

# **Lämmitysverkoston lämpötilatasojen optimointi lämpöpumppujärjestel- mässä**

Ulla Puranen

Opinnäytetyö

Joulukuu 2020

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikka

Tekijä(t) Puranen, Ulla	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Joulukuu 2020
	Sivumäärä 79	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Lämmitysverkoston lämpötilatasojen optimointi lämpöpumppujärjestelmässä</b>		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikka		
Työn ohjaaja(t) Marjukka Nuutinen & Ville Kotimäki		
Toimeksiantaja(t) Sweco Talotekniikka Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Toimeksiantaja Sweco Talotekniikka Oy tarvitsi talotekniikan suunnittelun avuksi työkalun, jolla voitaisiin määrittellä lämpöpumppujärjestelmän lämmitysverkoston elinkaarenaikais- ten kustannusvaikutusten kannalta optimoiduin lämpötilataso. Lämpöpumpun käyttö jär- jestelmässä on energiatehokkainta matalilla menoveden lämpötiloilla. Samalla kuitenkin lämmitysverkoston putki- ja päätelaitekustannukset kasvat korkeampiin lämpötilatasoihin verrattuna. Tavoitteena oli tehdä toimiva tarkoitusta palveleva optimointityökalu ja löytää lämpötilataso, jolla nämä elinkaarikustannusten kannalta eri suuntiin vaikuttavat taloudel- liset tekijät yhdessä ovat kustannustehokkaimmat.</p> <p>Elinkaarikustannuslaskelmia varten selvitettiin kaukolämmön ja lämpöpumpun hybridijär- jestelmässä lämmönjaon investointikustannukset sekä energiankustannussäästö verrat- tuna pelkkään kaukolämpöön. Kaikki laskelmat tehtiin viidelle eri vertailulämpötilatasolle. Tarkastelun kohteena oli neljä suuren kokoluokan rakennustyyppiä, joissa lämpimän käyt- töveden kaukolämpökytkentä voitiin toteuttaa kahdella eri tavalla. Tutkimuksessa käytetyt lähtödatat olivat energiasimuloinnein lasketut koko vuoden lämmityksen tuntitehotiedot, Ilmatieteen laitoksen testisäävuoden 2012 tuntilämpötilat ja tarvittavat hintatiedot.</p> <p>Tuloksena saatiin toimiva Excel-pohjainen työkalu, joka laskee valikoista valittavien ja ma- nuaalisesti syötettävien tietojen perusteella kustannustehokkaimman lämmitysverkoston menoveden lämpötilan. Tulosten perusteella olisi taloudellisesti kannattavinta suunnitella järjestelmät korkeammille verkoston lämpötilatasoille 50–60 °C.</p> <p>Laskentatyökalulla saadaan karkea arvio suositellusta lämpötilatasosta, mutta lopulliset suunnitteluarvot ovat aina rakennusprojekti kohtaisten vaatimusten ja tarpeiden mukaiset.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Maalämpöpumppu, ilma-vesilämpöpumppu, lämmitysjärjestelmä, lämmitysverkoston läm- pötila, optimoiminen, elinkaarikustannukset		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Puranen, Ulla	Type of publication Bachelor's thesis	Date December 2020 Language of publication: Finnish
	Number of pages 79	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Optimization of heating network temperature levels in a heat pump system</b>		
Degree programme Bachelor's Degree Programme in Energy and Environmental Technology		
Supervisor(s) Marjukka Nuutinen & Ville Kotimäki		
Assigned by Sweco Talotekniikka Oy		
Abstract  <p>To help with the design of the building systems, the assignor company needed a tool to determine the most optimized temperature level for the life cycle cost impact of the heating network in a heat pump system. Usage of a heat pump is the most energy efficient at low heating water temperatures. At the same time, however, the pipe and the heating device costs of the heating network increase in comparison to the higher temperature levels. The aims of the study were to make a functional and purpose-built optimization tool and to find the temperature level at which these economic factors, which impact on opposite directions in terms of life cycle costs, are together the most cost-effective.</p> <p>For the life cycle cost calculations, the investment costs and the energy savings compared to district heating, were defined in a hybrid system of heat pump and district heating. The calculations were performed for five reference temperature levels. Four large-scale building types in which district heating of domestic hot water could be implemented in two different ways were examined. The initial data used in the study were the hourly heating capacities for the full year calculated by energy simulations, temperatures of the Finnish Meteorological Institute's test reference year 2012 and price data needed.</p> <p>The result was a useful Excel-based tool that outputs the temperature of the ingoing water in the most cost-effective heating network based on data selected from the menus and entered manually. Based on the results, it would be economically most profitable to choose higher temperature levels 50–60 °C for heating networks.</p> <p>The calculation tool provides a rough estimate of the recommended temperature level, but the final design values are always in accordance with the requirements and needs specific to the construction project.</p>		
Keywords/tags (subjects) Ground source heat pump, air to water heat pump, heating system, temperature level of heating network, optimization, life cycle costs		
Miscellaneous (Confidential information)		

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>6</b>
1.1	Rakentamisen tavoitteet hiilineutraaliuden näkökulmasta .....	6
1.1.1	Lämpöpumppujen käytön lisääminen .....	7
1.1.2	Materiaalien tehokas käyttö .....	8
1.1.3	Kustannustehokkuus .....	8
1.2	Toimeksianto .....	8
<b>2</b>	<b>Tutkimusasetelma .....</b>	<b>10</b>
2.1	Työn tavoite.....	10
2.2	Tutkimusote.....	10
2.3	Työssä tarkasteltavat muuttujat ja työn rajaus.....	11
2.4	Luotettavuuden arviointi.....	13
<b>3</b>	<b>Lämpöpumppu lämmitysjärjestelmässä .....</b>	<b>13</b>
3.1	Lämmitystarpeen määräytyminen .....	14
3.1.1	Simulointiohjelmistot suunnittelun apuna.....	14
3.1.2	Ilmatieteenlaitoksen testisäätövuoden 2012 lämpötilojen käyttö energiankulutusvertailuissa .....	15
3.2	Lämpöpumpun toiminnan periaate .....	16
3.2.1	Peruskiertoprosessi .....	16
3.2.2	Lämpöpumpun lämpökerroin.....	17
3.2.3	Lauhduttimen merkitys .....	19
3.3	Haasteet Suomen ilmastossa .....	21
3.4	Lämpöpumpun mitoitus .....	24
3.4.1	Maalämpöpumpun mitoitus.....	24
3.4.2	Energiakaivojen mitoitus .....	25
3.4.3	Ilma-vesilämpöpumpun mitoitus .....	26
3.4.4	Lämmityksen säätökäyrän merkitys lämpöpumpun hyötysuhteen kannalta .....	26
3.5	Lämpöpumpun kytkentä kaukolämpöön .....	27
3.6	Lämmitysverkoston lämmönjako .....	30
3.6.1	Radiaattorit.....	31

	2
3.6.2	Lämmityspaneelit ..... 32
3.6.3	Ilmalämmitys ..... 33
3.6.4	Verkoston lämpötilatason vaikutus putkikokoon ..... 34
<b>4</b>	<b>Elinkaarikustannuslaskelmien muuttujat, määrittäminen ja laskeminen ..... 34</b>
4.1	Rakennustyytit ja niiden lähtötiedot ..... 36
4.2	Lämmityksen tuntitehojen määrittely lämpöpumpputarkasteluihin ..... 37
4.3	Maalämpöpumpun tuoman säästön laskeminen ..... 38
4.3.1	Maalämpöpumpun tehomitoitus ..... 39
4.3.2	Maalämpöpumpun COPin määrittäminen ..... 40
4.3.3	Maalämpöpumpun kokonaissähkötehon laskeminen ..... 41
4.4	Ilma-vesilämpöpumpun säästön laskeminen ..... 43
4.4.1	Ilma-vesilämpöpumpun tehomitoitus ..... 43
4.4.2	Ilma-vesilämpöpumpun COPin määrittäminen ..... 45
4.4.3	Vesi-ilmalämpöpumpun kokonaissähkötehon laskeminen ..... 47
4.5	Investointikustannukset ..... 47
4.5.1	Radiaattorit ..... 48
4.5.2	Lämmityspaneelit ..... 50
4.5.3	Ilmalämmitys ..... 51
4.5.4	Putkistokustannukset ..... 52
4.5.5	Lämpöpumput ..... 54
4.5.6	Lämpökaivot ..... 54
4.6	Optimointityökalun luominen ..... 55
<b>5</b>	<b>Tulokset ..... 56</b>
5.1	Kustannustehokkain lämpötilataso ..... 56
5.1.1	Putkikustannusten vaikutus tuloksiin ..... 58
5.1.2	Lämmönjaon laitteiden vaikutus tuloksiin ..... 58
5.1.3	Energiakustannussäästöt ..... 59
5.1.4	Maalämpökaivokustannukset ..... 59
5.2	Lämpöpumppujen vuosihyötysuhteet ..... 60
5.3	Muita huomioita ..... 62

<b>6</b>	<b>Johtopäätökset ja tulosten pohdintaa .....</b>	<b>63</b>
6.1	Luotettavuuden tarkastelu .....	64
6.2	Optimointityökalun käytön rajoitukset ja jatkokehitys.....	66
6.3	Vähähiilisyystavoitteet ja optimointitulos .....	67
	<b>Lähteet .....</b>	<b>69</b>
	<b>Liitteet .....</b>	<b>73</b>
	Liite 1. Coolpack-ohjelmalla tehty lämpökertoimen laskentaesimerkki .....	73
	Liite 2. Putkikustannukset.....	74
	Liite 3. Asuinkerrostalo, välituloksia .....	75
	Liite 4. Toimistorakennus, välituloksia .....	76
	Liite 5. Opetusrakennus, välituloksia .....	77
	Liite 6. Kauppakeskus, välituloksia .....	78
	Liite 7. Optimointilaskurin ulkoasu esimerkkilähtötietovalinnoin .....	79

## Kuviot

Kuvio 1. Rakennetun ympäristön kokonaishiilijalanjäljen 2017 jakautuminen merkittävimpiin päästölähteisiin .....	6
Kuvio 2. Riuska-ohjelman simulointiesimerkki neuvotteluhuoneen lämpökuormien jakautumisesta yhden vuorokauden aikana .....	15
Kuvio 3. Lämpöpumppukoneiston toimintaperiaate ja teoreettinen kylmätekninen kiertoprosessi log p,h tilapiirroksena .....	17
Kuvio 4. Lauhduttimen lämmönsiirron toiminta ja lämpötilat R407C kylmäaine 20	
Kuvio 5. Kylmäaineiden R32 ja R410A toiminta-rajat ja niiden ylitysten aiheuttamat ongelmat scroll-kompressorin tapauksessa .....	22
Kuvio 6. Lämpöpumpun (kompressorin) toimintaa parantavia kylmäainekierron kytkentöjä .....	23
Kuvio 7. Esimerkki väliruiskutuksen vaikutuksesta kylmäaineen R32 toiminta-alueen kasvattamiseen scroll-kompressorin tapauksessa, kun väliruiskutuksen osuutta kompressoriin kasvatetaan peruskylmäainekiertoon (No injection) verrattuna .....	23

