



Janne Laksola

# Maalämpöpumppujen elinkaari- kustannukset

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

22.3.2024

# Tiivistelmä

Tekijä: Janne Laksola  
Otsikko: Maalämpöpumppujen elinkaarikustannukset  
Sivumäärä: 49 sivua + 3 liitettä  
Aika: 22.3.2024

Tutkinto: Insinööri (AMK)  
Tutkinto-ohjelma: Talotekniikka  
Ammatillinen pääaine: LVI-tekniikka  
Ohjaajat: Yliopettaja Aki Valkeapää

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli mitoitaa vanhaan olemassa olevan asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmä, tutustua mitoitamiseen liittyviin seikkoihin sekä tutkia maalämmön kannattavuuteen vaikuttavia seikkoja Helsingissä, Espoossa ja Vantaalla.

Työ tehtiin pääasiassa käyttämällä Excel-taulukkolaskentaohjelmaa. Ensin määritettiin kiinteistön lämmitystehon tarve sekä mitoitettiin maalämpöpumppu- ja PILTO-järjestelmä. Laitteiston mitoituksen jälkeen mitoitettiin energiakaivokenttä laskennallisesti. Laitteiston ja energiakaivonkentän mitoituksen jälkeen määriteltiin investoinnin suuruus, vuosittaiset käyttökulut ja kaukolämmön vertailuhinta sekä laskettiin näistä elinkaarikustannukset kahdella eri sähköenergian hinnalla.

Vaikka maalämpöön siirtymistä pidetään ympäristön kannalta positiivisena ratkaisuna, investoinnin kannattavuus vaihtelee merkittävästi eri kaupungeissa ja sähkön hintatilanteissa. Laskennan tuloksista voitiin päätellä, että maalämpö on kannattavinta Helsingissä. Espoossa maalämmön kannattavuus on Helsinkiä heikompi, Vantaalla maalämpöön siirtyminen ei ollut kannattavaa. Lisäksi tuloksista selvisi, että maalämmön kannattavuus riippuu voimakkaasti valituista lähtöarvoista, minkä vuoksi lähtöarvojen valintaan tulisi erityisesti kiinnittää huomiota.

Työn tuloksia voidaan hyödyntää Kiinteistöliitto Uusimaa Ry:n neuvontatyössä, ja ne auttavat ymmärtämään investointipäätösten epävarmuutta ja vaihtelevuutta, joka on seurausta erilaisten lähtöarvojen käytöstä.

Avainsanat: maalämpö, lämpöpumppu, asuinkerrostalo, elinkaarikustannus

---

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

## Abstract

Author: Janne Laksola  
Title: Life Cycle Cost Analysis of Geothermal Heat Pump System  
Number of Pages: 49 pages + 3 appendices  
Date: 22 March 2024

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Building Services Engineering  
Professional Major: HVAC Design  
Supervisors: Aki Valkeapää, Principal Lecturer

---

The purpose of this final year project was to dimension the geothermal heat pump system for an existing apartment building and study the factors influencing the profitability of geothermal heat in Helsinki, Espoo, and Vantaa.

The final year project was conducted through calculations using the MS Excel program. Initially, the heating power demand of the apartment building was determined, followed by the dimensioning of the geothermal heat pump and exhaust air recovery system. Subsequently, the energy well field was dimensioned computationally. After dimensioning the equipment and the energy well field, the investment size, annual operating costs, comparative district heating price, and life cycle costs were calculated with two electricity prices.

The calculations showed that geothermal heat is most profitable in Helsinki. The profitability in Espoo is lower than in Helsinki, and in Vantaa, transitioning to geothermal heat was not profitable. Additionally, the results revealed that profitability heavily depends on the chosen initial values, emphasizing the importance of careful consideration in selecting the parameters.

The thesis, with its conclusions, could be used in daily advisory work, aiding in understanding the uncertainty and variability of investment decisions due to different initial values.

Keywords: geothermal heat pump, heat pump, apartment house, life cycle cost

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	7
2	Asuinkiinteistön energiankulutus Uudellamaalla	8
2.1	Asuinkerrostalokanta Uudellamaalla	8
2.2	Asuinrakennusten lämpöenergiankulutus	8
2.3	Asuinkerrostalon lämmöntuotantotavat	10
2.4	Asuinkerrostalon lämmönjakotavat	12
2.5	Asuinkerrostalon ilmanvaihto	13
2.6	Indeksitalo	14
3	Maalämpö	16
3.1	Lämpöpumpun toimintaperiaate	16
3.2	Eri lämpöpumpputyypit	17
3.2.1	Poistoilmalämpöpumppu	17
3.2.2	Maalämpöpumppu	18
3.2.3	Hybridit	21
3.3	Energiakaivo	21
3.4	Lämpöpumpun hyötysuhteet	23
3.4.1	COP	23
3.4.2	SCOP	24
3.4.3	SPF	25
4	Maalämpöjärjestelmän mitoitus	26
4.1	Rakennusten lämmitystehon tarve	26
4.2	Rakennuksen lämmitystehon ominaislämpöhäviö	27
4.3	Käyttöveden tarvitsema lämmitysteho	28
4.4	Ulkolämpötilan pysyvyysarvot	29
4.5	Lämmitystehon pysyvyys	29
4.6	Lämpöpumpun mitoitus	30
4.7	Kaivokentän mitoitus laskemalla	31
5	Investointi- ja elinkaarilaskelmat	34
5.1	Investointi	34

5.2	Elinkaarikustannustarkastelu, LCC	34
5.3	Lämmöntuottojärjestelmien elinkaari	34
5.4	Energian hinnat ja hintakehitys	35
5.4.1	Kaukolämpö	35
5.4.2	Sähkö	35
5.5	Nimelliskorko	37
5.6	Inflaatio	38
5.7	Inflaation vaikutus energian hintaan	39
5.8	Nykyarvo	40
6	Laskennan tulokset	41
7	Yhteenveto	44
	Lähteet	48
	Liitteet	
	Liite 1: Kaukolämmön vuosikustannukset	
	Liite 2: Sähkön vuosikustannukset	
	Liite 3: LCC-laskennan tulokset	

## Lyhenteet

COP: *Coefficient of Performance*. Lämpöpumpun hetkellinen hyötysuhde.

LCC: *Life-Cycle Costing*. Elinkaarikustannus

PILP: Poistoilmalämpöpumppu. Lämpöpumppu joka hyödyntää lämmönlähteenään poistoilmaa.

PILTO: Poistoilman lämmön talteenotto. Nestekiertoinen lämmön talteenotolaite poistoilmakanavassa.

SCOP: *Seasonal Coefficient of Performance*. Lämpöpumpun koko lämmityskauden hyötysuhde.

SFP: *Seasonal Performance Factor*. Luku, joka kertoo lämpöpumpun todellisen vuosihyötysuhteen.

## 1 Johdanto

Insinööriyön tavoitteena on tutkia, miten voidaan tarkastella maalämpöön siirtymisen kannattavuutta ja mitkä tekijät vaikuttavat maalämpöremontin mitoitukseen ja elinkaaren kannattavuuteen tyypillisessä vanhassa olemassa olevassa asuinkerrostalossa. Asuinkerrostaloa ei voi siirtää kunnasta toiseen vaan kiinteistö on sidottu paikallisen sähkönjakelu- ja kaukolämpöyhtiön verkkoihin ja verkkoyhtiöiden määrittelemiін hintoihin, jotka vaihtelevat alueittain. Näillä paikakuntakohtaisilla eroilla voi olla ratkaiseva merkitys maalämmön kannattavuuteen verrattuna kaukolämpöön samalla maantieteellisellä ja ilmastollisella alueella kuten Espoossa, Vantaalla ja Helsingissä sijaitsevilla kerrostaloilla.

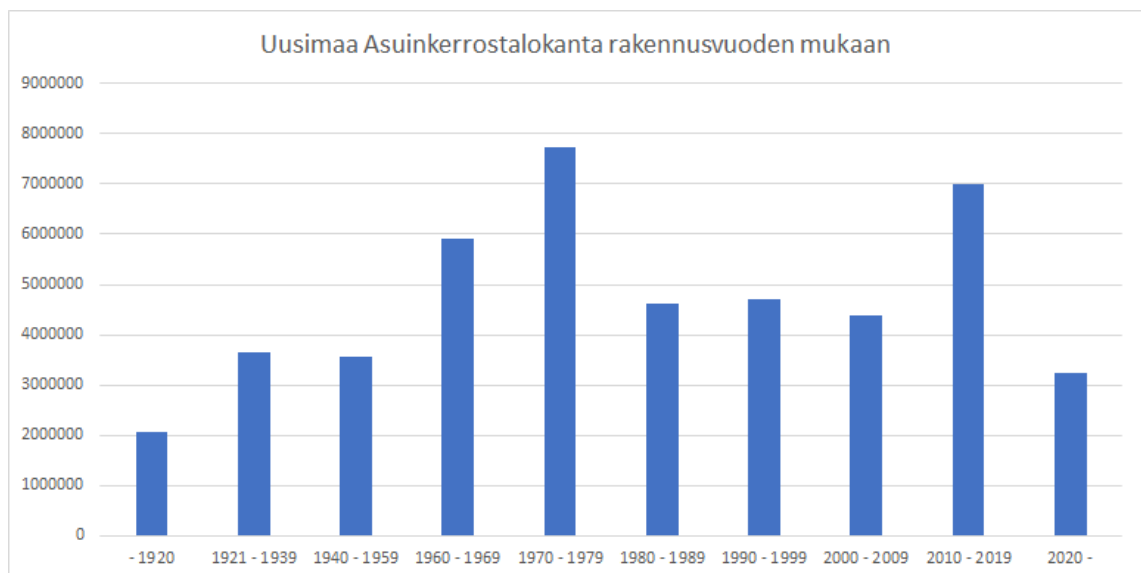
Suomen pitkän aikavälin tavoitteena on olla hiilineutraali yhteiskunta. Tämä on erityinen haaste energia-alalle, sillä Suomen kasvihuonepäästöistä pääosa syntyy energian tuotannosta ja kulutuksesta. Rakennettu ympäristö ja erityisesti rakennusten lämmitys muodostavat ison osan Suomen energian kulutuksesta. Rakennusten energiatehokkuutta on parannettu merkittävästi vuonna 2013 voimaan tulleilla rakentamismääräyksillä, joten uudet rakennukset ovat selkeästi energiatehokkaampia kuin vanhat. Vanhojen rakennusten energiatehokkuuden osalta energian tuotantotapa ja energian lähde tulevat korostumaan, kun tavoitellaan hiilineutraaliutta. (1, s. 12–13, 44–45.)

Insinööriyö tehtiin Kiinteistöliitto Uusimaa Ry:lle, joka on Suomen Kiinteistöliitto Ry:n suurin alueellinen jäsenyhdistys. Yhdistys on asuntokiinteistöalan johtava etujärjestö, joka valvoo yleisiä ja yhteisiä etuja ja edistää kiinteistöomaisuuden kunnossa- ja ylläpitämisen yleisiä edellytyksiä toimialueellaan.

## 2 Asuinkiinteistön energiankulutus Uudellamaalla

### 2.1 Asuinkerrostalokanta Uudellamaalla

Uudenmaan olemassa olevasta asuinrakennuskannasta suurin osa on vanhaa. Kerrostalokannasta valtaosa on 1960- ja erityisesti 1970-luvulla kaupunkeihin suuntaavan suuren muuttoliikkeen tarpeisiin rakennettua. Tämän jälkeisillä vuosikymmenillä kerrostaloja on rakennettu vähemmän 2010-luvulle saakka, jolloin kerrostalojen rakennusvolyymi kasvoi jälleen. Rivitalorakentamisen piikki sijoittuu 1970- ja erityisesti 1980-luvulle. (2, s. 24.) Kuvassa 1 on esitetty Uudenmaan asuinkerrostalokannan ikäjakauma.



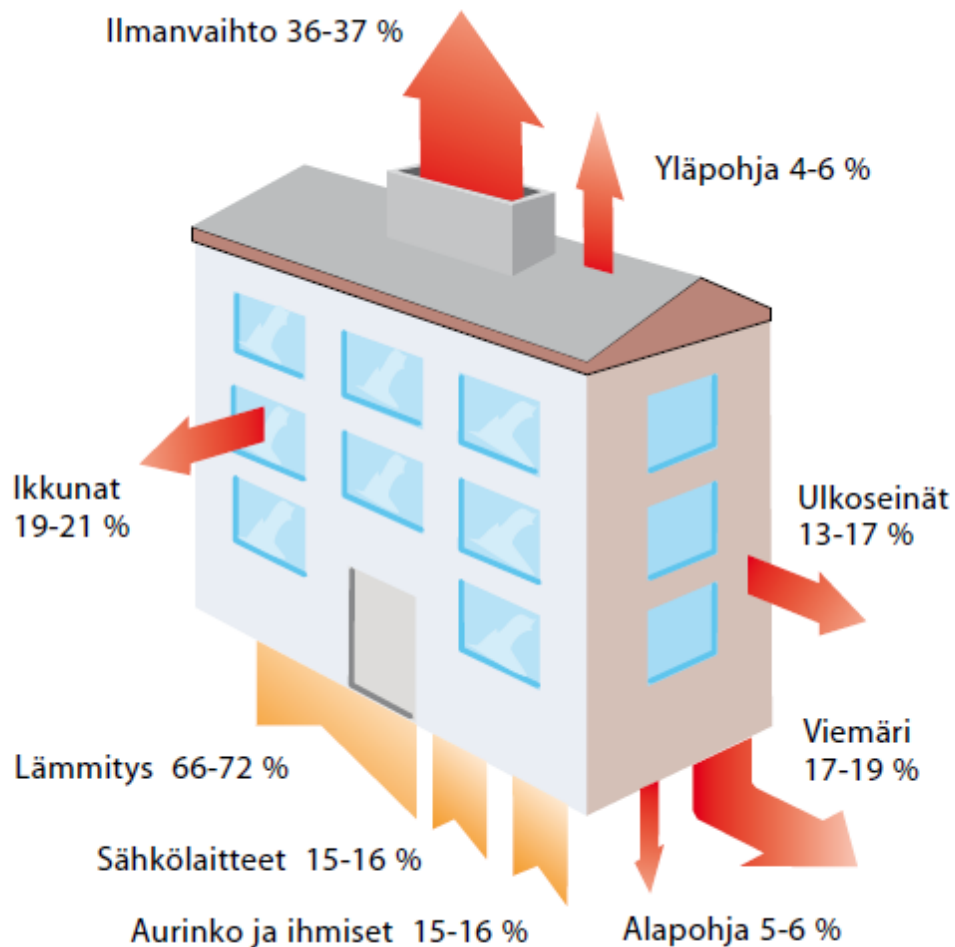
Kuva 1. Asuinkerrostalokanta Uudellamaalla kerrosalan mukaan (2).

### 2.2 Asuinrakennusten lämpöenergiankulutus

Asuinkerrostalojen kolme suurinta yksittäistä lämpöhäviöiden aiheuttajaa ovat ilmanvaihto, lämmin käyttövesi ja ikkunat. Ylä- ja alapohjan lämpöhäviöiden osuus ulkovaipan johtumishäviöistä on pieni. Myös rivitaloissa lämpöä häviää yleensä eniten ilmanvaihdon kautta. Rivitaloissa ala- ja yläpohjan kautta häviää suhteessa huomattavasti enemmän lämpöä kuin asuinkerrostaloissa. Häviö on



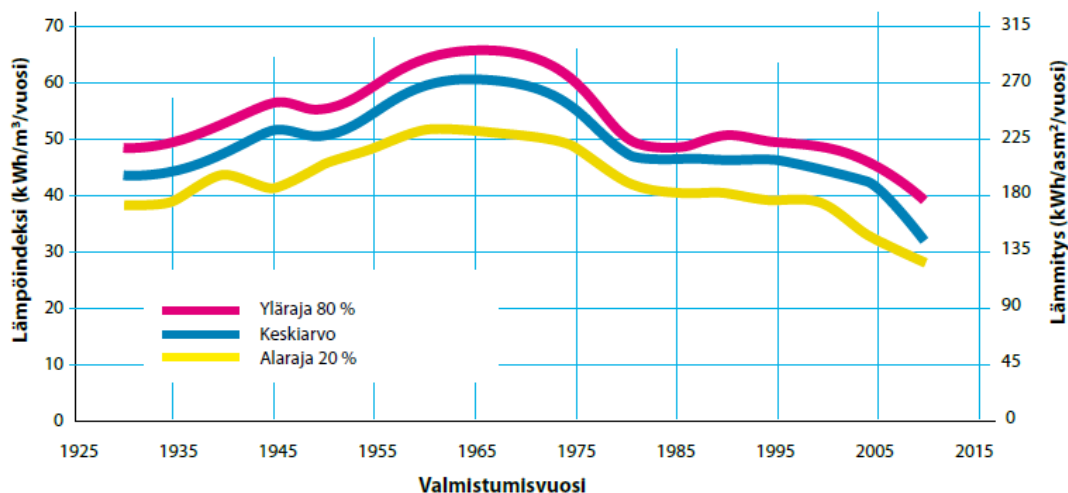
lähes yhtä suuri kuin lämpöhäviö ikkunoiden kautta. (4, s. 20.) Kuvassa 2 on esitetty 1960–1980-luvun asuinkerrostalon tyypillinen lämpöenergiatase.



