä huomata, että lämpöpumput ovat huomattavasti käytännöllisempiä. Siinä missä puulämmityksessä lämmittämistä vastuu on aina käyttäjällä, lämpöpumpuilla kaikki tapahtuu automaattisesti. Lisäksi puulämmityksen kannalta on hyvin tärkeää, että kattilan lämmitys tapahtuu riittävän usein. Mikäli lämmitys on puutteellista, joudutaan varaajissa oleva vesi lämmittämään sähkövastuksilla tai hyödyntämään vaihtoehtoisesti ilmalämpöpumppua, jolla on suora vaikutus sähkönkultukseen.

Investointi- ja vuosikustannusten kannalta on myös huomioitava mahdollisen ilma-vesilämpöpumpun hankinnasta ja käytöstä syntyvät lisäkustannukset. Luvussa 6 lasketuista kustannuksista voidaan nähdä, että puukeskuskattilan ja ilma-vesilämpöpumpun yhteiskustannukset ovat likimain samat kuin maalämmöllä. Näin ollen järkevimpänä lämmitysratkaisuna kustannusten, ekologisuuden sekä käytännöllisyyden kannalta voidaan pitää maalämpöä.

Maalämmön sekä muiden lämpöpumppuratkaisuiden kannattavuutta lisää myös mahdollisuus erilaisiin, melko helposti toteutettaviin automaattioratkaisuihin, joiden avulla kohteen energiankäyttöä on mahdollista optimoida jatkossa.

Mikäli vuoden 2021 aikana toteutettavien tuulivoimamittausten perusteella pystytään osittamaan tuulivoiman kannattavuus kohteessa, tukisi se myös lämpöpumpuilla toteutettua lämmitysratkaisua. Tässä tapauksessa pientuulivoimalla tuotettua sähköä pystyttäisiin hyödyntämään lämpöpumppujen käytössä ja tällä tavoin laskemaan ostosähkön määrää talvella.