Kuvio 8. Rinnakkaislämmön kytkentä tilojen lämmitykseen.....	27
Kuvio 9. Omaenergian liittäminen kaukolämpösiirtimien väliin rakennuksen lämpimän käyttöveden valmistuksessa.....	28
Kuvio 10. Kytkentäesimerkki. Lämpöpumpun tuottaman lämpimän käyttöveden kytkeminen rinnan kaukolämpöön.....	29
Kuvio 11. Esimerkkikytkentä maalämmöstä kaukolämmön rinnalla .....	30
Kuvio 12. Radiaattorin rakenne .....	31
Kuvio 13. Lämmitys- ja jäähdytyspaneeli tilan katossa .....	32
Kuvio 14. Ilmanvaihtokoneen lämmönsiirrin eli lämmityspatteri.....	33
Kuvio 15. Tyyppirakennusten vuotuiset lämmitysenergiat (kWh/m <sup>2</sup> ).....	37
Kuvio 16. Asuinkerrostalo, maalämpöpumpun osatehomitoituksen periaate ....	39
Kuvio 17. Kokonaisenergioiden pysyvyyssäyrät rakennustyypeittäin, sisältävät lämpimän käyttöveden kierron .....	40
Kuvio 18. Työssä käytyt lämpökertoimien arvot maalämpöpumpulle .....	41
Kuvio 19. Maalämpöpumpun lämpökertoimen vaihtelun laskentaan käytetyt ulkolämpötilan kompensointikäyrät eri lämmitysveden lämpötilatasoilla.....	42
Kuvio 20. Testisäätävien ulkolämpötilojen lukumäärät eri lämpötilaluokittain, muokattu aineistosta .....	43
Kuvio 21. Ilma-vesilämpöpumpun tietojen laskennassa käytetyn esimerkkilaitteen lämmitystehtävien käyttäytyminen ulkolämpötilan mukaan eri menoveden lämpötiloilla.....	44
Kuvio 22. Ilma-vesilämpöpumpun tietojen laskennassa tarvittujen lämmitystehtävien käyttäytyminen ulkolämpötilan mukaan käytetyn esimerkkilaitteen tietoihin perustuen .....	44
Kuvio 23. Ilma-vesilämpöpumpun tietojen laskennassa käytetyn esimerkkilaitteen lämpökertoimien käyttäytyminen ulkolämpötilan mukaan....	46
Kuvio 24. Ilma-vesilämpöpumpun lämpökertoimien käyttäytyminen ulkolämpötilan mukaan perustuen esimerkkilaitteen tietoihin.....	46
Kuvio 25. Radiaattorin pituuden vaikutus lämmönluovutustehoon .....	49
Kuvio 26. Radiaattoreiden neliökohtaiset hinnat rakennustyypeittäin eri lämpötilatasoilla .....	50
Kuvio 27. Lämmityspaneelien neliökohtaiset hinnat rakennustyypeittäin eri lämpötilatasoilla .....	51

Kuvio 28. Ilmanvaihdon lämmityspatterin neliökohtaiset hinnat rakennustyypeittäin eri lämpötilatasoilla.....	52
Kuvio 29. Investoinnit ja kannattavuus esimerkkivalinnoin asuinkerrostalossa (Ei K1-mukainen kytkentä).....	57
Kuvio 30. Investoinnit ja kannattavuus esimerkkivalinnoin toimistorakennuksessa (Ei K1-mukainen kytkentä) .....	57
Kuvio 31. Maalämpöpumpun vuosihyötysuhteet (Ei K1-mukainen LKV-kytkentä) .....	61
Kuvio 32. Ilma-vesilämpöpumpun vuosihyötysuhteet (Ei K1-mukainen LKV- kytkentä) .....	61

## Taulukot

Taulukko 1. Ulkoilmalämpöpumppujen vuosihyötysuhteita.....	19
Taulukko 2. Maalämpöpumppujen vuosihyötysuhteita.....	19
Taulukko 3. Tarkasteltavien lämpötilatasojen lämpimän käyttöveden (min +8 °C, max +58 °C) teho-osuudet käyttöveden lämmityksen kokonaistehosta kahdella eri kaukolämmön kytkentävaihtoehdolla.....	38
Taulukko 4. Tilalämmitystehot rakennustyypeittäin .....	47
Taulukko 5. Työssä käytetyt maalämpöpumpun toisiopuolen ja lämmitysverkostojen lämpötilaerot .....	48
Taulukko 6. Esimerkki työssä käytettyjen asuinkerrostalon radiaattorihintojen määräytymisestä eri verkostojen lämpötiloilla .....	49
Taulukko 7. MagiCAD:illa määritetyt putkikoot vertailulämpötiloille eri lämmitystehoilla .....	52
Taulukko 8. Putkikustannusten laskentaan määritellyt hintakertoimet .....	54

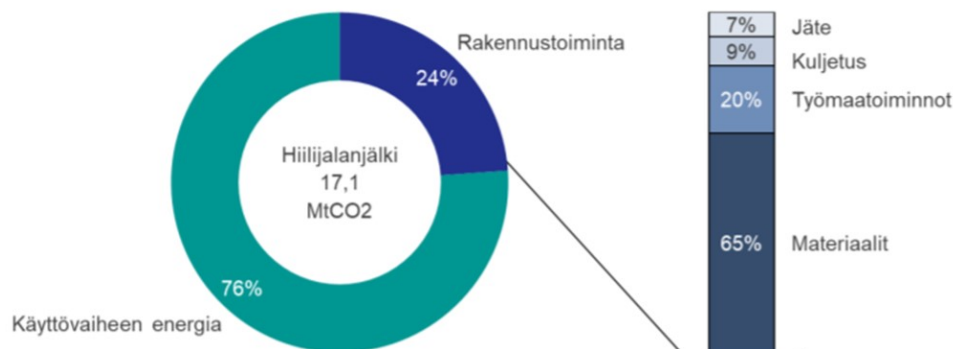


# 1 Johdanto

## 1.1 Rakentamisen tavoitteet hiilineutraaliuden näkökulmasta

Suomen pyrkimykset hiilineutraaliuteen vuoteen 2035 mennessä vaativat yrityksiltä sekä pakollisia että vapaaehtoisia toimintoja tavoitteiden saavuttamiseksi (Ilmasto- ja energiastrategia 2020). Muiden toimialojen ohella myös Rakennusteollisuus on julkaissut yhdessä sidosryhmien ja ympäristöministeriön kanssa tiekartan vähähiilisyteen (Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 2020). Kuviossa 1 on esitetty käyttövaiheen energian ja rakennustoiminnanaikaisen hiilijalanjäljen jakautuminen rakennustussa ympäristössä.

Rakennusteollisuuden tiekartan mukaan erityishuomiota kiinnitetään jatkossa erityisesti rakennuksen käyttövaiheen energiankulutuksen vähentämiseen. Rakennuksien energiatehokkuutta pyritään parantamaan pienentämällä lämpöhäviöitä, tehostamalla sähkönkäyttöä ja ottamalla käyttöön vähäpäästöisiä energianlähteitä ja ilmaisenergiaa esimerkiksi lämpöpumppujen avulla. (Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 2020, 16–17.)



Kuvio 1. Rakennetun ympäristön kokonaishiilijalanjäljen 2017 jakautuminen merkittävimpiin päästölähteisiin (Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 2020, 16)

Esimerkiksi asuinrakennusten osalta tilalämmityksen osuus on lähes 70 % kaikesta kulutuksesta (Asumisen energiankulutus 2019, 10). Tilalämmityksen osuus muissa

kuin asuinrakennuksissa on tätäkin suurempi vähäisemmän lämpimän käyttövedenkulutuksen vuoksi. Julkisten rakennusten on täytynyt asetusten mukaan täyttää lähes nollaenergiarakentamisen vaatimukset jo vuodesta 2019. Edelleen vuoden 2021 alusta voimaan tuleva EU-direktiivi vaatii lähes nollaenergiarakentamista kaikilta uusilta rakennuksilta, kuitenkin niin, että rakentaminen olisi kustannustehokasta ja rakennusten terveellisyys ja turvallisuus saadaan teknisesti turvattua. (Lähes nollaenergiarakennus n.d.)

Jo tällä hetkellä rakennusten suunnittelun tärkeimmät lähtökohdat ovat sisäilmasto-vaatimukset ja energiatehokkuus, joiden kohdalla uudisrakennusten täytyy täyttää käyttötarkoitustensa mukaiset minimivaatimukset (A 1010/2017, 4 §; A 1009/2017, 3 §, 8 §). Energiatehokkuuden kannalta nämä molemmat lähtökohdat mainitaan ympäristöministeriön julkaisemassa Energiatodistusoppaassa (2018, 18). Sen mukaan energiansäästöpotentiaalia täytyy pystyä hyödyntämään kustannustehokkaasti niin, ettei sisäilman laatu kärsi. Myös Sandberg (2014, 13–14) painottaa ilmanlaadun hyvää hallintaa kustannussäästöjen ja ilmaston lämpenemisen hillitsemisen ohella.

### 1.1.1 Lämpöpumppujen käytön lisääminen

Rakennuskohteiden varhaisissa hankesuunnitelmissa otetaan jo hyvin usein huomioon mahdollisten lämpöpumppujärjestelmien käyttö. Lämpöpumput yhdistetään helposti pientalokäyttöön, mutta niiden asennus on yleistynyt viime vuosina myös suuremmissa lämmitysteholuokissa (SULPU ry n.d.). Ilmaista lämpöä maasta, ilmasta ja hukkalämmöstä, esimerkiksi ilmanvaihdon poistoilmasta ja jätevedestä, halutaan korvaamaan kallista ostoenergiaa pientalojen ohella muun muassa kerrostalokohdeissa, toimistorakennuksissa ja sairaaloissa.

Tähän kannustavat osin asetukset ja julkinen ohjaus (A 1010/2017; Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 2020), mutta toisaalta myös energian hintojen epävarmat tulevaisuuden kehitysnäkymät. Esimerkiksi sähkön hinta on noussut pitkällä aikavälillä (Energian hinnat 2020, 8), mutta toisaalta markkinoiden epävarmuutta kuvaa hyvin uutinen vuoden 2020 korona-virusepidemian vaikutuksesta energianhintojen, myös sähkön hinnan, nopeaan laskuun (Korona romahdutti energian hinnan 2020).