Kuva 2. Kerrostalon lämpöenergiatase (4, s. 19).

Lämmitysenergian kulutuksen jakaumasta nähdään, kuinka esimerkiksi rakentamismääräysten muutokset ovat parantaneet rakennusten lämpötaloutta. Vuonna 1978 rakennusten lämmöneristysmääräykset kiristyivät noin 30 prosenttia, mikä näkyy erityisesti 1970–1980-luvun taitteessa asuinkerrostalojen lämpöindeksien alenemisena. 1960–1970-luvulla rakennetut asuinkerros- ja rivitalot sen sijaan kamppailevat tasavertaisesti suurimmasta lämpöindeksistä. Yhtenä syynä tähän on 1960-luvulta aina 2000-luvun alkuvuosiin asti käytössä

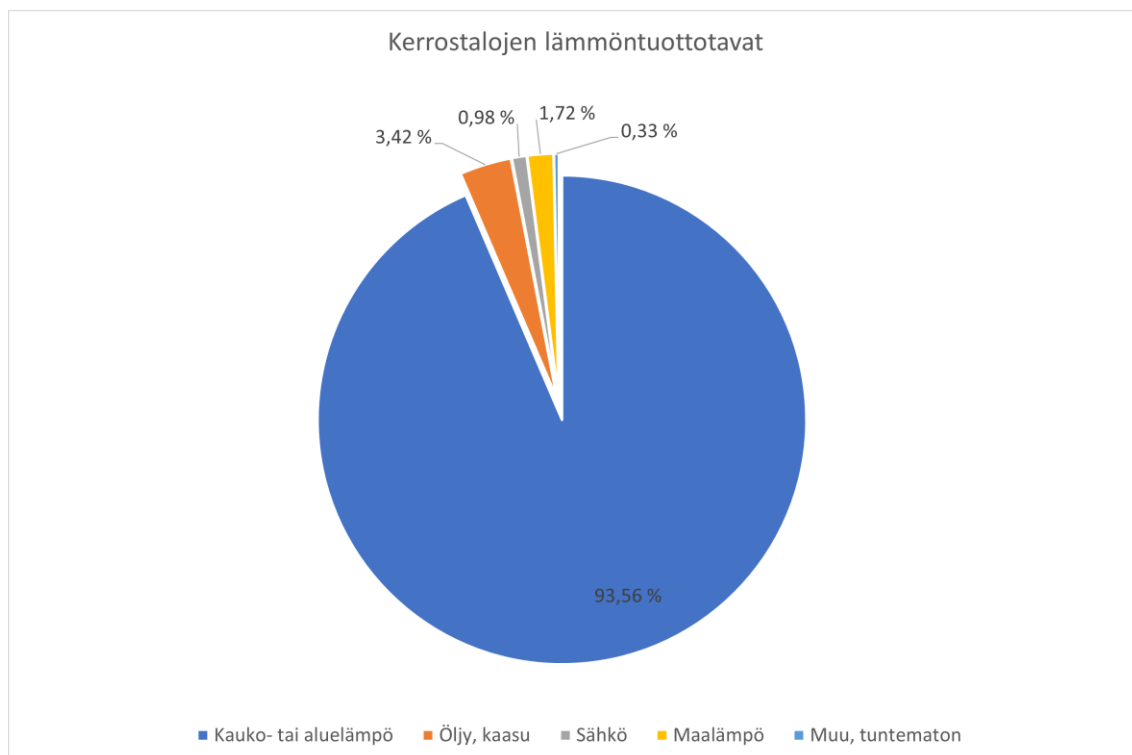
ollut koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä, jossa ei ole poistoilman lämmön-  
talteenottoa. (4, s. 22.)



Kuva 3. Eri-ikäisten asuinrakennusten lämpöenergian kulutus rakennusvuoden mukaan (4, s.21).

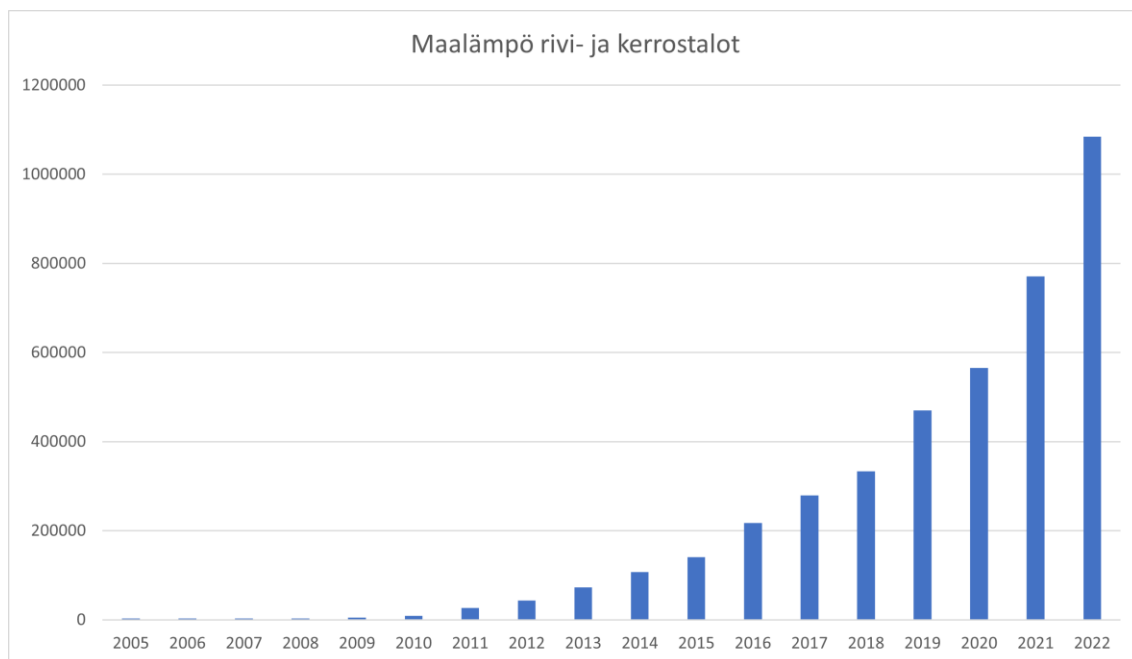
### 2.3 Asuinkerrostalon lämmöntuotantotavat

Ylivoimaisesti yleisin asuinkerrostalon lämmöntuotantotapa Uudellamaalla on edelleen kaukolämpö. Kuvasta 4 voidaan havaita, että yli 90 %:a asuinkerrostaloista lämpenee kaukolämmöllä, vain alle kaksi prosenttia kerrostaloista on siirtynyt maalämpöön.



Kuva 4. Uudenmaan kerrostalojen lämmöntuotantotavat (5).

Toisaalta maalämpöön siirtyy yhä enemmän kerrostaloyhtiöitä. Kuvassa 5 on kuvattu maalämpölaitteiston määrän kasvua Uudellamaalla. Kuvaajassa esitetty maalämpöpumpuilla lämmitettävien kerrosalan määrän kasvu vuodesta 2005 vuoteen 2022 asti.



Kuva 5. Maalämpölaitteistojen määrän kehitys kerrosalan mukaan rivi- ja kerrostaloissa Uudenmaan alueella (5).

## 2.4 Asuinkerrostalon lämmönjakotavat

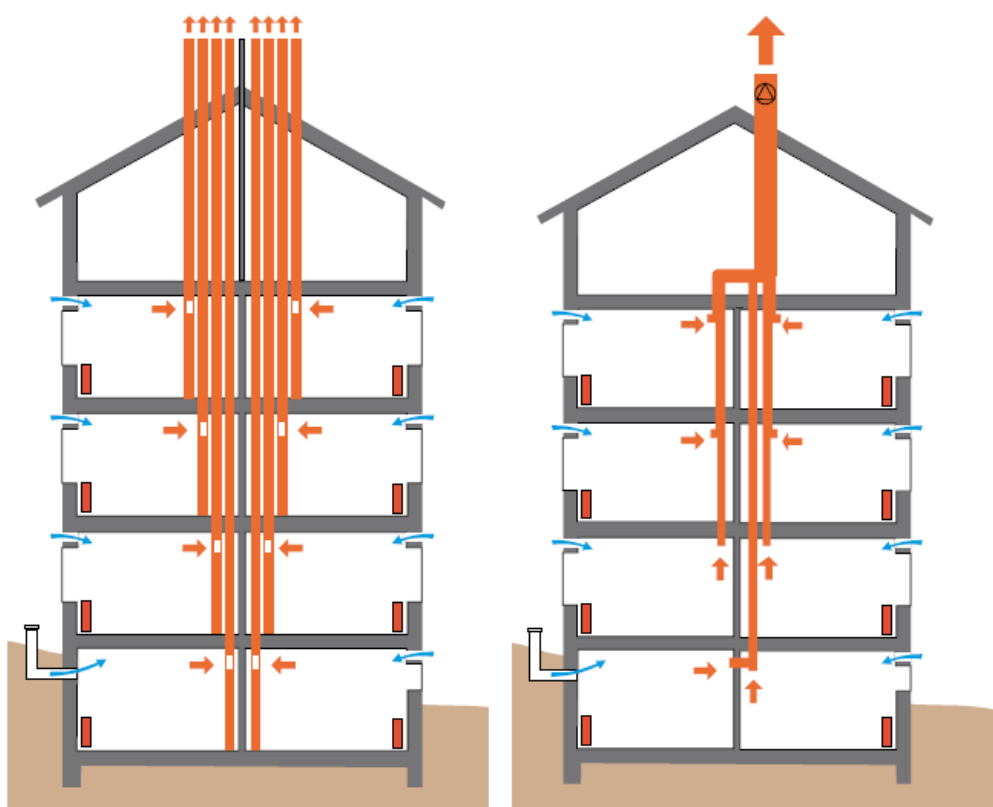
Kaukolämmöllä tai öljyllä lämpiävien asuinkerros- ja rivitalojen lämmitysjärjestelmä on useimmiten vesikiertoinen, jossa lämmönjako tapahtuu lämmityspattereiden eli radiaattoreiden avulla (4, s. 106).

Kuvan 4 tilastosta voidaan havaita, että 99 %:a asuinkerrostaloista Uudenmaan alueella on varustettu vesikiertoisella lämmitysjärjestelmällä. Yleisin vesikiertoinen lämmönjakotapa on vanhoissa kerrostaloissa patterilämmitys.

Pääosin ennen 2000-lukua valmistuneissa asuinkerrostaloissa lämmönjako on toteutettu patterilämmityksellä, jossa mitoittavat lämpötilat meno- ja paluuveldelle ovat 80/60 °C, 80/50 °C tai 70/40 °C (6, s. 120).

## 2.5 Asuinkerrostalon ilmanvaihto

Asuinkerrostalojen yleisin ilmanvaihtoratkaisu oli aina 1960-luvun alkuun asti painovoimainen ilmanvaihto. Tämän jälkeen yleistyivät koneelliset poistoilmanvaihtojärjestelmät yhteiskanavapoistolla, ja ne olivat puolestaan vallitseva ratkaisu aina 2000-luvun alkuvuosiin asti. Kuvassa 6 on esitetty sekä koneellisen poistoilmanvaihdon sekä painovoimaisen ilmanvaihdon toiminta asuinkerrostalossa. Vuonna 2003 annetussa RakMk osassa D2 ilmanvaihtoa koskevat määräykset muuttuivat niin että lämmön talteenotto alkoi yleistymään voimakkaasti. Kuvasta 3 (luku 2.2) voidaan havaita, kuinka rakennusten lämpöenergian kulutus on vuodesta 2004 lähtenyt voimakkaaseen laskuun lämmöntalteenoton yleistymisen vuoksi.



Kuva 6. Painovoimainen ja koneellinen poistoilmanvaihto (4, s. 85).

Nykyisen vuoden 2018 alussa voimaan astuneen ympäristöministeriön asetuksen uuden rakennuksen sisäilmastoista ja ilmanvaihdosta mukaan (1009/2017

§ 9) mukaan erityissuunnittelijan on mitoitettava ilmanvaihtojärjestelmä siten, että oleskelutiloihin voidaan johtaa terveellisen, turvallisen ja viihtyisän sisäilman laadun edellyttämä ulkoilmavirta. Koko rakennuksen ulkoilmavirraksi on mitoitettava vähintään 0,35 l/s/m<sup>2</sup>. Sama mitoitettava ilmavirta on ollut jo vuonna 1978 julkaistussa rakennusmääräyskokoelman osassa D2.

## 2.6 Indeksitalo

Kiinteistöliitto on verrannut vuodesta 2001 syksyisin vakiomuotoisen tyyppitalon eli niin sanotun Indeksitalon kiinteistöveroja ja muita kuntakohtaisesti määrittyviä kustannuksia Suomen suurimmissa kaupungeissa käyttäen voimassa olleita maksuperusteita ja hintoja. Indeksitalo on 10 000 kuutiometrin asuinkerrostalo, joka sijaitsee kaupunkikeskustan ruutukaava-alueella omalla tontilla ja jossa on 40 asuntoa. Talon energian- ja vedenkulutus on keskimääräinen, samoin jäteastioiden määrät ja tyhjennysvälit. (6.)

Indeksitalon koko, asukasmäärä, kulutustiedot ja kulutuksen jakautuminen on esitetty taulukoissa 1 ja 2.

Taulukko 1. Indeksitalon perustiedot.

<b>Tontti</b>	1200	m <sup>2</sup>
<b>Rakennustilavuus</b>	10000	rm <sup>3</sup>
<b>Kerros määrä</b>	4	krs
<b>Huoneistoala</b>	2400	m <sup>2</sup>
<b>Huoneistot</b>	40	kpl
<b>Asukkaat</b>	75	hlö
<b>Kaukolämmön kulutus</b>	450	MWh/v
<b>Tilauvesivirta</b>	3,2	m <sup>3</sup> /h
<b>Tilausteho</b>	200	kW
<b>Vedenkulutus</b>	155	l/hlö/vrk
<b>Kiinteistösähkö</b>	40000	kWh

Taulukko 2. Indeksitalon vuosittainen lämmönkulutusjakauma.

