

Aalto-yliopisto  
Insinöörیتieteiden korkeakoulu  
Insinöörیتieteiden kandidaattiohjelma

## **Kandidaatintyö**

Maalämpöpumppujen ja kaukolämmön hiilidioksidipäästöjen ja kokonaiskustannusten  
vertailu pienessä kerrostalossa Helsingissä ja Oulussa

21.4.2019

**Mikko Vuorenmaa**

---

**Tekijä** Mikko Vuorenmaa

---

**Tyon nimi** Maalämpöpumppujen ja kaukolämmön hiilidioksidipäästöjen ja kokonaiskustannusten vertailu pienessä kerrostalossa Helsingissä ja Oulussa

---

**Koulutusohjelma** Insinöörیتieteiden kandidaattiohjelma

---

**Pääaine** Energia- ja ympäristötekniikka**Pääaineen koodi** ENG3042

---

**Vastuupettaja** Jukka Paatero

---

**Tyon ohjaaja(t)** Timo Kalema

---

**Päivämäärä** 21.4.2019**Sivumäärä** 31**Kieli** Suomi

---

## Tiivistelmä

Työssä selvitettiin maalämpöpumppujen hiilidioksidipäästöjen suuruutta ja verrattiin niitä kaukolämmöntuotannon päästöihin Helsingissä ja Oulussa. Lisäksi työssä vertaillaan maalämpöpumppuremontin kannattavuutta suhteessa kaukolämmön käytön jatkamiseen saneerauskohteissa Helsingissä ja Oulussa. Helsingissä sijaitsevasta talosta tehdyt laskelmat perustuvat oikeaan taloon. Oulun talo on teoreettinen, jota ei ole olemassa. Oulun esimerkkitalo on identtinen Helsingissä sijaitsevan talon kanssa, mutta siinä on otettu huomioon maantieteellisestä sijainnista johtuvat erot muun muassa lämpöenergian kulutuksessa.

Maalämpöpumput todettiin kaukolämpöä vähäpäästöisemmiksi molemmissa kaupungeissa. Tämä johtui suurilta osin maalämpöpumppujen COP-kertoimesta, jonka takia ne kuluttavat huomattavasti vähemmän energiaa vastaavan lämpömäärän tuottamiseen kuin kaukolämpö. Lisäksi sähköntuotannossa käytetään kaukolämmöntuotantoa enemmän päästöttömiä energianlähteitä. Lisäksi tuontisähkö on laskennassa päästötöntä. Kaukolämmöntuotannossa käytetään erityisesti Helsingissä pääosin fossiilisia polttoaineita, jotka nostavat kaukolämmön hiilidioksidipäästöjen määrää.

Maalämpöpumppuinvestointi oli kannattava Helsingissä. Herkkyystarkastelun perusteella investoinnin kannattavuuteen vaikutti eniten energian hinta ja erityisesti kaukolämmön hinta. Laskuissa tarkasteltiin 20 vuoden kokonaiskustannuksia ja energian hinnalla ja maalämpöpumpun lämpökertoimella oli suurin vaikutus kokonaiskustannusten suuruuteen. Investoinnin koron vaikutus kokonaiskustannuksiin oli pieni. Maalämpöpumppujen määrän merkittävä kasvu ja pyrkimys päästä eroon fossiilisista polttoaineista johtavat erityisesti kaukolämmön mutta myös sähkön hinnan nousuun. Vaikutukset kaukolämmön hintaan tulevat olemaan suuremmat Helsingissä kuin Oulussa. Eduskunta säätöi lain, jonka mukaan Suomessa ei enää vuoden 2029 jälkeen käytettäisi kivihiiltä energiantuotannossa, mikä aiheuttaa Helsingissä suuren tarpeen investoida uusiin sähkön- ja lämmöntuotantotapoihin nopealla aikataululla. Investoinnit tulevat nostamaan erityisesti kaukolämmön hintaa, mutta lain seurauksena merkittävä osa Helsingin CHP-laitoksissa tapahtuvasta sähköntuotannosta tulee poistumaan, joka saattaa nostaa myös sähkön hintaa.

---

**Avainsanat** Maalämpöpumput, kaukolämpö, maalämpöpumppujen kannattavuus, maalämpöpumppujen hiilidioksidipäästöt, kaukolämmöntuotannon hiilidioksidipäästöt

---

# Sisällys

1 Johdanto.....	1
2 Kaukolämpö .....	2
2.1 Kaukolämmön tuotanto ja jakelu.....	2
2.1.1 Polttoaineet .....	2
2.1.2 Kaukolämmön hiilidioksidipäästöjen laskenta .....	3
2.1.3 Energiatohokkuus .....	4
2.1.4 Tuotantolaitokset ja -tavat .....	5
2.1.5 Kaukolämmön hinnan muodostuminen.....	7
2.1.6 Kaukolämpöverkosto.....	7
2.2 Kaukolämmön tuotannon vertailu Helsingin ja Oulun välillä.....	8
2.3 Kaukolämmön haasteet nyt ja tulevaisuudessa .....	10
3 Maalämpöpumput.....	12
3.1 Maalämpöpumppujen toimintaperiaate .....	12
3.2 Mitoitus.....	13
3.3 Hiilidioksidipäästöjen laskeminen.....	13
3.4 Maalämpöpumpun investoinnin ja käyttökulujen muodostuminen.....	14
3.5 Poistoilman lämmöntalteenotto .....	14
3.6 Maalämpöpumppujen haasteet .....	14
4 Maalämpöpumppujen ja kaukolämmön vertailu .....	16
4.1 Esimerkkitalot.....	16
4.1.1 Oulun esimerkkitalo .....	16
4.1.2 Sähkön hinta .....	17
4.1.3 Lämpöpumpun mitoitus.....	17
4.2 Hiilidioksidipäästöjen vertailu.....	18
4.3 Herkkyystarkastelu .....	20
4.3.1 Laskut .....	20
4.3.2 Epätarkkuudet laskuissa .....	25
4.4 Maalämpöpumppujen määrän lisääntymisen vaikutukset energiamarkkinoihin .	26
5 Johtopäätökset .....	27
6 Lähteet .....	28

# 1 Johdanto

Ilmastonmuutos pakottaa valtiot vähentämään hiilidioksidipäästöjään, mikä koskee myös Suomea. Energiantuotanto on yksi suurimmista hiilidioksidipäästöjen lähteistä Suomessa. Helsingissä kaukolämpöä tuotetaan CHP-laitoksissa, joissa tuotetaan lämmön lisäksi sähköä. Nämä voimalaitokset käyttävät polttoaineinaan kivihiiltä ja maakaasua, jotka aiheuttavat hiilidioksidipäästöjä.

Maalämpöpumput nähdään yhtenä mahdollisena keinona vähentää hiilidioksidipäästöjä lämmöntuotannossa. Maalämpöpumppujen ympäristöystävällisyyttä ja taloudellisuutta tulee tarkastella yksittäisten kohteiden lisäksi myös kokonaisvaltaisesti osana koko energijärjestelmää, ja maalämpöpumppujen mahdollisia vaikutuksia koko energijärjestelmän toimintaan Suomessa.

Kokonaisvaltaisen kuvan saamiseksi työ käsittelee aluksi kaukolämmön ja maalämpöpumppujen toiminnan perusteita sekä esittelee ongelmia ja epäkohtia kirjallisesti luvuissa 2 ja 3. Luvussa 4 tarkastellaan laskujen avulla takaisinmaksuaikoja ja kokonaiskustannuksia sekä tutkitaan muuttujien vaikutusta takaisinmaksuajan pituuteen ja kokonaiskustannusten suuruuteen 20 vuoden aikavälillä. Luvussa 4 arvioidaan lisäksi hiilidioksidipäästöjen suuruutta, jotka esimerkkitalojen energiankulutus aiheuttaa Helsingissä ja Oulussa.

Tutkin tässä työssä talokohtaisen maalämpöpumppulämmityksen ja kaukolämmön hiilidioksidipäästöjä, energiatehokkuutta ja haasteita normaalin sekä huippukulutuksen olosuhteissa. Lisäksi arvioin, onko maalämpöpumppu järkevä investointi talonyhtiöille taloudellisesta ja hiilidioksidipäästöjen näkökulmista verrattuna kaukolämmön käytön jatkamiseen. Taloudellista näkökulmaa tarkastellaan kokonaiskustannusten vertailun avulla sekä herkkyystarkastelun avulla eri muuttujien vaikutusta kokonaiskustannusten suuruuteen. Arvioin myös EU:n kiristyvien päästörajoitteiden vaikutusta kaukolämmön ja sähkön hintaan ja päästörajoitteiden mahdollista vaikutusta maalämpöpumppujen houkuttelevuuden lisääntymiseen lämmitysratkaisuna.

Työ on rajattu koskemaan ainoastaan kerrostaloja Helsingissä ja Oulussa ja käsittelee tässä työssä lämpöpumpuista ainoastaan maalämpöpumppuja. Hiilidioksidipäästöjen osalta tarkastelen energiantuotannossa syntyviä päästöjä. Voimalaitosten ja kaukolämpöverkon rakentamisen ja lämpöpumppujen valmistuksen, kuljettamisen ja muun muassa energiakaivojen poraamisen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä ei huomioida tässä työssä.

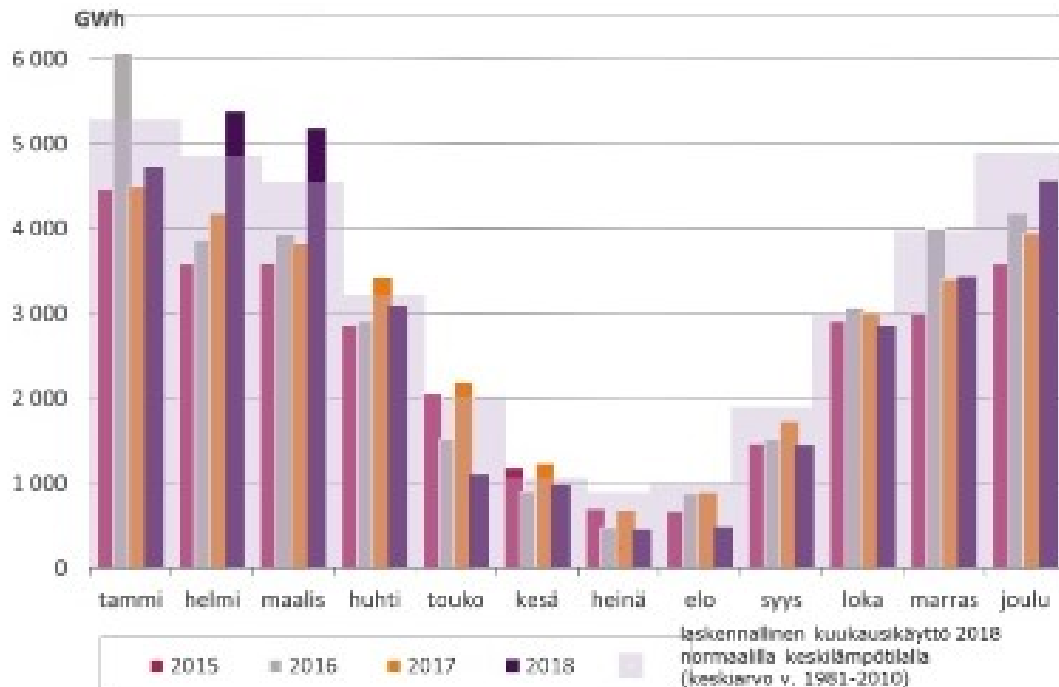
Tutustuin maalämpöön ja kaukolämpöön kirjallisuuden avulla lukemalla oppikirjoja ja aiheesta tehtyjä tieteellisiä artikkeleita. Helsingin esimerkkitalon laskut ja laskuissa käytettävät arvot perustuvat oikeaan taloon ja taloyhtiön ilmoittamaan energiankulutukseen. Oulun esimerkkitalo on teoreettinen ja sen energiankulutus ja investointikustannus on arvioitu kirjallisuuden avulla. Talo on samankokoinen kuin Helsingin esimerkkitalo, mutta pohjoisemman sijainnin takia sen energiankulutus on suurempaa. Päädyin käyttämään teoreettista taloa Oulussa, koska Oulusta ei löytynyt samankokoista taloyhtiötä kuin Helsingissä, joka olisi siirtynyt kaukolämmöstä maalämpöön. Syy tällaisten taloyhtiöiden puutteeseen Oulussa selvisi laskujen avulla. Halvan kaukolämmön hinnan takia Oulussa ei ollut taloudellisesti järkevää vaihtaa kaukolämmöstä maalämpöön.

## 2 Kaukolämpö

Tässä luvussa käsitellään kaukolämmön tuotantoa, hiilidioksidipäästöjä, energiatehokkuutta ja haasteita normaaleissa ja huippukulutuksen olosuhteissa.