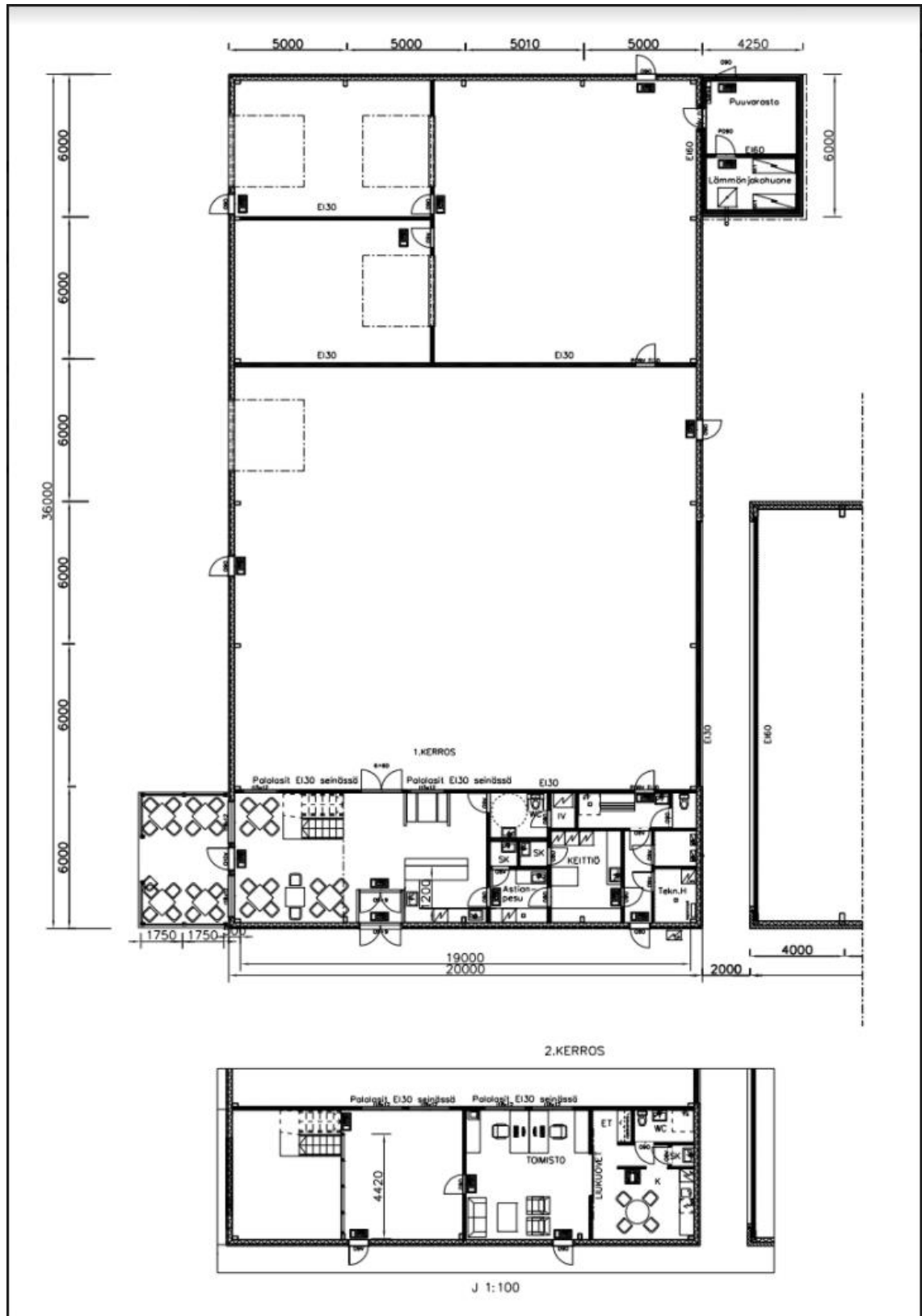
## LÄHTEET

- [1] Tilastokeskus, Rakennusluokitus, 2018, Saatavissa (viitattu 3.3.2021): <https://www.stat.fi/fi/luokitukset/rakennus/?code=0919&name=Muu%20teollisuuden%20tuotantorakennukset>
- [2] Motiva, Lämpöä ilmassa, 2012, Saatavissa (viitattu 3.3.2021): [https://www.motiva.fi/files/7964/Lampoa\\_ilmassa\\_Ilmalampopumput.pdf](https://www.motiva.fi/files/7964/Lampoa_ilmassa_Ilmalampopumput.pdf)
- [3] GreenMatch, Air source heat pumps, 2021, Saatavissa (viitattu 10.3.2021): <https://www.greenmatch.co.uk/heat-pump/air-source-heat-pump>
- [4] Ground source heat, 2021, Saatavissa (viitattu 10.3.2021): <https://www.greenmatch.co.uk/heat-pump/ground-source-heat-pump>
- [5] J. Juvonen, T. Lapinlampi, Energiakaivo, maalämmön hyödyntäminen pientalossa, 2013, Saatavissa (viitattu 10.3.2021): [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO\\_2013.pdf](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf)
- [6] J. Lehtinen, Maalämpöpumpun ja maalämmön valinta, 2013, Saatavissa (viitattu 10.3.2021): <http://docplayer.fi/110904-Maalampopumpun-ja-maalammon-valinta.html>
- [7] Kiinteistömedia, Energiatehokkuuden minimivaatimukset korjausrakentamisessa, 2021, Saatavissa (viitattu 13.5.2021): [https://www.kiinteistomedia.fi/ContentFiles/tuotteet/uudet\\_energiatehokkuusmaaraykset\\_korjausrakentamisessa/Uudet%20energiatehokkuusmaaraykset\\_n%C3%A4ytesivut.pdf](https://www.kiinteistomedia.fi/ContentFiles/tuotteet/uudet_energiatehokkuusmaaraykset_korjausrakentamisessa/Uudet%20energiatehokkuusmaaraykset_n%C3%A4ytesivut.pdf)
- [8] Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta, 2012, Saatavissa (viitattu 13.5.2021): <https://www.ymparisto.fi/download/no-name/%7B5DA79466-F15E-4FC9-9C76-46AE002B7FF6%7D/141249>
- [9] Lämpöpumppujen energialaskentaopas, 2012, Saatavissa (viitattu 1.4.2021): [https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6\\_EA2F\\_45F9\\_869C\\_6F909138CB26-30757.pdf](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6_EA2F_45F9_869C_6F909138CB26-30757.pdf)
- [10] VTT: Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, 2000, Saatavissa (viitattu 1.4.2021): <https://www.motiva.fi/files/685/t2045.pdf>
- [11] Lännen maalämpö, 2021, Saatavissa (viitattu 20.3.2021): <https://lannenmaalampo.fi/tarjouspyynto>
- [12] HSY: Puunpoltto heikentää ilmanlaatua, 2021, Saatavissa (viitattu 1.4.2021): <https://www.hsy.fi/ilmanlaatu-ja-ilmasto/puunpoltto-heikentaa-ilmanlaatua/>
- [13] B. Erat, Soltekniska föreningen. Aurinko-opas: aurinkoenergiaa rakennuksiin. Porvoo: Aurinkoteknillinen yhdistys; 2008.
- [14] Maankäyttö- ja rakennuslaki, 5.2.1999/132. Saatavissa (viitattu 3.3.2021): <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>
- [15] Tukes: Aurinkosähköjärjestelmät, 2021, Saatavissa (viitattu 20.3.2021): <https://tukes.fi/sahko/sahkotyot-ja-urakointi/aurinkosahkojarjestelmat>

