



Maalämpö lämmönlähteenä teollisuushallissa

Otto-Anskar Karjalainen

OPINNÄYTETYÖ
Kesäkuu 2023

Talotekniikan tutkinto-ohjelma
LVI-talotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan tutkinto-ohjelma
LVI-talotekniikka

KARJALAINEN, OTTO-ANSKAR:
Maalämpö lämmönlähteenä teollisuushallissa

Opinnäytetyö 33 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Kesäkuu 2023

LVI-talotekniikan osuus rakennuksen energiankulutuksesta on merkittävässä osassa tänä päivänä. Jatkuvasti kiristyvät rakentamismääräykset ja EU-direktiivit ovat vaatineet LVI-talotekniikkaa kehittymään ympäristöystävällisemmäksi ja energiatehokkaammaksi. Maalämpö onkin yleistymässä sen ympäristöystävällisyyden ja uusiutumismahdollisuuksien takia.

Opinnäytetyön tilaajana on Elomatic Oy. Työn tavoitteena oli laatia suunnitteli-joille esittely, jossa tutkitaan kaukolämmöstä maalämpöön siirtymisen hyötyjä ja kustannuksia. Tutkimus toteutettiin kirjallisuutta käyttäen ja olemassa olevan koh-teen mitoitustietoja sekä piirustuksia hyödyntäen.

Opinnäytetyön aikana tavoite oli sovittaa maalämpö ja siihen kytketty ilmastoinnin esilämmitys olemassa olevaan järjestelmään mahdollisimman vähillä muutok-silla. Toinen tärkeä tavoite oli saada olemassa oleva järjestelmä toimimaan maa-lämmön sekä ilmastoinnin esilämmityksen kanssa energiatehokkaasti kokonai-suutena. Työssä laskettiin uudistettavien laitteiden investointikustannuksien li-säksi, kuinka paljon maalämpö tulee laskemaan ostettavan sähkön määrää ja sen kautta tuottamaan säästöä.

Opinnäytetyössä kerrotaan maalämmöstä ja maalämmön varastointitavoista. Lo-puksi esitetään käyttökustannuksia koskeva hintavertailu uuden ja vanhan järjes-telmän välillä. Työn tuloksena saatiin esittely, jossa kerrotaan esimerkki, miten kohteeseen on mahdollista tehdä kyseinen muutos. Työn lopussa oleva hintaver-tailu ja säästölaskelmat antavat käsityksen järjestelmien uudistamis- ja remon-tointihyödyistä uudehkoihinkin rakennuksiin.

Asiasanat: lvi, maalämpö, ilmastoinnin esilämmitys, kaukolämpö

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree programme in Building Services Engineering
HVAC Systems

KARJALAINEN, OTTO-ANSKAR:
Geothermal Heat as Heat Source in Industrial Hall

Bachelor's thesis, pages 33, appendices 0 pages
June 2023

HVAC building technology accounts for a significant part of buildings' energy consumption today. The ever-tightening construction regulations and EU-directives have pushed HVAC building technology to become more environmentally friendly and energy efficient. For this reason, geothermal heat is becoming more common due to its environmental friendliness and renewal possibilities.

This thesis was commissioned by Elomatic Oy. The aim of the work was to draw up a guide for designers to study the benefits and costs of switching from district heat to geothermal heat. The research was carried out using literature and using the dimensioning data and drawings of the existing project.

During the study the goal was to add geothermal heating and the preheating of the air conditioning connected to it to the existing system with as few changes as possible. Another important goal was to make the existing system work with ground heating, as well as preheating air conditioning as an energy-efficient whole. In addition to the investment costs of the equipment to be renewed, calculations were made to find out how much the updated system will reduce the amount of electricity to be purchased and, through it, make savings.

The thesis provides a discussion on about geothermal heat, methods of storing geothermal heat, and finally, a price comparison of operating costs between the updated systems. The result of the work was a guide that gives an example of how to make such changes to the heating system. The price comparison and savings calculations at the end of the work give an idea of the need for renewal and renovation of systems even for quite new buildings.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	MAALÄMMÖN TEORIA	8
2.1	Maalämpö yleisesti.....	8
2.2	Maalämpöpumpun toimintaperiaate	12
2.3	Maalämmön käyttö ilman esilämmityksessä	14
2.4	Maalämmön käyttö ilman viilennyksessä	14
3	GEOTERMISEN LÄMMÖN KAUSIVARASTOINTI POHJOISMAISSA	16
3.1	Kausivarastointi yleisesti	16
3.2	Esimerkki Arlandan lentokenttä.....	17
4	ESIMERKKIKOHDE.....	20
5	MAALÄMMÖN SOVELTAMINEN KOHTEESEEN	22
5.1	Alkutiedot	22
5.2	Maalämpökaivojen poraus	23
5.3	Ilmanvaihdon esilämmitys maapiirillä	24
5.4	Kaukolämmön kustannukset	26
5.5	Siirtyminen kaukolämmöstä maalämpöön.....	27
6	POHDINTA	29
	LÄHTEET.....	30

ERITYISSANASTO

TAMK	Tampereen ammattikorkeakoulu
op	opintopiste
COP	lämpökerroin
SFP	ominaissähköteho
LTO	lämmöntalteenotto

1 JOHDANTO

Suomen harvaan asuttu maa, sekä pohjoinen sijainti tuovat erilaisia haasteita teollisuushallien suunnitteluun, kuten sääolosuhteet ja kaukolämpöpiirien saataavuus. Tästä syystä kaukolämpöön liittyminen taajamien ulkopuolella, sekä erilaiset ympäristövaikutukset lämmönlähteen valinnassa tulee ottaa huomioon. Koska kiinteistöjen energiakulutus tulee pääosin lämmityksestä, sekä suuremmissa kiinteistöissä lämmitysmuodoksi valikoituu pääosin maalämpö, työssä tarkastellaan teollisuushallin lämmönlähteenä olevaa maalämpöä.

Opinnäytetyön tarkoituksena on perehtyä maalämpöjärjestelmään yleisesti käsitteenä, sen mitoitusperusteisiin ja toimintaperiaatteisiin. Työ on tarkoitettu esittämään niin, että siitä on hyötyä lämmönlähteiden valitsemisessa ja vertailussa teollisuushalleihin. Työssä tullaan tutkimaan ympäristöystävällisen ja uusiutuvan energian erilaisia hyötyjä, haittoja ja mahdollisia säästöjä olemassa olevaan kaukolämpöjärjestelmään verrattuna.

Tarkemmin työssä tullaan tarkastelemaan Ruotsissa sijaitsevan Arlandan lentokentällä toteutettua ratkaisumallia. Huomion keskipisteessä tulee olemaan Arlandan lentokentälle suunniteltu ratkaisu, jota on käytetty ilmanvaihdon esilämmitykseen maapiirillä, sekä lämmön varastointiin maan alle.

Työ on tehty Elomatic Oy:lle ja se luo esimerkin yrityksen sisälle, lämmönlähteen valintaa tehdessä. Opinnäytetyön tuloksena on teoreettinen esittely maalämmöstä ja maalämpöjärjestelmästä kiinnostuneelle ja sitä harkitsevalle kaukolämmön ollessa toinen vaihtoehto tai nykyinen järjestelmä.