<b>Kuu- kausi</b>	<b>Lämmitysenergian osuus</b>
1	16 %
2	14 %
3	12 %
4	8 %
5	4 %
6	2 %
7	2 %
8	2 %
9	4 %
10	9 %
11	12 %
12	15 %

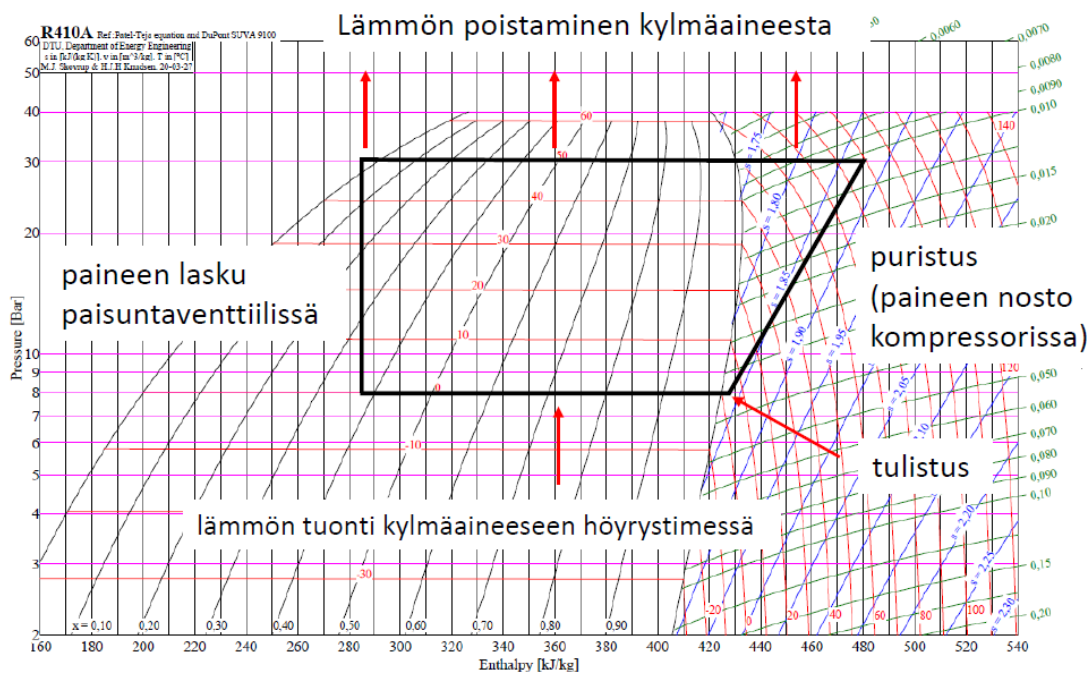
### 3 Maalämpö

#### 3.1 Lämpöpumpun toimintaperiaate

Lämpöpumpun toiminta perustuu prosessiin, jossa koneistossa kiertävä kylmäaine vuoroin höyrystyy ja lauhtuu. Kylmäaine kiertää putkilla toisiinsa yhdistettyjen osien, höyrystimen ja lauhttimen välillä. Höyrystimessä alhaiseen paineeseen vapautunut kylmäaine kerää itseensä lämpöä lämmönlähteestä, jolloin se samalla kaasuuntuu. Tämän jälkeen kompressori puristaa kylmäaineen korkeampaan paineeseen, jolloin se kuumenee lähes 100°C:n lämpötilaan. Kuumentunut paineen alainen kylmäaine johdetaan lämpöpumpun lauhttimeen, jossa se luovuttaa keräämänsä lämmön ja kompressorin puristustyön rakennuksen lämmittämiseen. Lämpöään luovuttava kylmäaine jäähtyy ja tiivistyy nesteeksi. Nestemäinen kylmäaine purkautuu paistuntaventtiin kautta uudelleen höyrystimeen, jolloin sen paine ja lämpötila alenee voimakkaasti ja kierto alkaa uudelleen. (8.)

Lämpöpumpun toiminnan mahdollistaa kylmäaine, joka höyrystyy alhaisessa lämpötilassa sopivassa paineessa ja lauhtuu lämmitysjärjestelmän kannalta sopivassa lämpötilassa (8). Kuvassa 7 on esitetty lämpöpumpun toimintaprosessi log p,h -piirroksessa.





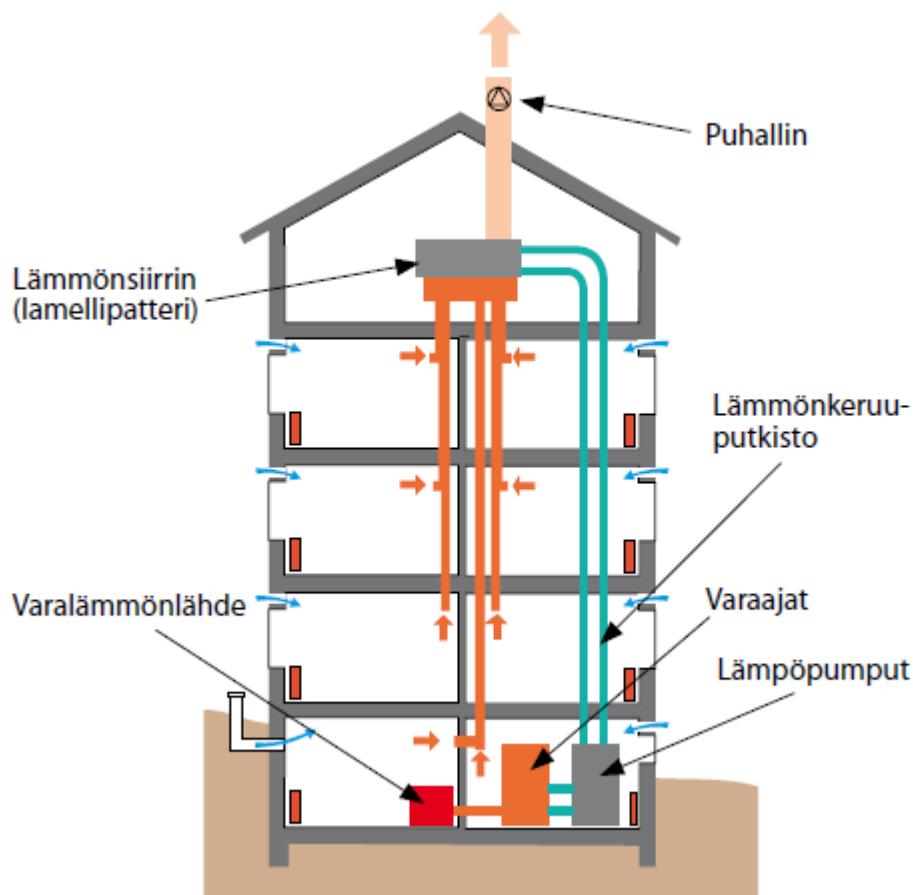
Kuva 7. Lämpöpumpun prosessi log p,h -piirroksessa (12).

## 3.2 Lämpöpumpputyypit

Lämpöpumpputyypit voidaan karkeasti jakaa eri ryhmiin käytetyn lämmönlähteen mukaisesti. Tässä luvussa esitellään lyhyesti tämän insinööriyön kannalta olennaiset pumpputyypit.

### 3.2.1 Poistoilmalämpöpumppu

Kiinteistöstä poistettavasta ilmasta voidaan poistoilmalämpöpumpun avulla ottaa lämmitysenergia takaisin käyttöön joko tuloilmaan, lämpimään käyttöveteen tai vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään. Parhaimmillaan poistoilmasta voidaan hyödyntää 60–70 prosenttia lämpöenergiasta. Poistoilmalämpöpumppu voi toimia lämmitystä tukevana energialähteenä, joten sillä ei voida kattaa koko kiinteistön lämmitysenergian tarvetta (9). Kuvassa 8 on esitetty poistoilmalämpöpumpun toimintaperiaate.



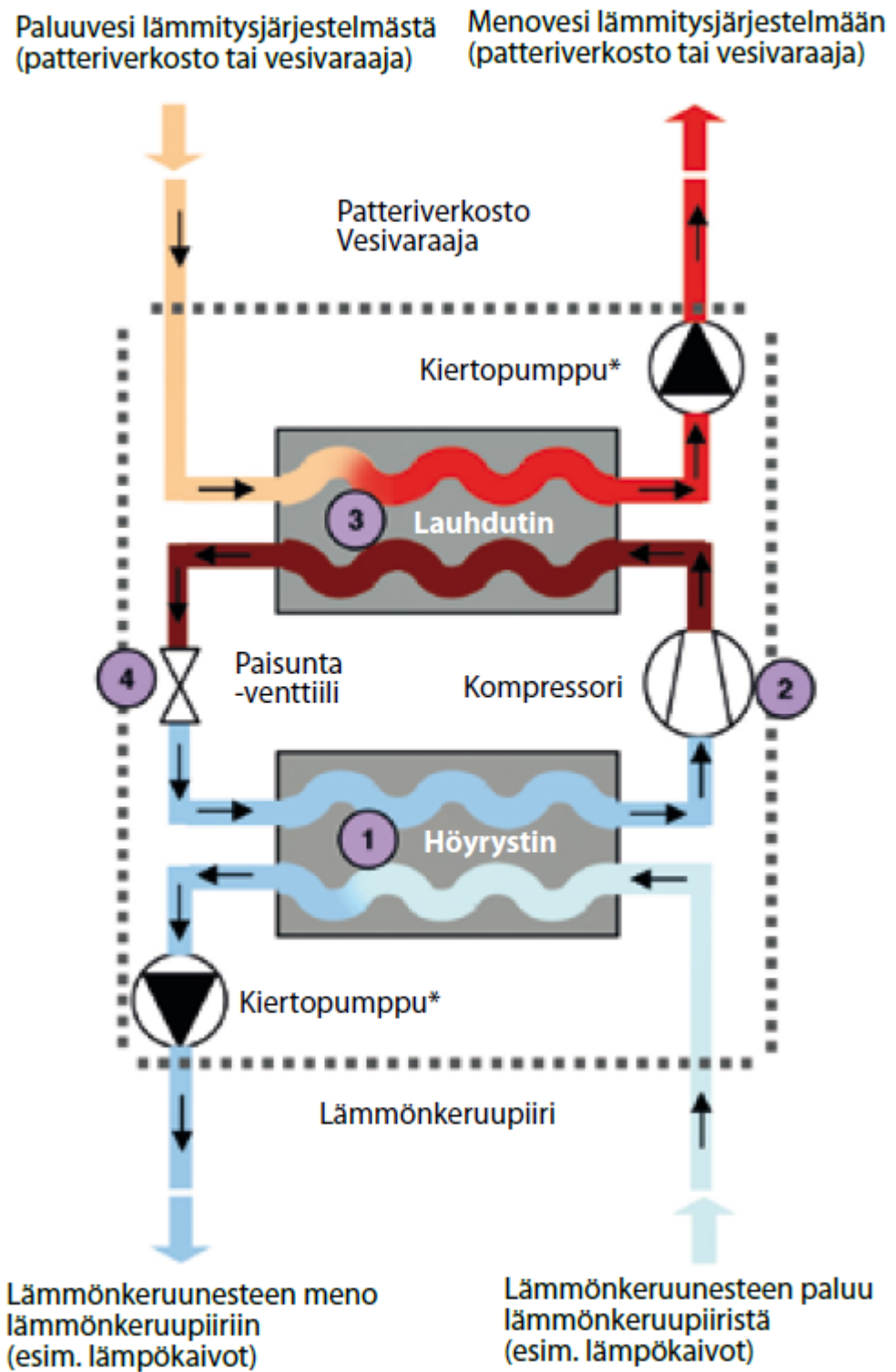
Kuva 8. Poistoilmalämpöpumpun toimintaperiaate kerrostalossa (4, s. 124).

### 3.2.2 Maalämpöpumppu

Maalämpöpumppujen toimintaperiaate on samanlainen kuin muilla lämpöpumppuilla. Maalämpöpumpun lämmönlähteenä hyödynnetään maaperään tai vesistöihin sitoutunutta aurinkoenergiaa. Kallioon porattu lämpökaivo on nykyään yleisin maalämmön talteenottotapa. Maalämpöpumppu käyttää sähköä, jonka määrä vastaa noin kolmannesta maaperästä otetun uusiutuvan energian määrästä. (1 s. 36.)

Maalämpöpumppujärjestelmä koostuu lämpöpumppuista, vesivaraajista, lämmönkeruupiiristä ja varalämmönlähteestä. Järjestelmä hyödyntää maaperän lämpöä tilojen ja käyttöveden lämmittämiseen. Lämmönkeruupiirissä kiertää lämmönkeruuneste, joka lämpiää maaperän lämmöstä muutamia asteita.

Lämmenneen lämmönkeruunesteen lämpötila on huomattavasti alhaisempi kuin lämmitysjärjestelmässä kiertävän veden. Jotta lämpöä voidaan siirtää alemmasta lämpötilasta korkeampaan, tarvitaan siihen lämpöpumppuja. Lämmönkeruuneste luovuttaa lämpönsä lämpöpumpussa kiertävälle kylmäaineelle, jonka avulla lämpöä siirretään tilojen ja käyttöveden lämmittämiseen. (4, s. 115.) Kuvassa 9 on esitetty maalämpölaitteiston toimintaperiaate.



Kuva 9. Maalämpöpumpun toimintaperiaate (4, s. 116).

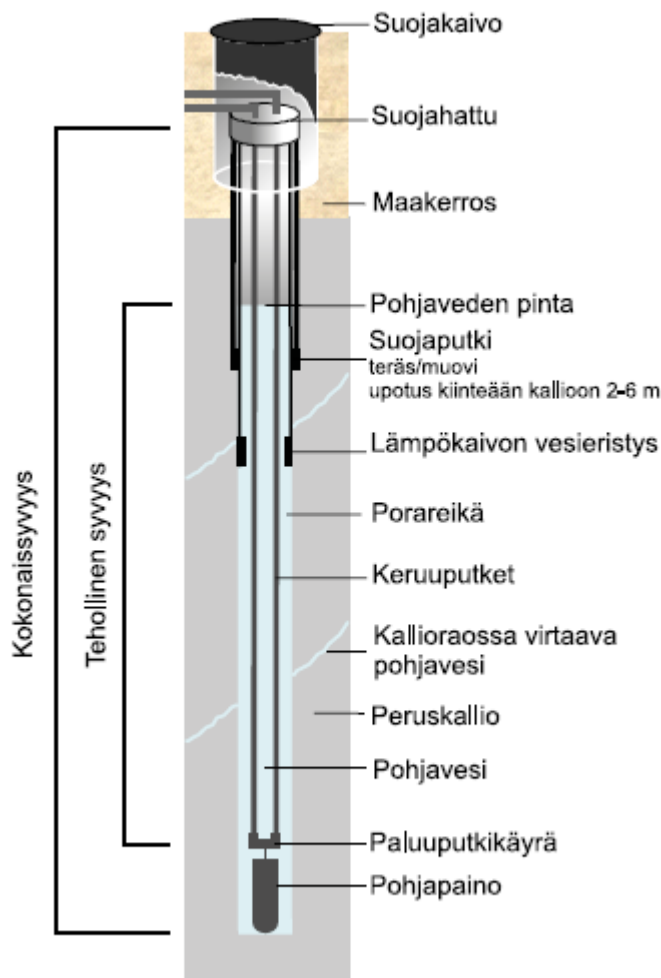
### 3.2.3 Hybridit

Hybridilämmityksellä tarkoitetaan kahden lämmitysmuodon vuorottelua esimerkiksi vuodenajan tai vuorokauden ajan mukaisesti, jolloin hyödynnetään kummankin lämmitysmuodon parhaat puolet ja olosuhteet. Lämmitysmuotoja voi olla useampikin vuorottelemassa tai myös samanaikaisesti toiminnassa. (9.)

Tässä työssä tarkastellaan maalämmön ja poistoilman lämmöntalteenoton hybridiä. Poistoilman lämmöntalteenotto eli PILTO on toiminnaltaan hyvin samankaltainen kuin poistoilmalämpöpumppu eli PILP. PILTO:lla voidaan lämmittää energiakaivoja, jos poistoilman lämpöä ei hyödynnetä lämpöpumpun lämmönlähteenä. PILTO:n hyötynä on tarvittavan energiakaivokentän pieneneminen. Lisäksi PILTO nostaa energiakaivokentän lämpötilaa ja siten kasvattaa maalämpöpumpun hyötysuhdetta.

### 3.3 Energiakaivo

Porattavien maalämpökaivojen määrä ja niiden syvyys riippuvat kiinteistön energiantarpeesta ja maaperän laadusta. Yksittäisen maalämpökaivon syvyys vaihtelee 120–300 metrin välillä. Tarvittaessa voidaan porata syvemmällekin. Maalämpökaivojen halkaisijat vaihtelevat 105–165 mm:n välillä. Kaivon yläosaan maaperäkerroksen osuudelle asennetaan suojaputki, jonka tehtävä on estää irtoaineksen pääsy kallioon porattuun reikään ja sitä kautta pohjaveteen. Suojaputki upotetaan 2–6 metrin syvyyteen kiinteään kallioon. Upotussyvyys vaihtelee kalliopinnan kiinteyden mukaan. Keruuputkisto lasketaan porareiän pohjalle painon avulla. Muoviputki ja lämmönkeruuneste ovat vettä kevyempiä eivätkä pysy alhaalla ilman pohjapainoa. Porareiältä rakennukselle tulevia keruuputkia kutsutaan siirtoputkiksi. Tällä osuudella siirtoputket lämpöeristetään. Energiakaivon maahan kaivetut osat voidaan peittää näkymättömiin, mutta porareiän päälle tulee rakentaa erillinen suojakaivo mahdollisia tarkastus- ja huoltotoimenpiteitä varten. (10, s. 33–37.) Kuvassa 10 on esitetty energiakaivon poikkileikkaus.