### 2.1 Kaukolämmön tuotanto ja jakelu

Kaukolämpö on keskitetysti tuotettua lämpöä, jota käytetään rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen. Suomessa merkittävä osa kaukolämmöstä tuotetaan CHP-laitoksissa eli niin kutsutuissa vastapainevoimalaitoksissa yhdistettynä sähkön- ja lämmöntuotantona. Kaukolämmön kysyntä vaihtelee voimakkaasti vuodenaikojen ja vuorokauden ajan mukaan. Kysyntä riippuu voimakkaasti ulkolämpötilasta. Kuvassa 1 on esitelty kuukausittainen kaukolämmön kulutus. Kuten kuvasta voidaan huomata, kulutus on suurimmillaan kylminä talvikuukausina. [1a]



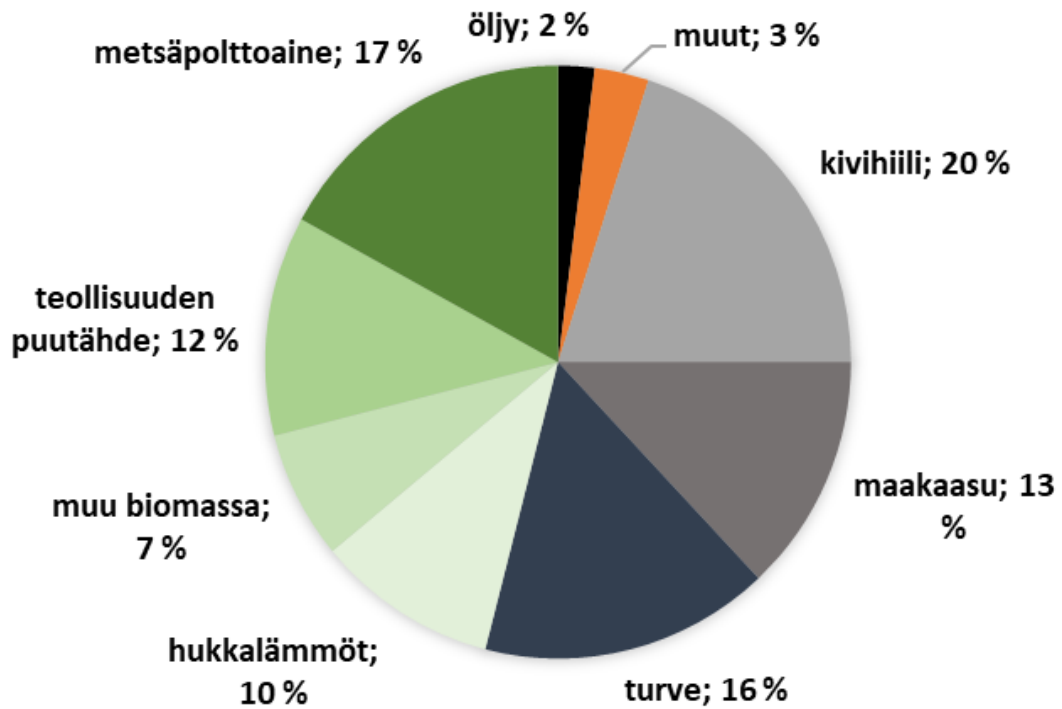
Kuva 1: Kaukolämmön kysynnän jakautuminen eri kuukausille. Lähde: Energiateollisuus ry [2a]

Kaukolämmön tehonkulutuksen voimakas riippuvuus vuoden- ja vuorokaudenajoista on muovannut Suomen kaukolämpöjärjestelmästä nykyisenkaltaisen. Tämä on vaikuttanut kaukolämpöjärjestelmän voimalaitosten tehon mitoittamiseen. [1a]

#### 2.1.1 Polttoaineet

Kaukolämmön tuotannon aiheuttamat hiilidioksidipäästöt riippuvat käytetystä polttoaineesta ja tuotetun energian määrästä kyseisellä polttoaineella. Energiateollisuus ry:n mukaan Suomessa tuotettiin vuonna 2018 37,1 TWh kaukolämpöä [2a]. Kuvassa 2 on esitelty vuoden 2018 kaukolämmön tuotantoon käytetyt polttoaineet. Kuten kuvasta nähdään

hiilidioksidineutraalien polttoaineiden osuus kaikesta tuotetusta kaukolämmöstä, oli vain 46 % eli 54 % kaukolämmöstä tuotetaan polttoaineilla, jotka tuottavat hiilidioksidipäästöjä. [1b]



Kuva 2: Polttoaineiden osuudet kaukolämmön tuotannossa Suomessa. Lähde Energiateollisuus ry [2a]

Polttoaine vaikuttaa myös kaukolämmön hintaan. Kaukolämmön hintaa käsitellään tarkemmin alaluvussa 2.1.5.

## 2.1.2 Kaukolämmön hiilidioksidipäästöjen laskenta

Kaukolämmön hiilidioksidipäästöjen määrää voidaan arvioida tilastokeskuksen polttoaineluokituksen avulla. Taulukossa 1 on esiteltyä eri polttoaineiden CO<sub>2</sub> oletuspäästökerroimet. Biopolttoaineiden hiilidioksidipäästöjä ei oteta huomioon EU:n päästökaupassa eikä niitä lasketa myöskään Suomen kasvihuonekaasujen kokonaispäästömäärään, joten en laske niitä mukaan kaukolämmön hiilidioksidipäästöihin omassa laskennassani.

Taulukko 1: Polttoaineiden päästökertoimet ja oletuslämpöarvot. Lähde Tilastokeskus [3]

Polttoaine	Polttoainekohtainen määräyksikkö	CO <sub>2</sub> oletuspäästökerroin [t/TJ]	Alempi tehollinen oletuslämpöarvo käyttötilassa [GJ/yksikkö]
Turve	tonnia	Jyrsinturve: 107,6 Palaturve: 103,2	Jyrsinturve: 10,1 Palaturve: 12,3
Kivihiili	tonnia	92,7	24,8
Maakaasu	1000 m <sup>3</sup>	55,3	36,4
Biomassa	tonnia	0	7 – 45
Puu			7 – 17
Jätepolttoaineet	tonnia	40 (yhdyskuntajäte)	10

Taulukossa 1 on käsitelty yleisimmät polttoaineet, joita käytetään Helsingissä ja Oulussa kaukolämmöntuotantoon. Tarkastelemme lähemmin kaupunkikohtaisia hiilidioksidipäästöjä alaluvussa 4.2. Biopolttoaineisiin kuuluvat muun muassa puunjalostusteollisuuden sivu- ja jätetuotteet, jotka erityisesti nostavat tehollista lämpöarvoa. Esimerkiksi metanolin ja tärpätin teholliset lämpöarvot voivat nousta jopa 45 GJ / tonnilta. Puun teholliset lämpöarvot ovat 7 – 17 GJ / tonnin väliltä, kun mukaan on huomioitu teollisuuden puutahteet. Metsäpuun tehollinen lämpöarvo on noin 10 GJ / tonni, ja tulen käyttämään tätä lämpöarvoa laskuissani. [3]

On huomionarvoista, että polttoprosesseissa syntyy myös muitakin päästöjä, jotka edistävät ilmastomuutosta. Muun muassa typenoksidien ja hiilimonoksidin päästöt ovat ongelmallisia. Päästöt ovat kuitenkin laitoskohtaisia ja riippuvat polttoprosessin optimoinnista ja toimivuudesta. Näitä päästöjä ei tarkastella tässä kandidaatintyössä.

### 2.1.3 Energiatehokkuus

Taulukossa 1 esiteltiin myös polttoaineiden alemmat oletuslämpöarvot käyttötilassa. Alemmalla eli tehollisella lämpöarvolla tarkoitetaan vapautuneen energian polttoaineen määrää kuvaavaa yksikköä kohti, missä polttoaineen polttamisessa syntyvän vesihöyryn lämpösisältöä ei pystytä hyödyntämään [1b]. Esimerkiksi 1000 kilogrammasta kivihiiltä voidaan polttoprosessissa saada 24,8 GJ lämpöenergiaa. Mitä korkeampi polttoaineen ominaislämpöarvo on, sitä vähemmän polttoainetta tarvitaan tietyn energiamäärän tuottamiseen. Energiatehokkuuteen vaikuttaa myös voimalaitosten hyötysuhteet. Voimalaitoksen hyötysuhde ilmaisee, kuinka monta prosenttia polttoainetehosta pystytään hyödyntämään ja kuinka monta prosenttia polttoainetehosta menee hukkaan. Laskin taulukoon 2, kuinka monta kiloa polttoainetta pitää polttaa yhden MWh:n tuottamiseksi, kun

voimalaitoksen hyötysuhde on 85 %. Oletuslämpöarvon kullekin polttoaineelle sain taulukosta 1. Muutin joulet wattitunneiksi kertomalla oletuslämpöarvon muutoskertoimella.

$$kg = \frac{1 \text{ MWh}}{\text{hyötysuhde} * \text{tehollinen oletuslämpöarvo}}$$

Hiilidioksidipäästöt MWh:ta kohden laskin taulukon oletuspäästökertoimen avulla, jolle piti ainoastaan tehdä yksikkömuunnos jouleista wattitunteihin sekä tonneista kilogrammisiin.

Taulukko 2: Polttoaineiden hiilidioksidipäästöt ja yhden MWh:n tuottamiseen vaadittu määrä polttoainetta kilogrammoissa.

Polttoaine	Yhden MWh:n tuottamiseen tarvittava määrä polttoainetta [kg]	CO <sub>2</sub> -päästöt [kgCO <sub>2</sub> / MWh]
Turve	419 (Jyrsinturve)	387 (Jyrsinturve)
	344 (Palaturve)	371 (Palaturve)
Kivihiili	171	334
Maakaasu	116 (yksikkö m <sup>3</sup> )	199
Puu	423	0
Jätepolttoaineet	423	144

Tarvittavan polttoaineen paino MWh:ta kohti korreloi kuljetuksen hiilidioksidipäästöjen kanssa. Mitä enemmän polttoainetta tarvitaan energiayksikköä kohti sitä suuremmat ovat kuljetuksen hiilidioksidipäästöt. Tässä kandidaatintutkielmassa ei kuitenkaan tarkastella kuljetuksesta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä, mutta asia on hyvä tiedostaa.

## 2.1.4 Tuotantolaitokset ja -tavat

Luvussa 2.1 mainitun tehon vaihtelun takia ei ole järkevää mitoittaa peruskuorman hoitavia laitoksia tuottamaan huippukulutuksen vaatimaa tehoa vaan on järkevämpää rakentaa pienempiä huippulämpökeskuksia. Näillä huippulämpökeskuksilla tuotetaan lämpöä, kun tehon kysyntä ylittää peruskuorman hoitavien laitosten kapasiteetin. Huippulämpökeskuksissa käytetään useimmiten fossiilisia polttoaineita, joten huippukulutuksen aikaan hiilidioksidipäästöt ovat suuremmat. [1c]

Tuotantolaitokset voidaankin jakaa ryhmiin niiden käytön perusteella. Peruskuormalaitos on kannattavaa mitoittaa tuottamaan noin 40 – 60 % verkon nimellistehosta, joka vastaa noin 80 – 90 % vuotuisesta kaukolämmönkulutuksesta. Kaukolämmön käsikirjan mukaan 60 % nimellistehon jälkeen laitoksen osuus kokonaisenergian tuotannosta ei enää merkittävästi kasva [1d]. Tämän takia on järkevää rakentaa huippukulutuksen olosuhteita varten erillisiä kattiloita. Lisäksi tarvitaan kattiloita tuottamaan lämpöä toimintahäiriöiden tai huoltoseisokkien aikaan. [1c]



CHP-laitoksilla tuotetaan lämpöä ja sähköä samaan aikaan. CHP-laitoksilla on merkittävä rooli Suomen energiamarkkinoilla. Energiategiikan mukaan noin 75 % Suomen kaukolämmöstä tuotetaan CHP-laitoksissa sekä kolmannes Suomessa tuotetusta sähköstä tuotetaan myös CHP-laitoksissa [2b]. Kaukolämmön käsikirjassa erillis- ja yhteistuotannon polttoaineen kulutuksen vertailussa 50 yksikön lämmöntuotantoon ja 25 yksikön sähköntuotantoon kului 149 yksikköä polttoainetta erillistuotannossa. Yhteistuotannolla vastaavien energiamäärien tuottamiseen kului polttoainetta 100 yksikköä. Yhteistuotannon polttoaineenkulutus oli siis vain 67 % erillistuotannon polttoaineenkulutuksesta. [1c,1e, 2b]

Eri CHP-voimalaitostyyppinä ovat höyryvoimalaitos, kaasuturbiinilaitos, kombivoimalaitos ja polttomoottorivoimalaitos. Höyryvoimalaitostyyppinä ovat vastapainevoimalaitos ja väliotto-lauhdutuslaitos. Vastapainevoimalaitoksessa höyryn paisuessa turbiinissa höyryjen paisunta jätetään kesken ennen kuin ne ehtivät paisua alipaineeseen ja höyry johdetaan lämmönsiirtimiin. Lämmönsiirtimissä höyry luovuttaa lämpönsä kaukolämpöpiiriin vedelle. [1c,1e]

Väliotto-lauhdutuslaitoksen kaukolämpö vesi lämmitetään väliottohöyryillä. Väliotton jälkeen jäljelle jääneiden höyryjen annetaan paisua alipaineeseen turbiinissa. Prosessi voidaan jakaa periaatetasolla kahteen osaan, jossa ennen väliottoa tuotetaan höyryllä lämpöä ja sähköä ja jälkimmäisessä osassa pelkästään sähköä. Sähköntuotannon määrä riippuu kaukolämmön veden tarvittavasta lämpötilasta. Mitä korkeampi lämpötila, sitä vähemmän höyryä voidaan antaa paisua, jolloin sähköä voidaan tuottaa vähemmän. [1c]

Kaasuturbiinilaitos koostuu kompressorista, polttokammioista, turbiinista ja LTO-kattilasta ja lämmönsiirtimestä. Kompressorin tehtävänä on puristaa palamisessa tarvittava ilma kovaan paineeseen. Prosessissa polttokammioon tuodaan ilmaa yli palamiseen tarvittavan määrän, sillä kovassa paineessa oleva ilma on lämmintä ja auttaa pitämään turbiinista tulevan savukaasun lämpötilan sopivalla tasolla. LTO-kattilasta lämpö voidaan siirtää joko suoraan kaukolämpöveden tai höyryyn. Polttoaineiksi soveltuvat kiinteät, nestemäiset kaasufaasiset polttoaineet riippuen polttopaineesta. Suomessa käytetään pääasiassa maakaasua pienissä kaasuturbiinilaitoksissa. [1c]

Kombivoimalaitos toimii pääosin samalla tavalla kuin kaasuturbiinilaitos, mutta pelkän LTO-kattilan sijasta kombivoimalaitoksissa on lisäksi höyrypiiri. Savukaasujen lämpöenergia käytetään höyryn tuotantoon, joka ohjataan toiseen turbiiniin. Tässä osassa prosessia voidaan vastaavasti tuottaa myös kaukolämpöä väliotton avulla. [1c]

Moottorivoimalaitokset voivat olla joko diesel- tai kaasumoottorilaitoksia. Moottorivoimalaitosten etuna on modulaarisuus, joka mahdollistaa nopean rakentamisen ja modifioinnin kohteeseen sopivaksi. Polttoaineina käytetään joko nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita. Prosessi tuottaa lämpöä useassa eri kohdassa prosessia. Keräämällä talteen lämpöä voiteluöljyn, ahtoilman ja sylinteriryhmän jäädyttimistä ja hyödyntämällä pako kaasun lämpöä voidaan moottorivoimalaitosta käyttää kaukolämmön tuotannossa. Lisäksi moottorivoimalaitoksesta voidaan tehdä kombivoimalaitos. [1c]

Lämpökeskuksissa tuotetaan ainoastaan kaukolämpöä. Polttoaineet voivat olla kiinteitä esimerkiksi puu tai turve, nesteitä kuten raskas polttoöljy tai kaasuja esimerkiksi maa-

kaasu. Lämpökeskukset voidaan jakaa ryhmiin ominaisuuksiensa perusteella. Lämpökeskus ryhmiä ovat kiinteät kattilalaitokset, siirrettävät ja tehdasvalmisteiset kattilalaitokset ja kiinteän polttoaineen kattilat. [1c]