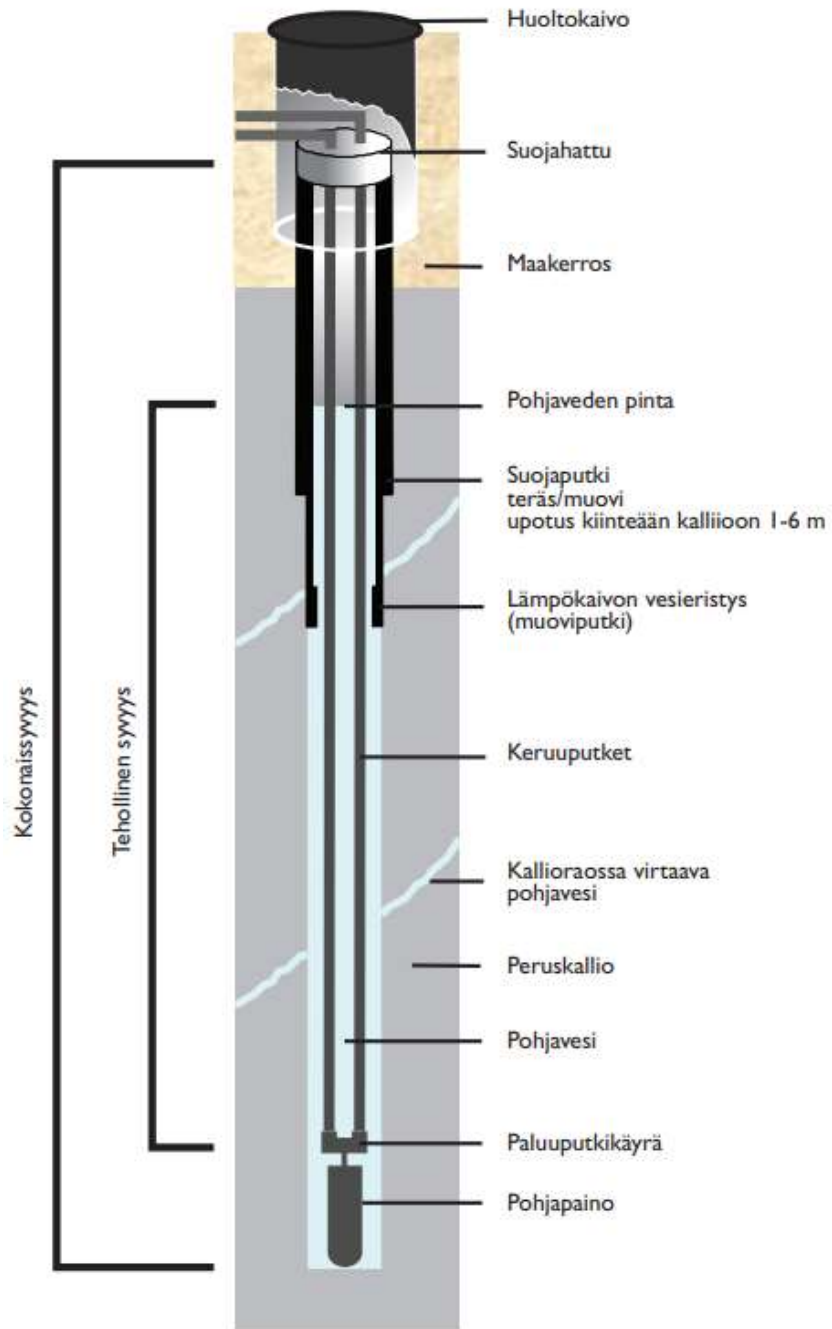
2 MAALÄMMÖN TEORIA

2.1 Maalämpö yleisesti

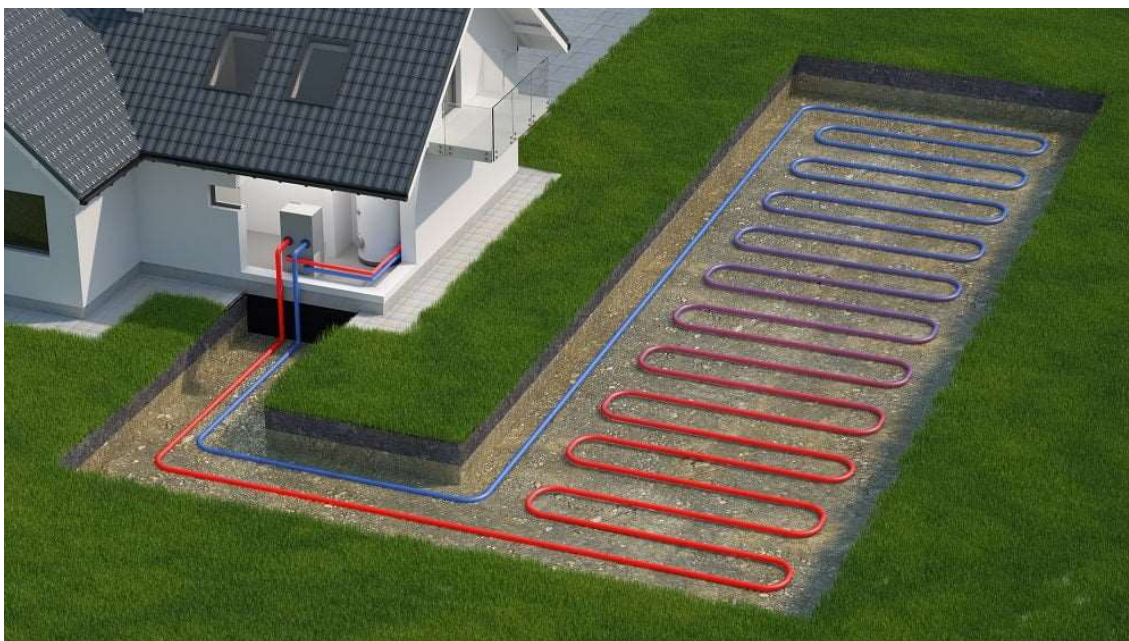
Maalämpö on kaikessa yksinkertaisuudessaan maahan tai vesistöön varastoitunutta lämpöenergiaa. Maalämpöä syntyy, kun auringon lämpö tai geoterminen lämpö varastoituu maaperään tai vesistöön lämmittäen sitä. Tämän vuoksi maalämpö on myös uusiutuvaa energiaa.

Jotta maalämpöä voidaan hyödyntää, maahan porataan energiakaivo tai metrin syvyyteen maahan kaivetaan lämmönkeruuputkisto. Tavallisesti energiakaivo on noin 100–350 m syvä. Reikään upotetaan putki, jota pitkin kiertää lämmönkeruuneste, joka on useimmiten 70 % vettä ja 30 % bioetanolia. Bioetanoli toimii jäänestona lämmönkeruunesteessä ja alentaa jäätymispisteen noin -17 °C -asteeseen (KUVA 1). Keruuputkistossa neste lämpiää maaperän lämmöstä ja tuloksena saadaan maalämpöä energiakaivosta. (Thermia)

Lämmönkeruuneste voi myös kiertää maassa noin metrin syvyydessä maanpinnasta vaakaputkistoa pitkin (KUVA 2). Vaakaputkiston tehokkuuteen vaikuttavat leveysasteiden lisäksi maaperän ominaisuudet. Kosteaa savimaa on lämmönluovutuksen kannalta tehokkain ja kuiva hiekkamaa heikoin maalaji, kun taas kivinen maaperä saattaa vahingoittaa putkistoa roudan liikuttaessa kiviä. Keruupiiri on lähtökohtaisesti parempi valinta isolle tontille jossa on peltoa ja savimaata, sekä alueelle joka saa talvella lumipeitteen, sillä se eristää maan jäähtymistä. Keruupiiri on mahdollista asentaa myös vesistön pohjaan.



KUVA 1. Porakaivon rakenne (Ympäristöopas 2013)



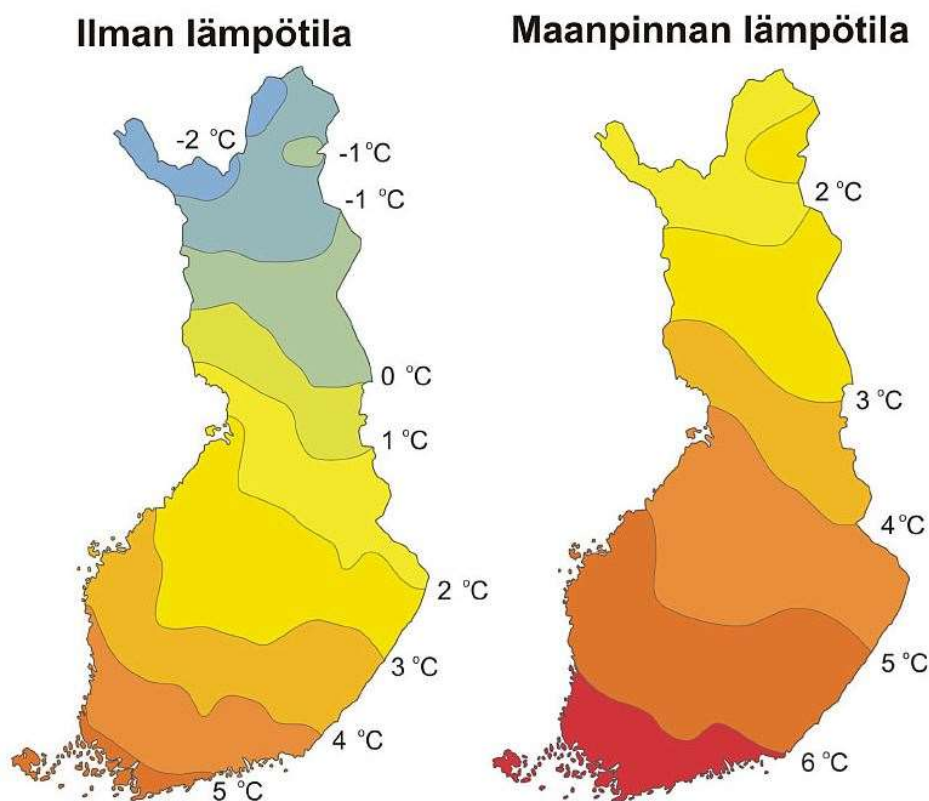
KUVA 2. Vaakaputkisto (Suomela.fi)