Kuva 10. Energiakaivon rakenne (10, s. 35).

Lämpökaivoa suunniteltaessa kaivosta saatavan energiamäärän nyrkkisääntönä voidaan pitää 100 kWh/m lämpökaivoa kohti. Todellisuudessa saatavaan energiamäärään vaikuttavat monet tekijät, kuten sijainti ja kivilaji. Koska lämpöpumpun lämpökerroin eli hyötysuhde laskee lämmönlähteen lasiessa, tulisi välttää liian suuria lämmönottomääriä. Lämmönoton määrä kannattaa rajoittaa niin, että lämpötila lämpökaivoin seinämässä pysyy vähintään noin 2°C:ssa. (11, s. 50 ja 56.)

Maalämpöjärjestelmässä lämpökaivon poraaminen muodostaa suuren osan investoinnista. Tämän takia lämpökaivon syvyyden optimointi kulloinkin kyseessä olevaan kohteeseen on tärkeää. Tämän vuoksi energiakaivojen määrän ja syvyyden mitoitus olisi hyvä tehdä siihen tarkoitettulla mallinnusohjelmalla, kuten EED:llä tai IDA-ICE:lla. Tämä mahdollistaa energiakaivojen mallinnuksen halutulla ajanjaksolla. Mitoitusohjelmat ottavat huomioon muun muassa kallioperän lämmönsiirtoon vaikuttavat ominaisuudet, energiakaivojen välisen etäisyyden ja niiden muodostaman konfiguraation sekä kaivoista otettavan ja sinne ladattavan energian. (11, s. 60.)

### 3.4 Lämpöpumpun hyötysuhteet

Lämpöpumpun energiatehokas toiminta perustuu sen hyvään hyötysuhteeseen. Erilaisia hyötysuhteita on useita.

#### 3.4.1 COP

COP on lyhenne sanoista Coefficient of performance. Se on lämpöpumpun lämpökerroin eli hyötysuhde tarkasteltavassa toimintaolosuhteessa. Lämpökerroin kertoo lämpöpumpun lämmöntehon verrattuna lämpöpumpun kompressorin tekemään työhön. Lämpökerroin vaihtelee voimakkaasti riippuen toimintaolosuhteista. Kun höyrystymislämpötila laskee tai lauhtumislämpötilaa nousee, laskee hyötysuhde voimakkaasti. Lämpöpumpun COP lasketaan kaavalla 1 (12).

$$COP = \frac{\phi_l}{P_k} \quad (1)$$

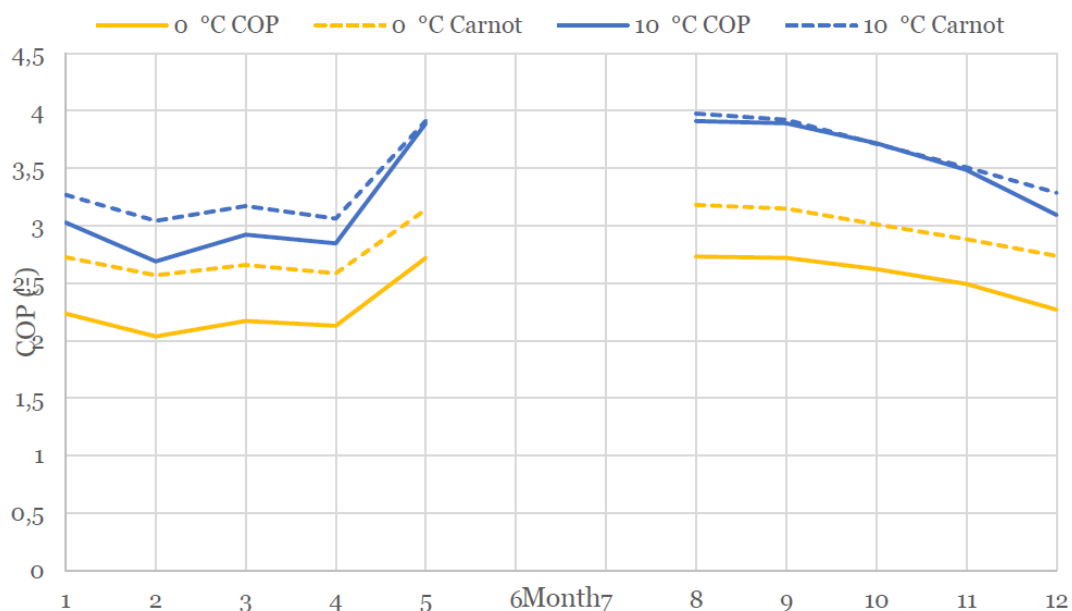
$COP$  on lämpöpumpun lämpökerroin

$\phi_l$  on lämpöpumpun lämpöteho, kW

$P_k$  on kompressorin sähköteho, kW.

Lämmitysjärjestelmässä lauhtumislämpötila vaihtelee tyypillisesti ulkolämpötilasta riippuen. Höyrystymislämpötila on korkeimmillaan lämmityskauden alkaessa syksyllä ja matalammillaan keväällä. Lämpimän käyttöveden tuottamisessa lauhtumislämpötila pysyy vakiona noin 60 °C:ssa, mutta

höyrystyslämpötila vaihtelee aina vuodenajan mukaan. Kuvassa 11 on mallinnettu erään asuinkerrostalon maalämpölaitteiston hyötysuhteen vaihtelua höyrystyslämpötilasta riippuen eri energiakaivokentän lämpötiloilla.



Kuva 11. Erään maalämpöpumpun COP-arvot vuodenajasta riippuen energiakaivokentän eri lämpötiloilla. (16, s. 65).

### 3.4.2 SCOP

SCOP-arvoa käytetään kuvattaessa lämpöpumpun lämmityskauden vuotuista hyötysuhdetta. Vuosihyötysuhteessa ei oteta huomioon käyttöveden tuottoa vaan ainoastaan lämmitykseen tuotettu ja käytetty energia.

SCOP-arvo ilmoitetaan standardin EN 14825 mukaan. Standardissa on määritelty kolme ilmastovyöhykettä: lämmin ilmasto (Ateena), keski-ilmasto (Strasbourg) ja kylmä ilmasto (Helsinki). Lisäksi laskennassa käytetään kahta menoveden mitoituslämpötilaa: 35 °C (lattialämmitys) ja 55 °C (patterilämmitys). SCOP on täysin laskennallinen arvo, eikä sitä voi käyttää kiinteistökohtaisissa energiansäästölaskelmissa. (14, s. 15.)



### 3.4.3 SPF

SPF eli Seasonal Performance Factor on lämpöpumpun todellinen vuotuinen hyötysuhde. Siinä on huomioitu lämpöpumpun apulaitteiden esimerkiksi siirtopumppujen sähkönkulutus. SPF-luku voidaan laskea erikseen lämmitykselle ja lämpimälle käyttövedelle. SPF-luku lasketaan kaavalla 2. (15, s. 32.)

$$SFP = \frac{Q}{W+W_{apu}} \quad (2)$$

$Q$  on lämpöpumpun tuottama lämmitysenergia, kWh

$W$  on lämpöpumpun vuosittain kuluttama sähköenergia, kWh

$W_{apu}$  on apulaitteiden vuosittain kuluttama sähköenergia, kWh.

Järjestelmän toimintalämpötiloilla on voimakas vaikutus SFP-lukuun aivan kuten lämpökertoimeenkin. Ympäristöministeriön energialaskentaoppaassa on annettu esimerkkiarvoja maalämpöpumpun SFP-luvuille järjestelmän eri lämpötilatasoille. Nämä SFP-luvut on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. YM energialaskentaopas eri lämpötilatason SFP-luvut (15).

Maalämpöpumppu max. lämpötila (meno- vesi), °C	SFP-luku	
	Vuotuinen keruu- piirin paluunes- teen lämpötila, °C	
	-3	+3
Tilojen lämmitys		
30	3,4	3,5
40	3,0	3,1
50	2,7	2,7
60	2,5	2,5
Käyttöveden lämmitys		
60	2,3	2,3

## 4 Maalämpöjärjestelmän mitoitus

### 4.1 Rakennusten lämmitystehon tarve

Rakennusten lämmityslaitteet mitoitetaan lämmitystehontarpeen mukaisesti. Jokaiselle säävyöhykkeelle on määritelty mitoitusta vastaava ulkolämpötila. Lämmitysjärjestelmä mitoitetaan niin, että haluttu sisälämpötila saavutetaan mitoitussulkolämpötilassa. (16.)

Olemassa olevan rakennuksen lämmitystehontarve voidaan laskea kulutustiedoista, jos sellaiset on käytettävissä. Kulutustiedoista laskettavissa oleva lämmityksen huipputehontarve on esitetty energiategollisuuden julkaiseman Kaukolämpö K1:n esimerkkilaskelmassa 5 (17, s.75–83). Kaavalla 3 lasketaan lämmityksen huipputehon tarve eli mitoitusteho (17 s. 76).

$$\Phi_{mit,huippu} = (Q - Q_{lkv}) * \frac{(17^{\circ}C - t_u)}{24 * S} \quad (3)$$

$\Phi_{mit,huippu}$  on kiinteistön lämmityksen huipputehontarve, kW

$Q$  on tarkasteluajan normeerattu energiankulutus, kWh

$Q_{lkv}$  on tarkasteluajan käyttöveden energiankulutus, kWh

17 on sisälämpötila, °C

$t_u$  on mitoitusulkolämpötila, °C

$S$  on lämmitystarveluku, °Cd.

Laskentamenetelmä ei sovellu käytettäväksi koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla varustettujen rakennusten lämmityshuipputehon laskentaan, jos ilmanvaihdon käyntiajat ja tehot vaihtelevat merkittävästi vuorokauden tai viikon aikana. Näissä tapauksissa on ilmanvaihtolaitteiden tehot ja käyntiajat on selvitettävä ja laskettava lämmityksen huipputehontarve tätä kautta saatavien lisätietojen perusteella. Käyttöveden lämmityksen energiankulutus voidaan arvioida kesäkuukausien kulutusten perusteella vähentämällä kulutuksesta ympäri vuoden toimivien käyttövesipatterien luovuttama energiamäärä. (17, s. 76.)

#### 4.2 Rakennuksen lämmitystehon ominaislämpöhäviö

Rakennuksen ominaislämpöhäviö eli konduktanssi voidaan laskea, kun kulutus-tiedoista on ensin laskettu rakennuksen lämmitystehontarve mitoitusolosuhteissa. Ominaislämpöhäviö lasketaan kaavalla 4.

$$G_{kok} = \frac{\Phi_{mit}}{t_{sis} - t_{u,mit}} \quad (4)$$

$G_{kok}$  on rakennuksen ilmanvaihdon ja vaipan ominaislämpöhäviö, W/°C

$\Phi_{mit}$  on rakennuksen lämmitystehontarve mitoitusulkolämpötilassa, kW

$t_{sis}$  on sisälämpötila, °C

$t_{u,mit}$  on mitoitusulkolämpötila, °C.

Ominaislämpöhäviötä käyttäen voidaan rakennuksen lämmitystehontarve laskea millä tahansa ulkoilman lämpötilalla.

### 4.3 Käyttöveden tarvitsema lämmitysteho

Osa kiinteistön ostolämmitysenergiasta kuluu lämpimän käyttöveden tuottamiseen ja lämpimän käyttövedenkierron häviöihin. Lämpimän käyttöveden osuus, kiertojohdon häviöt mukaan luettuna, voidaan arvioida kesä-elokuun keskimääräisen kulutuksen perusteella. Edellytyksenä on, että rakennuksen lämmitys ei ole ollut päällä. Varsinaisen käyttöveden lämmittämisen vaatiman energiamäärän lisäksi lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviöt sisältyvät käyttöveden lämmittämiseen tarvittavaan energiaan. Kiertojohtojen lämpöhäviöt ovat usein merkittäviä. Varsinkin vanhoissa rakennuksissa lämpimän käyttöveden varsinaiseen lämmitykseen kuluva energiamäärä ja kiertojohtojen lämpöhäviöt voivat olla samansuuruisia. Lämpimän käyttöveden vuosittain tarvitsema nettoenergiamäärä voidaan laskea kaavalla 5. (18.)

$$Q_{lkv} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot V \cdot (t_2 - t_1)}{3600} \quad (5)$$

$Q_{lkv}$  on veden lämmittämiseen kuluva energia, kWh

$\rho$  on veden tiheys, 1000 kg/m<sup>3</sup>

$c_p$  on veden ominaislämpökapasiteetti, 4,2 kJ/kg°C

$V$  on lämpimän käyttöveden kulutus, m<sup>3</sup>

$t_2$  on lämmitetyn veden lämpötila, °C.

$t_1$  on lämmitettävän veden lämpötila, °C

3600 on muuntokerroin kilowateista kilowattitunneiksi.

Kaavalla 5 laskettuna lämpimän käyttöveden vuosittain kuluttama energiamäärä vastaa vain noin 50 %:a taulukossa 3 esitetystä Indeksitalon kesäajan kaukolämmönkulutuksesta, joten laskelmissa on käytetty  $Q_{lkv}$ -arvona kesäajan keskimääräistä kaukolämmönkulutusta kerrottuna 12 kuukaudella.

Lämpimän käyttöveden lämmittämiseen tarvittava vuoden keskimääräinen teho lasketaan kaavalla 6. Keskimääräisen tehon perusteella saadaan pysyvyyskäyrälle minimiteho.

$$\phi_{lkv}(t) = \frac{Q_{lkv}}{t} \quad (6)$$

$\phi_{lkv}(t)$  on käyttöveden tunnitainen lämpöteho, kW

$Q_{lkv}$  on lämpimän käyttöveden kulunut energia, kWh

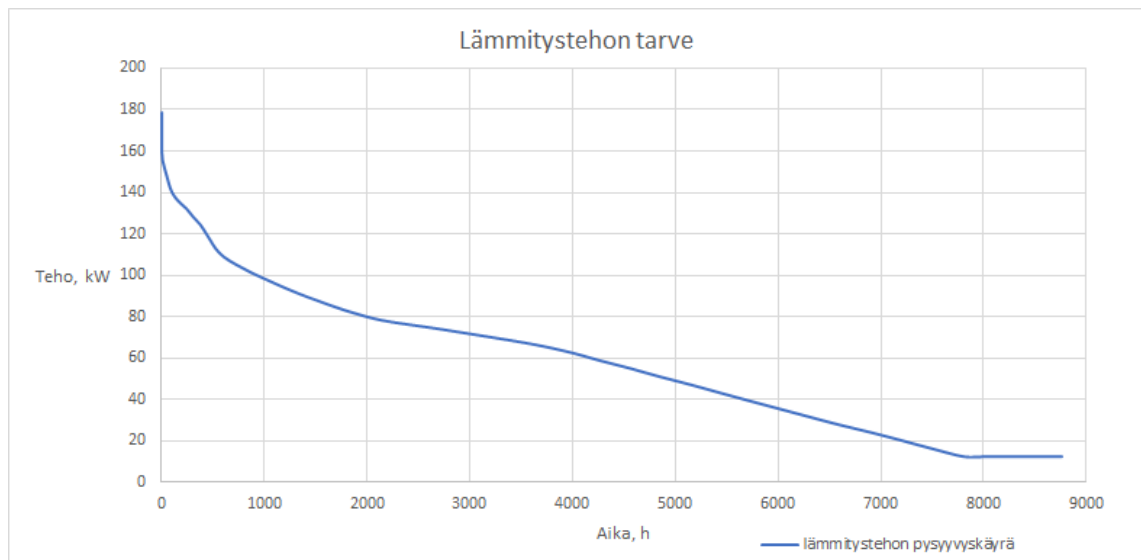
$t$  on lämpimän käyttöveden käyttöaika, h.

