

Tuomas Parkkila

## **ESILÄMMITYS JA VIILENNYS KANAVAPATTERILLA**

Vaikutusten arviointi pientaloissa

# **ESILÄMMITYS JA VIILENNYS KANAVAPATTERILLA**

Vaikutusten arviointi pientaloissa

Tuomas Parkkila  
Opinnäytetyö  
Kevät 2024  
Talotekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Talotekniikan tutkinto-ohjelma

---

Tekijä: Tuomas Parkkila

Opinnäytetyön nimi: Esilämmitys ja viilennys kanavapatterilla

Työn ohjaaja: Niko Peltokangas

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2024

Sivumäärä: 62 + 7 liitettä

---

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia ulkoilmakanavapatterilla toteutettavia esilämmitys- ja viilennysjärjestelmiä pientaloissa. Tavoitteena oli selvittää järjestelmän vaikutuksia maalämpökaivon mitoittamiseen ja saada käsitys järjestelmän kannattavuudesta tutkimuskohteena olevan pientalon esilämmityspatterista tehtyjen mittaustuloksien avulla. Opinnäytetyössä apuna käytettiin CADMATIC 2023 -energialaskentatyökalua, IDA ICE -ohjelmaa tutkimuskohteen lämmitys- ja jäähdytysenergiantarpeen määrittämiseksi ja Earth Energy Designer -ohjelmaa maalämpökaivon mitoittamiseen. Opinnäytetyössä keskityttiin porakaivolla toteutettaviin maalämpökohteisiin. Perusajatuksena oli, että uudisrakennukseen olisi valittu lämmitysjärjestelmäksi maalämpö porakaivolla, jolloin esilämmitys- ja viilennysjärjestelmän hankintakustannukset olisivat maltilliset.

Opinnäytetyön tietoperustana käytettiin talotekniikka-alan kirjallisuutta, Ympäristöministeriön asetuksia ja ohjeita rakennuksen lämmityksen ja jäähdytyksen tehon- ja energiantarpeen laskennasta, Rakennustietosäätiön julkaisemia ohjekortteja ja valmistajien materiaaleja. Tietoperustaa hyödynnettiin laajasti ja monipuolisesti laadun varmistamiseksi. Lisäksi hyödynnettiin opinnäytetyön tekijän laajaa kokemusta LVI-alalta.

Ensimmäisessä vaiheessa opinnäytetyössä käsiteltiin pientalon ilmanvaihtojärjestelmää ja sen energiankulutusta, maalämpöjärjestelmän toimintaa, lämmönkeruutapoja ja lämpökaivon mitoittamiseen liittyviä tekijöitä ja lämpökaivon optimointia. Toisessa vaiheessa tutkittiin esilämmitys- ja viilennysjärjestelmää yleisesti, ilmanvaihdon jälkilämmityksen energiankulutuksen laskentaa ja lämmöntalteenoton hyötysuhteen vaikutusta siihen sekä viilennyksen ja jäähdytyksen tehon- ja energiantarpeen laskemista. Kolmannessa vaiheessa määritettiin tutkimuskohteen lämmityksen ja jäähdytyksen tehon- ja energiantarpeet sekä esilämmitysjärjestelmän mittaustietojen perusteella määritettiin siitä tutkimuskohteeseen vuosittain saatava energia ja suurimmat tehot. Niiden perusteella tehtiin Earth Energy Designer -ohjelmalla simulointeja esilämmitysjärjestelmän vaikutuksista maalämpökaivon mitoittamiseen. Lopuksi laskennalla saatuja tietoja hyödyntämällä tutkittiin esilämmitysjärjestelmän kannattavuutta investointina.

Tutkimuksesta saatujen tuloksien perusteella todettiin esilämmitysjärjestelmän säästävän energiaa tutkimuskohteessa noin 1250 kWh. Järjestelmän hankintakustannuksiin nähden taloudellinen säästö jäi kuitenkin pieneksi ja tutkimuskohteen osalta takaisinmaksuajaksi saatiin noin 30 vuotta. Yhdistämällä järjestelmään jäähdytys puhallinkonvektorilla investoinnin kannattavuus luultavasti paranisi huomattavasti, mikäli sitä verrattaisiin kompressorikyilmään.

---

Asiasanat: ilmanvaihto, maalämpö, esilämmitys, viilennys, energia, optimointi, IDA ICE

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Building Services

---

Author: Tuomas Parkkila  
Title of thesis: Preheating and cooling with duct radiator  
Supervisor: Niko Peltokangas  
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2024  
Number of pages: 62 + 7 appendices

---

The subject of this thesis was study the operation of a duct radiator preheating and cooling system in private houses. The aim was to determine the effects of the system on the dimensioning of a geothermal well and to determine whether the system would make economic sense. The programs used in the calculation were CADMATIC 2023, IDA ICE and Earth Energy Designer.

The object of study was a one-year-old single-family house with a preheating and cooling duct radiator. The basis of knowledge in the study was the literature on building services, Finnish regulations and guidelines on the energy efficiency of buildings and manufacturers material. The thesis calculated the heating and cooling energy needs of the research object, and the energy obtained by preheating was determined based on the measurement results. Based on the results, the effects of preheating on borehole dimensioning were simulated with a simulation program Earth Energy Designer.

In the study, the calculated savings of the preheating system were 1250-kilowatt hours compared with a conventional ventilation system. The study showed that the cost of purchasing the preheating system in relation to the benefit received is too high and the payback period of the system would be 27 years. If the system is combined with cooling by a fan convector, profitability can be improved.

---

Keywords: ventilation, geothermal energy, preheating, cooling, energy, optimization, IDA ICE

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
2	ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄ .....	9
2.1	Ilmanvaihtojärjestelmän osat .....	9
2.2	Ilmanvaihdon mitoituksen perusteet .....	10
2.3	Energiankulutus ilmanvaihtojärjestelmässä .....	11
3	MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄ .....	12
3.1	Maalämpöpumpun toiminta .....	14
3.2	Lämmönkeruuputkistot .....	16
3.3	Maalämpökaivon mitoitus .....	18
3.4	Maalämpökaivon optimointi .....	20
4	ESILÄMMITYS JA VIILENNYS KANAVAPATTERILLA .....	21
4.1	Ulkoilman esilämmitys .....	22
4.1.1	Esilämmityksen vaikutuksen arviointi jälkilämmitystarpeeseen .....	22
4.2	Viilennys ja jäähdytys .....	27
4.2.1	Kostean ilman Mollier-diagrammi .....	28
4.2.2	Jäähdytystehon laskeminen .....	30
4.2.3	Jäähdytystehon- ja energiantarpeen määrittäminen .....	32
4.3	Esilämmityksen vaikutus porakaivon mitoitukseen .....	34
5	TUTKIMUSKOHTTEEN TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	35
5.1	Mittaukset .....	35
5.2	Lämmityksen ja jäähdytyksen tehon- ja energiantarve .....	36
5.2.1	Kuukausitason laskentamenetelmä .....	37
5.2.2	CADMATIC 2023 HVAC -teho- ja energialaskenta .....	38
5.2.3	IDA ICE -mallinnus ja -alkuarvot .....	39
5.2.4	IDA ICE -tulokset .....	43
5.3	Esilämmityspatterin tehon- ja energianotto .....	44
5.4	EED-mallinnus .....	47
5.5	Johtopäätökset mallinnoista .....	49
6	ESILÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KANNATTAVUUDEN ARVIOINTI .....	51
6.1	Hankinta- ja käyttökustannukset .....	51

7	POHDINTA.....	56
	LÄHTEET.....	58
	LIITTEET	

# 1 JOHDANTO

Uusissa pientaloissa maalämpö on edelleen yleisin valinta lämmitysmuodoksi, ja lähes kaikki pientalot varustetaan koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmällä ja lämmöntalteenotolla. Kalistuneet energiakustannukset kannustavat etsimään energiatehokkaita ratkaisuja lämmitykseen ja jäähdytykseen. Avarat tilat ja suuret ikkunapinnat lisäävät jäähdytyksen tarpeellisuutta pientaloissa, ja maalämpöjärjestelmä porakaivolla varustettuna tarjoaa käyttökustannuksiltaan edullisen ratkaisun olosuhteiden hallinnalle vapaajäähdytyksellä. Maalämpökaivo mahdollistaa myös ulkoilman esilämmittämisen, joka parantaa ilmanvaihtokoneen toimintaa lyhentäen lämmöntalteenoton sulatusjaksoja sekä vähentäen jälkilämmityspatterin energian kulutusta.

Työskenneltyäni pitkään LVI-alalla heräsi oma kiinnostukseni esilämmitysjärjestelmän kannattavuuteen, kun olen niitä useita itsekkin asentanut. Kuitenkaan koskaan ei ole ollut aivan selvää järjestelmästä saatavat hyödyt ja sen vaikutukset porakaivolle. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää ulkoilmakanavapatterin käytön kannattavuutta tilanteessa, jossa sitä käytetään esilämmitykseen talvella ja viilennykseen kesällä. Järjestelmän kannattavuus tai kannattamattomuus pyritään selvittämään laskemalla ja arvioimalla järjestelmän aiheuttamat lisäkustannukset hankintaan ja käyttöön tutkimuskohteena olevan asuinrakennuksen avulla.

Tavoite oman ammatillisen kasvun näkökulmasta on saada kattavasti tietoa esilämmitysjärjestelmän tarkemmasta toiminnasta ja sen soveltuvuuksista taloudellisesti kannattavasti erilaisiin kohteisiin. Tavoitteena on saada itselle kattava käsitys siitä, mitä täytyy huomioida esilämmitysjärjestelmää suunniteltaessa.

Työssä kerrotaan tutkimuksen kannalta oleellista teoretietoa maalämmöstä, ilmanvaihdosta ja energialaskennasta, ja niiden avulla johdatellaan esilämmitykseen ja viilennykseen kanavapatterilla. Työn ei ole tarkoituksena toimia laskentaoppaana esilämmitysjärjestelmille, vaan tarkoituksena on oleellisimpien teoretietojen ja tutkimuskohteen avulla antaa lukijalle käsitys esilämmitysjärjestelmien toiminnasta ja vaikutuksesta lämmönlähteelle.

Opinnäytetyössä tutkitaan laskennallisin menetelmin ulkoilmakanavaan kytkettävän kanavapatterin toimintaa esilämmitys- ja viilennyskäytössä. Lisäksi tarkastellaan tilannetta, jossa vapaajäähdy-

tyksellä ylläpidetään pientalon sisäilman lämpötilaa mieluksena kesällä. Tutkimuksessa on tarkoituksena keskittyä porakaivolliseen maalämpökohteeseen. Tavoitteena on selvittää energiamäärä, joka porakaivosta otetaan esilämmitykseen, ja energiamäärä, joka porakaivoon voidaan ladata viilennyspatterin ja jäähdytyskonvektorin avulla. Työssä selvitetään myös kanavapatterin käytön vaikutusta porakaivon mitoitukseen EED-mallinnusohjelman ja tutkimuskohteen avulla.

Aihetta pohtiessani ajattelin tutkimuskohteita olevan useampia. Sopivasti erilaisia kohteitakin olisi ollut saatavilla, mutta lopulta totesin resurssini riittämättömäksi useamman kohteen mittauksiin. Tutkimuskohteeksi valikoitui lopulta omistamani pientalo, koska maalämpöpumpun ja ilmanvaihdon etäohjauksien ansiosta sain valmista mittausdataa käyttööni, mikä ei olisi ollut muissa mahdollisissa kohteissa mahdollista. Tutkimuskohteessa on maalämpöjärjestelmä porakaivolla, kanavapatteri ulkoilmakanavassa sekä puhallinkonvektori kesäajan jäähdytystä varten. Kohteessa suoritetaan lämmityskaudella tarpeellisia mittauksia ilmanvaihdon ja keruupiirin osalta, joiden perusteella suoritetaan vertailua laskennalliseen tilanteeseen. Tutkimuskohteen jäähdytysenergian tarve selvitetään laskemalla kuukausitason menetelmällä, CADMATIC 2023 -energiälaskentatyökalulla sekä mallintamalla kohde IDA ICE -simulointiohjelmaa hyödyntäen. Jo etukäteen on tiedossa, että porakaivon syvyys ei välttämättä ole riittävä, mutta sen riittämättömyyttä ei ole tarkoitus käsitellä.



## 2 ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄ

Ilmanvaihtojärjestelmällä tarkoitetaan järjestelmää, jolla voidaan hallita sisäilman laatutavoitetta, toisin sanoen sisäilman puhtautta. Ilmavirta mitoitetaan sillä perusteella, että laatutavoite täyttyy. Ilmanvaihtojärjestelmää ei tule sekoittaa ilmastointijärjestelmän kanssa, jolla voidaan lisäksi huolehtia tilan lämpöolotavoitteiden täyttymisestä. (Sandberg & Ripatti 2016a, 113.)

Ilmanvaihtojärjestelmän tehtävä on huolehtia riittävästä ulkoilmavirrasta rakennuksen sisäilmaan. Poistoilmavirran mukana rakennuksesta poistuu terveydelle ja viihtyisyydelle haitallisia aineita, hajuja ja kosteutta sekä rakennustuotteista, ihmisistä ja niiden toiminnasta aiheutuvia epäpuhtauksia. (Ympäristöministeriön asetus 1009/2017, 3:8 §.)

Ilmanvaihtojärjestelmä voi olla painovoimainen, koneellinen poistoilmavaihto- tai koneellinen tulo- ja poistoilmavaihtojärjestelmä. Nykyisen kaltaisten tulo- ja poistoilmavaihtojärjestelmien aika-kausi alkoi, kun ilmalämmityskoneiden lämmitysosa riisuttiin pois. 1980-luvulta lähtien tulo- ja poistoilmavaihtojärjestelmä on ollut suosituin valinta pientalojen ilmanvaihtojärjestelmäksi. (Sandberg & Ripatti 2016a, 113–118.)

### 2.1 Ilmanvaihtojärjestelmän osat

Pientalon ilmanvaihtojärjestelmän pääkomponentti on ilmanvaihtokone. Pientalojen ilmanvaihtokoneet kuuluvat pienet ilmanvaihtokoneet -luokitukseen. Ne on kehitetty palvelemaan pientaloja, rivitaloja ja hajautetun ilmanvaihdon asuinkeuhkotaloja. Ne ovat standardituotteita, joiden nimellisvirta-alueet ovat noin 50–500 l/s. Tavanomaisesta ilmanvaihtokoneesta löytyvät tulo- ja poistoilmapuhaltimek, pyörivä roottorilämmönsiirrin tai vastavirtalämmönsiirrin, tulo- ja poistoilman suodattimet, lämmönsiirtimen ohituspelti, jälkilämmityspatteri ja itsenäinen ohjausautomaattikka. Lisäksi koneessa voi olla esilämmityspatteri, jäähdytyspatteri tai lämpöpumppu. (Mäkinen ym. 2016a, 156–157.)

Pientalojen kanavistot ovat yleensä sinkitystä teräksestä valmistettuja pyöreitä kanavia, mutta myös suorakaidekanavat ovat mahdollisia. Kanaviston osat, kuten käyrät, t-haarat, sisäliittimet, muuntoliittimet ja tulpat ovat yleensä tehdasvalmisteisia kumitiivisteliitoksilla varustettuja osia. Tu-

loilma- ja poistoilmakanavisto varustetaan äänenvaimentimin ja myös muita varusteita voi olla, kuten sulku- ja säätöpeltejä sekä palon- tai savunrajoittimia. (Ripatti, Railio & Sandberg 2016a, 213–217.)

Ilmanvaihtokanavien eristys voi olla palo-, lämmön-, kondenssi- tai äänieristystä. Ympäröivä tila ja lämpötila sekä kanavassa kulkeva ilman lämpötila vaikuttavat eristemateriaalin ja eristepaksuuden valintaan. Tavallisimmat eristemateriaalit ovat mineraalivillamatot ja kourut sekä umpisolumuovi, jos se on paloturvallisuuden kannalta mahdollista. Yleensä eristeet on päällystetty alumiinilaminaatilla tai muulla vastaavalla. (Ripatti ym. 2016a, 218.)

Päätelaitteiden tehtävänä on tilojen ilmanjako. Onnistuneeseen ilmanjakoon eivät rakennuksen käyttäjät kiinnitä huomiota. Onnistuneessa ilmanjaossa ei synny veto-ongelmia tai melua ja ilmanlaatu on hyvä. Poistoilmalaitteet, esimerkiksi poistoilmaventtiilit, sijoitetaan yleensä huonetiloihin, joissa epäpuhtauksia syntyy. Keittiöt varustetaan yleensä liesikuvulla tai liesituulettimella. Tuloilmalaitteina käytetään esimerkiksi lautasventtiileitä tai tuloilmahajottajia. (Kosonen & Sandberg 2016a, 225, 229, 232.)

Kanavistoon on mahdollista liittää myös erillinen kanavapatteri, jolla voidaan toteuttaa järjestelmän esilämmitys tai jäähdytys. Kanavapatteri täytyy olla varustettu kondenssiviemäroinnillä jäähdytettäessä. (Sandberg (toim.) 2016a, 160.) Maalämpöpumpun yhteydessä on mahdollista käyttää kanavapatteria ulkoilmakanavassa, jossa kierrätetään maapiirin liuosta ja saadaan näin samalla kanavapatterilla talvella lämmitettyä ja kesällä viilennettyä sisään otettavan ilman lämpötilaa (Swegon 2023, 3).

## **2.2 Ilmanvaihdon mitoituksen perusteet**

Tilakohtaiset ulkoilmavirrat suunnitellaan niin, että käyttöaikana huonetilojen ilmanvaihto ylläpitää viihtyisää, terveellistä ja turvallista sisäilman laatua. Ensisijaisesti ulkoilmavirran määrä määräytyy tilassa tavanomaisen käytön aikana oleskelevien henkilöiden määrän perusteella, mutta käyttäjämäärätietojen puuttuessa käytetään mitoitusta pinta-alan perusteella. Yleensä ulko- ja ulospuhallusilmavirrat suunnitellaan tavanomaisissa rakennuksissa yhtä suuriksi. Tilakohtaisesti tulo- ja poistoilmavirrat saavat olla erisuuruiset, jolloin alipaineista tilaa kohti ilma siirtyy siirtoilmana. Merkittäviä sisäisiä kosteuskuormia sisältävät tilat suunnitellaan lievästi alipaineisiksi ulkoilmaan nähden ja

näin estetään kosteuden siirtyminen rakennuksen rakenteisiin. Koko rakennusta kohden ulkoilmavirran täytyy olla vähintään  $0,35 \text{ (dm}^3\text{/s) /m}^2$ . (Talotekniikkainfo 2023, 17.)

Asuinrakennuksissa tavanomaisen käyttöajan tulo- ja poistoilmavirtaa tulee voida tehostaa vähintään 30 % suuremmaksi ja niitä saa pienentää enintään 60 % tilanteessa, jossa asunnossa ei ole tarvetta normaalin käyttöajan ilmanvaihdolle eikä siellä oleskele henkilöitä. Asuinrakennuksessa ilmavirran säätö saadaan aikaan puhaltimien pyörimisnopeutta muuttamalla. (Talotekniikkainfo 2023, 18–19.)

Opas asuinrakennusten ilmanvaihdon mitoitukseen (FINVAC 2019, 2) käsittelee asetuksen Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017 mukaisesti ilmanvaihdon mitoittamista asuinrakennuksiin. Oppaan tilakohtaiset vähimmäisilmamäärät perustuvat tavanomaiseen asumiseen, henkilömäärään ja niitä vastaaviin epäpuhtaus-, kosteus- ja hajulähteisiin, mutta eivät lämpökuormiin. Asunnoissa vähimmäisvaatimukset ovat, että koko asuinpinta-alan ja jokaisen asuinhuoneen ulkoilmavirta on minimissään  $0,35 \text{ dm}^3\text{/s, m}^2$ , asunnon ulkoilmavirta on minimissään  $18 \text{ dm}^3\text{/s}$  ja kaikissa asuinhuoneissa minimiulkoilmavirta on  $8 \text{ dm}^3\text{/s}$ . Kokonaisulkoilmavirtaan lisätään  $6 \text{ dm}^3\text{/s}$ , jos asunnossa on sauna. (FINVAC 2019, 4–5.)

### **2.3 Energiankulutus ilmanvaihtojärjestelmässä**

Pientalon ilmanvaihtojärjestelmässä energiaa kuluu ilman siirtämiseen tulo- ja poistoilmapuhaltimilla sekä ilmanvaihtoilman lämmittämiseen, jota tapahtuu ilmanvaihtokoneessa ja huonetilassa. Lämmöntalteenotolla (LTO) voidaan kattaa ilmanvaihtokoneessa tapahtuvasta ilman lämmittämisestä noin 50–80 % riippuen lämmöntalteenoton tyypistä. (Heinonen & Vuolle 2016b, 450.)

Nykyisin ilmanvaihdon lämmitykseen tarvittavasta lämpömäärästä 55 % täytyy ottaa poistoilman lämpömäärästä, ellei lämpöenergiatarpeen määrää pienennetä muulla tavalla, kuten parantamalla rakennuksen lämmöneristystä (Tasauslaskentaopas 2018, 42). Myös nestekiertoinen esilämmityspatteri voi olla yksi keino vähentää ilmanvaihdon lämmitysenergiatarvetta (Heinonen & Vuolle 2016b, 450).

Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho (SFP) kuvaa järjestelmän tehokkuutta, ja hyvän SFP-luvun saavuttamiseksi puhaltimien hyvän hyötysuhteen lisäksi kanaviston mitoituksen täytyy olla riittävän väljä. (LVI 30-10529 2013, 1, 3.)

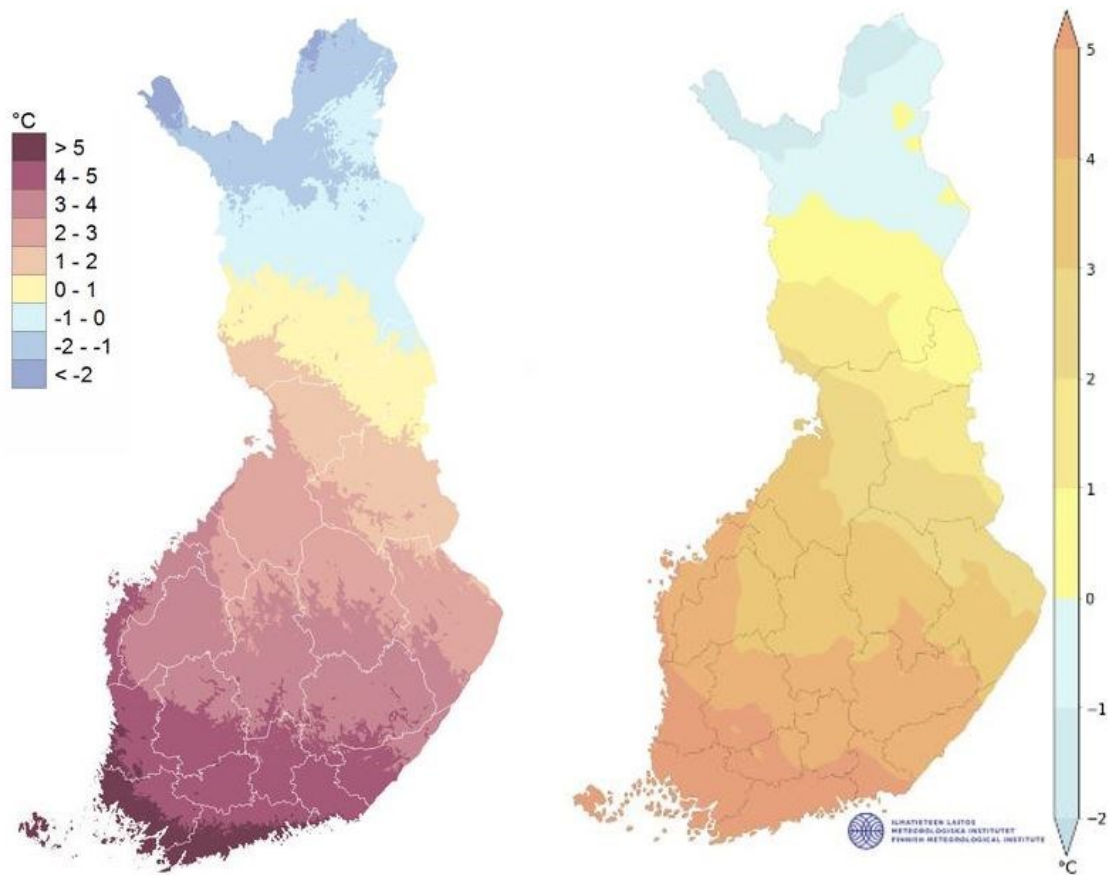
### 3 MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄ

Maalämpö eli geoenergia on auringosta peräisin olevaa maa- ja kallioperän pintaosiin varastoitunutta lämpöenergiaa. Syvemmillä kallioperässä oleva lämpöenergia on pääosin geotermistä energiaa, joka on seurausta pääosin radioaktiivisten aineiden hajoamisesta (Juvonen & Lapinlampi 2013, 7). Geoenergiaa on mahdollista hyödyntää myös vesistöistä. Geoenergiaa on mahdollista hyödyntää Suomessa koko maassa, koska maan pohjoisosissakin maan pinnan lämpötila pysyy plussan puolella. Hyötysuhde Etelä-Suomessa on pohjoista parempi. (GTK 2019.)

Maa- ja kallioperän pintaosien vuotuinen keskilämpötila Suomessa on keskimäärin kaksi astetta korkeampi kuin vastaavalla sijainnilla olevan ilman vuotuinen keskilämpötila. Keskimääräiset pintalämpötilat vaihtelevat maantieteellisen sijainnin mukaisesti ja paikallisestikin lämpötilat voivat vaihdella. Esimerkiksi luonnontilaisten metsien osalta lämpötilat voivat olla useita asteita matalammat rakennettuihin alueisiin verrattuna. Maanpinnan keskilämpötilaan vaikuttaa ilman lämpötila, jolloin maanpinnan keskilämpötila vaihtelee eri vuoden aikoina. Etelä-Suomessa maaperän lämpötila vakiintuu 5–6 °C:een noin 14–15 metrin syvyydessä. Geotermisen energia nostaa lämpötilaa syvemmillä kallioperässä noin 0,5–1 astetta sadan metrin matkalla, joten esimerkiksi eteläisessä Suomessa kallioperän lämpötila on noin 6,5–9 °C 300 metrin syvyydessä. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 7.)

Ilmastollisella vertailukaudella kuvataan lähimenneisyyden sään keskiarvoja ja vaihteluvälejä. Ilmatieteen laitos on ottanut nykyisen ilmastollisen vertailukauden 1991–2020 käyttöön vuonna 2021. Sillä tarkoitetaan 30 vuoden ajanjaksoa, jonka ajalta säätilastojen perusteella se on laadittu. (Ilmatieteenlaitos 2021.)

Vertaamalla keskilämpötiloja uudelta vertailukaudelta edelliseen voimassa olevaan (kuva 1) on Suomen keskilämpötila noussut 0,6 astetta, ja jos vertailu ulotetaan vertailukaudelle 1961–1990, on keskilämpötilan nousu nykyiseen verrattuna noin 1,3 astetta. Eniten muutosta on havaittu joulukuussa ja vähiten kesäkuussa ja lokakuussa. (Ilmatieteenlaitos 2021.)