Lämmönkeruuneste kiertää lämmönkeruuputkistossa lämmeten noin 2–5 astetta. Lämmönkeruuneste kiertää maapiiristä lämpöpumpun höyrystimeen, jossa se luovuttaa keräämänsä lämmön ja josta se palaa takaisin maapiiriin. Höyrystimen välityksellä lämpö siirtyy kylmäaineeseen, joka sen vaikutuksesta lämpenee ja kaasuuntuu. (Thermia)

Kylmäaine jatkaa maalämpöpumpun sisällä höyrystimeltä kompressorille, joka nostaa sen painetta ja lämpötilaa entisestään. Kompressorilta kylmäaine johdetaan lauhtuttimeen, jossa se luovuttaa lämpönsä talon lämmönjakojärjestelmään lauhtuen samalla takaisin nestemäiseen muotoon. Kylmäaine palaa paisunta-venttiiliin kautta takaisin höyrystimelle, ja kierto alkaa taas alusta. (Thermia)

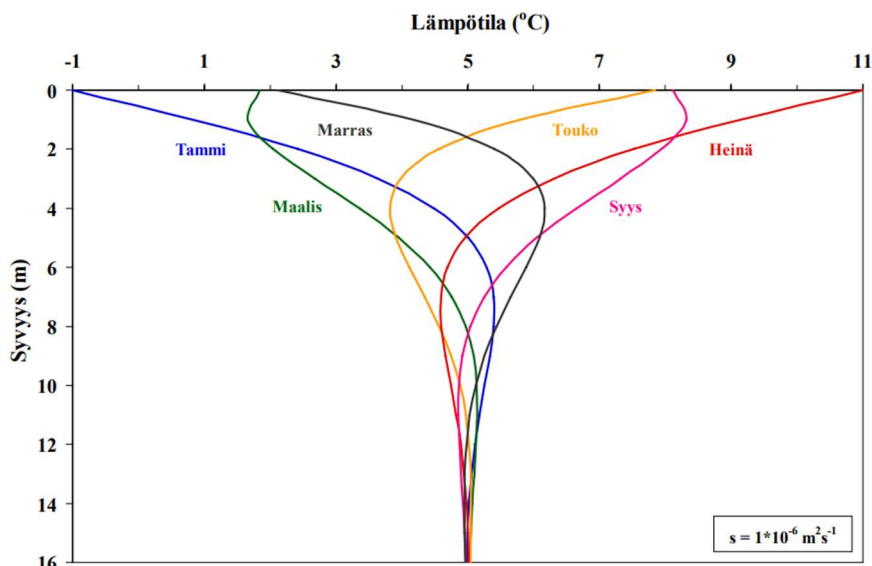
Lämmönkeruuneste kerää lämpöä itseensä ja luovuttaa sen maalämpöpumpulla. Säännöllinen huoltaminen on kuitenkin tarpeen ja se nostaa käyttöikää huomattavasti. Maaperään varastoitunutta aurinkoenergiaa on saatavilla runsaasti ja maalämpökaivot tulee mitoittaa tarpeeksi syviksi sekä riittävän kauas toisistaan, ettei ne ala jäädyttämään toinen toistaan. Ruotsissa Tukholman alueella on pakko tehdä energiakaivojen simulointi viilenemisen estämiseksi.

Maaperän lämpötila on yleisesti 100 metrin syvyydessä noin 5–7 °C ja 200 metrin syvyydessä 6–9 °C astetta. Kuvassa 3 on ilmalämpötilan ja maanpinnan lämpötilan vuotuiset keskiarvot eri paikoissa Suomea. (Juvonen & Lapinlampi 2013)



KUVA 3. Ilmalämpötilan ja maanpinnan lämpötilan vuotuiset keskiarvot (Juvonen & Lapinlampi 2013)

Auringon säteily lämmittää erityisesti pintamaata ja sen vaikutukset siirtyvät alaspäin samalla vaimentuen. Syvemmillä maan sisäosissa oleva lämpö on pääosin peräisin radioaktiivisten aineiden hajoamisesta. Vuosittaisten pintalämpötilojen vaihtelun on laskettu ulottuvan noin 10–15 metrin syvyyteen maanpinnasta. Kuvasta 4 nähdään, että noin 15 metrin syvyyteen mentäessä maanpintalämpötilojen vaihtelu tasaantuu ja on noin +5 °C. (Juvonen & Lapinlampi 2013)



KUVA 4. Maanpinnan lämpötila vuoden aikana (Nina Leppäharju)

2.2 Maalämpöpumpun toimintaperiaate

Maalämpöpumppu hyödyntää rakennuksen ja käyttöveden lämmityksessä maaperään varastoitunutta aurinkoenergiaa. Maalämpöjärjestelmän lämmönkeruuneste kiertää lämmönkeruuputkistossa. (Tom Allen Senera)

Maalämpöpumpussa on höyrytimen, kompressorin, lauhduttimen ja paisunta-venttiilin lisäksi myös kolmitieventtiili sekä lämpimän käyttöveden varaaja. Maalämpöpumpun ohjausjärjestelmän säätämä kolmitieventtiili johtaa maalämpöpumpun lämmittämän veden joko rakennuksen lämmönjakojärjestelmään eli lattialämmitykseen tai patteriverkostoon tai lämpimän käyttöveden tuottamiseen. Lämmin käyttövesi säilötään lämminvesivaraajaan, joka voi olla myös maalämpöpumpusta irrallinen yksikkö. (Tom Allen Senera)

Maalämpöpumppu on tehokas, koska se tuottaa lämpöenergiaa 3–4 kW per kuluttamansa 1 kW sähkötehoa. Karkeasti arvioiden maalämpö laskee lämmityslaskun yhteen kolmasosaan verrattuna suoraan sähkölämmitykseen.

COP-luku kertoo kuinka monta kilowattituntia lämpöenergiaa lämpöpumppu tuottaa pumpun kuluttama sähkökilowattitunti kohden. Tämän hetken parhaimmat pumpput tuottavat noin 4,5 kWh lämpöenergiaa per sähkökilowattitunti. Hyötysuhde laskee luonnollisesti mitä kuumempaa vettä pumppu tuottaa. (Urakkamaailma)

Energiatehokkuutta mittaava COP-luku mittaa energian tuoton hyötysuhdetta, kun lämmönkeruuputkista tuleva neste on 0-asteista ja maalämpöpumppu tuottaa joko 35- tai 50-asteista vettä. COP-luvun merkitys kasvaa, kun kiinteistöä lämmitetään pattereilla, jossa veden lämpö on verrattain korkea lattialämmitykseen verrattuna. Patterilämmitettyyn asuntoon kannattaa hankkia pumppu, jossa on korkea hyötysuhde 65-asteiselle vedelle. Jos maalämpöpumpussa on kolmi-venttiilirakenne, pumpun tuottama lämmin vesi ohjataan joko kiinteistön lämmitykseen tai käyttövedenlämmitykseen. Kun asunnon lämmitykseen käytetty energia vastaa noin 75 % osuutta kokonaisuudesta ja veden lämpö on alhaisempi, pääsee maalämpöpumppu hyödyntämään korkeampaa hyötysuhdetta mahdollisimman usein. (Urakkamaailma)