Kiinteät kattilalaitokset voidaan erotella tulitorvi-tuliputkikattiloiksi ja vesiputkikattiloiksi. Tulitorvi-tuliputkikattilat ovat teholtaan enintään 30 MW. Sitä suuremmat kattilat ovat rakenteellisista syistä vesiputkikattiloita. Siirrettävät ja tehdasvalmisteiset kattilalaitokset eroavat näistä malleista rakenteellaan ja siirrettävyydellään. [1c]

Kiinteän polttoaineen kattilat voidaan jakaa myös aliryhmiin polttotekniikkansa perusteella. Arinapoltoissa polttoaineet voidaan polttaa suurempina palasina kuin leijupetikattiloissa. Arinat voidaan jakaa päätyypeihin kiinteä tasoarina, kiinteä viistoarina ja mekaaninen viistoarina. Päätyyppisiä voidaan myös yhdistellä. Lisäksi arinat eroavat toisistaan jäähdytystavan osalta. Toinen aliryhmä on leijupoltto. Sekin voidaan jakaa osiin pedin ominaisuuksien osalta. Ne voidaan jakaa esimerkiksi kerrosleijukattiloihin ja kierto-leijukattiloihin. Kerrosleijukattiloissa polttoaine pysyy leijukeroksessa, kun taas kierto-leijukattiloissa ne ajautuvat pois leijukerroksesta ja ne pitää palauttaa sinne erillisellä systeemillä. Kerrosleijukattila on halvempi ja sopii kosteille tai matalalämpöarvoisille kattiloille, mutta sen typpioksidit ja rikkidioksidipäästöt ovat suuremmat kuin kierto-leijukattiloissa. [1c]

## 2.1.5 Kaukolämmön hinnan muodostuminen

Kaukolämmön hinta muodostuu liittymismaksusta, tehomaksusta ja energiamaksusta. Liittymismaksu maksetaan kaukolämpöverkkoon liittymisen yhteydessä. Liittymismaksun suuruus perustuu liittyvän asiakkaan tehontarpeeseen ja maksun tarkoituksena on kattaa kaukolämmön tuottamiseen ja jakamiseen liittyvien investointien pääomakustannuksia. [2c]

Joillain alueilla on käytössä vuodenaikahinnoittelu, kuten esimerkiksi Helsingissä. Kaukolämmön hinta vaihtelee siis vuodenaikojen mukaan siten, että se on kesäisin halvempaa kuin talvisin. Talvisin kulutus on suurimmillaan. [2e]

Energiamaksu muodostuu asiakkaan energian kulutuksen mukaan. Energiamaksuun sisältyvät polttoaineiden kustannukset ja lämmönhankinnan muuttuvat kustannukset kuten esimerkiksi verot. Tehomaksun suuruus riippuu asiakkaan huipputehon tuntisesta keskiarvosta. [2c]

## 2.1.6 Kaukolämpöverkosto

Suomessa käytetään lämmönsiirrossa kaksiputkijärjestelmää, yhdessä putkessa kulkee lämmitetty vesi asiakkaille ja toisessa putkessa jäähtynyt vesi palaa asiakkailta takaisin lämmitettäväksi. Yleisin käytetty kanavarakenne on kiinnivaahdotettu johtotyyppi. Kiinnivaahdotetussa johdossa virtausputki ja polyeteenisuojakuori on liitetty yhteen polyuretaanieristeellä. Kiinnivaahdotetun johtotyypin hyviä puolia ovat sen käsittelyn helppous, maan painuminen ei muuta johdon toimintaa, elementit ovat tasalaatuisia, korroosion aiheuttama tuho rajoittuu vain rikkoutumiskohtaan. Suomessa putkistoissa kulkeva vesi on maksimissaan 120 °C. Putkistoissa kiertävä vesi on puhdistettua ja siitä on poistettu

happi, jotta putkien sisäpuolella ei esiintyisi korroosiota. Usein vesi on myös värjättyä, jotta vuotojen löytäminen olisi helpompaa. Suomessa on 1980-luvun puolivälin jälkeen siirrytty käyttämään kiinnivaahdotettuja kaukolämpöjohtoja. Suomessa oli vuonna 2015 14600 kilometriä kaukolämpöjohtoja [2d]. [1f, 2d]

Kaukolämpöverkon suunnitteluun vaikuttavat rakennusten ominaistehontarve, prosessien tehontarve, käyttöveden lämmityksen tehontarve, ominaispainehäviö, meno- ja paluuv veden lämpötilaero mitoitustilanteessa, tehontarpeiden samanaikaisuus ja alueiden ja asiakkaiden etäisyys lämmöntuotantolaitoksesta [1g]. Riittävän tarkka arvio rakennuksen huipputehontarpeesta voidaan määrittää kertomalla ominaislämpöteho lämmitettävällä rakennustilavuudella ja kertomalla alueellisella verrannollisuuskertoimella. Helsingin verrannollisuuskertoimen on yksi ja Oulun 1.12 [1g]. Koko vuoden kulutus voidaan laskea vastaavasti, mutta ominaislämpöteho tilalla käytetään lämpöindeksiä. Jotta kaukolämpöverkkojen paine saadaan pidettyä yllä, tarvitaan välipumppaamoja. Välipumppaamoja tarvitaan, mikäli asiakkaat asuvat kaukana voimalaitoksesta tai vesivirrat ovat suuria. [1f]

Kaukolämpöveden lämpö siirretään asiakkaiden lämpöjärjestelmään lämmönsiirtimillä. Asiakkaan lämpöjärjestelmän kiertoveden lämpötila riippuu asuntojen lämmitystavasta. Patteriverkon veden lämpötila on maksimissaan 80 °C vanhemmissa taloissa ja 70 °C uudemmissa taloissa. Kierrosta palaavan veden lämpötila on maksimissaan 40 °C. Pattereiden lisäksi lämmitys voidaan hoitaa lattialämmityksen avulla. Lattialämmityksen veden lämpötila on maksimissaan 45 °C astetta. Rakennusten lämmönjakohuoneesta pystytään määrittämään kiertoveden lämpötila lämmitystarpeen mukaan. [1h]

Lämpimän käyttöveden minimilämpötila on 55 °C ja maksimissaan 65 °C ympäristöministeriön asetuksen mukaisesti [4]. Minimilämpötilan valinnan perusteena on legionellabakteerien kasvun torjuminen. [5]

## 2.2 Kaukolämmön tuotannon vertailu Helsingin ja Oulun välillä

Tarkastelen tässä luvussa Suomen mittakaavassa kahden merkittävän kokoisen kaupungin kaukolämmöntuotantoa ja kulutusta sekä kaukolämmön hintaa ja käytettyjä polttoaineita. Vertailen Helsinkiä ja Oulua niiden toisistaan poikkeavien polttoainevalintojen takia sekä niiden maantieteellisen etäisyyden vuoksi. Keskilämpötilat on laskettu Oulun lentoaseman ja Helsingin Kaisaniemen mittausaseman mittaamien kuukausittaisten keskilämpötilojen keskiarvona. Kulutus kuutiometriä kohti on saatu Motivan artikkelista. Oulun kulutus kuutiometriä kohti on arvioitu kaukolämmön käsikirjan antaman kertoi men avulla (1,12), jonka arvioin kohtuullisen luotettavaksi, koska Oulu sijaitsee meren lähellä, joka hieman lämmittää vuotuista keskilämpötilaa, vaikka Oulu sijaitseekin Pohjois-Suomessa [1g]. Motivan mukaan kulutus on Keski-Suomessa 10 – 15 % ja Pohjois-Suomessa 25 – 30 % suurempaa kuin Etelä-Suomessa alemman keskilämpötilan takia [7a]. Taulukossa esiintyvä kulutus on laskettu Kaukolämmön käsikirjan antamalla verrannollisuuskertoimella. Hajonnan vuoksi laskin luvussa 4 lämmitystarvelukujen avulla Oulun teoreettisen talon lämmitysenergian kulutuksen. Helsingissä kaukolämmön hinta on kausihinnoiteltu. Energiateollisuuden taulukossa on laskettu Helsingille kulutuspainotettu keskiarvo normaalivuoden jakaumalla. Taulukossa esiintyvät hinnat perustuvat Energiateollisuus ry:n arvioon kaukolämmön kokonaishinnasta eri alueilla Excel-tiedos-

tossa esiintyvien tyyppirakennusten avulla esiteltyinä. Hinnassa ovat mukana energiamaksut ja kiinteät maksut veroineen. Tyyppirakennus on kooltaan varsin samansuuruinen laskeissani esiintyvien esimerkkitalojen kanssa, joten arvioin taulukon hinnan olevan riittävän tarkka arvio kaukolämmön hinnasta kyseisissä taloissa. [2e]

Ominaispäästöjen avulla voimme arvioida yksittäisen rakennuksen lämmittämisen hiilidioksidipäästöjä verrattuna maalämpöpumppujen energiankulutuksen aiheuttamiin hiilidioksidipäästöihin. Taulukossa esiintyvät ominaispäästöt ovat Helenin ja Oulun Energian ilmoittamat ominaispäästölukemat kaukolämmöntuotannolle vuonna 2017. Luvussa 4.2 käsittelemme tarkemmin Helsingin ja Oulun kaukolämmöntuotannon ominaispäästöjä sekä lasken Helsingin ja Oulun ominaispäästöt samalla tavalla, jotta luvut ovat vertailukelpoisia keskenään. Taulukossa esiintyvät arvot ominaispäästöille Helsingissä ja Oulussa on laskettu alkuperäisissä lähteissään eri tavalla, joten ne eivät ole vertailtavissa.

Taulukko 3: Helsingin ja Oulun olosuhteet, kaukolämmön kulutus, tuotantomuodot ja päästöt

Kaupunki	Keskilämpötila	Kulutus per kuutiometri (kWh/m <sup>3</sup> /v)	Tärkeimmät polttoaineet/tuotantotavat	Kaukolämmön hinta	Kaukolämmön ominaispäästöt
Helsinki	6,3 °C (v. 2000 – 2010) [6a]	45 – 65 [7a]	Kivihiili 61% Maakaasu 28% Lämpöpumput 8% (v.2017) [8a]	80,6 € / MWh [2e]	172 g CO <sub>2</sub> /kWh [8b]
Oulu	3,0 °C (v. 2000 – 2010) [6a]	50 – 73	Turve 53% puu 40% Jätepolttoaineet 6% (v.2017) [9]	57,2 € / MWh [2e]	227 g CO <sub>2</sub> /kWh [10]

Taulukosta 3 huomaamme, että kaukolämmön hinta Oulussa on selvästi halvempi kuin Helsingissä. Kaukolämmön hinnan ja kulutetun kaukolämmön määrä on merkittävä luvussa 4.3 tehtävien laskujen takia sekä kaukolämmön alempi hinta vaikuttaa myös maalämpöremontin kannattavuuteen.

## 2.3 Kaukolämmön haasteet nyt ja tulevaisuudessa

Noin 50% kaukolämmöstä tuotetaan Suomessa fossiililla polttoaineilla [2a]. Fossiilisten polttoaineiden käytöstä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt voimistavat ilmastonmuutosta. Lisäksi EU:n kiristyvät päästövaatimukset sekä nousevat päästöoikeuksien hinnat tulevat nostamaan kaukolämmön hintaa. Toistaiseksi lämmöntuotannosta ei ole tarvinnut maksaa päästökauppamaksuja toisin kuin sähköntuotannosta, koska kaukolämpöyhtiölle on jaettu ilmaisia päästöoikeuksia. Kuitenkin vuonna 2020 enää 30 % päästöoikeuksista on ilmaisia ja vuonna 2027 ilmaisten päästökauppaoikeuksien osuus laskee nolnaan [11]. Tämä johtaa kaukolämmön hinnan nousuun. Toisaalta päästöoikeuksien hinnan nousu nostaa sähkön hintaa. Kuvasta 3 nähdään päästöoikeuksien hinnan kehitys. Kuten kuvasta 3 huomataan, ovat päästöoikeuksien hinnat kasvaneet yli 350 % vuodesta 2016. Kuvassa on esitetty päästöoikeuksien hinta tonnin hiilidioksidipäästöä kohti.



Kuva 3: Päästöoikeuksien hinta 2016-2019 (euroa / tCO<sub>2</sub>). Lähde: Business Insider [12]

Helsingin Sanomien mukaan suurin syy päästöoikeuksien hintojen nousuun on käyttöön otetussa päästökauppauudistuksessa, jossa otettiin käyttöön markkinavakausmekanismi, joka poistaa ylimääräisiä oikeuksia markkinoilta [13].

Kaukolämmön hintaa Suomessa nostaa kova verotus, joka perustuu polttoaineiden energia- ja hiilipitoisuuteen. Uusiutuvia polttoaineita, kuten puuta, ei veroteta. Verotus selittää hintaeroja esimerkiksi Oulun ja Helsingin välillä. Tämä vero ei koske sähköntuotantoa. Yhdistettynä pian alkaviin päästökauppamaksuihin lämmöntuotannossa, muut lämmöntuotantotavat, kuten maalämpö, saattavat tulla kuluttajalle halvemmiksi kaukolämmön kilpailukyvyyn laskiessa. [2f]

Eduskunnassa säädettiin laki, jonka mukaan Suomessa luovutaan kivihiielen käytöstä vuoteen 2029 mennessä. Tämä on Helsingin kannalta ongelmallista, sillä toistaiseksi 61 % kaukolämmöstä tuotetaan kivihiiellä. Helsinki on suunnitellut sulkevansa Hanasaaren voimalaitoksen vuoteen 2024 mennessä ja korvaavansa sen tuotannon biopolttoaineilla toimivilla lämpökeskuksilla. Helsinki ei kuitenkaan ole varautunut luopumaan Salmisaaren hiilivoimalaitoksestaan ennen vuotta 2035. [14]

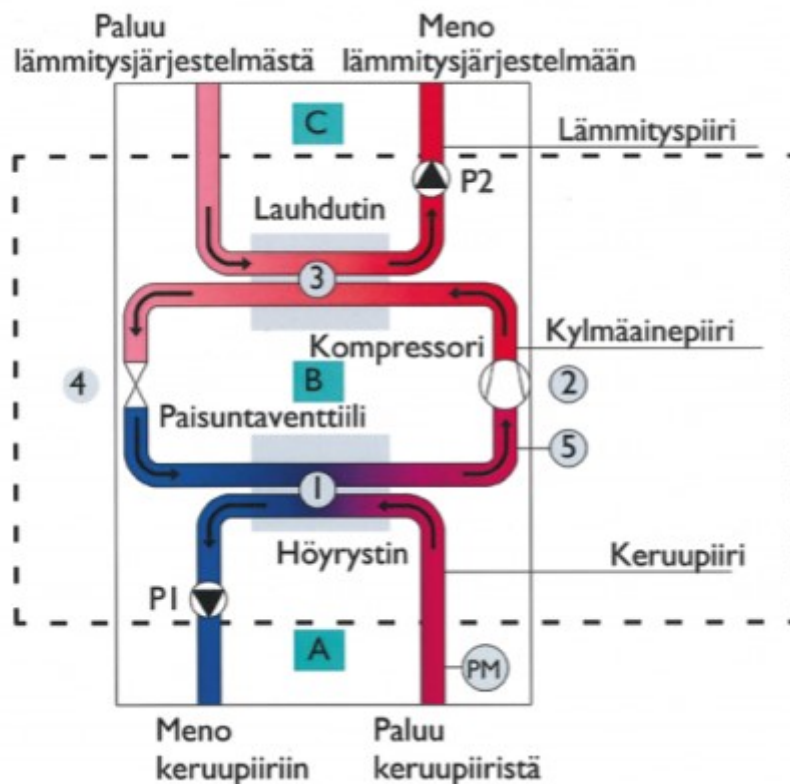
Kivihiilestä luopuminen pakottaa Helenin tekemään investointeja uusiin tapoihin tuottaa kaukolämpöä. Helenin asiakkaat tulevat maksamaan investoinneista aiheutuvia kustannuksia, mikä nostaa Helenin myymän energian hintaa. Sähkön ja kaukolämmön hinta tulee investointien seurauksena nousemaan, mikä saattaa vaikuttaa asiakkaiden lämmitysratkaisujen valintaan. Vertailen hintojen nousun vaikutusta maalämmön ja kaukolämmön kannattavuuteen luvussa 4.3.