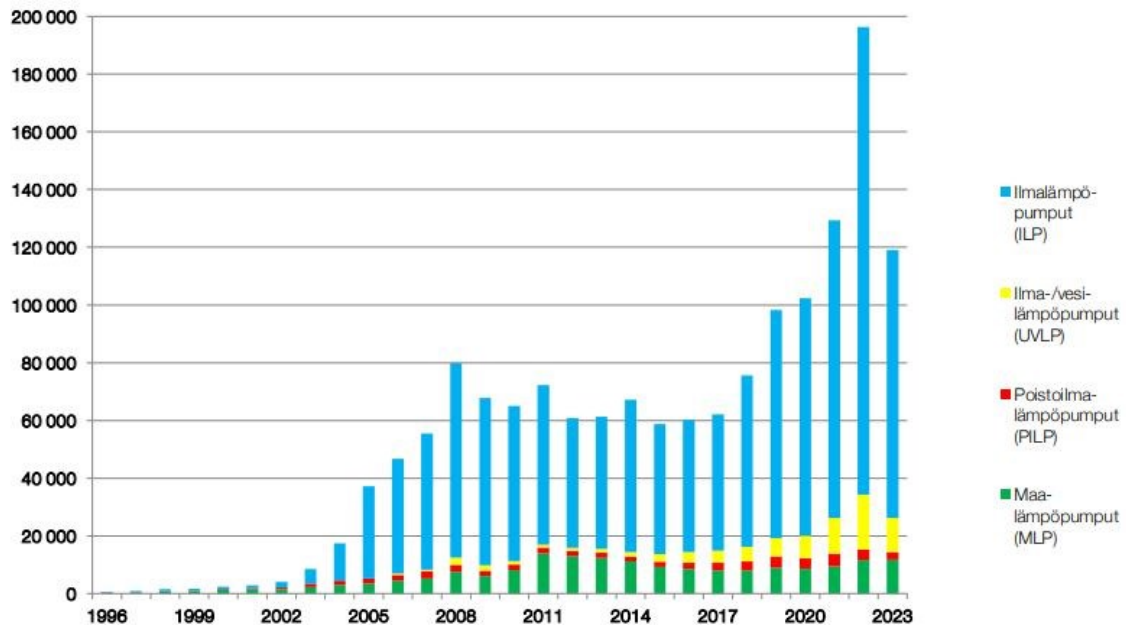


Kuva 1. Ilmatieteen laitoksen ilmastollisen vertailukauden ilman vuotuiset keskilämpötilat Suomessa. Vasen vertailukaudelta 1981–2010 ja oikea vertailukaudelta 1991–2020 (Ilmatieteenlaitos 2021).

1970-luvun energiakriisin seurauksena kiinnostus lämpöpumppuihin heräsi Suomessakin. Suomessa oli jo vuosia aiemmin tekniikasta kiinnostuneiden toimesta rakennettu ensimmäiset lämpöpumput, mutta maalämpöpumpun mahdollisuuksia alettiin tutkimaan Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa ja aluksi selvitettiin vaakasuoralla putkistolla tapahtuvassa lämmönnotossa tietokone-mallinnuksen avulla maaperän käyttäytymistä. (Aittomäki, Hannu & Aalto 2015, 109.)

Maalämpöpumppujen valmistus Suomessa alkoi Lapuan Yleishiomo Oy:n Matti Mäkysen toimesta tuotemerkillä Geotherm. Valmistajia syntyi nopeasti lisää, mutta varsinkin monilla pienillä valmistajilla oli haasteita lämpöpumpun tekniikan kanssa. Lämmönlähteenä ensimmäisen polven maalämpöpumpuissa oli pelkästään maaperään tai vesistön pohjaan sijoitettu vaakaputkisto. Öljyn hinnan laskun seurauksena ja monen pienen valmistajan huonon laadun seurauksena lämpöpumppujen kysyntä romahti, vaikka pientalolämpöpumppujen pienet valmistusmäärätkään eivät mahdollistaneet kunnollista tuotekehitystä. (Aittomäki ym. 2015, 110.)

Vuosituuhannen vaihteessa pientalojen maalämpöpumppujen myynti alkoi kasvamaan nopeasti ja Suomi nousi nopeasti yhdeksi Euroopan kärkimaaksi myytyjen lämpöpumppujen osalta (Aittomäki ym. 2015, 116). SULPUn tilastosta (kuva 2) voidaan todeta, että maalämpöpumppuja on Suomessa myyty ja asennettu vuosittain noin 10000–15000 kappaletta 2010-luvulta lähtien.



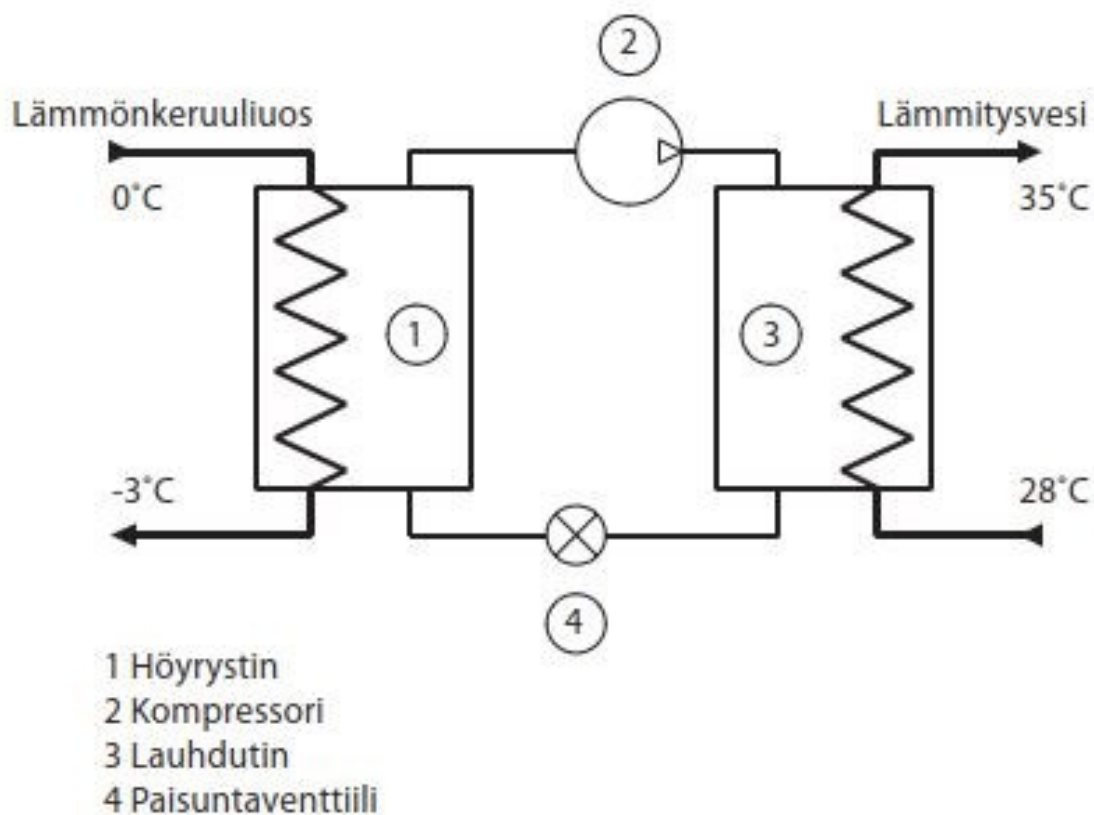
Kuva 2. Myytyt lämpöpumput (kpl) Suomessa vuosittain (SULPU 2023).

### 3.1 Maalämpöpumpun toiminta

Maalämpöpumppu on yhteisnimitys lämmönottotavoista, joiden avulla lämpöä otetaan talteen lämmönkeruuputkistosta, joka on joko kaivettu maahan vaakasuuntaisesti, upotettu vesistöön tai lämpökaivosta, joka on porattu kallioon (Hakala & Kaappola 2022, 230). Maalämpöpumpussa lämpöenergian siirtyminen tapahtuu matalammasta korkeampaan lämpötilaan. Maalämpöpumppu hyödyntää toiminnassaan yleisiä fysikaalisia luonnonilmiöitä, kuten lämpöenergian siirtymistä lämpimästä matalampaan lämpötilatasoon, nestemäisen kylmäaineen höyrystymistä ja lauhtumista sekä lämpöenergiaa, joka vapautuu ja sitoutuu kylmäaineen olomuodon muutoksissa. (LVI 11-10623 2018, 3.)

Maalämpöpumpun toiminta perustuu kylmäkoneistossa (kuva 3) kierrätettävän kylmäaineen höyrystämiseen ja lauhtuttamiseen. Lämmönkeruuputkistossa lämmennyt neste kierrätetään kierto-

vesipumpulla lämpöpumpun höyrystimen läpi. Höyrystimessä kylmäaineen olomuoto muuttuu nesteestä kaasuksi sitoen samalla lämpöä lämmönkeruunesteestä jäädyttäen sitä samalla. Sähkömoottorilla toimiva kompressori imee höyrystimeltä tulevaa kaasumaista kylmäainetta puristaen sitä korkeampaan paineeseen. Puristuksen aikana kaasumaisen kylmäaineen lämpötila kasvaa ja kompressori painaa kylmäainehöyryn lauhduttimelle. Lauhduttimessa kylmäainehöyryn lämpö siirtyy nesteeseen, kiertovesipumpulla kierrätettävään lämmitysveteen, jolloin kylmäaine lauhtuu eli olomuoto muuttuu jälleen nestemäiseksi. Lauhduttimelta nestemäinen kylmäaine johdetaan paisuntaventtiilille, joka annostelee sopivasti kylmäainetta höyrystimelle. (Hakala & Kaappola 2022, 230.)



Kuva 3. Maalämpöpumpun kylmäpiirin pääosat (LVI 11-10623 2018, 3).

Yleinen pientalojen maalämpöpumpun toimintaperiaate on vaihtelevalla lauhdutuksella toimiva lämpöpumppu, jossa vaihtoventtiilin avulla lauhduttimelta tuleva lämmitysvesi ohjataan käyttöveden lämmitykseen tai rakennuksen lämmitysverkoston lämmitykseen (LVI 11-10623 2018, 4). Lämpöpumpun lämpökerroin (COP) kuvaa hyötysuhdetta, joka saadaan jakamalla tuotetun lämmön määrä tuottoon käytetyllä sähkön määrällä. Lämpökerroin voidaan ilmoittaa pelkälle kompressorille

tai koko lämpöpumpulle ja on hyvä varmistua, kummasta on kyse ja missä olosuhteissa se ilmoitetaan. (Hakala & Kaappola 2022, 230.)

Valmistajat ilmoittavat yleensä koko lämmityskauden hyötysuhteen (SCOP), joka standardin EN 14825 mukaisesti ilmoitetaan Pohjois-Euroopassa Helsingin ilmasto-olosuhteiden mukaan. SCOP on vertailukelpoisempi arvo valmistajia vertaillessa, mutta on muistettava mille ilmastovyöhykkeelle laskelma on tehty. (Suutari.)

Kylmäaineina maalämpöpumpuissa on tällä hetkellä käytössä esimerkiksi R407C, R134A ja R410A, joista erityisesti R407C on ollut suosittu kylmäaine maalämpöpumpuissa (Hakala & Kaappola 2022, 232). Tulevaisuudessa maalämpöpumppujen kylmäaineet tulevat kokemaan uudistuksia 11.3.2024 voimaan astuneen EU:n F-kaasuasetuksen vuoksi (Ympäristöministeriö 2024).

### **3.2 Lämmönkeruuputkistot**

Keruuputkisto on tavallisesti muovista vesijohtoa tai se voi olla myös pelkästään keruuputkeksi rakennettu muovituote. Keruuputkistolle ei ole erityisiä vaatimuksia paineluokan ja materiaalin suhteen. Lämmönkeruunesteenä on tavallisesti sekoitussuhteeltaan noin 30 p-%:n vesi-etanoliliuos, jota voidaan käyttää vielä -17 °C:n lämpötilassa, koska lämmönkeruujärjestelmän lämpötila voi laskea 0 °C:n alapuolelle. Muita mahdollisia lämmönkeruuliukuksia on esimerkiksi etyleeniglykoli tai propyleeniglykoli. (LVI 11-10623 2018, 6.)

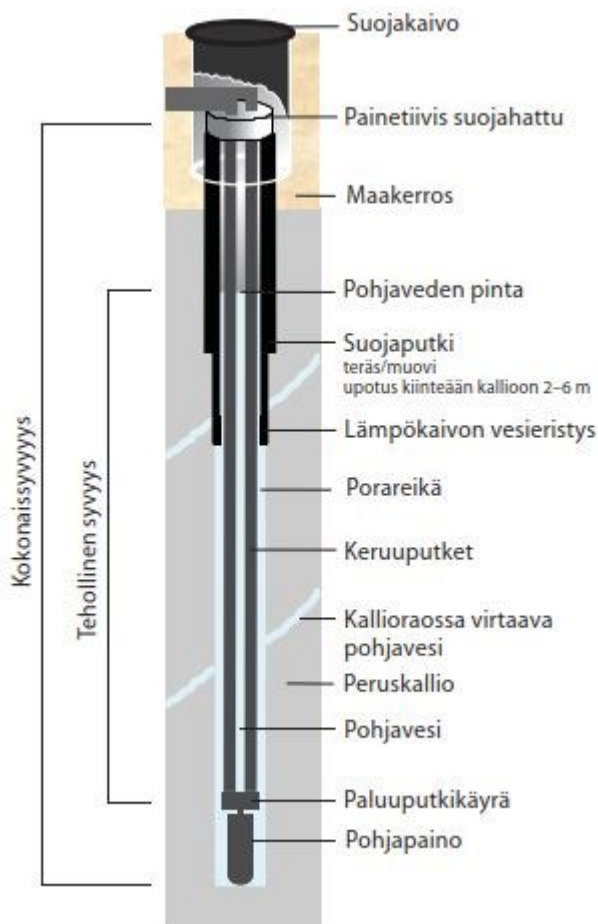
Lämmönlähteenä maalämpöpumpulle voidaan käyttää pintamaaputkistoa, vesistöputkistoa tai energiakaivoa. Pintamaaputkistossa putkisto kaivetaan maahan noin metrin syvyyteen ja putkilenkien välinä käytetään 1,5 metriä. Pintamaaputkistolla on mahdollista kerätä lämpöenergiaa savi- maasta 30–60 kWh/m ja hiekkamaasta 10–40 kWh/m riippuen sijainnista. Vesistöputkistolla on mahdollista kerätä lämpöenergiaa 70–80 kWh/m putkea. Putket asennetaan vesistön pohjaan ja pohjassa pysyminen varmistetaan putkipainojen avulla. Vesistöputkisto täytyy saada koko matkaltaan routarajan alle, joten jyrkkärantaiseen vesistöön järjestelmä on helpompi toteuttaa. (LVI 11-10332 2002, 3–4.)

Energiakaivo mahtuu pienellekin tontille, ja se on yleisin lämmönlähde pientalojen maalämpöjärjestelmissä. Energiakaivossa kallioon porattuun porareikään asennettu keruuputkisto siirtää läm-



pöä lämmitysjärjestelmälle, joka on varastoituneena kallioon ja pohjaveteen. Energiakaivon hankintakulu on suurempi pintamaaputkistoon verrattuna, mutta sillä saadaan enemmän kerättyä energiaa putkimetriä kohden, kaivuutyöt jäävät vähäisemmiksi ja se mahdollistaa jäädytyksen. Yleisin lämmönkeruuputki energiakaivoissa on U-putkikollektori, jossa meno- ja paluuputken yhdistää pohjapainolla varustettu paluuputkikäyrä. Kollektori voi olla sileää putkea tai sisäpinnasta rihlattua putkea, jonka tarkoitus on parantaa lämmönkeruuta. (LVI 11-10623 2018, 6–7.)

Maalämpökaivojen syvyys vaihtelee 120–300 metrin välillä, ja porareikien lukumäärän määrittelee rakennuksen energiantarve. Suomessa porareikien halkaisija kalliossa on yleensä 105–165 mm. Maaosuudelle asennetaan suojaputki, jota upotetaan kallioon 2–6 metriä. Lisäksi suojaputken ja kallion välinen liitos vesieristetään. Porareikä (kuva 4) täyttyy tai täytetään vedellä, jolloin porareikän tehollinen syvyys alkaa siitä pinnasta, mihin vesipinta asettuu. Mikäli vedenpinta jää kauaksi porakaivon pinnasta, voidaan porareikää täyttää bentoniitilla, joka parantaa lämmön siirtymistä. (Juvenen & Lapinlampi 2013, 33.)



Kuva 4. Energiakaivon rakenne (LVI 11-10623 2018,7).

### 3.3 Maalämpökaivon mitoitus

Suomessa maaperän pintaosien lämmönvaihtelu eri vuodenaikoina ulottuu 10–15 m:n syvyyteen maanpinnan keskilämpötilan ollessa 2 °C korkeampi kuin vyöhykkeen ilman keskilämpötila. Syvemmällä lämpötila ei muutu vuodenaikojen mukaan ja lämpötila nousee geotermisen gradientin eli asteen verran 100 metrin välein syvemmälle mentäessä, ellei lämpötasapainoa häiritä. Geotermisen lämpövuon on noin 0,03–0,05 W/m<sup>2</sup>, jolloin hehtaarin alueelta energiakaivon kohdistuu ai-noastaan 500 W:n teho geotermisen lämpövuon kautta. Käytännössä lämpökaivon toiminta perus-tuu auringon lämpöön ja ympäröivän maaperän lämpökapasiteettiin. (Silvan, Kauppila & Kaappola 2016a, 270–271.)

Käytännössä maaperän lämpötila voidaan arvioida tai mitata riittävällä tarkkuudella. Lämpötekni-sen ominaisuuksien arviointi on hankalampaa. Suomessa esiintyvien kivilajien lämmönjohtavuuk-sien vaihteluväli (taulukko 2) on noin 2–6 W/km tyypillisen vaihteluvälin ollessa 2,5–3,5 W/Km vä-lillä. Irtomaalajit ovat noin 1–1,5 W/Km lämmönjohtavuudeltaan riippuen maalajin vesipitoisuu-desta. Energiakaivon irtomaasuudella on noin kolmasosan lämmönsiirtokyky kallioperään verrat-tuna, joten se voidaan muuttaa helposti teholliseksi porareian pituudeksi. Irtomaan kosteudella on olennainen vaikutus lämmönsiirtoon. Irtomaa on myös heikompi lämmönsiirtokyvyltään, kun siihen puretaan lämpöä johtuen ympäristöönsä lämpimämmän putken kuivausvaikutuksesta, joka heiken-tää lämmönjohtavuutta. (Silvan ym. 2016a, 271, 275.)

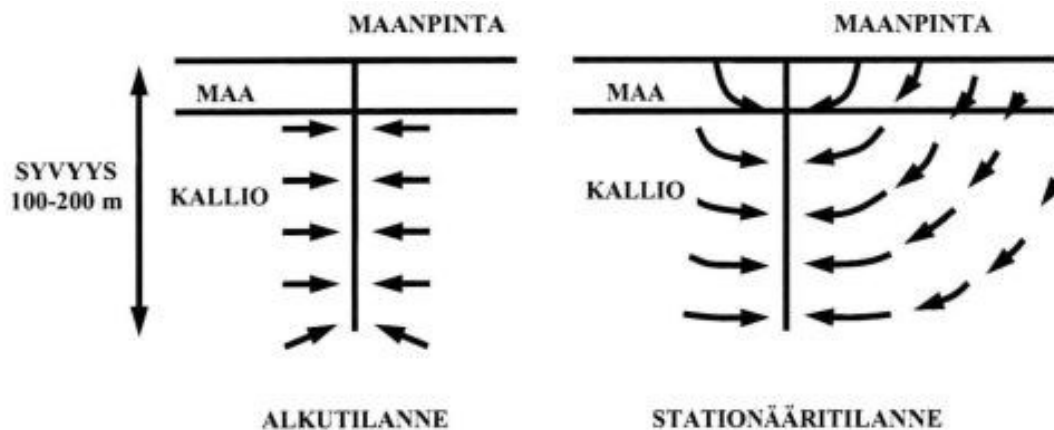
Taulukko 1. Yleisimpien kalliolajien lämmönjohtavuudet (Huusko 2014, 9).

Kivilaji	Mitattu lämmönjohtavuus W/mK	Tyypillinen kirja-arvo W/mK
Graniitti	2,9–4,2	3,24
Granodioriitti	2,6–4,1	3,17
Kiilleliuske	2,3–3,5	2,86
Kiillegneissi	2,9–3,5	3,01
Dioriitti	3,2–3,3	3,43
Kvartsimaasälpagneissi	3,5–4,0	3,59
Kalkkikivi	1,7–3,0	2,5
Kvartsiitti	5,0–7,0	5,52
Saviliuske, -kivi	1,7–3,4	2,4

Hyödynnettävissä oleva lämpöenergian määrä on myös riippuvainen pohjaveden virtauksista, joita ei voida etukäteen arvioida luotettavasti kallion rakoilun vaihdellessa pienelläkin alueella hyvin paljon. Lämpökaivon ympärillä lämpötilakenttä saavuttaa lopullisen tasonsa vasta vuosien kuluessa, ja mahdollinen hyödynnettävissä oleva lämpöenergian määrä on noin 80–150 kWh:a lämpökaivo-metrille. Lämmönkeruuputken liuosvirtauksen tulee olla turbulenttia tehokkaan lämmönsiirron saavuttamiseksi. (Aittomäki 2012, 352.)

Maksimaalisena jatkuvana tehokuormana voidaan yleensä käyttää 25–30 W tehollista porakaivo-metriä kohden. Myös suurempia hetkellisiä kuormia on mahdollista ottaa, kun järjestelmä on varustettu automatiikalla, joka estää energiakaivon jäätyksen. (Silvan ym. 2016a, 277.)

Lämmönotto aiheuttaa lämpötilan laskua lämpökaivossa. Ensimmäisen lämmönottopäivän aikana tapahtuu kolmasosa ja seuraavan kahden kuukauden aikana kaksi kolmasosaa alkuperäiseen lämpötilaan eli stationääritilanteeseen verrattuna. Viiden käyttövuoden jälkeen lämpötilan muutosta ei enää juurikaan tapahdu. Aluksi lämmönotto aiheuttaa lämpövirran kaivon ja ympäröivän kallion välille (kuva 5), jolloin lämpöä siirtyy ympäröivästä kalliosta. Pitemmälle lämmönottossa mentäessä yhä suurempi osa lämmöstä on peräisin maanpinnalta. (Leppäharju 2008, 26.)



Kuva 5. Lämpökaivon latautuminen. Lämmönoton edetessä yhä suurempi osa lämmöstä tulee maanpinnalta. (Leppäharju 2008, 26.)

Maalämpöpumppujen toimittajilla on myös omia mitoitusohjelmia ja mitoitusohjeita laitteiden mitoittamiseen, joita ei tule ylittää mitoituksia tehdessä. Esimerkiksi NIBE ilmoittaa oppaassaan säävyöhykkeittäin maksimiarvot lämmönlähteiden energian- ja tehonotolle laitetyypeittäin. Esimerkiksi

vyöhykkeelle 3 asennettavan invertterimaalämpöpumpun (F1155/F1255) maksimienergianotto on 120 kWh/m ja maksimitehonotto on 30 W/m teholliselle porakaivometrille. (NIBE, 20.)

Maalämpökaivoja on mahdollista hyödyntää myös rakennuksien jäähdyttämiseen. Jäähdytyksestä lämpökaivoon siirrettävä lämpö auttaa maaperän lämpötilaa palautumaan eli lämpötase tasapainottuu. Jäähdytystä voi jopa suositella, koska se mahdollistaa energiakentän pitkäaikaisen käytön. Etelä-Suomessa on erityisesti huomioitava, että energiakaivon lämpötila palautuu nopeasti talven jälkeen tasapainolämpötilaan, noin 8 °C:een, jolloin liuoksen keskilämpötila voi nousta liian korkeaksi, jos jäähdytystehon tarve on suuri. Energiakaivosta jäähdytystehoa voi saada 20–30 W/m lämpökaivoa. (Silvan ym. 2016a, 277.)

### **3.4 Maalämpökaivon optimointi**

Energiakaivojärjestelmä tulisi mitoittaa siten, että järjestelmä voi toimia rakenteellisen eliniän eli noin 50–100 vuoden ajan. Jotta se on mahdollista, täytyy energiakaivon tai -kaivojen pitkäaikaisen lämpötilan lämpötilatrendin olla hallinnassa saman aikajakson. (Silvan ym. 2016a, 275.)

Pienten kohteiden yksittäiset kaivot mitoitetaan yleensä toimittajien ohjelmilla. Mikäli tarvitaan useita kaivoja eli energiakenttä, on niiden tarkempaa mitoittamista varten tarpeellista tehdä TRT-mittaus (Thermal Response Test) eli terminen vastetestti, joka tehdään yhteen testikaivoon suunnitellulla energiakentällä. TRT-mittauksessa saadaan mitattua kallioperän tehollinen lämmönjohtavuus, peruskallion häiriötön keskilämpötila, pohjaveden virtaus sekä lämpövastus porareissä. Porareian lämpövastuksen suuruus määrittää energiansiirtymisen kallion, porareian, keruuputkiston ja keruunesteen välillä. TRT-mittauksen avulla vältetään virheellisiltä energiakenttien mitoituksilta, kun suoritetaan kentän optimoinnit tulosten perusteella. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 31.)

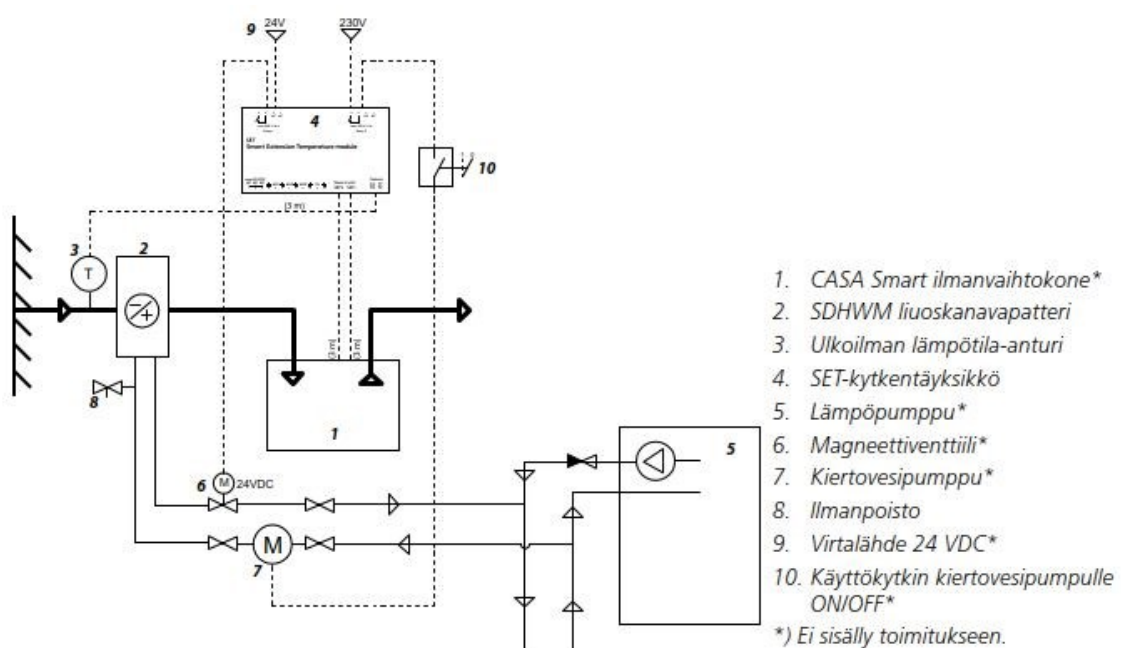
Maalämpökaivojen toimintaa voidaan simuloida myös simulointiohjelmilla. Earth Energy Designer (EED) on tietokoneohjelma, jolla suunnitellaan pystysuuntaisia porakaivoja tai energiavarastoja. EED:llä on mahdollista mallintaa 1–1200 porareian kohteita, ja vuotuiset peruskuormat voivat vaihdella muutaman MWh:n energiamäärästä usean TWh:n energiamääriin. Se pystyy käsittelemään tuntikohtaiset kuormitukset lämmityksen, jäähdytyksen ja käyttöveden lämmityksen osalta. Mallinuksen avulla voidaan nähdä esimerkiksi keruunesteen lämpötilan kehitys jopa sadan vuoden ajalta. (Blocon.)

## 4 ESILÄMMITYS JA VIILENNYS KANAVAPATTERILLA

Ulkoilman esilämmityksen avulla voidaan parantaa lämmöntalteenoton huurteensulatuksen toimintaa. Jäätymisvaaran takia se on useimmiten sähköllä toimiva lämmityspatteri. Maalämmön yhteydessä olevaa lämmönkeruuputkistoa on myös mahdollista hyödyntää esilämmitykseen. (Mäkinen ym. 2016a, 159.)