### 1.1.2 Materiaalien tehokas käyttö

Kuvion 1 mukaisesti materiaalien osuus on toinen merkittävä hiilijalanjäljen aiheuttaja rakennustoiminnan aikana. Rakentamisen aiheuttaman hiilijalanjäljen tarkastelu sisältää myös kiertotalousajattelun mukaiset näkemykset erilaisten tuotteiden elinkaaresta kestäväen kehityksen mukaisesti. Rakennusmateriaalien hankkimisesta, valmistamisesta, kuljettamisesta ja käytöstä poistamisesta aiheutunutta hiilijalanjälkeä voidaan pienentää oikeilla materiaalivalinnoilla ja menekkiä pienentämällä. Tätä voidaan toteuttaa käytännössä huolellisella suunnittelulla, jolloin kasvatetaan myös materiaalitehokkuutta. (Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 2020, 16.)

### 1.1.3 Kustannustehokkuus

Hiilijalanjäljen pienentämisen keinot ovat osin viranomaistaholta säädetyjä, mutta niiden tarkoitus ei ole haitata esimerkiksi yritysten kilpailukykyä. Ne antavat yrityksille suuntaviivat, joiden avulla voidaan jo rakennuksen suunnitteluvaiheessa arvioida, mitkä muuttujat vaikuttavat rakennuksen ja sen osatoimintojen elinkaarien aikaisiin kustannuksiin. Energiatehokkuussäädösten, yleisen kiertotalousajattelun ja materiaalitehokkuuden avulla voidaan saavuttaa positiivisia konkreettisia talousvaikutuksia (Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 2020, 16). On kuitenkin mietittävä, ovatko suunnitteilla olevat yksittäiset ratkaisut kokonaistaloudellisesti kannattavia ja toiminta kustannustehokasta, koska rakentamisen tulisi olla toimijasta riippuen myös tuottavaa liiketoimintaa.

## 1.2 Toimeksianto

Toimeksiantajana opinnäytetyölle toimi Sweco Talotekniikka oy, joka on osa kansainvälistä Sweco-konsernia. Sweco on Euroopan alueella toimiva rakennetun ympäristön ja teollisuuden asiantuntijayritys, joka tarjoaa asiakkaille monenlaisia suunnittelu- ja konsultointipalveluja. Yrityksen liikevaihto oli noin 2 mrd. vuonna 2019. Suomessa työskentelee yhteensä noin 2 400 asiantuntijaa, joista 300 talotekniikan parissa.

Erilaisten elinkaarikustannuslaskelmien tekeminen on Sweco:lla arkipäiväistä toimintaa. Esimerkiksi lämpöpumppuinvestoinneista on tapana tehdä laskelmat kannattavuudesta lämpöpumpun käytön tuoman säästön ja laite- sekä asennuskustannuksen perusteella. Taustalla ovat lämmöntuotannon tapauksessa usein valmiit suunnitelmat tai päätökset rakennuksen lämmitysverkoston rakenteesta, lämpötilatasoista ja esimerkiksi lämmönjakotavoista sekä -laitteista. Näin lämpöpumppuinvestoinnin kustannusvaikutukset riippuvat valmiiksi päätetystä suunnitteluarvoista.

Lämpöpumpun käytön kannalta mahdollisimman alhaisen menoveden lämpötilatason tuottaminen on taloudellisesti kannattavaa (Ketola, Lairi, Laulumaa & Nieminen 2017, 52; Hakala & Kaappola 2013, 230–231). Kuitenkin lämpötilatasojen madaltuessa, kasvavat lämmönjakoverkoston putkikoko ja tilojen päätelaitteiden koot. Tällöin lämmitysverkoston investointikustannukset kasvavat ja voivat alkaa pienentää energiankustannussäästöjen taloudellista hyötyä. Matala menoveden lämpötilan tavoittelu, mikä on lämpöpumpun käytön kannalta kustannustehokkainta ja aiheuttaa eniten energiansäästöä, ei siis välttämättä ole kokonaistaloudellisesti kannattavaa.

Työn toimeksiantajalla oli tarve selvittää käsitystä siitä, onko lämpöpumpulla tuotettava mahdollisimman matala lämmitysverkoston menoveden lämpötilataso aina kustannustehokkain vaihtoehto tarkasteltaessa lämmitysjärjestelmän elinkaaren aikaisia kustannuksia. Kustannustehokkaimman lämpötilatason selvittämiseksi ei ole ollut tarjolla sopivia välineitä tai arviointimenetelmiä, eikä tutkimustietoa aihepiiristä juuri löydy.

Toimeksiantona oli pyrkiä selvittämään neljän erityyppisen suuren kokoluokan uudisrakennuksen tapauksessa kustannustehokkain menoveden lämpötilataso lämmitysverkostossa. Lämmitysenergia tuotettaisiin pääosin lämpöpumpuilla ja tarvittava lisäenergia kaukolämmöllä. Lämmönjaon tapojen vaihtoehtoiksi haluttiin vesikiertoiset radiaattorit, lämmityspaneelit ja ilmalämmitys. Työkalun antamia tuloksia voitaisiin jatkossa käyttää perusteluna asiakkaalle siitä, millainen järjestelmä olisi elinkaaren kannalta kannattavaa suunnitella tulevaan rakennukseen.

## 2 Tutkimusasetelma

### 2.1 Työn tavoite

Tavoitteena oli toimeksiannon mukaisesti kartoittaa eri rakennustyypeille ja valituille lämmönjaon järjestelmille kustannustehokkain lämmitysverkoston menoveden lämpötilataso. Jotta tavoite saavutettaisiin, tuli tehtäväksi etsiä optimaalisinta elinkaarikustannusta vastaava lämpötila, kun muuttujina kokonaisuudessa olivat lämpöpumpun tuomat taloudelliset säästöt, lämmönjakoputkiston investointikustannukset ja lämmönjaon päätelaitteiden investointikustannukset. Optimoidun lämpötilan tuli ilmetä havainnollisesti ja selkeästi tutkimusprosessin tuotoksesta. Tärkein tutkimuskysymys oli:

Mihin lämpötilatasoon verkoston lämpötila kannattaa lämpöpumpulla nostaa, jotta lämmitysjärjestelmään investoiminen tilalaitteineen olisi elinkaarikustannusten kannalta järkevintä?

Tavoitteena oli siis myös suunnitella sujuvasti toimiva ja helppokäyttöinen työkalu, jolla tutkimusongelma ratkaistaan ja optimaalinen lämpötila saadaan selvitettyä. Tutkimuksen tavoitteita määriteltäessä oli vielä epävarmaa, millaisiin tuloksiin työ johtaa. Tästä huolimatta voitiin työn sisältämän lämpöpumppujen energialaskennan perusteella asettaa tavoitteeksi saada kiinnostavia oheistuloksia esimerkiksi lämpöpumppujen hyötysuhteisiin liittyen.

### 2.2 Tutkimusote

Työ tehtiin kehittämistutkimuksena, ja apuna käytettiin sekä kvalitatiivisia että kvantitatiivisia menetelmiä. Kattavaa tietoa tutkimuksen tekemisestä ja sen eri vaiheista saatiin Kanasen julkaisuista (2015 ja 2019). Kvantitatiivinen lähestymistapa sisälsi suuren määrän numeerista tietoa, sen käsittelyä, matemaattista analysointia, laskentaa sekä monipuolista ongelmanratkaisua. Eksaktien arvojen kautta päästiin yhdistämään usean eri lähteen tietoja, ja sitä kautta tulokseksi saatiin tavoitteena ollut haluttu konkreettisen työkalun numeerinen perusta. Työssä käytettiin useiden eri toimi-

joiden ja laitevalmistajien valmiita laskentaohjelmia mm. lämpöpumppujen lämpökertoimien ja tilalaittekokojen määrittämiseen. Varsinaista laskenta-aineistoa käsiteltiin ja analysoitiin Excel-ohjelmalla.

Jotta työssä pystyttiin etenemään, oli tarpeen soveltaa myös kvantitatiivista menetelmää aihepiiriin ja asiakokonaisuuden hahmottamiseen ja yksityiskohtien ymmärtämiseen. Kaikkia työn vaatimia tietoja ei saatu hankittua lähdekirjallisuudesta tai muista dokumenteista. Täytyi kartoittaa ja koota kokemuksen tuomaa ”hiljaista tietoa”, työtä tukevaa aineistoa ja dokumentteja konsultoiden alalla työskenteleviä asiantuntijoita, kollegoita, laitevalmistajia ja laitetoimittajia. Tällä tavoin voitiin myös arvioida työn eri vaiheiden ja välitulosten luotettavuutta, mikä osaltaan helpotti siirtymistä opinnäytetyössä eteenpäin.

### 2.3 Työssä tarkasteltavat muuttujat ja työn rajaus

Työn tekeminen sisälsi paljon numeerisen aineiston käsittelyä ja erilaisia työvaiheita. Oli tehtävä rajoituksia ja oletuksia, jottei laskurin laskenta kävisi liian raskaaksi ja toisaalta työn fyysinen määrä ylittänyt käytössä olevia ajallisia resursseja. Rajaaminen tehtiin niin, että tulokset olisivat mahdollisimman luotettavat ja yleistettävissä ja sallisivat eri lämpötilatasojen vertailun.

Tarkastelun kohteena olleiksi rakennustyypeiksi valikoituivat:

- asuinkerrostalo
- toimistorakennus
- opetusrakennus
- kauppakeskus

Eri rakennustyypeistä saadut tiedot perustuivat työn tekemisen ajankohtana suunnitella oleviin uudisrakennuksiin säävyöhykkeellä 1. Saneerauskohteiden voidaan olettaa soveltuvan lopullisessa laskurissa käytettäväksi, mikäli koko lämmitysverkosto ja -

päätelaitteet uusittaisiin ja energiatehokkuutta parannettaisiin vastaamaan uudisrakennusten vaatimuksia.

Lämpöpumpputyypeistä laskennassa olivat mukana:

- maalämpöpumppu
- ilma-vesilämpöpumppu

Maalämmön osalta huomioitiin myös energiakaivot ja arvioitiin karkeasti porauskustannukset. Maalämpökentän jäähtymistä vuosien mittaan tai liuospiirin lämpötilojen vuodenaikaisvaihtelua ei otettu tarkastelussa huomioon.

Lämmitysverkoston lämmönjaon tavoiksi valikoituivat:

- vesikiertoinen radiaattorilämmitys
- vesikiertoinen säteilypaneelilämmitys
- vesikiertoinen ilmalämmitys (IV-lämmityspatteri)

Vaikka vesikiertoinen lattialämmitysjärjestelmä on mielletty sopivaksi lämpöpumppujärjestelmiin, jätettiin se tarkastelun ulkopuolelle. Järjestelmän suunnittelulämpötilat ovat jo valmiiksi alhaisia, joten tarkastelu korkeammilla lämpötilatasoilla ei olisi ollut tämän työn tavoitteen kannalta oleellista.