- [16] Sähkön ja eräiden polttoaineiden vero, 2021, Saatavissa (viitattu 3.3.2021): <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/sahko-ja-eraat-polttoaineet/>
- [17] Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta annetun valtioneuvoston asetuksen muuttamisesta, 2020, Saatavissa (viitattu 21.3.2021): <https://valtioneuvosto.fi/paatokset/paatos?decisionId=0900908f806f9675>
- [18] European commission photovoltaic geographical information system, 2019, Saatavissa (viitattu 1.3.2021): <https://re.jrc.ec.europa.eu/>
- [19] Sun Energy aurinkosähkölaskuri, 2021, Saatavissa (viitattu 1.3.2021): <https://app.sunenergia.com/>
- [20] Kannattavuuslaskurit, 2020, Saatavissa (viitattu 1.1.2021): <https://finso-lar.net/kannattavuus/kannattavuuslaskurit/>
- [21] Elenia verkkopalveluhinnasto, 2021, Saatavissa (viitattu 15.3.2021): <https://www.elenia.fi/files/6139106ff40ec0193ede522108ca33c7c1a6e3f1/elenia-sulake-hinnasto-2021-a5-fin-v1.pdf>
- [22] Sähkön-hintatilastot, 2020, Saatavissa (viitattu 15.3.2021): <https://energiavirasto.fi/sahkon-hintatilastot>
- [23] Finnwind Oy, 2021, Saatavissa (viitattu 2.3.2021): <https://finnwind.fi>
- [24] A. Korpela, Luentomoniste kurssille: Tuulivoiman perusteet, 2014
- [25] Jokamiehen opas tuulivoimalan käyttöön, 2020, Saatavissa (viitattu 10.4.2021): [https://www.motiva.fi/files/6010/Joka\\_miehen\\_opas\\_pientuulivoiman\\_kayttoon.pdf](https://www.motiva.fi/files/6010/Joka_miehen_opas_pientuulivoiman_kayttoon.pdf)
- [26] Wind power and human health, flicker, noise and air quality, 2010, Saatavissa (viitattu 10.2.2021): <https://www.michiganseagrant.org/wp-content/uploads/2018/08/10-733-Wind-Brief2-Flicker-Noise-Air-Quality2.pdf>
- [27] Sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon, 2019, Saatavissa (viitattu 3.3.2021): [https://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/S%C3%A4hk%C3%B6tuotantolaitoksen\\_liitt%C3%A4minen\\_jakeluverkkoon\\_2019.pdf](https://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/S%C3%A4hk%C3%B6tuotantolaitoksen_liitt%C3%A4minen_jakeluverkkoon_2019.pdf)
- [28] Maanmittauslaitos: Paikkatietoikkuna, 2021, Saatavissa (viitattu 10.3.2021): <https://kartta.paikkatietoikkuna.fi/>
- [29] Ilmatieteenlaitos, suomen tuuliatlas, 2021, Saatavissa (viitattu 15.3.2021): <http://tuuliatlas.fmi.fi/fi/>
- [30] K. Suoniemi, Pientuulivoiman suunnittelu ja tuotannon ennustus kuluttajan näkökulmasta, 2014.
- [31] Ecorote 2800 wind, 2021, Saatavissa (viitattu 15.3.2021): <https://www.wattu-need.com/en/wind-turbine/21141-ecorote-28kw-wind-kit-injection-network-0768563817137.html?preconfig=1:1|1:1|1:1>