Osatehomitoitettu järjestelmä mitoitetaan kattamaan 60–85 % huipputehontarpeesta, jolloin kovilla pakkasilla maalämpöpumpun lämpöpumpun sähkövastukset kytkeytyvät päälle eli lämmitys toteutetaan osittain sähköllä. Osatehomitoitettujen järjestelmien investointikustannukset ovat hieman halvemmat; pienempitehoisen lämpöpumpun ja hieman lyhyemmän lämpökaivon ansiosta, mutta käyttökustannukset ovat isommat kovien pakkasten aikaan, jolloin lämmitetään sähkövastuksilla korkean sähkönhinnan aikaan. (Gebwell Oy)

Maalämpöjärjestelmän täystehomitoitus tarkoittaa, että järjestelmä mitoitetaan kattamaan 100 % huipputehontarpeesta. Täten kiinteistön ja käyttöveden lämmitys hoidetaan kovimmillakin pakkasilla maalämmöllä ilman sähkövastuksia. Täystehomitoitettu maalämpöjärjestelmä on hieman kalliimpi investointi, mutta käyttökulut huippupakkasilla ovat pienemmät kuin osatehomitoitetussa järjestelmässä. (Gebwell Oy)

Lämpökaivon eli energiakaivon syvyyteen, ja sitä kautta maalämmön hintaan, vaikuttaa myös maaperä. Peruskallion päällä olevan pehmeän maan osuudelle täytyy maalämpökaivoa poratessa asentaa teräksinen maasuojaputki, joka estää irtomaata sortumasta ja tukkimasta kaivoa. Maaporaus on kallioporausta hitaampaa ja lisäksi teräspuutkitangot on hitsattava toisiinsa kiinni. Maaporaus on täten kallioporausta kalliimpaa. (Gebwell Oy)

Pehmeän maan osuus vaikuttaa myöskin kaivon syvyyteen. Mikäli pehmeää maata on paljon, kaivoa täytyy porata syvemmälle mitoituksen määrittelemän aktiivisyvyyden (tehollinen syvyys) saavuttamiseksi. Aktiivisyvyys on se syvyys, mihin asti vesi nousee kaivossa. Pehmeää maata on harvoin Suomessa niin paljon, että maaporauksesta koituva lisäkustannus tekisi maalämpöinvestoinnin kannattamattomaksi. Mikäli pehmeän maan osuuden epäillään ylittävän 50 metriä, niin silloin maalämpöinvestointi voi osoittautua kannattamattomaksi. (Gebwell Oy) Gebwell Oy:n mukaan Suomessa kallio löytyy ennen ensimmäistä 20 metriä jopa 95 %:ssa kohteista.

2.3 Maalämmön käyttö ilman esilämmityksessä

Suoraan tuloilman esilämmityspatteriin kytkettäessä maapiiri toimii automaattisesti sekä maalämmön että maakylmän lähteenä ulkolämpötilasta riippuen. Maakylmän käyttö maalämmön rinnalla on yleensä kannattavaa, sillä ne tehostavat toistensa toimintaa. Viilennyskaudella maapiiri varastoi lämpöä maaperään auttaen sitä palautumaan lämmityskauden aikana alenneista lämpötiloista, eikä huolta maalämpökaivojen viilenemisestä ole. Samalla se pitää maapiirin lämpimämpänä lämmityskauden alussa ja parantaa maalämpöpumpun hyötysuhdetta, mikäli sellaista käytetään.

2.4 Maalämmön käyttö ilman viilennyksessä

Maalämpöpumpun lämmönkeruupiiriä voidaan hyödyntää myös viilennyksen lähteenä. Jäähdytyksessä syntyvä lämpö siirtyy keruupiirin kautta lämpökaivoon tai maahan. Lämpökaivon tapauksessa lämpö jossain määrin varastoituu kaivoon, mikä ehkäisee sen jäähtymistä pitkällä aikavälillä ja vaikuttaa tätä kautta positiivisesti myös lämpöpumpun hyötysuhteeseen.

Maaviileää voidaan jakaa taloon esimerkiksi tuloilmakanaviston kautta, lattiaviilennyksellä tai huoneistoon asennettavien puhallinkonvektoreiden avulla. Maaviilennys on helpointa toteuttaa maalämpöinvestoinnin yhteydessä, mutta se onnistuu hyvin myös jälkiasennuksena. (Energiatehokaskoti)

Viileää on mahdollista jakaa tuloilmakanavistoa pitkin, jos kanavisto on lämpö- ja kondenssieristetty. Tuloilmakanaviston hyödyntämisen etuna on, että viileää saadaan jaettua tasaisesti eri puolille taloa. Viileä siirretään tuloilmaan esimerkiksi asentamalla ulkoilmakanavaan ennen ilmanvaihtokonetta erillinen kanavapatteri. Viilennysteho tavanomaisesti mitoitettulla IV-järjestelmällä ympärivuorokautisella käytöllä kesäaikana riittää yleensä noin 2–3 asteen lämpötilan laskuun huoneiloissa. Samalla ilmankosteus vähenee ja sisäilma tuntuu miellyttävämmältä. (Energiatehokaskoti)

3 GEOTERMISEN LÄMMÖN KAUSIVARASTOINTI POHJOISMAISSA

3.1 Kausivarastointi yleisesti

Aurinkoenergian varastointi suuriin kausivarastoihin, joiden avulla lämpöenergiaa varastoidaan kesäkuukausilta talvikaudelle, on Suomessa vähäistä. Lämmön varastointi pitkiä aikoja pienessä (joitakin kuutiometrejä) varastossa on hyvin haastavaa fysikaalisista syistä. Varaston eristyksen täytyisi olla erittäin hyvä, jotta lämpö pysyisi varastossa useita kuukausia. (Motiva)

Jos varasto on riittävän suuri, kymmeniä tai satojatuhansia kuutiometrejä, pysyy lämpö varastossa ilman eristystäkin, sillä varaston pinta-ala suhteessa sen tilavuuteen on niin pieni, ettei lämpö ehdi karata varastosta esimerkiksi puolessa vuodessa. (Motiva)

Kaukolämpöjärjestelmissä käytetään 10 000 kuution vesisäiliövarastoja lyhytaikaiseen lämmöntarpeen ja tuotannon yhteensovittamiseen, mutta varsinaiset kausivarastot ovat yleensä erityyppisiä maanalaisia varastoja. (Motiva)

Maaperän salliessa aurinkolämmön varastona käytetään:

- porakaivokenttiä (BTES, Borehole Thermal Energy Storage),
- pohjavesivarantovarastoja (ATES, Aquifer Thermal Energy Storage) tai
- kaivantovarastoja (PTES, Pit Thermal Energy Storage).

Eri puolille Suomea on rakennettu BTES-tyyppisiä kausivarastoja, joissa lämpö varastoidaan joko kalliomaalla porakaivoista muodostuneeseen energiakenttään tai savimailla vastaavaan energiapaalukenttään. (Motiva)

Uusiin kauppakeskuksiin rakennetaan usein lyhytaikaiseen energiavarastointiin suunniteltuja ratkaisuja, muun muassa samanaikaisen lämmitys- ja jäähdytystarpeen vuoksi. Maalämpö lämpökaivoineen on muutenkin yleinen ratkaisu suurissa uudiskohteissa. (Motiva)

Suurin käytössä oleva pohjavesivarantoon perustuva lämpövarasto on Ruotsissa Arlandan lentokentällä, jossa kesän yllilämpö varastoidaan kentän alapuolella olevaan maanalaiseen järveen ja palautetaan sitten talvella lämpöpumpuilla lämmityskäyttöön. (Motiva)

Kaivantolämpövarastoja on rakennettu erityisesti Saksassa ja Tanskassa, koska siellä ei löydy sopivia olosuhteita muille varastotyypeille. Suomessakin on rakennettu porakaivovarastoja, joihin varastoidaan kesän aikaista hukkalämpöä talven lämmöntarpeen varalle. (Motiva)

3.2 Esimerkki Arlandan lentokenttä

Jättimäinen määrä energiaa kuluu lentokentän ylläpitoon ja etenkin pohjoismaissa, missä energiaa tarvitaan sekä lämmitykseen että viilennykseen. Arlandan lentokenttä tarvitsee yhtä paljon energiaa kuin pieni 25 000 asukkaan kylä.

