

Timo Juusola

Ilmavesilämpöpumpun toiminnan tehostaminen maaperän lämpöenergiaa hyödyntämällä

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Energiatekniikan koulutus

2023



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (amk)
Tekijä/Tekijät	Timo Juusola
Työn nimi	Ilmavesilämpöpumpun toiminnan tehostaminen maaperän lämpöenergiaa hyödyntämällä
Toimeksiantaja	Antti Koro
Vuosi	2023
Sivut	45 sivua
Työn ohjaaja(t)	Hannu Sarvelainen, Antti Koro

TIIVISTELMÄ

Talvella ulkolämpötila laskee alhaiseksi, jolloin ilmavesi- ja ilmalämpöpumppujen hyötysuhde heikkenee. Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää, voidaanko ilmavesilämpöpumpun toimintaa tehostaa maaperän lämpöenergiaa hyödyntämällä. Työ on teoreettinen esiselvitys ilman lämmittämisestä maanlaisessa putkistossa. Lämmitettävä kiinteistö on pientalo.

Tutkimuksen Ilmavesilämpöpumppu on Panasonic Aquarea All in One T-CAP 9 kW. Koejärjestelyssä on neljä 12 metriä pitkää putkea, joiden sisähalkaisijat ovat 20 cm. Putket kaivetaan maan alle noin kahden metrin syvyyteen. Maanpinnalla on katoksella suojattu tuloaukko, josta ulkoilma pääsee sisään lämpenemään putkistoon. Ilma virtaa putkissa 3 m/s puhaltimen avustuksella. Esilämmitettyä ilmaa puhalletaan nousukuilusta ilmavesilämpöpumpun ulkoyksikköön, jolloin lämpöpumpun hyötysuhde paranee ja syntyy energiansäästöä.

Koejärjestely tullaan toteuttamaan Kouvolassa, siksi lämpötilatietoina on käytetty Utin havaintoaseman arvoja vuosilta 2013–2022. Tutkimuksen suurin ongelma on selvittää, kuinka hyvin maaperän lämpö siirtyy putkissa virtaavaan ilmaan. Ilmavesilämpöpumpusta on kerätty COP- ja tehonkulutusarvoja eri ulkolämpötiloilla, joiden avulla on voitu laskea vuotuinen energiansäästö. Säästöä syntyy 287–656 kilowattituntia vuodessa, mikä vastaa 5,3–12,1 % kokonaislämmitysenergian tarpeesta. Tuloksen tarkkuuteen vaikuttaa paljon lämpöpumpun ulkoyksikön läpi menevä tilavuusvirta, joka voi olla jopa tuhansia kuutiometrejä ilmaa tunnissa. Kaikkea ulkoyksikön käyttämää ilmaa ei saada riittämään putkistosta, vaan osa on ulkoilmaa. Esilämmitettyä ilmaa putkistosta tulee noin 40 % ulkoyksikön käyttämästä maksimi ilmamäärästä.

Työssä tehtiin karkea kustannusvertailu maalämmön, ilmavesilämpöpumpun ja ilmavesilämpöpumpun, jossa on esilämmitys, välillä. Maalämpö on edullisin energiaratkaisu. Esilämmitys ei juuri paranna ilmavesilämpöpumpun vuotuisia kokonaiskustannuksia. Työn lopussa tarkastellaan lisää epävarmuustekijöitä, jotka vaikuttivat tuloksiin.

Asiasanat: ilmavesilämpöpumppu, ilmalämpöpumppu, maaperä, esilämmitys

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Timo Juusola
Thesis title	Improving the operation of the air to water heat pump by utilizing the heat energy of the soil
Commissioned by	Antti Koro
Time	2023
Pages	45 pages
Supervisor	Hannu Sarvelainen, Antti Koro

ABSTRACT

In winter when an outside temperature drops the efficiency of air-to-air heat pumps and air-to-water heat pumps declines. The purpose of this thesis was to determine if it is possible to improve the efficiency of an air-to-water heat pump by utilizing soil as an energy source. The thesis was a theoretical preliminary investigation of preheating air in pipes embedded in the soil. The heated property is a detached house.

The heat pump used in this thesis was Panasonic Aquarea All in One T-CAP 9 kW. Four pipes that are 12 metres long with a 20 cm inner radius were set in the trial arrangement. The pipes will be dug approximately 2 metres underground. There is an air inlet on the surface of the earth where the outside air can pass to the pipes. The air is blown at 3 m/s by a fan as the air warms in the pipes. Preheated air exits from the pipes via an ascension gap to the heat pump's outdoor unit which improves the efficiency of the heat pump.

The trial arrangement will be made in Kouvola. Weather data from Utti observation station from 2013-2022 has been used to calculate energy savings. One of the main challenges of the thesis was to determine how much heat can transfer from soil to air inside the pipes. Power usage and COP (coefficient of performance) values were collected from the heat pump in different outside temperatures to calculate yearly energy savings. A total of 287-656 kilowatt-hours of energy was saved in a year which accounts for 5,3-12,1 % of the total heating energy. The result varies because the air flow required for a heat pump's outdoor unit varies. Air flow can be as high as three thousand cubic meters per hour. The outdoor unit uses air from the pipes and outside air. The preheated air coming from the pipes is only about 40 % of the maximum total air to the outdoor unit.

A rough cost comparison was made between a ground source heat pump, an air-to-water heat pump and an air-to-water heat pump with the pipe preheating. The ground source heat pump proved to be the most inexpensive energy solution. The air-to-water heat pump with preheating does not notably decrease the annual total costs compared with the air-to-water heat pump. At the end of the thesis more uncertainty factors were discussed that might have an influence on the results.

Keywords: air-to-water heat pump, air-to-air heat pump, soil, preheating

SISÄLLYS

SYMBOLILUETTELO	5
1 JOHDANTO	7
2 ENERGIANKÄYTTÖ RAKENNUSTEN LÄMMITTÄMISESSÄ.....	8
3 LÄMMÖN SIIRTYMISEN PERIAATTEET.....	9
4 ILMAVESILÄMPÖPUMPUN (IVLP) TOIMITAPERIAATE	11
5 MAAPERÄN LÄMMÖNTUOTTOPOSENTIAALI	13
6 ILMAVESILÄMPÖPUMPUN TULOILMAN ESILÄMMITYS.....	17
6.1 Putkien valinta	19
6.2 Putkimateriaalien vertailu.....	21
6.3 Putkien asennussyvyys	22
6.4 Lämpötilatiedot Kouvolan Utissa.....	24
7 LASKENTA JA TULOKSET	26
7.1 Laskenta	26
7.2 Tulokset	31
7.3 Säästö esimerkki Rovaniemi	37
8 VERTAILUA MAALÄMPÖPUMPPU, IVLP JA IVLP+ESILÄMMITYS	38
9 YHTEENVETO JA VIRHEIDEN TARKASTELU	41
LÄHTEET.....	43

SYMBOLILUETTELO

Lyhenteet

COP	lämpöpumpun tuottaman lämpöenergian suhde käytettyyn sähkö-energiaan (Coefficient of performance)
SPF	lämpöpumpun kausilämpökerroin (Seasonal Performance Factor)

Symbolit

A	putkien seinämien pinta-ala [m^2]
A'	putkien poikkipinta-ala [m^2]
c_p	ominaislämpökapasiteetti [$kJ/(kg^\circ C)$]
d	putken seinämän paksuus [m]
D	putken sisähalkaisija [m]
E	kokonaisenergiansäästö vuodessa [kWh]
h_e	lämmönsiirtymiskerroin (putki/ilma) [$W/(m^2K)$]
h_i	lämmönsiirtymiskerroin (maa/putki) [$W/(m^2K)$]
l	Putken pituus [m]
m	sekoitussuhde putkesta [%]
n	putkien lukumäärä [-]
Nu	Nusseltin luku [-]
p	ilmanpaine [Pa]
P_1	IVLP käyttämä teho [kW]
P_2	IVLP käyttämä teho esilämmityksellä [kW]
Pr	Prandtlin luku [-]
q_m	massavirta [kg/s]
q_v	kokonaistilavuusvirta [m^3/s]
q_{v1}	putkiston tilavuusvirta [m^3/s]
q_{v2}	ulkoilman tilavuusvirta [m^3/s]
R	kaasuvakio [$J/(^\circ Cmol)$]
Re	Reynoldsin luku [-]
t	vuoden tuntiesiintymät [h]
T	ulkoyksikköön tuleva ilman lämpötila [$^\circ C$]
T_1	maaperän lämpötila [$^\circ C$]
T_2	putkista poistuva ilman lämpötila [$^\circ C$]

T_3	ulkoilman lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
U	lämmönläpäisykerroin [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
w	virtausnopeus putkessa [m/s]
λ_i	ilman lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{mK})$]
λ_p	putkimateriaalin lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{mK})$]
ν	ilman kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]
ρ	ilman tiheys [kg/m^3]
ϕ	lämpöteho [W]

1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena on tutkia ilmavesilämpöpumpun (IVLP) toiminnan tehostamista maaperän lämpöenergiaa hyödyntämällä kylmillä ulkolämpötiloilla. Vaikka työssä käsitellään ilmavesilämpöpumppua, samaa ideaa voidaan hyödyntää myös ilmalämpöpumpuilla. Ulkolämpötilan ollessa $-15 - -30$ °C ilmavesilämpöpumpun hyötysuhde heikkenee selvästi (Motiva Oy 2022). Tässä työssä selvitetään, kuinka hyvin maaperän lämmöllä saadaan nostettua ilmavesilämpöpumpun hyötysuhdetta.

Ilmavesilämpöpumppuun tulevaa ilmaa esilämmitetään maan alle noin 2 metrin syvyyteen sijoitetuissa putkissa. Ulkoilma pääsee sisään etelään päin suunnatun katoksen kautta. Tuloaukosta ulkoilma menee maan alle sisäänmenokuiluun, joka on yhdistetty maan alle asetettuihin putkiin. Kuilussa puhallin puhaltaa ilmaa putkiston läpi. Maaperän lämpö siirtyy putken ulkopinnan kautta putkimateriaalin läpi putken sisässä olevaan ilmaan, jolloin ilma lämpeenee. Putket toimivat lämmönvaihtimen tavoin. Esilämmitetty ilma ohjautuu maanalaisista putkista nousukuiluun, josta ilmaa johdetaan lämpöpumpun ulkoyksikköön.

Opinnäytetyön idea on lähtöisin Kouvolassa asuvalta yksityishenkilöltä. Hänellä on Ilmavesilämpöpumppu (Panasonic Aquarea All in One T-CAP 9kW) 130 neliöisessä omakotitalossa. Ilmavesilämpöpumppu on asennettu keväällä 2022. Toimeksiantaja haluaa esilämmittää ilmavesilämpöpumppuun tulevaa ilmaa neljällä 12 metriä pitkällä lämpöpumpun ulkoyksiköstä alaspäin viettävällä putkella.

Opinnäytetyössä tehdään teoreettinen esiselvitys ilman esilämmittämisestä maan alla sijoitetuissa putkissa, joilla lämmitetään lämpöpumpun tuloilmaa. Työssä pyritään selvittämään järjestelmän kannattavuutta.

2 ENERGIANKÄYTTÖ RAKENNUSTEN LÄMMITTÄMISESSÄ

Rakennusten lämmitys kuluttaa neljäsosan Suomessa käytetystä energiasta (Tilastokeskus 2021a). Kun fossiilisista polttoaineista pyritään eroon, on niiden osuus vähentynyt rakennuksien lämmityksessä nopeasti 2010-luvulta lähtien. Tilalle ovat tulleet erilaiset lämpöpumput, jotka ovat huomattavasti tehokkaampia kuin suora sähkölämmitys, mutta toimivat kuitenkin sähköllä. (Tilastokeskus 2021b.)

Pientalojen lämmitykseen käytetty energiamäärä prosentteina Suomessa vuonna 2020 eri energialähteillä oli seuraava: puulämmitys 38 %, suora sähkölämmitys 32 %, lämpöpumput 16 %, öljylämmitys 7 % ja kaukolämpö 7 %. Lämpöpumpuilla tuotetun energian osuus pientaloissa on miltei kaksinkertainen vuosien 2010–2020 välillä. (Tilastokeskus 2021c.)

Euroopan unionin tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Suomi EU:n jäsenmaana on sitoutunut hiilineutraaliustavoitteeseen. Suomen hallitusohjelman asettama hiilineutraaliustavoite on jo vuodelle 2035, mikä on huomattavasti kunnianhimoisempi kuin monilla muilla EU-mailla. Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia korostaa, että lämmöntuotannossa halutaan edistää etenkin polttoon perustumatonta lämmöntuotantoa sekä sähköistää energijärjestelmää. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022.) Lämpöpumpputeknologialla tulee siis olemaan suuri merkitys rakennusten lämmittämisessä nyt ja tulevaisuudessa.

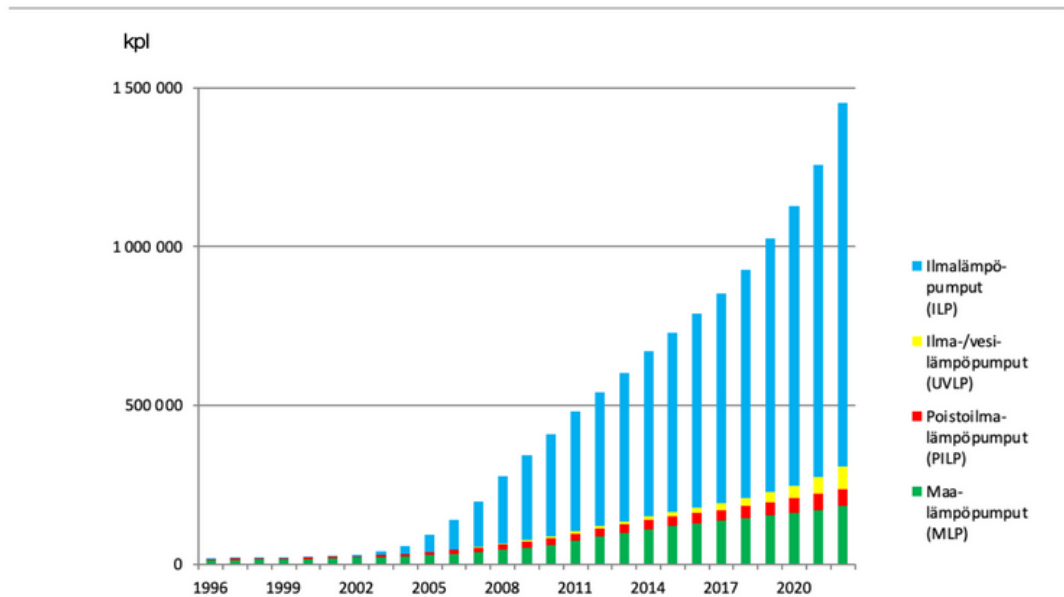
Suomessa lämpöpumppujen kasvavan suosion taustalla voidaan pitää ilmastomuutoksen aiheuttamaa painetta siirtyä pois fossiilisista polttoaineista. Myös sähkön, öljyn, kaasun ja kaukolämmön hintojen nousu on vauhdittanut lämpöpumppuihin siirtymistä etenkin vuoden 2022 energiakriisin aikana. Lisäksi noussut sähkön hinta ohjaa sähkölämmitteisiä pientaloja valitsemaan lämpöpumpun, jolla sähkön kulutusta voidaan laskea merkittävästi.