- [32] WindSpot tuulivoimalat, 2021, Saatavissa (viitattu 15.3.2021): <https://sites.google.com/site/kodinvihreaenergia/windspot-tuulivoimalat>
- [33] Hybrid energia Oy, 2021, Saatavissa (viitattu 2.3.2021): <https://kauppa.hybridenergia.fi/>

# LIITE 1: HALLIN POHJAPIIRUSTUS



## LIITE 2: LÄMMITYSMUOTOEJEN ENERGIANKULUTUS ENNEN PERUSPARANNUKSA

| Kulutukset ennen energiatehokkuus parannuksia     |          |                              |            |          |     |
|---|----------|------------------------------|------------|----------|-----|
| <i>Toteutus ydellä järjestelmällä</i>             |          |                              |            |          |     |
|   | Lämmitys | Käyttövesi                   | Yhteensä   |          |     |
| <b>Lämmitysenergia/ vuosi</b>                     | 60000    | 5000                         | 65000      | kWh      |     |
| <b>Maalämpö energiankulutus/vuosi</b>             |          |                              |            |          |     |
| Menovesi 30c°, Käyttövesi 60c°                    | 17647    | 2174                         | 19821      | kWh      |     |
| Menovesi 40c°, Käyttövesi 60c°                    | 20000    | 2174                         | 22174      | kWh      |     |
| Menovesi 60c°, Käyttövesi 60c°                    | 24000    | 2174                         | 26174      | kWh      |     |
| <b>Ilma-vesilämpöpumppu energiankulutus/vuosi</b> |          |                              |            |          |     |
| Menovesi 30c°, Käyttövesi 30c°                    | 21429    | 3125                         | 24554      | kWh      |     |
| Menovesi 40c°, Käyttövesi 60c°                    | 24000    | 3125                         | 27125      | kWh      |     |
| Menovesi 30c°, Käyttövesi 60c°                    | 28571    | 3125                         | 31696      | kWh      |     |
| <i>Toteutus 2 järjestelmällä</i>                  |          |                              |            |          |     |
|   | Halli    | Toimistot (15% kulutuksesta) |            |          |     |
|   | Lämmitys | Lämmitys                     | Käyttövesi | Yhteensä | kWh |
| <b>Lämmitysenergia/ vuosi</b>                     | 51000    | 9000                         | 5000       |          |     |
| <b>Maalämpö energiankulutus/vuosi</b>             |          |                              |            |          |     |
| Menovesi 30c°                                     | 15000    | -                            | -          | 15000    | kWh |
| <b>Ilma-vesilämpöpumppu energiankulutus/vuosi</b> |          |                              |            |          |     |
| Menovesi 30c°, Käyttövesi 60c°                    | -        | 3214                         | 3125       | 6339     | kWh |
|   |          |                              |            | 21339    | kWh |
| <b>Maalämpö energiankulutus/vuosi</b>             |          |                              |            |          |     |
| Menovesi 40c°                                     | 17000    | -                            | -          | 17000    | kWh |
| <b>Ilma-vesilämpöpumppu energiankulutus/vuosi</b> |          |                              |            |          |     |
| Menovesi 40c°, Käyttövesi 60c°                    | -        | 3600                         | 3125       | 6725     | kWh |
|   |          |                              |            | 23725    | kWh |
| <b>Maalämpö energiankulutus/vuosi</b>             |          |                              |            |          |     |
| Menovesi 60c°                                     | 20400    | -                            | -          | 20400    | kWh |
| <b>Ilma-vesilämpöpumppu energiankulutus/vuosi</b> |          |                              |            |          |     |
| Menovesi 60c°, Käyttövesi 60c°                    | -        | 4286                         | 3125       | 7411     | kWh |
|   |          |                              |            | 27811    | kWh |
| <b>ILP energiankulutus/vuosi</b>                  |          | 3214                         |            |          | kWh |