Säästääkseen energiakustannuksissa ja toteuttaakseen kunnianhimoisia ympäristötavoitteitaan Arlanda päätyi ainutlaatuiseseen ratkaisuun ja rakensi maailman suurimman maanalaisen vesivaraston, joka tuottaa lähes kaiken lentokentän kesällä tarvitseman jäähdytysenergian. Kyseinen vesivarasto on pohjavesivarantovarasto eli lyhenteeltään ATES. Vesivaraston lämpöenergiaa käytetään talvella lentokoneiden pysäköintipaikkojen sulattamiseen ja rakennusten tuloilman esilämmitykseen. (Retermia)

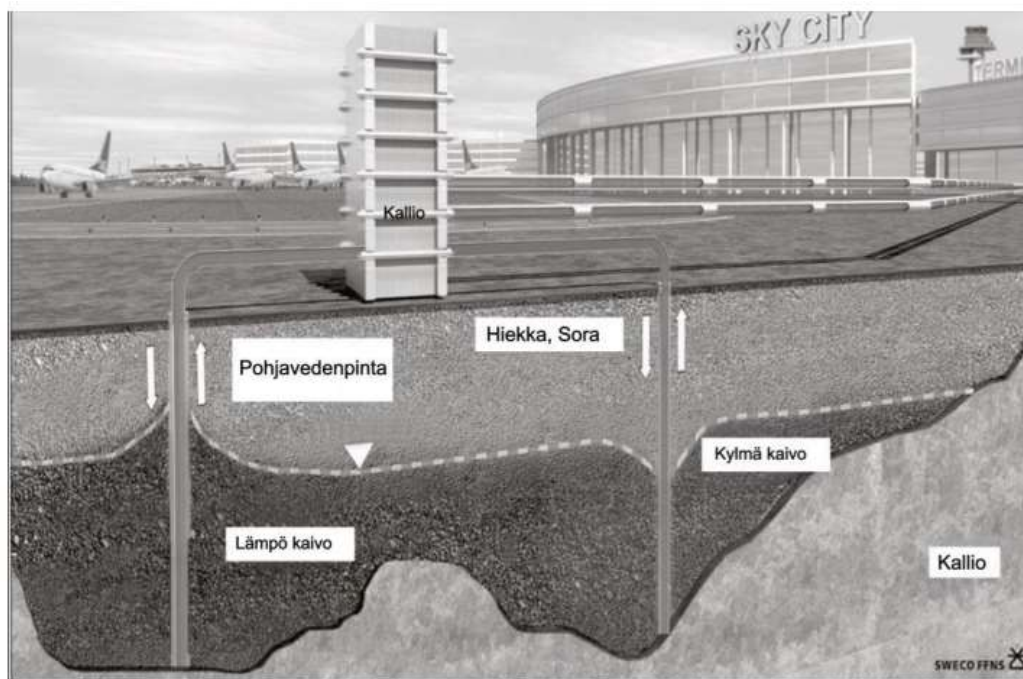
Arlandan lentokentältä, jossa lentokentän toisella puolella olevista energiakaivoista otetaan lämpöenergiaa eli käytännössä ladataan kaivoihin kylmäenergiaa. Toisella puolella lentokenttää vastavuoroisesti kaivoihin laitetaan lämmintä energiaa eli otetaan tarvittaessa kylmäenergiaa (KUVA 5).



KUVA 5. Havainnekuva Tukholma-Arlanda lentoaseman pohjavesilämpöjärjestelmästä (Retermia)

Alun perin kohteessa energiaa otettiin läheisestä vesistöstä mutta vesistön lämpenemisen seurauksien vuoksi energiaa päätettiin ottaa siiviläkaivoista avojärjestelmänä lämmönvaihdistinta hyödyntäen. (Nordell et al. 2014)

Kuvassa 6 on esitelty poikkileikkauskuva havainnollistamaan lämpövarastoja.



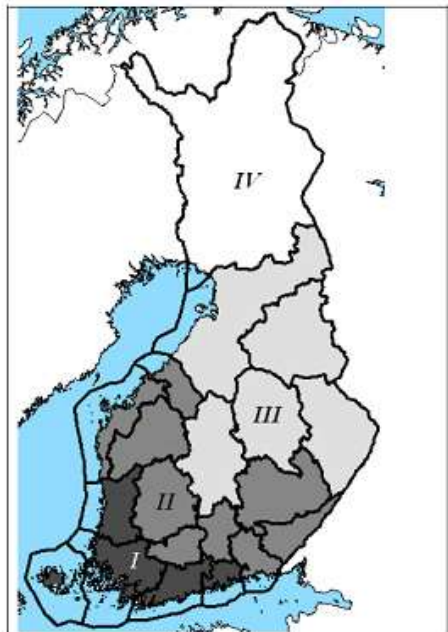
KUVA 6. Havainnekuva lämpövarastona toimivasta harjusta Tukholma-Arlanda lentoaseman yhteydessä (Nordell et al. 2014)

Prosessissa ei käytetä pohjavettä. Sen sijaan sama tilavuus palautetaan ja pumpataan putkien läpi pohjaveden varastointiyksikköön käytön jälkeen.

4 ESIMERKKIKOHDE

Esimerkkikohde on olemassa oleva teollisuushalli, joka on suunniteltu 2000-luvulla. Elomatic Oy on suunnitellut LVIA-suunnitelmat kohteeseen. Rakennukset on liitetty kaukolämpöverkoston. Kaukolämmön mittauskeskus sijaitsee rakennuksen lämmönjakohuoneessa.

Rakennuksen lämpöhäviölaskelmissa lämpöhäviöiksi on saatu noin 90 kW. Ilmanvaihtokoneen tarvitsee tuottaa 10,5 m³s ilmaa. Työselityksessä ilmanvaihdolle on määritetty SFP-luvuksi enintään 2.5 kW/m³s ja ilmanvaihdon lämmityspatterin tehoksi 315 kW. Kohteen patteriverkosto ja iv-patterit ovat mitoitettu toimimaan +60/40°C ja ilmastointiryhmä +70/40°C. Työselityksessä mitoitettava ulkolämpötila on -26°C, joka perustuu mitoitettavien ulkolämpötilojen eri vyöhykkeisiin (kuva 3).



Säävyöhykkeet. Lähde:RaMK D5:2007

Säävyöhyke	Mitoitettava ulkoilman lämpötila [°C]	Vuoden keskimääräinen ulkoilman lämpötila [°C]	Lämmityskauden keskimääräinen ulkoilman lämpötila [°C]
I	-26	+5	+1
II	-29	+4	0
III	-32	+2	-1
IV	-38	0	-5

KUVA 3. Mitoitusvyöhykkeet (Suomen rakentamismääräyskokoelma)

Kyseiseen teollisuushalliin on tarkoitus tutkia kaukolämmön korvaamista maalämmöllä, sekä ilmanvaihdon esilämmityksen hyödyntämistä maapiirillä ja niiden vaikutuksia rakennuksen lämpötehontarpeeseen.

Teollisuushalliin ei ole tarkoitus tehdä muita muutoksia, kuin siirtyä käytännössä yksi yhteen mallilla maalämpöjärjestelmään. Maalämpöpumput mitoitetaan yleisesti käytetyllä osatehomitoituksella, jolloin ne lämmittävät korkeimmilla pakka-silla sähkövastuksien avulla jäljellä olevan määrän. Sähkötehontarpeen kasva-essa huomattavasti, voi aiheutua lisäkustannuksia suuremmista liittymismak-suista, muuntajista ja lukuisista muista asioista. Järjestelmä tulee mitoitaa si-ten, että asian ottaa huomioon ja valitsee täysteho- tai osatehomitoituksen ta-pauskohtaisesti.

Tässä tapauksessa on oleellista huomata vanhat tai kumotut ohjeet, joissa on huomattavasti löyhemmät vaatimukset rakentamiseen, onhan suunnitelmista ja laskelmista lähes viisitoista vuotta aikaa. Kumottujen ohjeiden ja määräysten myötä mitoitus ei tule onnistumaan täysin identtisellä ilmanvaihtokoneella, vaan ilmanvaihtokone, sekä olosuhteet pitää säätää mahdollisimman lähelle vanhaa mitoitusta, koska alkuperäinen ei ole hyväksyttävä nykyisillä energiamääräyksillä.