### 3 Maalämpöpumput

Tässä luvussa kerron maalämpöpumppujen toimintaperiaatteesta, niiden vaatimuksista ja haasteista kerrostaloissa.

#### 3.1 Maalämpöpumppujen toimintaperiaate

Maalämpöpumppu siirtää joko geotermistä lämpöä kallioperästä tai auringon lämpöä maaperästä sähkön avulla. Maalämpöpumput koostuvat kolmesta piiristä: keruupiiristä, lämpöpumpun kylmäainepiiristä ja lämmityspiiristä. Keruupiiri vastaa lämmön keräämisestä maaperästä tai kallioperästä. Lämmönkeruuneste liikkuu keruupiirissä pumpun avulla. Lämmönkeruunesteen lämpöenergia siirtyy lämpöpumpun kylmäaineeseen höyrystimessä, joka aiheuttaa kylmäaineen höyrystymisen. Kylmäaineen lämpötilaa kohotetaan vielä kompressorin avulla puristamalla sitä kasaan, jotta kylmäaine saadaan lauhtumislämpötilaan. Kylmäaine tiivistyy takaisin nesteeksi, kun se luovuttaa lämpöenergiaa lauhtuttimessa lämmitysjärjestelmän nesteelle. Kylmäaineen painetta ja lämpötilaa laskeetaan vielä paisuntaventtiilin avulla. Paisuntaventtiiliin jälkeen kierto alkaa alusta. Lämmityspiirissä kiertävä neste luovuttaa lämpöenergiansa joko lämmitysverkostoon eli se käytetään rakennuksen lämmittämiseen tai sillä lämmitetään käyttövettä. Luovutettuaan lämpöenergiansa lämmityspiiriin vesi kiertää takaisin lauhtuttimeen, jossa se lämpiää uudelleen. Kuva 4 havainnollistaa maalämpöpumpun osia ja sen toimintaa. [15]



Kuva 4: Maalämpöpumpun osat. Lähde: Ympäristöministeriö [15]

Maalämpöpumppujen putkistoilla voidaan kerätä lämpöä, joko porakaivojen tai vaakaputkistojen avulla. Porakaivoja voidaan porata useita, mikäli lämmityksen tarve on suuri. Vaakaputkistot asennetaan noin metrin syvyyteen. Ne vaativat suuren pinta-alan kerätäkseen riittävästi lämpöä. Lämmitettävää rakennuskuutiota kohden tarvitaan noin 1-2 metriä putkea ja jokainen putki vaatii noin 1,5m<sup>2</sup> neliötä tonttimaata. Siksi vaakaputkistot eivät sovellu useimmissa tapauksissa kerrostalojen lämmitysratkaisuksi kaupunkialueilla. [16]

Energiakaivot mitoitetaan rakennuksen lämpöenergian kulutuksen perusteella. Mikäli kyseessä on uudisrakennus, pyritään kulutusta arvioimaan vastaavien rakennusten kulutuksen perusteella laskennallisten menetelmien lisäksi. Energiakaivojen oikea mitoittaminen on tärkeää, koska reikien poraaminen muodostaa merkittävän osan maalämpöremontin kustannuksista. Tom Allen Seneran Oy:n arvion mukaan porauksen hinta on noin 30 euroa metriltä, kun hintaan sisällytetään mukaan lämmönkeruuputkisto ja lämmönkeruuneste [17a]. Kyseinen hinta-arvio on tehty pelkästään kallioporaukselle ja mikäli porrattavassa kohdassa on maakerros Tom Allen Senera Oy arvio porauksen olevan kaksi kertaa kalliimpaa, koska porauksessa tarvitaan teräsputkea, joka estää lämpökaivon tukkiutumisen maa-aineksen sortumisen takia [17a]. Energiakaivojen mitoittaminen liian suuriksi nostaa lisäksi pumppauskustannuksia. [17a, 18]

### 3.2 Mitoitus

Maalämpöjärjestelmä on järkevää mitoittaa kattamaan noin 70-80% lämmitystehosta. Tällöin se pystyy tuottamaan noin 98% vuoden lämmön tarpeesta. Jos lämpöpumppua ei ole mitoitettu täydelle teholle, vaan se on mitoitettu osatehoiseksi, maalämpöä tukevana lämmönlähteenä käytetään esimerkiksi sähkökattilaa huippukulutuksen aikana. Maalämpöpumppua ei kannata myöskään alimitoittaa, koska se nostaa sähkökattilan käyttöaikaa, joka tarkoittaa suurempaa sähkönkulutusta ja suurempia kuluja. [17a]

### 3.3 Hiilidioksidipäästöjen laskeminen

Kuten mainitsin jo luvussa 3.1, lämpöpumpun käyttövoimana toimii sähkö. Sähkön kulutuksen määrä riippuu tuotetun lämmön määrästä, lämpöpumpun lämpökertoimesta ja mitoituksesta. Lämpöpumppujen lämpökerrointa kutsutaan myös COP-kertoimeksi. COP-kerroin ilmaisee, kuinka monta energiayksikköä lämpöä lämpöpumppu tuottaa kulutettua sähkön määrää kohti. Esimerkiksi jos lämpöpumppu kuluttaa 1 kWh sähköä ja tuottaa kyseisellä sähkön määrällä 3 kWh lämpöä, on COP-kerroin 3. Koska lämpöpumppua ei ole kannattavaa mitoittaa kattamaan huippukulutuksen aikaan tarvittavaa tehoa, tukivoiman tuottajana toimii yleensä sähkökattila, joka lisää sähkön kulutusta. Sähkön kulutus riippuu siis myös lämpöpumpun ja sähkökattilan tehosta. Sähkönkulutusta ja hiilidioksidipäästöjä normaali ja huippukulutuksen aikaan on vertailtu suhteessa kaukolämpöön luvussa 4.2. Hiilidioksidipäästöjä arvioin Energiaviraston sivuilta löytyneen sähköntuotannon hiilidioksidikertoimen avulla. Suomessa tuotetun sähkön keskimääräinen kerroin on 128,5 kg CO<sub>2</sub>/MWh [19a]. Paikallisen sähköntuotannon päästökertoimet voivat olla huomattavasti korkeampia, mutta tarkkoja laskelmia siitä, miten taloon tuleva sähkö on tuotettu, on mahdotonta tehdä. Energiaviraston päästökerroin kuvaa ainoastaan Suomessa tuotetun sähkön päästökerrointa. Energiateollisuuden mukaan Suomessa kulutetusta sähköstä 23 % tuotiin ulkomailta vuonna 2018 [2g]. Tuontisähkö on laskennassa päästötöntä, joten laskin sähkön päästökertoimeksi 98,9 kg CO<sub>2</sub>/MWh.



### **3.4 Maalämpöpumpun investoinnin ja käyttökulujen muodostuminen**

Maalämmön kustannukset muodostuvat vanhan laitteiston purkamisesta, energiakaivon poraamisesta, lämmönkeruupiirin rakentamisesta ja siihen kuuluvista osista, lämmönjakohuoneen mahdollisesta remontista ja lämmönvaraajista, lämpöpumpusta ja sähkökattilasta. Lisäksi kuluja saattaa syntyä muun muassa maanperätutkimuksista ja viranomaismaksuista. Kulujen suuruus riippuu talonyhtiön tehon tarpeen suuruudesta. Tehon tarpeen kasvaessa joudutaan poraamaan useampia ja syvempiä reikiä, tarvitaan suurempia pumppuja, sähköön kulutus on suurempaa ja lämpöpumpun tarvitsee olla tehokkaampi. [20]

Käyttökulut muodostuvat ostetusta sähköstä ja huoltokustannuksista. Sähköä tarvitaan lämpöpumpun, pumppujen ja lisätehoa tuottavan sähkökattilan käyttämiseen. Huippukulutuksen aikaan sähkökattilan ollessa käytössä sähköön kulutus on huomattavasti suurempaa. Huoltokustannuksiin sisältyy muun muassa komponenttien vaihdot. Esimerkiksi kompressorin pitää uusia noin 10-15 vuoden välein. [21]

### **3.5 Poistoilman lämmöntalteenotto**

Poistoilman lämmöntalteenotolla voidaan parantaa rakennuksen energiatehokkuutta, mikäli käytössä on koneellinen ilmanvaihto. Poistoilmasta kerätään talteen sen lämpö. Ilman lämmön talteenottoa rakennuksesta poistuu 20 asteista ilmaa. Se kerää lämmön talteen lämmönkeruunesteellä, kun rakennuksen poistoilma virtaa laitteiston lävitse. Tom Allen Senera Oy arvioi, että poistoilman lämmöntalteenotolla voidaan ostoenergian kulutusta laskea 30-40%. Kerätyllä lämmöllä voidaan lämmittää joko käyttövettä tai syöttää lämpö lämmönjakoverkostoon. Poistoilman lämmöntalteenotto järjestelmä voidaan yhdistää sekä kaukolämmöllä että maalämmöllä lämmitettyihin rakennuksiin. Remontin hinnaksi Tom Allen Senera Oy arvio pienille kerrostaloille 50000€. Poistoilmasta kerätyllä lämmöllä lämmitetään yleensä tuloilmaa. Maalämmöllä toimivissa taloissa poistoilmasta kerätty lämpö voidaan syöttää myös energiakaivoihin, jos kulutus on pientä, jolloin se varastoituu sinne ja se voidaan käyttää suuremman kulutuksen aikaan. Tämän seurauksena keruupiirin veden lämpötila nousee, joka nostaa lämpöpumpun hyötysuhdetta. [17b]

### **3.6 Maalämpöpumppujen haasteet**

Maalämpöpumpun hyötysuhde riippuu talon lämpöjärjestelmän vaatimasta kiertoveden lämpötilasta. Vanhemmissa patterilämmitystä käyttävissä taloissa pattereissa kiertävän veden tulisi olla jopa 80 °C lämmintä, kuten kaukolämmön käsikirjassa kerrottiin. Ratkaisuna ongelmaan on pattereiden pinta-alan kasvattaminen, mikä mahdollistaa matalamman kiertoveden lämpötilan ja paremman hyötysuhteen. [15,16]

Maalämpöpumppujen hyötysuhde on sitä parempi mitä pienempi ero keruupiirin ja rakennuksen lämpöpiirin veden lämpötilalla on, koska kompressorin tarvitsema teho pienenee. [22]

Kuten luvussa 3.1 mainittiin kaupunkialueella ainoa mahdollinen tapa saada energiaa maalämpöpumpuille, on porata energiakaivoja. Energiakaivojen porauksen voi estää talon sijaitseminen pohjavedenottoalueella tai jos talon alla on suunniteltu tai jo olemassa esimerkiksi parkkihalli tai muuta maanalaista infrastruktuuria kuten metrotunneli. [15]

## 4 Maalämpöpumppujen ja kaukolämmön vertailu

Tässä luvussa käsitellään maalämpöpumpun kannattavuutta pienissä kerrostaloissa sekä pohditaan maalämpöpumppujen vaikutusta Suomen energiajärjestelmään.

### 4.1 Esimerkkitalot

Esimerkkitalot ovat identtisiä ominaisuuksiltaan kuten kooltaan ja lämmitysratkaisuiltaan. Talot sijaitsevat Helsingissä ja Oulussa. Valitut kaukolämmön hinnat perustuvat Energiategollisuuden kaukolämmön hinta -taulukkoon [2e]. Hinnat on esitelty taulukossa 3 sivulla 9. Talojen lämmitettävä ala on kooltaan 1262 brm<sup>2</sup> ja vertailtavia taloja on yhteensä kaksi. Molemmissa kaupungeissa oleva talo on rakennettu vuonna 1934. Helsingissä talon energiankulutus on 172 MWh. Oulun talon kulutuksessa on otettu huomioon vuotuisen keskilämpötilaeron aiheuttama lisääntynyt lämmönkulutus. Esimerkkitalojen lämmönjakohuoneet ovat remontin tarpeessa ja remontin kokonaishinta on 20000 €. Helsingissä energiakaivoja porataan 4 kappaletta 220 metrin syvyyteen. Investointikustannus Helsingissä on yhteensä 70000 €. Maalämpöjärjestelmään kuuluu kaksi 750 litran lämmönvaraajaa, sähkökattila ja Helsingissä IVT Greenline F Plus 43 -lämpöpumppu. Lämpöpumpun antoteho on 43 kW. Esimerkkitalo pohjautuu As Oy Kivelänkatu 1 B:hen. [23]

#### 4.1.1 Oulun esimerkkitalo

Oulusta ei löytynyt vastaavan kokoista asuinkerrostaloa, jossa olisi siirrytty kaukolämmöstä maalämpöön. Siksi Oulun talo on teoreettinen, jonka lämmönkulutus ja maalämpöinvestoinnin hinta on saatu laskemalla. Arvioin Oulun esimerkkitalon lämmönkulutuksen lämmitystarveluvun avulla. Lämmitystarveluku ilmaisee niiden päivien määrän, joita kuukaudessa tai vuodessa on ollut, jolloin ulkolämpötilan keskiarvo on ollut keväällä yli 10 °C ja syksyllä yli 12 °C. Lämmitystarveluvun yksikkö on °Cvrk. Lämmitystarveluvut sain ilmatieteenlaitoksen sivuilta [6b]. Laskukaava on Motivan sivuilta [7b]. Laskussa normeerataan Helsingin ja Oulun vuoden 2017 lämmönkulutus Jyväskylään eli kaavalla saadaan, kuinka paljon lämpöenergiaa rakennus kuluttaisi vuodessa, jos se sijaitsisi Jyväskylässä. Rakennusten energiankulutuksesta saadaan identtiset, kun molempien rakennusten normitettu kulutus on Jyväskylässä sama. Haarukoin siis alla olevan kaavan avulla Oulun esimerkkitalon vuosikulutuksen.

$$Q_{NORM} = k_2 \times \frac{S_{N \text{ vpkunta}}}{S_{\text{toteutunut vpkunta}}} \times Q_{\text{toteutunut}} + Q_{\text{lämmin käyttövesi}}$$

Jossa  $Q_{norm}$  on normitettu energiankulutus ja  $k_2$  on paikkakunta-kohtainen korjauskerroin Jyväskylään.  $S_{N \text{ vpkunta}}$  on normaalivuoden (1971 – 2000) lämmitystarveluku vertailupaikkakunnalla ja  $S_{\text{toteutunut vpkunta}}$  on vuoden 2017 toteutunut lämmitystarveluku vertailupaikkakunnalla [7b].