#### 4.4 Ulkolämpötilan pysyvyysarvot

Elinkaarilaskelmissa käytetään tilastollisia säätietoja. Rakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergiankulutuksen energialaskentaa varten on vuonna 2011 laadittu nykyistä ilmastoa vastaava testivuosi TRY2012. Suomi on testivuodessa jaettu neljään lämpötilavyöhykkeeseen. Kahdelle eteläisimmälle vyöhykkeelle käytetään samaa Vantaan havaintoaineistoon perustuvaa energialaskennan testivuotta, sillä erot näiden kahden alueen keskilämpötiloissa ovat pieniä ja suurempi osa rakennuskannasta sijaitsee vyöhykkeellä I (19).

#### 4.5 Lämmitystehon pysyvyys

Kun yhdistetään kaavat 4 ja 6 sekä ulkolämpötilan pysyvyysarvot, saadaan lämmitystehon pysyvyydelle kuvaaja. Kuvaajassa on rakennuksen lämpötehon tarve tunneittain. Kuvassa 12 on esitetty Indeksitalon lämmitystehon pysyvyydelle kuvaaja. Pysyvyyskuvaajasta saadaan selvitettyä vuoden kokonaiskulutus, huipputeho, huipunkäyttöaika, keskimääräinen teho ja kuormituskerroin. Vaaka-akselilla on aika tunteina ja pystyakselilla lämmitystehontarve. Vuoden kokonaiskulutus on yhtä suuri kuin pysyvyyskäyrän rajaaman alueen pinta-ala kuvaajassa. Kuvaajan avulla voidaan tarkastella, mille osateholle lämpöpumppulaitos olisi järkevä mitoittaa.



Kuva 12. Lämmitystehon pysyvyyskäyrä.

#### 4.6 Lämpöpumpun mitoitus

Lämpöpumpputarve mitoitetaan kohteen energian- ja tehontarpeen mukaan. Uudisrakennuksissa lähtötietoina käytetään sääolosuhteisiin ja rakennuksen rakenteellisiin sekä taloteknisiin ominaisuuksiin perustuvaa energiamallinusta. Perusparannuskohteissa lähtötiedoiksi riittävät tiedot energian kulutuksesta, käyttöveden kulutuksesta sekä lämmönjakojärjestelmän lämpötilataasoista. Vuosittaisten energiankulutusten vertailu tehdään normittamalla rakennuksen toteutunut energiankulutus. (20, s.4.)

Ilmanvaihtojärjestelmän kunto ja toiminta tarkastetaan ennen lopullisen mitoituksen tekemistä. Energiansäästöä on voitu tavoitella ilmavirtoja pienentämällä. On myös mahdollista, että puhaltimien vikaantumista ei ole huomattu, jolloin ilmanvaihtokoneet ovat voineet olla pois käytöstä pitkänkin aikaa. Näillä tekijöillä voi olla merkittävä vaikutus rakennuksen energiankulutukseen. (20, s.4.)

Käyttöveden lämmittämiseen kuluva energia ei ole verrannollinen ulkolämpötilaan, joten sen osuus erotetaan normeerattavasta lämmitysenergian kulutuksesta (20, s.4).

Mikäli maalämpöpumpulla katetaan kiinteistön kaikissa olosuhteissa tarvitsema lämmitysenergiatarve kokonaisuudessaan, on järjestelmä niin kutsutusti täystehomitoitettu. Maalämpöpumppujen mitoituksessa käytetään täystehomitoituksen lisäksi usein myös osatehomitoitusta, jolloin lämpöpumppu mitoitetaan vastaamaan tyypillisesti 50–70 %:a rakennuksen lämmitystehon enimmäistarpeesta. Tällöin lämpöpumppu voi tuottaa tapauksesta riippuen 60–98 %:a vuotuisesta lämmitysenergian tarpeesta. (15 s. 8.)

Kuten kuvasta 14 voidaan havaita, täystehomitoitus kasvattaa usein lämpöpumppulaitoksen kokoa huomattavasti. Kiinteistökokoluokan laitteistot mitoitetaan pääsääntöisesti osateholle. Tässä työssä laitteisto mitoitettiin 70 %:n osateholle ja tällöin lämpöpumpulla katettiin 95 % vuosittaisesta lämpöenergian tarpeesta. Tarvittava lisälämmitysteho tuotetaan sähköllä.

#### 4.7 Kaivokentän mitoitus laskemalla

Lämpökaivosta otettava energiamäärä lasketaan kaavalla 7 (12).

$$Q_{lk} = \frac{COP-1}{COP} * Q_{LP} \quad (7)$$

$Q_{lk}$  on lämpökaivosta otettava energia, kWh

$COP$  on lämpöpumpun vuotuinen hyötysuhde (SPF)

$Q_{lp}$  on lämpöpumpun tuottama energia, kWh.

SPF-luvut vaihtelevat taulukon 3 mukaisesti. Tässä työssä SFP-arvona käytettiin arvoa 3. Lämpökaivon huipputehoperusteisessa mitoituksessa kaavassa määräävä COP-arvo oli 2,5.

Huipputehomitoitus lämpökaivolle lasketaan kaavalla 8 (12).

$$\phi_{lk} = \frac{COP_p-1}{COP_p} * \phi_{LP,max} \quad (8)$$

$\phi_{lk}$  on kollektorin teho mitoitusasteessa, kW

$COP_P$  on lämpöpumpun vuotuinen hyötysuhde (SPF)

$\phi_{LP,max}$  on lämpöpumpun maksimiteho mitoitusasteessa, kW.

Tarvittava lämpökaivokapasiteetti voidaan laskea suuntaa antavasti kaavalla 9 käyttämällä energian ominaiskuormituksen arvona noin 85 kWh/m.

$$l = \frac{Q_{lk}}{Q'} \quad (9)$$

$l$  on keruupiirin kokonaispituus

$Q_{lk}$  on lämpökaivosta otettava energia, kWh

$Q'$  on ominaiskuormitus, kWh/m.

Yleensä kollektorin kokonaispituus määrittyy teho- ja energiaperusteisesti. Lämpökaivojen enimmäissyvyys riippuu osittain porauskalustosta. Useimmiten kaivot porataan maksimissaan noin 300 metrin syvyisiksi. Yhden kollektorin ohjeellinen tehoarvo, jolla lämpökaivo tuottaa lämpöä vielä huipputehollakin hyvällä hyötysuhteella, on 30 W/m. Kaivon syvyyttä määrittävät mm. tarvittava kollektorin virtaama ja painehäviöt sekä kollektorin ja keruuliuksen ominaisuudet. Lämpöpumpun höyrystimen lämpötilaero on 3–4 K ja tätä voidaan käyttää kaavassa 10 keruupiirin kokonaisvirtaaman laskemiseen. (14, s. 25.)

$$q_v = \frac{\phi_{lk}}{\rho * c_p * \Delta t} \quad (10)$$

$q_v$  on keruupiirin virtaama, l/s

$\phi_{lk}$  on lämpökaivokentän teho mitoitusasteessa, kW

$\rho$  on keruuliuksen tiheys, 0,97 kg/l, (etanoli 25 p-% / 0°C)

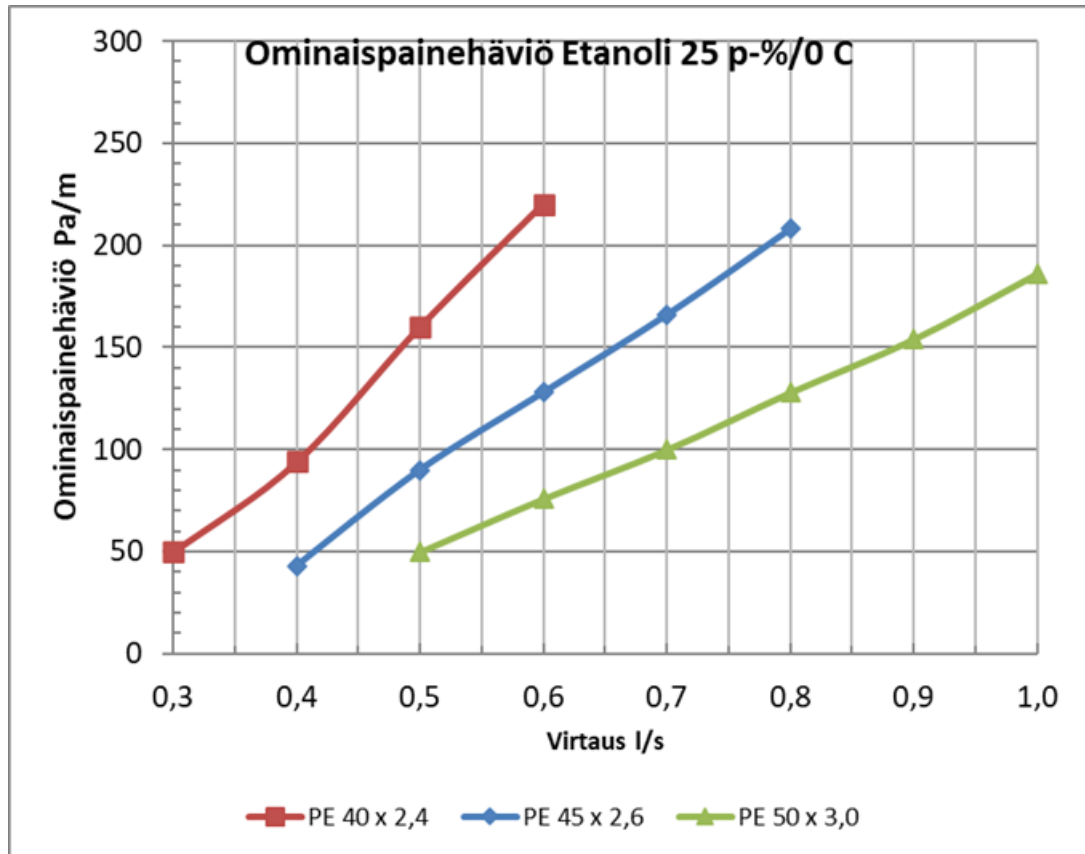
$c_p$  on keruuliuksen ominaislämpökapasiteetti, 4,27 kJ/kgK

$\Delta t$  on lämpötilaero höyrystimellä, K.

Tarvittava kaivomäärä lasketaan jakamalla kokonaisvirtaama kollektoriputken virtaamalla. Mikäli kokonaisvirtaama on suurempi kuin suositusvirtaama, on suositeltavaa porata useampi lämpökaivo. Kollektoriputkien koot ovat



normaalisti PE (muovi) 40, PE 45 ja PE 50. Ohjeellinen virtaama on PE 40x2,4 -putkella on 0,45 l/s, PE 45 x 2,6 -putkella 0,55 l/s ja PE 50 x 3,0 -putkella noin 0,7 l/s. Kuvassa 13 on esitetty kollektoriputkien virtaamaominaispainehäviö graafina, johon merkitty myös suositeltava virtaama-alue (12).



Kuva 13. Lämmönkeruuputkien ominaispainehäviöt, kun lämmönkeruunesteenä 25-painoprosenttinen etanoli (12).

Kuvasta 13 saatavaa ominaispainehäviötä käyttäen saadaan kaavalla 11 laskettua kollektorin kokonaispainehäviö.

$$\Delta p_{kok} = \frac{2 \cdot h \cdot \Delta p_{omin}}{1000} \quad (11)$$

$\Delta p_{kok}$  on kokonaispainehäviö, kPa

$h$  on kollektorin syvyys, m

2 on kerroin, jolla saadaan kollektorin kokonaispituus, m

$\Delta p_{omin}$  on ominaispainehäviö, Pa/m

1000 on muuntokerroin pascaleista kilopascaleiksi.

## 5 Investointi- ja elinkaarilaskelmat

### 5.1 Investointi

Investoinnissa suurehko rahasumma sijoitetaan kohtalaisen pitkäksi aikaa johonkin kohteeseen. Yritys maksaa menoja saadakseen tuloja. Yleensä investointi rajataan koskemaan sellaisia menoja, jotka ovat rahamäärältään suuria ja joissa tulon odotusaika on pitkä (21, s. 206).

Oman ja vieraan pääoman sijoittaminen investointeihin sitoo yleensä yrityksen kuten taloyhtiön, toiminnan ja osan muutakin päätöksentekoa melko pitkäksi aikaa, joten hankkeen kannattavuuden tutkimiseen kannattaa käyttää resursseja (21, s.206).

Tyypillisesti maalämpöinvestoinnit ovat kokoluokaltaan suuria, ja niiden tuotot eli säästöt tulevat pikkuhiljaa laitteiston elinkaaren aikana.

### 5.2 Elinkaarikustannustarkastelu, LCC

Elinkaarikustannustarkastelu (LCC, Life Cycle Costing) on resurssien optimaaliseen käyttöön tähtäävä päätöksenteon apuväline, jossa otetaan huomioon tarkasteltavan kohteen koko elinkaaren tai sen määrätyn osan elinjakson aikana ostamisesta, käyttämisestä, kunnossapidosta syntyvät kustannukset (21, s. 210).

### 5.3 Lämmöntuottojärjestelmien elinkaari

Kaukolämmönsiirtimien keskimääräinen tekninen käyttöikä on 20 vuotta. Maalämpöpumppujen keskimääräinen tekninen käyttöikä on 25–30 vuotta, ja lämpöpumpun kompressori voidaan joutua uusimaan keskimäärin 10–15 vuoden

käyttöiän kohdalla (22). Tässä opinnäytetyössä LCC-laskelmien tarkasteluajaksi kaukolämmön ja lämpöpumpun vertailulaskelmille valittiin 20 vuotta.

## 5.4 Energian hinnat ja hintakehitys

### 5.4.1 Kaukolämpö

Kaukolämmön hinnoittelu on yhtiökohtaista. Asiakkaan maksama kaukolämpölasku koostuu tyypillisesti mitattuun energiankäyttöön perustavasta energiamaksusta ja tehoon tai vesivirtaan sidotusta tehomaksusta. Tehomaksun osuus on yleensä 10–50 %:a kokonaissummasta (23, s.1, s. 3).

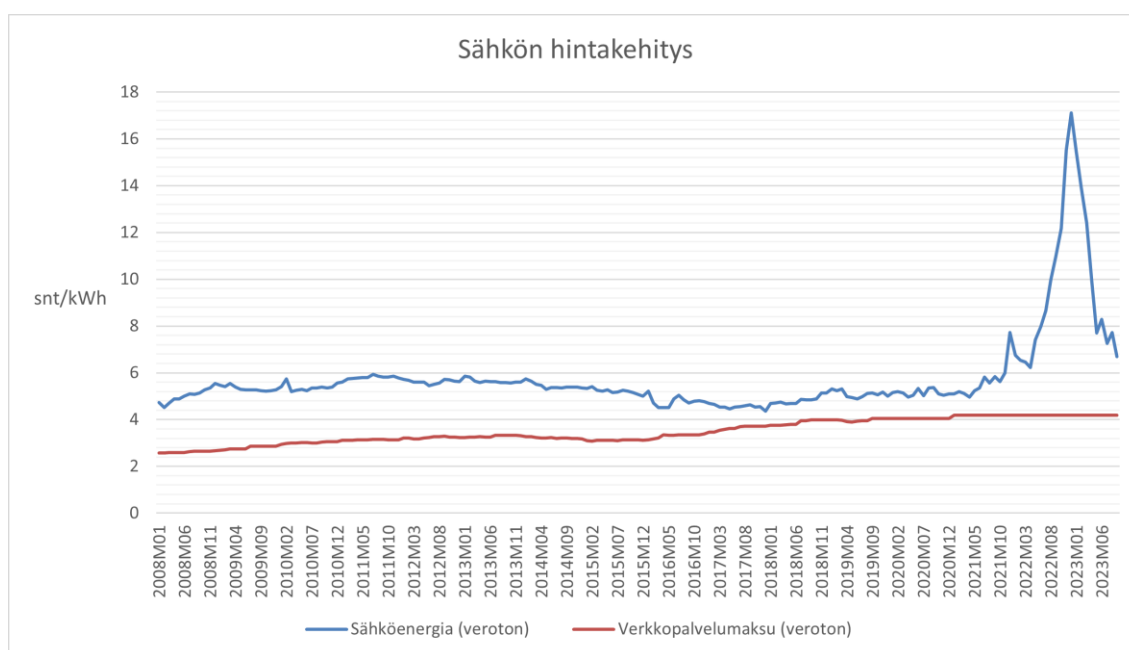
Helsingissä, Espoossa ja Vantaalla toimivat yhtiöt hinnoittelevat energiamaksut kuukausittain tai kausittain. Helsingissä vuosi on jaettu neljään eri kauteen, jolla jokaisella on oma kausihintansa. Espoossa ja Vantaalla on joka kuukaudelle oma kuukausihintansa.