5 MAALÄMMÖN SOVELTAMINEN KOHTEESEEN

5.1 Alkutiedot

Teollisuushallin ilmanvaihdon lämmitykseen aikaisempien laskelmien mukaan 315 kW lämmitystehoa, josta pelkän rakennuksen lämpöhäviöihin menee 90 kW. Esilämmityspatterilla tavoiteltiin talven mitoituslämpötilan nostoa 10°C verran. Mitoitusalueen 1 ulkolämpötilan mitoitusarvo talvella on -26°C asteesta, jonka tuli esilämmityspatterin avulla nostaa -16°C asteeseen. € Näillä arvoilla ilmastointikoneen Acon-mitoitusohjelmasta esilämmityspatterin tehoksi tuli 135 kW, joka leikkaa lämmitystehontarvetta kiinteistössä. Tässä pitää kuitenkin muistaa, että myös maalämpöpumput, jotka lisätään teollisuushalliin tarvitsevat sähköä toimakseen.

Maalämpöpumput tulisi valita kohteeseen siten, että niiden hyötysuhteet olisivat valmiiksi mahdollisimman korkeat, koska kohteen nykyinen patteriverkosto on suunniteltu toimivan alueella +60/40°C. Maalämpö tulisi suunnitellaan toimimaan alueella +55/40°C ja se merkitsee sitä, että maalämpöpumppujen hyötysuhde laskee, kun lämpötila kasvaa. Tästä johtuen tulee ottaa huomioon, miten uuden järjestelmän sovittaminen tapahtuu vielä energiatehokkaasti ja siten, että nykyinen järjestelmä ja esimerkiksi teollisuushallin lämmityspatterit toimivat moitteitta.

Erään maalämpöpumppuja valmistavan yrityksen esite antaa modernin maalämpöpumpun COP-kertoimeksi silmämääräisesti katsottuna 2.9 alueella 0/55. Samasta käyrästä katsottuna toiminta alueelle 0/60 on COP-kerroin noin 2.75. Lämpökerroin ei siis huonone ratkaisevasti ja maalämpöpumpun saa toimimaan kyseiseen järjestelmään suoraan.

Yhdestä lämpökaivosta saadaan tavallisesti energiaa noin 20 W – 40 W per metri. Tämä tarkoittaa sitä, että 200 metrin porakaivot tuottavat noin 4 kW – 8 kW per reikä. Tähän lisäksi kiinteistön lämmittämiseen saadaan kompressorin kuluttaman sähköenergian verran lämmitysenergiaa.

Teollisuushallin maalämpöpumput ja kaivot tulee laskennan perusteella mitoittaa 315 kW teholle, joka tarkoittaa 28 porakaivoa riippuen kaivojen tuottamasta tehosta ja syvyydestä. Tässä tapauksessa on kuitenkin järkevämpi porata 300 metriä syviä reikiä, jolloin 40 W per metri laskettuna energiakaivojen tehoksi on 12 kW per energiakaivo. Tällä menetelmällä reikiä tarvitsisi porata 28 kappaletta. Mitä vähemmän energiakaivoja on, sitä helpompaa ne ovat sijoittaa tontille ja tontilla tehtävien maanrakennustöiden ja esimerkiksi keruukaivojen määrä vähenee.

5.2 Maalämpökaivojen poraus

Porakaivon tekeminen on iso osa maalämmön asennuksen hinnasta. Porakaivojen lisäksi hintaan sisältyy energiakaivojen putket sisään asti tuotuna sekä tontin maanrakennustyöt. Tarjouspyyntöön vastanneen Rototec Oy:n mukaan kaivojen hinta määräytyy alalla tyypillisesti putkimetriä mukaan, ja esimerkiksi 200 metriä syvä kaivo maksaa tyypillisesti 32 €/m. Mikäli kaivo on vaikka 120 metriä syvä, hintaan lisätään 3 €/metriltä. Hintaan vaikuttaa myös maalämpöputkien koko. Mikäli maalämpöputki on 40 mm putkea, pysyy hinta alkuperäisenä. Painehäviöiden kasvaessa liian suuriksi, käytetään 45 mm maalämpöputkia. 45 mm maalämpöputki maksaa 2 €/metri enemmän.

Aiemmin arvioidut noin 28 kpl 300 metrin syvyisiä reikiä, jotka tuottavat 12 kW, tulisi siis tarjouksen mukaan maksamaan 10714,28 € reiältä. Kokonaisuudessaan hinnaksi tulisi 300 000 €.

Kokonaishinta voisi olla myös paljon vähemmänkin, sillä urakoitsijat todennäköisesti antaisivat erittäin kilpailukykyisiä tarjouksia näinkin isosta urakasta verrattuna omakotitalon pieneen urakkaan, johon kuuluu kaluston siirtely ja yhden tai kahden reiän poraus samalle tontille.

Kaivokentästä voi muodostua huomattavasti kalliimpi tietyissä tapauksissa. Rototec Oy:n mukaan tällaisia skenaarioita voi olla esimerkiksi.

- Ei kallisteta kaivoja, vaan porataan suoria kaivoja etäälle toisistaan. Maarakennustyöt ja putkimäärät kasvaa.
- Käytetään ylisuuria putkikokoja
- Käytetään valmiiksi eristettyjä runkoputkia sen sijaan, että eristettäisiin putket EPS-kourulla
- Käytetään ylisuuria eristevahvuuksia
- Kaivetaan jokaiselle kaivolle tähtimäisesti oma ura, joka lisää maanrakennustöitä
- Porataan liian matalia tai liian syviä kaivoja
- Tuodaan jokaiselta kokoomakaivolta omat runkoputket tekniseen tilaan

5.3 Ilmanvaihdon esilämmitys maapiirillä

Ilmanvaihdon mitoitus on suoritettu aikanaan Acon-mitoitusohjelmalla. Mitoitetun ilmanvaihdon alkuperäinen lämmityspatteri on kooltaan 291 kW, lämmöntalteenotto on mitoitettu 444 kW tehoiseksi. Järjestelmän SFP-luku on 1,42 kW/m³/s ja SFPe on 1,55 kW/m³/s.

Acon-mitoitusohjelmaa hyödyntäen IV-koneen aikaisemmat mitoitustiedot saatiin projektista esille. Koneeseen lisättiin erillinen esilämmityspatteri, jonka tarkoitus on esilämmittää ilmaa 10°C. Esilämmityspatterin teho lasketaan kaavalla 1. Lähötiedoissa oli annettu ilmamäärä q_v 10,5 m³/s. Ilman ominaislämpökapasiteetti c on 1,0 kJ/(kg·°C) ja ilman tiheys ρ on 1,29 kg/m³.

$$\dot{Q} = q_v \cdot c \cdot \rho \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$\dot{Q} = 10500 \frac{\text{l}}{\text{s}} \cdot 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (-26 - (-16))$$

$$\emptyset = 135450 \text{ W} \cdot 1000$$

$$\emptyset = 135,45 \text{ kW}$$

Esilämmityspatterin tehon laskemisen jälkeen se lisätään Acon-mitoitusohjelmaan ja katsotaan miten LTO:n ja jälkilämmityspatterin arvot muuttuvat.

Esilämmityspatterin lisäyksen seurauksena LTO:n teho tippui 444 kilowatista 332 kilowattiin. Alkuperäisen lämmityspatterin teho pieneni 291 kilowatista 249 kilowattiin. Alkuperäinen mitoitettu teho oli yhteensä 444 kW + 291 kW joka on yhteensä 735 kW.

Esilämmityspatterin kanssa tehontarvetta on yhteensä 135 kW + LTO 332 kW + 249 kW lämmityspatteri, jotka ovat yhteensä 716 kW. Erilaiset yhteistehot johtuvat pattereiden ja LTO:n limityksestä.