Koska talot ovat identtiset, on lämpimän käyttöveden kulutus Oulun talossa sama kuin se on Helsingin talossa eli 56,8 MWh vuodessa.

Taulukko 4: Kulutuksen laskennassa käytetyt arvot

Kaupunki	$k_2$	$Q_{\text{toteutunut}}$	$Q_{\text{lämmin käyttö-vesi}}$	$S_{\text{toteutunut}}$ vpkunta	$S_N$ vpkunta
Helsinki	1,24	115 MWh	56,8 MWh	3549 (2017)	3878
Oulu	0,94	158 MWh	56,8 MWh	4821 (2017)	5057

Oulun talon lämpöenergian tarve on siis rakennuksen lämmittämiseen tarvittun energian ja lämpimän käyttöveden lämmittämiseen tarvittun energian summa eli 215 MWh.

Alaluvussa 4.1.3 on arvioitu Helsingin esimerkkitalon huipputehon kulutus, joka on 69 kW. Kaukolämmön käsikirjan perusteella huipputeho olisi Oulussa 1,12-kertainen [1f] eli Oulun esimerkkitalon huipputehon kulutus olisi 77 kW. Tätä huippukulutusta varten tarvitaan tehokkaampi lämpöpumppu kuin Helsingissä. Tätä varten tarvitaan esimerkiksi kaksi sarjaan kytkettyä 27,3 kW lämpöpumppua, jotka yhdessä siis kattaisivat siis 71 % huipputehosta. Esimerkiksi kaksi Gebwell T<sup>2</sup> 26 lämpöpumppua täyttävät nämä vaatimukset [17c]. Maalämpötukku sivuston perusteella hintaeroa Helsingin ja Oulun lämpöpumpuille tulee noin 2000 - 3000 € [24]. Lämpöpumpun tehon perusteella arvioituna Helsingin porakaivon mitoitus perustuu laskelmaan, jossa jokaista lämpöpumpun tehon kW:ta kohti on porattu 20 metriä porakaivoa ja varmuuden vuoksi vielä 20 metriä päälle. Oulussa kallioperän lämpötila on matalampi kuin Helsingissä, joten Oulussa tarvitsee porata noin 23 metriä yhtä kW:ta kohti [25]. Oulussa tarvitsee siis porata yhteensä 1276 metriä porakaivoa. Alaluvussa 3.1 porauksen hinnaksi arvioitiin 30 euroa metriltä, jolloin porakaivojen hinnaksi tulisi 38280 €. Tämä on siis noin 11880 € kalliimpi kuin Helsingin porakaivot. Laskettaessa lämpöpumppujen kustannukset ja porauksen kustannukset yhteen maksaisi Oulun maalämpöinvestointi noin 14000 € enemmän kuin Helsingissä.

#### 4.1.2 Sähkön hinta

Sähkön hinta on arvioitu Energiaviraston ylläpitämän sähkönhinta-sivuston avulla [19b]. Kivelänkadun taloyhtiön ilmoittama sähkönhinta oli 111 € / MWh vuonna 2017, mutta päästöoikeuksien hintojen nousun jälkeen hinta oli liian matala ja arvioin sen suuruuden uudestaan. Sähkön hintana on käytetty näissä laskuissa 125 € / MWh.

#### 4.1.3 Lämpöpumpun mitoitus

Lämpöpumppu on antoteholtaan 43 kW. Talon huipputehon kulutus on saatu laskemalla ja on täten karkea arvio todellisesta huipputehon kulutuksesta. Huipputehon avulla arvioin, kuinka suuren osan tehosta lämpöpumppu on suunniteltu kattamaan. Huipputeho on laskettu kaukolämmön käsikirjasta saadun vanhan kerrostalon ominaislämpötehon arvion mukaan ja kerrottu arviollani lämmitettävästä rakennustilavuudesta, joka perustuu esimerkkitalon lämmitettävään alaan, jonka kerroin 2,5 m huonekorkeudella. Ominaislämpötehoksi otin 22 W / m<sup>3</sup> [1f]. Täten Helsingin talon huipputehon kulutukseksi tulisi noin 69 kW. Täten lämpöpumppu olisi mitoitettu kattamaan noin 62 % huipputehosta, jolloin Motivan mukaan se kattaisi noin 95 % vuotuisesta lämpöenergiasta [14].

## 4.2 Hiilidioksidipäästöjen vertailu

Jotta hiilidioksidipäästöjä voidaan vertailla, on ne laskettava samalla tavalla. Helen ilmoittaa vuoden 2017 päästönsä sivuillaan SFS-EN-15316-4-5 standardin mukaisesti laskettuna. Oulun Energia ei ole ilmoittanut päästöjen laskumetodiaan, mutta heidän laskutapansa antoi huomattavasti suuremman lukeman ominaispäästön arvolle, kuin Helenin laskutapa, vaikka kaukolämmöntuotannossa Oulussa on käytössä uusiutuvia polttoaineita. Bionovan tutkimuksessa, jossa vertailtiin eri päästölaskentametoodeja, tultiin tulokseen, että menetelmän valinnan vaikutus päästökertoimeen on merkittävä [26]. Siksi päädyin laskemaan molempien kaupunkien kaukolämmöntuotannon päästöt hyödynjakomenetelmällä, jotta päästöjä voidaan vertailla keskenään. Hyödynjakomenetelmässä päästöt jaetaan CHP-tuotannossa erillisen sähkön ja lämmön tuotannon polttoainekulutusten suhteessa. Hyödynjakomenetelmää käytetään seuraavalla tavalla:

Lauhdetuotannon polttoainekulutus:

$$F'_e = \frac{E_e}{\eta_e}$$

Jossa  $F'_e$  on vaihtoehtoisen sähköntuotannon polttoainekulutus.  $E_e$  on tuotettu sähkö yhteistuotannossa ja  $\eta_e$  on erillisen lauhdetuotannon hyötysuhde, jonka arvo on 0,39 [7c].

Erillisen lämmöntuotannon polttoainekulutus:

$$F'_h = \frac{E_h}{\eta_h}$$

Jossa  $F'_h$  on vaihtoehtoisen lämmöntuotannon polttoainekulutus.  $E_h$  on tuotettu lämpö yhteistuotannossa ja  $\eta_h$  on erillisen lämmöntuotannon hyötysuhde, joka on 0,9 [7c].

Laskennallinen lämmön polttoaineiden kulutus yhteistuotannossa:

$$F_h = \frac{F'_h}{F'_h + F'_e} \times F$$

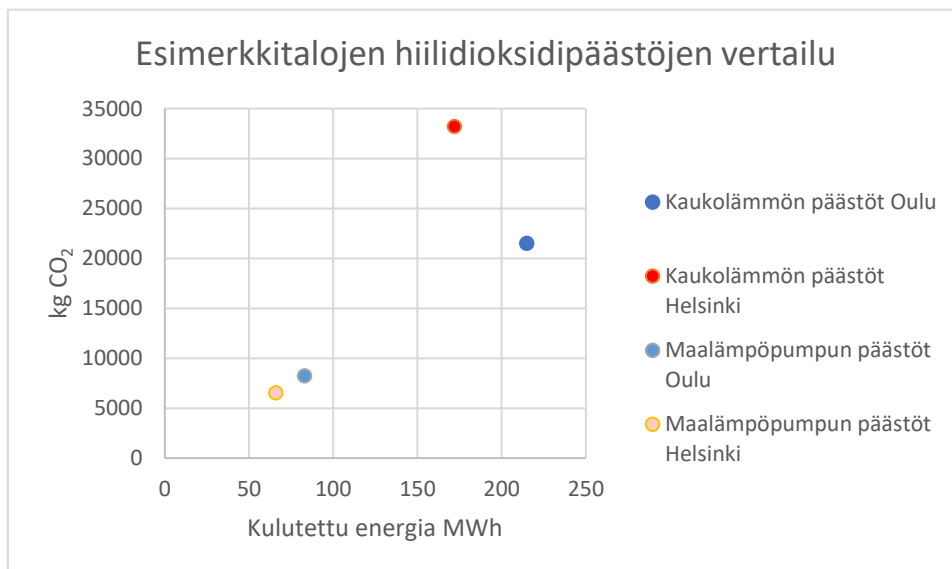
Jossa  $F_h$  on laskennallinen lämmön polttoaineiden kulutus yhteistuotannossa ja  $F$  on polttoaineiden kulutus yhteistuotannossa [7c]. Laskin ominaispäästökertoimen kertomalla kulutetun polttoainemäärän, jonka sain hyödynjakomenetelmän avulla, polttoaineen ominaispäästökertoimella ja jaoin tämän tuotetulla energiamäärällä. Helsingissä tuotetaan kaukolämpöä myös lämpöpumppujen avulla ja Oulussa on yksi jatkuvasti käytössä oleva jätepolttoaineita käyttävä lämpövoimalaitos. Lämpöpumppujen sähkön kulutus otettiin päästöissä huomioon käyttämällä Suomen sähkön kulutuksen päästökerrointa, jonka laskin alaluvussa 4.1.1. Polttoaineiden päästökertoimet on esitelty taulukossa 2 sivulla 5. Yksittäisten tuotantomuotojen päästökerrointen laskemisen jälkeen jaoin päästökertoimet vastaamaan polttoaineiden osuutta kaupunkien lämmöntuotannosta ja laskin kaupungin yleisen lämmöntuotannon ominaispäästökertoimen. Oulun kaukolämmön ominaispäästökertoimeksi tuli 100 kg CO<sub>2</sub> / MWh ja Helsingin ominaispäästökertoimeksi tuli 193 kg

CO<sub>2</sub> / MWh. Laskut perustuvat vuoden 2017 kaukolämmöntuotantotietoihin. Tiedot tuotannosta saatiin Helenin ja Oulun Energian nettisivuilta sekä Energiateollisuuden vuoden 2017 kaukolämpötilastosta [2h,8a, 10].

Ominaispäästökerroin on kerrottu esimerkkitalon lämmönkulutuksella, joka on 172 MWh Helsingissä ja alaluvussa 4.1.1 laskettu 215 MWh Oulussa. Kivelänkadun taloyhtiön ilmoittama sähkönkulutuksen määrä oli 66 MWh. Oulussa sijaitsevassa esimerkkitalossa tämä on 83 MWh. Maalämpöpumppujen sähkönkulutus on saatu esimerkkitalon sähkönkulutuksesta ja siinä on Oulun kohdalla huomioitu sijainnin vaikutus kulutukseen. Maalämpöpumppujen hiilidioksidipäästöjen erot johtuvat laskelmassani ainoastaan erosta kulutuksen suuruudessa kaupunkien välillä, koska laskelmassa on käytetty alaluvussa 3.3 laskemaani keskimääristä ominaispäästökerrointa Suomessa kulutetulle sähkölle, joka on 98,9 kg CO<sub>2</sub> / MWh.

Laskelmien perusteella kaukolämmön vaihtaminen maalämpöön on molemmissa kaupungeissa kannattavaa hiilidioksidipäästöjen vähentämisen kannalta. Kuten kuvaajasta 1 näkee, siirtyminen maalämpöön on helpoin tapa taloyhtiöille vähentää omia päästöjään merkittävästi. Siirtymällä kaukolämmöstä maalämpöön taloyhtiö voi vähentää hiilidioksidipäästöjään 25 tonnilla ja Oulussa 15 tonnilla vuodessa. Oulun esimerkkitalon huomattavasti pienemmät hiilidioksidipäästöt kaukolämmön kulutuksen osalta selittyvät Oulun kaukolämmöntuotannon biopolttoaineiden 40 % osuudella. Biopolttoaineet ovat päästölaskennassa päästöttömiä.

Taloyhtiöt voivat myös pyrkiä vähentämään kulutustaan, mikäli he haluavat vähentää hiilidioksidijalanjälkeään. Helsingissä 10% leikkaus kulutukseen vähentäisi talonyhtiön vuosittaisia hiilidioksidipäästöjä 4 tonnilla. Taloudelliset tekijät vaikuttavat taloyhtiöiden päätöksiin kuitenkin enemmän kuin ympäristölliset. Luvussa 4.3 käsitellään maalämpöremontin taloudellista kannattavuutta investoinnin takaisinmaksuajan avulla. Kulutuksen vähentämiseen liittyvät energiaremontit eivät kuulu tämän kandidaatintyön aiheeseen eikä niiden taloudellista järkevyyttä käsitellä.



Kuvaaja 1: Hiilidioksidipäästöjen vertailu maalämmön ja kaukolämmön tuotannon välillä Helsingin ja Oulun esimerkkitalojen energiankulutuksilla.

## 4.3 Herkkyystarkastelu

Arvioin maalämpöpumppuremontin kannattavuutta herkkyystarkastelun avulla. Herkkyystarkastelun avulla voidaan arvioida, kuinka eri muuttujien arvojen muuttuminen vaikuttaa investoinnin kannattavuuteen. [27]

Tämän herkkyystarkastelun tarkoituksena on selvittää, mitkä muuttujat ovat tärkeimpiä maalämpöpumppuremontin kannattavuuden kannalta. Maalämpöpumppuremontin kannattavuutta verrataan kaukolämmön hintaan vastaavalla energian kulutuksella. Tulen tarkastelemaan erityisesti koron suuruutta, kaukolämmön ja maalämpöpumpulla tuotetun sähkön hintaa. Herkkyystarkastelua tarvitaan, koska monet muuttujien arvot ovat varsinkin tulevaisuuden osalta hämärän peitossa.