Lämpimän käyttöveden valmistuksessa lämpöpumppujen tulistuslämmön osuutta ei laskennassa erikseen tarkasteltu eikä hyödynnetty. Käyttöveden kiertojohdon vaatima lämmitysenergia ja -teho jätetään työssä huomioimatta lämpöpumppulaskennan osalta, vaikka sen osuus lämmitysenergiasta saattaakin olla huomattava. Koska legionellabakteerin lisääntymisen estämiseksi lämpötilatason täytyy olla jatkuvasti vähintään yli +55 °C, tämä vaatii lämpöpumpulta jatkuvaa korkeaa lämpötilatuottoa, mikä ei ole tämän tutkimuksen kannalta järkevää. Kiertojohdon energiankulutus otetaan tässä työssä kuitenkin huomioon lämmityksen kokonaisenergiakustannuksissa.

Putkiverkoston, päätelaitteiden ja ilmanvaihdon pattereiden investointikustannukset on laskettu vain tilalämmitystehoon perustuen. Asennuskustannukset on huomioitu vain putkiverkoston osalta, koska putkikokojen kasvaessa (lämpötilatason laskiessa) myös asennuskustannukset kasvavat. Muuten oletetaan sekä asennus- että huoltokustannusten olevan lämpötilatasoista riippumatta vakiot, joten niitä ei oteta kustannuslaskennassa huomioon.

Lämmönjakojärjestelmien lämpöenergiähäviöitä ei otettu laskennassa huomioon.

## 2.4 Luotettavuuden arviointi

Koska työssä jouduttiin tekemään rajauksia ja useita yksinkertaistuksia, täytyi tutkimuksen luotettavuuteen kiinnittää erityistä huomiota. Työn eri vaiheissa pyrittiin esimerkiksi etsimään lähteistä viitearvoja, joihin aineistoa vertailtiin. Lisäksi alan ammattilaisten näkemyksiä ja kollegoiden kokemusta hyödynnettiin menetelmien soveltuvuuden ja välitulosten arvioinnissa. Tärkeimpiä tulosten luotettavuuteen liittyviä tarkasteltavia asioita olivat mm. lähtötietoaineistojen soveltuvuus, laskentamenetelmät, lämpöpumppujen lämpökertoimien määrittäminen ja laskenta sekä energian hintojen vaihtelu kohteittain.

## 3 Lämpöpumppu lämmitysjärjestelmässä

Useimmiten lämpöpumppuja käytetään hybridijärjestelmissä, joissa on mukana useampi kuin yksi lämmönlähde. Vaikka lämpöpumppu olisi mitoitettu täysteholle eli kattamaan kaiken lämmitysenergian tarpeen, on mietittävä, tarvitaanko mahdollisesti jokin varalämmönlähde laitteen rikkoutuessa.

Rakennuksen lämpöpumppuhybridijärjestelmä koostuu karkeasti yhdestä tai useammasta lämpöpumpusta, lisälämmönlähteestä, mahdollisista lämmönvaraajasäiliöistä ja lämmönjakelun verkostoista. Lämmönjakeluverkostot kuljettavat lämmön haluttuihin kohteisiin, kuten tiloihin, ilmanvaihdon lämmitykseen, käyttöveden lämmitykseen



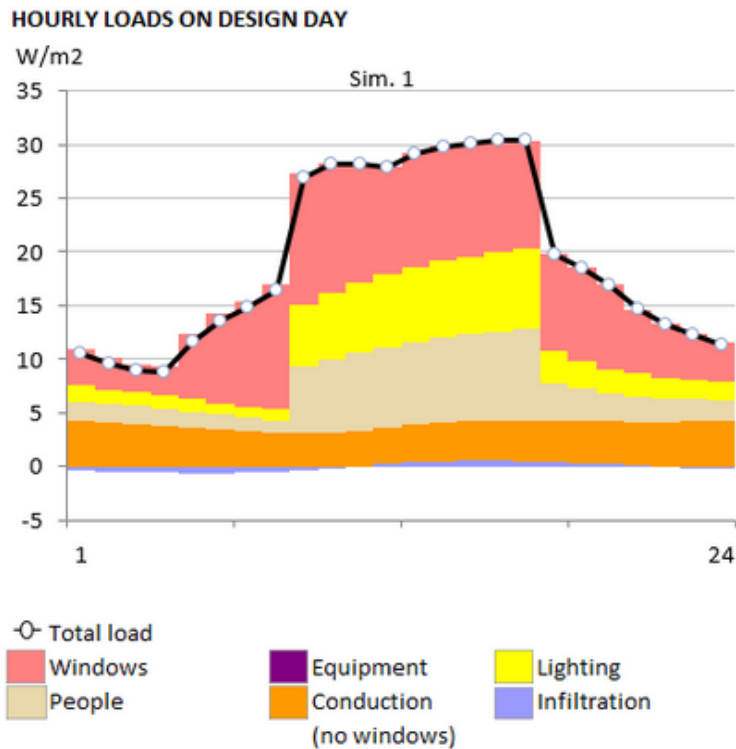
tai piha-alueen sulanapitoon. Järjestelmä sisältää varsinaisen putkiverkoston lisäksi esimerkiksi tarvittavan määrän kiertovesipumppuja ja erilaisia venttiilejä. Viimeisenä lämmitysjärjestelmässä ovat lämmönjaon päätelaitteet tai lämmönluovuttimet, kuten lattialämmitysputkisto ja erilaiset lämpöpatterit. (Ketola ym. 2017, 46–56).

### 3.1 Lämmitystarpeen määräytyminen

Huolimatta siitä, millä tavoin rakennuksen lämpö tuotetaan, täytyy lämmitysjärjestelmää suunniteltaessa tietää tai laskea kohteen lämpöhäviöt, niitä kompensoivat sisäiset lämpökuormat ja lisäksi lämpimän käyttöveden tarpeen suuruus (RakMK-103174 2018, 17–27; Sandberg 2014, 13). Suunnittelua ohjaavat etenkin uudisrakennusten kohdalla asetukset ja ohjeet esimerkiksi energiatehokkuudesta, ilmanvaihdon suunnitteluarvoista ja sisäilmastosta (A 1010/2017; A 1009/2017; RT 07-11299, 4–9). Lämmitystehontarpeiden suuruudet lasketaan kyseessä olevan säävyöhykkeen mitoitettavan ulkolämpötilan mukaan.

#### 3.1.1 Simulointiohjelmistot suunnittelun apuna

Rakennusten lämmitystehontarvetta ja energian kulutuksia voidaan nykyisin arvioida simuloiden esimerkiksi IDA ICE-ohjelmalla ja Riuska-simulointityökalulla (IDA ICE n.d.; Riuska n.d.). Etenkin uudisrakennusten osalta mallinnus voi olla ainoa keino saada viitettä tulevista energiakustannuksista. Ohjelmat ottavat huomioon energiatehokkuusasetuksen (A 1010/2017) käyttötarkoitukseluokituksen mukaiset lähtöarvot, kuten sisäilmasto-olosuhteet, ilmanvaihdon ilmamäärät ja sisälämpötilat. Muuttujina voivat olla esimerkiksi rakennuksen käyttötarkoitus, käyttöajat, sisäiset lämpökuormat ihmisistä, valaistuksesta ja sähkölaitteista, lämpimän käyttöveden kulutus, rakennuksen maantieteellinen sijainti, rakenneratkaisut ja rakenteiden U-arvot. Kuviossa 2 on esitetty Riuska-ohjelman esittelysivuston esimerkki sisäisten lämpökuormien merkityksestä lämmitystehontarpeen kannalta eli neuvotteluhuoneen lämpökuormien jakauma yhden vuorokauden aikana (Riuska n.d.).



Kuvio 2. Riuska-ohjelman simulointiesimerkki neuvotteluhuoneen lämpökuormien jakautumisesta yhden vuorokauden aikana (Riuska n.d.)

### 3.1.2 Ilmatieteenlaitoksen testisäävuoden 2012 lämpötilojen käyttö energiankulutusvertailuissa

Ilmatieteenlaitoksen testivuoden 2012 tuntiset lämpötilatiedot on koottu kuvaamaan Suomen nykyilmastoa neljällä eri säävyöhykkeellä, ja niitä voidaan käyttää apuna rakennusten energiankulutustarkasteluissa ja -vertailuissa (Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa n.d.). Kyseisen sääaineiston valitsemisen perusteita selittävän raportin mukaan (Jylhä, Kalamees, Tietäväinen, Ruosteenoja, Jokisalo, Hyvönen, Ilomets, Saku & Hutila 2011, 60) dataa ei ole tarkoitettu rakennusten lämmitystehtöjen mitoittamiseen. Aineisto sopii kuitenkin hyvin esimerkiksi ilma-vesilämpöpumpun ulkolämpötilasta riippuvan lämpökertoimen määrittämiseen sekä lämmityksen tuntitehtöjen määrittelyyn energiansimulointiohjelmistoissa.

## 3.2 Lämpöpumpun toiminnan periaate

Lämpöpumpun toiminta perustuu kylmätekniikkaan ja kylmäaineen suljettuun kiertoprosessiin, jossa lämpöä siirretään alemmalta lämpötilatasolta korkeampiin lämpötiloihin. Tämä on mahdollista toisaalta mm. kylmäaineen lämmönsiirto-ominaisuuksien ja toisaalta kiertoprosessiin tuodun energian eli kompressorin syötetyn sähköenergian avulla (Kaappola, Hirvelä, Jokela & Kianta 2018, 17).