Indeksitalon tietojen mukaan laskettu vesivirtamaksu on Helsingissä vuoden 2023 hinnaston mukaan 19 %:a kokonaishinnasta. Vantaalla maksua kutsutaan tehomaksuksi, ja sen osuus on 52 % kokonaishinnasta. Espoossa tehomaksu perustuu käyttötehoon, ja sen osuus on 29 % kokonaishinnasta. Energiateollisuus Ry:n 1.3.2023 julkaiseman kaukolämmön hintagraafin mukaan kaukolämmön pitkän aikavälin reaalin hinnannousu on ollut keskimäärin 1,4 % vuodessa. Indeksitalon vuosittaiset kaukolämpökustannukset eri kaupungeissa on esitetty liitteessä 1.

### 5.4.2 Sähkö

Sähkön kokonaishinta koostuu energiamaksusta, siirtomaksusta sekä sähkö- ja arvonlisäverosta. Energiamaksun osuus voidaan kilpailuttaa vapaasti, mutta siirtomaksu riippuu alueellisesta verkkoyhtiöstä. Arvonlisävero 24 % on koko Suomessa samansuuruinen (24, s.12, s. 13). Mikäli lämpöpumppulaitteiston tuottama nimellislämpöteho on suurempi kuin 500 kW, voi taloyhtiö hakea

veroluokan muutosta halvempaan sähköveroluokkaan II. Veroluokan I vero on 2,79372 c/kWh (25). Sähkösiirtokustannukset ovat vuodesta 2008 lähtien nousseet keskimäärin noin 3,5 % vuodessa. Kuvassa 14 on esitetty sähkön energiamaksun hintakehitys vuodesta 2008 vuoteen 2023. Energiamaksussa on viime vuosina ollut voimakasta kasvua. Energiamaksu on lähtenyt vuonna 2023 kuitenkin tasaantumaan kohti aiempia hintoja. Taulukossa 4 on esitetty voimassa olevat sähkön siirtohinnot pääkaupunkiseudulla. Indeksitalon vuosittaiset lämpöpumpun käyttämän sähkön kustannukset on esitetty liitteessä 2.



Kuva 14. Sähköenergian hintakehitys 2008–2023 (26).

Taulukko 4. Siirtohinnot pääkaupunkiseudulla.

<b>Paikkakunta</b>	<b>Siirtomaksu</b>
Helsinki	3,28 c/kWh
Vantaa	2,34 c/kWh
Espoo	2,49 c/kWh

### 5.5 Nimelliskorko

Korko ilmaisee rahan arvostuksen muuttumista ajan mukana. Raha on käyttäjälleen arvokkaampaa nyt kuin tulevaisuudessa. Korkea korkokanta painottaa nykyhetkellä ja lähitulevaisuudessa syntyviä kuluja. Alhaista korkokantaa käyttämällä erot nykyhetken ja tulevaisuuden välillä tasoittuvat. Investointien kannattavuuslaskennassa käytetty nimelliskorko ilmaisee investoinnille asetetun tuottovaatimuksen. Liiketoiminnassa nimelliskoron määrittäminen voi tapahtua monilla perusteilla. Se voi olla lainan korko riskilisällä tai ilman tai vaihtoehtoisen sijoituksen tuotto. Jos tarkastellaan vain hanketta, josta on vain menoja, mutta ei rahallisia tuottoja, kuten elinkaarikustannuslaskelmissa tyypillisesti on, ei korkoa voi pitää hankkeen tuottovaatimuksena, vaan se on valittava muilla perusteilla. Lainan korkotaso, kustannustason nousu tai BKT:n kasvunopeus ovat joi-tain tässä yhteydessä käytettäviä lähtökohtia. (27, s. 19.)

## 5.6 Inflaatio

Yleistä kustannustason nousua kutsutaan inflaatioksi. Inflaatio pienentää rahan ostovoimaa. Usein nimelliskoron ja inflaation vaikutus yhdistetään yhdeksi korotekijäksi, jota kutsutaan reaalikoroksi. (27, s. 20.) Reaalikorko lasketaan kaavalla 12.

$$r = \frac{i-f}{1+f} \quad (12)$$

$r$  on reaalikorko  
 $i$  on nimelliskorko  
 $f$  on inflaatio.

Reaalikorkoa käytetään nimelliskoron tilalla, jolloin inflaation vaikutus tulee huomioitua (27, s. 20.). Yksittäisen suorituksen reaalin diskonttaustekijä lasketaan kaavalla 13.

$$a_{yr} = \frac{1}{(1+r)^n} \quad (13)$$

$a_{yr}$  on reaalin diskonttaustekijä yksittäiselle suoritukselle  
 $r$  on reaalikorko  
 $n$  vuosien lukumäärä.

Jaksottaisten suoritusten diskonttaustekijä lasketaan kaavalla 14 (27, s. 21).

$$a_{sr} = \frac{1-(1+r)^{-n}}{r} \quad (14)$$

$a_{sr}$  on jaksottaisten suoritusten diskonttaustekijä.

## 5.7 Inflaation vaikutus energian hintaan

Yleinen inflaatio ja kuluttajahintaindeksi kuvaavat vain tietyn tuoteryhmän keskimääräistä hinnannousua ajan mukana. Yksittäisten tuotteiden tai hyödykkeiden hintakehitys voi selkeästi poiketa inflaation tasosta. Energia on yksi tällainen hyödyke, ja sen hinta voi muuttua nopeasti ja yleisestä hintakehityksestä poikkeavasti maailmanpoliittisen tilanteen muutoksen seurauksena. Siksi energian hinnan inflaatiota eli eskalaatiota ei ole syytä sitoa yleiseen hintakehitykseen. (27 s.20.)

Energian hinnan eskalaatio on yksi suurimpia ellei suurin epävarmuustekijä rakennusten energiainventointien laskennassa. Energian hintaan vaikuttaa kysynnän ja tarjonnan tasapaino. Fossiiliset polttoaineet ovat vähitellen ehtymässä, mikä merkitsee jatkuvaa hinnan nousua. Lisäksi ennustettavuutta vaikeuttavat maailmanpoliittiset tilanteet, jotka ovat hyvin arvaamattomia. Ainoa tapa arvioida tulevaa hintakehitystä on katsoa aikaisempaa hintakehitystä ja tehdä tätä taustaa varten joko yksi tai useampia arvioita. (27 s. 28)

Energian hinnan eskalaation reaalikorko lasketaan yleisen reaalikoron mukaisesti kaavalla 14.

$$r_e = \frac{i - f_e}{1 + f_e} \quad (14)$$

$r_e$  on energiakustannusten reaalikorko

$f_e$  on energianhinnan inflaatio, eskalaatio.

Energiakustannusten reaalikorko on kuitenkin eri asia kuin energiakustannusten reaalin hintakehitys. LCC-laskelmissa käytetään yleensä reaalikorkoa ja reaalista energian nousua (27, s. 19).

Jaksollisten suoritusten diskonttaus tehdään kaavalla 15.

$$a_{er} = \frac{1-(1+r_e)^{-n}}{r_e} \quad (15)$$

$a_{er}$  on jaksollisten energiakustannusten diskonttaustekijä.

## 5.8 Nykyarvo

Useimmat kannattavuuslaskelmat perustuvat nykyarvoyhtälöön. Nykyarvomenetelmässä kaikki investoinnista johtuvat tuotot ja kustannukset lasketaan yhteen ja diskontataan valitulla laskentakorkokannalla nykyhetkeen. Nykyarvo lasketaan kaavalla 16.

$$N = \sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+i)^t} T_t + \frac{1}{(1+i)^t} J - \sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+i)^t} M_t - \sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+i)^t} U_t - H$$

$N$  on nykyarvo, €

$T$  on tuotto, €

$J$  on jäännösarvo, €

$n$  on tarkasteluvuosi

$M$  on meno, €

$U$  on uusintainvestointi, €

$H$  on hankintahinta, €.

Mikäli nykyarvo on positiivinen, investointi on annetulla korolla ja laskentajakson pituudella kannattava (28, s.12).

Rakennuksen lämmityksestä koituu kiinteistölle vain kustannuksia. Siksi lämmitysjärjestelmien nykyarvon laskelmissa ei ole tuottoja, vaan tarkasteluvuosilta lasketaan ainoastaan menot. Myöskään jäännösarvoa ei lämmitysjärjestelmille lasketa, koska sellaista ei lämmitysjärjestelmillä enää kahdenkymmenen käyttövuoden jälkeen ole. Siksi tuotto ja jäännösarvo voidaan jättää kaavasta pois.



## 6 Laskennan tulokset

Insinööriyössä maalämpöinvestoinnin suuruudeksi arvioitiin 340 000 €. Maalämpö varustettuna poistoilmanlämmöntalotteenotolla arviotiin 315 000 € hintaiseksi. Lämpöpumpun tarvitsema korjausinvestointi arvioitiin sijoittuvan 10. vuodelle, ja sen suuruus on tarkastelussa 10 000 €. Kaukolämmön vertailuinvestoinnin suuruus oli 20 000 €. Maalämmön vuosittaiseksi huoltokustannukseksi arvioitiin 1000 €. Laskentakorkona käytettiin 5 %:a, inflaatio oli 2 %, energiahinnan eskalaatio oli 3,5 % ja tarkasteluaikana pidettiin 20:tä vuotta.

Elinkaarilaskelmassa laskettiin maalämpöinvestoinnin diskontattu kumuloitu nettonykyarvo kahdella eri sähköenergian hinnalla. Skenaariossa 1 sähköenergian veroton hinta oli 0,06 €/kWh, ja skenaariossa 2 sähköenergian veroton hinta oli 0,12 €/kWh. Taulukoissa 5–7 on esitetty kumuloidut nettonykyarvot 20. vuoden kohdalla Helsingissä, Espoossa ja Vantaalla. Nettonykyarvonlaskennan tarkemmat tulokset on esitetty liitteessä 3.

Taulukko 5. Lämmitysjärjestelmien kumuloidut diskontatut menot 20. tarkasteluvuonna Helsingissä.

<b>Sähköenergian veroton hinta €/kWh</b>	<b>Helsinki MLP</b>	<b>Helsinki MLP+PILTO</b>	<b>Helsinki KL</b>
0,06 €	769 604 €	744 604 €	1 029 667 €
0,12 €	981 415 €	956 415 €	1 029 667 €

Taulukosta 5 voidaan havaita, että molemmat maalämpöratkaisut ovat kannattavia Helsingissä sekä sähkön hinnalla 0,06 €/kWh että 0,12 €/kWh. Lisäksi voidaan laskea, että lämpöpumpuinvestoinnin tuotto 20. tarkasteluvuonna 0,06 €/kWh sähkön hinnalla maalämmölle voi olla 1 029 667 € – 769 604 € = 260 063 €. Samalla tavalla laskettuna yhdistetyn maalämpö ja PILTO-ratkaisun tuotto on 1 029 667 € – 744 604 € = 285 063 €.

Taulukko 6. Lämmitysjärjestelmien kumuloidut diskontatut menot 20. tarkastelu-  
vuonna Espoossa.

<b>Sähköenergian veronton hinta €/ kWh</b>	<b>Espoo MLP</b>	<b>Espoo MLP+PILTO</b>	<b>Espoo KL</b>
0,06 €	741 706 €	716 706 €	761 979 €
0,12 €	953 526 €	928 526 €	761 979 €

Taulukosta 6 voidaan havaita, että maalämpö Espoossa on kannattavaa aino-  
astaan halvemmalla sähkön hinnalla.

Taulukko 7. Lämmitysjärjestelmien kumuloidut diskontatut menot 20. tarkastelu-  
vuonna Vantaalla.

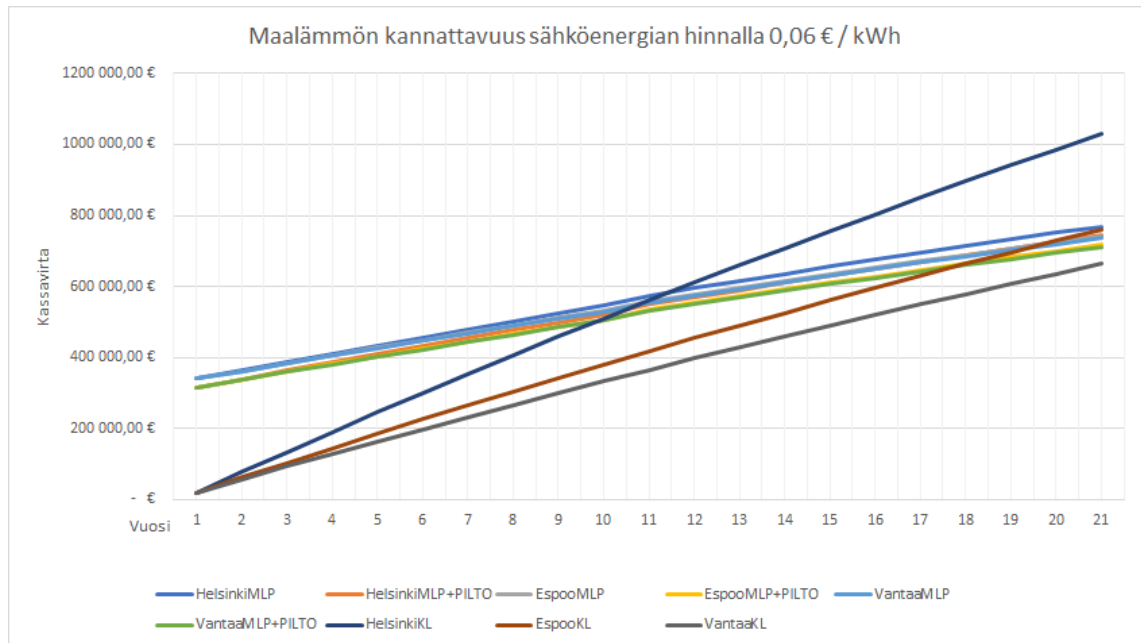
<b>Sähköenergian veronton hinta €/ kWh</b>	<b>Vantaa MLP</b>	<b>Vantaa MLP+PILTO</b>	<b>Vantaa KL</b>
0,06 € / kWh	736 410 €	711 410 €	664 273 €
0,12 € / kWh	948 230 €	923 230 €	664 273 €

Taulukosta 7 havaitaan, että Vantaalla molemmat maalämpövaihtoehdot tulevat  
elinkaarensa aikana kalliimmaksi kuin kaukolämpö.

Elinkaarilaskelmissa varsin epävarma tekijä on järjestelmien investointikustan-  
nus, jota ei tarkkaan tiedetä ennen investoinnin kilpailutusta. Tämän vuoksi ny-  
kyarvon laskentamenetelmää voi käyttää niin, että lasketaan jokaisen lämpö-  
pumppujärjestelmän suurin sallittu investointikustannus, jolla lämpöpumppujär-  
jestelmän nykyarvo tarkasteluaikana on samansuuruinen kuin kaukolämmöllä.