### 4.3.1 Laskut

Tein taulukkolaskentaohjelmalla taulukon, jonka avulla pystyin muuttamaan muuttujien arvoja ja selvittämään niiden vaikutuksia maalämpöpumppuremontin kannattavuuteen verrattuna. Maalämpöpumppujen investointihinnat on saatu Suomessa toteutuneista maalämpöpumppuprojekteista. Maalämpöpumppuremontin kustannukset ovat kuitenkin taloyhtiökohtaisia, ja näiden laskujen tehtävänä on ainoastaan karkeasti arvioida eri osatekijöiden vaikutusta maalämpöpumppu lämmityksen kannattavuuteen eri skenaarioissa.

Laskuissa vertaillaan eri lämmitysjärjestelmien kokonaiskustannusta 20 vuoden aikavälillä. Investointien ja koron vaikutus on otettu mukaan laskuihin annuiteettimenetelmällä, jossa kokonaiskustannuksiin on lisätty lainan takaisinmaksuajan vuosien aikana jokaisena vuonna saman suuruinen erä. Takaisinmaksuaika on jokaisessa laskussa 15 vuotta. Investointikorko on 3 %. Ainoastaan koron suuruuden vaikutusta kokonaiskustannuksiin arvioidaessa korko nostetaan 5 %:iin.

Kokonaiskustannusten vertailua varten on vuosittaiset rahavirrat diskontattava nykyhetkeen. Toistuvat yhtä suuret kustannukset on diskontattu nykyhetkeen kaavalla:

$$\text{Nykyarvo} = \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^{n \times i}} \times \text{kuluerä}$$

Jossa  $i$  on vuosittainen korkokanta ja  $n$  on maksujen lukumäärä. Kaava antaa toistuvan kuluerän kokonaiskustannuksen nykyarvon [28]. Laskuissa esiintyy myös vuosittain kasvavia kulueriä, jolloin yllä esitettyä kaavaa ei voi käyttää näiden erien diskonttaamiseen nykyhetkeen. Näissä tapauksissa on käytetty kaavaa:

$$\text{Nykyarvo} = \frac{\text{kuluerä}}{(1+i)^{n^v}}$$

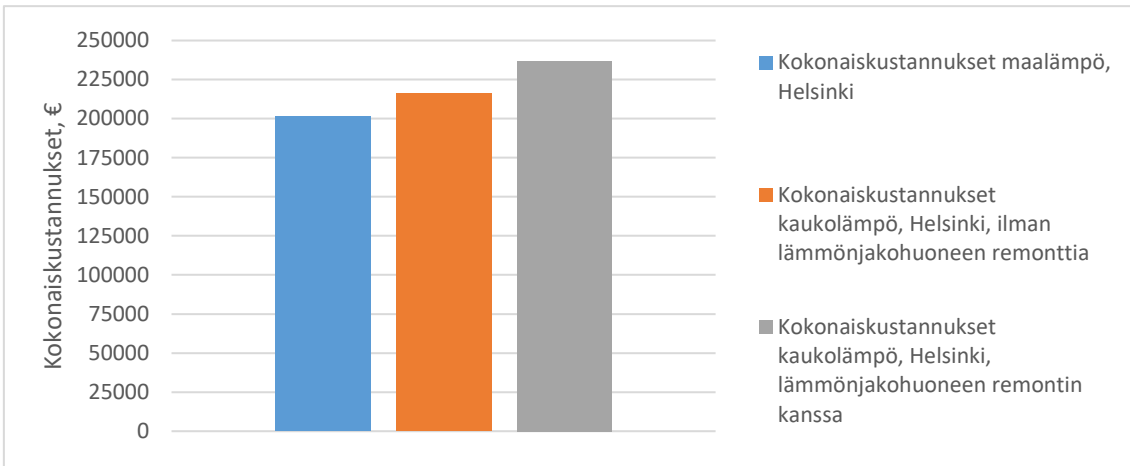
Jossa  $i$  on vuosittainen korkokanta ja  $n^v$  on vuosi. Tämän jälkeen kuluerät summataan yhteen, jotta saadaan kuluerien aiheuttama kokonaiskustannus. [28]

### 4.3.1.1 Lämmönjakohuoneen remontti

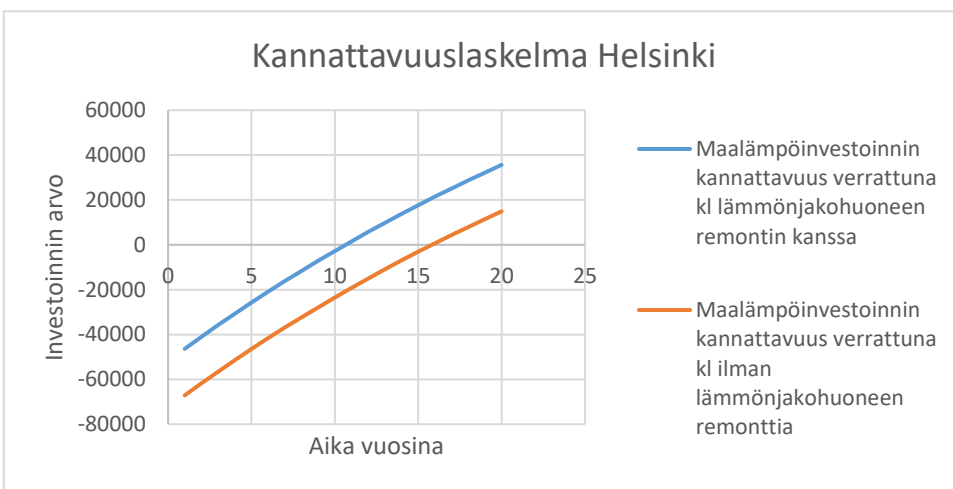
Ensimmäisen skenaarion tiedot on annettu luvussa 4.1. Laskelmissa energian hinta on pidetty vakiona ja tutkittu maalämmön kannattavuutta tilanteessa, jossa lämmönjakohuone olisi muutenkin menossa remonttiin. Vertaan tätä skenaariota vastaavaan tilanteeseen, jossa lämmönjakohuone ei ole menossa remonttiin. Lämpöpumpun lämpökertoimenä on 2,6. Laskuissa investoinnin hinta on otettu huomioon hyödyntämällä Excelin PMT-funktiota. PMT-funktio laskee annuiteetilainalle maksuerän suuruuden, jonka avulla laskin lainan kokonaiskustannukset. Korkona investoinneille käytin 3 % ja maksuaikana 15 vuotta. Vuosittain maksettavat annuiteettierät ovat yhtäsuuria, joten diskonttasin lainan kustannukset hyödyntämällä toistuvien samansuuruisten tuloerien diskonttaus kaavaa. Korkokantana käytin 2,5 % ja maksujen lukumäärä oli 15. Lämmönjakohuoneen kokonaiskustannus oli näillä arvoilla 20740 €. Maalämpöinvestoinnin kokonaiskustannus oli Helsingissä 72600 € ja Oulussa noin 87120 €. Ostetun sähkön kokonaiskustannus muodostuu yhtä suurista kulueristä. Täten diskontattu kokonaiskustannus on saatu kertomalla vuosittain kulutettu sähköenergia Helsingissä ja Oulussa sähkön hinnalla 125 € / MWh ja hyödyntämällä toistuvien samansuuruisten tuloerien diskonttaus kaavaa. Korkokantana käytin 2,5 % ja maksujen lukumäärä oli 20, koska tarkastelujakso on 20 vuotta. Maalämmön kokonaiskustannukset on saatu laskemalla ostoenergian ja investoinnin diskonttatut kokonaishinnat yhteen.

Kaukolämmön skenaariossa ilman lämmönjakohuoneen remonttia, kokonaiskustannus muodostuu pelkästään diskontatusta energian hinnasta. Eli kulutus on kerrottu kaukolämmön hinnalla ja hyödyntämällä toistuvien samansuuruisten tuloerien diskonttaus kaavaa. Skenaariossa, jossa ei tehdä lämmönjakohuoneen remonttia taloyhtiö on vastikään uusinnut lämmönjakohuoneensa, jolloin sitä ei tarvitse uusida 20 vuoden tarkastelujakson aikana. Skenaariossa, jossa lämmönjakohuoneen remontti tehdään on kokonaiskustannuksien laskennassa laskettu yhteen lämmönjakohuoneen remontin diskontattu investointikustannus ja 20 vuoden aikana kulutetun energian diskontattu hinta. Energian hinnat eivät muuttuneet tässä laskelmassa. Kuvaajat 3 ja 5 kuvaavat vuotta, jolloin investointi tulee kannattavaksi suhteessa kaukolämpöön. Kuvaajan 3 laskelmat on tehty ottamalla aluksi huomioon investoinnin diskontattu kustannus korkoineen huomioon. Tapauksessa, jossa lämmönjakohuoneen remonttia ei tehty ainoa investointi kustannus on maalämpöinvestointi. Tästä on vähennetty diskonttatut säästöt, joita saadaan kaukolämmön ja sähkön hinnan erotuksena joka vuosi. Koska on tarkasteltu vuosittaisia kuluja, on energian hinnat diskontattu hyödyntäen yksittäisen kuluerän diskonttauksessa käytettyä kaavaa. Lämmönjakohuoneen remontin tapauksessa maalämpöinvestoinnin kokonaishinnasta on vähennetty lämmönjakohuoneen remontin kokonaishinta.

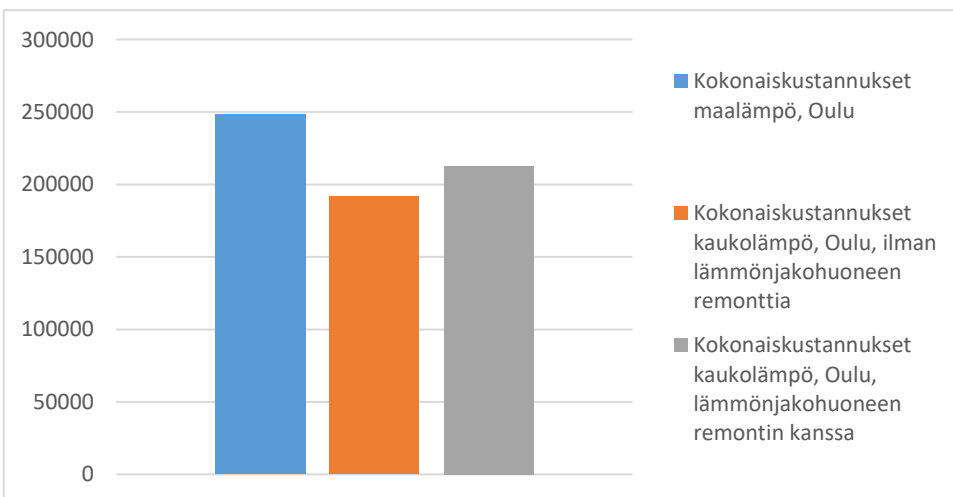




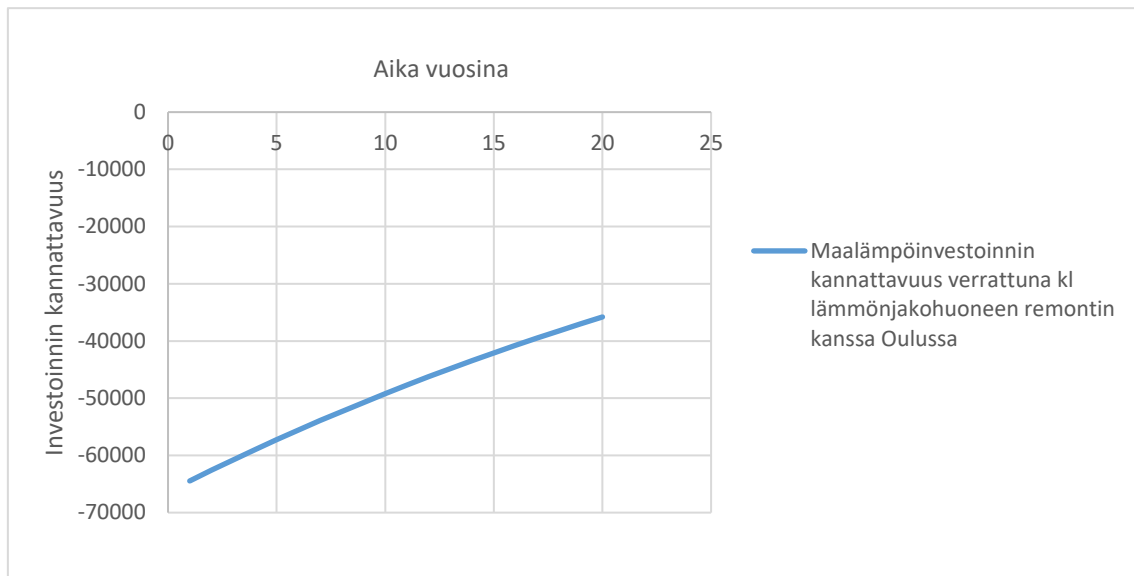
Kuvaaja 2: Kokonaiskustannusvertailu Helsingissä



Kuvaaja 3: Säästöt 20 vuoden aikana suhteessa kaukolämpöön Helsingissä



Kuvaaja 4: Kokonaiskustannusvertailu Oulussa



Kuvaaja 5: Säästöt 20 vuoden aikana suhteessa kaukolämpöön Oulussa

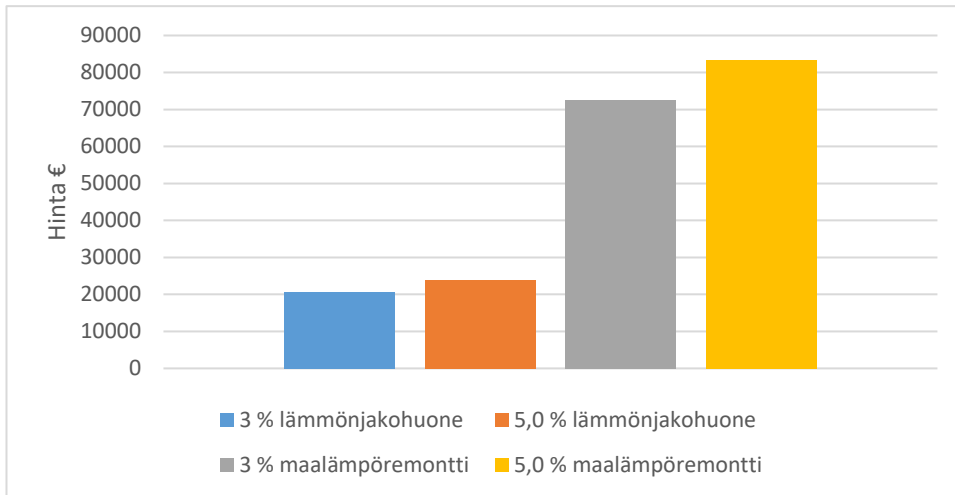
Kuvaajasta 2 huomataan, että maalämpö tulee 20 vuoden aikavälillä noin 37000 € euroa halvemmaksi kuin kaukolämpö, kun laskuihin otetaan mukaan lämmönjakohuoneen remontti. Ilman remonttia maalämpö on silti kannattavampaa, mutta enää noin 16000 €. Lämmönjakohuoneen remontin kanssa maalämpöinvestoinnista tulee kannattava 11 vuoden jälkeen ja ilman lämmönjakohuoneen remonttia 16 vuoden jälkeen. Kuvaajista 2 ja 3 huomaa, että maalämpöön siirtyminen kannattaa Helsingissä.