Tässä työssä esilämmityksellä tarkoitetaan ulkoilman lämmittämistä nestekiertoisella kanavapatterilla, jonka lämpö otetaan maalämmön keruupiiristä. Samalla kanavapatterilla voidaan myös viilennää ilmaa kesällä.

Esilämmityspatteri kytketään ulkoilmakanavaan (kuva 6). Ulkoilmakanavassa ennen kanavapatteria tulee olla karkeasuodatin. Kanavapatterin toiminnan ohjaus tapahtuu yleensä ilmanvaihtokoneen omalla ohjaimella. Putkiliitännät tehdään valmistajan ohjeen tai LVI-suunnitelman mukaan. (Swegon 2019, 3.4.)



Kuva 6. Swegon Casa liuospatterin kytkentä (Swegon 2019, 4).

Kanavapatteri lisää ulkoilmakanavan painehäviötä, jolloin sillä on hieman vaikutusta myös ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehoon (Heinonen & Vuolle 2016b, 454). Tuloilman puhallin ottaa siten hieman enemmän sähkötehoa ja se täytyy huomioida laskettaessa energiankulutuksia.

#### **4.1 Ulkoilman esilämmitys**

Ilmanvaihtoilman lämmittämistä tapahtuu lämmöntalteenotossa, ilmanvaihtokoneen tuloilman lämmityspatterissa sekä tilassa, johon tuloilmaa johdetaan. Tuloilman lämmityspatterissa, joka voi olla sähköinen tai vesikiertoinen, tapahtuvaa lämmitysenergiaa voidaan vähentää, mikäli ilmaa lämmitetään maalämpöpiiriin kytketyllä esilämmityspatterilla ennen lämmöntalteenottoa. (Heinonen & Vuolle 2016b, 448–450.)

Esilämmityspatteria lämmityskäytössä on mahdollista hyödyntää, kun ulkoilman lämpötila on matalampi kuin patterille tulevan liuoksen lämpötila. Tutkimuksen kohdetalon sisään tulevan lämmönkeruuliuoksen keskilämpötila on ollut 1.1.2024–10.4.2024 välisenä aikana 1,1 astetta, kun on huomioitu alle 3,5 °C:n mittaukselliset. Energiakaivosta tulevan liuoksen keskilämpötilan voisi olettaa olevan noin 2–3 °C. Kohteessa on samaan aikaan ollut esilämmityspatteri käytössä. Lämpöä siirtäessä menetetään 1–2 astetta verkostojen välillä (Silvan ym. 2016a, 277). Tästä voidaan vetää johtopäätös, että lämmönsiirto voisi olla mahdollista, kun ilman lämpötila ennen kanavapatteria on 0 °C tai vähemmän.

##### **4.1.1 Esilämmityksen vaikutuksen arviointi jälkilämmitystarpeeseen**

Esilämmityspatterin tarkoituksena on siis vähentää ilmanvaihtokoneen jälkilämmityspatterin käyttämää energiamäärää. Pientalojen ilmanvaihtokoneiden jälkilämmitys on toteutettu yleensä sähkövastuksella, jolloin porakaivon lämpöä hyödyntämällä ulkoilman lämmittämiseen on mahdollista saada säästöjä. Toki hyöty on riippuvainen monesta asiasta, kuten lämmöntalteenoton hyötysuhteesta, ulospuhallusilman lämpötilasta ja säävyöhykkeestä, jolla rakennus sijaitsee. Mikäli valmistaja ei anna ilmanvaihtokoneelle ulospuhallusilman minimilämpötilaa, voidaan asuinrakennuksissa käyttää levylämmönsiirtimille +5°C:n lämpötilaa ja pyöriville lämmönsiirtimille ja kosteutta siirtäville levylämmönsiirtimille 0°C:n lämpötilaa (Heinonen & Vuolle 2016, 451).

Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihdossa sisään puhallettavaa ilmaa lämmitetään aiemmin todetun mukaisesti ilmanvaihtokoneessa ja tilassa, johon ilma puhalletaan. Sisään puhallettavan ilman lämpötilaan vaikuttavat ulkolämpötila, lämmöntalteenoton hyötysuhde ja jälkilämmityspatterin toiminta. Yksinkertaisessa laskennassa tuloilman lämpötilana ( $T_{sp}$ ) voidaan käyttää 18 °C:n lämpötilaa. (Heinonen & Vuolle 2016, 449.)

Tuloilman lämpötilahyötysuhde ja poistoilman lämpötilahyötysuhde kuvaavat Lämmöntalteenotto-laitteen kykyä ottaa lämpöä talteen poistoilmasta. Yleensä laskennassa hyödynnetään valmistajan ilmoittamaa tuloilman lämpötilahyötysuhdetta, joka on määritetty EN 308:1997 mukaan samansuuruisilla tulo- ja poistoilman massavirroilla. Tuloilman lämpötilahyötysuhde  $\eta_t$  lasketaan kaavalla 1. (Tasauslaskentaopas 2018, 50.)

$$\eta_t = \frac{T_{LTO} - T_u}{T_s - T_u} \quad (\text{Kaava 1})$$

Kaavassa 1  $T_{LTO}$  on tuloilman lämpötila lämmön talteenoton jälkeen (°C),  $T_u$  on ulkoilman lämpötila (°C) ja  $T_s$  on sisäilman lämpötila / poistoilman lämpötila (°C).

Poistoilman lämpötilahyötysuhdetta  $\eta_p$  hyödynnetään jäätymisen eston säätämiseen poistopuolella, ja se lasketaan kaavalla 2 (Tasauslaskentaopas 2018, 50).

$$\eta_p = \frac{T_s - T_{up}}{T_s - T_u} \quad (\text{Kaava 2})$$

Kaavassa 2  $T_{up}$  on ulospuhallusilman lämpötila (°C).

Tulo- ja poistoilmavirran suhde lämmöntalteenoton läpi  $R_{LTO}$  lasketaan kaavalla 3 (Tasauslaskentaopas 2018, 51).

$$R_{LTO} = \frac{q_{tLTO}}{q_{pLTO}} = \frac{\eta_p}{\eta_t} \quad (\text{Kaava 3})$$

Kaavassa 3  $q_{tLTO}$  on lämmöntalteenoton läpi kulkeva tuloilmavirta ( $m^3/s$ ) ja  $q_{pLTO}$  on lämmöntalteenoton läpi kulkeva poistoilmavirta ( $m^3/s$ ).

Jos tuloilman lämpötilahyötysuhde on ilmoitettu epäsuhteisilla ilmavirroilla, lasketaan poistoilman lämpötilasuhde hyödyntämällä kaavaa 3. Tuloilman lämpötilahyötysuhde  $\eta_{t(RLTO)}$  samansuuruisilla

ilmavirroilla epäsuhteisilla ilmavirroilla ilmoitetusta lämpötilahyötysuhteesta lasketaan kaavalla 4. (Tasauslaskentaopas 2018, 51.)

$$\eta_{t(R_{LTO})} = \frac{2}{(1+R_{LTO})} \eta_{t(R_{LTO}-1)} \quad (\text{Kaava 4})$$

Kaavassa 4  $\eta_{t(R_{LTO}-1)}$  on lämmöntalteenoton tuloilman vuosihyötysuhde samansuuruisilla ilmavirroilla.

Ilmanvaihdon lämmitysenergiatarve lämmityskaudella  $Q_{IV}$  (kWh) lasketaan lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen määrittämistä varten kaavalla 5 (Tasauslaskentaopas 2018, 52).

$$Q_{IV} = c_{pi} \rho_i q_{v,poisto} (T_s - T_u) \Delta_t \quad (\text{Kaava 5})$$

Kaavassa 5  $c_{pi}$  on ilman ominaislämpökapasiteetti (1,006 kJ/(kg, K)),  $\rho_i$  on ilman tiheys (1,2 kg/m<sup>3</sup>),  $q_{v, poisto}$  on lämmöntalteenoton piiriin kuuluva poistoilmavirta (m<sup>3</sup>/s) ja  $\Delta_t$  on aikajakso, jolla lämpötilaero esiintyy (h).

Lämmityskaudella poistoilmavirrasta talteen otettu lämpöenergia  $Q_{LTO}$  (kWh) voidaan esittää tuloilman lämmitysenergiana, ja se lasketaan kaavalla 6 (Tasauslaskentaopas 2018, 56).

$$Q_{LTO} = c_{pi} \rho_i q_{v,tulo} (T_{LTO} - T_u) \Delta_t \quad (\text{Kaava 6})$$

Kaavassa 6  $q_{v, tulo}$  on lämmöntalteenoton läpi kulkeva tuloilmavirta (m<sup>3</sup>/s).

Yhdistelemällä ja muokkaamalla kaavoja 1, 2 ja 3 saadaan ratkaistua tuloilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen  $T_{LTO}$  (°C) kaavalla 7.

$$T_{LTO} = T_u + \frac{1}{R_{LTO}} (T_s - T_{up}) \quad (\text{Kaava 7})$$

Kaavaa 2 muuttamalla saadaan ratkaistua ulospuhallettavan ilman  $T_{up}$  (°C) lämpötila kaavalla 8.

$$T_{up} = T_s - \eta_p (T_p - T_u) \quad (\text{Kaava 8})$$

Vakioilmavirtaisessa ilmanvaihtojärjestelmässä, jossa ilmankäsittelyprosessi pitää sisällään vain ilman lämmittämistä, voidaan ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarve  $Q_{LP}$  (kWh) laskea kaavalla



9. Ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarpeella tarkoitetaan ilmanvaihtokoneessa tapahtuvaa tuloilman lämmittämistä. Jos kaavalla 9 lasketusta lukuarvosta tulee negatiivinen, käytetään arvona nollaa. (Ympäristöministeriö 2018, 23.)

$$Q_{LP} = q_{v,tulo} \rho_i c_{pi} ((T_{sp} - \Delta T_{puhalli}) - T_{LTO}) \Delta t \quad (\text{Kaava 9})$$

Kaavassa 9  $T_{sp}$  on tuloilman sisäänpuhalluslämpötila (°C) ja  $\Delta T_{puhallin}$  on lämpötilan nousu puhaltimessa (°C).

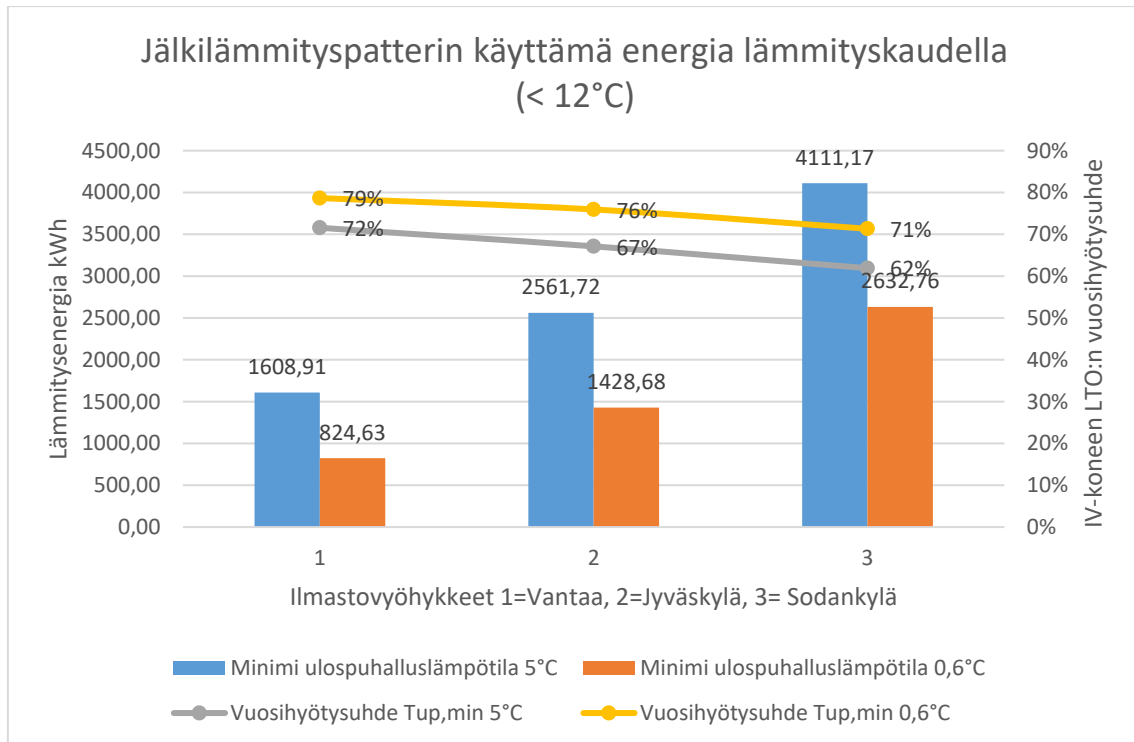
Ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton hyötysuhde  $\eta_{a, iv-kone}$  lasketaan kaavalla 10 (Tasauslaskentaopas 2018, 58).

$$\eta_{a, iv-kone} = \frac{Q_{LTO}}{Q_{iv}} \quad (\text{Kaava 10})$$

Ilmatieteenlaitoksen energialaskennan testivuosi 2020 (TRY 2020) on kehitetty vastaamaan nykyistä ilmastoa, kun lasketaan rakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergiankulutusta. Testivuosiaineistoista on saatavilla tuntikohtaiset säätiedot laskentaa varten. Lisäksi samasta palvelusta löytyvät tulevaisuuden ilmastoa kuvaavat testivuodet, joiden avulla on mahdollista arvioida energiantarpeen muuttumista tällä vuosisadalla. (Ilmatieteenlaitos 2020.)

Esimerkkilaskelmissa on käytetty TRY 2020 -energiatieteen testivuoden tuntikohtaisia ulkolämpötiloja. Esimerkkilaskelmissa tuloilman lämpötilasuhteena on käytetty 83 %, joka on saatu Swecon ProCASA v9.0-mitoitusohjelmalla esimerkkimitoituksesta. Muut laskennassa käytetyt arvot ovat tulo- ja poistoilmavirta 75 dm<sup>3</sup>/s, tuloilman sisäänpuhalluslämpötila 18 °C, ulospuhallusilman minimilämpötilana 5 °C ja 0,6 °C sekä sisälämpötilana 21 °C. 0,6 °C on valmistajan mitoituksessaan antama minimilämpötila ulospuhallusilmalle jäätymissuojauksessa. Jos ulospuhalluksen minimilämpötila ei ole tiedossa, käytetään silloin arvoa 5 °C. Ilman ominaisuudet on oletettu vakioiksi.

Jälkilämmityspatterin käyttämää sähköenergian kulutusta on mahdollisuutta vähentää esilämmityspatterin avulla. Kaaviossa 1 on laskettu kaavoja 1–10 hyödyntäen ilmanvaihtokoneen jälkilämmityspatterin tarvitsema energia ja lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde lämmityskaudella säävyöhykkeille 1, 3 ja 4, kun ulkolämpötila on 12°C tai alle.

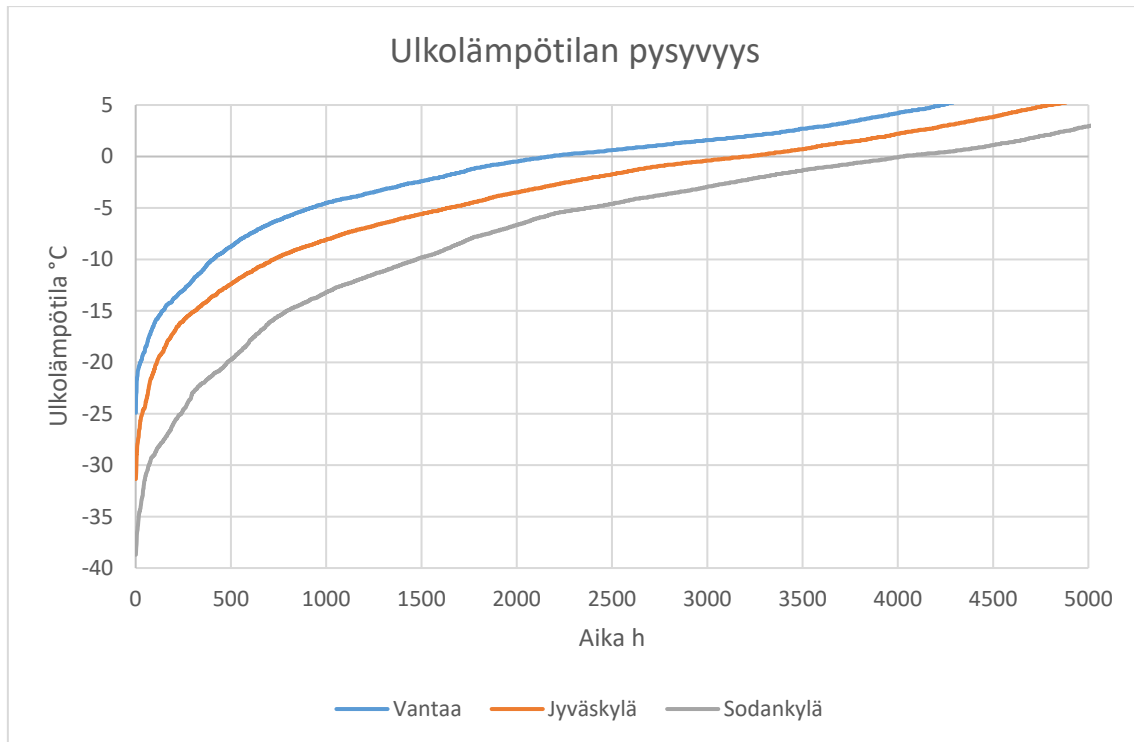


*Kaavio 1. Ilmanvaihtokoneen jälkilämmityspatterin kuluttama energia lämmityskaudella ja vuosihyötysuhde tuntikohtaisen säädätin perusteella.*

Kaaviosta 1 voidaan todeta, että ulospuhallusilman minimilämpötilalla on laskennallisesti merkittävä vaikutus ilmanvaihtokoneen vuosihyötysuhteeseen ja sitä kautta jälkilämmityksen käyttämään energiankulutukseen. Liuoskiertoisella esilämmityspatterilla on tarkoitus vähentää juuri jälkilämmitysvastuksen käyttämää sähköenergiaa. Mikäli esilämmityspatterilla saataisiin vähennettyä jälkilämmityspatterin käyttämää sähköenergiaa 50 %, joka on melko varovainen arvio, tarkoittaisi se vuositasolla noin 400–1300 kWh:n energiansäästöä esimerkin mukaisella ilmanvaihtokoneella. 0,18 €/kWh energianhinnalla se tarkoittaisi 72–234 euron säästöä vuositasolla, mikä vaikuttaa tässä vaiheessa hyvin maltilliselta säästöltä.

Pyörivällä lämmöntalteenotolla varustetussa ilmanvaihtojärjestelmässä, joka sallisi hyvin matalan ulospuhalluslämpötilan ilman lämmöntalteenoton jäätymisvaaraa, saattaisi esilämmitysjärjestelmästä saatava hyöty jäädä hyvin pieneksi. Esilämmitysjärjestelmän järkevyyttä on arvioitava aina tilannekohtaisesti.

Liuksen pumppaaminen kuluttaa myös sähköä, mikä täytyy huomioida järjestelmän kannattavuutta arvioitaessa. Kaaviossa 2 on säävyöhykkeittäin pysyvyysskäyrä ulkolämpötiloille, josta voi arvioida pumppaukseen käytettyä aikaa.



Kaavio 2. Ulkolämpötilan pysyvyyskäyrä.

Jyväskylän säävyöhykkeellä alle  $-5^{\circ}\text{C}$ :n ulkolämpötiloja on keskimäärin noin 1650 tuntia ja alle  $0^{\circ}\text{C}$ :n ulkolämpötiloja noin 3200 tuntia. Näiden perusteella 80 wattia käyttävä kiertovesipumppu kuluttaisi 132–256 kWh sähköä eli noin 24–46 euroa vuodessa.

## 4.2 Viilennys ja jäähdytys

Pientalon jäähdytystehontarpeeseen vaikuttavat talon muoto, sisäiset lämpökuormat, rakenteet, tontin ominaisuudet ja auringon säteily ikkunoista (Talotekniikka info 2021). Lämpökuormat voivat lisätä tilan tuntuva lämpötehoa, eli tilassa on tarvetta vain kuivalämpötilan laskulle. Lämpökuorma voi lisätä myös kosteuskuormaa, jolloin myös kosteutta täytyy poistaa sisäilmasta. Jäähdytysteho on tuntevan jäähdytystehon ja kosteuden poistoon kuluvan jäähdytystehon summa. (Mentula 2012, 321.)

Kun ilmaa jäähdytetään, ilmankosteus pienenee, jolloin ilman lämpötuntemus on kosteaan ilmaan verrattuna parempi. Ilmaa voi viilentää lämpöpumpulla, joka voi olla ilmanvaihtokoneessa tai se voi

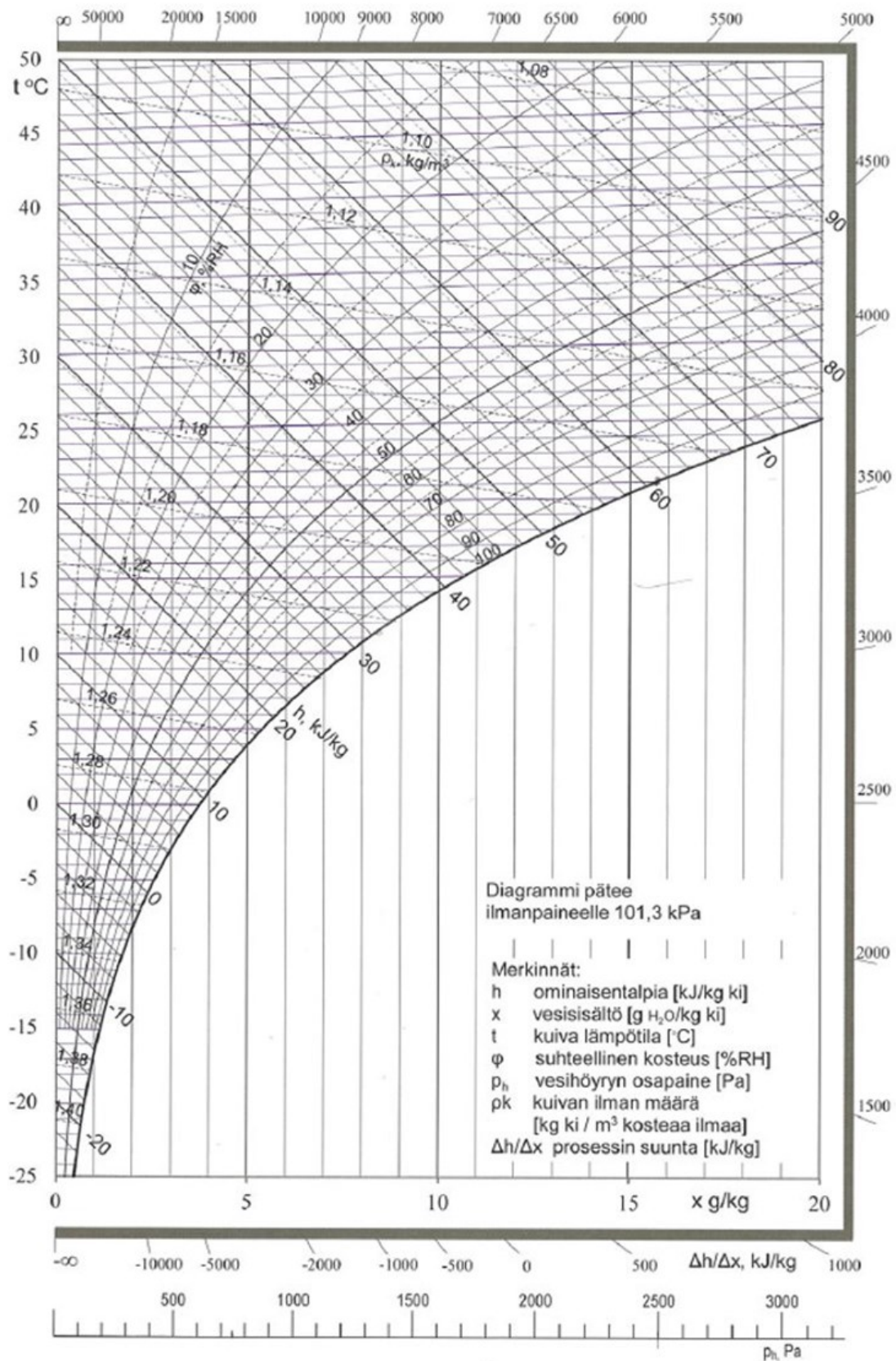
olla huoneyksikkö (Ilmalämpöpumppu). Maalämpöjärjestelmän yhteydessä keruuliuosta voi hyödyntää esimerkiksi viilennyspatterin tai puhallinkonvektorin avulla. Rakennuksen viilennyksen suunnittelussa on järkevää huolehtia myös auringon suojauksesta. (Talotekniikkainfo 2021.)

#### 4.2.1 Kostean ilman Mollier-diagrammi

Sisä- ja ulkoilman kosteudesta puhuttaessa käytetään yleensä suhteellista kosteutta (% RH), mutta ilmastointiteknikan laskelmissa käytetään yleensä absoluuttista kosteutta (g/kg), koska sen avulla on helpompi ymmärtää esimerkiksi, milloin kosteutta tiivistyy ilmasta. Näitä tarkastellaan kostean ilman Mollier-diagrammin (kuva 7, seuraava sivu) eli h-x-piirroksen avulla. (Sandberg 2016a, 81.)

Vaaka-asteikolla pystysuorilla viivoilla on ilman absoluuttinen kosteus  $x$  (g/kg), joka ilmaisee ilman vesihöyryn määrän kuivassa ilmakilossa. Pystyasteikolla vaakasuorilla viivoilla on ilman kuiva lämpötila  $t$  (°C), eli tavallisen lämpömittarin näyttämä lukema. Vainoasteikolla on ilman lämpösisältö eli entalpia  $h$  (kJ/kg). Alimmalla vaaka-asteikolla pystysuorilla viivoilla on vesihöyryn osapaineen  $p_h$  (Pa) asteikko. Suhteellisen kosteuden  $\varphi$  (%) käyrät kulkevat eksponentiaalisesti käyrästöllä. Kylästyskäyrältä (RH 100 %) voidaan lukea tietyssä tilassa olevan ilman kastepistelämpötila. (Sandberg 2016a, 85.)

Esimerkiksi, jos ilman kuiva lämpötila  $t$  on 25 °C ja suhteellinen kosteus  $\varphi$  on 40 %, voidaan pystysuoraan alaspäin mennä kylästyskäyrälle, jonka kohdalta voidaan lukea kastepistelämpötila asteikolta  $t$ . Tässä tapauksessa kastepistelämpötila on noin 11,5 °C. Samalta pystysuoralta voidaan lukea ilman absoluuttinen kosteus  $x$ , joka on tässä esimerkissä 7,9 g/kg kuivaa ilmaa. Ominaisentalpia  $h$  esimerkin mukaisessa ilman tilassa on noin 45,5 kJ/kg.



Kuva 7. Mollier-diagrammi (Sandberg 2016a, 84).

#### 4.2.2 Jäähdytystehon laskeminen

Esilämmitykseen käytetyllä kanapatterilla voidaan kesällä viilentää ulkoa otettavaa ilmaa (Swecon 2023, 3). Kun ilmavirtaa jäähdytetään kanavapatterissa, mutta ilmaa ei kuivata, voidaan tarvittava teho  $\Phi_{ilma}$  laskea kaavalla 11 (Sandberg 2016a, 87).

$$\phi_{ilma} = \rho_i c_{pi} q_{vi} (T_{ulko} - T_{tulo}) \quad (\text{Kaava 11})$$

Kaavassa 11  $\rho_i$  on ilman tiheys (1,2 kg/m<sup>3</sup>),  $c_{pi}$  on ilman ominaislämpökapasiteetti (1,006 kJ/(kg, K)),  $q_{vi}$  on jäähdytettävän ilman tilavuusvirta (m<sup>3</sup>/s),  $T_{ulko}$  ulkolämpötila (°C) ja  $T_{tulo}$  on tuloilman lämpötila (°C).