Pelkällä esilämmityspatterin lisäyksellä tehontarve jälkilämmityspatterilta putoaa 42 kW. Toisen tyyppisellä LTO:lla saataisiin esilämmityksestä suurempi hyöty, koska huurtuminen alkaisi matalammassa lämpötilassa. Nykyinen pyörivä LTO on niin hyvä, että esilämmityksen lisäämisellä sen LTO:n lämmöntalteenottoteho heikkenee merkittävästi ja silloin esilämmityksestä ei ole niin paljoa hyötyä. LTO:n talteenottoteho putosi mitoituksen mukaan 112 kW. Esimerkiksi epäsuora nestekiertoinen LTO saavuttaisi isomman hyödyn esilämmityksellä, koska sen LTO:n talteenottoteho on huonompi, eikä se siten putoaisi niin merkittävästi. Esilämmityspatterin lisäyksen myötä LTO ei todennäköisesti koskaan mene huurteenpoistotilaan.

Mitoitusohjelmat eivät hyväksyneet maapiirissä käytetyn nesteen alhaista lämpötilaa tai etanolipitoisuuden kasvattamista. Tästä johtuen maapiiriä ei tarkastella enempää opinnäytetyössä.

5.4 Kaukolämmön kustannukset

Turku Energian hinta-arviot perustuvat kausittaisiin hintoihin, jotka menevät vuodenaikojen mukaan (TAULUKKO 1.)

Turku-Energia		snt/kWh	€/MWh
	Kesäkausi	6,894	68,940
	Syyskausi	8,911	89,110
	Talvikausi	10,349	103,490
	Kevätkausi	9,038	90,380
	Keskiarvo	8,798	87,980

TAULUKKO 1. Kausittaiset hinnat kaukolämmölle

Kaukolämmön hinta lasketaan taulukon 1 arvoilla. Edelliset laskelmat olivat Excel-muodossa, josta saatiin selville ilmanvaihdon lämpöenergiankulutus. Rakennuksen ilmanvaihdon alkuperäinen lämpöenergiankulutus on 310 006 kWh vuodessa. Ilmanvaihdon lämpöenergiankulutuksesta vuoden aikana ei saa tarkkaa arviota eri kausille, koska se lämmittää syksystä kevääseen kalliimmalla hinnalla paljon enemmän kuin kesällä. Tästä syystä laskelmissa tulisi tietää lämpötilat ympäri vuoden, jotta kustannus olisi täysin tarkka. Kesällä lämmitys on halpaa ja vähäistä, mutta sitä on vähän verrattuna kylmiin keleihin, joka nostaa vuodessa maksettua energian määrää keskiarvoa korkeammaksi. Arvioiden keskihinta kaukolämmölle vuoden aikana voisi olla esimerkiksi 9,3 snt/kWh, vaikka kausien laskennallinen keskiarvo on 8,798 snt/kWh. Arvioitu keskiarvohinta vuodessa kaukolämmöllä tulee kaavasta 2. Kertolaskun jälkeen kaavassa oleva vakio 100 senttiä muuttaa tuloksen euroiksi.

$$9,3 \frac{\text{snt}}{\text{kWh}} \cdot 310006 \text{ kWh} \div 100 \text{ snt} \quad (2)$$

Ilmanvaihdon lämpöenergiankulutus kaukolämmityksellä vuodessa

$$= 28\,830,56 \text{ €}$$

5.5 Siirtyminen kaukolämmöstä maalämpöön

Maalämpöön siirtyminen merkitsee isompaa investointia, koska 315 kW lämmitys tarvitsee kattaa suurella porakentällä. Tässä tapauksessa energiakaivoja tulisi porata 28 kappaletta, jotka ovat 300 metriä syviä. Rototec Oy:n tarjouksessa hinnaksi urakalle tulisi 300 000 €, johon sisältyy maanrakennustyöt ja tarvikkeet vedettynä tekniseen tilaan asti. Tämän lisäksi LVI-alalla toimiva yritys tarjosi kohteeseen sopivat maalämpöpumput, asennus-sarjat ja sähkökattilat kokonaishintaan 102 898 €. Yhteensä investoinnin hinnaksi tulisi 402 898 €.

Rakennuksen lämpöenergiankulutus vuoden aikana on 310 006 kWh.

Saatujen energialaskelmien mukaan ostoenergia maalämmöllä olisi 93 939,39 kWh, joka tulisi tuottaa sähköllä. Kaavalla 6 saadaan laskettua maalämmön ostoenergian hinta vuoden aikana. Lopuksi kaukolämmön ostoenergian määrästä vähennetään maalämmön ostoenergia, jolloin erotuksesta muodostuu maalämpöön siirtymisellä saavutettava säästö vuoden aikana.

$$7,63 \frac{\text{snt}}{\text{kWh}} \cdot 93\,939,39 \text{ kWh} \div 100 \text{ snt} + 59,28 \text{ €} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \textit{Vuositainen hinta sähköenergiankulutukselle maalämmöllä} \\ & = 7\,226,85 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\textit{Vuositainen säästö siirtymällä kaukolämmöstä maalämpöön}$$

$$\begin{aligned} & = 28\,830,56 \text{ €} - 7\,226,85 \text{ €} \\ & = 21\,603,71 \text{ €} \end{aligned}$$

Kaukolämmöllä tapahtuva lämmitys kiinteistölle maksoi vuodessa 28 830,56 €, joka on noin 21 600 € enemmän verrattuna maalämmöllä maksettavaan hintaan 7226,85 €. Laskennan tuloksena maalämpöön siirtyminen kokonaisuudessaan vaatisi noin 403 000 € investoinnin ja se maksaisi itseään takaisin noin 21 600 € per vuosi. Korkokantoja ja inflaatiota huomioonottamatta se tarkoittaisi noin 19

vuotta takaisinmaksulle (TAULUKKO 2). Investointia harkitsevan tulisi myös huomioida energiakaivoista saatavilla olevaa viilennystä, joka vaikuttaa työntekijöiden työolosuhteisiin sekä työhyvinvointiin etenkin lämpimillä ajanjaksoilla.

Tulokset		
	Kaukolämpö	Maalämpö 315kw
Kulutus (€/a)	28 830,50 €	7 226,75 €
Säästö (€/a)	-	21 603,75 €
Investointi, laitteet (€)	-	102 898,00 €
Investointi, porakaivot (€)	-	300 000,00 €
Investointi <u>yhteensä</u> (€)	-	402 898,00 €
Takaisinmaksu (vuotta)	-	18,6

TAULUKKO 2. Laskennan tulokset ja takaisinmaksuaika

6 POHDINTA

Työn tarkoituksena oli perehtyä maalämpöjärjestelmään yleisesti käsitteenä, sen mitoitusperusteisiin ja toimintaperiaatteisiin. Lisäksi työssä selvitettiin, kuinka paljon on mahdollista säästää kiinteistön lämmitys- ja sähkökustannuksissa maalämmöllä toimivaa esilämmityspatteria hyödyntäen, samalla kun muun tekniikan tulisi säilyä ennallaan. Työssä esiteltiin olemassa oleva projekti, joka on aikanaan mitoitettu toimimaan tietyillä arvoilla ja ilmanvaihtokoneella. Työn puitteissa saatiin selvitettyä mahdollinen säästö uusilla laitteilla. Projektiin suunniteltua kaukolämmön- ja sähkönkulutusta oli tarkoitus leikata nykyiseen verrattuna ja siten parantaa energiatehokkuutta. Maalämmön ja ilmanvaihdon esilämmityspatteria mitoittaessa tuli haasteita vanhan järjestelmän toimintalämpötilojen kanssa, jotka eivät tuonutkaan odotettua energiatehokkuutta vanhaan järjestelmään verrattuna. Olemassa olevan järjestelmän lopullisia mitoitus tietoja ei pystytty vertailemaan tasavertaisesti, koska tämän päivän ohjeet ja määräykset ovat tiukentuneet. Tästä syystä vertailussa jouduttiin hieman soveltamaan. Tämä osaltaan vaikuttaa tutkimuksen säästölaskelmien totuudenmukaisuuteen ja siten järjestelmien suoraan vertailuun keskenään suosien hieman vanhaa järjestelmää. Työn tutkimusosuuden perusteella ja esitetyillä uudistuksilla olisi mahdollista saavuttaa arviolta noin 21 600 € säästö verrattuna vanhaan järjestelmään. Hankkeen voisi tehdä perusteellisemmin ja sitä kautta vähentää sen virheellisyyttä. Työtä voisi selkeästi kuitenkin jalostaa pitemmälle, jotta voidaan arvioida tarkemmin sen kannattavuutta. Työn lopputulos saavutti sille asetetut tavoitteet. Työstä kerätyt tiedot ja malli toimii apuna tämän kaltaisissa projekteissa ja sopii hyvin näyttämään suuntaa erilaisille vaihtoehdoille kustannuksineen. Kokonaisuuden kannalta työ osoitti myös sen, että etenkin sellaisissa rakennuksissa joiden lämmitysjärjestelmä on suhteellisen vanha, voi olla järkevämpi vaihtaa koko lämmitysmuoto, kuin lisätä pelkkä esilämmityspatteri ilmanvaihdon tueksi. Tulokset olivat mielestäni melko odotetut ja maalämpö vähentäisi ostoenergiantarvetta merkittävästi. Tuloksia arvioidessa pitää muistaa energian nykyhintaa, korkokantaa ja inflaatio. Esimerkiksi vuonna 2020 sähkön keskihinta oli Omavoima.fi mukaan 3,47 snt/kWh. Vuoden 2020 hinnalla se tarkoittaisi käytännössä puolittaisi lasketun sähkön hinnan vuositasolla ja vähentäisi takaisinmaksuaikaakin merkittävästi. Tulevaisuudessa sähkö kuitenkin voi myös nousta merkittävästi, joka pidentäisi järjestelmän takaisinmaksuaikaa.