Lämpöpumppujen yleistymisen on nähtävillä Suomessa ja maailmalla. Kuvasta 1. nähdään, että Suomessa on jo 1,45 miljoonaa lämpöpumppua vuoteen 2022 mennessä. Etenkin ilmavesilämpöpumppujen kasvuvauhti on ollut nopeaa. Vuonna 2022 niiden määrä kasvoi noin 60 % edellisvuodesta, jolloin

asennusmäärä oli noin 19 000 kappaletta. Euroopan tasolla lämpöpumppujen suosion uskotaan räjähtävän tulevina vuosina. Euroopan unionin FIT55- ja RePowerEU-paketin yhteydessä suunnitellaan lämpöpumppujen määrän jopa kolminkertaistamista nykyisestä 20 miljoonasta vuoteen 2030 mennessä. (Sulpu 2023.)

Suomeen myydyt lämpöpumput, kumulatiivinen

1,45 miljoonaa kappaletta



Kuva 1. Suomeen on myyty 1,45 miljoonaa lämpöpumppua vuoteen 2022 mennessä (Sulpu 2023)

3 LÄMMÖN SIIRTYMISEN PERIAATTEET

Lämpö voi siirtyä kolmella eri tavalla: johtuminen (konduktio), konvektio (kuljetus), säteily tai näiden yhdistelmät. Kaikki lämmönsiirtotavat edellyttävät lämpötilaeron väliaineiden välillä. Lämpö siirtyy kuumemmasta kylmempään väliaineeseen.

Johtumisessa lämpö siirtyy aineen sisällä. Lämpö voi siirtyä johtumalla myös toiseen aineeseen, mikäli aineet ovat kosketuksissa toistensa kanssa. Johtumista tapahtuu kiinteissä aineissa, nesteissä ja kaasuissa. Siirtyminen tapahtuu enemmän energiaa sisältävästä kohdasta vähemmän energiaa sisältävään kohtaan tai enemmän energiaa sisältävästä väliaineesta vähemmän energiaa sisältävään väliaineeseen. Lämmön siirtymisnopeuteen vaikuttaa väliaineen materiaali, muoto, tiheys sekä lämpötilaero väliaineiden välillä. (Çengel 2002, 17–18.)

Konvektiossa lämpöenergia siirtyy kiinteästä pinnasta nesteeseen tai kaasuun, jonka mukana lämpö siirtyy paikasta toiseen. Konvektiossa yhdistyy johtuminen ja kaasun tai nesteen liike. Mitä nopeampi on nesteen tai kaasun liike, sitä suurempi on konvektiolämmönsiirto. Konvektio voidaan jakaa pakotettuun konvektioon ja vapaaseen konvektioon. (Çengel 2002, 25.)

Pakotetussa konvektiossa neste tai kaasu on pakotettu kulkemaan pinnan yli ulkoisella tavalla kuten tuulettimen, pumpun tai tuulen avustuksella. Lämmönsiirtymiskerroin on korkeampi pakotetussa konvektiossa kuin vapaassa konvektiossa. Samalle aineelle voi olla useita lämmönsiirtymiskertoimen arvoja. Kuitenkaan lämmönsiirtymiskerroin ei ole kaasun tai nesteen ominaisuus, vaan se määritetään kokeellisesti. Siihen vaikuttaa erilaiset muuttujat kuten pinnanmuoto, nesteen ja kaasun ominaisuudet ja niiden liike. (Çengel 2002, 26.)

Taulukko 1. Konvektiotyypin lämmönsiirtymiskertoimia (Çengel 2002, 26)

Konvektiotyyppi	$h, W/(m^2K)$
Vapaa konvektio kaasuille	2–25
Vapaa konvektio nesteille	10–1000
Pakotettu konvektio kaasuille	25–250
Pakotettu konvektio nesteille	50–20000
Kiehumisen ja tiivistyminen	2500–100000

Vapaa konvektio, josta käytetään myös nimitystä luonnollinen konvektio, on lämmönsiirtymistä, jossa nestemolekyylit liikkuvat tiheyden ja lämpötilagradientin vuoksi siirtääkseen lämpöä. Nesteen tai kaasun liike tulee nostevoimista, jotka ovat aiheutuneet tiheyseroista lämpötilan muutoksen seurauksena. Suurin ero vapaan konvektion ja pakotetun konvektion välillä on siis, että vapaassa konvektiossa nesteen tai kaasun molekyylit liikkuvat lämpötila- ja tiheyseron vuoksi, kun taas pakotetussa konvektiossa nestemolekyyleissä liike syntyy ulkoisesta lähteestä kuten puhaltimesta. (Mech Content 2021.)

Toisin kuin johtumisessa ja konvektiossa, energian siirtyminen säteilemällä ei vaadi väliainetta. Säteily on aineen lähettämää energiaa sähkömagneettisten aaltojen tai fotonien muodossa, minkä saa aikaan atomien tai molekyylien

elektronisten rakenteiden muutokset. Kaikki nesteet, kaasut ja kiinteät aineet, joiden lämpötila ylittää absoluuttisen nolla pisteen lähettävät eriävissä määrin lämpösäteilyä. Säteilystä saatava lämpöenergian määrä riippuu kappaleen tilavuudesta ja lämpötilasta. Auringosta saatava lämpö tulee maanpinnalle säteilemällä. Energian siirto säteilemällä on nopein lämmönsiirtotapa. (Çengel 2002, 27.)

4 ILMAVESILÄMPÖPUMPUN (IVLP) TOIMITAPERIAATE

Ilmavesilämpöpumppu ottaa energiaa ulkoilmasta, ja siirtää sen rakennuksen vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään. Ilmavesilämpöpumpun ulkoyksikkö pystyy keräämään ulkoilmasta lämpöenergiaa myös talvella. Mikäli lämpötila laskee alle - 20 °C:een lämpöpumpusta saatava hyöty jää vähäiseksi. IVLP toimii samalla periaatteella kuin muutkin lämpöpumput, ja tarvitsee toimiakseen kylmäaineen, joka kiertää systeemissä.

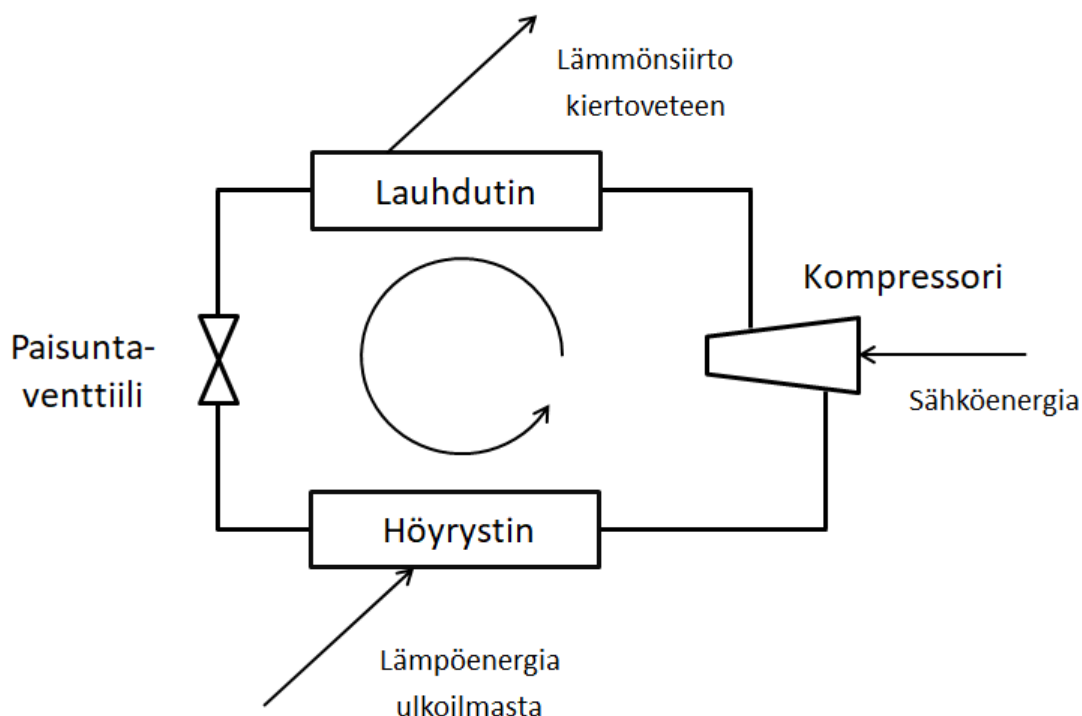
Ilmavesilämpöpumppujen laitetyppejä on pääsääntöisesti kahdenlaisia. On olemassa monoblock- ja split-laitteita. Monoblock-laitteissa lämpöpumpun tekniikka sijaitsee kokonaan ulkoyksikössä. Split-laitteissa kylmäaine kiertää ulko- ja sisäyksikön välillä. (Motiva Oy 2022.)

Lämpöpumpun ulkoyksikössä ovat höyrystin ja kompressori, sisäyksikössä ovat lauhdutin ja paisuntaventtiili. Kun ulkoilma menee ulkoyksikön lämmönvaihtajan läpi, systeemissä kiertävä kylmäaine saa lämpöenergiaa ja alkaa höyrystyä. Kylmäaineessa tapahtuu faasimuutos nesteestä höyryksi ulkoilman lämpöenergian avulla. Kylmäainehöyry siirretään kompressorin avulla lauhduttimeen, jonka aikana sen paine kasvaa ja lämpötila nousee. Lämpötila nousee jopa noin sataan °C:een ennen lauhdutinta (Motiva Oy s.a.). Eri kylmäaineilla on kuitenkin erilaiset aineominaisuudet, joten lämpötila, paine ja entalpia-arvot voivat vaihdella kylmäaineista ja lämpöpumppujen sisäisistä komponenteista riippuen.

Lauhduksessa kylmäainehöyry muuttuu nesteeksi. Tämä faasimuutos vapauttaa energiaa, joka siirretään ilmavesilämpöpumpussa rakennuksen vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään. Samalla yleensä lämmitetään myös raken-

nuksen käyttövesi. Tyypillisesti vesi saadaan lämmitettyä noin +55 °C lämpötilaan. Korkeampaan lämpötilaan vesi täytyy lämmittää esimerkiksi sähkövoimalla. (Motiva Oy 2021.) Jäähtynyt kylmäaine kulkee vielä paisuntaventtiilin läpi ennen kuin se palaa takaisin höyrystimeen. Paisuntaventtiilissä kylmäaineen paine ja lämpötila laskevat. Kylmäaine on pitkälti nestemäistä ennen höyrystintä, kun kierto alkaa uudestaan.

Kuvassa 2. on yksinkertaistettu kaaviokuva ilmavesilämpöpumpun toimintaperiaatteesta. Kylmäaine kiertää vastapäivään. Toimintaperiaate on samanlainen eri lämpöpumpuille.



Kuva 2. Lämpöpumpun toimintaperiaate

COP eli Coefficient Of Performance on lämpöpumpun lämpökerroin. Se tarkoittaa kuinka paljon lämpöpumppu pystyy tuottamaan lämpöenergiaa suhteessa sen käyttämään energiaan. Yleensä lämpöpumppu käyttää sähköenergiaa omana energianlähteenä. Esimerkiksi COP-arvo kolme tarkoittaa sitä, että lämpöpumppu tuottaa kolme kilowattituntia lämpöenergiaa ja käyttää yhden kilowattitunnin sähköenergiaa. (Perälä & Perälä 2013, 30.)

Ilmavesilämpöpumpun ulkoyksikkö pystyy keräämään lämpöä noin -20 – -25 °C:een saakka, kunnes ilmasta ei saada enää riittävää lämpöhyötyä (Perälä &

Perälä 2013, 73). Kun ulkolämpötila laskee liian alas, kytkeytyy ilmavesilämpöpumpun sähkövastus päälle, jolla pystytään turvaamaan rakennuksen lämmitys.

Ilmavesilämpöpumpun COP-arvoa eli lämpökerrointa heikentää myös korkea menoveden lämpötila. Lämpökerroin on myös parempi silloin, kun käytössä on pelkkä lattialämmitys verrattuna, jos käytössä on patterilämmitys. (Motiva Oy 2022.)

Tässä työssä COP-arvoa halutaan nostaa ulkoyksikön tuloilmaa esilämmittämällä. Työssä tutkitaan maaperään upotettujen putkien tuottaman lämmön vaikutusta ilmavesilämpöpumpun COP-arvoon. Esilämmitetty ilma tuotetaan maaperään upotetuissa putkissa.

5 MAAPERÄN LÄMMÖNTUOTTOPOTENTIALI

Riittävän syvällä maaperässä lämpötila on yli 0 °C Suomessa ympäri vuoden. Kun maasta otetaan lämpöä, maaperä kylmenee. Lämmöntuotto maaperästä on tärkeä osa kokonaislämmönsiirtymistä putkista ilmaan. Maaperän lämmönsiirtymistä putkeen on selvitetty erilaisilla matemaattisilla mallinuksilla (Guohui 2017; Golik ym. 2019). Lämmönsiirtymiskerroin kertoo, kuinka paljon tehoa pystyy siirtymään pinta-alaa kohti, kun väliaineen ja pinnan välillä on jokin tietty lämpötilaero. Mitä suurempi kerroin on, sitä paremmin lämpö siirtyy.

Maahan sijoitetuissa putkissa väliaineena toimii maaperä ja pintana putkimateriaali. Lämmönsiirtymiskertoimissa usein väliaine ja pinta ovat homogeenisiä aineita, jolloin kerroin on helpommin määriteltävissä. Maaperä ei ole homogeeninen, vaan sen koostumus ja näin myös lämmönsiirtymiskerroin vaihtelee paljon. Mikäli maakerros ei ole kunnollisessa kontaktissa putken ulkoreunaan esimerkiksi kivien seurauksena, ei lämpö voi siirtyä tehokkaasti. Maaperän vesipitoisuudella on myös merkittävä vaikutus lämmönjohtavuuteen ja näin myös lämmönsiirtymiskertoimeen. Lämmönsiirtymiskerroin maasta putken ulkopintaan ei ole hyvin tiedossa (NBSIR 81-2378, 13).