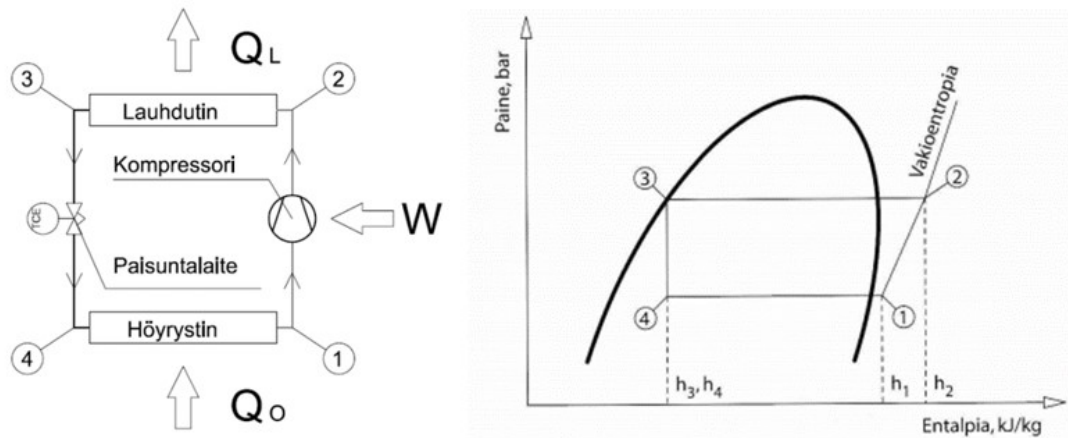
Aiheesta on saatavilla paljon kansainvälistä tutkimustietoa, kuten eri kylmäaineiden ja teknisten ratkaisujen vaikutuksesta laitteen toimintaan (Minghong, Baolong, Xianting, Wenxing & Leping 2015, Hwang, Xu, Radermacher & Pham 2012.; Wang, Ye & Cao 2018). Kotimaisia painettuja teoksia lämpöpumpun toiminnasta on muutamia (Aalto, Alijoki, Hakala, Hirvelä, Kaappola, Mentula & Seinelä 2012; Hakala & Kaappola 2013; Kaappola ym. 2018).

### 3.2.1 Peruskiertoprosessi

Kuviossa 4 vasemmalla on kuvattu lämpöpumpun peruskiertoprosessi tärkeimpine pääkomponentteineen ja oikealla vastaava prosessi esitettynä log p,h-tilapiirroksena, joka on tärkeä apuväline tarkasteltaessa yksilöllisiä kylmäaineen toimintapisteitä olomuodon muutoksissa.

Tärkeimmät lämpöpumpun pääkomponentit ovat höyrystin, kompressori, lauhdutin ja paisuntalaite. Höyrystimen tehtävä on sitoa lämpöä ympäristöstä, esimerkiksi suoraan ilmasta tai vaihtoehtoisesti maahan sijoitetusta lämmönkeruun liuospiiristä. Tällöin kylmäaine on matalassa paineessa ja lämpötilassa. Ympäristön lämpö saa kylmäaineen höyrystymään samalla, kun se virtaa kohti kompressorin imuputkea (ks. kuvio 3, kohta 1). Kylläinen tai usein hieman tulistunut höyry imetään kompressorin, jossa se puristetaan korkeampaan paineeseen (ks. kuvio 3, kohta 2). Samalla tulistuneen kylmäaineen lämpötila nousee maksimiinsa. Kuumakaasu alkaa jäähtyä lauhduttimen paineessa, kunnes se saavuttaa kylläisen höyryn pisteen ja alkaa lauhtua. Kun kaikki kylmäaine on lauhtunut nesteeksi (ks. kuvio 3, kohta 3), kulkee se seuraavaksi paisuntalaitteen läpi, jolloin paine alenee, lämpötila laskee, ja tämä höyryn ja nesteen seos

(Kuvio 3, kohta 4) virtaa takaisin höyrystimelle keräämään lämpöä ympäristöstä. (Hakala & Kaappola 2013, 12; Kaappola ym. 2018, 50.)



Kuvio 3. Lämpöpumppukoneiston toimintaperiaate ja teoreettinen kylmätekninen kiertoprosessi log p,h tilapiirroksena (Hakala & Kaappola 2013, 10, 12)

### 3.2.2 Lämpöpumpun lämpökerroin

Koska lämpöpumppuprosessi toimii sähköenergiaa kuluttavan kompressorin avulla, on laitteen hyötysuhdetta haluttu kuvata omalla suurellaan. Dimensioton lämpökerroin on määritelty esimerkiksi kaavan 1 mukaan seuraavasti (Hakala & Kaappola 2013, 10, 230):

$$\varphi = \frac{Q_L}{W} \quad (1)$$

jossa  $\varphi$  on lämpökerroin,  $Q_L$  on lauhduttimen luovuttama lämpö ja  $W$  on kompressorin tekemä työ. Hyötysuhteesta käytetään myös yleisesti lyhennettä COP (Coefficient Of Performance).

Mitä suurempi on laitteen lämpökertoimen arvo, sitä pienemmällä kompressoriin syötetyllä ostoenergiämäärällä saadaan ilmaisenergiaa lämmitykseen hyödyksi. Toisaalta lämmityksen lämpötilatasojen suhteen voidaan todeta lämpökertoimen olevan

sitä paremman, mitä matalammalla lämpötilatasolla lämpöpumppu lämmön luovuttaa. 1 K korkeampi lauhtumislämpötila huonontaa lämpökerrointa noin 3 %. (Hakala & Kaappola 2013, 217, 230-231.)

Lämpökertoimella on siis suora vaikutus laitteen käytön sähköenergiakustannuksiin. Tämän vuoksi on tarpeen muistaa, että COP kuvaa vain hetkellistä tilannetta. Lämpöpumppuvalmistajat ilmoittavat laitteen lämpökertoimen toimintapisteet usein +7 °C lämpötilassa muutamalla lämmitysverkoston menoveden lämpötila-arvolla. Toimintapisteet kuitenkin vaihtelevat esimerkiksi menoveden lämpötila lämmityksen säätökäyrän mukaan tai ilma-vesilämpöpumpun tapauksessa ulkolämpötilan mukaan. Lämpökerroin ei ole koko vuoden ympäri vakio. Tämän vuoksi on määritelty vuosi-lämpökerroin SPF (Seasonal Performance Factor), joka kuvaa lämpöpumpun vuosienenergiantuoton suhdetta vuoden aikana kuluneeseen kompressorin sähköenergiankulutukseen. SPF-luvussa otetaan huomioon myös lämpimän käyttöveden osuus. (RT RakMK-103174 2018, 52.) Nykyisin yleistynyttä lämmityskauden lämpökerrointa SCOP (Seasonal Coefficient of Performance) käytetään myös samassa tarkoituksessa, mutta lähinnä tilojen lämmityksen yhteydessä. Käyttöveden lämmitys voidaan energiatarkeiluissa laskea siihen erikseen mukaan.

Taulukoissa 1 ja 2 esitetään Suomen rakennusmääräyskokoelman esittämät arviot vuosihyötysuhteista eri lämpöpumpputyypeille, kun määritellään lämpöpumppujen sähköenergiankulutus rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskentaa varten. Nähdään, että eteläisimmässä Suomessa ilma-vesilämpöpumpun SPF:t ovat keskimäärin 0,5 pienemmät kuin maalämmöllä. Edelleen lämpimän käyttöveden tuoton hyötysuhde jää vastaavasti tilojen lämmitystä pienemmäksi.

Taulukko 1. Ulkoilmalämpöpumppujen vuosihyötysuhteita (RT RakMK-103174 2018, 55)

Ulkoilmalämpöpumput: menoveden korkein lämpötila, °C	SPF-luku		
	Säävyöhykkeet		
	I-II	III	IV
Ilma-ilma	2,8	2,8	2,7
Ilma-vesi (tilojen lämmitys)			
30	2,8	2,8	2,7
40	2,5	2,5	2,4
50	2,3	2,3	2,2
60	2,2	2,1	2,0
Ilma-vesi (käyttöveden lämmitys)			
60	1,8	1,6	1,3

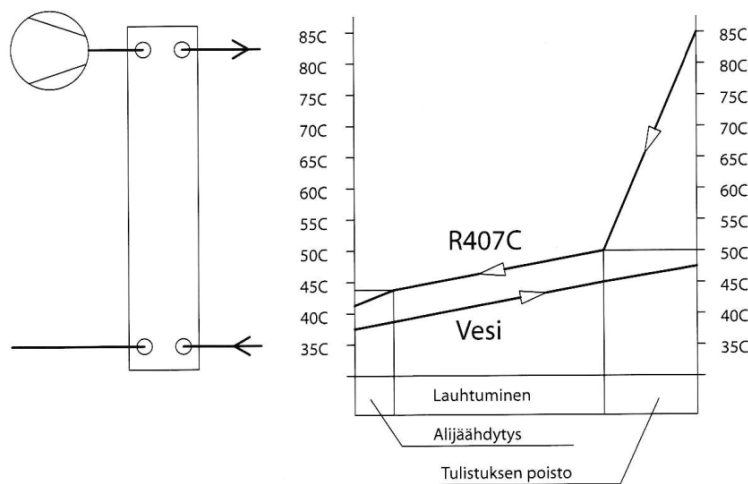
Taulukko 2. Maalämpöpumppujen vuosihyötysuhteita (RT RakMK-103174 2018, 55)

Maalämpöpumput: menoveden korkein lämpötila, °C	SPF-luku	
	Vuotuinen keruupiirin pa- luunesteen keskilämpötila, °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

### 3.2.3 Lauhduttimen merkitys

Lauhduttimen tehtävä lämpöpumpun toiminnan kannalta on poistaa kylmäainekierrosta se lämpömäärä, mikä lämmönlähteestä kylmäaineeseen on sitoutunut. Mikäli ympäristö tai esimerkiksi lämmitysjärjestelmässä kiertävä vesi ei pysty jäähdyttämään ja lauhduttamaan kylmäainetta takaisin kylläiseksi nesteeksi, häiriintyy lämpöpumpun toiminta ja se pysähtyy. Tämän vuoksi on tärkeä ymmärtää lauhdutuslämmönsiirtimien mitoituksen perusteita ja rajoituksia, kun lämpöpumppujärjestelmää suunnitellaan.

Kuviossa 4 on esitetty kuinka kylmäaineen ja jäädyttävän nesteen (veden) lämpötilat käyttäytyvät ristivirtasiirtimessä. Kyseisellä kylmäaineella lauhtumislämpötila ei ole vakio. Periaate on joka tapauksessa, että lauhtumismelle tulevan veden on oltava hieman lauhtumislämpötilaa kylmempää. Edelleen vesi voi lämmentä lauhtumislämpötilaa korkeammaksi kylmäaineen korkean tulistuslämpötilan vuoksi. Tärkeä huomio on, että lämpökerroin ei pienene, vaikka tulistuslämpöä käytettäisiin hyväksi veden lämmittämiseen.