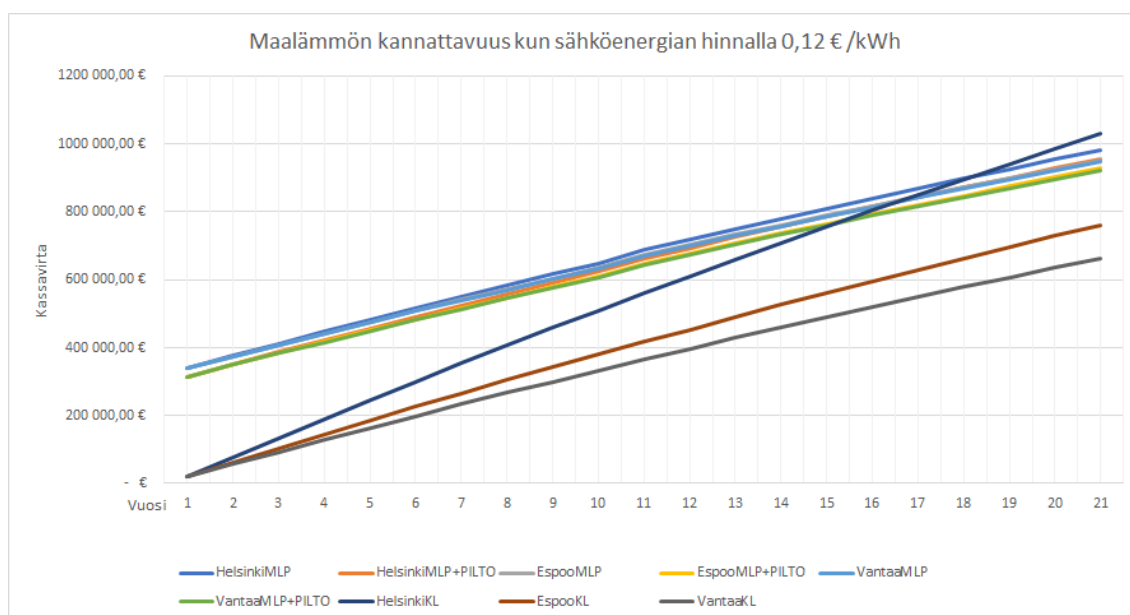
Taulukon 7 arvoilla voidaan laskea mikä olisi maalämpöjärjestelmän suurin in-  
vestointi, jolla maalämpö olisi vielä kannattava 20 vuoden tarkasteluaikana. Hal-  
vemmalla sähkön hinnalla suurin investointi yhdistetyn maalämpö ja PILTO-rat-  
kaisulle olisi  $315\,000\text{ €} + 664\,273\text{ €} - 711\,410\text{ €} = 267\,863\text{ €}$ .

Kuvassa 15 on esitetty kuvaajana elinkaarilaskelma sähkön verottomalla hinnalla 0,06 €/kWh verrattuna kaukolämpöön. Kuvassa 16 on sähkön verottomana hintana käytetty 0,12 €/kWh. Kuvista 15 ja 16 nähdään, milloin maalämpöratkaisun nykyarvo leikkaa kaukolämmön nykyarvon. Tämä on nykyarvolaskennassa takaisinmaksuaika.



Kuva 15. Maalämmön ja kaukolämmön kumulatiivinen nykyarvo viivadiagrammina.

Kuvasta 15 voidaan havaita, että Helsingissä kannattavimmaksi osoittautui maalämpö varustettuna poistoilman lämmöntalteenotolla. Sen takaisinmaksuaika valituilla lähtöarvoilla oli hieman alle 11 vuotta. Pelkän maalämmön takaisinmaksuaika oli lähes sama. Espoossa maalämpö poistoilmantalteenotolla maksaa itsensä takaisin hieman yli 17 vuodessa ja pelkkä maalämpö yli 18 vuodessa. Vantaalla kaukolämpö tulee 20 vuoden tarkasteluaikana halvemmaksi kuin maalämpö.



Kuva 16. Maalämmön ja kaukolämmön kumulatiivinen nykyarvo viivadiagrammina.

Kuvasta 16 voidaan havaita, että sähkön hinnalla on suuri vaikutus takaisinmaksu-aikaan. Valitulla sähkön hinnalla ainoastaan Helsingissä maalämpö oli kannattavaa. Maalämpö poistoilmanlämmöntalteenotolla maksoi itsensä takaisin hieman alle 16 vuodessa, ja pelkkä maalämpö maksoi itsensä takaisin hieman yli 17 vuodessa. Espoossa ja Vantaalla kaukolämpö osoittautui tarkasteluaikana elinkaarikustannuksiltaan edullisemmaksi kuin maalämpöratkaisut.

## 7 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli mitoittaa vanhaan olemassa olevan asuinkerrostaloon maalämpöjärjestelmä sekä tutkia maalämmön kannattavuuteen vaikuttavia seikkoja eri kaupungeissa. Maalämmön mitoittaminen ja kannattavuus on aihealueena varsin laaja, ja työtä tehdessä jouduttiin tekemään kompromisseja, jotta kokonaisuus saatiin pysymään aihealueen sisällä eivätkö puutteet lähtöarvoissa tai niistä tehdyt oletukset vaikuttaisi lopputulokseen liiaksi.

Tässä työssä merkittävässä osassa oli Excel-taulukkolaskentaohjelma, jolla suurin osa työstä tehtiin. Työ jakaantui kolmeen eri vaiheeseen: Ensimmäisessä

vaiheessa määritettiin kiinteistön lämmitystehon tarve ja mitoitettiin maalämpöpumppu- ja PILTO-järjestelmä. Toisessa vaiheessa mitoitettiin energiakaivokenttä taulukkolaskentatyökalua käyttäen. Kolmannessa vaiheessa määriteltiin investoinnin suuruus, vuosittaiset käyttökulut, kaukolämmön vertailuhinta sekä laskettiin näistä elinkaarikustannukset kahdella eri sähköenergian hinnalla.

Olemassa olevan kiinteistön lämmitystä tai lämmitystavan muutosta koskevaa lakia, asetusta sekä viranomaismääräyksiä tai -valvontaa ei juurikaan ole olemassa. Kerrostaloille yleisin lämmitysmuoto on ollut vuosikymmeniä kaukolämpö. Viranomaiskontrollin puuttuessa on kaukolämpöala jo pitkään säädellyt itse omaa toimintaansa. Kaukolämpöyhtiöt ovat laatineet ensimmäiset alaa koskevat ohjeistukset ja määräykset jo 1960-luvulla. Nykyisin ohjeet ovat hyvinkin yksityiskohtaiset ja tarkat. Kaukolämpöyhtiöt noudattavat näitä ohjeita ja määräyksiä pienin yhtiökohtaisin poikkeuksin.

Vaikka lämpöpumppuja on Suomessa myyty ja asennettu jo 1970-luvulta lähtien ei alalle yhteistä ohjeistusta tai mitoitustapaa ole muodostunut. Näin ollen maalämpölaitteistot voidaan mitoittaa täysin vapaasti. Laitoksen mitoituksella voi olla suuri vaikutus investoinnin kokoon, primäärienergian kulukseen ja sitä kautta elinkaarikustannuksiin. Verrattuna kaukolämpöön on maalämpölaitteiston mitoituksella huomattavasti suurempi vaikutus investoinnin suuruuteen kuin kaukolämmöllä, koska pelkän laitteiston hinnan lisäksi investoinnin suuruuteen vaikuttaa myös energiakaivokaivokentän koko.

Tässä työssä mitoitettiin laitteisto yhdellä tavalla. Koska kyseessä on kuvitteellinen asuintalo, kiinteistöstä ei ole saatavissa kovin yksityiskohtaisia tietoja eikä niitä voida tutkimuksilla selvittää. Esimerkiksi lämmitysverkoston lämpötilatasoista, käyttöveden mitatusta kulutuksesta, ilmanvaihdosta tai kiinteistösähköjärjestelmästä ei ollut käytettävissä mitään tietoja. Lämmitysverkoston lämpötilatasoilla on merkittävä vaikutus lämpöpumpun hyötysuhteeseen. Ilmanvaihdon toiminnalla PILTO:n lämmön tuottoon ja sähköjärjestelmällä investoinnin suuruuteen. Joka tapauksessa, investoinnin tarkka koko määrittyy vasta kun on saatu tarjoukset toteuttajalta. Jos kyseessä olisi olemassa oleva kohde, voisi

urakoitsijalta pyytää tarjoukset eri mitoituksella ja laskea elinkaarikustannukset uudelleen molemmille mitoituksille. Hyvän kustannusarvion tekeminen paljon työtä ja materiaalia sisältävälle investoinnille on hankalaa. Näiden seikkojen takia ei ollut mielekästä lähteä mitoittamaan lämpöpumppulaitosta eri tavoin vaan oli tarkoituksenmukaisempaa tutkia elinkaarikustannuksia yhtenevällä mitoituksella.

Kaivokentän mitoitus olisi aina syytä tehdä siihen tarkoitettuun mitoitusohjelmistolla, mutta lähtötietojen puutteellisuudesta johtuen tässä työssä päädyttiin käyttämään vain Excel-tilukkolaskentaohjelmaa.

Investoinnin kannattavuuden laskentamenetelmiä on lukuisia. Investoinnin kannattavuuden laskentamenetelmät ovat kehittyneet yrityselämän tarpeisiin, ja niiden soveltuvuus taloyhtiölle on kyseenalaista. Osakeyhtiön tarkoitus on tuottaa voittoa osakkeen omistajilleen. Asunto-osakeyhtiön tarkoitus on puolestaan osakkaiden asumistarpeiden tyydyttäminen, ei riskipitoinen liiketoiminta. Yhtiömallien tavoitteiden suuren eron takia työssä esitettiin vain yksi tapa laskea investoinnin kannattavuutta eikä muita tapoja käyty läpi lainkaan.

Rakennusten lämmöntuottojärjestelmien elinkaaret ovat pitkiä, joten elinkaari-laskelman laskentajaksoista tulee pitkä. Mitä pidempi laskentajakso, sitä epävarmempi on myös tulos. Lisäksi laskelmassa on useita muuttujia. Muuttujien määrän kasvaessa kasvaa myös epävarmuus.

Energian hinta nykyhetkellä on tieto joka on helposti saatavilla. Sähkön hinta ja kaukolämmön hinta ovat julkista tietoa ja saatavilla energiayhtiöiden kotisivuilta. Ongelmaksi muodostuu se että hintoja on useita ja hintaan vaikuttavat muun muassa ostaja ja myyjä. Erilaisille kuluttajille, suurkiinteistöille, pienkiinteistölle ja teollisuudelle on eri hinnat. Esimerkiksi sähkön hinnalle on lukuisia variaatioita, joita ovat esimerkiksi yleissähkö, kausisähkö tai sähköpörssissä kysynnän ja tarjonnan mukaan määräytyvä spot-hinta. Lisäksi käytössä on erilaisia sopimuksia kuten toistaiseksi voimassa olevia ja määräaikaista sopimuksia.

Energian hinnan tulevaisuuden hintakehitystä voi vain arvailla. Tämä työ osoittaa, että elinkaarilaskelman lopputulos riippuu voimakkaasti valituista lähtöarvoista. Silti työ auttaa ymmärtämään, kuinka maalämmön kannattavuus vaihtelee voimakkaasti eri kaupungeissa. Laskelmien lopputulokset eivät kaikilta osin vastanneet työlle asetettuja tavoitteita, mutta ne ovat kuitenkin perusteltavissa.

Työtä hyödynnetään Kiinteistöliitto Uusimaa Ry:n päivittäisessä taloyhtiöiden neuvontatyössä. Työ auttaa selventämään, kuinka yhdellä tavalla lasketun elinkaarikustannuksen lopputulos on varsin epävarma ja laskennan lopputulos vaihtelee suuresti valituista lähtöarvoista riippuen.

## Lähteet

- 1 Energia- ja ilmastotiekartta 2050. Parlamentaarisen energia- ja ilmastokomitean mietintö 16. päivänä lokakuuta 2014. 2014. Verkkoaineisto. Työ- ja elinkeinoministeriö. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia ja ilmasto 31/2014. <<https://tem.fi/documents/1410877/2628105/Energia-+ja+ilmastotiekartta+2050.pdf/1584025f-c5c7-456c-a912-aba0ee3e5052>>. 16.10.2014. Luettu 8.9.2023.
- 2 Huovari, Janne; Kurvinen, Antti; Lahtinen, Markus; Saari, Arto & Sen, Tuuli. 2022. Raportti 276, Asuinrakennusten korjaustarve 2020–2050. Verkkoaineisto. <[https://www.ptt.fi/wp-content/uploads/media/julkaisut/asuinrakennusten-korjaustarve-2020-2050-ptt-raportteja-276\\_.pdf](https://www.ptt.fi/wp-content/uploads/media/julkaisut/asuinrakennusten-korjaustarve-2020-2050-ptt-raportteja-276_.pdf)>. Luettu 9.9.2023.
- 3 Rakennukset käyttötarkoituksen ja valmistumisvuoden mukaan. Muuttujina kerrosala, vuosi, alue, rakennuksen käyttötarkoitus, rakennusvuosi ja tiedot, 2022. 2023. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <[https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_rakke/statfin\\_rakke\\_pxt\\_116g.px/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__rakke/statfin_rakke_pxt_116g.px/)>. Luettu 8.9.2023.
- 4 Virta, Jari & Pylsy, Petri. 2011. Taloyhtiön energiakirja. Helsinki: Kiinteistöalan Kustannus.
- 5 Rakennukset maakunnittain käyttötarkoituksen ja lämmitysaineen mukaan 2005–2022. Muuttujina kerrosala, vuosi, alue, rakennusten lämmitysaine, rakennuksen käyttötarkoitus ja tiedot, 2022. 2023. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <[https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_rakke/statfin\\_rakke\\_pxt\\_116i.px/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__rakke/statfin_rakke_pxt_116i.px/)>. Luettu 8.9.2023.
- 6 Seppänen, Olli. 2001. Rakennusten lämmitys. Helsinki: Suomen LVI-yhdistysten liitto.
- 7 Indeksitalo. Verkkoaineisto. Kiinteistöliitto Ry. <<https://www.kiinteistoliitto.fi/palvelut/tutkimus/saannolliset/indeksitalo/>>. Luettu 6.9.2023.
- 8 Perälä, Osmo & Perälä Rae. 2013, Lämpöpumput. 3.painos. Tallinna: Alfamer/Karisto.
- 9 Energiatehokas koti. 2020 Verkkoaineisto. Motiva. <[https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan\\_suunnittelu/lammitys/ilmalampo-ja\\_maalampopumput](https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan_suunnittelu/lammitys/ilmalampo-ja_maalampopumput)>. Luettu 8.12.2023.



- 10 Juvonen, Janne & Lapinlampi, Toivo. 2013. Ympäristöopas. Energiakaivo, maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 11 Leppäharju, Nina. 2008. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofyysikaaliset ja geologiset tekijät. Pro gradu -tutkielma. Oulun yliopisto. Finna-tietokanta..
- 12 Valkeapää, Aki. 2021. Lämpöpumput ja lämpöpumppulaitokset. Opintomateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 13 Kössi, Pihla. 2022. Assessing the techno-economic feasibility of heat pump systems. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Aaltodoc-tietokanta.
- 14 Rontti, Aappi. 2022. Ilma-vesi- ja maalämpöpumpun fuusioiminen ja energiatehokkuuden optimointi. Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 15 Lämpöpumppujen energialaskentaopas. 2012. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <[https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6\\_EA2F\\_45F9\\_869C\\_6F909138CB26-30757.pdf/1d053cd5-1865-e174-6424-841fac831c48/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6\\_EA2F\\_45F9\\_869C\\_6F909138CB26-30757.pdf?t=1603260214849](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6_EA2F_45F9_869C_6F909138CB26-30757.pdf/1d053cd5-1865-e174-6424-841fac831c48/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6_EA2F_45F9_869C_6F909138CB26-30757.pdf?t=1603260214849)>. Luettu 1.10.2023.
- 16 Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. 2017. 1010/20.12.2017.
- 17 Rakennusten kaukolämmitys määräykset ja ohjeet. 2020. Julkaisu K1. Verkkoaineisto. Energiateollisuus Ry. <<https://energia.fi/julkaisut/rakennusten-kaukolammitys-maaraykset-ja-ohjeet-julkaisu-k1-2021/>>. Luettu 5.10.2023.
- 18 Laskukaavat: Lämmin käyttövesi. 2023. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <[https://www.motiva.fi/files/20935/Motiva\\_Kulutuksennormitus\\_laskenta-kaavat-ja-ohjeet\\_01-2023.pdf](https://www.motiva.fi/files/20935/Motiva_Kulutuksennormitus_laskenta-kaavat-ja-ohjeet_01-2023.pdf)>. Luettu 1.10.2023.
- 19 Rakennusten energianlaskennan testivuodet. 2012. verkkoaineisto. <[https://www.ilmatieteenlaitos.fi/documents/30106/359229/Testivuodet\\_ku-vaus.pdf/3b0cb383-0c9a-4682-80d9-ef492ae4e955](https://www.ilmatieteenlaitos.fi/documents/30106/359229/Testivuodet_ku-vaus.pdf/3b0cb383-0c9a-4682-80d9-ef492ae4e955)>. Luettu 1.11.2023.
- 20 Maalämpöpumput, Kiinteistöjärjestelmät. 2018. LVI 11-10624. Rakennustieto.