Taulukosta 2. nähdään miten lämmönjohtavuus kasvaa selvästi, kun maaineksessa on mukana kosteutta. Vaikka taulukossa on esimerkkejä vain kuivan

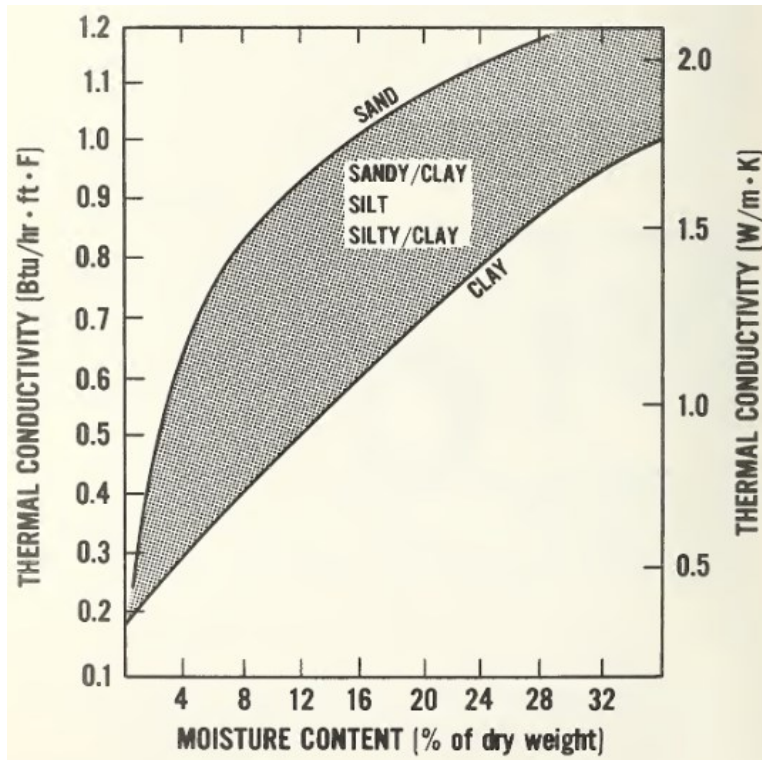
maan ja täysin märän maan lämmönjohtavuuksille, voidaan olettaa, että osittain märän maan lämmönjohtavuudet ovat kuivan ja märän maan väliltä.

Kuivan hiekka- ja savimaan lämmönjohtavuudessa ei ole kovin merkittävää eroa. Kuitenkin vedellä kyllästetyn hiekan lämmönjohtavuus on parempi kuin vedellä kyllästetyn saven. Kuivaa turvetta voidaan pitää eristeenä. Märän turpeen ja veden lämmönjohtavuudet ovat samaa suuruusluokkaa. Jos esilämmitysputkien paikan voi valita, niin märkä hiekka on paras vaihtoehto.

Taulukko 2. Hiekan, saven ja turpeen sekä veden ja ilman lämmönjohtavuusarvot. (Oke 1988, 44)

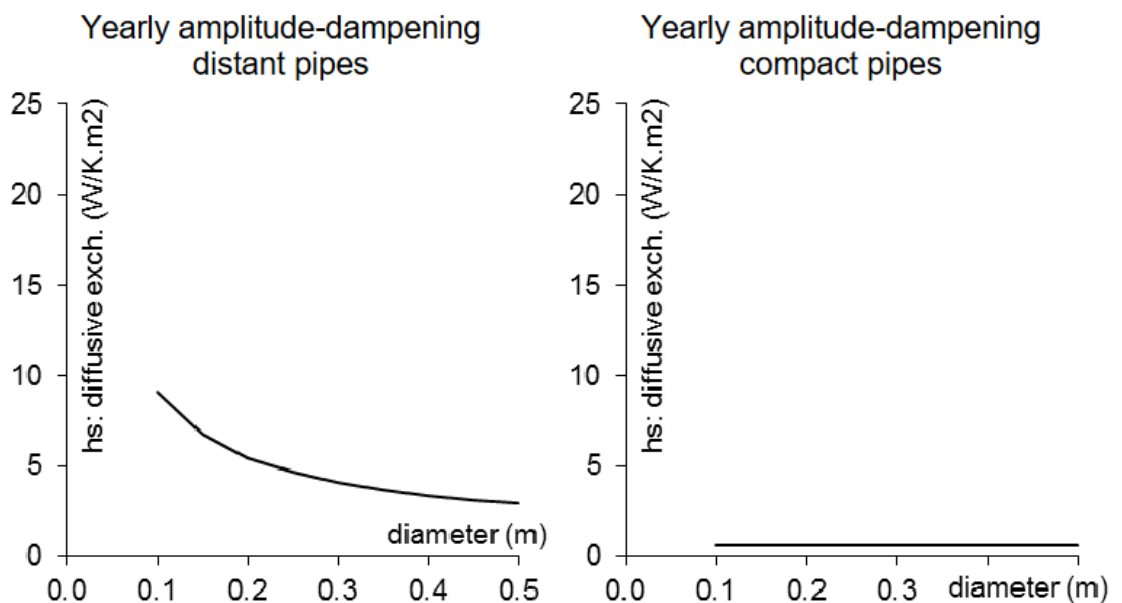
Materiaali/maalaji	Lämmönjohtavuus, W/(mK)
Kuiva hiekka (huokoisuus 40 %)	0,30
Vedellä kyllästetty hiekka	2,20
Kuiva savi (huokoisuus 40 %)	0,25
Vedellä kyllästetty savi	1,58
Kuiva turve (huokoisuus 80 %)	0,06
Vedellä kyllästetty turve	0,50
Vesi (4 °C)	0,57
Ilma (10 °C)	0,025

Yleisesti ottaen pätee, mitä kosteampi on maaperä sitä korkeampi lämmönjohtavuus. Kuvasta 3. nähdään, että lämmönjohtavuus kasvaa savisessa, silttisessä ja hiekkaisessa maaperässä, kun kosteuspitoisuus kasvaa maaperässä. Vaikka lämmönjohtavuus paranee kosteuden eli veden osuuden kasvaessa, ei veden lämmönjohtavuus ole yhtä hyvä kuin märän maan.



Kuva 3. Kosteuspitoisuuden vaikutus lämmönjohtavuuteen savisessa, silttisessä ja hiekkaisessa maaperässä (NBSIR 81-2378, 4)

Sveitsiläinen tutkimus selvitti, millainen vaikutus lämmönsiirtymiskertoimeen (maasta/putkeen) on putkien eri etäisyyksillä. Tarkastelutapoja oli kaksi. Ensimmäisessä kokeessa putket asetettiin 20 cm etäisyydelle toisistaan (compact pipes). Toisessa kokeessa putket asetettiin 3 metrin etäisyydelle toisistaan (distant pipes). Etäisyydellä oli merkittävä vaikutus tuloksiin.



Kuva 4. Lämmönsiirtymiskerroin putken ja maan välillä putken halkaisijan funktiona (Hollmuller & Lachal 2014)

Putkien asettaminen 3 metrin syvyyteen ja etäisyydelle (kuva 4. distant pipes) toisistaan kasvatti vuosittaista lämmönsiirtymiskerrointa maasta putkeen merkittävästi. Suuri maan tilavuus putkien ympärillä ei kuluta maaperään varastoituneita lämpöenergiavaroja. Kuvasta 4. nähdään, että lämmönsiirtymiskerroin maasta putkiin eri putkihalkaisijoilla oli noin 2,7–9 W/(m²K).

Kun putket olivat 20 cm etäisyydellä (kuva 4. compact pipes) toisistaan lähellä maanpintaa, vuosittainen lämmönsiirtymiskerroin maasta putkiin oli aina 0,6 W/(m²K) putkien halkaisijoista riippumatta. Putkiin ei siis siirry tässä tapauksessa riittävästi lämpötehoa lämmittämään ilmaa putkien sisällä. (Hollmuller & Lachal 2014.)

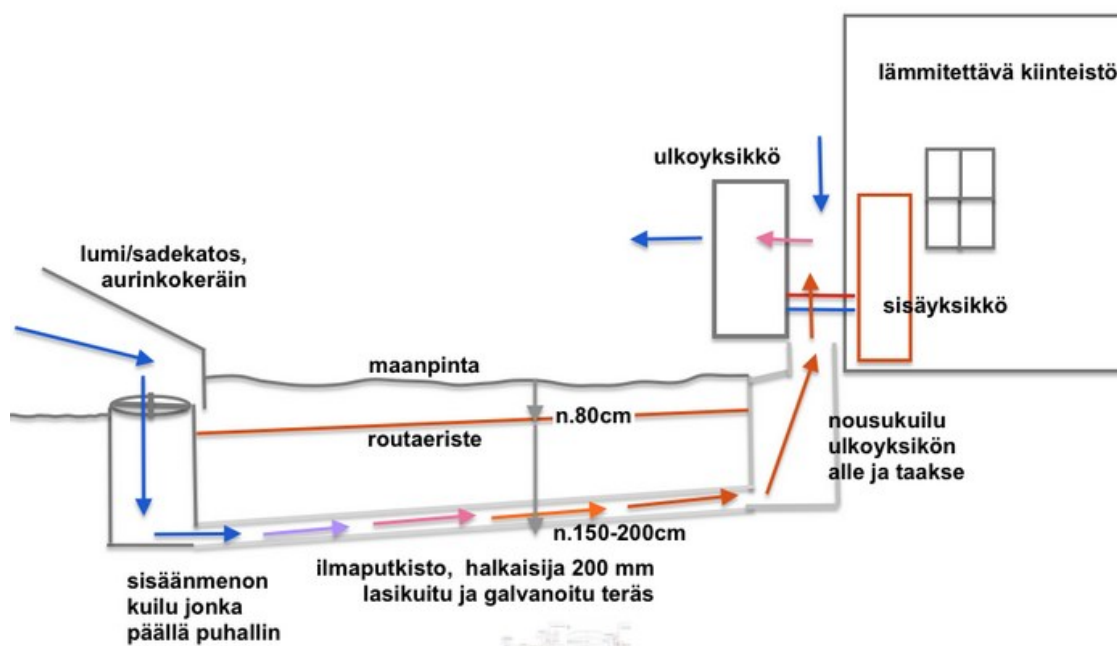
Puolalainen teoreettinen tutkimus selvitti kuumaa raakaöljyä siirtämistä merenpohjan sedimenttiin upotetussa putkessa. Jotta lämmin 60 °C öljy säilyisi mahdollisimman kuumana pitkiä matkoja, on sedimentin lämmönsiirtymiskertoimen oltava pieni. Teräsputkesta oli poistettu kaikki eristysuojat, jotka ovat normaalisti merenpohjaan upotetuissa putkissa mukana. Tällöin 4 °C sedimentillä on selvä viilentävä vaikutus putkissa virtaavaan öljyyn pitkällä matkalla. Lämmönsiirtymiskerroin (maa/putki) on laskettu teoreettisella menetelmällä, johon on käytetty muun muassa seuraavia arvoja: hiekan lämmönjohtavuus 2,0 W/(mK), putken ulkohalkaisija 0,8636 m ja 18,25 mm putken paksuus. (Magda 2017.)

Öljyn lämpötila laski vain 22,7 % sadan kilometrin matkalla, kun sedimentin lämmönsiirtymiskerroin oli 1,80 W/(m²K). Sedimentti käyttäytyy tällöin eristeen tavoin. Lämmönsiirtymiskertoimen ollessa 3,40 W/(m²K) laski öljyn lämpötila 38,1 %. Kun lämmönsiirtymiskerroin on 6,50 W/(m²K), öljyn lämpötila laski 59,7 %, josta voi seurata öljyn ”vahautumista”. (Magda 2017, 129.)

Tässä työssä maaperä lämmittää putken sisällä olevaa ilmaa, joten mitä korkeampi lämmönsiirtymiskerroin maasta putkeen on, sen paremmin ilma lämpenee putkissa ja sitä kautta ilmavesilämpöpumpun hyötysuhde paranee. Lämmönsiirtymiskertoimeksi on valittu 5 W/(m²K). Tämä arvo edustaa keskimääräistä lämmönsiirtymistä maasta putkiin. Joitakin tuloksia on esitetty pienemmällä ja suuremmalla lämmönsiirtymiskertoimen arvolla.

6 ILMAVESILÄMPÖPUMPUN TULOILMAN ESILÄMMITYS

Ilmalämpöpumpun tai Ilmavesilämpöpumpun ulkoyksiköiden ottamaa ilmaa voi kokeilla esilämmittää eri tavoilla. Jo olemassa olevia maanalaisia putkistoja ja kellareita voi hyödyntää lämpöpumpulle tulevan ilman esilämmityksessä. Tässä luvussa kerrotaan, kuinka ilmavesilämpöpumpun tuloilmaa esilämmitetään maahan upotetuissa putkissa.



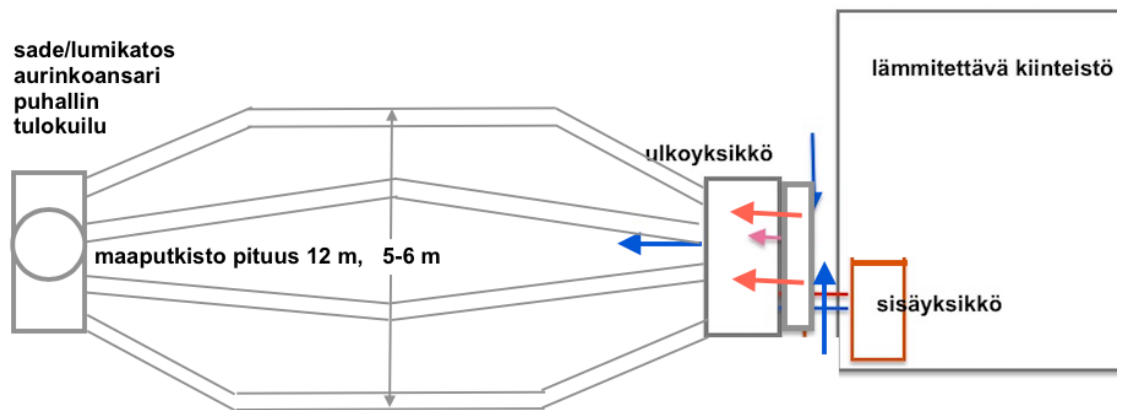
Kuva 5. Periaatekuva Ilmavesilämpöpumpun ulkoyksikköön menevän ilman esilämmityksestä

Kuvasta 5. nähdään, miten ulkoilma menee sisään sisäänmenokuilusta. Sääolojen takia kuiluun täytyy tehdä lumi/sadekatos, jonka tehtävänä on estää lumen tai veden pääsy putkistoon. Myös aurinkokeräintä tai kuumailmakeräintä on mahdollista soveltaa katoksen yhteyteen. Etenkin keväällä auringon säteilylämpö lämmittää katoksen kautta putkiin siirtyvää ilmaa

Järjestelmää voidaan ajaa niin, että osa ulkoyksikköön menevästä ilmasta tulee tavalliseen tapaan ulkoilmasta ja osa ilmasta tulee putkistosta. Eniten hyötyä saataisiin, jos kaikki ilma tulisi putkistosta, mutta silloin järjestelmästä tulee kallis.

Putkistoesilämmitystä voidaan teoriassa käyttää koko ajan niin kauan, kun maaperän lämpötila on ulkoilman lämpötilaa korkeampi. Käytännössä kuitenkin maaperästä saatava lämpöteho mahdollisesti heikkenee jatkuvan käytön seurauksena. Toisin sanoen maaperä kylmenee putkien ympäriltä, jolloin lämpöenergiaa maasta saadaan vähemmän.

Järjestelmää voidaan myös käyttää osa-aikaisesti talvella esimerkiksi alle kymmenen asteen pakkasilla, jolloin ilma-vesilämpöpumpun matalia COP-arvoja saadaan nostettua. Etuna osa-aika käytölle on se, että maaperän lämpöenergiavarastot riittävät, jolloin maaperästä saatava lämpöenergia ei vähene, kun putkistoa käytetään.