Kuvio 4. Lauhduttimen lämmönsiirron toiminta ja lämpötilat R407C kylmäaine (Hakala & Kaappola 2013, 233)

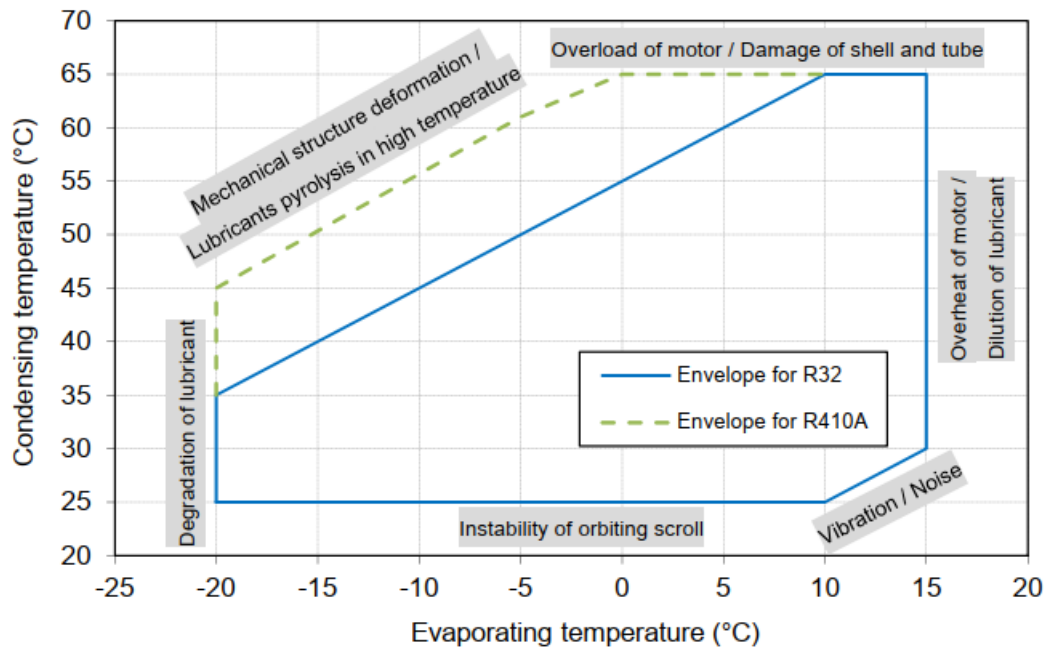
Mikäli lämpöpumpulla halutaan lämmittää sekä tiloja että käyttövettä, voidaan laitteeseen mitoittaa erikseen alijäähdetyssiirrin, lauhdutuslämmönsiirrin ja tulistuslämmönsiirrin. Tilat lämmitetään lauhdutuslämmöllä, käyttövesi esilämmitetään alijäädytyksellä ja nostetaan suositusten mukaiselle lämpötilatasolle tulistuslämmöllä. Ongelmaksi muodostuu lähinnä tulistuslämmön pieni osuus. Kylmäaineesta riippuen se on noin 10–20 % (Hakala & Kaappola 2013, 217) lauhduttimen kokonaistehosta. Matalilla lauhtumislämpötiloilla tulustusteho ei välttämättä riitä tilalämmityksen ohella hetkellisten suurien käyttövesimäärien lämmittämiseen.

### 3.3 Haasteet Suomen ilmastossa

Lämpöpumpun tehokkaaseen toimintaan lämmitysjärjestelmässä vaikuttavat monet asiat. Tekniikan kannalta ongelmaksi muodostuvat esimerkiksi jokaisen käytettävän kylmäaineen yksilölliset vaikutukset mm. lämpökertoimeen, toimintapaineisiin, puristustilämpötilaan ja tulistustilämmön osuuteen (Hakala & Kaappola 2013, 217, 233; Kianta 2018, Kylmäaineet 3). Tämä asettaa niiden käytölle haasteita laitteiston toimivuuden sekä halutun lämmöntuoton suhteen etenkin tulevaisuudessa, kun voimakkaiksi kasvihuonekaasuiksi luokiteltuja aineita, korvataan asteittain ympäristö- ja ilmastoystävällisemmällä vaihtoehdoilla (EU A 517/2014).

Kuviossa 5 on esitetty kylmäaineiden R410A ja R32 toimintarajat ja niiden ylitysten aiheuttamat ongelmat nykyisin yleisesti käytetyn scroll-kompressorin tapauksessa. Nähdään, että höyrystymislämpötilan (vaaka-akseli) laskeessa laskee myös lauhtumislämpötila (pystyakseli) voimakkaasti toimintarajan tullessa vastaan jo  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :ssa. Esimerkiksi ilma-vesilämpöpumpun tapauksessa juuri nämä tekijät rajoittavat mm. lämpöpumpulta saatavaa lämmitysveden lämpötilatasoa ja tehontuottoa kylmässä ilmastossa.



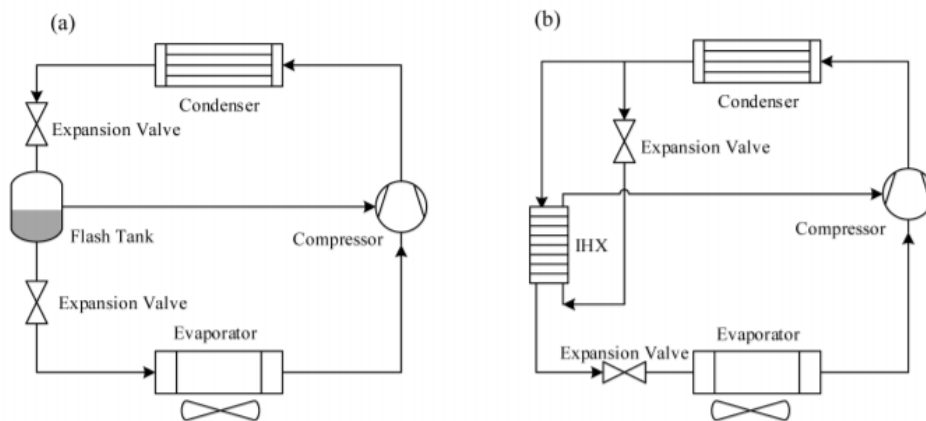


Kuvio 5. Kylmäaineiden R32 ja R410A toiminta-rajat ja niiden ylitysten aiheuttamat ongelmat scroll-kompressorin tapauksessa (Minghong ym. 2015, liitekuvio 5)

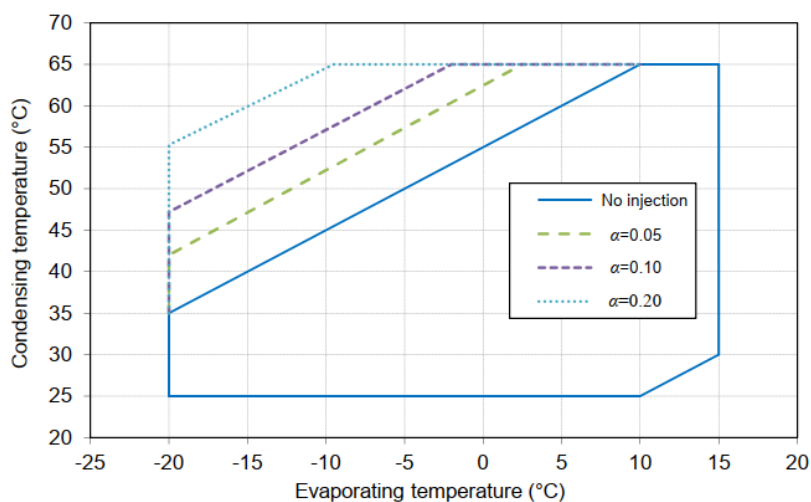
Kuviossa 3 esitetty kylmäainekierron peruseriaate on sama maalämpöpumpulla ja ilma-vesilämpöpumpulla. Ilma-vesilämmössä erona on kuitenkin höyrystimen lämmönlähteen eli ulkoilman lämpötilan vaihtelu vuodenajan mukaan, kun maalämmön tapauksessa liuospiirin keskilämpötila muuttuu vain muutamia asteita vuoden aikana. Ulkolämpötilan vaihtelu aiheuttaa höyrystimen lämpötilan ja paineen vaihteluja ja siten haasteita ilma-vesilämpöpumpun toiminnalle. Yritettäessä tuottaa lämpöpumpulla korkeaa lämpötilatasoa matalissa ulkolämpötiloissa kasvavat lauhdutinpaineen ja höyrystinpaineen suhde sekä samalla kompressorilta vaadittu puristustyö. Myös kuumakaasun lämpötila nousee korkeaksi. Tietyissä pisteissä kompressorin ja myös paisuntaventtiilin toimintarajat tulevat vastaan. (Aalto ym. 2012, 77)

Useissa tutkimuksissa on todettu, että erilaisten kylmäaineen välisyöttökentöjen käyttäminen lämpöpumpussa parantaa laitteen tehokkuutta, toimintavarmuutta ja lämpökerrointa (Hwang ym. 2012, 5–7; Minghong ym. 2015, 22; Wang ym. 2018, 7–8). Myös maalämpöpumpu voi sisältää koneikon toimintaa tehostavaa sisäistä tek-

niikkaa, mutta erityisesti ilma-vesilämpöpumppujen toiminnan kannalta edistykse-  
lliset tekniset ratkaisut ovat oleellisia. Kuviossa 6 on esitetty kaksi erilaista toimintape-  
riaatetta, joista b-kohdan sisäisen lämmönsiirtimen käyttö on yleistä tehokkaimmissa  
ilma-vesilämpöpumpuissa. Kuvio 7 nähdään, miten pystyakselilla esitettyä lauhtu-  
mislämpötilaa saadaan nostettua eri kylmäaineosuuksien väliruiskutuksilla. Näin on  
mahdollista nostaa lämpöpumpulla tuotettavaa lämpötilatasoa myös alimmilla ulko-  
lämpötiloilla.



Kuvio 6. Lämpöpumpun (kompressorin) toimintaa parantavia kylmäainekierron  
kytkentöjä (Wang ym. 2018, 2)



Kuvio 7. Esimerkki väliruiskutuksen vaikutuksesta kylmäaineen R32 toiminta-alueen  
kasvatamiseen scroll-kompressorin tapauksessa, kun väliruiskutuksen osuutta  
kompressorin kasvatetaan peruskylmäainekierto (No injection) verrattuna  
(Minghong ym. 2015, Liitekuvio 9)

### 3.4 Lämpöpumpun mitoitus

Varsinaisesta mitoituksesta ja käytännön kytkennöistä lämmitysjärjestelmiin löytyy luotettavaa tietoa lähinnä maalämmön osalta ja usein ainoastaan pienempiin rakennuskohteisiin. Virallisten lämpöpumppuoppaiden ja laskentaohjeiden (Esimerkki lämpöpumpun laskemisesta 2018; RT RakMK-103174. 2018; Juvonen & Lapinlampi, 2013; Motiva n.d.; LVI 11-10624 2018) lisäksi lukuisat lämpöpumppuvalmistajat ja -toimittajat kertovat verkkosivuillaan huomioon otettavia asioita lämpöpumppujen mitoituksesta ja käyttökohteista. Suurempien rakennusten osalta julkaisut perustuvat useimmiten opinnäytetöiden toimeksiantoihin.