## LIITE 3: LÄMMITYSMUOTOEJEN ENERGIANKULUTUS PERUSPARANNUSTEN JÄLKEEN

| Kulutukset energiatehokkuus parannusten jälkeen   |          |                              |            |          |     |  |
|---|----------|------------------------------|------------|----------|-----|--|
| <i>Toteutus ydellä järjestelmällä</i>             |          |                              |            |          |     |  |
|   | Lämmitys | Käyttövesi                   | Yhteensä   |          |     |  |
| <b>Lämmitysenergia/ vuosi</b>                     | 40000    | 5000                         | 45000      | kWh      |     |  |
| <b>Maalämpö energiankulutus/vuosi</b>             |          |                              |            |          |     |  |
| Menovesi 30c°, Käyttövesi 60c°                    | 11765    | 2174                         | 13939      | kWh      |     |  |
| Menovesi 40c°, Käyttövesi 60c°                    | 13333    | 2174                         | 15507      | kWh      |     |  |
| Menovesi 60c°, Käyttövesi 60c°                    | 16000    | 2174                         | 18174      | kWh      |     |  |
| <b>Ilma-vesilämpöpumppu energiankulutus/vuosi</b> |          |                              |            |          |     |  |
| Menovesi 30c°, Käyttövesi 30c°                    | 14286    | 3125                         | 17411      | kWh      |     |  |
| Menovesi 40c°, Käyttövesi 60c°                    | 16000    | 3125                         | 19125      | kWh      |     |  |
| Menovesi 30c°, Käyttövesi 60c°                    | 19048    | 3125                         | 22173      | kWh      |     |  |
| <i>Toteutus 2 järjestelmällä</i>                  |          |                              |            |          |     |  |
|   | Halli    | Toimistot (15% kulutuksesta) |            |          |     |  |
|   | Lämmitys | Lämmitys                     | Käyttövesi | Yhteensä | kWh |  |
| <b>Lämmitysenergia/ vuosi</b>                     | 34000    | 6000                         | 5000       |          |     |  |
| <b>Maalämpö energiankulutus/vuosi</b>             |          |                              |            |          |     |  |
| Menovesi 30c°                                     | 10000    | -                            | -          | 10000    | kWh |  |
| <b>Ilma-vesilämpöpumppu energiankulutus/vuosi</b> |          |                              |            |          |     |  |
| Menovesi 30c°, Käyttövesi 60c°                    | -        | 2143                         | 3125       | 5268     | kWh |  |
|   |          |                              |            | 15268    | kWh |  |
| <b>Maalämpö energiankulutus/vuosi</b>             |          |                              |            |          |     |  |
| Menovesi 40c°                                     | 11333    | -                            | -          | 11333    | kWh |  |
| <b>Ilma-vesilämpöpumppu energiankulutus/vuosi</b> |          |                              |            |          |     |  |
| Menovesi 40c°, Käyttövesi 60c°                    | -        | 2400                         | 3125       | 5525     | kWh |  |
|   |          |                              |            | 16858    | kWh |  |
| <b>Maalämpö energiankulutus/vuosi</b>             |          |                              |            |          |     |  |
| Menovesi 60c°                                     | 13600    | -                            | -          | 13600    | kWh |  |
| <b>Ilma-vesilämpöpumppu energiankulutus/vuosi</b> |          |                              |            |          |     |  |
| Menovesi 60c°, Käyttövesi 60c°                    | -        | 2857                         | 3125       | 5982     | kWh |  |
|   |          |                              |            | 19582    | kWh |  |
| <b>Ilma-ilmalämpöpumppu energiankulutus/vuosi</b> |          |                              |            |          |     |  |
|   |          |                              | 2143       |          | kWh |  |