Jos ilmaa kuivataan jäähdytyspatterissa, eli siitä poistetaan kosteutta, lasketaan tarvittava teho  $\Phi_{ilma}$  kaavalla 12 ilmojen entalpiaerojen kautta (Sandberg 2016a, 87).

$$\phi_{ilma} = \rho_i c_{pi} q_{vi} (h_{ulko} - h_{tulo}) \quad (\text{Kaava 12})$$

Kaavassa 12  $\rho_i$  on ilman tiheys (1,2 kg/m<sup>3</sup>),  $c_{pi}$  on ilman ominaislämpökapasiteetti (1,006 kJ/(kg, K)),  $q_{vi}$  on jäähdytettävän ilman tilavuusvirta (m<sup>3</sup>/s),  $h_{ulko}$  on ulkoilman entalpia (kJ/kg) ja  $h_{tulo}$  on tuloilman entalpia (kJ/kg).

Energiakaivosta on saatavilla jäähdytystehoa noin 20–30 W/m riippuen energiakaivon kuormitus-historiasta (Silvan ym. 21 2016a, 277). Mikäli energiakaivon pituus olisi 150 metriä, tarkoittaisi se saatavilla olevaa jäähdytystehoa 3–4,5 kW. Aivan Etelä-Suomessa kalliosta saatava suora jäähdytysteho voi jäädä 10–20 W/m, koska kallioperän tasapainolämpötila energiakaivojen keski-syvyydellä on noin 8°C, ja energiakaivo voi palautua nopeastikin talven jälkeen tasapainotilanteeseen ja lämpimämmäksi kuormituksen jatkuessa (Silvan ym. 21 2016a, 277).

Ilmanvaihtokoneen kautta toteutettu jäähdytys viilentää tiloja, joihin tuloilma ohjataan kanavistolla. Ilmanvaihtokanavisto täytyy olla rakennettu jäähdytyskäyttöön. Viilennyspatteriin täytyy olla liitetynä kondenssiviemärinti, ja kanavisto täytyy olla eristetty siten, että kanaviston pinnoille ei pääse muodostumaan kondenssivettä. Jäähdytyksellä tarkoitetaan sisäilman olosuhteen hallintaa kaikissa tilanteissa. Viilennyksellä tarkoitetaan järjestelmää, jolla tuloilman lämpötilaa laskemalla

pyritään rajoittamaan sisäilman lämpötilan nousua. Tästä syystä kanavapatterilla toteutetusta järjestelmästä pientaloissa käytetään yleensä nimitystä viilennys. (Talotekniikkainfo 2021.)

Pientalon ilmanvaihdon avulla tuntuvaa viilennystehoa voidaan tuloilmaa jäähdyttämällä saada noin  $10 \text{ W}/(\text{dm}^3/\text{s})$  (Talotekniikkainfo 2021). 100–200 neliömetrin asunnoissa se voisi tarkoittaa noin 500–1000 W viilennystehoa. Ilmavirtaa kasvattamalla tehoa voidaan saada lisättyä luokkaan  $10\text{--}20 \text{ W}/\text{m}^2$ , mutta se täytyisi huomioida kanavien ja päätelaitteiden mitoituksessa. Vaikka erillis- ja rivitaloissa ei rakennusta suunniteltaessa tarvitsekaan tehdä kesäajan lämpötilojen tarkastelua, saataisiin sillä lisättyä asumismukavuutta. (Talotekniikkainfo 2021.)

Puhallinkonvektoreita on saatavilla seinään asennettavia ja kattoon upotettavia malleja. Esimerkiksi NIBE:n Cool-IN tuotesarjassa on kaksi FHW seinäpuhallinta (kuva 8) ja TOPLINE kattopuhallin. Seinäpuhallimien maksimijäähdytystehot ovat 2,2 kW ja 3,7 kW ja kattopuhallimella maksimijäähdytysteho on 4,3 kW. (Cool-IN 2021, 1–2.)



*Kuva 8. NIBE Cool-IN seinäasenteinen puhallinkonvektori (Cool-IN Comfort).*

Ilmalämpöpumpuissa, joita tavallisesti käytetään pientaloissa, jäähdytystehot ovat 2500 W tai 3500 W (Talotekniikkainfo 2021). Puhallinkonvektorin avulla päästään siis samoihin jäähdytystehoihin, mutta pienemmällä energiankulutuksella. Maalämpötalossa puhallinkonvektoriin investointi voi siis olla järkevä ratkaisu.

### 4.2.3 Jäähdytystehon- ja energiantarpeen määrittäminen

Uuden rakennuksen suunnittelussa tulee osoittaa kesäajan huonelämpötilan vaatimuksenmukaisuus tilatyypeittäin, lukuun ottamatta käyttötarkoituksiluokkien 1 ja 9 rakennuksia. Vaatimuksenmukaisuus osoitetaan tilakohtaisella lämpötilalaskennalla käyttämällä E-luvun laskennan mukaisia lähtötietoja ilmavirtaa lukuun ottamatta. (Ympäristöministeriön asetus 1010/2017, 4:29 §.)

Kaikki pienet asuinrakennukset eli pientalot, rivitalot ja enintään kaksikerroksiset asuinkerrostalot kuuluvat luokkaan 1 (Ympäristöministeriön asetus 1010/2017, 2:4 §). Jos jäähdytystä tarvitaan sisäilman lämpötilan hallinnassa, tulee ostoenergiälaskenta suorittaa dynaamisella menetelmällä (Ympäristöministeriön asetus 1010/2017, 2:8 §). Pientalojen jäähdytystehon- ja energiantarpeen määrittämistä ei siis tehdä osoitettaessa rakennuksen vaatimuksenmukaisuutta. Pientaloissa laskennallinen ostoenergiankulutus voidaan osoittaa kuukausitason laskentamenetelmällä (Ympäristöministeriön asetus 1048/2017, 2).

Jäähdytysenergian nettotarve tiloissa on riippuvainen vuoden- ja vuorokaudenajasta ja parhaiten siinä onnistutaan simuloimalla rakennus (Jäähdytysjärjestelmien energialaskentaopas 2011). Rakennussimulointiohjelmien avulla voidaan tehdä olosuhdetarkastelut, energialaskenta sekä jäähdytysjärjestelmien mitoitus. Suomessa käytetään yleensä RIUSKAA, joka perustuu Granlund Oy:n kehitystyöhön sekä DOE 2.1E -simulointiohjelmaan ja IDA ICE -ohjelmaa, joka kehitettiin alun perin Kunglika Tekniska Högskolanin sekä Teknillisen korkeakoulun LVI-laboratorion avulla. (Heinonen & Vuolle 2016b, 457.)

Jäähdytyksen ostoenergiantarvetta laskettaessa vaihtoehtoisella (kuukausittaisella) laskentataavalla, lasketaan ensin tilojen ja ilmanvaihdon jäähdytysenergian nettotarve  $Q_{\text{jäähdytys, netto}}$  kaavalla 13 (Ympäristöministeriön asetus 1048/2017, 20).

$$Q_{\text{jäähdytys, netto}} = (1 - \eta_{\text{lämpö}}) Q_{\text{lämpökuorma}} - \frac{(T_{s, \text{lask, keskim}} - T_s)^{1,1}}{(T_s - T_u)} (Q_{\text{tila}} + Q_{\text{iv}})$$

(Kaava 13)



Kaavassa 13  $\eta_{\text{lämpö}}$  on lämpökuormien kuukausittainen hyödyntämisaste,  $Q_{\text{lämpökuorma}}$  on lämpökuorma (energiatehokkuuden laskentaohje luku 5) (kWh) ja  $T_{s, \text{lask, keskim.}}$  on Jäähdytyksen asetusarvo (tavanomaisesti 23 °C),  $T_s$  on sisälämpötila / lämmityksen asetusarvo (yleensä 21 °C).  $T_u$  on kuukauden keskimääräinen ulkolämpötila (1010/2017 liite 1) (°C),  $Q_{\text{tila}}$  on rakennuksen tilojen lämmitysenergiatarve (rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta ohje luku 3) (kWh) ja  $Q_{\text{iv}}$  on rakennuksen ilmanvaihdon lämmitysenergiatarve (rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskentaohje luku 3) (kWh). 1,1 on tekijä, joka huomioi lämmönsiirron tehostumisen lämpötilatason noustessa (eksponentti on 1, jos sulkulausekkeen arvo on negatiivinen).

Kaavalla 14 lasketaan rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon jäähdytysenergiakulutus  $Q_{\text{jäähdytys}}$ , joka ottaa huomioon jäähdytysjärjestelmässä tapahtuvat kylmähäviöt. Ellei jäähdytysjärjestelmän hyötysuhdetta tunneta, voidaan käyttää arvoa 0,7. (Ympäristöministeriön asetus 1048/2017, 21.)

$$Q_{\text{jäähdytys}} = \frac{Q_{\text{jäähdytys, netto}}}{\eta_{\text{jäähdytys}}} \quad (\text{Kaava 14})$$

Kaavassa 14  $\eta_{\text{jäähdytys}}$  on jäähdytysjärjestelmän hyötysuhde.

Ostoenergiatarpeen määrä voidaan laskea kaavalla 15 (Ympäristöministeriön asetus 1048/2017, 21).

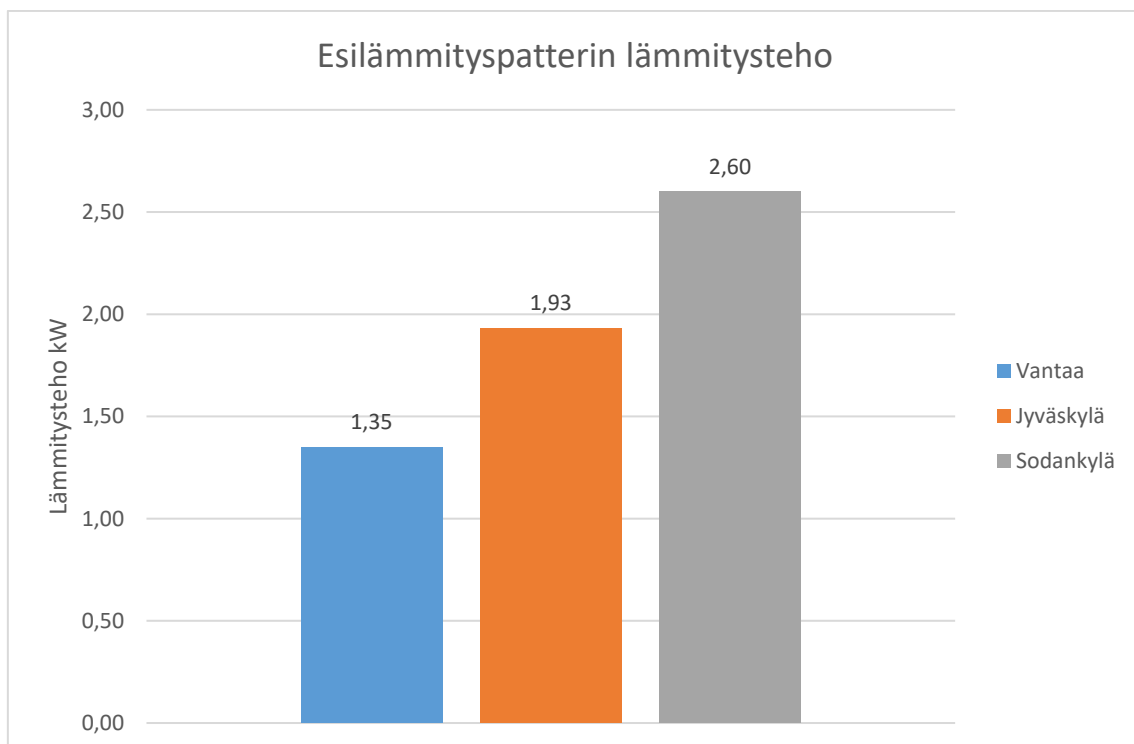
$$W_{\text{jäähdytys, osto}} = \frac{Q_{\text{jäähdytys}}}{\epsilon_E} \quad (\text{Kaava 15})$$

Kaavassa 15  $W_{\text{jäähdytys}}$  on ostoenergiankulutus (kWh) ja  $\epsilon_E$  on kylmäntuotto prosessin vuotuinen kylmäkerroin.

Jäähdytysjärjestelmien energianlaskentaoppaassa taulukossa 1 on ohjearvoja kylmäkertoimille. Vapaa jäähdytyksellä vertikaalisella maaputkistolla (porakaivo) kylmäkertoimen ohjearvo on 30 ja ilmalauhdutteiselle kompressori-kylmälaitokselle vastaava ohjearvo kylmäkertoimelle on 2,5. (Jäähdytysjärjestelmien energialaskentaopas 2011, 6.)

### 4.3 Esilämmityksen vaikutus porakaivon mitoitukseen

Esilämmityksen vaikutusta porakaivon pituuden määrittelyssä tarkastellaan energianoton ja tehonoton kautta. Suomessa saatavissa oleva lämpöenergiamäärä vaihtelee 80–150 kWh:n välillä tehollisen porakaivometrin matkalla (Aittomäki ym. 2012, 352). Energianottoa voisi arvioida kaavion 1 perusteella. Jos jälkilämmityspatterin energiaa saataisiin vähennettyä puoleen, Jyväskylän vyöhykkeellä energiaa otettaisiin noin 700 kWh:a ja sen vaikutus energiakaivon pituutta määriteltessä olisi 5–9 metriä. Jos mitoitusulkolämpötilassa ulkoilma lämpiäisi esilämmityspatterissa  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n, tarkoittaisi se hetkellisenä tehonottona 1,35–2,60 kW:a energiakaivosta (kaavio 3).



*Kaavio 3. Esilämmityspatterin arvioitu lämmitysteho mitoitusulkolämpötilalla.*

Suurimmaksi jatkuvaksi tehonotoksi talviaikana on arvioitu 25–30 W tehollista metriä kohden. Hetkellisesti tehonottoa voi olla jopa 40–50 W/m, mutta tällöin tulee ottaa huomioon liuoksen ja energiakaivon seinämän lämpötilaeron kasvaminen. Jatkuva liian runsas tehonotto voi johtaa lämpökaivon nopeaan jäätymiseen. (Silvan ym. 2016, 277.)

Kaavion 3 tilanteessa arvoa 50 W/m käyttämällä energiakaivon pituutta täytyisi lisätä 27–52 metriä, joten voitaneen todeta tehonoton olevan määräävä tekijä energiakaivon mitoittamisessa.

## 5 TUTKIMUSKOHTTEEN TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuskohteeksi valikoitui Pohjois-Pohjanmaalla Nivalassa sijaitseva keväällä 2023 valmistunut omakotitalo, jossa on maalämpöpumppu, 200 metrinen maalämpökaivo, kanavapatteri ulkoilmakanavassa, jota käytetään esilämmitykseen ja viilennykseen sekä seinäasenteinen puhallinkonvektori, jolla jäähdytetään sisäilmaa. Lisäksi on maalämmöllä lämpiävä autotallirakennus.

Kohteessa mitattiin aikavälillä 12.2.2024–19.4.2024 ulkoilman lämpötilaa ennen ja jälkeen kanavapatterin ja kanavapatterille tulevan ja lähtevän liuoksen lämpötilaa. Lisäksi kertaluontoisena mittauksena mitattiin ulkoilmakanavasta ulkoilmavirtaama ja liuoksen tilavuusvirta kanavapatterissa. Mitattujen tietojen avulla suoritettiin laskentaa järjestelmän toiminnasta, kannattavuudesta ja lämpökaivon mitoituksen riittävydestä.

Tutkimuksessa selvitettiin tarkasti kohdetalon lämmityksen ja jäähdytyksen tehon- ja energiantarve mallintamista varten. Tarkemmat kohdetiedot ja muut laskennassa käytetyt tiedot ovat listattuna liitteisiin 1 ja 2. Laskenta suoritettiin kohteen todellisia tietoja hyödyntäen sekä käyttämällä hyväksi TRY 2020 Jyväskylän (III) vyöhykkeen säädataa.

### 5.1 Mittaukset

Ulkoilmavirtaama mitattiin log-linear-menetelmällä 12 mittauspisteen avulla. Log-linear-menetelmässä mitataan vähintään kahdelta halkaisijalta kuusi mittaustulosta Pitot-putkella, tai virtausnopeuden ollessa alle 3 m/s soveltuu monipistemittaus myös kuumaelementtianturille (LVI 014-10190 1992, 4–5). Mittauslaitteena käytettiin TSI VelociCalc 9555-P monitoimimittaria ja kuumalankaanemometriä. Suojaetäisyytenä mittauksessa oli ennen mittauspistettä 5\*D ja mittauspisteen jälkeen 2\*D, jolloin virhemarginaaliksi tuli 4,5 % LVI 014-10190:n sivulla 6 olevan arviointitaulukon perusteella.

Mittaushetkellä ilman lämpötila oli -1,8 °C ja suhteellinen kosteus 65,8 %, joten tilavuusvirta muutettiin vastaamaan yleisesti käytettyä tiheyttä 1,2 kg/m<sup>3</sup>. Muutos laskettiin kaasun jatkuvuusyhtälöllä kaavalla 16 (Tammertekniikka 2005, 99).

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (\text{kaava 16})$$

Kaavassa 16  $\rho_1$  on kaasun tiheys alussa,  $A_2$  on poikkipinta-ala alussa,  $v_1$  on nopeus alussa,  $\rho_2$  on kaasun tiheys lopussa,  $A_2$  on poikkipinta-ala lopussa,  $v_1$  on nopeus lopussa.

Keskinopeuden perusteella laskettiin ulkoilmavirtaamaksi 98,8 dm<sup>3</sup>/s laskentaolosuhteisiin muutettuna. Tarkemmat mittapisteen ja virhemarginaalin vaikutus tulokseen selviävät mittauspöytäkirjasta liitteestä 3. Päätettiin laskennassa käyttää kuitenkin suunnitteluarvoja ilmavirtojen osalta, koska ne olivat hyvin lähellä mitattua.

Lämpötilamittauksiin käytettiin 4-kanavaista AZ-88598 termoelementti dataloggeria, joka mittaa K-termopariantureilla lämpötiloja tallentaen mittaustulokset. Termoparianturit asennettiin esilämmityspatterin molemmille puolille keskelle kanavaa ja liuospuolelle eristetyn kupariputken pinnalle folioteipillä varmistaen anturin pysyvyys putken pintaa vasten. Lämpötilamittaukset tehtiin 12.2.2024–19.4.2024 välisenä aikana 10 minuutin aika-askeleella, joiden perusteella laskettiin tunnikohtaisesti keskilämpötilat. Lämpötilamittauksien tulokset selviävät liitteestä 4.

Tutkimuskohteen ilmanvaihtokoneessa on etäohjaus MyVallox Cloud palvelun kautta, josta on saatavilla koneen lämpötilojen lokitiedot 10 minuutin aika-askeleella. 26.4.2023–28.4.2024 välisenä aikana, kun ulkoilman lämpötila on ollut alle 0 °C, on ulospuhallusilman keskilämpötila ollut 0,88°C. Päätettiin käyttää näissä laskennoissa kyseistä arvoa ulospuhallusilman minimilämpötilana.

## 5.2 Lämmityksen ja jäädytyksen tehon- ja energiantarve

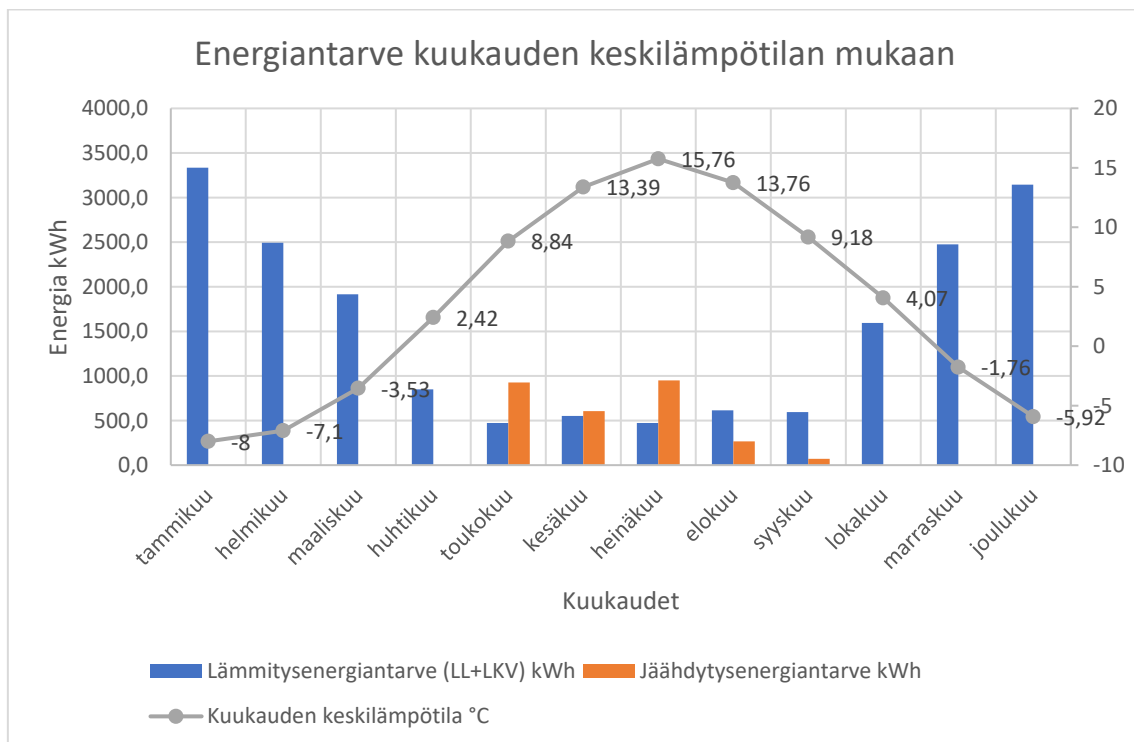
Kohteen lämmityksen tehon- ja energiantarve laskettiin kuukausitason laskennalla, CADMATIC 2023 HVAC -sovelluksen energian- ja tehonlaskentatyökalulla sekä mallintamalla kohde IDA ICE -ohjelmalla. Useaa laskentatapaa käyttämällä haluttiin varmistua tuloksien samankaltaisuudesta, vaikka lopullisessa laskennassa käytettiin vain IDA ICE -ohjelman tuloksia. Autotallin lämmitysenergia ja -teho laskettiin IDA ICE -ohjelmalla. Tietoja hyödynnetään EED-mallinnuksessa.

Kaikessa laskennassa hyödynnettiin liitteiden 1 ja 2 mukaisia lähtötietoja ja laskenta-arvoja. Laskennassa hyödynnettiin asetuksia, ohjeita ja oppaita, joiden perusteella myös laskentaohjelmat suorittavat laskentaa, kun osoitetaan uuden rakennuksen vaatimuksenmukaisuutta. Tutkimuskohte on olemassa oleva asuinrakennus, josta oli tarkoitus selvittää todellisia kulutustietoja, joten laskennassa käytettiin todellisuudessa toteutuneita arvoja. Laskennoissa ei huomioitu varjostuksia, kuten puita tontilla. Laskennassa hyödynnettäviä oppaita olivat:

- Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdesta 1009/2017
- Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017
- Energiatehokkuus. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta ohje
- Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta 1048/2017
- Jäähdytysjärjestelmien energialaskentaopas 2011

### 5.2.1 Kuukausitason laskentamenetelmä

Kuukausitason laskenta perustuu kuukauden keskilämpötiloihin ja keskimääräisiin ilmansuunnittain annettuihin auringon säteilytietoihin. Kuukauden keskilämpötiloina ja auringon säteilyarvoina käytettiin Ympäristöministeriön asetuksen 1009/2017 liitteen 1 mukaisia Jyväskylän säävyöhykkeen arvoja. Lämmitys- ja jäähdytysenergiantarve hyödynnettävien lämpökuormien jälkeen nähdään kaaviosta 4. Koko vuoden lämmitysenergiantarpeeksi saatiin 18516,2 kWh ja jäähdytysenergiantarpeeksi 2821,7 kWh. Lämmitystehontarvetta ei laskettu käsimenetelmin.

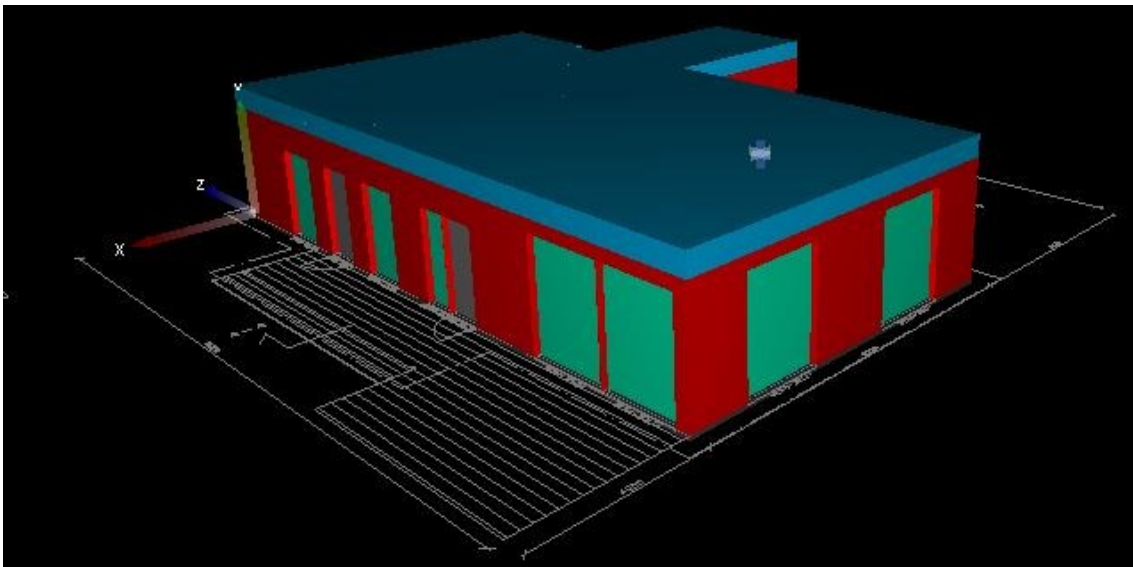


*Kaavio 4. Lämmitys- ja jäähdytysenergiantarve kuukausitason laskennalla.*

Kuukasitason laskennan perusteella jäähdytystarvetta rakennuksessa olisi toukokuusta syyskuuhun. Samalla ajanjaksolla lämmitysenergiantarve muodostui lähes yksinomaan käyttöveden lämmittämisestä, joka on kuukausittain keskimäärin 420 kWh, kun häviöt on huomioitu. Laskennassa käytettiin aurinkosuojauksena  $F_{\text{verho}}$  arvona 0,75, joka on energiatehokkuuden laskentaohjeen taukukon 5.2 mukaan verho. Laskennan mukaan tuloilman jälkilämmitystarvetta oli 1599,3 kWh.