LÄHTEET

Energiakorjaus.info, 2013. Pientalon ilmanvaihto. Luettu 30.5.2023

http://www.energiakorjaus.info/pages/kortit/Pientalo_10_Ilmanvaihto_2013_02_01.pdf

Energiatehokaskoti, a. N.d. Maapiirillä lisää energiatehokkuutta ja asumismukavuutta. Luettu 30.5.2023

https://www.energiatehokaskoti.fi/files/380/Maapiirilla_lisaa_energiatehokkuutta_ja_asumismukavuutta.pdf

Energiatehokaskoti, b. 2020. Suunnittelu – talotekniikan suunnittelu – lämmitys – ilmalämpö- ja maalämpöpumput – maalämpöpumppu. Luettu 30.5.2023.

https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan_suunnittelu/lammitys/ilmalampo- ja_maalampopumput/maalampopumppu

Energiatehokaskoti, c. 2021. Korjaaminen – viilennysratkaisuja. Luettu 30.5.2023.

<https://www.energiatehokaskoti.fi/korjaaminen/viilennysratkaisuja>

Gebwell, a. N.d. Maalämpö. Luettu 9.1.2023.

<https://gebwell.fi/maalampo/>

Gebwell, b. N.d. Maalämpö. Maalämpöpumput kerrostaloissa. Luettu 30.5.2023.

<https://gebwell.fi/maalampo/maalampopumput-kerrostaloissa-mitoita-maalampopumppusi-oikein/>

Gebwell, c. N.d. Maalämpö. Maalämpö suurten kiinteistöjen lämmityksessä. Luettu 20.1.2023.

<https://gebwell.fi/maalampo/maalampo-suurten-kiinteistojen-lammityksessa/>

Gebwell, d. N.d. Maalämpö. Kerrostalon kaivokentän suunnittelu. Luettu 30.5.2023

<https://gebwell.fi/maalampo/kerrostalon-kaivokentan-suunnittelu/>

Gebwell, e. N.d. Maalämpö. Mitä maalämpö maksaa. Luettu 30.5.2023

<https://gebwell.fi/maalampo/mita-maalampo-maksaa/>

Juvonen, J & Lapinlampi, T. 2013. Energiakaivo. Luettu 10.1.2023.

https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=4&isAllowed=y

Kouvo, J. 2017. Pohjaveden hyödyntäminen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmissä Suomessa. Luettu 30.5.2023.

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/139964/Kouvo_Joonas.pdf?sequence=1

Leppäharju, N. 2008. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Luettu 30.5.2023.

<https://www.finna.fi/Record/oy.9910109333906252>

Motiva, a. N.d. Lämpöä omasta maasta Maalämpöpumput. Luettu 30.5.2023

https://www.motiva.fi/files/7965/Lampoa_omasta_maasta_Maalampopumput.pdf

Motiva, b. N.d. Hanki hallitusti maalämpöjärjestelmä. Luettu 30.5.2023

https://www.motiva.fi/files/4764/Hanki_hallitusti_maalampojarjestelma.pdf

Motiva, c. N.d. Lämpöpumppujen hankintaopas kunnat ja taloyhtiöt. Luettu 30.5.2023

https://www.motiva.fi/files/14752/Lampopumppujen_hankintaopas_kunnat_ja_taloyhtiot.pdf

Nordell, B., Snijders, A. & Stiles. 2014. The use of aquifers as thermal energy storage (TES) systems', in Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods 27 and Applications. Luettu 6.6.2023.

<https://www.sciencedirect.com/book/9781782420880/advances-in-thermal-energy-storage-systems>

Pihlanen, N. 2021. Kohderyhmäkohtaisen geoenergiakoulutusmateriaalin muodostaminen. Luettu 30.5.2023

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/501776/Pihlanen_Niko.pdf?sequence=3

Purhonen, S. 2016. Energiakaivojen mitoitukseen liittyvät tekijät. Luettu 11.1.2023. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/108157/Energiakaivojen%20mitoitukseen%20liittyvat%20tekijat.pdf>

Pöllänen, L. 2021. Maalämpö pientalon lämmitysmuotona. Luettu 30.5.2023 https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/509449/P%C3%B6ll%C3%A4nen_Lauri.pdf?sequence=2

Rakentamismääräykset. Asetuksiin liittyvät ympäristöministeriön ohjeet. Energia-
tehokkuus – Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen las-
kenta (2018). Luettu 7.2.2023. <https://ym.fi/rakentamismaaraykset>

Retermia, N.d. Case Arlanda. Luettu 30.5.2023 https://retermia.fi/wp-content/uploads/2018/09/Case_Arlanda_21082018_web.pdf

Sandberg, E. 2016. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Osa 1. Painos 2. Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Suomela, N.d. Maalämmön hyödyt – käytön helppous ja edullisuus. Luettu 30.5.2023 <https://www.suomela.fi/maalammon-hyodyt-kayton-helppous-ja-edullisuus/>

Suomenporakaivo, N.d. Ympäristöopas lämpökaivo. Luettu 30.5.2023 <http://www.suomenporakaivo.fi/pdf/ymparisto-opas-lampokaivo.pdf>

Sähkölaitos, N.d. Lämpöratkaisut. Luettu 7.2.2023. <https://www.sahkolaitos.fi/yrityksille-ja-taloyhtioille/lamporatkaisut/>

Sänkiäho, R. 2017. Tuloilman lämmitys maapiirillä. Luettu 30.5.2023.

<https://www.theseus.fi/handle/10024/127380>

Tekniikanmaailma, 2023. Maalämpökaivo jäähtyy vuosien mittaan. Luettu 31.5.2023

<https://tekniikanmaailma.fi/lehti/5a-2023/maalampokaivo-jaahtyy-vuosien-mittaan/>

Thermia Oy, N.d. Miten maalämpö toimii. Luettu 30.5.2023

<https://www.thermia.fi/maalampo/maalampo1/miten-maalampo-toimii/>

Tom Allen Senera, N.d. Maalämpö. Luettu 30.5.2023

<https://www.tomallensenera.fi/maalampo>

Turku Energia, N.d. Kaukolämpöhinnasto. Luettu 30.5.2023

<https://www.turkuenergia.fi/asiakaspalvelu/kaukolampohinnasto/>

Underground energy, 2021. ATEs – Aquifer Thermal Energy Storage. Luettu 6.6.2023

<https://underground-energy.com/our-technology/ates/>

Urakkamaailma.fi, 2023. Maalämmön hinta. Luettu 30.5.2023

<https://www.urakkamaailma.fi/maalampo-hinta>

Yle.fi, 2017. Liian lyhyissä maalämpökaivoissa voi piillä jäätymisen riski. Luettu 31.5.2023

<https://yle.fi/a/3-9986724>

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 20.12.2017/1010. Luettu 30.5.2023.

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010#Pidm45053757047552>

Wiheriäkoski, V. 2021. Lämpöenergian kausivarastointi maaperään. Luettu 30.5.2023

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/132699/Wiheri%C3%A4koskiVeeti.pdf?sequence=3>