- 21 Neilimo, Kari & Uusi-Rauva, Erkki. 2012. Johdon laskentatoimi. Helsinki: Edita Publishing.
- 22 Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitajaksot. 2008. LVI 01-10424. Rakennustieto.
- 23 Teho ja vesivirta kaukolämmön maksuperusteina. 2014. Julkaisu K15. Verkkoaineisto. Energiateollisuus. <<https://energia.fi/suosituksset-ja-ohjeet/suositus-k15-2014-teho-ja-vesivirta-kaukolammon-maksuperusteina/>>. Luettu 5.10.2023.
- 24 Wass, Touko & Helminen Jussi. 2022. Sähköhinnannousu Suomessa. Opinnäytetyö. LAB-ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 25 Energiaverotus. Verkkoaineisto. Valtiovarainministeriö. <<https://vm.fi/energiaverotus>>. Luettu 1.10.2023
- 26 Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin 2008M01–2023M09. Muuttujina hinta, kuukausi, hintakomponentti, kuluttajatyypit 2023. 2023. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <[https://pxdata.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_ehi/statfin\\_ehi\\_pxt\\_13rb.px](https://pxdata.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehi/statfin_ehi_pxt_13rb.px)>. Luettu 8.11.2023
- 27 Sirén, Kai. 2015. Rakennusten energiainvestointien kannattavuuden laskenta. Opintomateriaali. Aalto-yliopisto.
- 28 Yrjölä, Jukka. 2018. Investointilaskelmat. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

## Kaukolämmön vuosikustannukset

KK	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	a
%-osuus vuosikulukssesta	16,00 %	14,00 %	12,00 %	8,00 %	4,00 %	2,00 %	2,00 %	2,00 %	4,00 %	9,00 %	12,00 %	15,00 %	100,00 %
Kulutus, MWh	72	63	54	36	18	9	9	9	18	40,5	54	67,5	450
Energian hinta Helsinki	113,53 €	113,53 €	119,87 €	119,87 €	49,55 €	49,55 €	49,55 €	49,55 €	49,55 €	111,00 €	111,00 €	111,00 €	
Energian hinta Vantaa	54,06 €	54,06 €	38,56 €	20,96 €	20,96 €	20,96 €	20,96 €	20,96 €	20,96 €	20,96 €	38,56 €	54,06 €	
Energia hinta Espoo	80,60 €	80,60 €	71,92 €	57,04 €	42,16 €	33,48 €	33,48 €	33,48 €	40,92 €	59,52 €	69,44 €	78,12 €	
Perusmaksu Helsinki	941,39 €	941,39 €	941,39 €	941,39 €	941,39 €	941,39 €	941,39 €	941,39 €	941,39 €	941,39 €	941,39 €	941,39 €	11 296,88 €
Perusmaksu Vantaa	1 608,60 €	1 608,60 €	1 608,60 €	1 608,60 €	1 608,60 €	1 608,60 €	1 608,60 €	1 608,60 €	1 608,60 €	1 608,60 €	1 608,60 €	1 608,60 €	19 303,24 €
Perusmaksu Espoo	1 029,20 €	1 029,20 €	1 029,20 €	1 029,20 €	1 029,20 €	1 029,20 €	1 029,20 €	1 029,20 €	1 029,20 €	1 029,20 €	1 029,20 €	1 029,20 €	12 350,40 €
<b>Kokonais hinta Helsinki</b>	<b>9 115,55 €</b>	<b>8 093,78 €</b>	<b>7 414,37 €</b>	<b>5 256,71 €</b>	<b>1 833,29 €</b>	<b>1 387,34 €</b>	<b>1 387,34 €</b>	<b>1 387,34 €</b>	<b>1 833,29 €</b>	<b>5 436,89 €</b>	<b>6 935,39 €</b>	<b>8 433,89 €</b>	<b>58 515,18 €</b>
<b>Kokonais hinta Vantaa</b>	<b>5 500,92 €</b>	<b>5 014,38 €</b>	<b>3 690,84 €</b>	<b>2 363,16 €</b>	<b>1 985,88 €</b>	<b>1 797,24 €</b>	<b>1 797,24 €</b>	<b>1 797,24 €</b>	<b>1 985,88 €</b>	<b>2 457,48 €</b>	<b>3 690,84 €</b>	<b>5 257,65 €</b>	<b>37 338,79 €</b>
<b>Kokonais hinta Espoo</b>	<b>6 832,40 €</b>	<b>6 107,00 €</b>	<b>4 912,89 €</b>	<b>3 082,64 €</b>	<b>1 788,08 €</b>	<b>1 330,52 €</b>	<b>1 330,52 €</b>	<b>1 330,52 €</b>	<b>1 765,76 €</b>	<b>3 439,76 €</b>	<b>4 778,96 €</b>	<b>6 302,30 €</b>	<b>43 001,34 €</b>

## Sähkön vuosikustannukset

Helsinki			Vantaa			Espoo		
Sähkö energiakustannus	0,06	€/kWh	Sähkö energiakustannus	0,06	€/kWh	Sähkö energiakustannus	0,06	€/kWh
Sähkö siirtokustannus	0,0328	€/kWh	Sähkö siirtokustannus	0,0234	€/kWh	Sähkö siirtokustannus	0,0249	€/kWh
Sähkövero I luokka	0,02253	€/kWh	Sähkövero I luokka	0,02253	€/kWh	Sähkövero I luokka	0,02253	€/kWh
Arvonlisävero	0,02768	€/kWh	Arvonlisävero	0,02542	€/kWh	Arvonlisävero	0,02578	€/kWh
Sähkön kok kustannus	0,143	€/kWh	Sähkön kok kustannus	0,131	€/kWh	Sähkön kok kustannus	0,133	€/kWh
COP	3		COP	3		COP	3	
Lämmönkulutus	450 000	kWh	Lämmönkulutus	450 000	kWh	Lämmönkulutus	450 000	kWh
Energiapaitto	95 %		Energiapaitto	95 %		Energiapaitto	95 %	
LP tuotto	427500	kWh	LP tuotto	427500	kWh	LP tuotto	427500	kWh
LP kulutus	142500	kWh	LP kulutus	142500	kWh	LP kulutus	142500	kWh
Lisäenergia kulutus	22500	kWh	Lisäenergia kulutus	22500	kWh	Lisäenergia kulutus	22500	kWh
Kokonais sähkönkulutus	165000	kWh	Kokonais sähkön kulutus	165000	kWh	Kokonais sähkön kulutus	165000	kWh
Sähkön vuosikustannus	23596,5	€	Sähkön vuosikustannus	21673,3	€	Sähkön vuosikustannus	21980,2	€

Taulukko 1. Sähkön vuosikustannus sähköenergian hinnalla 6 snt/kWh.

Helsinki			Vantaa			Espoo		
Sähkö energiakustannus	0,12	€/kWh	Sähkö energiakustannus	0,12	€/kWh	Sähkö energiakustannus	0,12	€/kWh
Sähkö siirtokustannus	0,0328	€/kWh	Sähkö siirtokustannus	0,0234	€/kWh	Sähkö siirtokustannus	0,0249	€/kWh
Sähkövero I luokka	0,02253	€/kWh	Sähkövero I luokka	0,02253	€/kWh	Sähkövero I luokka	0,02253	€/kWh
Arvonlisävero	0,04208	€/kWh	Arvonlisävero	0,03982	€/kWh	Arvonlisävero	0,04018	€/kWh
Sähkön kok kustannus	0,217	€/kWh	Sähkön kok kustannus	0,206	€/kWh	Sähkön kok kustannus	0,208	€/kWh
COP	3		COP	3		COP	3	
Lämmönkulutus	450 000	kWh	Lämmönkulutus	450 000	kWh	Lämmönkulutus	450 000	kWh
Energiapaitto	95 %		Energiapaitto	95 %		Energiapaitto	95 %	
LP tuotto	427500	kWh	LP tuotto	427500	kWh	LP tuotto	427500	kWh
LP kulutus	142500	kWh	LP kulutus	142500	kWh	LP kulutus	142500	kWh
Lisäenergia kulutus	22500	kWh	Lisäenergia kulutus	22500	kWh	Lisäenergia kulutus	22500	kWh
Kokonais sähkönkulutus	165000	kWh	Kokonais sähkön kulutus	165000	kWh	Kokonais sähkön kulutus	165000	kWh
Sähkön vuosikustannus	35872,5	€	Sähkön vuosikustannus	33949,3	€	Sähkön vuosikustannus	34256,2	€

Taulukko 2. Sähkön vuosikustannus sähköenergian hinnalla 12 snt/kWh.

## LCC-laskennan tulokset

Taulukko 1. Maalämmön ja PILTO:n diskontattu kumuloitu nettonykyarvo sähköenergian hinnalla 6 snt/kWh.

vuosi	Sähköenergian hinta 0,06 €/kWh					
	Helsinki <sub>MLP</sub>	Helsinki <sub>MLP+PILTO</sub>	Espoo <sub>MLP</sub>	Espoo <sub>MLP+PILTO</sub>	Vantaa <sub>MLP</sub>	Vantaa <sub>MLP+PILTO</sub>
0	340 000,00 €	315 000,00 €	340 000,00 €	315 000,00 €	340 000,00 €	315 000,00 €
1	364 231,33 €	339 231,33 €	362 637,60 €	337 637,60 €	362 335,09 €	337 335,09 €
2	388 102,62 €	363 102,62 €	384 937,94 €	359 937,94 €	384 337,23 €	359 337,23 €
3	411 619,41 €	386 619,41 €	406 906,21 €	381 906,21 €	406 011,57 €	381 011,57 €
4	434 787,15 €	409 787,15 €	428 547,56 €	403 547,56 €	427 363,18 €	402 363,18 €
5	457 611,20 €	432 611,20 €	449 867,02 €	424 867,02 €	448 397,05 €	423 397,05 €
6	480 096,83 €	455 096,83 €	470 869,56 €	445 869,56 €	469 118,07 €	444 118,07 €
7	502 249,24 €	477 249,24 €	491 560,06 €	466 560,06 €	489 531,07 €	464 531,07 €
8	524 073,52 €	499 073,52 €	511 943,32 €	486 943,32 €	509 640,80 €	484 640,80 €
9	545 574,69 €	520 574,69 €	532 024,06 €	507 024,06 €	529 451,92 €	504 451,92 €
10	574 241,27 €	549 241,27 €	559 290,49 €	534 290,49 €	556 452,59 €	531 452,59 €
11	595 110,98 €	570 110,98 €	578 780,06 €	553 780,06 €	575 680,18 €	550 680,18 €
12	615 672,16 €	590 672,16 €	597 980,82 €	572 980,82 €	594 622,70 €	569 622,70 €
13	635 929,52 €	610 929,52 €	616 897,19 €	591 897,19 €	613 284,53 €	588 284,53 €
14	655 887,70 €	630 887,70 €	635 533,52 €	610 533,52 €	631 669,96 €	606 669,96 €
15	675 551,23 €	650 551,23 €	653 894,11 €	628 894,11 €	649 783,22 €	624 783,22 €
16	694 924,61 €	669 924,61 €	671 983,15 €	646 983,15 €	667 628,47 €	642 628,47 €
17	714 012,24 €	689 012,24 €	689 804,79 €	664 804,79 €	685 209,81 €	660 209,81 €
18	732 818,46 €	707 818,46 €	707 363,11 €	682 363,11 €	702 531,26 €	677 531,26 €
19	751 347,55 €	726 347,55 €	724 662,12 €	699 662,12 €	719 596,77 €	694 596,77 €
20	769 603,69 €	744 603,69 €	741 705,76 €	716 705,76 €	736 410,26 €	711 410,26 €

Taulukko 2. Maalämmön ja PILTO:n diskontattu kumuloitu nettonykyarvo sähköenergian hinnalla 12 snt/kWh.

	Sähköenergian hinta 0,12 €/kWh					
vuosi	Helsinki <sub>MLP</sub>	Helsinki <sub>MLP+PILTO</sub>	Espoo <sub>MLP</sub>	Espoo <sub>MLP+PILTO</sub>	Vantaa <sub>MLP</sub>	Vantaa <sub>MLP+PILTO</sub>
0	340 000,00 €	315 000,00 €	340 000,00 €	315 000,00 €	340 000,00 €	315 000,00 €
1	376 331,48 €	351 331,48 €	374 738,23 €	349 738,23 €	374 435,72 €	349 435,72 €
2	412 130,07 €	387 130,07 €	408 966,33 €	383 966,33 €	408 365,62 €	383 365,62 €
3	447 403,76 €	422 403,76 €	442 691,97 €	417 691,97 €	441 797,32 €	416 797,32 €
4	482 160,45 €	457 160,45 €	475 922,72 €	450 922,72 €	474 738,34 €	449 738,34 €
5	516 407,89 €	491 407,89 €	508 666,02 €	483 666,02 €	507 196,05 €	482 196,05 €
6	550 153,72 €	525 153,72 €	540 929,20 €	515 929,20 €	539 177,71 €	514 177,71 €
7	583 405,47 €	558 405,47 €	572 719,48 €	547 719,48 €	570 690,50 €	545 690,50 €
8	616 170,53 €	591 170,53 €	604 043,95 €	579 043,95 €	601 741,43 €	576 741,43 €
9	648 456,19 €	623 456,19 €	634 909,59 €	609 909,59 €	632 337,45 €	607 337,45 €
10	687 753,19 €	662 753,19 €	672 806,86 €	647 806,86 €	669 968,95 €	644 968,95 €
11	719 101,45 €	694 101,45 €	702 775,39 €	677 775,39 €	699 675,51 €	674 675,51 €
12	749 991,49 €	724 991,49 €	732 305,42 €	707 305,42 €	728 947,30 €	703 947,30 €
13	780 430,16 €	755 430,16 €	761 403,49 €	736 403,49 €	757 790,84 €	732 790,84 €
14	810 424,19 €	785 424,19 €	790 076,08 €	765 076,08 €	786 212,52 €	761 212,52 €
15	839 980,21 €	814 980,21 €	818 329,54 €	793 329,54 €	814 218,66 €	789 218,66 €
16	869 104,76 €	844 104,76 €	846 170,14 €	821 170,14 €	841 815,46 €	816 815,46 €
17	897 804,25 €	872 804,25 €	873 604,02 €	848 604,02 €	869 009,04 €	844 009,04 €
18	926 085,03 €	901 085,03 €	900 637,27 €	875 637,27 €	895 805,41 €	870 805,41 €
19	953 953,32 €	928 953,32 €	927 275,84 €	902 275,84 €	922 210,50 €	897 210,50 €
20	981 415,25 €	956 415,25 €	953 525,63 €	928 525,63 €	948 230,14 €	923 230,14 €

Taulukko 1. Kaukolämmön diskontattu kumuloitu nettonykyarvo.

vuosi	Kaukolämpö		
	Helsinki <sub>KL</sub>	Espoo <sub>KL</sub>	Vantaa <sub>KL</sub>
0	20 000,00 €	20 000,00 €	20 000,00 €
1	77 679,25 €	62 387,04 €	56 805,38 €
2	134 534,51 €	104 168,54 €	93 084,97 €
3	190 577,55 €	145 353,17 €	128 846,28 €
4	245 819,98 €	185 949,44 €	164 096,71 €
5	300 273,23 €	225 965,77 €	198 843,57 €
6	353 948,57 €	265 410,44 €	233 094,04 €
7	406 857,13 €	304 291,61 €	266 855,22 €
8	459 009,85 €	342 617,34 €	300 134,09 €
9	510 417,52 €	380 395,55 €	332 937,56 €
10	561 090,81 €	417 634,08 €	365 272,40 €
11	611 040,19 €	454 340,63 €	397 145,32 €
12	660 276,01 €	490 522,80 €	428 562,91 €
13	708 808,46 €	526 188,08 €	459 531,68 €
14	756 647,58 €	561 343,86 €	490 058,03 €
15	803 803,30 €	595 997,41 €	520 148,30 €
16	850 285,35 €	630 155,91 €	549 808,70 €
17	896 103,38 €	663 826,43 €	579 045,38 €
18	941 266,87 €	697 015,95 €	607 864,40 €
19	985 785,16 €	729 731,32 €	636 271,72 €
20	1 029 667,48 €	761 979,34 €	664 273,22 €