Kuva 6. Havainnekuva järjestelmästä ylhäältäpäin katsottuna

Maahan upotetuissa putkissa virtaavan ilman virtausnopeutta voidaan säätää puhaltimella. Puhallin on tulokuilussa, jonka jälkeen putkisto haarautuu. Puhallin saa aikaan putkiin pakotetun konvektion, jolloin lämmönläpäisykerroin maaperästä ilmaan paranee. Virtausnopeutta kasvattamalla lämmönläpäisykerroin paranee, mutta ei enää merkittävästi yli 3 m/s virtausnopeuksilla. Suuren virtausnopeuden ylläpitäminen vaatii kalliin ja enemmän energiaa käyttävän puhaltimen, joka vähentää järjestelmästä saatavaa hyötyä. Puhallimeksi on ajateltu ylimääräistä lämpöpumpun ulkoyksikön puhallinta, jonka puhallus on synkronoitu ilma-vesilämpöpumpun puhaltimen kanssa.

Kuvasta 6. nähdään, että putkisto jakautuu viuhkamaisesti laajentuen puoliväliin ja sitten supistuen ulkoyksikön alla olevaan nousukuiluun. Putkien etäisyys

toisistaan on noin puolitoista metriä. Tämä mahdollistaa maasta riittävän lämmönsaannin. Maalämpöjärjestelmissä, jossa putket asetetaan vaakatasoon, on putkien etäisyys 1–2 metriä (Motiva Oy s.a.).

Putkiin kertyy kondenssivettä nousukuilusta, kun lämpöpumppu on käynnissä. Lisäksi, kun ulkoilma menee maan alle putkiin, mukana tuleva kosteus härmistyy tai kondensoituu putken seinämiin sääoloista riippuen. Kondensoitunut vesi ohjautuu putkia pitkin kohti tulokuilua, sillä tulokuilu on syvemmällä kuin nousukuilu. Kondenssivesi ohjautuu tulokuilusta salaojaan. Mikäli putkiin alkaa kertyä liikaa jäätä pystytään jää sulattamaan, kun järjestelmä pysäytetään. Maaperän lämpö sulattaa jään, jonka jälkeen järjestelmä voidaan käynnistää uudelleen.

Maaputket voivat kuivattaa ulkoilmaa, mikä parantaa ilmavesilämpöpumpun ulkoyksikön tehokkuutta sekä vähentää sen sulatustarvetta. Tästä seuraa energiansäästöä. Tässä työssä ei kuitenkaan tutkita ilman kuivaamisesta syntyvää säästöä, vaan pyritään selvittämään, kuinka maaperästä saatava lämpö parantaa ilmavesilämpöpumpun hyötysuhdetta.

6.1 Putkien valinta

Putkien tehtävä on kerätä maaperään varastoitunutta lämpöä ja siirtää sitä putkissa virtaavaan ilmaan. Putkista pitää saada riittävä ilmamäärä, jotta ulkoyksikköön menevää ilmaa on tarpeeksi. Tässä työssä käytetään neljää putkeä, joiden pituus on 12 metriä ja sisähalkaisija on 0,2 metriä. Putkiin mahtuu tällöin 1,5 kuutiometriä ilmaa.

Tärkeää on tietää lämpöpumpun ulkoyksikön käyttämä ilman tilavuusvirta, jotta putkisto saadaan mitoitettua sopivan kokoiseksi. Jos tieto ei ole saatavilla ulkoyksikön käyttämää ilmavirtaa voi mitata ilmanvirtausmittarilla. Panasonic WH-UD09JE5 ulkoyksikössä on 9kW lämmitys kapasiteetti. Tämä ulkoyksikkö on hyvin samanlainen kuin tämän työn ilmavesilämpöpumpussa. Ohjekirjassa lukee, että lämpöpumpulla lämmittäessä ilman tilavuusvirta ulkoyksikössä on 53.4 m³/min, mikä vastaa 0,89 m³/s (Panasonic PRO Club 2019, 24).

Ohjekirjan ilmoittama Ilmamäärä voi olla suurin ilmamäärä. Uusissa ilmavesilämpöpumpuissa ulkoyksikön puhaltimessa on taajuusmuuttaja, joka optimoi puhaltimen kierroksia ja sitä kautta ilman tilavuusvirtaa. Ilmavesilämpöpumpun ulkoyksikön läpi menevä todellinen ilmamäärä ei siis ole vakio. Lämpimämpi ilma vähentää puhaltimen kierroksia, jolloin tilavuusvirta pienenee. Taulukkoon 3. on listattu eri kokoisten ilmavesilämpöpumpujen ulkoyksiköiden tilavuusvirtoja eli ilmamääriä.

Taulukko 3. Panasonic ulkoyksiköiden ilmavirtausmäärät teholuokan mukaan. Lämmitysteho on ilmoitettu, kun ulkolämpötila on 7 °C ja vettä lämmitetään 35 °C:een (Panasonic PRO Club 2019)

Ulkoyksikön nimi	Lämmitysteho (kW)	Ilmamäärä (m³/s)
WH-UD03JE5	3,2	0,48
WH-UD05JE5	5,0	0,53
WH-UD07JE5	7,0	0,76
WH-UD09JE5	9,0	0,89

Putkien yhtenä valitsemisen kriteerinä on hinta. Kun halutaan aikaan taloudellista säästöä, eivät putket saa maksaa liian paljon. Putkien hinta on merkittävä osa koko järjestelmän investointikustannuksista. Putkimateriaalilla on ilmeinen vaikutus putkien hintaan. Kalliit putkimateriaalit kuten teräs, kupari ja alumiini ovat kestävyyskannalta hyviä, mutta järjestelmän takaisinmaksuaika pitenee, mikäli näitä putkimateriaaleja käytetään. Luultavasti hinnaltaan edullisin ja myös toteutuksen kannalta järkevintä on käyttää muoviputkia.

Putkien valinnan perusteena on myös lämmönjohtavuus. Putkimateriaalien lämmönjohtavuus kuvaa kuinka hyvin materiaali johtaa lämpöä. Taulukkoon 4. on listattu eri putkimateriaalien lämmönjohtavuuskertoimia. Voisi olettaa, että on parasta valita sellainen putkimateriaali, jolla on paras lämmönjohtavuus. Moni tutkimus on kuitenkin osoittanut, että putkimateriaalin lämmönjohtavuudella on todella vähän vaikutusta kokonaislämmönsiirtymiskertoimeen maahan upotetuissa putkissa (Goswami & Biseli 1993, 2).

Taulukko 4. Putkimateriaalien lämmönjohtavuuksia (Çengel 2002)

Lämmönjohtavuus λ (300 K)		
Kupari	401	W/(mK)
Alumiini	237	W/(mK)
Rauta	80,2	W/(mK)
Teräs aisi 304	14,9	W/(mK)
Betoni	1,1	W/(mK)
Polyeteeni	0,33	W/(mK)

6.2 Putkimateriaalien vertailu

Laskemalla lämmönläpäisykerroin ilmaan eri putkimateriaaleille huomataan, että putkimateriaalin merkitys jää todella pieneksi. Kun putken seinämän paksuudeksi valitaan 2 mm ja vertaillaan kupariputkien ja muovisten polyeteeniputkien lämmönläpäisykerrointa, ei tuloksissa ole juuri eroa. Kupariputkilla lämmönläpäisykerroin on 2 % parempi polyeteeniputkiin nähden, vaikka lämmönjohtavuus on noin 1200 kertaa parempi. Mikäli putken paksuus olisi merkittävästi paksumpi, kuten esimerkiksi 100 mm, olisi putkimateriaalilla suuri vaikutus lämmönläpäisykerroimeen. Tällöin kupariputkilla lämmönläpäisykerroin olisi noin 50 % parempi kuin polyeteeniputkilla.

Vaikka putkimateriaali kannattaa pitää mahdollisimman ohuena, jolloin putkimateriaalin merkitys melkein häviää maasta saatavasta lämpötehosta, liian ohuet putket eivät välttämättä ole niin pitkäikäiset. Muoviputken seinämän paksuuden on oltava yli 2 mm kestävyuden kannalta. Maaperän kosteus saa aikaan ruostumista rautaputkiin. Ruostuminen ja kuluminen ei ole kuitenkaan kovin haitallista, sillä putkien tarkoitus on vain mahdollistaa maanlämmön siirtyminen putken sisässä olevaan ilmaan. Betoniputki on taulukon 4. putkimateriaaleista huonoin vaihtoehto huonon lämmönjohtavuutensa ja sen tarvitseman suuren seinämän paksuuden vuoksi.

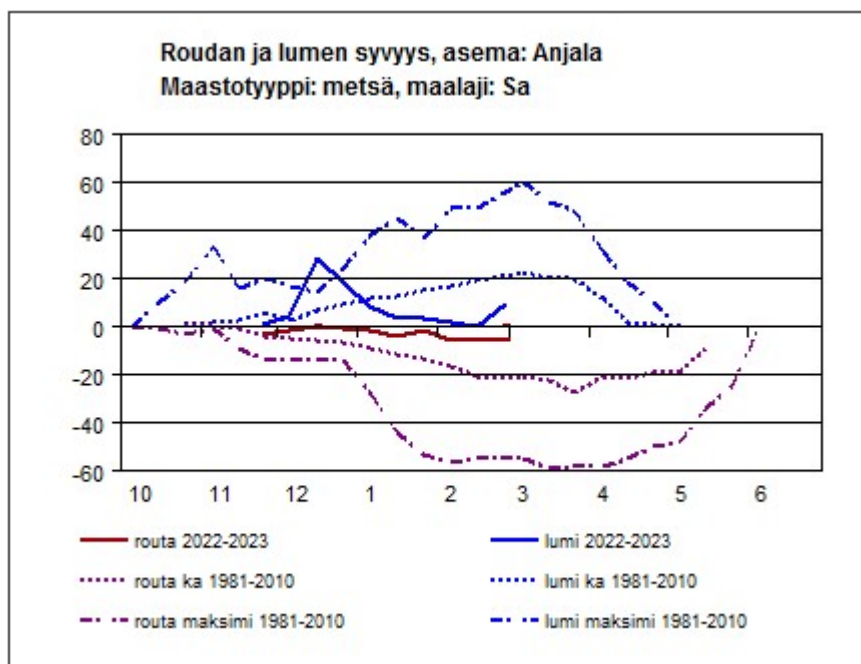
Lämmönläpäisykerroin alenee vähän betoniputkella ja muoviputkella, mutta jos seinämän paksuus on pieni ei vaikutus ole suuri. Muilla putkimateriaaleilla, joiden lämmönjohtavuus on yli 10 W/(mK) ei lämmönläpäisykerroin juuri parane putkimateriaalin lämmönjohtavuuden kasvaessa, joten kannattaa valita edullisin putkimateriaali. Tässä työssä laskennassa on käytetty teräsputkia, joiden seinämän paksuus on 4 mm.

6.3 Putkien asennussyvyys

Putket pitää asentaa tarpeeksi syväälle, jotta maaperän lämmöstä saataisiin riittävästi lämpötehoa putkiin. Maaperän lämpötila kasvaa maaperän syvyyden kasvaessa talvikuukausina. Putkien asentaminen liian lähelle maanpintaa ei siis anna kovin hyvää lämpötehoa talvikuukausina.

Maanpinnan keskilämpötilaan vaikuttaa ulkoilman lämpötila. Ulkoilman lämpötilalla on vaikutusta noin 15 metrin syvyyteen saakka, jonka jälkeen maaperän lämpötila tasaantuu noin 5–6 °C:een. Etelä-Suomessa syvällä kallioperässä geoterminen lämpö nostaa maaperän lämpöä 100 metrin välein 0,5–1 °C. Parhaimmillaan maalämmöllä päästään 6–8 °C lämpötiloihin 200 metrin syvyydessä Suomessa. (Ympäristöopas 2009.)

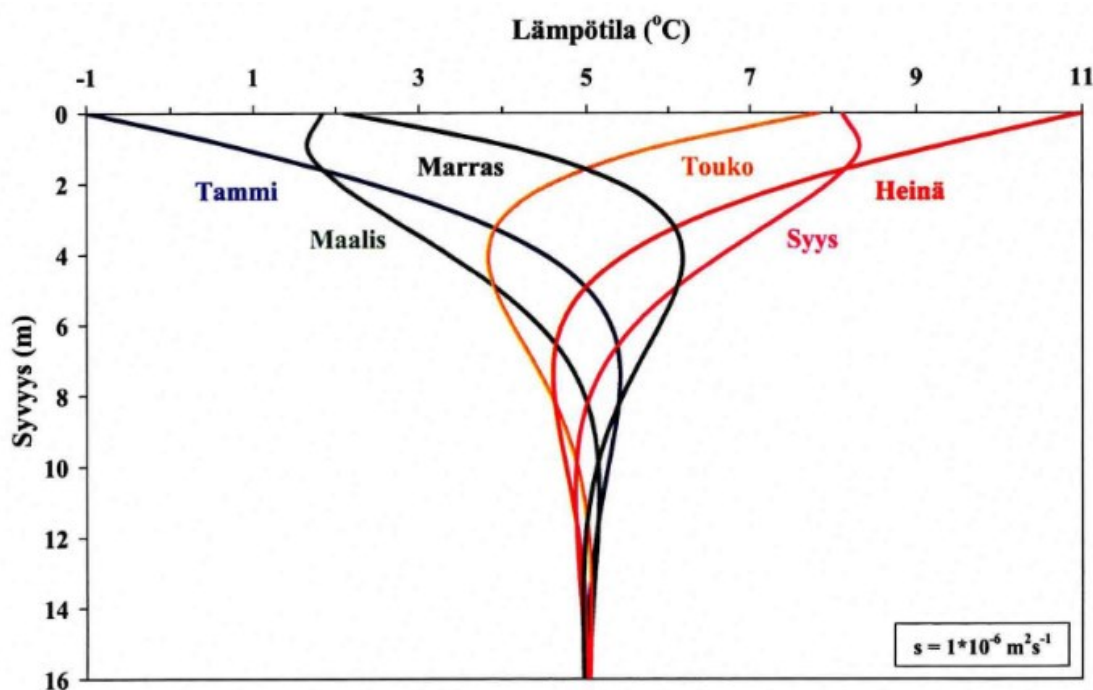
Tarkoituksena ei ole kaivaa maalämpökaivoa, vaan saada putket asennettua sellaiseen syvyyteen, mikä olisi kustannuksellisesti järkevää. Putkien kaivaminen aina syvemmälle lisää kaivamiskustannuksia. Mikäli putket asetetaan liian lähelle maanpintaa, on kuitenkin vaarana, että putket ovat routarajan sisäpuolella. Kuvasta 7. nähdään, että Kouvolan Anjalassa maksimi routaraja ylettyy noin 60 senttimetriin. Putket on asennettava selvästi rajan alapuolelle.



Kuva 7. Roudan syvyys Anjalassa Kymenlaaksossa (Suomen ympäristökeskus 2023)

Suomi on pituuspiiriltä pitkä maa, joten lämpötilat vaihtelevat eri paikassa maata. Vuoden ulkolämpötilojen keskiarvot vaihtelevat eri osissa Suomea. Maanpinnan keskilämpötila on suunnilleen kaksi astetta korkeampi kuin ilman keskilämpötila. Keskilämpötilat maanpinnassa vaihtelevat Pohjois-Lapin 1–2 asteesta Etelä-Suomen 6–7 asteeseen. (Leppäharju 2008, 10.) Maanpinnan lämpötila on sama kuin maan lämpötila 15 metrin syvyydessä. Kymenlaaksossa Kouvolassa maanpinnan keskilämpötila on 5 °C.