Kuvaajista 4 ja 5 nähdään, että maalämpöinvestointi ei ole kannattava Oulussa. Syynä on pääosin halpa kaukolämmön hinta. Lisäksi maalämpöpumpun vaatima investointi on suurempi Oulussa, joka vaikuttaa kannattavuuteen negatiivisesti.

#### 4.3.1.2 Koron vaikutus investointiin

Tutkin koron vaikutusta kokonaiskustannuksiin nostamalla koron 3 %:sta 5 %:iin. Investoinnin kokonaiskustannus laskettiin Excelin PMT-funktion avulla ja diskontattiin hyödyntämällä toistuvien samansuuruisten tuloerien diskonttaus kaavaa. Investoinnin kokonaiskustannusten osalta tarkasteltiin ainoastaan Helsinkiä, koska koron nousu vaikuttaa kannattavuuteen negatiivisesti, ja koska koron nousu nostaa lainan hintaa euroissa enemmän, kun kyseessä on suurempi laina. Täten maalämpöinvestoinnin hinta nousee euroissa enemmän kuin lämmönjakohuoneen remontti. Lisäksi edellisessä luvussa totesimme maalämpö ei ollut kannattava investointi Oulussa, jonka takia Oulun tarkasteleminen ei tuo lisäarvoa.

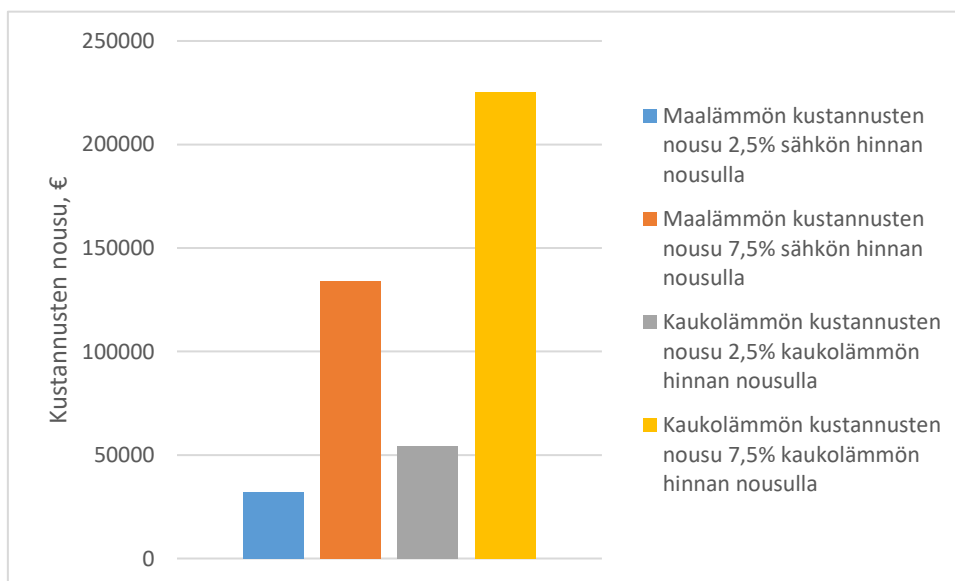
Kuvaajasta 6 nähdään, että koron nousu nosti lämmönjakohuoneen remontin hintaa noin 3000 € ja maalämpöremontin hintaa noin 10000 €. Maalämpöremontti tulisi siis 7000 € kalliimmaksi 5 % korolla kuin 3 % korolla, kun sitä verrataan lämmönjakohuoneen remonttiin. 7000 € ei ole 20 vuoden mittakaavassa erityisen merkittävä eikä nosta maalämmön kokonaiskustannuksia yli kaukolämmön kustannusten.



Kuvaaja 6: Investointien kokonaishinta 3 % ja 5 % koroilla.

### 4.3.1.3 Energian hinnan nousun vaikutus kokonaiskustannuksiin

Kuvaajassa 7 on tarkasteltu energian hinnan nousun aiheuttamaa kustannusten nousua Helsingissä. Kuvaajan arvot on saatu laskemalla ostetun energian hinta vuosittain nostamalla energian hintaa kuvaajassa esitetyllä prosenttimäärällä sekä diskontattu energian hinta joka vuosi, jonka jälkeen diskontatut energian hinnat laskettiin yhteen. Näistä kustannuksista vähennettiin vakiohintaisen energian diskontatut kokonaiskustannukset. 2,5 % vuosittainen hintojen nousu on varsin maltillinen ja 7,5 % hintojen nousu on varsin dramaattinen toistuessaan joka vuosi. Siksi onkin todennäköistä, että Helsingin energian hintojen kasvu on jotain tältä väliltä kaukolämmön tuotannon uudistuksen takia.

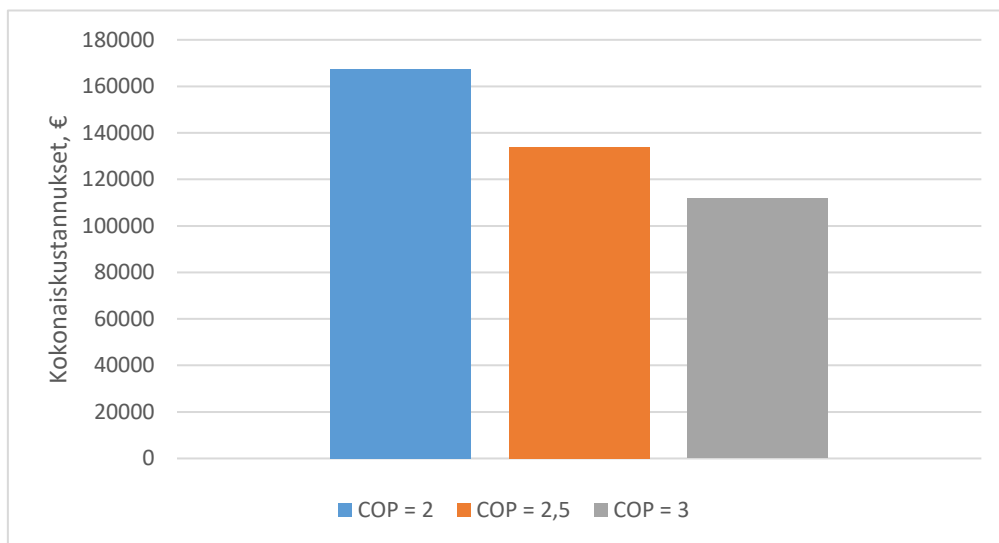


Kuvaaja 7: Energian kokonaiskustannusten nousu hinnankorotuksilla

Kuvaajan 7 avulla voi päätellä, että kaukolämmön hinnan nousu nostaa voimakkaammin kaukolämmön kokonaiskustannusta suhteessa maalämpöön, vaikka sähkön hinta nousisi prosentuaalisesti yhtä paljon kuin kaukolämmön. Energian hinta vaikuttaa voimakkaammin kokonaiskustannuksiin kuin korko tai lämmönjakohuoneen remontti.

#### 4.3.1.4 Maalämpöpumpun hyötysuhteen vaikutus kokonaishintaan

Maalämpöpumpun lämpökertoimen arvo vaikuttaa kulutetun sähköenergian määrään. Mitä alhaisempi lämpökerroin on, sitä enemmän sähköä se tarvitsee tuottaakseen riittävästi lämpöä. Maalämpöpumpun lämpökertoimeen vaikuttavia asioita on käsitelty luvussa 3. Olen tarkastellut lämpökertoimen vaikutusta tutkimalla, kuinka paljon maksaisi tuottaa 172 MWh lämpöä, kun lämpöpumpun lämpökertoimen vuotuinen keskiarvo olisi 2; 2,5 tai 3. Sähkön hintana käytettiin laskuissa 125 € / MWh. Kuvaajassa esiintyvät hinnat ovat diskontattu.



Kuvaaja 8: Lämpökertoimen vaikutus ostetun sähköenergian kokonaishintaan

Kuvaajasta 8 nähdään, että lämpökertoimen eli COP-luvun vaikutus maalämpöpumpun kannattavuuteen on merkittävä. COP-luvulla 2 toimiva lämpöpumppu tulee yli 50000 € kalliimmaksi kuin COP-luvulla 3 toimiva 20 vuoden aikajänteellä. Siksi lämpöpumpun mitoituksen onnistuminen on maalämmön kannattavuuden kannalta tärkeää.

#### 4.3.2 Epätarkkuudet laskuissa

Suurimmat epätarkkuudet laskuissa muodostuvat erityisesti energian hinnoista. On mahdotonta ennustaa tarkasti sähkön ja kaukolämmön hintaa tulevaisuudessa. Erityisen suuria kysymysmerkkejä aiheuttaa kiristyvien päästövaatimusten sekä päästömaksujen ja verotuksen vaikutukset energian hinnassa. Myös energian kulutus vaihtelee riippuen talon iästä, tehdyistä remonteista, säästä ja asukkaista. Lisäksi lähtötiedoissa voi olla epätarkkuuksia.

#### 4.4 Maalämpöpumppujen määrän lisääntymisen vaikutukset energiamarkkinoihin

Maalämpöpumput tuottavat lämpöä sähkön avulla. Maalämpöpumppujen määrän lisääntyminen siis johtaa sähkön kulutuksen kasvamiseen. Näköpiirissä ei ole lämmönkulutuksen pientymistä, vaikka rakennusten energiatehokkuus paraneekin, sillä kaupunkien rakennuskanta jatkaa kasvamistaan maan sisäisen ja ulkoisen muuttoliikkeen seurauksena. Maalämpöpumppujen suosio saattaa kasvaa voimakkaasti kivihiilen käytön kiellettyä korvaavien energialähteiden vaatiessa investointeja. Lisäksi päästöoikeuksien laajentumisessa koskemaan kaukolämmöntuotantoa se tulee nostamaan kaukolämmön hintaa. Investointien määrä jakautuu yhä harvempien asiakkaiden maksettavaksi, mikä voi edesauttaa yhä useampien asiakkaiden siirtymistä pois kaukolämmöstä. Lämpöpumppujen kehittyessä ja suosion kasvaessa niiden hinta saattaa laskea esimerkiksi porauksen tekniikoiden kehittyessä. Lisäksi lämpöpumppujen hyötysuhde saattaa parantua teknisen kehityksen seurauksena. [29]

Maalämpöpumppujen määrän lisääntyminen aiheuttaa haasteita sähkön tuotannolle, koska sähkön kulutus kasvaa ja suurin kulutus ajoittuu sähkökattiloiden takia kylmimpiin päiviin, jolloin kulutus on muutenkin jo suurempaa. Lisäksi osatehoiseksi mitoitettujen lämpöpumppujen ja näiden sähkökattiloiden lisääntyminen lisää myös sähkönsiirtoverkkojen raskautusta huippukulutuksen aikaan. [30]

Maalämpöpumppujen vaikutus huoltovarmuuteen on hyvä huomioida. Huoltovarmuuskeskusten vuonna 2016 julkaistussa raportissa arvioitiin, että kulutushuipun aikaan Suomen sähkötehon kulutus on 3400 MW suurempi kuin käytössä oleva tuotantokapasiteetti talvikaudella 2015-2016 [31]. Mikäli sähköntuotannossa tai -tuonnissa tapahtuu pitkäkestoisia häiriöitä huippukulutuksen aikaan, voi maalämpöpumpuilla lämpeneissä taloissa olla ongelmia lämmityksen kanssa. Kulutushuippuja esiintyy kylmimmillä talvipakkasilla, jolloin lämmitystarve on suurimmillaan [31]. Lämmityksessä toimimattomuus suurimman lämmitystarpeen aikaan on suuri ongelma, joka vaikuttaa asukkaiden asumismukavuuteen. Maalämpöpumppujen määrän merkittävän lisääntymisen seurauksena Suomen tulisi merkittävästi kasvattaa sähköntuotantokapasiteettiaan ja sähköntuontikapasiteettia, jotta sähkön riittävyys voidaan taata kulutushuippujen aikana.

## 5 Johtopäätökset

Lämpöpumput soveltuvat korvaamaan kaukolämpöä tapauksissa, joissa kiertoveden lämpötilan ei tarvitse olla korkea. Maalämpöpumppujen kannattavuutta haittaa korkean kiertoveden lämpötilan aiheuttama hyötysuhteen lasku ja matala kaukolämmön hinta. Maalämpöpumppujen asentamista voi haitata pohjavesialueilla saastunut maaperä tai mikäli energiakaivon alueella on merkittävä pohjavedenottoalue. Lisäksi poraamisen voi estää kaupunkialueilla yleinen runsas maanalaisen alueen käyttö, kuten esimerkiksi Helsingissä. Energiakaivoja on kuitenkin mahdollista porata vinoon, jolloin joitakin esteitä on mahdollista kiertää.

Taloyhtiöiden on mahdollista vähentää hiilidioksidipäästöjään merkittävästi siirtymällä kaukolämmöstä maalämpöön. Hiilidioksidipäästöjen määrän väheneminen riippuu kulutetusta energiamäärästä, lämpöpumpun lämpökertoimesta ja paikallisen kaukolämmön tuotannon käytetyistä polttoaineista.

Maalämmön kannattavuus riippuu eniten energian hinnasta. Sähkön ja kaukolämmön hinnan nousu nostivat voimakkaimmin kokonaiskustannuksia. Mitä korkeampi on kaukolämmön hinta, sitä kannattavampi sijoitus maalämpö on, mikäli sähkö ei ole erittäin kallista. Maalämmön kannattavuuteen vaikuttaa myös maalämpöpumpun lämpökerroin. Lämpökertoimen arvo riippuu mitoituksen onnistumisesta. Mitoituksessa voidaan epäonnistua joko energiakaivojen kanssa tai rakennuksen vaatiman tehon kanssa. Lämpöpumppu ei saa olla selkeästi ali- tai ylimitoitettu. Koron suuruus ei vaikuttanut merkittävästi pienen kerrostalon maalämpöremontin hintaan ja sitä kautta sen kannattavuuteen.