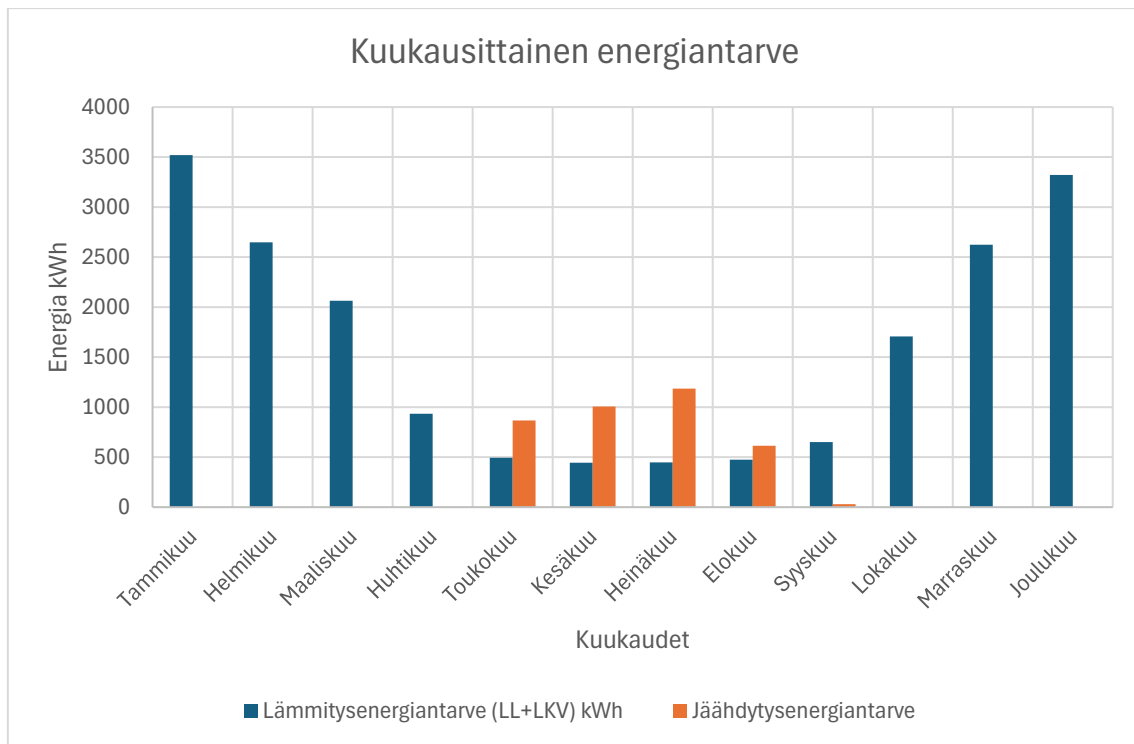
## 5.2.2 CADMATIC 2023 HVAC -teho- ja energialaskenta

CADMATIC ohjelman tila-työkalulla luotiin kohdetalon arkkitehtipohjalle tilat. Tiloille syötettiin kohdeessa toteutuneet rakenteet, mutta ilmamäärinä käytettiin kohteeseen suunniteltuja ilmavirtoja. Tila-työkalulla saadaan rakennus suunnattua toteutuneen mukaiseksi. Ohjelma laskee lämpöhäviötehon projektin asetuksissa annettua ulkolämpötilaa vasten. (Jyväskylä -32 °C). Energialaskenta suoritettiin sovelluksen Energialaskenta 2018 -työkalulla. Kuvassa 9 nähdään, miltä tila-työkalulla luotu malli näyttää generoituna 3D-muotoon.



Kuva 9. CADMATIC HVAC-tila-työkalulla luotu 3D-malli rakennuksesta.

Energialaskenta 2018 -työkalulla määritettiin tehon- ja energiantarpeet. Rakennuksen lämmityshontarpeeksi saatiin 6,9 kW ja lämmitysenergiatarpeeksi 19329 kWh sisältäen lämmityksen ja käyttöveden häviöineen. Jäähdytysenergiatarpeeksi saatiin 3702 kWh ja ilmanvaihdon jälkilämmityspatterin energiantarpeeksi 1336 kWh. Kaaviossa 5 esitettynä kuukausikohtaiset energiantarpeet.

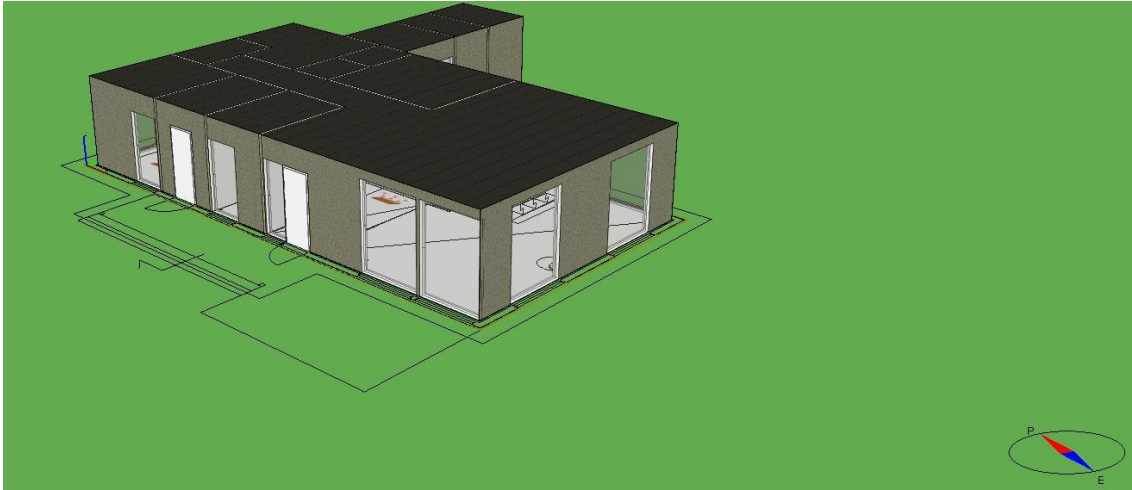


Kaavio 5. Kuukausittaiset energiatarpeet CADMATIC-energiälaskennalla.

### 5.2.3 IDA ICE -mallinnus ja -alkuarvot

IDA Indoor Climate and Energy on monivyöhykemallinnuksen mahdollistava dynaaminen simulointiohjelma. Ohjelman avulla on mahdollista tutkia rakennuksen lämpötasetta ja energiankulutusta viimeisimpään tutkimustietoon pohjautuvien fysikaalisten mallien avulla. Ohjelma on maailmanlaajuinen ja siihen on saatavilla maakohtaiset mitoitus tiedot. (EQUA 2023.)

IDA ICE -ohjelmaan voidaan tuoda IFC-malli tai se voidaan ohjelmassa rakentaa esim. CAD-kuvan päälle. Tässä työssä malli rakennettiin CAD-pohjapiirustuksen päälle pohjapiirustus työkalulla. Kuvassa 10 on valmis malli, jossa seinän paksuudet on otettu pois käytöstä.



Kuva 10. IDA ICE -malli tutkimuskohteesta.

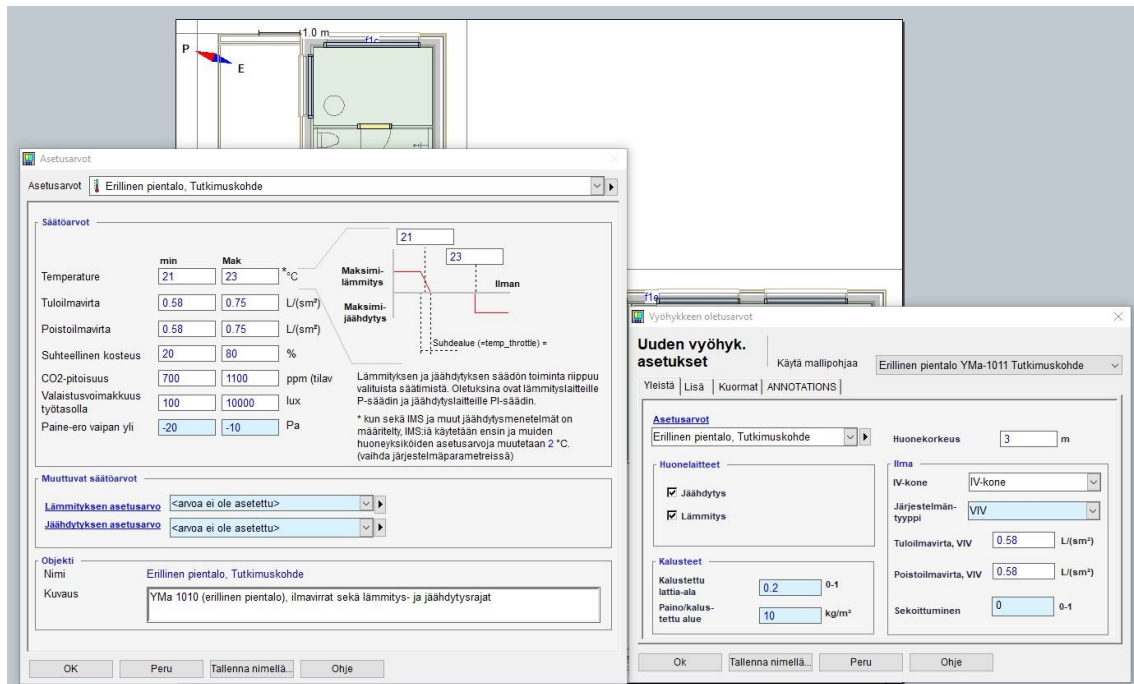
Ennen pohjapiirustuksen luontia ohjelma käynnistettiin Suomi-lokalisaation avulla, josta perusasetuksiksi valittiin yhden asunnon talot (käyttötarkoitusluokka 1 a-c). Sen jälkeen Yleislomakkeen rakennuskohtaiset tiedot-laatikossa määritettiin kohteen asetusarvot (kuva 11), kuten sijainti, sää, rakenteet, suuntaus, kylmäsillat, vuotoilma ja häviöt. Rakenteista muokattiin muun muassa kohteen todellisiin U-arvoihin perustuvat rakenteet. Ikkunoiden aurinkosuojausena käytettiin sisäpuolista kevyttä verhoa, joka ohjautuu auringon säteilyn mukaan.

Rakennuskohtaiset tiedot	
<a href="#">Sijainti</a>	<a href="#">Oletusarvot</a>
© Jyväskylä (Ref_2020_wCool)	<a href="#">Kohteen varjostus ja suuntaus</a>
<a href="#">Sää</a>	<a href="#">Kylmäsillat</a>
© Jyväskylä_Ref_2020	<a href="#">Maaperän ominaisuudet</a>
<a href="#">Tuuliprofiili</a>	<a href="#">Vuotoilma</a>
© [Normaali kaupunkiympäristö]	<a href="#">Paineertoimet</a>
<a href="#">Vapaapäivät</a>	<a href="#">Lisäenergia ja häviöt</a>
<arvoa ei ole asetettu>	<a href="#">Järjestelmäparametrit</a>

Kuva 11. Perusasetukset yleislomakkeella.

Pohjapiirustusvalikossa säädettiin vielä uuden vyöhykkeen asetukset sopiviksi (kuva 12), jonka jälkeen vyöhykkeiden lisääminen oli mahdollista. Siinä valittiin asetusarvot lämmitykselle, jäähdytykselle ja ilmanvaihdolle ja vyöhykkeisiin tulevien ideaalisten lämmitys- ja jäähdytyslaitteiden tehot sekä lämpökuormat.



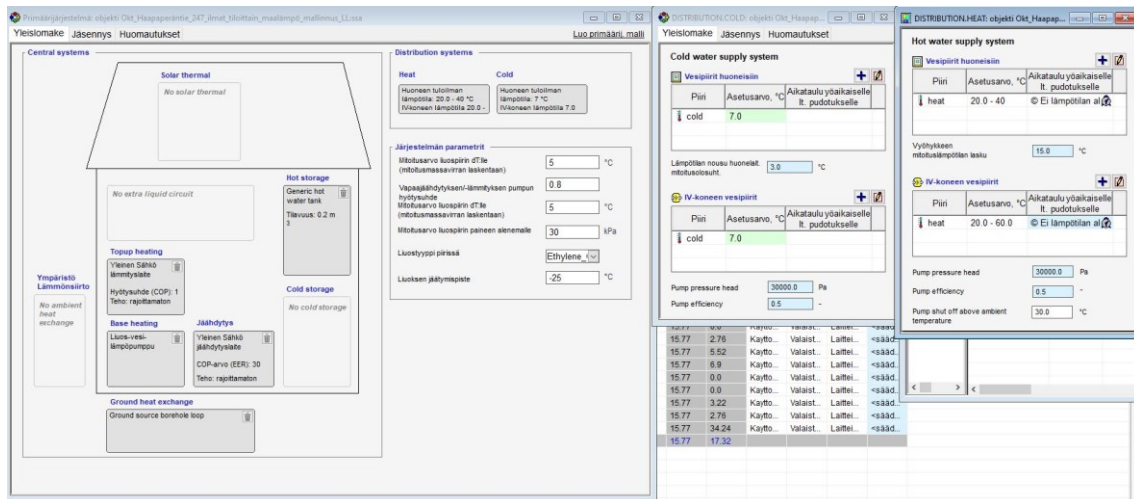


Kuva 12. Uuden vyöhykkeen asetukset ja asetuservot.

Pohjapiirustuksen mukaisesti säädettiin rakennuksen koko (building body) sopivaksi ja sitten luotiin vyöhykkeet tiloista. Vyöhykkeisiin asennettiin oikean kokoiset ikkunat ja ovet ja määriteltiin välioville, että ne ovat aina auki, niin voidaan seurata jäähdytyksen siirtymistä tiloista tiloihin. Lisäksi vyöhykkeiden ilmavirtatiedot asetettiin kohteen suunnitelmien mukaisiksi. Ensimmäinen lämmitystekohon tarpeen simulointi suoritettiin ideaalisilla lämmityslaitteilla Jyväskylän mitoitusolosuhteissa ilman lämpökuormia.

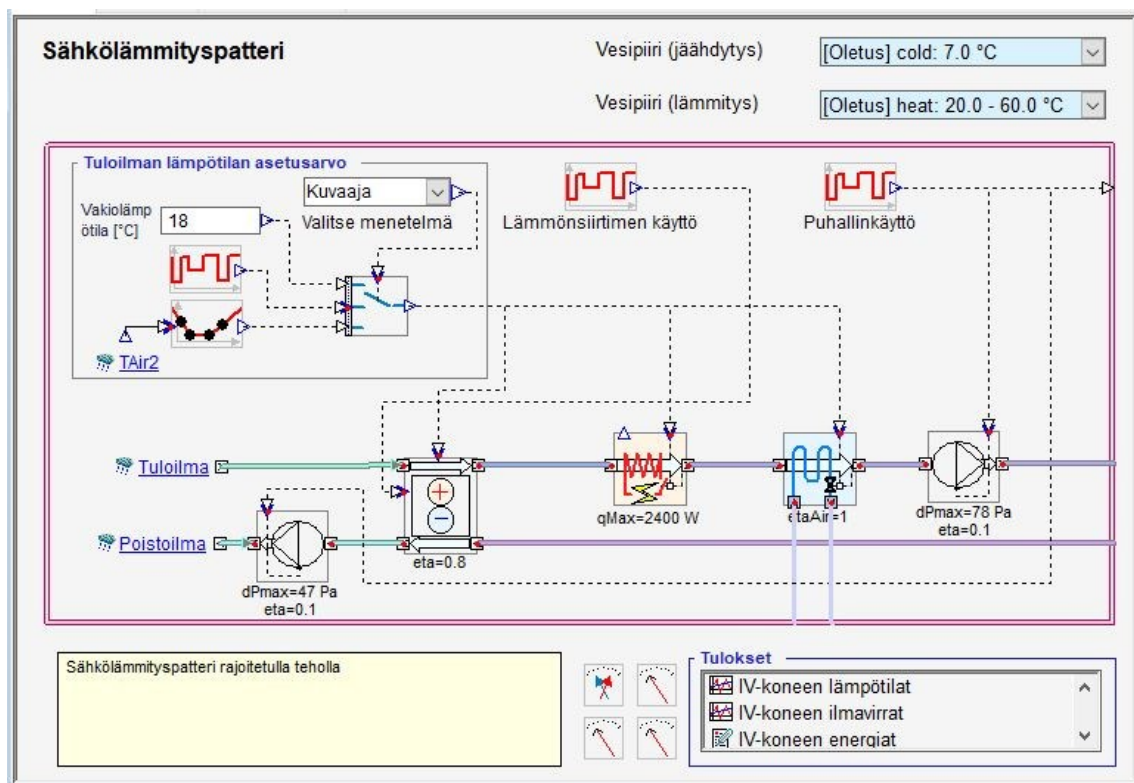
Mitoituksen jälkeen tiloista poistettiin ideaaliset jäähdytys- ja lämmityslaitteet ja tilalle valittiin vyöhykekohtaisesti lattialämmitys, joiden tehot säädettiin tilaan sopiviksi. Samalla myös lämpökäyrä säädettiin sopivaksi lattialämmitykselle ja suoritettiin simulointi uudestaan, jotta nähtiin vyöhykekohtaisen operatiivisten lämpötilojen pysyminen asetuservossa. Vyöhykekohtaiset tehot säädettiin siten, että operatiivinen lämpötila pysyy 21 °C:ssa.

Primäärijärjestelmä (lämmitys ja jäähdytys) muokattiin maalämpöpumpuksi porakaivolla ja varaa-jaksi asetettiin 200 litran varaaaja. Jäähdytyslaitteeksi laitettiin geneerinen jäähdytyslaite. Samassa valikossa valittiin myös lämpökäyrät jäähdytykselle ja lämmitykselle (kuva 13). Saman valikon alla on myös mahdollista asetella pumppujen yms. tiedot oikeaksi, jotta ostettavan sähköenergian las-kenta menisi oikein, mutta tässä työssä sillä ei ollut merkitystä.



Kuva 13. Primäärijärjestelmän luonti ja asetukset.

Ilmanvaihtokoneeksi (kuva 14) asetettiin sähköisellä jälkilämmityspatterilla oleva. Ilmanvaihtokoneelle syötettiin oikeat arvot lämmön talteenotolle ja puhaltimille, rajoitettiin vastuksen maksimikuorma valmistajan ilmoittamaan ja luotiin tuloilman lämpötilalle kuvaaja, joka ulkolämpötilan saavuttaessa 15 astetta laskee tuloilman lämpötilan jäähtyksen asetusarvoon 15 °C.



Kuva 14. IV-kone sähköisellä jälkilämmityksellä ja sen asetukset.

Ilmanvaihtokoneessa on jäähdytyspatteri ja lisäksi kohteessa on puhallinkonvektori isossa tilassa (OH+KE+ET+KÄYT.), joten samaan tilaan asetettiin ilmamääräsäätyvä jäähdytyspuhallinkonvektori, jonka maksimi-ilmamääräksi asetettiin  $3,2 \text{ dm}^3/(\text{s}, \text{m}^2)$ . Tämän avulla saadaan selvitettyä kohteen ottama jäähdytysteho ja nähdään samalla, miten tilojen välillä tapahtuu lämmönsiirtoa.

#### 5.2.4 IDA ICE -tulokset

Kun mallin asetukset oli saatu asetettua, aloitettiin kohteelle simuloinnit. Kohteelle ajettiin lämmitystarpeen, jäähdytystarpeen, energian ja yllilämmön simuloinnit.

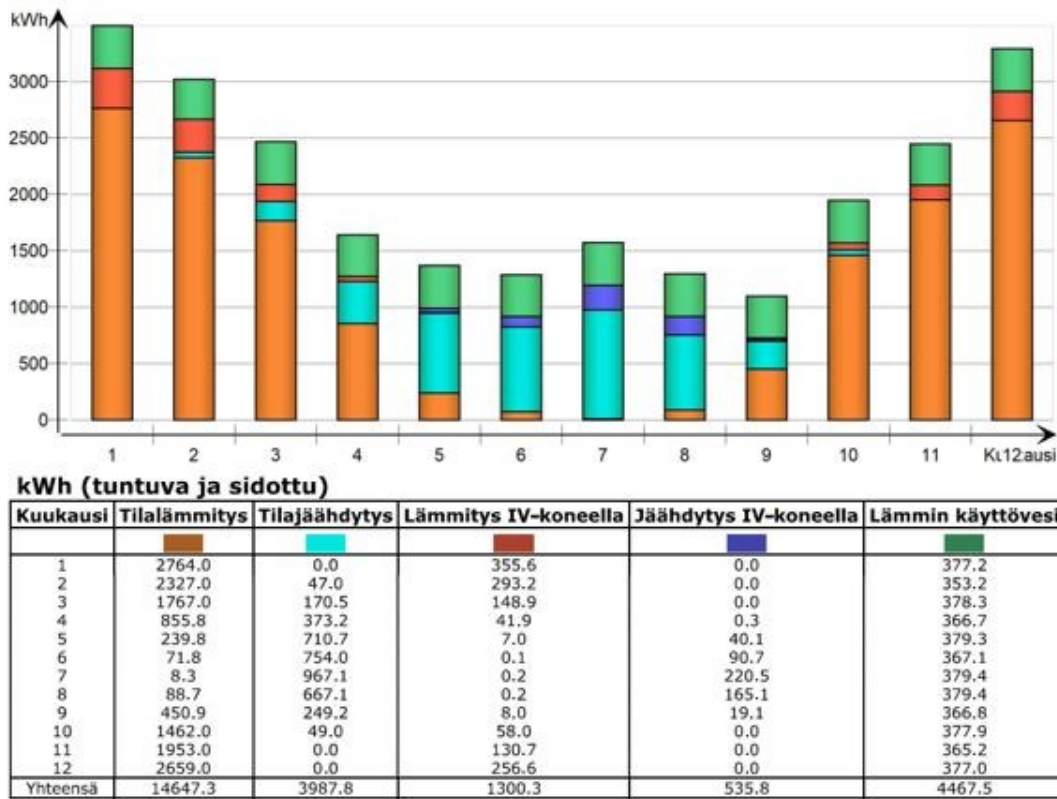
Lämmitystarpeen simuloinnissa selviää rakennuksen lämmitystehontarve mitoitustilanteessa ilman lämpökuormia. Jäähdytystarpeen simuloinnissa etsittiin huhtikuun–syyskuun väliseltä ajalta suurin mahdollinen jäähdytyskuorma tilanteessa, jossa kaikki lämpökuormat ovat käytössä. Energiasimulointi laskee valitulle mitoitusolosuhteelle (Jyväskylä TRY 2020) koko vuoden ajalta energiankulutuksen lämmitykselle, jäähdytykselle ja muille laitteille, ja se ottaa huomioon lämpökuormat, varjostukset ja muut oleelliset asiat. Yllilämpö simuloinnissa tarkastellaan kesäkuun–elokuun väliseltä ajalta, kuinka monta tuntia jäähdytyksen asetuntiraja ( $27 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ylittyy rakennuksessa.

Tilojen lämmitystehontarpeeksi ohjelma laski  $8,713 \text{ kW}$ :a ja käyttöveden lämmitystehontarpeeksi  $0,7494 \text{ kW}$ . Mitoitustilanteessa ilmanvaihtokoneessa olevat vastukset  $2400 \text{ W}$  eivät riitä pitämään tuloilman lämpötilaa asetusarvossaan, vaan tuloilman lämpötila jää  $12,6 \text{ }^\circ\text{C}$ :een asetusarvon  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  sijasta. Kohteen suunnitellulla ilmavirralla ( $94 \text{ l/s}$ ) tästä aiheutuu tiloihin noin  $0,62 \text{ kW}$ :n lämmitystarve. Tehtiin vielä lämmitystehontarpeella uusi simulointi, koska haluttiin tuloilman lämpötilan pysyvän asetusarvossa. Lopulliseksi tilojen lämmitystehontarpeeksi muodostui  $8,055 \text{ kW}$ . Autotalirakennuksen lämmitystehontarpeeksi saatiin  $2,614 \text{ kW}$ .

Tilojen jäähdytystehontarpeeksi ohjelma laski  $7,151 \text{ kW}$  sisältäen tuntuvan ja sidotun tehon. Tästä ilmanvaihtokoneen jäähdytyspatterissa saadaan tehoa  $2,373 \text{ kW}$  ja puhallinkonvektorilla saadaan tehoa  $4,778 \text{ kW}$ . Näillä tehoilla ei saavuteta jäähdytyksen asetusarvoa ( $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ) kuin tilassa, jossa puhallinkonvektori sijaitsee. Muiden tilojen osalta lämpötilat vaihtelevat  $23,5\text{--}26 \text{ }^\circ\text{C}$ :n välillä.

Energialaskennassa lämmitysenergiantarpeeksi (LL+LKV) saatiin  $19114,8 \text{ kWh}$  ja lisäksi IV-koneen jälkilämmityspatterin energiankulutukseksi  $1300,3 \text{ kWh}$ . Tilojen jäähdytysenergiantarpeeksi saatiin IV-koneelle  $535,8 \text{ kWh}$  ja puhallinkonvektorille  $3987,8 \text{ kWh}$ . Jäähdytyksen asetuntiraja ei

ylity ollenkaan valituilla laitteilla. Kaaviossa 6 on esitetty kuukausikohtaisesti energiankulutukset. Autotallirakennuksen lämmitysenergiantarpeeksi saatiin 4903 kWh.

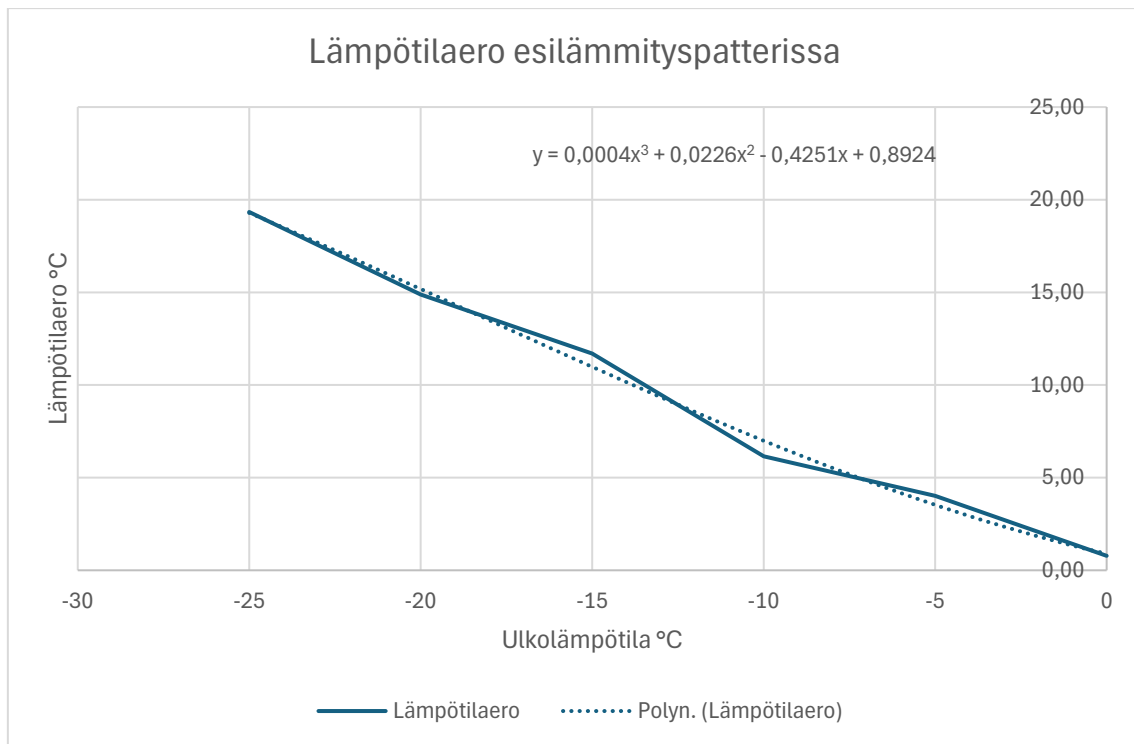


Kaavio 6. IDA ICE -energiasimuloinnilla saadut energiantarpeet.

### 5.3 Esilämmityspatterin tehon- ja energianotto

Esilämmityspatterin tehon- ja energianottoa varten mitattiin lämpötilaa dataloggerilla 10 minuutin aika-askeleella mittausaikana. Mittausaikavälille ei osunut pitkiä kovia pakkasjaksoja, mutta koska kylmimmät ajanjaksot olivat jo takana päin, päätettiin mittaustuloksia hyödyntää kylmemmilläkin keleillä.