Putkien asennussyvyys voisi olla 1–2 metriä. Kuvasta 8. voidaan laskea, että maaperän keskilämpötila marras-, tammi- ja maaliskuussa 2 metrin syvyydessä on noin 3,3 °C. Keskilämpötila yhden metrin syvyydessä on noin 2,2 °C. Myöhemmin laskennassa maaperän lämpötilana on käytetty 3 °C.

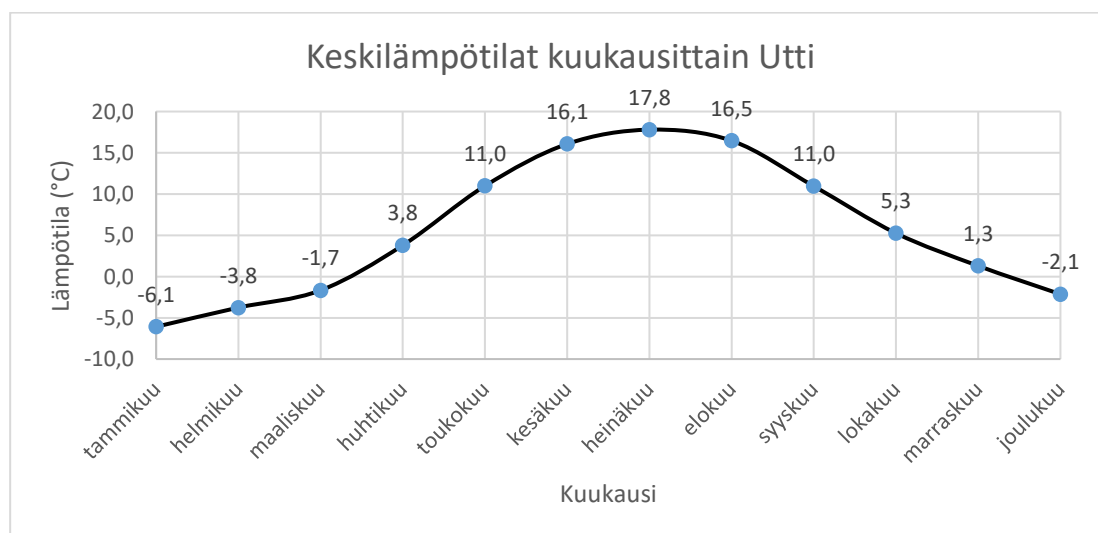


Kuva 8. Maaperän lämpötila riippuu vuodenajasta ja syvyydestä. Yli 10 metrin syvyydessä lämpötilan vaihtelu häviää. Kuvio on tehty teoreettisella menetelmällä (Leppäharju 2008, 7)

Maahan asennettujen putkien maaperästä saatavaa lämpöenergiaa hyödynnettäisiin lämmityskaudella. Lämpöenergiaa saadaan vain silloin, kun maaperän lämpötila on ulkoilmaa lämpimämpää.

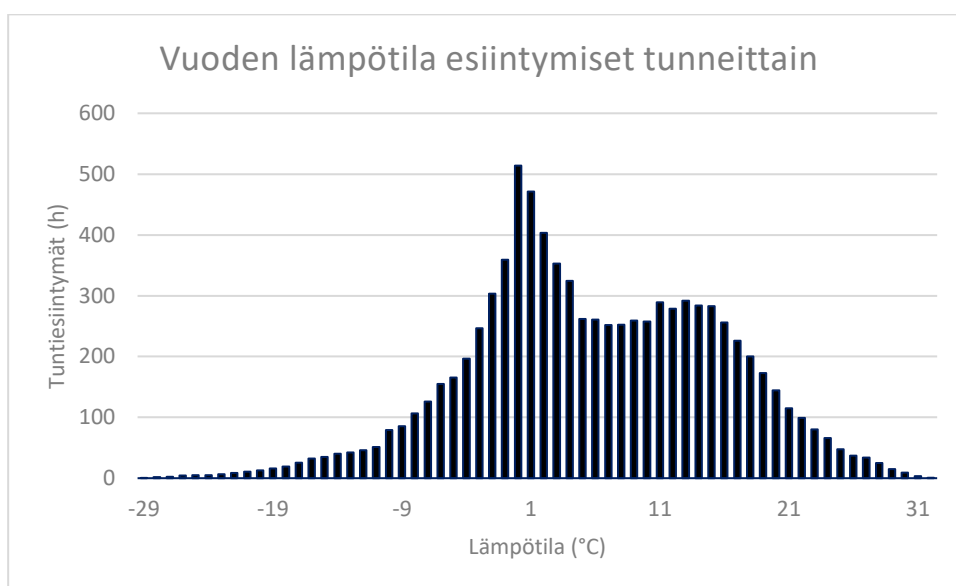
6.4 Lämpötilatiedot Kouvolan Utissa

Kuvasta 9. nähdään, että keskilämpötila Utissa on alle 3 °C marras-, joului-, tammi-, helmi- ja maaliskuussa. Muinakin kuukausina voi esiintyä alle 3 °C lämpötiloja, mutta pääasiallinen putkiston käyttö kohdistuu näihin kuukausiin.



Kuva 9. Utin lentokentän havaintopaikan lämpötilatiedot

Kuvasta 10. nähdään, kuinka vuodessa esiintyy eri lämpötiloja tuntimäärällisesti. Esimerkiksi -10 °C lämpötiloja esiintyy 79 tuntia vuodessa. Kun lämpötilat summataan tuntiesiintymien määrällä, saadaan vuoden tuntimäärä 8760 tuntia. Putkistolla tehtävää esilämmitystä tehdään pääsääntöisesti vain silloin, kun lämpötila alittaa 3 °C. Esilämmitystä voidaan käyttää keskiwertovuotena 3578 tuntia, jolloin lämpötila on alle 3 °C. Putkistoa käytettäisiin noin 40 % ajasta vuoden aikana.



Kuva 10. Utin lentoaseman lämpötilojen tuntiesiintymät vuodessa

Lämpötilatiedot kuvaan 9. ja kuvaan 10. on saatu ilmatieteenlaitoksen sivuilta. Tiedot on ladattu havaintojen latausohjelmalla. Tietoina on käytetty Utin lentoaseman tuntilämpötilatietoja ajanjaksolla 1.1.2013 klo 0:00-31.12.2022 klo 24:00. Puuttuvia lämpötilatietoja on täydennetty Kouvola Utti Lentoportintiedatalla samalta ajanjaksolta. Lämpötilatiedot 10 vuoden osalta antavat tarkan kuvan kyseisen alueen lämpötiloista. Kuvan 10. tuntiesiintymien selvittämiseksi on huomioitu karkauspäivät. Tiedot on skaalattu vastaamaan yhtä vuotta, jossa on 8760 tuntia.

7 LASKENTA JA TULOKSET

Tässä luvussa kerrotaan laskentaperiaate maasta saatavasta lämmitysenergiasta, sekä selvitetään vuosittainen energiansäästö. Lisäksi esitetään tulokset esimerkikohteelle, joka sijaitsee Kouvolassa. Mukaan on otettu myös toinen esimerkki käyttäen Rovaniemen lämpötilatietoja.

7.1 Laskenta

Putkien vaipan pinta-ala määritetään yhtälöstä (1). Tähän työhön valitaan neljä kappaletta samanlaisia putkia. Putkien pituus on 12 metriä ja halkaisija on 0,2 metriä. Näillä tiedoilla pinta-alaksi tulee 30,16 m².

$$A = n\pi lD \quad (1)$$

jossa	A	putkien seinämien pinta-ala	[m ²]
	n	putkien lukumäärä	[-]
	l	putken pituus	[m]
	D	putken sisähalkaisija	[m]

Kaavalla (2) määritetään putkien poikkipinta-ala. Sitä tarvitaan ilman massa-
virran määrittämiseen. Putkien poikkipinta-alaksi saadaan 0,13 m².

$$A' = \frac{n\pi D^2}{4} \quad (2)$$

jossa	A'	putkien poikkipinta-ala	[m ²]
	n	putkien lukumäärä	[-]
	D	putken sisähalkaisija	[m]

Ilman tiheys määritetään ideaalikaasun tilanyhtälöllä. Lämpötilan muuttumisella on vaikutus ilman tiheyteen, ja se on otettu huomioon laskennassa. Ilmanpaineen vaihtelua ei ole otettu huomioon, vaan on käytetty aina normaali-ilmanpainetta 101 325 Pascalia. Ilman moolimassana on käytetty arvoa 28,97 g/mol.

$$\rho = \frac{pM}{RT_3} \quad (3)$$

jossa	ρ	ilman tiheys	[kg/m ³]
	p	ilmanpaine	[Pa]
	M	moolimassa	[kg/mol]
	R	kaasuvakio	[J/(°Cmol)]
	T_3	ulkoilman lämpötila	[°C]

Ilman virtaus putkissa on turbulenttinen. Lasketaan Reynoldsin luku käyttämällä kaavaa (4). Virtausnopeutta putkissa voidaan säätää puhaltimella. Virtausnopeutena on käytetty arvoa 3 m/s. Ilman kinemaattisena viskositeettina on käytetty arvoa $1,2 \cdot 10^{-5}$ m²/s. Kinemaattinen viskositeetti vaihtelee lämpötilan muuttuessa, mutta tässä työssä vakioarvo on riittävän tarkka.

$$Re = \frac{wD}{\nu} \quad (4)$$

jossa	Re	Reynoldsin luku	[-]
	w	virtausnopeus putkessa	[m/s]
	D	putken sisähalkaisija	[m]
	ν	ilman kinemaattinen viskositeetti	[m ² /s]

Kaavalla (5) lasketaan Nusseltin luku turbulenttiselle virtaukselle käyttämällä Dittus-Boelterin yhtälöä. Nusseltin luku saadaan, kun tiedetään Reynoldsin luku ja Prandtin luku. Laskennassa on käytetty Prandtin lukuna taulukko arvoa 0,72 (Bergman ym. 2011, 995). Kaavalle on ehtona $0,6 \leq Pr \leq 160$, $Re > 10000$ ja $L/D > 10$. Ehdot täyttyvät, kun virtausnopeutta w ei lasketa alle 0,6 m/s.

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4} \quad (5)$$

jossa	Nu	Nusseltin luku	[-]
-------	------	----------------	-----

Re	Reynoldsin luku	[-]
Pr	Prandtlin luku	[-]

Kaavalla (6) lasketaan lämmönsiirtymiskerroin putkesta ilmaan. Ilman lämmönjohtavuus saadaan taulukosta, arvona käytetään 0,023 W/(mK) (Bergman ym. 2011, 995). Ilmanlämmönjohtavuus on lämpötilariippuvainen, mutta se ei muutu merkittävästi, kun pysytään ulkolämpötiloissa.

$$h_e = \frac{\lambda_i Nu}{D} \quad (6)$$

jossa	h_e	lämmönsiirtymiskerroin (putki/ilma)	[W/(m ² K)]
	λ_i	ilman lämmönjohtavuus	[W/(mK)]
	Nu	Nusseltin luku	[-]
	D	putken sisähalkaisija	[m]

Kaavalla (7) lasketaan lämmönläpäisykerroin eli U-arvo. Putkea voidaan ajatella levynä, jonka läpi lämpö siirtyy. Laskuissa on käytetty lämmönläpäisykerroimen kaavaa levyn läpi, koska ero putken läpi kaavalla laskettuun on tässä työssä merkityksetön.

Lämmönsiirtymiskertoimen (maa/putki) arvo perustuu aiemmin kerrottuun tutkimusarvioon (Hollmuller & Lachal 2014). Kuinka tehokkaasti lämpö siirtyy, riippuu paljon maanlämmönjohtavuudesta sekä jossain määrin putken halkaisijasta. Laskennassa arviona lämmönsiirtymiskertoimelle (maa/putki) on käytetty arvoa 5 W/(m²K). Maasta putkeen siirtyvällä lämmönsiirtymiskertoimella on suuri vaikutus lämmönläpäisykerroimeen.

Kaavassa (7) lämmönjohtavuus on putkimateriaalin lämmönjohtavuus. Sen merkitys jää todella pieneksi, minkä vuoksi putkimateriaalina voitaisiin käyttää jopa muovia. Putkimateriaaliksi on kuitenkin valittu teräs, jonka lämmönjohtavuus 14,9 W/(mK). Lämmönsiirtymiskertoimeen (putki/ilma) vaikuttaa ilman virtausnopeus putkessa. Kerroin saa arvoja 5,5–13,3 W/(m²K) virtausnopeuksien ollessa 1–3 m/s.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{d}{\lambda_p} + \frac{1}{h_e}} \quad (7)$$

jossa	U	lämmönläpäisykerroin	[W/(m ² K)]
	h_i	lämmönsiirtymiskerroin (maa/putki)	[W/(m ² K)]
	h_e	lämmönsiirtymiskerroin (putki/ilma)	[W/(m ² K)]
	d	putken seinämän paksuus	[m]
	λ_p	putkimateriaalin lämmönjohtavuus	[W/(mK)]

Maasta saatava lämpöteho voidaan laskea yhtälöllä (8). Lämpötila erona käytetään maaperän- ja ulkoilman lämpötilan erotusta. Putkien seinämien pinta-ala on laskettu kaavalla (1).

$$\phi = UA(T_1 - T_3) \quad (8)$$

jossa	ϕ	lämpöteho	[W]
	U	lämmönläpäisykerroin	[W/(m ² °C)]
	A	putkien seinämien pinta-ala	[m ²]
	T_1	maaperän lämpötila	[°C]
	T_3	ulkoilman lämpötila	[°C]

Kaavalla (9) saadaan laskettua esilämmitetyn ilman lämpötila, kun ilma poistuu putkista. Lämpöteho on maaperästä saatava teho. Ilman ominaislämpökapasiteettina käytetään arvoa 1,006 kJ/(kgK). Massavirta on putkien sisällä kulkeva ilmavirta. Massavirta saadaan ilman tiheyden, putkien poikkipinta-alan ja virtausnopeuden tulona.

$$T_2 = T_3 + \frac{\phi}{c_p q_m} \quad (9)$$

jossa	T_2	putkista poistuva ilman lämpötila	[°C]
	T_3	ulkoilman lämpötila	[°C]
	ϕ	lämpöteho	[W]

c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/(kg°C)]
q_m	massavirta	[kg/s]

Kaavalla (10) voidaan laskea ulkoyksikköön tuleva ilman lämpötila, jos tiedetään, mikä on kokonaistilavuusvirta. Lämpöpumpun ulkoyksikön ottama kokonaistilavuusvirran arvoksi valitaan 0,89 m³/s taulukon 3. perusteella. Arvo on mitä todennäköisesti maksimiarvo 9 kW:n ilmavesilämpöpumpulle. Työssä on myöhemmin esitetty vuotuista energiansäästöä erilaisilla tilavuusvirroilla.

$$T = \frac{(q_{v1}T_2 + q_{v2}T_3)}{q_v} \quad (10)$$

jossa	T	ulkoyksikköön tuleva ilman lämpötila [°C]	
	q_v	kokonaistilavuusvirta	[m ³ /s]
	q_{v1}	putkiston tilavuusvirta	[m ³ /s]
	T_2	putkista poistuva ilman lämpötila	[°C]
	q_{v2}	ulkoilman tilavuusvirta	[m ³ /s]
	T_3	ulkoilman lämpötila	[°C]

Putkista tuleva ilma ei riitä ulkoyksikölle virtausnopeudesta johtuen, joten osa ilmasta täytyy ottaa ulkoilmasta. Ilman määrälle määritetään sekoitussuhde kaavalla (11). Sekoitussuhde kuvaa kuinka paljon ilmaa tulee putkista verrattuna kokonaisilmavirtaan.

$$m = \frac{q_{v1}}{q_v} \cdot 100\% \quad (11)$$

jossa	m	sekoitussuhde putkesta	[%]
	q_{v1}	putkiston tilavuusvirta	[m ³ /s]
	q_v	kokonaistilavuusvirta	[m ³ /s]

7.2 Tulokset

Taulukkoon 5. on laskettu eri ulkolämpötiloille uusi ulkoyksikköön tuleva ilman lämpötila. Maasta saatava lämpöteho on saatu seuraavilla lähtötiedoilla. Putkien lukumäärä on neljä, sisähalkaisija on 0,2 m, pituus on 12 m, putken paksuus on 4 mm ja teräs putkien lämmönjohtavuus on 14,9 W/(mK). Maan lämpötila on 3 °C, ilman virtausnopeus putkissa on 3 m/s ja lämmönsiirtymiskerroin (maa/putki) on 5 W/(m²K). Ilmasta 42,4 % tulee esilämmitettynä putkistosta, ja loppuosa otetaan ulkoilmasta.