Suomen ilmasto asettaa joitain rajoituksia lämpöpumppujen tehokkaalle käytölle. Tämä ilmenee erityisesti ilma-vesilämpöpumppujen kohdalla, kun niiden lämmön tuotto heikkenee lämpötilojen laskiessa ja loppuu kokonaan riippuen laitteesta noin -20 °C:en molemmin puolin. VTT on julkaissut ohjeet, kuinka ilmaston vaikutus huomioidaan lämpöpumppulaskennassa ja vuosihyötysuhteissa (Laitinen, Tuominen, Holopainen, Tuomaala, Jokisalo, Eskola & Siren 2014). Opinnäytetöistä voidaan mainita Järvisen (2018) tutkimus liittyen ilma-vesilämpöpumppujen mitoitukseen Suomessa. Näissä töissä oli käsitelty myös suuremman kokoluokan rakennuksia.

#### 3.4.1 Maalämpöpumpun mitoitus

Kun mitoitetaan rakennukseen maalämpöpumppua, tarvitaan suunniteltavan tai olemassa olevan kohteen lämmitysjärjestelmien teho- ja energiatarpeet tai vastaavasti toteutuneet arvot. Olennainen tieto on myös lämmitysverkostojen mitoituslämpötilat kyseessä olevalla säävyöhykkeellä. Käyttöveden osalta tarvitaan vedenkulutus-tieto ja ilmanvaihdosta tieto LTO-pattereiden limityksestä. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 22–23; LVI 11-10624 2018, 4.)

Maalämpöpumppu mitoitetaan täysteholle tai osateholle. Täystehomitoituksessa lämpöpumpun teho vastaa rakennuksen suurinta mitoitettua lämmitystehontarvetta ja laitteen tuotto pystyy vastaamaan rakennuksen lämmitystarpeeseen kovimmillakin pakkasilla. Laadukkaan invertteri-ohjatun eli kierrosnopeussäädetyt koneikon kanssa

kyseinen mitoitus on nykyisin mahdollinen. Yleisin mitoitustapa kuitenkin lienee osatehomitoitus, jossa lämpöpumpun tehoksi määritellään 50–60 % tarvittavasta kokonaislämmitystehosta. Tällä mitoituksella voidaan tuottaa jopa yli 90 % tarvittavasta lämmitysenergiasta vuoden aikana. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 31)

### 3.4.2 Energiakaivojen mitoitus

Energiakaivo-oppaan mukaan tärkeimmät energiakaivon mitoitukseen vaikuttavat seikat ovat (Juvonen & Lapinlampi 2013, 30):

- rakennuksen energiantarve
- maaperän ominaisuudet ja pohjavesiolosuhteet
- lämmönjakojärjestelmän lämpötilataso

LVI-kortin ohjeessa (LVI11-10624 2018) kerrotaan edellä mainittujen seikkojen lisäksi lämpöpumpun tehokkuuden vaikutuksesta lämpökaivojen tarpeeseen. Mitä parempi vuosihyötysuhde (SCOP) lämpöpumpulla on, sitä suurempi osuus lämmitystehontarpeesta otetaan maaperästä. Energiakaivojen mitoitus onkin syytä tehdä huolella, jotta ei käy niin, että väärin mitoitettu järjestelmä jäähdyttää kentän lämpökaivot muutaman vuoden käytön jälkeen. Näin voi käydä myös silloin, kun oletettua paremmalla hyötysuhteella tehokkaammin toimiva lämpöpumppu ottaakin maasta lämpökaivomitoitusta enemmän energiaa suhteessa käytettyyn kompressorin sähköenergi-  
aan. (LVI 11-10624 2018, 5–6.)

Kaivojen mitoituksessa voidaan käyttää apuna erilaisia nyrkkisääntöjä, lämpöpump-  
putoimittajien arvioita, laskentaohjelmia ja käytännössä tapahtuvaa testiporausta. Tämän kalleimman vaihtoehdon avulla voidaan tarkasti määritellä kaivoa ympäröivät vertikaaliset maakerrokset ja tehollinen, veden täyttämä syvyys.

Maalämpökaivosta saatava ilmaisenergian määrä vaihtelee suuresti riippuen mm. maalajeista, kosteudesta ja maantieteellisestä sijainnista, jolloin arvot voivat vaih-

della useita kymmeniä kilowattitunteja paikasta riippuen. Nyrkkisääntönä lämpökai-  
vosta hyödynnettävälle vuositason energiamäärälle eteläisimmässä Suomessa voi-  
daan pitää arvoa 100 kWh/m.

### 3.4.3 Ilma-vesilämpöpumpun mitoitus

Ilma-vesilämpöpumpun mitoitus perustuu samoin kuin maalämmöllä kohteen läm-  
mitysjärjestelmien tehon- ja energiantarpeisiin. Ilma-vesilämpöpumppujen nimelliste-  
hot laskevat huomattavasti kovilla pakkasilla, ja lisälämmityksen tarve on otettava  
huomioon. Koko lämmitystehontarpeelle eli täysteholle mitoitusta ei kannata tehdä,  
koska tuotto kasvaa nopeasti moninkertaiseksi lämpötilojen noustessa ja lämpöpum-  
pun investointikustannus on tällöin turhan suuri suhteessa kovimpien pakkasten ai-  
kaiseen energiankustannussäästöön. Kokemuksen mukaan nyrkkisäännöksi on vakiin-  
tunut noin 50 % osatehomittoitus lämmitystehontarpeesta ulkolämpötilassa -20 °C.

### 3.4.4 Lämmityksen säätökäyrän merkitys lämpöpumpun hyötysuhteen kannalta

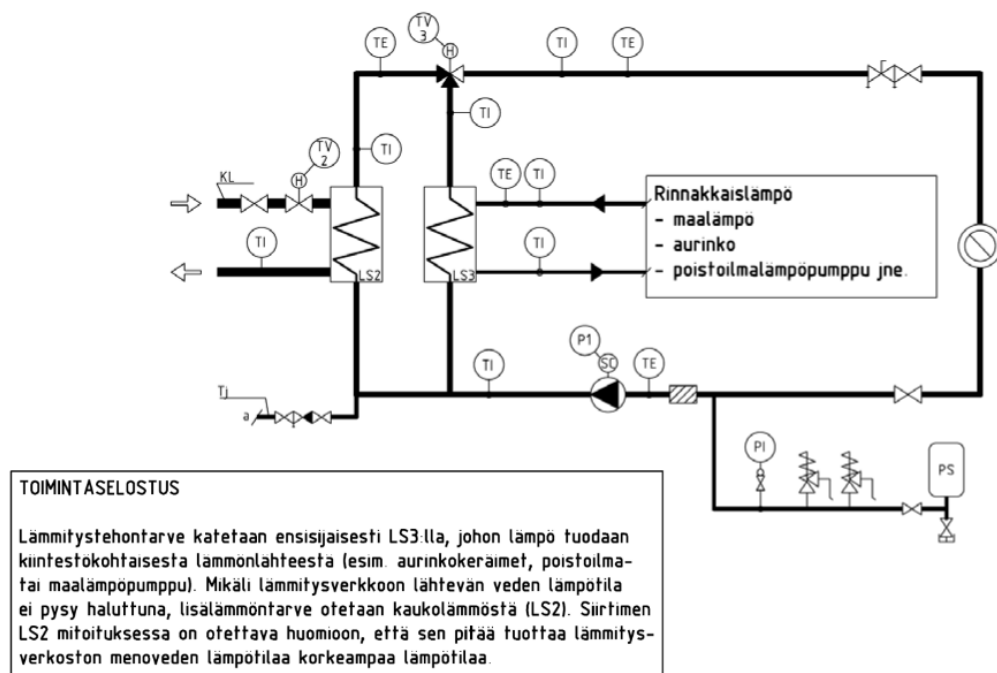
Rakennusten tila- ja IV-lämmitysten menoveden lämpötilat riippuvat ulkolämpöti-  
lasta. Verkoston mitoittavan ulkolämpötilan mukaan laskettua maksimilämpötilaa  
voidaan laskea sään lauhtuessa sitä mukaa, kun lämmitystehon tarve pienenee. Tämä  
riippuvuus on hyvin kohdekohtainen, ja uusissa hyvin eristetyissä taloissa vaihtelu voi  
olla vähäisempää kuin perinteisillä rakenneratkaisuilla. Yleensä ulkolämpötilakom-  
pensoinnin lineaarista suoraa voidaan käyttää lämmityksen säädöissä hyväksi riittä-  
väällä tarkkuudella.

Tilojen lämmitystehontarpeen ja samalla menoveden lämpötilan vaihtelu ulkolämpö-  
tilojen mukaan selittää, miksi tilalämmityksen ja käyttöveden lämmityksen vuosi-  
hyötysuhteet eriävät toisistaan (ks. taulukot 1 ja 2). Menoveden lämpötilan laskiessa  
tarvitaan lauhtuttimelta vähemmän lämpötehoa. Tällöin myös lauhtumislämpötila  
laskee eli lämpöpumpun lämpökerroin kasvaa. Samoin ei käy käyttöveden tapauk-  
sessa, kun läpi vuoden on pidettävä yllä samaa lämpötilatasoa.

### 3.5 Lämpöpumpun kytkentä kaukolämpöön

Kaukolämpöverkoston hyvä jäähtymä, eli mahdollisimman suuri ero kaukolämpöveden ensiöpuolen meno- ja paluulämpötilojen välillä, nostaa lämmöntuotantolaitosten hyötysuhdetta. Tämä on kaukolämpöyhtiöiden yksi tavoite, ja siihen on kiinnitettävä erityishuomiota, kun lämpöpumppu kytketään tuottamaan energiaa kaukolämpöverkon rinnalle.