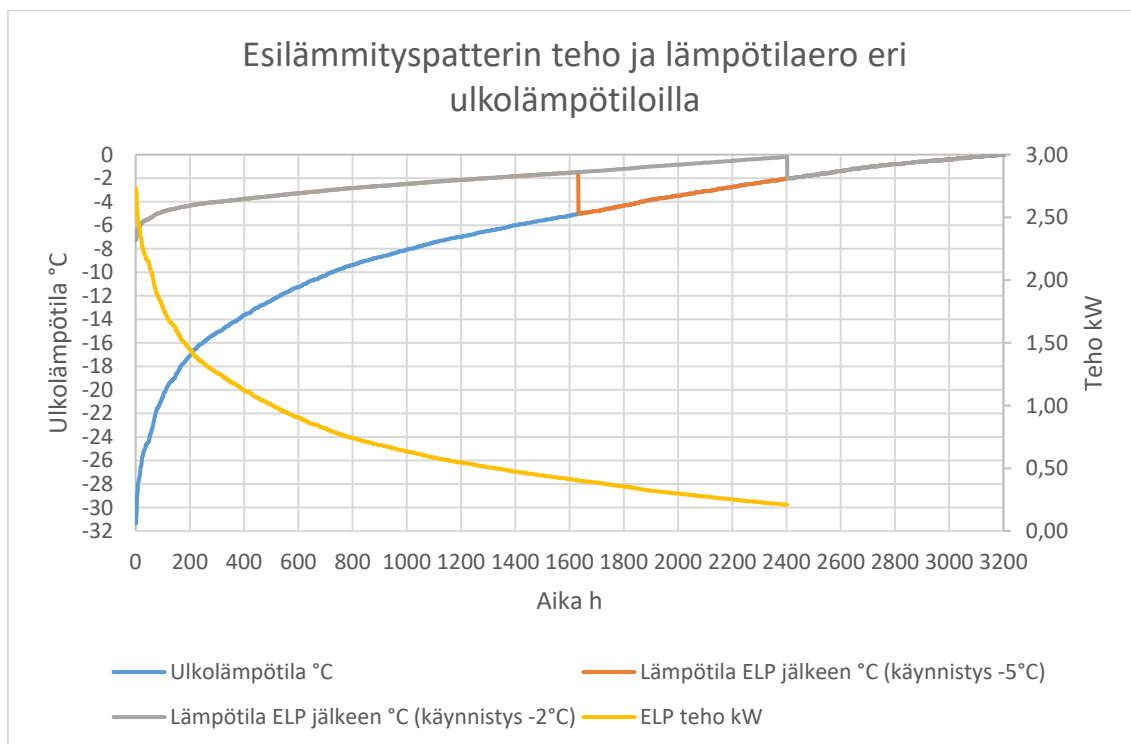
Dataloggerilla saaduista mittaustuloksista valittiin 0°C:sta ja siitä kylmempään mentäessä viiden asteen välein joukko, joiden perusteella laskettiin keskilämpötilaero ilman lämpenemisestä esilämmityspatterissa. Niiden perusteella luotiin Excelissä kuvaaja (kaavio 7), johon lisättiin kolmannen asteen polynominen trendiviiva. Trendiviiva valittiin mahdollisimman tarkasti mukailemaan lasketuja keskiarvoja mittaustuloksista. Trendiviivalle saatiin näkyviin kaava, jolla voitiin laskea ulkoilman lämpeneminen esilämmityspatterissa tässä tutkimuskohteessa.



*Kaavio 7. Ulkoilman lämpeneminen esilämmityspatterissa ja polynomisen trendiviivan laskenta-kaava lämpötilaerolle eri ulkolämpötiloissa.*

Kaavion 7 kaava siirrettiin laskentataulukkoon, jolla esimerkkilaskennassa laskettiin jälkilämmityspatterin energiantarpeita. Taulukkolaskinta muokkaamalla ja kaavan avulla laskettiin jokaiselle vyöhykkeelle uusi ulkolämpötila jokaiselle tunnille, joka kuvastaa ilmanvaihtokoneelle tulevan ilman lämpötilaa riittävän tarkasti, jotta esilämmityspatterin lämmitysenergia voitiin laskea.

Kaavioon 8 koottiin TRY 2020:n Jyväskylän tuntikohtaisen säädatan mukaisesti ulkoilman lämpötilan pysyvyyskäyrä esilämmityspatterilla ja ilman. Lisäksi kaavioon lisättiin esilämmityksen tehon käyrä tutkimuskohteesta mitatulla ulkoilmavirralla. Esilämmityspatterilla olevat pysyvyyskäyrät aseteltiin siten, että esilämmityspatteri on käytössä, jos ulkolämpötila on alle  $-5\text{ °C}$  tai alle  $-2\text{ °C}$ . Tämä perustuu aiemmin todettuun mittausdataan, jonka mukaan lämmönkeruuliuksen keskilämpötila oli noin  $1,1\text{ °C}$  mittauksien aikana, jolloin käynnistysraja määriteltiin laskentaan siten, että lämpöä voi olettaa siirtyvän.



*Kaavio 8. Ulkolämpötilan pysyvyysskäyrä esilämmityspatterilla ja ilman Jyväskylän säävyöhykkeellä. Keltaiselle viivalla esilämmityspatterin tehon pysyvyysskäyrä.*

Kohteeseen asennetulla esilämmityksen kiertovesipumpulla ei saada ylläpidettyä turbulenttista virtausta energiakaivossa, vaan siihen tarvittaisiin 160-wattinen kiertovesipumppu. Hankintakustannussyyistä kohteeseen on kuitenkin asennettu liitteen 1 mukainen kiertovesipumppu, jonka maksimiteho on 75 wattia. Magneettiventtiilin teho on 5 wattia, joten laskennassa oletettiin laitteiden otettavan tehoa 80 wattia. Esilämmityksestä saatava energia ja esilämmityspatterin käytön aiheuttamat pumppauskustannukset esitetään taulukossa 2.

*Taulukko 2. Esilämmityspatterilla mahdollisesti saatava energia ulkoilman lämmitykseen.*

Käynnistys- ja pysäytysraja	Käyttöaika	Saatu energia	Pumppausenergia	Hyötyenergia
-5 °C	1632	1448	131	1318
-2 °C	2402	1679	192	1487

Taulukosta voidaan huomata, että esilämmityspatterin käyttö -2 celsiusasteen käynnistysrajalla on vielä kannattavaa, mutta ei välttämättä järkevää. Todellisuudessa energiansäästöä sähkön muodossa saadaan laskelmien mukaan noin 1250 kwh, mikäli käytetään tuloilman lämpötilasuhteena 80 %. Jos laskennassa käytettäisiin valmistajan ilmoittamaa (85,3 %) lämpötilasuhdetta tuloilmalle,

olisi hyötyenergia silloin noin 1700 kWh.  $-5\text{ °C}$ :n käynnistysrajalla toimiessaan järjestelmän hyötysuhteeksi saadaan noin 10, kun kiertovesipumpun oletettiin ottavan maksimitehon.

Tulevaisuutta ajatellen tutkimusta voisi laajentaa ja kerätä koko vuoden ajalta ilmanvaihtokoneen lämpötilatiedot ja laskea paljonko lämmöntalteenotto kykenee hyödyntämään lämmöstä. Sen perusteella voisi laskea, saadaanko esilämmityspatterille syötetylle lämpöenergialle todellinen hyöty.

#### 5.4 EED-mallinnus

EED-mallinnuksen avulla oli tarkoitus selvittää maalämpökaivon riittävyttä tutkimuskohteessa, mutta saada myös tietoa siitä, millä lailla lämpökaivon mitoituksessa tulisi huomioida esilämmitystä ja jäähdystä. EED-mallinnuksesta oli tarkoitus saada vertailumitoituksia nykyiseen porakaivoon verrattuna. EED 4.20-ohjelmaan tutustuttiin ensin valmistajan ohjeiden ja verkosta löytyvän materiaalin avulla. Tarkoituksena ei ollut saada täysin oikeanlaista mitoitusta juuri tähän kohteeseen, vaan haluttiin saada vertailuarvoja tutkimuskohteen tiedoilla, joiden perusteella voisi vetää johtopäätöksiä vastaavia järjestelmiä suunniteltaessa. Kuitenkaan tässä työssä ilmenneitä tietoja ei tulisi käyttää sellaisenaan mihinkään mitoitukseen, koska jokaisessa talossa on niin omanlaiset tarpeet lämmitykselle ja jäähdytykselle.

Aluksi ohjelmaan syötettiin maaperän ominaisuudet. Kohdealueen kallioperä on GTK:n karttojen mukaan kiillegneissia, joten arvona käytettiin sen tyypillistä kirja-arvoa (taulukko 2), joka on  $3,01\text{ W/mK}$ . Volumetriseksi lämpökapasiteetiksi valittiin ohjelman suositus Gneissille ( $2,1\text{ MJ/m}^3\text{K}$ ), maanpinnan lämpötilaksi Jyväskylän säävyöhykkeen keskilämpötila lisättynä kahdella asteella ( $5,43\text{ °C}$ ) ja maaperän lämpövuoksi ohjelman suosittama arvo Ouluun ja Jyväskylään ( $0,04\text{ W/m}^2$ ).

Seuraavaksi syötettiin porausreiän arvot. Aktiivisyvyys ( $192\text{ m}$ ), porareian halkaisija ( $115\text{ mm}$ ) ja kollektorin koko saatiin porausraportista. Liuoksen tilavuusvirraksi asetettiin  $0,64\text{ dm}^3/\text{s}$ , joka on kohteen lämpöpumpun ohjeellinen maksimivirtaama. Täytteen lämmönjohtavuudeksi asetettiin ohjelman suositus vedelle ( $0,6\text{ W/mK}$ ), putken ja kaivonesteiden kontaktiseksi lämpövastukseksi  $0,01\text{ mK/W}$  ja U-putken lämmönjohtokyvyksi  $0,420\text{ W/mK}$ . Putkiväliseksi porakaivossa asetettiin  $60\text{ mm}$ . Lämpökaivon lämpöresistanssiksi asetettiin ohjelma käyttämään vakioarvoja.

Lämmönsiirtonesteeksi valittiin ohjelmasta löytyvä 28 % ja 0 °C:n etanoliliuos. Nesteen arvot olivat lämmönjohtokyky 0,4080 W/mK, ominaislämpökapasiteetti 4216 J/kgK, tiheys 968 kg/m<sup>3</sup>, viskositeetti 0,0063 kg/ms ja jäätymispiste -18,5 °C. Nesteen lämpötilan alarajaksi asetettiin -5 °C ja ylärajaksi 15 °C.

Seuraavaksi asetettiin perus- ja huippukuormat kuukausitasolla. Peruskuormien arvot saatiin IDA ICE-mallinnuksen avulla rakennuksista ja esilämmityspatterille laskettu koko vuoden kuorma jaettiin marraskuu–maaliskuu välille. Huippukuormien löytämiseksi koottiin IDA ICE-ohjelmasta saadut tuntikohtaiset tehot yhteen, ja niiden perusteella etsittiin joka kuukaudelle peräkkäisiä huippukuormatunteja. Huomattiin samalla, että peräkkäisiä huippukuormia ei esiinny kovin paljoa. Perus- ja huippukuormat on kirjattu tarkemmin taulukkoon 4. Simulaatiojaksoksi asetettiin 100 vuotta ja alkuajankohdaksi maaliskuu, joka oli tutkimuskohteen maalämpöpumpun käynnistämiskuukausi.

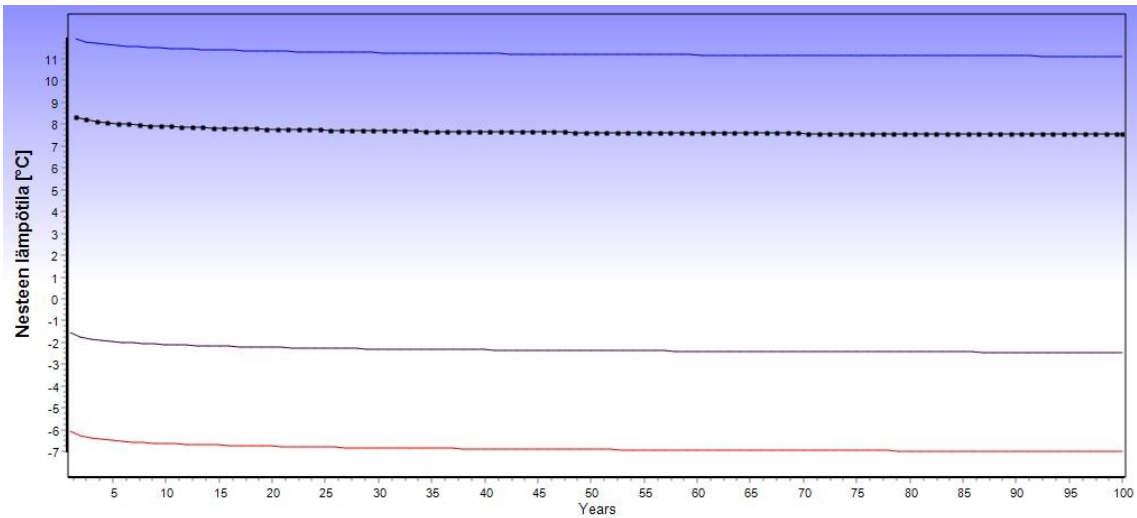
TAULUKKO 3. Perus- ja huippukuormat tutkimuskohteessa.

	Peruskuorma kWh			Huippukuorma kW			
	Lämpö	LKV	Viileä	Lämpö	Kesto	Viilennys	Kesto
Tammikuu	4134	372	0	13	3	0	0
Helmikuu	3569	372	0	13	3	0	0
Maaliskuu	2707	372	0	13	2	0	0
Huhtikuu	1216	372	373	13	2	0	0
Toukokuu	333	372	751	0	0	0	0
Kesäkuu	89	372	845	0	0	5	6
Heinäkuu	18	372	1188	0	0	5	6
Elokuu	105	372	833	0	0	5	5
Syyskuu	553	372	296	0	0	0	0
Lokakuu	1880	372	0	0	0	0	0
Marraskuu	2760	372	0	13	2	0	0
Joulukuu	3850	372	0	13	2	0	0

Tietojen syöttämisen jälkeen ajettiin laskenta, jonka perusteella saatiin graafinen esitys (kuva 15) lämpökaivon käyttäytymisestä. Sininen viiva (ylin) kuvaa jäähdätyksen piikkikuorman aiheuttamaa korkeinta mahdollista liuoksen keskilämpötilaa kaivossa. Musta viiva kuvaa peruskuorman aiheuttamaa korkeinta liuoksen keskilämpötilaa kaivossa. Harmaa viiva kuvaa peruskuorman aiheuttamaa matalinta liuoksen keskilämpötilaa kaivossa. Punainen viiva (alin) kuvaa lämmityksen piikkikuorman aiheuttamaa matalinta liuoksen keskilämpötilaa kaivossa. Kuvaajasta nähdään hyvin



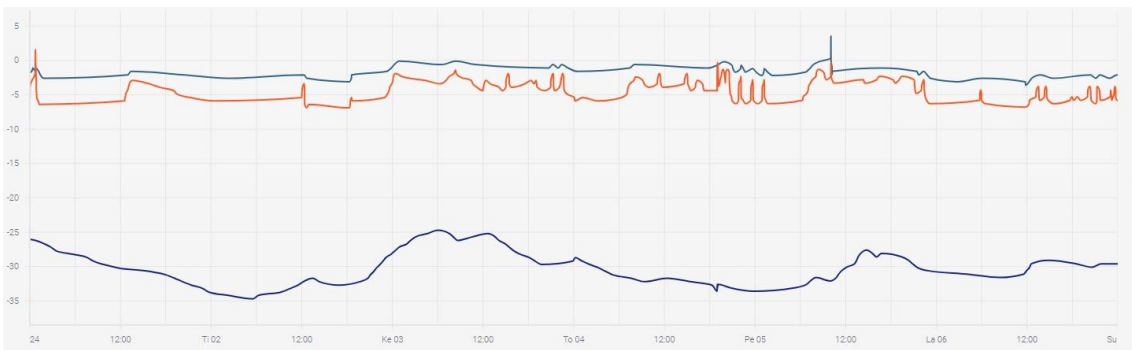
myös se, miten lämpökaivon jäätyminen tapahtuu ensimmäisten käyttövuosien aikana, ja sen jälkeen lämpötilakehitys hidastuu vähäiseksi.



Kuva 15. Tutkimuskohteen energiakaivon toiminnan mallinnus 100 vuoden ajalle.

## 5.5 Johtopäätökset mallinnoista

Energiakaivon mallinnusta verrattiin maalämpöpumpun historialokista löytyviin tietoihin vuoden 2024 ensimmäiseltä viikolta. Kyseisellä viikolla pakkasen vaihteli  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n ja  $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n välillä, joten lämmitysenergian kulutus oli huipussaan. Kuvasta 16 voidaan todeta, että keskimääräinen liuoslämpötila on ollut noin  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , joten voitiin todeta mallinnuksen tulos jokseenkin oikeanlaiseksi.



Kuva 16. NIBE S1255-historialokista liuoslämpötilat ja ulkolämpötila viikolla 1 vuonna 2024.

Mallinnoita energiakaivon käyttäytymisestä eri järjestelmillä tehtiin vielä useita. Kokeiltiin vaihtoehtoja pelkällä maalämpöpumpulla, maalämpöpumpulla ja jäähdytyksellä sekä maalämpöpumpulla

ja esilämmityksellä. Kuormitustiedot muutettiin aina vastaamaan kutakin tilannetta mahdollisimman oikeaksi. Muut pohjatiedot pidettiin vakioina. Taulukkoon 4 koottiin oleelliset arvot laskennoista ylös. Huomattiin nykyisen porakaivon pituuden olevan hiukan vaatimaton ohjelman ratkaisemaan pituuteen nähden ja tästä syystä lämmityksen huippukuormituksella liuoslämpötilassa on noin kahden asteen lämpötilaero. Karkeana johtopäätöksenä esilämmityspatteria varten tulisi energiakaivon syvyyttä lisätä vähintään 20 metriä verrattuna tilanteeseen, jossa kohteessa olisi ainoastaan maalämpöpumppu. Mikäli jäähdystehon tarvetta on paljon, hieman vähempikin voisi riittää.

*Taulukko 4. Eri järjestelmien vaikutusten vertailua energiakaivon pituuteen ja liuoslämpötiloihin.*

Järjestelmä	Maalämpöpumppu Esilämmityspatteri Viilennyspatteri Jäähdytys	Maalämpöpumppu Esilämmityspatteri	Maalämpöpumppu Viilennyspatteri Jäähdytys	Maalämpöpumppu
Kaivon syvyys (m)	192	192	192	192
Korkein liuoslämpötila huippukuormalla (°C)	11,1	4,44	11,2	4,54
Alin liuoslämpötila huippukuormalla (°C)	-6,9	-7,35	-5,61	-5,97
Korkein liuoslämpötila peruskuormalla (°C)	7,54	4,44	7,64	4,54
Alin liuoslämpötila peruskuormalla (°C)	-2,46	-2,81	-1,62	-1,97
EED:n ratkaisemilla pituuksilla				
kaivon syvyys (m)	223	228	201	207
Korkein liuoslämpötila huippukuormalla (°C)	10,7	-5	-5,03	-5
Alin liuoslämpötila huippukuormalla (°C)	-4,97	4,99	11,1	4,78
Korkein liuoslämpötila peruskuormalla (°C)	7,61	4,99	7,65	4,78
Alin liuoslämpötila peruskuormalla (°C)	-1,04	-1,15	-1,2	-1,28

Tutkimuskohteessa ei ole tehty TRT-mittausta, joten tarkkoja arvoja kallioperän lämmönjohtavuudesta, lämpötilasta ja porakaivon lämmönvastoista ei ole selvillä. Energiakaivon alkuperäisessä mitoituksessa on käytetty hieman korkeampaa arvoa kallioperän lämmönjohtavuudelle, joten näiden mallinnojen perusteella ei voida varmuudella todeta energiakaivoa riittämättömäksi. Paljon on myös siitä kiinni, minkä verran lämpökaivossa on pohjavesivirtausta ja kuinka paljon energiakaivon todellisuudessa ladataan lämpöä takaisin jäähdytyskaudella. Kyseisessä tutkimuskohteessa on ilmanvaihtokoneen poistoilman lämpötila 1.5.2023–31.8.2023 välisenä aikana vaihdellut 20–25 °C:n välillä, joten vaatisi tarkempia mittauksia varmistua latausenergian määrästä.

## 6 ESILÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KANNATTAVUUDEN ARVIOINTI

LCC (Life Cycle Costing) eli elinkaarikustannuslaskenta kertoo tuotteen tai järjestelmän kustannuksen kokonaisuudessaan. Siinä otetaan huomioon tarkasteltavan kohteen osalta investointi- ja käyttökustannukset, mutta myös käytöstä poistaessa aiheutuvat kustannukset. Sen avulla on mahdollista löytää kokonaistaloudellisin ratkaisu. (Motiva 2018.)

Tämän opinnäytetyön yksi selkeä tavoite oli saada arvioitua järjestelmän kannattavuutta taloudellisesti. Kustannuslaskenta päätettiin kuitenkin toteuttaa kevennetysti, eli laskettiin esilämmitysjärjestelmän aiheuttamat lisäykset hankintavaiheessa sekä niiden käytöstä aiheutuvat lisäkustannukset. Kustannusten arvioinnissa käytettiin tutkimuskohteen tietoja hyväksi arvioitaessa energiankulutusta ja tarvikkeita. Korot jätettiin huomioimatta laskennoissa.

### 6.1 Hankinta- ja käyttökustannukset

Kannattavuuden arvioinnissa oletettiin, että uuteen asuinrakennukseen olisi joka tapauksessa tulossa maalämpöjärjestelmä sekä koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä. Näin niiden hankinta- ja huoltokustannukset voidaan jättää huomioimatta ja esilämmitysjärjestelmän hankintakustannuksetkin ovat pienemmät. Tarvikelistat koottiin allekirjoittaneen kokemuksen perusteella aiemmin toteutetuista vastaavista järjestelmistä. Liitteeseen 5 kirjattiin laitteiston hankinta- ja uudistamiskustannukset ja ne koottiin taulukkoon 5.

TAULUKKO 5. Esilämmitysjärjestelmän hankintakustannukset.

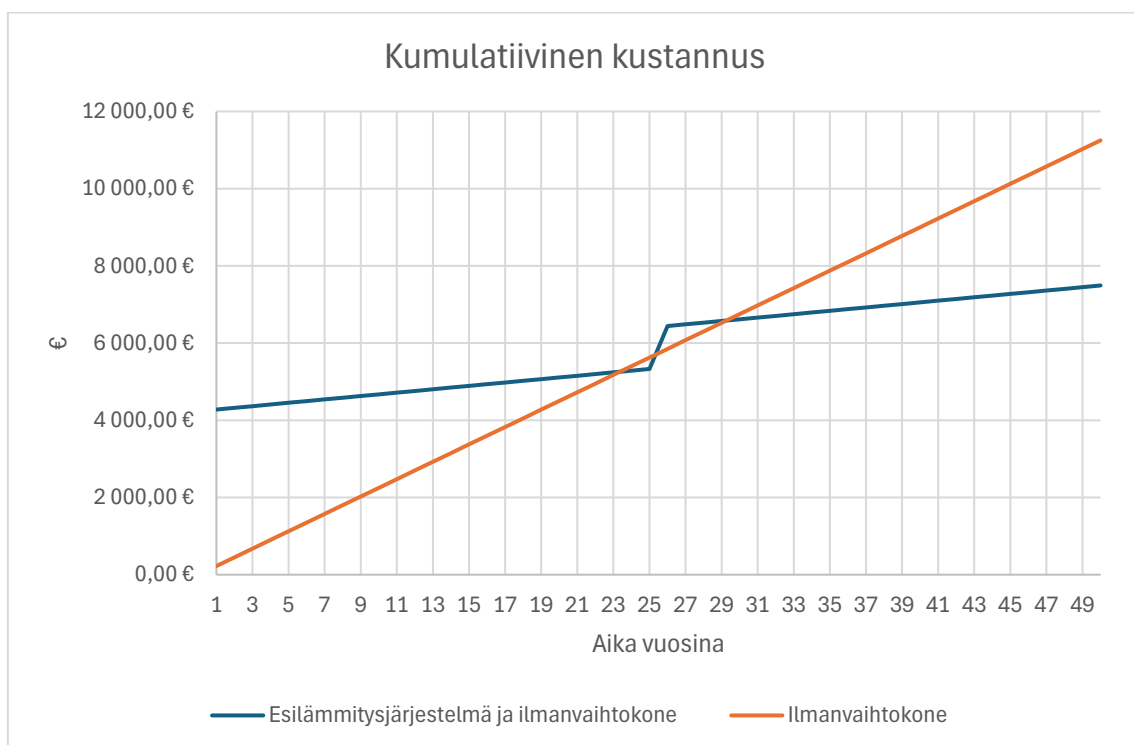
LVI-tarvikkeet	2992,56 €
Sähkötarvikkeet	136,40 €
Työt	1105,00 €
Yhteensä	4233,96 €

RT 10-10922 (2008)-ohjekortissa kerrotaan kiinteistöjen laitteiden tekniset käyttöiät. Kupariputkiston käyttöiäksi mainitaan vähintään 50 vuotta. Pumpuille, venttiileille ja liuospattereilla annetaan normaalissa käytössä käyttöiäksi noin 25 vuotta. (RT 1010922 2008, 17, 23.)

Tässä työssä oletettiin, että laitteet kestävät 25 vuotta ilman moitteita ja järjestelmän ylläpidoksi riittää suodattimen vaihto kanavapatterille kaksi kertaa vuodessa. 25 vuoden jälkeen vaihdettavaksi tulisi sähköosat ja linjasäätöventtiili. Muiden komponenttien oletettiin kestävän 50 vuotta.

Sähköä kuluttavia laitteita järjestelmässä on magneettiventtiili ja kiertovesipumppu, ja niiden ottamaksi tehoksi oletettiin 80 wattia. Koska kanavapatteri aiheuttaa painehäviötä kanavistossa, kuluttaa tuloilmapuhallin enemmän sähköä. Valmistajan mitoitusohjelmalla (Vallox MySelecta) tehdyn mitoituksen perusteella saatiin puhaltimien väliseksi kulutuseroksi 7 wattia, joka otettiin huomiin käyttökustannuksia laskiessa. Sähkön hintana käytettiin 0,18 €/kWh sisältäen energian (Oomi 24kk), siirron (Elenia) ja perusmaksut. Hankinta- ja käyttökustannukset listattiin liitteeseen 6.

Esilämmitysjärjestelmän hankinta- ja käyttökulujen perusteella luotiin kumulatiivinen esitys (kaavio 10), jossa sinisellä kuvaajalla kulkee esilämmitysjärjestelmän kustannukset hankinta- ja käyttöku- luineen vuosittain. Oranssilla kuvaajalla kuvattiin järjestelmän toteutusta pelkällä ilmanvaihtokoneella, jossa jälkilämmitysvastus huolehtii ilman lämmittämisestä esilämmityksen sijasta. Oranssilla kuvaajalla on kuvattu vain se kulu, joka esilämmityksellä olisi mahdollista säästää.



Kaavio 9. Esilämmitysjärjestelmän ja normaalin ilmanvaihtojärjestelmän kumulatiivinen kustannus.

Tuntitason LTO:n laskennan perusteella esilämmitysjärjestelmällä saadaan vähennettyä noin 1250 kWh jälkilämmitysvastuksen käyttöä. Laskennassa käytettiin 80 % tuloilman lämpötilasuhteena. Mikäli lämpötilasuhte olisi parempi, lukema olisi luultavasti hieman suurempi.

Kaaviosta 10 voidaan todeta, että esilämmitysjärjestelmään investointi ei sellaisenaan vaikuta kovin järkevältä ja takaisinmaksuaikakin olisi 30 vuotta, mikäli järjestelmä toimisi toivotulla tavalla eli yli odotusten ilman ainuttakaan vikaa. Järjestelmän hankintakustannukset ovat saatuun hyötyyn nähden liian suuret. Järjestelmän hankintakustannuksien hinnat poimittiin verkkohakujen perusteella, ja niissä olisi varmasti jonkin verran säästämahdollisuutta. Toisekseen sähkön hinnalla tulee olemaan myös suuri merkitys takaisinmaksu-aikaan. Mikäli energian hinta laskisi pysyvästi 20 prosenttia, pitenis takaisinmaksu-aika 38 vuoteen. Jos energian hinta nousisi pysyvästi 20 prosenttia, päästäisiin 20 vuoden tietämällä säästön puolelle.