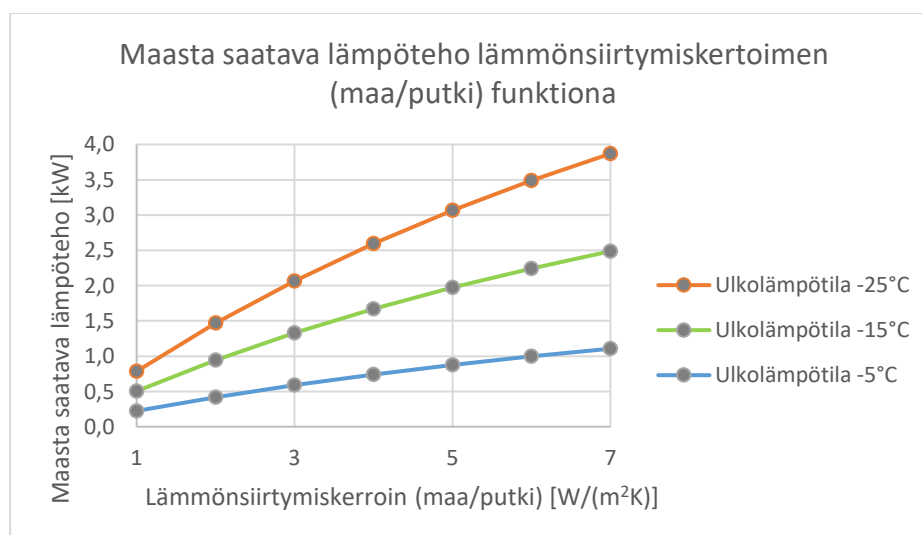
Taulukko 5. Ilman ulkolämpötila, maasta saatava lämpöteho, esilämmitetty ilma putkista ja ulkoyksikköön tuleva ilman lämpötila.

Ulkolämpötila ilma (°C)	Maasta saatava lämpöteho (kW)	Esilämmitetty ilma putkista (°C)	Ulkoyksikköön tuleva ilman lämpötila (°C)
-29	3,5	-22,5	-26,3
-28	3,4	-21,7	-25,3
-27	3,3	-20,9	-24,4
-26	3,2	-20,1	-23,5
-25	3,1	-19,3	-22,6
-24	3,0	-18,4	-21,6
-23	2,8	-17,6	-20,7
-22	2,7	-16,8	-19,8
-21	2,6	-16,0	-18,9
-20	2,5	-15,2	-18,0
-19	2,4	-14,4	-17,0
-18	2,3	-13,6	-16,1
-17	2,2	-12,8	-15,2
-16	2,1	-12,0	-14,3
-15	2,0	-11,2	-13,4
-14	1,9	-10,4	-12,5
-13	1,8	-9,6	-11,5
-12	1,6	-8,8	-10,6
-11	1,5	-8,0	-9,7
-10	1,4	-7,2	-8,8
-9	1,3	-6,4	-7,9
-8	1,2	-5,6	-7,0
-7	1,1	-4,8	-6,1

-6	1,0	-4,0	-5,2
-5	0,9	-3,2	-4,2
-4	0,8	-2,4	-3,3
-3	0,7	-1,7	-2,4
-2	0,5	-0,9	-1,5
-1	0,4	-0,1	-0,6
0	0,3	0,7	0,3
1	0,2	1,5	1,2
2	0,1	2,2	2,1
3	0,0	3,0	3,0

Kaikista kylmillä ulkolämpötiloilla saadaan suurempaa maasta saatavaa lämpötehoa. Tämä johtuu siitä, että lämpötilaero kasvaa ulkoilman ja maaperän välillä. Maasta saatava lämpötehoa saadaan eniten silloin, kun sen tarve on suurin. Mikäli putkistoa käytetään aina kun maaperän lämpö on suurempi kuin ulkolämpötila, maasta saatava keskimääräinen lämpöteho putkimetriä kohti vuoden aikana on noin 15 W/m. Lämpöteho putkimetriä kohti on paljon parempi, jos järjestelmää halutaan käyttää vain kovilla pakkasilla. Esimerkiksi jos putkistoa hyödynnettäisiin alle -10 °C lämpötiloissa lämpöteho putkimetriä kohti olisi noin 40 W/m.

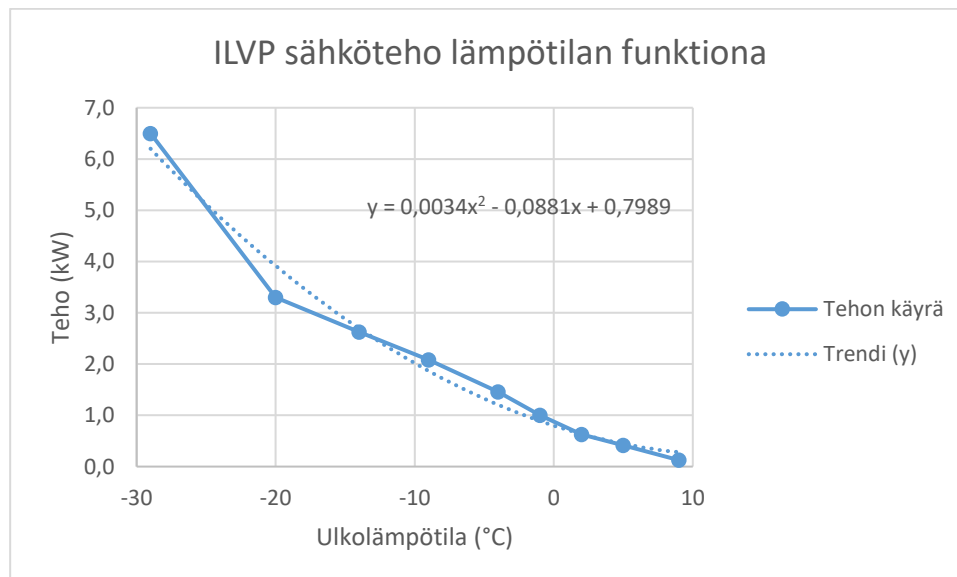
Lämmönsiirtymiskertoimella (maa/putki) on suuri vaikutus maasta saatavaan lämpötehoon. Kerroin voi vaihdella paljon eri maaperissä, sen vuoksi kuvaan 11. on koottu maasta saatava lämpöteho erilaisilla lämmönsiirtymiskertoimilla (maa/putki). Kaikki muut koejärjestelyn parametrit on pidetty samoina.



Kuva 11. Maasta saatava lämpöteho lämmönsiirtymiskertoimen (maa/putki) funktiona

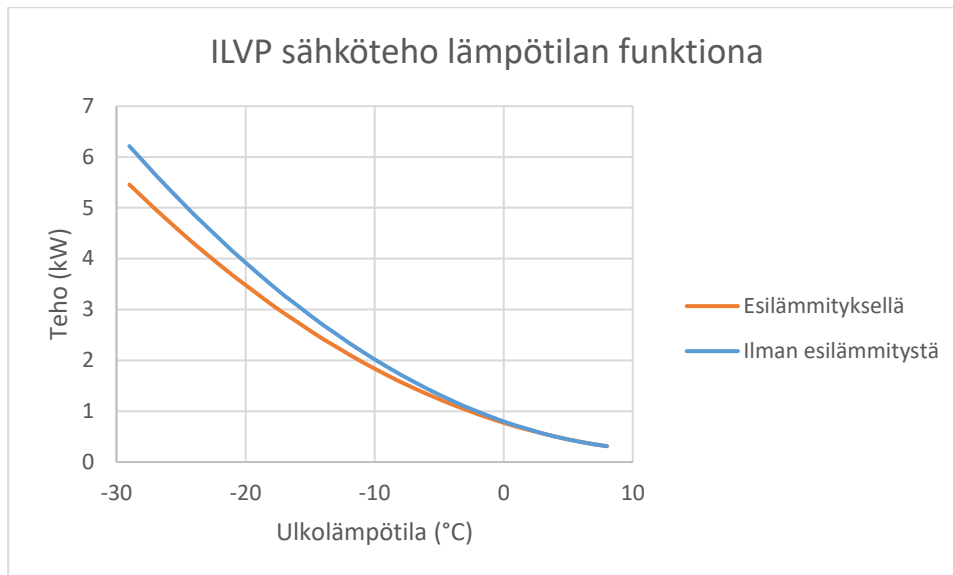
Ilmavesilämpöpumpusta on otettu sähkön kulutustietoja eri ulkolämpötiloilla. Tiedot on saatu ilmavesilämpöpumpun laitteen keräämästä omasta datasta. Laitte kertoo hetkellisiä energian kulutustietoja vuorokauden välein. Päivän energian kulutustiedossa näkyy myös päivän keskiarvo lämpötila. Teho on saatu vuorokauden energian kulutustiedoista jakamalla vuorokauden tunneilla.

Lauhan talven vuoksi alle -20 °C lämpötiloissa tehon kulutustietoja ei ole saatu kerättyä. Laitteen maksimi tehonotto on $6,85\text{ kW}$, jonka oletetaan kuluvan silloin kun lämpötila on noin -30 °C . Kuvaan 12. saaduista pisteistä on muodostettu trendikäyrä toiseen asteen yhtälöllä, joka näkyy kuvassa katkoviivana.



Kuva 12. Ilmavesilämpöpumpun ottama sähköteho eri lämpötiloissa

Kun sähköteho lämpötilan funktiona on määritetty ilmavesilämpöpumpulle normaalitilanteessa, voidaan sähköteho nyt määrittää käyttäen esilämmitettyä ilmaa. Kuvassa 13. on käytetty kuvan 12. trendifunktiota $y = 0,0034x^2 - 0,0881x + 0,7989$, jolla on tehty funktiot tilanteille ilman esilämmitystä ja esilämmityksen kanssa. Esilämmityksellä pystytään parhaiten keventämään kompressorin ja muiden lisälaitteiden tehonottoa kaikista kylmillä ulkolämpötiloilla.



Kuva 13. Ilmavesilämpöpumpun käyttämä sähköteho lämpötilan funktiona ilman esilämmitystä ja esilämmityksen kanssa

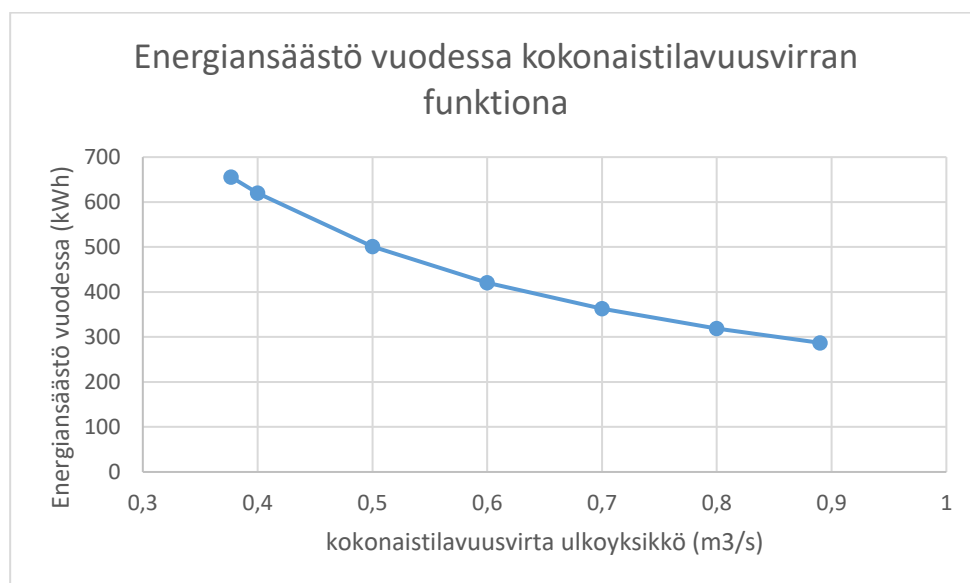
Kun tiedot ovat olemassa ilmavesilämpöpumpun käyttämästä tehosta esilämmityksellä ja ilman esilämmitystä, voidaan laskea kokonaisenergiansäästö vuodessa kaavalla (12). Jokaiselle ulkolämpötilalle on laskettu tehon arvot P_1 ja P_2 . Aiemmin työssä esitettiin ilman lämpötilatietoja. Tuntiesiintymien avulla voidaan laskea vuosittainen energiansäästö. Esimerkiksi silloin, kun ulkolämpötila on -20 °C saa P_1 arvon $3,9\text{ kW}$ ja P_2 arvon $3,5\text{ kW}$. Samaa ulkolämpötilaa esiintyy vuodessa $12,8$ tuntia. Kun lasketaan jokaiselle ulkolämpötilalle sama, saadaan kokonaisenergiansäästöksi vuodessa 287 kWh .

$$E = (P_1 - P_2) \cdot t \quad (12)$$

jossa	E	kokonaisenergiansäästö vuodessa	[kWh]
	P_1	IVLP käyttämä teho	[kW]
	P_2	IVLP käyttämä teho esilämmityksellä	[kW]
	t	vuoden tuntiesiintymät	[h]

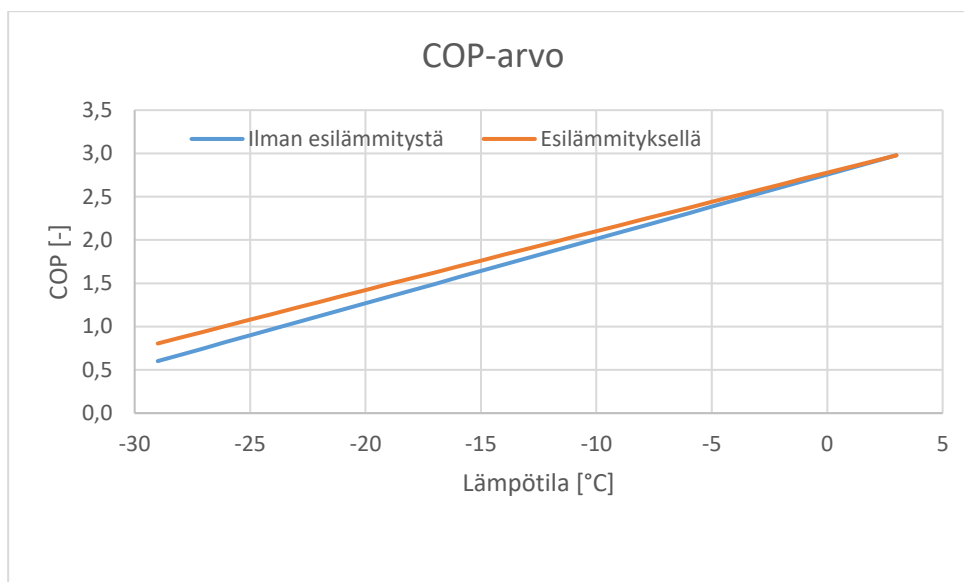
Ilmavesilämpöpumppu käyttää vuodessa 5398 kWh energiaa. Vuotuinen säästö vastaa $5,3\%$ käytetystä kokonaisenergiasta. IVLP käyttämä energia on saatu laskemalla laitteen käyttämä kokonaisteho kerrottuna vuoden tuntiesiintymillä. Putkista ei saada energiansäästöä ollenkaan, kun ulkolämpötila on yli 3 °C . Utin ilmatietojen mukaan alle 3 °C lämpötiloja on 3578 tuntia. Säästöä syntyy siis vain noin 40% ajalta vuoden aikana.