Nykyisillä energian hinnoilla maalämpöremontti oli kannattava Helsingissä, mutta ei kannattanut Oulussa kaukolämmön matalan hinnan takia. Maalämpöremontin kannattavuus on kuitenkin talokohtaista ja Oulun ja Helsingin talonyhtiöiden ei kannata tehdä päätöksiä energiajärjestelmiensä suhteen esimerkkitalojen arvioiden pohjalta.

Kaukolämmöntuotannossa tapahtuvat suuret muutokset seuraavien 10-30 vuoden aikana muuttavat suuresti kaukolämmössä käytettyjä polttoaineita ja lämmöntuotantotapoja. Näiden muutosten aiheuttamat vaikutukset sähkön ja lämmön hintaan ovat arvaamattomia ja niiden suuruutta on hankala ennustaa etukäteen. Tämä vaikeuttaa luotettavien kannattavuuslaskelmien tekemistä pitkällä aikavälillä.

## 6 Lähteet

1. Koskelainen, L; Saarela, R; Sipilä, K. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki, Energiateollisuus, 2006. 566 s. ISBN 952-5615-08-1 nidottu
  - a. Tuotanto ja kulutus s. 25-41
  - b. Kaukolämmönlämmityksen polttoaineet s. 260-274
  - c. Kaukolämmön tuotanto ja laitokset s.259, s. 282-304
  - d. Energiataloudellinen mitoitusuhde s.323
  - e. Lämmön tuotanto s. 47-48
  - f. Kaukolämpöverkosto s. 137-165
  - g. Verkon suunnittelu ja mitoitus s.153-154
  - h. Talojen lämmönjakojärjestelmä s.66-93
2. Energiateollisuus
  - a. Energiavuosi 2018 – Kaukolämpö, kaukolämmön kulutus eri kuukausina. Saatavissa: [https://energia.fi/ajankohtaista\\_ja\\_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi\\_2018\\_-\\_kaukolampo.html#material-view](https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi_2018_-_kaukolampo.html#material-view) [Viitattu 14.2.2019]
  - b. Yhteistuotannon osuus lämmön ja sähkön tuotannossa Saatavissa: [https://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiantuotanto/yhteistuotanto](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/yhteistuotanto) [Viitattu 1.3.2019]
  - c. Teho ja vesivirta kaukolämmön maksuperusteina. Suositus K15/2014. Saatavissa: [https://energia.fi/files/586/Teho\\_ja\\_vesivirta\\_SuositusK15\\_2014.pdf](https://energia.fi/files/586/Teho_ja_vesivirta_SuositusK15_2014.pdf) [Viitattu 17.2.2019]
  - d. Kaukolämpöverkkojen pituus. Saatavissa: [https://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiaverkot/kaukolampoverkot](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/kaukolampoverkot) [Viitattu 17.2]
  - e. Kaukolämmön hinta 15 asunnon esimerkki kerrostalossa. Saatavissa: [https://energia.fi/ajankohtaista\\_ja\\_materiaalipankki/tilastot/kaukolampotilastot/kaukolammon\\_hinta](https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/tilastot/kaukolampotilastot/kaukolammon_hinta) [Viitattu 19.2.2019]
  - f. Energiaan liittyvät tulot ja verot. Saatavissa: [https://energia.fi/energiateollisuuden\\_edunvalvonta/energiapolitiikka/tuet\\_ja\\_verot](https://energia.fi/energiateollisuuden_edunvalvonta/energiapolitiikka/tuet_ja_verot) [Viitattu 15.3.2019]
  - g. Energiavuosi 2018 – Sähkö. Saatavissa: [https://energia.fi/ajankohtaista\\_ja\\_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi\\_2018\\_-\\_sahko.html](https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi_2018_-_sahko.html) [Viitattu 16.3.2019]
  - h. Kaukolämpötilasto 2017. Saatavissa: [https://energia.fi/files/2949/Kaukolampotilasto\\_2017.pdf](https://energia.fi/files/2949/Kaukolampotilasto_2017.pdf). [Viitattu 6.4.2019]
3. Grönfors, K; Timonen, L. Polttoaineluokitus 2019. Tilastokeskus, 2019. Saatavissa: [https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut\\_polttoaineluokitus.html](https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html) [Viitattu 1.3.2019]
4. Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön asetus rakennusten vesi- ja viemäri-laitteistoista. Ympäristöministeriö, 2019. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171047> [Viitattu 17.3.2019]
5. Terveystieteiden tutkimuskeskus. Vesijärjestelmiin liittyvää suomalaista lainsäädäntöä ja ohjeistoja. Saatavissa: <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/vesi/legionellabakteerit-vesijarjestelmissa/lainsaadantoa-ja-ohjeistoja> [Viitattu 17.3.2019]
6. Ilmatieteenlaitos.

- a. Suomen virallinen tilasto (SVT): Ilmastotilastot [verkkojulkaisu]. Helsinki: Ilmatieteen laitos. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/ilmatila/index.html> [Viitattu: 18.2.2019]
  - b. Lämmitystarveluvut Saatavissa: [https://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut?p\\_auth=MuX8QxqM&p\\_p\\_id=WebProxyPortlet\\_WAR\\_WebProxyPortlet\\_INSTANCE\\_ZZq1&p\\_p\\_lifecycle=1&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-2&p\\_p\\_col\\_count=3&WebProxyPortlet\\_WAR\\_WebProxyPortlet\\_INSTANCE\\_ZZq1\\_edu.wisc.my.webproxy.URL=http%3A%2F%2Fcdn.fmi.fi%2Flegacy-fmi-fi-content%2Fproducts%2Fheating-degree-days%2Findex.php](https://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut?p_auth=MuX8QxqM&p_p_id=WebProxyPortlet_WAR_WebProxyPortlet_INSTANCE_ZZq1&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=3&WebProxyPortlet_WAR_WebProxyPortlet_INSTANCE_ZZq1_edu.wisc.my.webproxy.URL=http%3A%2F%2Fcdn.fmi.fi%2Flegacy-fmi-fi-content%2Fproducts%2Fheating-degree-days%2Findex.php) [Viitattu 10.4.2019]
7. Motiva.
- a. Lämmitysenergiankulutus. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/taloyhtiot/energiaeksperttitoiminta/tietoa\\_energian\\_ja\\_vedenkulutuksesta/lammitysenergiankulutus](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/taloyhtiot/energiaeksperttitoiminta/tietoa_energian_ja_vedenkulutuksesta/lammitysenergiankulutus) [Viitattu 2.3.2019]
  - b. Rakennusten lämmitysenergiankulutuksen normitus. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/2840/Rakennusten\\_lammitysenergiankulutuksen\\_normitus.pdf](https://www.motiva.fi/files/2840/Rakennusten_lammitysenergiankulutuksen_normitus.pdf) [Viitattu: 10.4.2019]
  - c. Kuvaus hyödynjakomenetelmästä. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/6820/Kuvaus\\_hyodynjakomenetelmasta.pdf](https://www.motiva.fi/files/6820/Kuvaus_hyodynjakomenetelmasta.pdf)
8. Helen
- a. Energian alkuperä. 2017. Saatavissa: <https://www.helen.fi/yritys/energia/energiantuotanto/energian-alkuperä/> [Viitattu 19.2.2018]
  - b. Ominaispäästöt 2017, Saatavissa: <https://www.helen.fi/yritys/energia/energiantuotanto/sahkon-ja-lammon-ominaispaastot/> [Viitattu: 2.3.2019]
9. Oulun kaupunki, energiantuotanto. 2017. Saatavissa: <https://www.ouka.fi/oulu/ilmasto/energiantuotanto> [Viitattu 19.2.2018]
10. Oulun Energia. Lämmön alkuperä. Saatavissa: <https://www.oulunenergia.fi/energia-ja-ymparisto/energiantuotanto/lammon-alkuperä> [Viitattu 2.3.2019]
11. Kakkonen, J. Selvitys EU:n päästökauppajärjestelmästä, päästöoikeuden hinnasta ja päästökauppajärjestelmään puuttumisesta. Selvitystyö. Aalto-yliopisto ja Energiateollisuus ry. Insinööritieteiden korkeakoulu. 2013. 43 s. s. 18. Saatavissa: [https://energia.fi/files/500/EUn\\_paastokauppa.pdf](https://energia.fi/files/500/EUn_paastokauppa.pdf) [Viitattu 15.3.2019]
12. Business Insider, *CO2 EUROPEAN EMISSION ALLOWANCES*. Saatavissa: <https://markets.businessinsider.com/commodities/co2-emissionsrechte/euro> [Viitattu: 15.3.2019]
13. Hartikainen, J. Helsingin Sanomat, 2018. Päästöoikeuden hinta nousi uuteen ennätykseen – päästöttömän energian kannattavuus paranee. Saatavissa: <https://www.hs.fi/talous/art-2000005802873.html> [Viitattu 15.3.2019]
14. Vesalainen, S. Hallitus hoputtaa luopumaan hiilestä – Mistä Helsinki saa energiansa vuoden 2029 jälkeen? Yle, 2018. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10160707> [Viitattu 15.3.2019]
15. Juvonen, J; Lapinlampi, T. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Helsinki, Ympäristöministeriö 2013. 64 s. ISSN 1796-167X [verkkojulkaisu]. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO\\_2013.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=4&isAllowed=y) [Viitattu 20.2.2019]
16. Motiva. Lämpöä omasta maasta. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/7965/Lampoa\\_omasta\\_maasta\\_Maalampopumput.pdf](https://www.motiva.fi/files/7965/Lampoa_omasta_maasta_Maalampopumput.pdf) [Viitattu 20.2.2019]



17. Tom Allen Senera Oy
  - a. Maalämpö. Saatavissa: <https://www.tomallensenera.fi/maalampo> [Viitattu 14.3.2019]
  - b. Lämmön talteenotto. Saatavissa: <https://www.tomallensenera.fi/lammon-talteenotto> [Viitattu 16.3.2019]
  - c. Gebwell-T2. Saatavissa: [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/1830590/Tom\\_Allen/Esitteet-ja-kayttoohjeet/Gebwell/EG2\\_Gebwell-T2.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/1830590/Tom_Allen/Esitteet-ja-kayttoohjeet/Gebwell/EG2_Gebwell-T2.pdf) [Viitattu: 10.4.2019]
18. Rantanen, M. Lämpöpumppulämmitysjärjestelmän mitoitus ja laitevalinnat. Insiinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Talotekniikka. 2015. 48 + 8 s. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/88825/Mikko%20Rantanen%20Lampopumppulammitysjarjestelman%20mitoitus%20ja%20laitevalinnat.pdf?sequence=1> [Viitattu 14.3.2019]
19. Energiavirasto.
  - a. Sähkön tuotannon päästökerroin. Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/sahkontuotannon-paastokerroin> [Viitattu: 16.3.2019]
  - b. Sähkön hinta -palvelu. Saatavissa: <https://www.sahkonhinta.fi/summariesandgraphs> [Viitattu: 12.4.2019]
20. Pesonen, J. Maalämpöjärjestelmän mitoitus ja kustannusarvio. Opinnäytetyö. Lapin Ammattikorkeakoulu, Tekniikka ja liikenne, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 2018. 39 + 5 s. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/150144/Pesonen\\_Joni.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/150144/Pesonen_Joni.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [Viitattu 16.3.2019]
21. Energiatehokas koti. Lämmitysjärjestelmien elinkaari. Saatavissa: [https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan\\_suunnittelu/lammitys/lammitysjarjestelmien\\_elinkaari](https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan_suunnittelu/lammitys/lammitysjarjestelmien_elinkaari) [Viitattu 16.3.2019]
22. S.J. Rees, 1 - An introduction to ground-source heat pump technology, Advances in Ground-Source Heat Pump Systems, Woodhead Publishing, 2016, Pages 1-25, ISBN 9780081003114, Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100311-4.00001-7>. [Viitattu 17.3.2019]
23. As Oy Kivelänkatu 1 B. Saatavissa: <http://www.navea.net/maalampo.html> [Viitattu 15.3.2019]
24. Maalämpötukku. Saatavissa: <https://www.maalampotukku.fi/category/11/gebwell> [Viitattu: 10.4.2019]
25. Nibe. Maalämpöpumppuopas. Saatavissa: [https://www.nibe.fi/Documents/haato\\_fi/NIBE%20MLP%20JA%20VPDIM%20OPAS%201137-1.PDF](https://www.nibe.fi/Documents/haato_fi/NIBE%20MLP%20JA%20VPDIM%20OPAS%201137-1.PDF) [Viitattu: 11.4.2019]
26. Pasanen, P; Bruce, T; Anastasia, S. Kaukolämmön CO<sub>2</sub>-päästöjen laskentamenetelmät päätöksenteon työkaluina. Bionova Consulting ja Energiateollisuus ry, 2013. Saatavissa: [https://www.oneclicklca.com/wp-content/uploads/2017/11/raportti\\_kaukolammon\\_co2-paastojen\\_laskentamenetelmät\\_paatoksenteon\\_tyokaluuina\\_20130829.pdf](https://www.oneclicklca.com/wp-content/uploads/2017/11/raportti_kaukolammon_co2-paastojen_laskentamenetelmät_paatoksenteon_tyokaluuina_20130829.pdf) [Viitattu 17.3.2019]
27. Pulakka, S; Heimonen, I; Junnonen, J; Vuolle, M. Talotekniikan elinkaarikustannukset. VTT 2007. 66 s. ISBN 978-951-38-6962-5. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2409.pdf> [Viitattu 21.2.2019]
28. Talousmatematiikan peruskaavat. Haaga-Helia ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://myy.haaga-helia.fi/~nurju/Teaching/Talousmatematiikka/tmkaavat.pdf> [Viitattu 17.4.2019]

29. Jokela, E. Lämpöpumppujärjestelmien vaikutus energiayhtiön liiketoimintaan. Diplomityö. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Konetekniikan koulutusohjelma. 2014. 102 + 17. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22560/Jokela.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Viitattu 14.4.2019]
30. Pessi, I. Maalämpöpumppujen yleistymisen vaikutukset energiayhtiöissä. Diplomityö. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Konetekniikan koulutusohjelma. 2017. 76 + 3. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/25221/Pessi.pdf?sequence=3&isAllowed=y> [Viitattu 14.4.2019]
31. Hankalin, V; Sivill, L; Rantanen, L; Hellsten, J; Juuri, K. Selvitys keinoista sähkötehon riittävyyden varmistamiseksi kulutushuipuissa. Huoltovarmuuskeskus, Energiavirasto, Työ- ja elinkeinoministeriö. 2016. Saatavissa: <http://huoltovarmuuskeskus.s3-eu-west-1.amazonaws.com/app/uploads/2016/09/08165658/917.pdf> [Viitattu 17.4.2019]