On myös hyvä huomioida, että korkojen osuutta arvioinnissa ei ole vielä otettu huomioon. Mikäli käytetään investointikannattavuuslaskuria (Kuntaliitto 2018), olisi hanke kannattava ainoastaan silloin, kun laskentakorkokanta olisi 2,8 % tai vähemmän, kun kannattavuutta arvioidaan annuiteettitai nykyarvomenetelmällä (liite 7). Tällä hetkellä pankkilainojen korot (euribor + pankin marginaali) liikkuvat 4,5 %:n paikkeilla, joten näkymät ovat hieman huonot investoinnille tällaisenaan.

Esilämmitysjärjestelmään investointi kuitenkin mahdollistaa saman järjestelmän käyttämisen huoneisiin puhallettavan tuloilman viilennykseen. Esimerkiksi tuloilmavirran ollessa 94 dm<sup>3</sup>/s, kuten tässä työssä käsitellyssä tutkimuskohteessa, olisi tuntuvaa jäähdytystehoa saatavilla noin 1100 wattia, jos tuloilman ja sisäilman lämpötilaerona olisi 10 °C. Tehostustilanteessa jäähdytystehoa olisi noin 1500 wattia 10 °C:n lämpötilaerolla. Lisäksi sisään puhallettava ilma kuivuu kanavapatterissa, mikä sekin tuo viihtyisyyden tuntua. Tutkimuskohteen tapauksessa kiertovesipumpun ja magneettiventtiilin maksimienergiankulutus oli 80 wattia tunnissa ja viilennyskäytössä kiertovesipumppua ei tarvinne käyttää maksimiteholla, joten tuntuvaa viilennystä saadaan tuotettua kulutettuun sähköön nähden vähintään 13-kertaisesti.

Pientalojen ilmanvaihtokoneissa yleensä kanavapatterin käyttöä ohjataan ulkolämpötilan perusteella. Tutkimuskohteen tapauksessa ilmanvaihtokoneen asetuksista määritellään, millä ulkolämpötilalla viilennys käynnistetään. Todellisessa tilanteessa tuloilman lämpötilalle asetetaan minimiraja sekä lämpötila, jossa ohjaus pyrkii pitämään tuloilman lämpötilan lämmöntalteenottoa kokonaan tai osittain hyödyntämällä. Koska ilmanvaihtokoneessa ei ole muuta ohjausta kuin pumpun

käynnistystieto, täytyy ilmanvaihtokoneen LTO:lla lämmittää ilmaa, mikäli se kanavapatterin jälkeen on liian viileää.

IDA ICE-mallinnuksessa viilennys käynnistyi, kun ulkolämpötila ylitti 15 °C, ja silloin tuloilman lämpötila pidettiin asetusarvossa 15. Tällä ohjausvalinnalla ilmanvaihtokoneella tuotettiin viileää 536 kWh simulointivuotena. Viilennystä iv-koneella tehtiin 983 tuntia, jolloin sähköä kulutettiin maksimissaan 79 kWh, eli viilennystehoa saatiin 457 kWh ostamalla sähköä 79 kWh. Mikäli rakennuksen aurinkosuojaus on kunnossa ja tuloilmavirtaa on mahdollista kasvattaa (tehostus), voi tällä järjestelmällä saada pidettyä sisäilman siedettävänä kesällä. Jos tuloilmakanaviston eristys on varmasti hyvä ja diffuusiotiivis, on mahdollista puhaltaa tuloilma vieläkin viileämpänä asuntoon, jolloin viilennysteho kasvaa huomattavasti aiemmasta.

Varsinkin suuria ikkunapintoja sisältävässä rakennuksessa viilennystä tai jäähdytystä tarvitaan muulloinkin kuin yli 15 °C:n ulkolämpötiloilla. Kevätaurinko voi nostaa huonelämpötilan huomattavan korkeaksi, vaikka ulkolämpötilan perusteella viilennystarvetta ei olisikaan. Tähän tarpeeseen voidaan vastata, mikäli viilennyspatterin toimintaa ohjataan ilmanvaihtokoneen poistoilman lämpötilan perusteella. Mikäli poistoilman lämpötilan asetusarvoksi asetellaan jäähdytysrajana aiemmin hyödynnetty 23 °C, ilmanvaihtokone käynnistää viilennyksen kiertovesipumpun, jos poistoilman lämpötila on suurempi kuin asetusarvo. Lisäksi useissa ilmanvaihtokoneissa automatiikka kasvattaa puhallinnopeutta automaattisesti, jos asetusarvossa ei pysytä tai siihen ei päästä. Kun annetaan ilmanvaihtokoneen tällä tavalla ohjata viilennystä, on todellisuudessa viilennyspatterista saatava energia paljon suurempi kuin tutkimuskohteen IDA ICE-mallinnuksen 536 kWh. Poistoilman lämpötilan perusteella viilennystä ohjattaessa tulee kuitenkin varmistua siitä, ettei rakennuksen lämmitysjärjestelmä yritä samaan aikaan lämmittää rakennusta.

Jäähdytyspuhallinkonvektorin investointi esilämmitysjärjestelmän rinnalle ei lisänne kustannuksia ilmalämpöpumpun hankkimista enempää rakennusvaiheessa, mikäli jäähdytystä halutaan rakennukseen joka tapauksessa. Jäähdytysjärjestelmien energialaskentaoppaan 2011 (s. 6) mukaan vapaajäähdytyksellä tuotetun jäähdytysenergian vuotuisena kylmäkertoimena voisi olla jopa 30 eli liuoksen pumppaukseen ja puhallinkonvektorin käyttämään sähköön nähden jäähdytystä on mahdollista tuottaa 30-kertaisesti.

Kun lasketaan kannattavuutta järjestelmälle, jossa on esilämmitys- /viilennyspatteri ja puhallinkonvektori, saataneen takaisinmaksuaikakin järkevämmäksi vertailtaessa kustannuksia ilmalämpöpumpun käyttöön. Kuitenkin järjestelmiä valittaessa on rakennuksen lämmitys- ja jäähdytystehontarpeilla isoin merkitys. Esilämmityspatterin valinnassa ulkoilmavirran määrällä on suuri merkitys, sillä tavallisesti ulkoilmavirran määrä pientaloissa on noin 50–120 dm<sup>3</sup>/s. Työn tuloksena voi todeta, että vaikea järjestelmästä on saada kannattava 94 dm<sup>3</sup>/s ulkoilmavirrallakaan, joten siihen investoiminen vaatii harkintaa. Tulevaisuudessa järjestelmän kannattavuus voi parantua mahdollisen energian hinnan nousun myötä.

## 7 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää kanavapatterilla toteutetun esilämmitys- ja viilennysjärjestelmän kannattavuutta, mutta myös vaikutuksia maalämpökaivon mitoittamiseen. Aiheena esilämmitys ja viilennys kanavapatterilla oli itselleni mielenkiintoinen ja ajankohtainen, kun kyseisiä järjestelmiä olen toimintaan saattanut useita, tietämättä tarkemmin sen vaikutuksia ja hyötyjä. Halusin haastaa itseäni käyttämällä työssäni teoretiedon lisäksi monipuolisesti erilaisia laskentatyökaluja.

Hankkiessani mittalaitteita lämpötilojen pitkäaikaisseurantaan varten, suunnittelin tekeväni lämpötilaseurantaan useammassa kohteessa, jotta tutkimus olisi laajempi ja ottaisi paremmin huomioon talojen erilaisuuden. Tarkemmin resursseja harkittuani päätin typistää mittaukset tämän työn osalta yhteen tutkimuskohteeseen, jotta saisin pitemmän mittausjakson laskennan tueksi. Mittalaitteet tilattuani ajattelin kuitenkin, että tässä työssä tehtyjen hyvien pohjatöiden jälkeen jatkan mittauksia kesäajan yli ja pyrin saamaan vastauksen kanavapatterin todellisesta viilennyspotentiaalista. Lämmönkeruuliuoksen ja ilmavirran mittaukset tehtiin kertamittauksena puhtailla suodattimilla ilma- ja liuospuolelle. Virtausmittauksien tuloksia pääsen hyödyntämään vielä kesäajan viilennyksen mitaamisessa, kun ilmaa jäähdyttämällä täytyy huomioida tuntuva ja sitoutumaton teho.

Opinnäytetyön aikana löysin kattavasti materiaalia energialaskennasta ja sain niistä tarvittavat tiedot päästäkseni edistymään työn suorittamisessa. Aluksi käsittelin yleisesti ilmanvaihto- ja maalämpöjärjestelmistä teoretietoa, jotta saisin johdateltua lukijan ymmärtämään paremmin, mihin esilämmitysjärjestelmä lopulta tulee vaikuttamaan kyseisissä järjestelmissä. Tietoperustana opinnäytetyössä käytin talotekniikka-alalla yleisesti käytössä olevia oppikirjoja, kylmäteknikan kirjallisuutta sekä ympäristöministeriön asetuksia, ohjeita ja niiden perusteella luotuja oppaita. Lämpötilamittauksien osalta olin ajatellut, että saisin talteen kovimmatkin pakkasjaksot, jotta saisin luotettavasti osoitettua esilämmityspatterin toiminnan silloinkin. Mittausjaksolle ei kuitenkaan alle  $-10\text{ °C}$ :n lämpötiloja osunut kuin noin 150 tuntia ja kylmin mitattu lämpötila oli noin  $-27\text{ °C}$ .

Opinnäytetyön suorittamiseksi sain käyttööni Earth Energy Designer- ja IDA ICE -ohjelmat. Ohjelmat olivat minulle ennestään melko tuntemattomia, joten niiden käyttöä opettelini työn aikana valmistajien ohjekirjoista ja muista verkkolähteistä, kuten EQUA Simulation AB:n YouTube-kanavalta. Ohjelmista sain merkittävän lisäarvon työlleni. Energialaskennan osalta kuukausitason laskenta ja



CADMATIC-energiälaskenta olisivat olleet riittäviä, mutta IDA ICE mahdollisti useamman erilaisen vaihtoehdon simuloimisen, ja niiden vaikutuksien kautta oli mahdollista miettiä työhön liittyen järkeviä ratkaisuja.

Tutkimuskohteen mittausdatan ja muiden laskentojen perusteella saadut tulokset olivat osittain odotettuja, mutta osittain myös yllättäviä. Esilämmityspatterilla saatava hyöty jäi mielestäni pieneksi taloudelliseen panostukseen nähden pitkän takaisinmaksuajan vuoksi. Vaikka tutkimuskohteessa oli mallinnuksen perusteella jäähdytyksen energiantarve noin kolminkertainen esilämmitykseen käytettävään energiaan verrattuna, ei sillä ollut merkittävää vaikutusta mitoittaessa maalämpökaivoa. Tämä selittynee sillä, että esilämmityspatterin käyttäessä suurinta tehoa talvella myös maalämpöpumppu ottaa rakennuksen lämmittämiseen samaan aikaan suurta tehoa ja sitä kautta tehonotto talvella on merkittävä maalämpökaivon mitoituksen kannalta. Mikäli opinnäytetyöhön olisi saatu mukaan myös kesäajan mittaukset viilennyksen toiminnasta, olisi luotettavammin voitu osoittaa järjestelmän kannattavuutta.

Tutkimusta voisi myös laajentaa tulevaisuudessa siten, että jättäisi ensin yhdeksi talveksi ilmanvaihtokoneen toimimaan omillaan ja seuraavana talvena suorittaisi samat mittaukset esilämmityspatteria apuna käyttäen. Samassa mittauksessa voisi mitattavaksi ottaa myös jälkilämmityspatterin kulutuksen mittauksen. Mikäli talvista lämpötilaa olisi pitempinä ajanjaksoina, olisi mittaukset mahdollista suorittaa jopa yhden talven aikana vuorokäytöllä, vaikkapa kahden viikon mittaisina sykleinä.

Tutkimuksen tekeminen kaikkine vaiheineen oli mielenkiintoinen ja ammatillisesti kasvattava prosessi. Laskentaa en avannut yksityiskohtaisesti työssäni, koska se olisi kasvattanut työn mittaa merkittävästi. Ajattelin pystyväni luotettavasti kertomaan asioista ilman yksityiskohtaista raportointiakin, koska nostin mielestäni esille oleellisimmat asiat ja listasin ne työhön ja liitteisiin. Kanavapatterin erilaisia kytkentävaihtoehtoja en tarkoituksella ottanut esille, koska niillä ei mielestäni ollut lopputuloksen kannalta merkittävää vaikutusta. Jos järjestelmään liitettäisiin ulkoista automatiikkaa, voisi järjestelmän toiminta parantua. Ulkoisen automatiikan lisääminen lisäisi järjestelmän hankintakustannusta, eikä automatiikkaan investoimalla välttämättä saavutettaisi tässä järjestelmässä taloudellista hyötyä. Ilman tarkempia tutkimuksia sitäköön ei voida luotettavasti arvioida.

## LÄHTEET

Aittomäki, Antero 2012. Lämpöpumput. Teoksessa Kylmäteknikka (toim. Antero Aittomäki), 336–359. 4. painos. Helsinki. Suomen Kylmäyhdistys ry.

Aittomäki, Antero, Hannu, Petri & Aalto, Esa 2015. Lämpöpumput – vaikeuksien kautta voittoon. Teoksessa Kylmäala muutosten pyörteissä (toim. Esa Aalto), 109–124. Helsinki: Suomen Kylmäyhdistys ry.

Blocon Ab 2021. EED – Earth Energy Designer. Verkkoaineisto. Hakupäivä 10.4.2024. <https://buildingphysics.com/eed-2/>.

Cool-IN 2021. Tekninen tuoteseloste Cool-IN maalämpöpumpulle. NIBE Energy Systems Oy. Hakupäivä 19.4.2024. <https://assetstore.nibe.se/hcms/v2.3/entity/document/19186/storage/MDE5MTg2LzAvbWFzZdGVy>.

EQUA 2023. IDA Indoor Climate and Energy. Hakupäivä 25.4.2024. <https://www.equa.se/fi/ida-ice>.

FINVAC 2019. Opas asuinrakennuksen ilmanvaihdon mitoitukseen. Hakupäivä 4.4.2024. [https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/opas\\_asuinrakennusten\\_ilmanvaihdon\\_mitoitukseen\\_2019.pdf](https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/opas_asuinrakennusten_ilmanvaihdon_mitoitukseen_2019.pdf).

GTK 2019. Geoenergia. Geologia.fi 31.12.2019. Hakupäivä 9.4.2024. <https://www.geologia.fi/2019/12/31/geoenergia/>.

Hakala, Pertti & Kaappola, Esko 2022. Kylmälaitoksen suunnittelu. 6. painos. Helsinki. Opetushallitus.

Heinonen, Jarkko & Vuolle, Mika 2016b. Ilmastoinnin energiantarpeen laskenta sekä olosuhde- ja energiasimulointi. Teoksessa Ilmastointilaitoksen mitoitus. Ilmastointitekniikka osa 2 (toim. Esa Sandberg), 447–466. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Huusko, Asmo 2014. Energiakaivokentän mitoituksen perusteet. Koulutuspäivät 2014. Suomen Kylmäyhdistys ry.

Ilmatieteenlaitos 2020. Energialaskennan testivuodet 2020. Hakupäivä 4.2.2024. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/energialaskenta-try2020>.

Ilmatieteenlaitos 2021. Ilmastollinen vertailukausi 1991–2020. Hakupäivä 9.4.2024. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmastollinen-vertailukausi>.

Juvonen, Janne & Lapinlampi, Toivo 2013. Ympäristöopas 2013. Energiakaivo. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas 2013. Helsinki. Ympäristöministeriö. Hakupäivä 2.4.2024. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4211-6>.

Jäähdytysjärjestelmien energialaskentaopas 2011. Hakupäivä 20.4.2024. [https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/jaahdytys\\_laskentaopas\\_2011.pdf](https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/jaahdytys_laskentaopas_2011.pdf).

Kosonen, Risto & Sandberg, Esa 2016a. Päätelaitteet ja huonelaitteet. Teoksessa Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointitekniikka osa 1 (toim. Esa Sandberg), 225–240. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Kuntaliitto 2018. Kustannuslaskenta. Hakupäivä 30.4.2024. <https://www.kuntaliitto.fi/talous-ja-elinvoima/budjetointi-ja-taloussuunnittelu/kustannuslaskenta>.

Leppäharju, Nina 2008. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Oulun yliopisto. Fysikaalisten tieteiden laitos. Pro gradu -tutkielma. Hakupäivä 2.4.2024.

LVI 014-10190 1992. Ilmastointi. Ilmavirtojen ja painesuhteiden mittaus ilmastointilaitoksissa. Rakennustietosäätiö.

LVI 11-10332 2002. Lämpöpumput. Rakennustietosäätiö.

LVI 30-10529 2013. Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho SFP. Rakennustietosäätiö.

LVI 11-10623 2018. Maalämpöpumput. Pientalot. Rakennustietosäätiö.

Mentula, Jukka 2012. Ilmastoinnin jäähdytys. Teoksessa Kylmäteknikka (toim. Antero Aittomäki), 321–335. 4. painos. Helsinki. Suomen Kylmäyhdistys ry.

Motiva 2018. Elinkaarikustannuslaskenta – LCC (Life Cycle Costing). Hakupäivä 27.4.2024. [https://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/kestavat\\_julkiset\\_hankinnat/tietopankki/elinkaarikustannuslaskenta\\_lcc\\_%28life\\_cycle\\_costing%29](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/elinkaarikustannuslaskenta_lcc_%28life_cycle_costing%29).

Mäkinen, Pekka, Tammivaara, Heikki, Paasio, Ilkka, Sandberg, Esa & Lönnström, Jyrki 2016a. Ilmastointikoneet ja -konehuoneet. Teoksessa Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointitekniikka osa 1 (toim. Esa Sandberg), 155–212. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

NIBE. Pientalojen maalämpöpumppuopas. NIBE MLP-OPAS 1508-9. Hakupäivä 2.4.2024. <https://installer.nibe.eu/download/18.2f77694717c7dac18ea1abc/1635770466669/PIENTALO-JEN%20NIBE%20MLP%20OPAS%201508-09.pdf>.

NIBE. Cool-IN Comfort maalämpöpumpulle. Hakupäivä 19.4.2024. <https://installer.nibe.eu/fi/tuotteet/viilennys/cool-in-comfort>.

Ripatti, Harri, Railio, Jorma & Sandberg, Esa 2016a. Kanavat ja varusteet. Teoksessa Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointitekniikka osa 1 (toim. Esa Sandberg), 213–224. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

RT 18-10922 2008. Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossa pitojaksot. Rakennustietosäätiö.

Sandberg, Esa 2016a. Kosteus ilmassa. Teoksessa Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointitekniikka osa 1 (toim. Esa Sandberg), 81–96. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Sandberg, Esa & Ripatti, Harri 2016a. Ilmanvaihtojärjestelmät. Teoksessa Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointitekniikka osa 1 (toim. Esa Sandberg), 113–128. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Silvan, Jari, Kauppila, Kari & Kaappola, Esko 2016a. Jäähdytysjärjestelmät. Teoksessa Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointitekniikka osa 1 (toim. Esa Sandberg), 241–286. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

SULPU 2023. Lämpöpumpputilasto 2023, kuvaajat. Hakupäivä 9.4.2024. <https://drive.google.com/file/d/1iW2L0QMw1VApkZSw3ZOSWgBG7pADiEO7/view>.

Suutari, Tero. COP vs. SCOP – Hyötysuhteiden erot. Nilan Suomi Oy. Hakupäivä 10.4.2024. <https://www.nilan.fi/energiansaasto/cop-vs-scop-hyotysuhteiden-erot/>.

Swecon CASA 2019. Swecon CASA kanavapatteri maalämpöpumpun yhteyteen. Hakupäivä 2.4.2024. [https://www.swegon.com/siteassets/product-documents/home-ventilation/accessories/fi/sdhwm\\_c\\_fi-m.pdf](https://www.swegon.com/siteassets/product-documents/home-ventilation/accessories/fi/sdhwm_c_fi-m.pdf).

Swegon 2023. CASA-kanavapatteri. Tuote-esite 2023. Hakupäivä 4.4.2024. [https://www.swegon.com/siteassets/product-documents/home-ventilation/accessories/fi/casa\\_heating\\_and\\_cooling\\_coils\\_fi\\_p.pdf](https://www.swegon.com/siteassets/product-documents/home-ventilation/accessories/fi/casa_heating_and_cooling_coils_fi_p.pdf).

Talotekniikkainfo 2023. Sisäilmasto- ja ilmanvaihto-opas, päivitetty 7.6.2023. Hakupäivä 2.4.2024. <https://talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas>.

Talotekniikkainfo 2021. Jäähdytys ja viilennys. Hakupäivä 19.4.2024. <https://talotekniikkainfo.fi/ratkaisut-etusivu/jaahdytys-ja-viilennys>.

Tammertekniikka 2005. Tekniikan kaavasto. Tampere. Amk-Kustannus Oy.

Tasauslaskentaopas 2018. Rakennuksen lämpöhäviön määräystenmukaisuuden osoittaminen. Hakupäivä 2.4.2024. [https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Tasauslaskentaopas-2018-310317-181217-\(002\)-8DA891B6\\_94AC\\_4367\\_9E45\\_D59ECED00CCF-133703.pdf/acb4fd5e-e622-c6e7-c0f0-97aa59de0886/Tasauslaskentaopas-2018-310317-181217-\(002\)-8DA891B6\\_94AC\\_4367\\_9E45\\_D59ECED00CCF-133703.pdf?t=1603260250564](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Tasauslaskentaopas-2018-310317-181217-(002)-8DA891B6_94AC_4367_9E45_D59ECED00CCF-133703.pdf/acb4fd5e-e622-c6e7-c0f0-97aa59de0886/Tasauslaskentaopas-2018-310317-181217-(002)-8DA891B6_94AC_4367_9E45_D59ECED00CCF-133703.pdf?t=1603260250564).

Vallox 2021. Vallox MLV Multi 200/250 -lämmitys-viilennyskanavapatteri. Hakupäivä 2.4.2024. [https://res.cloudinary.com/vallox/image/upload/v1683801740/FileStock/AllManuals/Manual\\_Vallox\\_MLV\\_Multi\\_200\\_250\\_FIN\\_SWE\\_ENG\\_20141030.pdf](https://res.cloudinary.com/vallox/image/upload/v1683801740/FileStock/AllManuals/Manual_Vallox_MLV_Multi_200_250_FIN_SWE_ENG_20141030.pdf).

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017. Hakupäivä 2.4.2024. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009>.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017. Hakupäivä 2.4.2024. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>.

Ympäristöministeriö 2018. Energiatehokkuus. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Hakupäivä 2.4.2024. [https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ohje---Rakennuksen-energiankulutuksen-ja-lammitystehontarpeen-laskenta-20-12-2017-4332AA81\\_75E1\\_4CA0\\_B208\\_B0ACB60A267F-133692.pdf](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ohje---Rakennuksen-energiankulutuksen-ja-lammitystehontarpeen-laskenta-20-12-2017-4332AA81_75E1_4CA0_B208_B0ACB60A267F-133692.pdf).

Ympäristöministeriö 2024. EU:n uusi asetus hillitsee fluorattujen kasviuonekaasujen päästöjä. Valtioneuvosto. Hakupäivä 9.4.2024. <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/eu-n-uusi-asetus-hillitsee-fluorattujen-kasviuonekaasujen-paastoja>.

## LIITTEET

Tutkimuskohteen tiedot Liite 1

Energialaskennassa käytetyt tiedot Liite 2

Mittauspöytäkirja Liite 3

Lämpötilamittaukset Liite 4

Esilämmitysjärjestelmän hankintakustannus Liite 5

Esilämmitysjärjestelmän käyttökustannus Liite 6

Investointikannattavuuslaskuri esilämmitys Liite 7

## TUTKIMUSKOHTTEEN TIEDOT

LIITE 1/1

Rakennuksen vaippa:

Ulkoseinät	A 99 m <sup>2</sup> , U-arvo 0,17 W/m <sup>2</sup> K
Yläpohja	A 157 m <sup>2</sup> , U-arvo 0,09 W/m <sup>2</sup> K
Alapohja	A 157 m <sup>2</sup> , U-arvo 0,13 W/m <sup>2</sup> K
Ikkuna	A 63,8 m <sup>2</sup> , U-arvo 0,90 W/m <sup>2</sup> K
Ulko-ovet	A 6,90 m <sup>2</sup> , U-arvo 0,90 W/m <sup>2</sup> K

Kylmäsilat:

Ikkuna ja ovi	151,9 m, 0,04 W/mK
Ulkoseinä - yläpohja	62 m, 0,05 W/mK
Ulkoseinä - alapohja	62 m, 0,1 W/mK
Ulkonurkat	17,2 m, 0,04 W/mK
Sisänurkat	5,2 m, -0,04 W/mK

Ikkunat ilmansuunnittain:

Koillinen	A 15,40 m <sup>2</sup> , U-arvo 0,90 W/m <sup>2</sup> K, g <sub>kohtisuora</sub> -arvo 0,5
Kaakko	A 18,10 m <sup>2</sup> , U-arvo 0,90 W/m <sup>2</sup> K, g <sub>kohtisuora</sub> -arvo 0,5
Lounas	A 12,70 m <sup>2</sup> , U-arvo 0,90 W/m <sup>2</sup> K, g <sub>kohtisuora</sub> -arvo 0,5
Luode	A 17,60 m <sup>2</sup> , U-arvo 0,90 W/m <sup>2</sup> K, g <sub>kohtisuora</sub> -arvo 0,5

Ilmanvaihtojärjestelmä:

IV-kone	Vallox 145 MV L
Kanavapatteri	Vallox MLV 250
Ulkoilmavirta	suunniteltu 94 l/s
Poistoilmavirta	suunniteltu 96 l/s
Painehäviö <sub>ELP</sub>	28 Pa
Painehäviö <sub>UI+TI</sub>	78 Pa (suunnitteluarvo)
Painehäviö <sub>UPI+PI</sub>	47 Pa (suunnitteluarvo)



## Tutkimuskohteen tiedot

LIITE 1/2

Ilmanvaihtokone:

$P_{\text{puhaltimet}}$	122 W
$T_{\text{UP, minimi}}$	-5,8 °C
$T_{\text{UP, minimi todellinen}}$	0,88 °C (Keskiarvolämpötila Valloxin lokista, kun $T_u < 0$ °C)
Tuloilman lämpötilasuhde	80 % (EN308)
Poistoilman vuosihyötysuhde	76 % (Vallox mitoitus)
SFP	1,27 kW/(m <sup>3</sup> /s)

Lämmönkeruu:

Porakaivo	40 mm x 2,4 mm x 2*200 m, Turbocollector
Siirtoputki	40 mm x 2,4 mm x 2*13 m
Liuos	Naturet 28 p-% etanoliliuos
Kiertovesipumppu	Wilo Yonos Pico 25/1-8 ( $P_{\text{max}}$ 75 W)
Magneettiventtiili NC	DN20, 5 W

Ilmanvuotoluku:

$Q_{50}$	0,297 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> (mitattu)
----------	---

Pinta-alat ja tilavuudet:

Huoneistoala	157 m <sup>2</sup>
Kerrosala	173 m <sup>2</sup>
Rakennustilavuus	680 m <sup>3</sup>
Sisätilavuus	465 m <sup>3</sup>

Puhallinkonvektori:

Sabiana CVP-ECM-T 4	
Suurin sähkön ottoteho	30 W

## ENERGIALASKENNASSA KÄYTETYT TIEDOT

LIITE 2

LKV kulutus	4200 kWh/a
LKV varastointi	480 kWh/a
$T_s$ (°C)	21
$T_{sp}$ (°C)	18
$\Delta T_{puhallin}$ (K)	0
$T_{s, jäähditys}$ (°C)	23
$C_{rak}$ (Wh/m <sup>2</sup> K)	70
$\eta_{lämmitys, tilat}$	0,8
$\eta_{LKVsiirto}$	0,92
$\eta_{tuotto}$	1
$\eta_{jäähditys}$	0,9
$e_E$	30
Sähkö $e_{tilat}$ (kWh/m <sup>2</sup> a)	2,5
$P_{valaistus}$ (kW/m <sup>2</sup> )	0,006
$P_{kuluttajalaitteet}$ (kW/m <sup>2</sup> )	0,003
$P_{ihmiset}$ (kW/m <sup>2</sup> )	0,002
$A_{netto}$ (m <sup>2</sup> )	157
$A_{kerrosala}$ (m <sup>2</sup> )	173
$V_{rakennus}$ (m <sup>3</sup> )	465
Ilmanvuotoluku (m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	0,297
$x$	35,00
Avaippa (m <sup>2</sup> )	483,7
$\rho_i$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,2
$c_{p,i}$ (J/kgK)	1006
$\eta_{LKV, varastointi}$	50 %
$g_{kohtisuora}$	0,5
$g$	0,45
$F_{kehä}$	0,9
$F_{verho}$	0,75 (IDA ICE:ssa vaalea verho)
$F_{varjostus}$	1
$F_{läpäisy}$	0,675

# MITTAUSPÖYTÄKIRJA

LIITE 3

Mittauspöytäkirja 13.3.2024 TP

Ulkoilmakanavan (250mm) tilavuusvirran mittaus log-linear menetelmällä 12 pisteestä  
Mittalaite: TSI VelociCalc 9555-P +kuumalanka-anemometri

Mittauslämpötila: -1,8 °C

RH 65,8 %

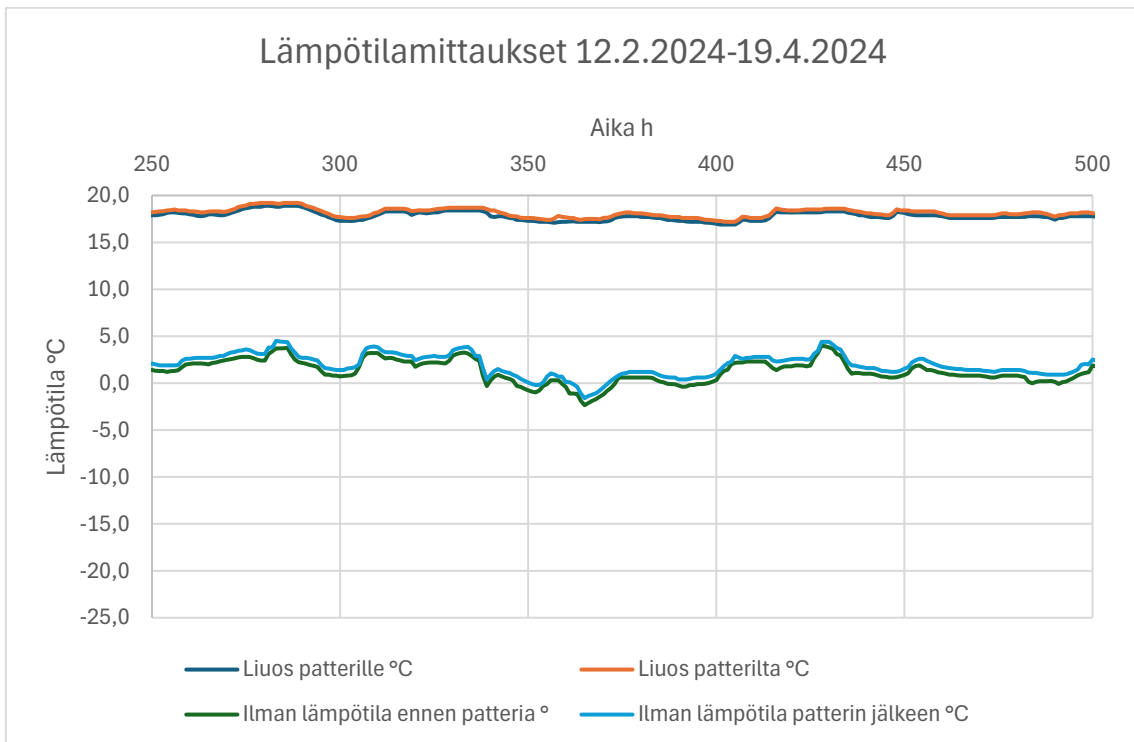
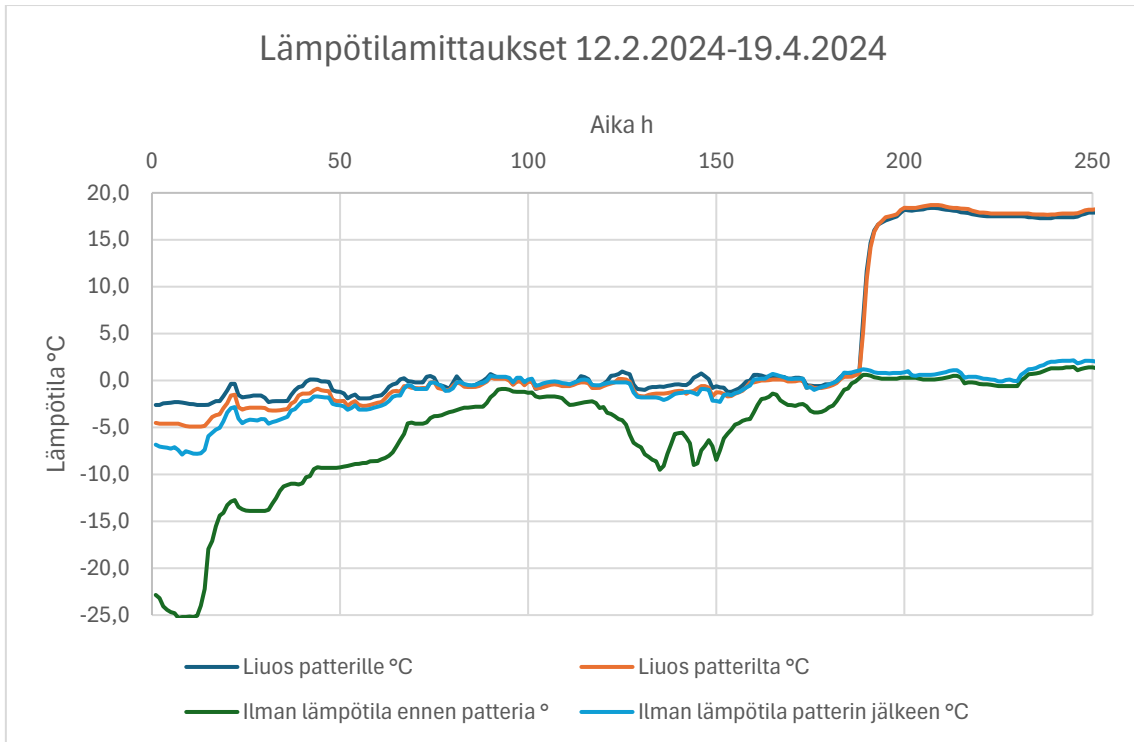
Ilman tiheys 1,2991 kg/m<sup>3</sup> lähde: vaisala

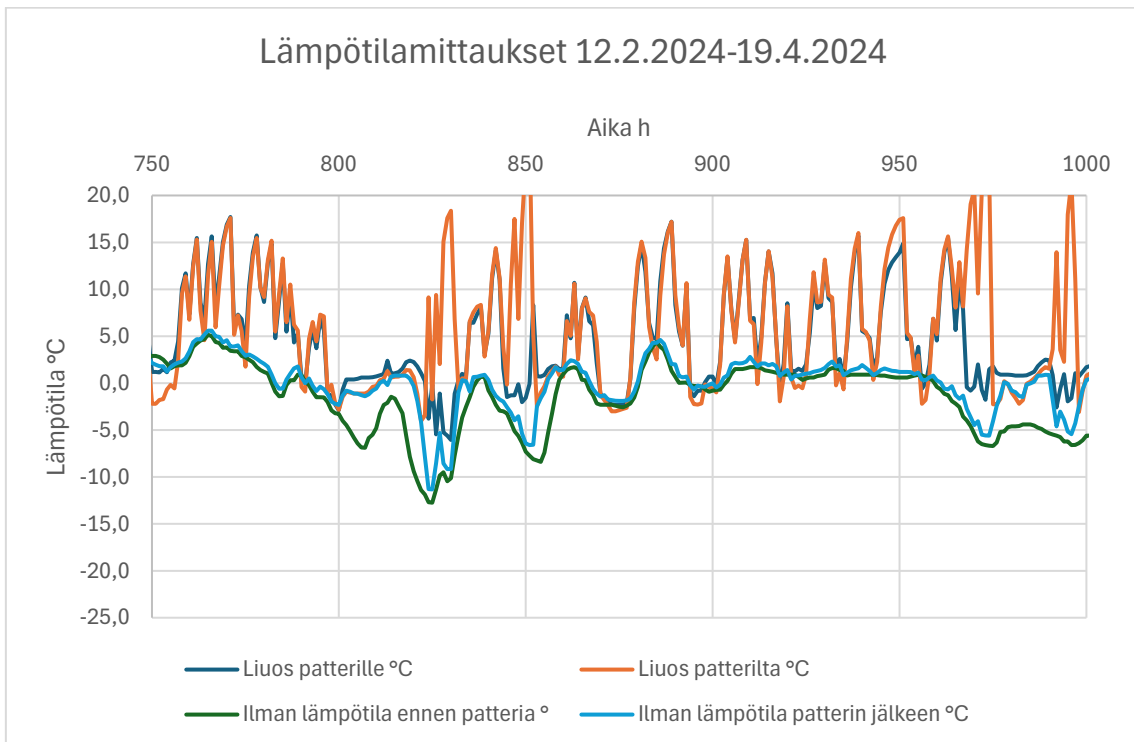
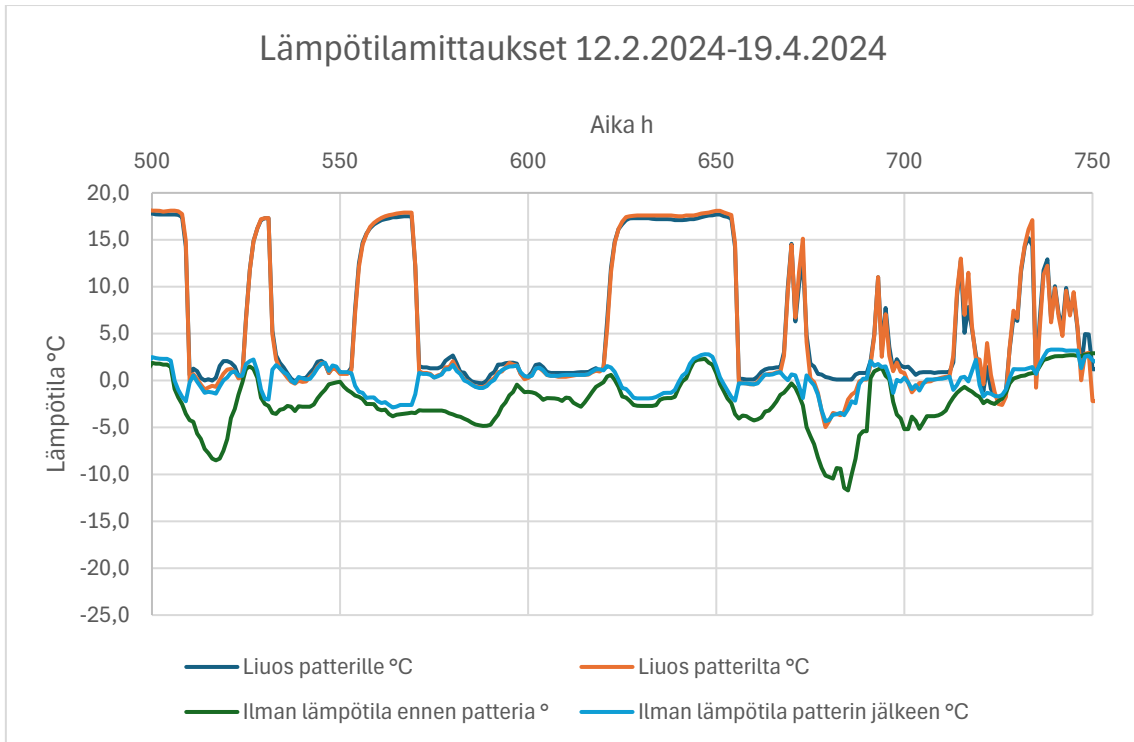
Mittauslinja	Mittaussyvyys	Nopeus (m/s)
Vaaka	3,20 %	2,13
Pysty	3,20 %	1,83
Vaaka	16,50 %	1,94
Pysty	16,50 %	1,82
Vaaka	32,10 %	1,71
Pysty	32,10 %	1,75
Vaaka	67,90 %	1,73
Pysty	67,90 %	2,02
Vaaka	86,50 %	1,57
Pysty	86,50 %	2,22
Vaaka	96,80 %	1,8
Pysty	96,80 %	1,78
	$V_{\text{keskimääräinen}}$ (m/s)	1,858

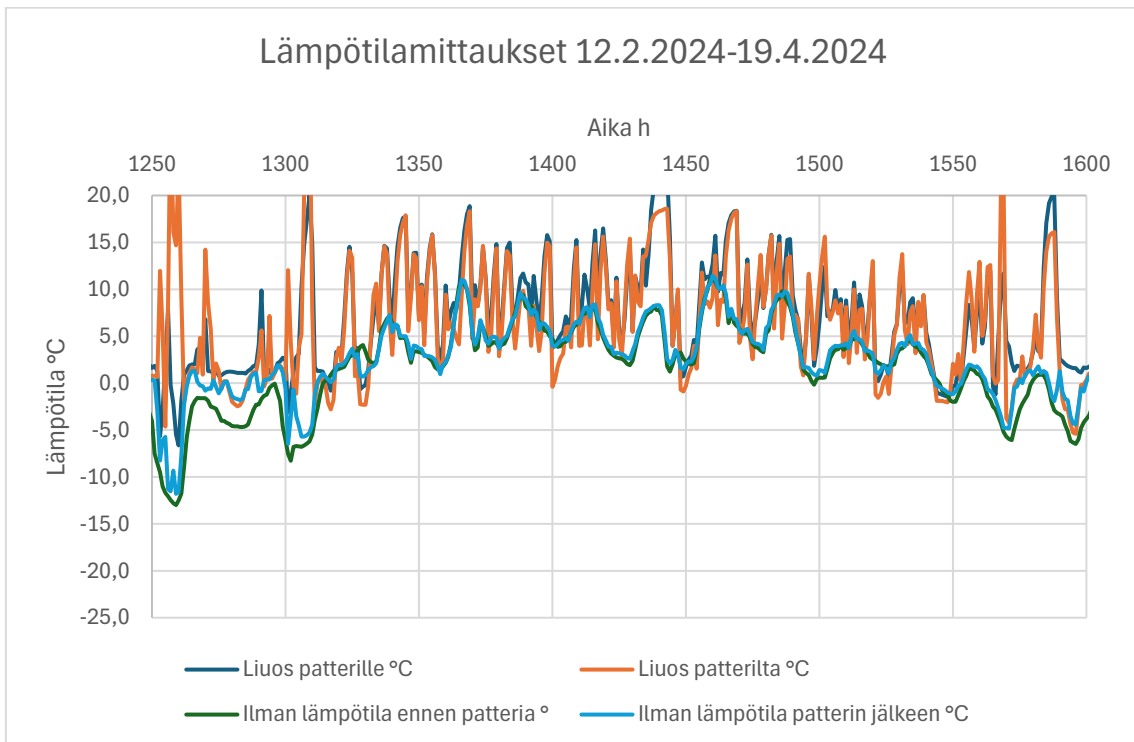
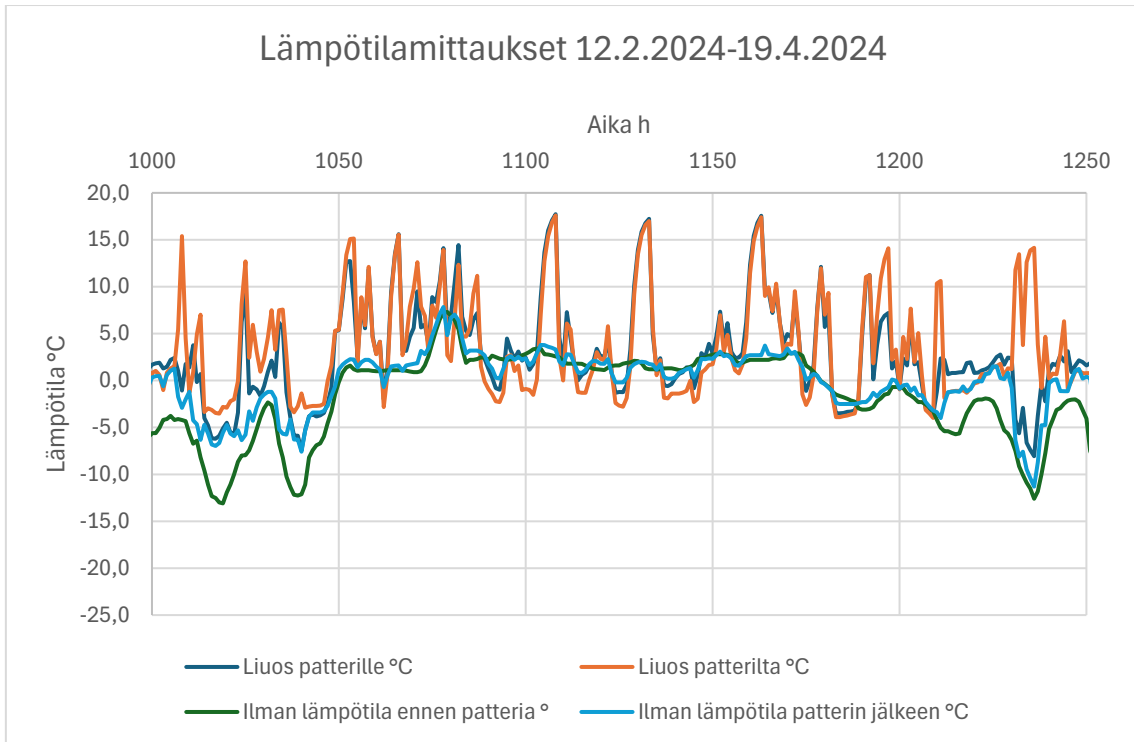
Tilavuusvirta halutulla tiheydellä 1,2 kg/m<sup>3</sup>

$q_v$ (dm <sup>3</sup> /s)	98,8
----------------------------	------

Virhemarginaali	$q_{v, \text{min}}$ (dm <sup>3</sup> /s)	$q_{v, \text{max}}$ (dm <sup>3</sup> /s)
4,5 %	94,3	103,2







## ESILÄMMITYSJÄRJESTELMÄN HANKINTAKUSTANNUS

LIITE 5

Ilmanvaihtourakka		
MLV 250	1 kpl	778,00 €
Ilmastointimatto 50 mm	14 m <sup>2</sup>	220,36 €
Alumiiniteippi 50 mm	4 rll	67,60 €
Lisätyö	6 h	390,00 €

Putkiurakka		
Kiertovesipumppu 25–80	1 kpl	378,90 €
Magneettiventtiili	1 kpl	199,95 €
Takaskuventtiili	2 kpl	29,90 €
Linjasäätöventtiili	1 kpl	99,95 €
Sulkuventtiili	2 kpl	39,90 €
Kv-pumpun liitinpari	1 kpl	28,90 €
Kupariputki 22 mm	7 m	139,65 €
Putkiosat + kannakkeet		300,00 €
Armaflex eristeet + liima	10 m	49,45 €
Energiakaivon lisämetrit	20 m	660,00 €
Lisätyö	8 h	520,00 €

Sähköurakka		
Kaapelit	50 m	65,00 €
Tarvikkeet		71,40 €
Lisätyö	3 h	195,00 €

Yhteensä **4233,96**

Lähde hintatiedoille:

[www.lvi-tarvikkeet.net](http://www.lvi-tarvikkeet.net)

[www.taloon.com](http://www.taloon.com)

[www.lvi-kauppa.fi](http://www.lvi-kauppa.fi)

Uudistuskustannus		
Kiertovesipumppu 25–80	1 kpl	378,90 €
Magneettiventtiili	1 kpl	199,95 €
Linjasäätöventtiili	1 kpl	99,95 €
Lisätyö	6 h	390,00 €
Yhteensä		<b>1 068,80 €</b>

**ESILÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KÄYTTÖKUSTANNUKSET**

LIITE 6

Vuosi	Esilämmitys + IV-kone		Yh- teensä	IV-kone Kumulatiivinen
	Yhteensä	Kumulatiivinen		
1	4 277,77 €	4 277,77 €	225,00 €	225,00 €
2	43,78 €	4 321,55 €	225,00 €	450,00 €
3	43,78 €	4 365,34 €	225,00 €	675,00 €
4	43,78 €	4 409,12 €	225,00 €	900,00 €
5	43,81 €	4 452,93 €	225,00 €	1 125,00 €
6	43,78 €	4 496,71 €	225,00 €	1 350,00 €
7	43,78 €	4 540,50 €	225,00 €	1 575,00 €
8	43,78 €	4 584,28 €	225,00 €	1 800,00 €
9	43,81 €	4 628,09 €	225,00 €	2 025,00 €
10	43,78 €	4 671,87 €	225,00 €	2 250,00 €
11	43,78 €	4 715,66 €	225,00 €	2 475,00 €
12	43,78 €	4 759,44 €	225,00 €	2 700,00 €
13	43,81 €	4 803,25 €	225,00 €	2 925,00 €
14	43,78 €	4 847,03 €	225,00 €	3 150,00 €
15	43,78 €	4 890,82 €	225,00 €	3 375,00 €
16	43,78 €	4 934,60 €	225,00 €	3 600,00 €
17	43,81 €	4 978,41 €	225,00 €	3 825,00 €
18	43,78 €	5 022,19 €	225,00 €	4 050,00 €
19	43,78 €	5 065,98 €	225,00 €	4 275,00 €
20	43,78 €	5 109,76 €	225,00 €	4 500,00 €
21	43,81 €	5 153,57 €	225,00 €	4 725,00 €
22	43,78 €	5 197,36 €	225,00 €	4 950,00 €
23	43,78 €	5 241,14 €	225,00 €	5 175,00 €
24	43,78 €	5 284,92 €	225,00 €	5 400,00 €
25	43,81 €	5 328,73 €	225,00 €	5 625,00 €
26	1 112,58 €	6 441,32 €	225,00 €	5 850,00 €
27	43,78 €	6 485,10 €	225,00 €	6 075,00 €
28	43,78 €	6 528,89 €	225,00 €	6 300,00 €
29	43,81 €	6 572,69 €	225,00 €	6 525,00 €
30	43,78 €	6 616,48 €	225,00 €	6 750,00 €
31	43,78 €	6 660,26 €	225,00 €	6 975,00 €
32	43,78 €	6 704,05 €	225,00 €	7 200,00 €
33	43,81 €	6 747,85 €	225,00 €	7 425,00 €
34	43,78 €	6 791,64 €	225,00 €	7 650,00 €
35	43,78 €	6 835,42 €	225,00 €	7 875,00 €
36	43,78 €	6 879,21 €	225,00 €	8 100,00 €
37	43,81 €	6 923,01 €	225,00 €	8 325,00 €
38	43,78 €	6 966,80 €	225,00 €	8 550,00 €
39	43,78 €	7 010,58 €	225,00 €	8 775,00 €



Vuosi	Yhteensä	Kumulatiivinen	Yhteensä	Kumulatiivinen
41	43,81 €	7 098,17 €	225,00 €	9 225,00 €
42	43,78 €	7 141,96 €	225,00 €	9 450,00 €
43	43,78 €	7 185,74 €	225,00 €	9 675,00 €
44	43,78 €	7 229,53 €	225,00 €	9 900,00 €
45	43,81 €	7 273,34 €	225,00 €	10 125,00 €
46	43,78 €	7 317,12 €	225,00 €	10 350,00 €
47	43,78 €	7 360,90 €	225,00 €	10 575,00 €
48	43,78 €	7 404,69 €	225,00 €	10 800,00 €
49	43,81 €	7 448,50 €	225,00 €	11 025,00 €
50	43,78 €	7 492,28 €	225,00 €	11 250,00 €

# INVESTOINTIKANNATTAVUUSLASKURI ESILÄMMITYS

LIITE 7

Nettotuottojen summa	3 757
Nettotuottojen nykyarvojen summa	89

Jos nettotuottojen nykyarvojen summa on positiivinen, hanke on taloudellisesti kannattava.

Eli: **HANKE ON KANNATTAVA**

Sisäinen korkokanta	3 %
---------------------	-----

Sisäinen korkokanta tarkoittaa sitä laskennallista korkokantaa, jolla vuosittaisten nettotuottojen nykyarvo vastaa hankintakustannusta.

Vuosi	Tuotto	Kustannus	Nettotuotto	Nettotuoton nykyarvo		
Aloitusvuosi	0,0 €	4 234,0 €	-4 234,0 €	-4 234,0 €		
1	181,2 €	0,0 €	181,2 €	176,3 €	Hankintakustannus	0 %
2	181,2 €	0,0 €	181,2 €	171,5 €		
3	181,2 €	0,0 €	181,2 €	166,8 €	Laskentakorkokanta	2,80 %
4	181,2 €	0,0 €	181,2 €	162,3 €		
5	181,2 €	0,0 €	181,2 €	157,8 €	Vuosittaiset tuotot	0,00 %
6	181,2 €	0,0 €	181,2 €	153,5 €		
7	181,2 €	0,0 €	181,2 €	149,4 €	Käyttökustannukset	0,00 %
8	181,2 €	0,0 €	181,2 €	145,3 €		
9	181,2 €	0,0 €	181,2 €	141,3 €		
10	181,2 €	0,0 €	181,2 €	137,5 €		
11	181,2 €	0,0 €	181,2 €	133,7 €		
12	181,2 €	0,0 €	181,2 €	130,1 €		
13	181,2 €	0,0 €	181,2 €	126,5 €		
14	181,2 €	0,0 €	181,2 €	123,1 €		
15	181,2 €	0,0 €	181,2 €	119,8 €		
16	181,2 €	0,0 €	181,2 €	116,5 €		
17	181,2 €	0,0 €	181,2 €	113,3 €		
18	181,2 €	0,0 €	181,2 €	110,2 €		
19	181,2 €	0,0 €	181,2 €	107,2 €		
20	181,2 €	0,0 €	181,2 €	104,3 €		
21	181,2 €	0,0 €	181,2 €	101,5 €		
22	181,2 €	0,0 €	181,2 €	98,7 €		
23	181,2 €	0,0 €	181,2 €	96,0 €		
24	181,2 €	0,0 €	181,2 €	93,4 €		
25	181,2 €	0,0 €	181,2 €	90,8 €		
26	181,2 €	1 069,0 €	-887,8 €	-433,0 €		
27	181,2 €	0,0 €	181,2 €	86,0 €		
28	181,2 €	0,0 €	181,2 €	83,6 €		
29	181,2 €	0,0 €	181,2 €	81,3 €		
30	181,2 €	0,0 €	181,2 €	79,1 €		
31	181,2 €	0,0 €	181,2 €	77,0 €		
32	181,2 €	0,0 €	181,2 €	74,9 €		
33	181,2 €	0,0 €	181,2 €	72,8 €		
34	181,2 €	0,0 €	181,2 €	70,9 €		
35	181,2 €	0,0 €	181,2 €	68,9 €		
36	181,2 €	0,0 €	181,2 €	67,1 €		
37	181,2 €	0,0 €	181,2 €	65,2 €		
38	181,2 €	0,0 €	181,2 €	63,5 €		
39	181,2 €	0,0 €	181,2 €	61,7 €		

**Nykyarvomenetelmässä** jokaisen vuoden nettotuotto diskontataan nykyhetkeen annetun korkokannan perusteella. Kaava on  $\text{nettotuotto} \cdot (1 - \text{laskentakorkokanta})^{\text{vuosien lukumäärä}}$ . Mikäli vuosittaisten nettotuottojen nykyarvojen summa on positiivinen, on hanke taloudellisesti kannattava.