Mikäli ulkoyksikön käyttämä kokonaistilavuusvirta on pienempi kuin laskennassa käytetty $0,89 \text{ m}^3/\text{s}$, saadaan parempi vuosittainen säästö. Energiansäästön kasvua selittää se, että putkistossa lämmennyttä ilmaa on suurempi osuus kuin ulkoilmaa eli sekoitussuhteen putkesta kasvaessa saadaan parempi vuotuinen säästö. Kuvaan 14. on laskettu kokonaisenergiansäästö vuodessa eri ilmamäärille ulkoyksikön läpi. Säästöä syntyy 5,3–12,1 % käytetystä kokonaisenergiamäärästä. Kun kokonaistilavuusvirta ulkoyksikköön on $0,38 \text{ m}^3/\text{s}$ on sekoitussuhde putkesta 100 % eli kaikki ilma on esilämmitettyä. Kun kokonaistilavuusvirta ulkoyksikköön on $0,89 \text{ m}^3/\text{s}$ on sekoitussuhde 42,4 %.



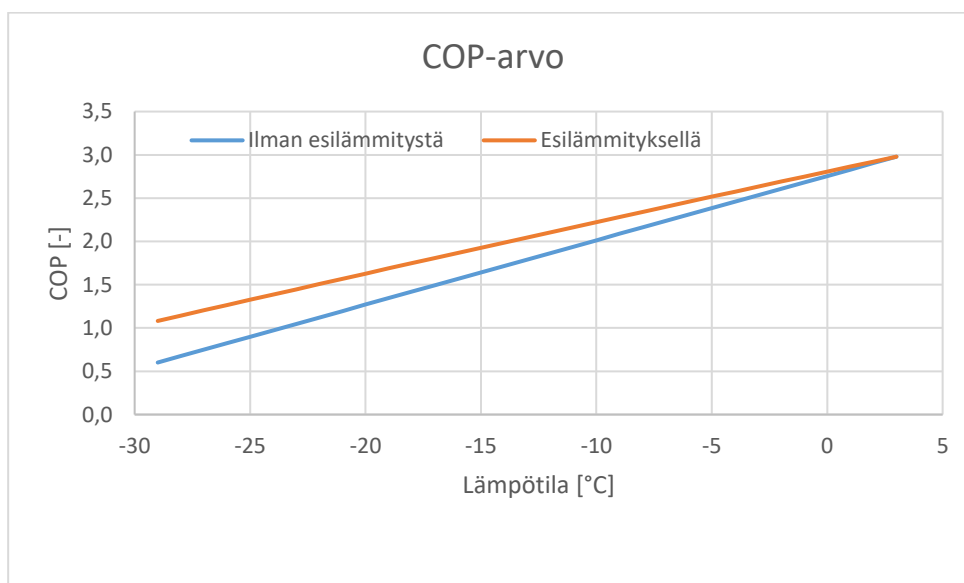
Kuva 14. Energiansäästö vuodessa kokonaistilavuusvirran funktiona

Ilmavesilämpöpumpun COP-arvoja on otettu ylös laitteen omasta datasta eri ulkolämpötiloilla. Datasta on muodostettu lämpötilakäyrä, joka vastaa suoran yhtälöä. Kun tiedetään ulkoyksikköön tuleva ilman lämpötila, voidaan muodostaa COP-arvot myös esilämmitetylle ilmalle. Kuvassa 15. on esitetty COP-arvot eri lämpötiloissa esilämmityksellä ja ilman esilämmitystä esimerkkitilanteessa, kun kokonaisenergiansäästö vuodessa on 287 kWh. Esilämmityksellä saadaan parannettua ilmavesilämpöpumpun COP-arvoja.



Kuva 15. Esilämmityksen vaikutus COP-arvoon. Ilman virtausnopeus putkistossa on 3 m/s, maan lämpötila on 3 °C, Sekoitussuhde putkesta 42,4 %, Lämmönsiirtymiskerroin maasta putkeen on 5 W/(m² °C)

Kuvasta 16. nähdään, mikäli kaikki ilma saataisiin putkistosta COP-arvot paranevat enemmän. Ilmamäärä ulkoyksikköön on tällöin vain 0,38 m³/s, mikä on mitä todennäköisemmin liian pieni määrä yhdeksän kilowattitunnin ilmave-silämpöpumpulle. Todellisuudessa ilmamäärä riittäisi mahdollisesti 3–5 kW lämpöpumpulle täysimääräisesti. Kokonaisenergiänsäästö vuodessa on tällöin 656 kWh, mikä vastaa 12,1 % käytetystä kokonaisenergiasta.



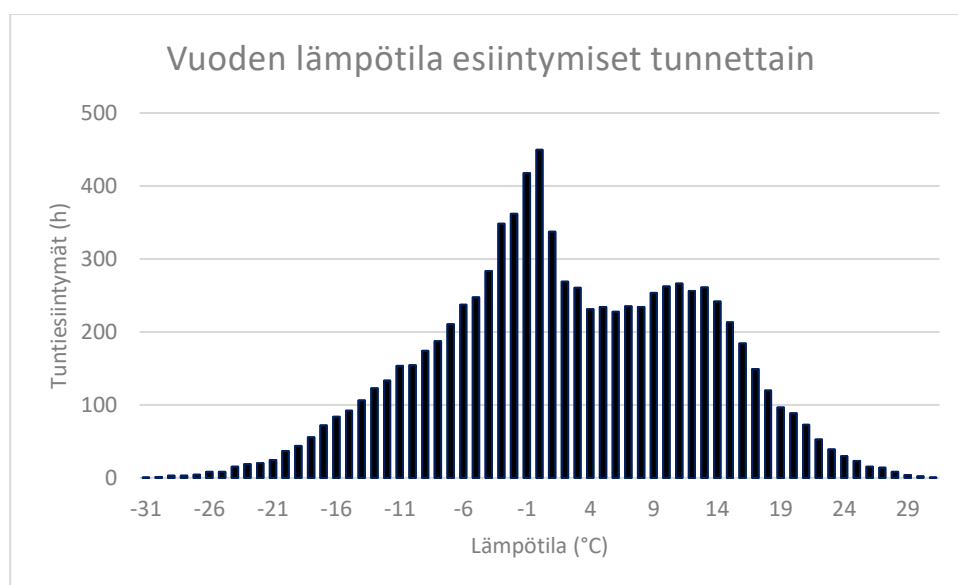
Kuva 16. Esilämmityksen vaikutus COP-arvoon. Ilman virtausnopeus putkistossa on 3 m/s, maan lämpötila on 3 °C, Sekoitussuhde putkesta 100 %, Lämmönsiirtymiskerroin maasta putkeen on 5 W/(m² °C)

7.3 Säästö esimerkki Rovaniemi

Tässä kappaleessa otetaan esimerkkipaikka Pohjois-Suomesta, ja selvitetään kokonaisenergiansäästö vuodessa. Rovaniemellä lämmityskausi on pitempi kuin Kouvolan Utissa. Myös kylmiä ulkolämpötiloja esiintyy Rovaniemellä enemmän kuin Utissa. Tässä esimerkissä käytetään muuten täysin samoja lähtöarvoja kuin luvussa 7.2, mutta maaperän lämpötila ja ilmasto on vaihdettu vastaamaan Rovaniemeä.

Lämpötilatiedot kuvaan 17. on saatu ilmatieteenlaitoksen sivuilta. Tietoina on käytetty Rovaniemen lentoaseman tuntilämpötilatietoja ajanjaksolla 1.1.2013 klo 0:00-31.12.2022 klo 24:00. Lämpötilatiedot ovat keskiarvo kymmeneltä vuodelta.

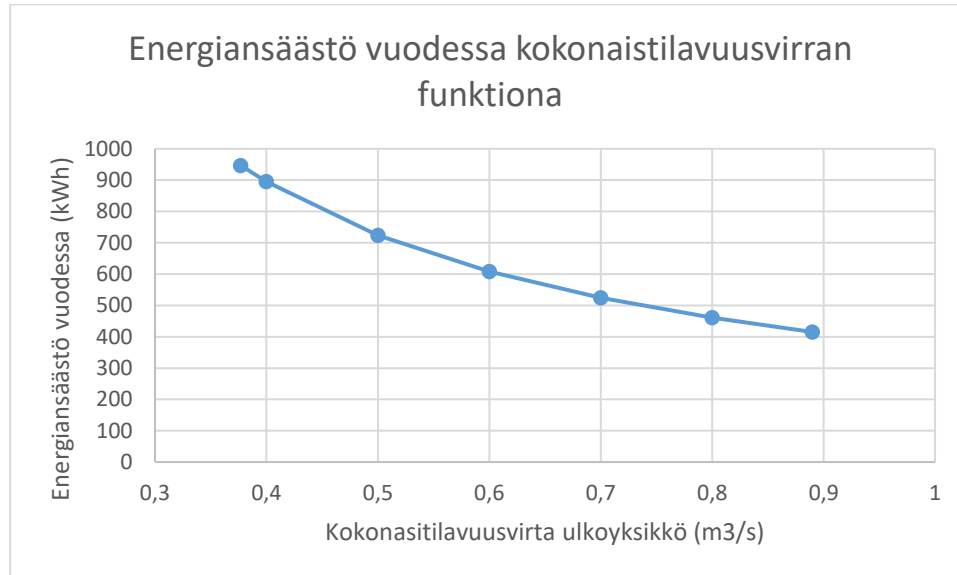
Verrattuna Utin lämpötilatietoihin Rovaniemellä esiintyy alle 3 °C lämpötiloja enemmän kuin Utissa. Rovaniemellä maaperän lämpötila on kuitenkin kylmempi kuin 3 °C. Aiemmin työssä kerrottiin, että maanpinnan vuotuinen keskilämpötila on Lapissa 1–2 °C. Talvikuukausina maaperän lämpötila muutaman metrin syvyydessä kylmenee parilla asteella lisää. Putket tulisi asentaa noin 2–3 metriin, sillä routaraja voi ylettyä jopa puoleentoista metriin.



Kuva 17. Rovaniemen lentoaseman lämpötilojen tuntiesiintymät vuodessa

Valitsemalla maaperän lämpötilaksi 0 °C saadaan energiansäästöä vuodessa 415 kWh, mikä vastaa 7,7 % kokonaisenergian kulutuksesta.

Ulkoyksikön ottama kokonaistilavuusvirta on todennäköisesti kuitenkin pienempi kuin $0,89 \text{ m}^3/\text{s}$. Kuvaan 18. on laskettu energiansäästö vuodessa erilaisille ilmamäärille. Kokonaisenergiansäästöksi saadaan 7,7–17,5 % eri kokonaistilavuusvirroilla.



Kuva 18. Energiansäästö vuodessa tilavuusvirtojen funktiona Rovaniemellä

8 VERTAILUA MAALÄMPÖPUMPPU, IVLP JA IVLP+ESILÄMMITYS

Vaikka maalämpöpumppu on osoittautunut tehokkaaksi energiaratkaisuksi, korkeat alkukustannukset sekä asennustekniset esteet eivät mahdollista sen käyttöä kaikkialla. Ilmavesilämpöpumppu on itsessään toimiva ratkaisu rakennusten lämmittämiseen ja sen asentaminen onnistuu sellaisiin kohteisiin, joihin maalämpö ei ole mahdollinen. Putkisto-esilämmitystä voidaan yrittää soveltaa kohteisiin, joissa on jo IVLP tai ILP asennettuna tai uusiin kohteisiin. Vaatimuksena putkistolle on noin aarin verran maapinta-alaa, johon putket voidaan upottaa. Tässä luvussa vertaillaan maalämpöpumpun, ilmavesilämpöpumpun ja putkillä esilämmitetyn ilmavesilämpöpumpun kannattavuutta. Lämpöpumpujen hinnat, pitoajat, ym. on arvioitu keskimääräisillä arvoilla.

Ilmavesilämpöpumppu maksaa kokonaan asennettuna 8000–15000 euroa. Kotitalousvähennyksellä hinta putoaa 7000–13000 euroon. Maalämpö kokonaan asennettuna maksaa 15000–25000 euroa. Kotitalousvähennyksellä hinta on noin 10000–20000 euroa. (Lämpöykkönen 2023.) Kotitalousvähennys on vuoden 2023 alussa käytössä, mutta se voidaan lainsäädännöllä muuttaa.

Siksi tähän vertailuun, valitaan hinnat ilman kotitalousvähennystä. Ilmavesilämpöpumpun hinnaksi päätetään 11500 euroa ja maalämpöpumpulle 20000 euroa.

Ilmavesilämpöpumpun pitoajaksi valitaan 20 vuotta ja maalämmölle 30 vuotta. Oletustilanteessa kompressorin vaihto täytyy tehdä 10 vuoden välein kummallakin lämpöpumpulle. IVLP kompressori maksaa keskimäärin 1500 euroa. Maalämpöpumpun kompressori maksaa keskimäärin 2500 euroa, mikä vaihdetaan kaksi kertaa. (Energiatehokas koti 2020.)

IVLP+esilämmitys esilämmitysputkiston kokonaiskustannus voisi olla 2000 euroa, kun huomioidaan kaivauskustannukset, putkikustannukset ja muut kustannukset, johon kuuluu muun muassa puhallin tai puhaltimet, katos ja kuilujen teko. Hintaa voidaan saada alemmaksi käyttämällä edullisempia putkia. Kaivamistyö täytyy tehdä kaivinkoneella, joten siitä ei voi säästää.

Talon vuotuinen energiantarpeeksi valitaan 17000 kilowattituntia. SPF eli Seasonal Performance Factor tarkoittaa lämpöpumpun kokovuotista hyötysuhdetta. SPF-arvo antaa todennukaisimman vuosihyötysuhteen, sillä se myös huomioi lämpimän käyttöveden osuuden (Thermia s.a.). Ilmavesilämpöpumpulle SPF-arvoksi valitaan 2,7 ja maalämmölle 3,5. Arvot ovat tyypillisiä arvoja Ilmavesilämpöpumpulle ja maalämmölle. Vuotuinen energiankulutus on tällöin ilmavesilämpöpumpulla 6296 kWh. Maalämpöpumpulla kulutus on 4857 kWh vuoden aikana. Luvussa 7.2 laskettiin, että kokonaisenergiansäästö vuodessa IVLP+esilämmitys oli noin 5,3–12,1 % verrattuna tavalliseen ilmavesilämpöpumpuun. Jos energiaa säästyisi 8,5 % saataisiin IVLP+esilämmityksen kulutukseksi 5761 kWh.

Lämpöpumppujen jäännösarvoksi valitaan 0 euroa, kun pitoaika päättyy. Ilmavesilämpöpumppu maksaa 13000 euroa, kun lisätään kompressorin uusiminen. Maalämpöpumppu maksaa 25000 euroa, kun huomioidaan kaksi kompressorin vaihtoa. IVLP+esilämmitys maksaa 15000 euroa kun huomioidaan vielä 2000 euron kustannus putkijärjestelmän asentamiseen. Kiinteät kustannukset lasketaan investointikustannukset jaettuna pitoajoilla. Ilmavesilämpö-

pumpun kiinteiksi kustannuksiksi saadaan 650 euroa vuodessa. Maalämpöpumpulle sama on 833 euroa vuodessa. IVLP+esilämmitys kiinteät kustannukset ovat 750 euroa vuodessa.

Sähkön kokonaishintana käytetään 0,17 €/kWh, joka oli keskimääräinen hinta Suomessa vuoden 2020 lopussa (Energiavirasto 2021, 25). Hinta sisältää energian, veron ja siirtohinnan. Muuttuvat kustannukset eli vuotuinen energian hinta lasketaan vuotuinen sähkönkulutus kertaa sähkön kokonaishinta. Ilmavesilämpöpumpulle vuotuinen energian hinta on 1070 euroa. Maalämpöpumpulle vastaava on 826 euroa. IVLP+esilämmitys vuotuinen energian hinta on 979 euroa.

Laskemalla yhteen kiinteät ja muuttuvat kustannukset saadaan kokonaisvuosikustannus. Ilmavesilämpöpumpun vuotuinen kustannus on 1720 euroa. Maalämpöpumpun vuotuinen kustannus on 1659 euroa. IVLP+esilämmitys vuotuinen kustannus on 1729 euroa

Tuloksista nähdään, että IVLP+esilämmitys ei ole näillä arvoilla kannattavaa. On toki mahdollista, että sähkön hinta nousee tulevina vuosina, jolloin kannattavuus voi parantua. Tulevaisuudessa mahdollisesti siirrytään tehohinnoitteluun sähkön osalta. Teho maksu tulee käyttöön silloin, kun jokin tietty tehoraja ylitetään. (Järvi-Suomen Energia 2022.) IVLP+esilämmityksellä voidaan leikata huipputehoja talvella, jolloin järjestelmän kannattavuus voisi parantua ilmavesilämpöpumppuun nähden.

IVLP+esilämmitys voi olla järkevää toteuttaa tilanteessa, jos esilämmitysputkiston kokonaiskustannus saadaan edulliseksi. Esimerkiksi Uudessa kiinteistössä rakennusvaiheessa pohjatyön yhteydessä esilämmitysputkisto voisi olla kannattavaa asentaa. Uuteen kohteeseen olisi myös mahdollista käyttää suurempaa putkistoa, jolloin energiaa säästyisi vielä enemmän.

9 YHTEENVETO JA VIRHEIDEN TARKASTELU

Tässä työssä selvitettiin, kuinka paljon maahan sijoitetuilla putkilla voidaan parantaa ilmavesilämpöpumpun hyötysuhdetta ja selvittää sitä kautta energiansäästö vuodessa. Vuosittaiseksi energiansäästökseksi saatiin 287–655 kWh käytämällä Utin lämpötilatietoja. Todellinen energiansäästö tällaisella systeemillä voi vaihdella lasketusta tiedosta useista seikoista johtuen.

Varsinkin lämmönsiirtymiskertoimen arviointi maasta esilämmitysputkeen osoittautui haasteelliseksi. Laskuissa juuri tämä lämmönsiirtymiskertoimen arvon muuttaminen vaikuttaa lopputulokseen merkittävästi. Kuvassa 11. on eri lämmönsiirtymiskertoimien vaikutus maasta saatavaan lämpötehoon tässä työssä käytetyllä koejärjestelyllä. Maaperällä tehtyjä lämmönsiirtymiskerrottutkimuksia, jossa maaperän lämpö siirtyy putkeen, oli vähän tarjolla. Maaperän lämmönjohtavuudella on riippuvuus lämmönsiirtymiskertoimeen. Tässä työssä lämmönsiirtymiskertoimena käytettiin $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, mikä voisi ehkä toteutua savi- tai hiekkamaassa, jossa on mukana kosteutta. Kuivasta maaperästä tuskin saataisiin yhtä hyvää kerrointa, jolloin maasta ei siirtyisi lämpöä riittävästi lämmittämään putkien sisällä virtaavaa ilmaa.

Ilmavesilämpöpumpun ulkoyksikön läpi menevä todellinen ilmamäärä ei ole vakio. Uusissa ilmavesilämpöpumpuissa ulkoyksikön puhaltimessa on taajuusmuuttaja, joka optimoi puhaltimen kierroksia ja sitä kautta sen läpi menevää tilavuusvirtaa. Työssä on kuitenkin käytetty valmistajan ilmoittamaa tilavuusvirtaa $0,89 \text{ m}^3/\text{s}$, joka on todennäköisesti maksimivirtaus. Energiansäästö vuodessa on laskettu sen vuoksi myös pienemmillä tilavuusvirroilla kuvaan 14.

Jotta ilma virtaisi putkistossa tarvitaan putkistoon puhallin. Tuloksissa ei ole huomioitu puhaltimen sähkönkulutusta, sillä sen vaikutus ei ole kovin suuri. Puhallin tuottaa käydessään myös lämpöä, joka lämmittää putkissa olevaa ilmaa. Todellisuudessa järjestelmästä saatava hyöty on heikkoa silloin kun ulkolämpötila on noin $0\text{--}3 \text{ }^\circ\text{C}$, sillä maasta saatava lämpöenergia voi olla samaa luokkaa mitä puhallin käyttää sähköenergiaa.

Etenkin talvella Ilmavesilämpöpumppeihin ja ilmalämpöpumppeihin muodostuu jäätä. Ulkoyksikön kennostoon muodostuu jäätä etenkin silloin, kun lämpötila on lähellä nollaa, sillä silloin ilmassa on mukana paljon kosteutta. Sulatukseen kulunutta aikaa ei ole tarkasteltu tässä työssä. Esilämmitys putkilla voidaan mahdollisesti vähentää sulatusta, sillä kun kylmä ulkoilma menee putkistoon, muodostuu härmistymistä eli ulkoilma jäätyy putken seinämiin. Ilma voi myös kondensoitua vedeksi putkessa. Putkisto siis kuivattaa ilmaa. Lämpöpumpun ulkoyksikkö käy tehokkaammin kuivalla ilmalla. Myös sulatukseen käytettävän ajan lyhentyessä energiansäästö vuodessa kasvaa. Asian tutkiminen vaatisi käytännön kokeilemista.

Kaavan (8) laskentatapa maasta saatavalle lämpöteholle on yksinkertaistettu. Todellisuudessa lämpöteho maasta heikkenee vähitellen, kun putkissa oleva ilma lämpenee. Lämpövuoto ei siis ole koko putkien matkan ajan vakio ilman lämmitessä putkissa. Kuitenkin 12 metrisissä putkissa, jossa ilma virtaa 3 m/s ei virhettä ehdi syntyä maasta saatavaan lämpötehoon merkittävästi.

Opinnäytetyön tavoitteiseen päästiin vaikeuksista huolimatta. Vuosittainen energian säästö saatiin selville. Työn tekeminen oli hieno kokemus, mielenkiintoisen aiheen ansiosta, kiitos siitä menee toimeksiantajalle. Kiitos kuuluu myös ohjaavalla opettajalle Hannu Sarvelaisella hyvästä työn ohjauksesta.

LÄHTEET

Bergman, T., Incropera, F., DeWitt, D. & Lavine, A. 2011 Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7. painos. John Wiley & Sons.

Çengel, Y. 2002. Heat Transfer: A Practical Approach. 2. painos. Texas: Mcgraw-Hill.

Energiavirasto. 2021. Sähkömarkkinat nyt – Mitä tapahtui vuonna 2021. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/13008633/Energiavirasto+mediainfo+20012022.pdf/b83136e5-180f-9083-d5d1-a2ca08df18ee/Energiavirasto+mediainfo+20012022.pdf?t=1642765981569> [viitattu 15.4.2023].

Golik, V., Zemenkov, Y., Gladenko, A., Seroshtanov, I. 2019. Modeling the heat transfer processes in the pipe-soil system *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 663. Saatavissa: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/663/1/012012> [viitattu 5.3.2023].

Goswami, Y., Biseli, K. 1993. Use of Underground Air Tunnels for Heating and Cooling Agricultural and Residential Buildings. *Fact sheet EES* 78, 1-4. Saatavissa: <http://ufdcimages.uflib.ufl.edu/IR/00/00/48/50/00001/EH21100.PDF> [viitattu 23.2.2023].

Guohui, G. 2017. Dynamic thermal simulation of horizontal ground heat exchangers for renewable heating and ventilation of buildings *Renewable Energy* 103, 361-371. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.052> [viitattu 5.3.2023].

Hollmuller, P., Lachal, B. 2014. Air–soil heat exchangers for heating and cooling of buildings: Design guidelines, potentials and constraints, system integration and global energy balance. *Applied Energy* 119, 476-487. Verkkojlehti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.042> [viitattu 15.2.2023].

Juvonen, J. 2009. Lämpökaivo maalämmön hyödyntäminen pientaloissa Ympäristökeskus. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://www.suomenpora-kaivo.fi/index.php/download_file/view/9/141/ [viitattu 27.1.2023].

Kolme tärkeää tekijää, jotka vaikuttavat lämpöpumpun valintaan. s.a. Thermia. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.thermia.fi/hyodyllista-tietoa/ostalampopumppu/lampopumppu-kolme-tekijaa/> [viitattu 7.3.2023].

Leppävaara, N. 2008. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Oulun yliopisto. Fysikaalisten tieteiden laitos. Pro gradu -tutkielma. PDF-dokumentti.

Lämmitysjärjestelmien elinkaari. 2020. Energiatehokas koti. WWW-dokumentti. Päivitetty 17.3.2020. Saatavissa: https://www.energiatehokas-koti.fi/suunnittelu/talotekniikan_suunnittelu/lammitys/lammitysjarjestelmien_elinkaari [viitattu 7.3.2023].

Lämpöykkönen. 2023. Maalämpö- vai ilma-vesilämpöpumppu? Vertaile lämmitysjärjestelmiä näin. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://lampoykkonen.fi/100faktaa/fakta-86-lammitysjarjestelmavertailu-maalampopumppu-vai-ilma-vesilampopumppu/> [viitattu 25.4.2023].

Magda, W. 2017. Comparison of Soil Models in the Thermodynamic Analysis of a Submarine Pipeline Buried in Seabed Sediments. *Polish Maritime Research* 24, 124–130. Verkkojlehti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1515/pomr-2017-0144> [viitattu 27.3.2023].

Motiva Oy. 2021. Ilma-vesilämpöpumppu, IVLP. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/ilma-vesilampopumppu_ivlp [viitattu 29.11.2022].

Motiva Oy. 2022. Ilma-vesilämpöpumppu (IVLP). WWW-dokumentti. Päivitetty 21.12.2022. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput/lampopumpputeknologiat/ilma-vesilampopumppu [viitattu 27.2.2023].

Motiva Oy. s.a. Lämpöä ilmassa. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.motiva.fi/files/175/Ilmalampopumput.pdf> [viitattu 29.11.2022].

Motiva Oy. s.a. Lämpöä omasta maasta. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/7965/Lampoa_omasta_maasta_Maalampopumput.pdf [viitattu 29.3.2023].

NBSIR 81-2378. 1981. Heat transfer analysis of underground heat and chilled-water distribution systems.

Oke, T. Boundary Layer Climates. 1987. 2.uudistettu painos. Psychology Press.

Perälä, O., Perälä, R. 2013. Lämpöpumput. 3. uudistettu painos. Helsinki: Alfamer/Karisto Oy.

Pratik, K. 2021. Free convection vs Forced convection. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://mechcontent.com/free-convection-vs-forced-convection/> [viitattu 2.2.2023].

Roudan syvyys. 2023. Suomen ympäristökeskus. WWW-dokumentti. Päivitetty 3.3.2023. Saatavissa: <http://wwwi3.ymparisto.fi/i3/ti-lanne/FIN/routa/KAS.htm> [viitattu 3.3.2023].

Service Manual Air-to-Water Hydromodule + Tank. 2019. Panasonic PRO Club. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.panasonicproclub.com/uploads/ES/catalogues/manual-instalacion/Service%20Manual%20Serie%20J%20All%20in%20One.pdf> [viitattu 6.3.2023].

Sulpu. 2023. Lämpöpumppuja myytiin viime vuonna lähes 200 000 kappaletta. Kasvu 50 %. WWW-dokumentti. Päivitetty 16.1.2023. Saatavissa: <https://www.sulpu.fi/lampopumppuja-myyntiin-viime-vuonna-lahes-200-000-kappaletta-kasvu-50/> [viitattu 22.2.2023].

Tasainen sähkönkäyttö on tulevaisuudessa edullisinta. 2022. Järvi-Suomen Energia. WWW-dokumentti. Päivitetty 22.2.2022. Saatavissa: <https://www.jseoy.fi/ajankohtaista/tasainen-sahkonkaytto-on-tulevaisuudessa-edullisinta/> [viitattu 18.4.2023].

Tilastokeskus 2021a. Energia 2021 -taulukkopalvelu. Energian kokonaiskulutus sektoreittain. Tilastokeskus, Helsinki. Saatavissa: https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2021/html/suom0000.htm [viitattu 19.1.2023].

Tilastokeskus 2021b. Energia 2021 -taulukkopalvelu. Asumisen energiankulutus. Asumisen energiankulutus energialähteittäin (TJ, GWh). Tilastokeskus, Helsinki. Saatavissa: https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2021/html/suom0007.htm [viitattu 19.1.2023].

Tilastokeskus 2021c. Energia 2021 -taulukkopalvelu. Rakennusten lämmitys. Asuin- ja palvelurakennusten lämmityksen energialähteet (TJ, GWh). Tilastokeskus, Helsinki. Saatavissa: https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2021/html/suom0006.htm [viitattu 22.2.2023].

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2022. Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. Päivitetty 09.09.2022. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-811-0> [viitattu 23.2.2023].