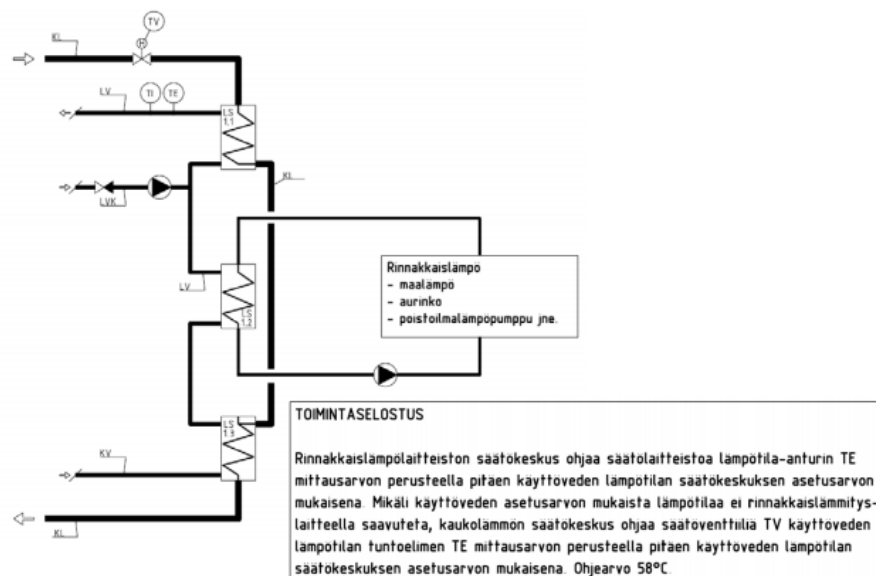
Suosituksia putkikytkentöihin on esitetty Energiateollisuuden 2013/K1-julkaisussa (Rakennusten kaukolämmitys 2014). Energiateollisuuden oppaasta ei ilmene erityisiä vaatimuksia esimerkiksi tilalämmityksen tai tuloilman lämmityksen kytkentöihin. Ne voidaan kytkeä rinnan kaukolämmönsiirtimien kanssa (ks. kuvio 8), jolloin lämpöpumpun tuottama energia saadaan kokonaisuudessaan hyödynnettyä lämmityksessä. Yleensä on kuitenkin hyvä selvittää, mikä on paikallisen kaukolämpöyhtiön kanta kytkentävaihtoehtoihin.



Kuvio 8. Rinnakkaislämmön kytkentä tilojen lämmitykseen (Rakennusten kaukolämmitys 2014, 89)

Lämpimän käyttöveden lämpötilan täytyy olla ympäristöministeriön asetuksen mukaan yli 55 °C koko järjestelmässä kiertojohto mukaan lukien. Vähintään tämä lämpötilataso täytyy saavuttaa joko lämpöpumpulta saatavalla energialla tai lisälämmitysjärjestelmän avulla. Korkeampia lämpötiloja kannattaa tuottaa lämpöpumpulla, mikäli laite on varustettu tulistuksen poistovaihtimella (Hakala & Kaappola 2013, 217).

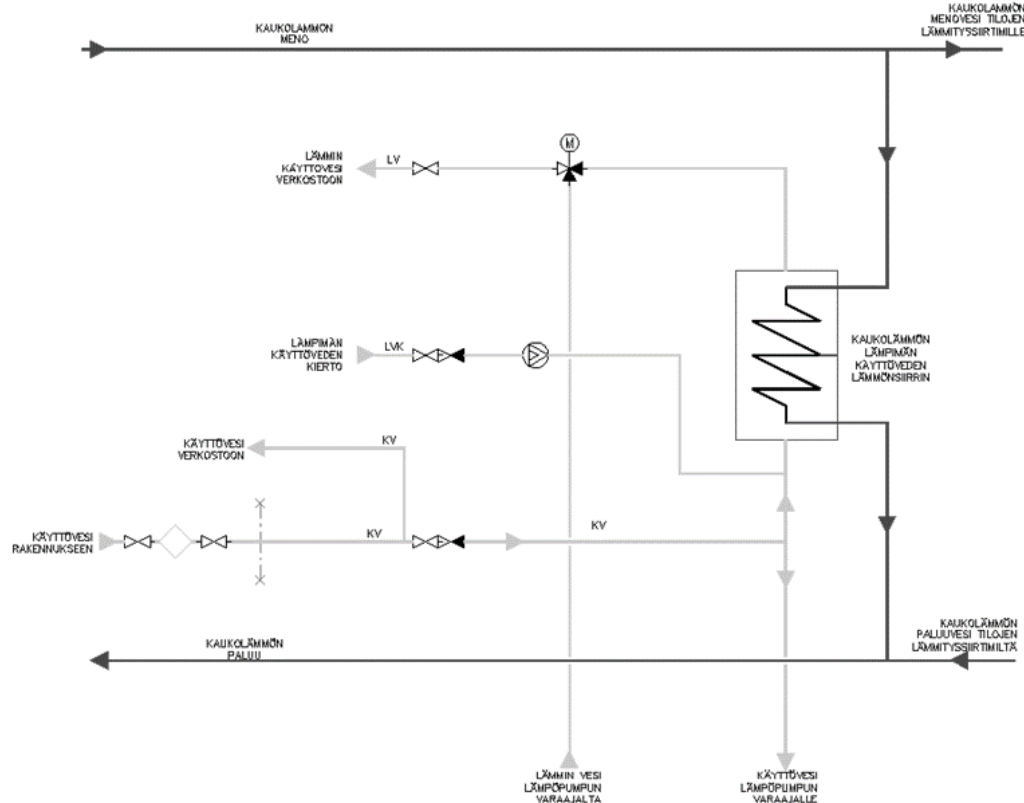
Lämpimän käyttöveden kytkentään on 2013/K1-oppaassa esitetty esimerkki. Rakennuksen omaenergianlähteen lämmönsiirrin kytketään yleensä kuvion 9 mukaisesti kahden kaukolämmönsiirtimen väliin riittävän kaukolämpöveden jäähtymän turvaamiseksi. Alimmalla esilämmityssiirtimellä on suuri merkitys kaukolämpöveden jäähtymään, kun ensiöpuolen paluuvettä voidaan tehokkaasti jäähdyttää esilämmittämällä kylmää käyttövettä. Tämä energiaosuus voi olla merkittävä ja silloin se on tietenkin pois lämpöpumpulla tuotettavasta energiasta.



Kuvio 9. Omaenergian liittäminen kaukolämpösiirtimien väliin rakennuksen lämpimän käyttöveden valmistuksessa (Rakennusten kaukolämmitys 2014, 89)

Myös muita kytkentöjä on mahdollista tehdä, mutta niistä täytyy neuvotella ja sopia kohdekohtaisesti energiayhtiöiden kanssa. Yksi yleistynyt kytkentätyyppi on kolmi-tieventtiilillä toteutettava rinnankytkentä kaukolämpöön. Esimerkkinä on esitetty ku-

vion 10 periaatekytkentä. Kytkenässä on mahdollista käyttää hyväksi kaikki lämpöpumpulta saatavissa oleva energia lämpimän käyttöveden verkostoon. Lämpimän käyttöveden kiertoveden lämmitys tehdään tässä kaavioesimerkissä kokonaan kaukolämmöllä.

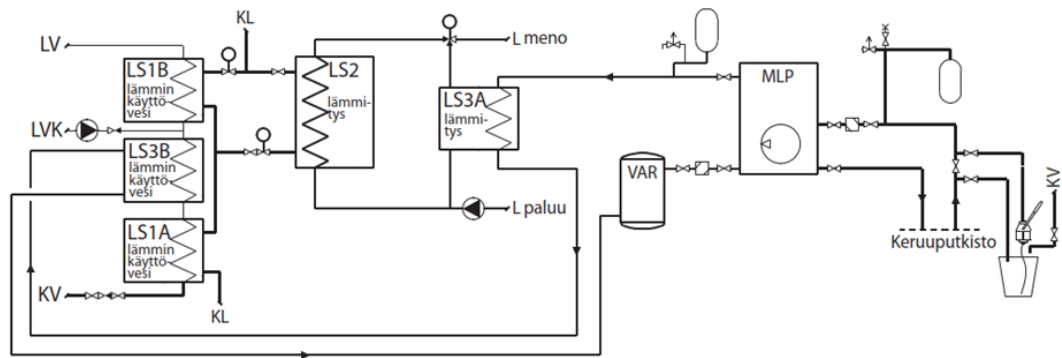


Kuvio 10. Kytkenäesimerkki. Lämpöpumpun tuottaman lämpimän käyttöveden kytkeminen rinnan kaukolämpöön (Swecon dokumentit)

Yleisenä ongelmana lämpimän käyttöveden tuottamisessa lämpöpumpulla kaukolämmön kanssa ovat säädön ongelmat. Ne johtuvat lämpöpumppujen korkean lämpötilatuoton teknisistä rajoituksista, nopeista lämmitystehontarpeen vaihteluista ja virtaamien muuttumisista. Erityisesti käyttöveden lämmityksen tapauksessa käytetäänkin varaajasäiliöitä tasaamaan nopeita lämpötilojen ja virtaamien vaihteluita sekä niiden epäsuotuisia vaikutuksia lämmitysjärjestelmässä (Rakennusten kaukolämmitys 2014, 82). Toinen syy varaajien käyttöön on lisäksi se, ettei käyttövettä saa suoraan kierrättää lämpöpumpun lauhduttimen kautta (Hakala & Kaappola 2013, 218).



Kuviossa 11 on esitetty vielä esimerkki sekä tilojen lämmityksen että lämpimän käyttöveden kaukolämmön lämpöpumppukytkenstä kokonaisuutena. Kyseessä on maalämpöpumpun kytkentä, mutta periaate ilma-vesilämpöpumpun tapauksessa on sama. Luotettavasti toimiva ja tehokas lämpöpumppujärjestelmä kaukolämpöön liitettynä on aina yksilöllinen kohdekohtainen ratkaisu, joten esitetyt kytkentäratkaisut eivät ole ainoita vaihtoehtoja.



Kuvio 11. Esimerkkikytkentä maalämmöstä kaukolämmön rinnalla (LVI 11-10624, 9).

### 3.6 Lämmitysverkoston lämmönjako

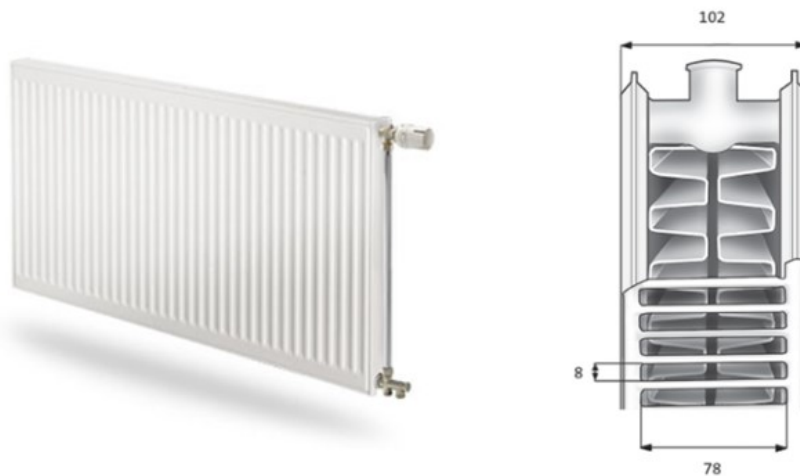
Lämpö jaetaan haluttuihin lämmityskohteisiin vesiputkia pitkin. Käytettyjä materiaaleja voivat olla esimerkiksi kupari, teräs, happidiffuusiopinnoitetut PEX-putket ja komposiittiputket. Kuparia ei juuri enää uusissa lämmitysratkaisuissa käytetä. (Ketola ym. 2017) Verkoston päälinjaan ovat yleensä rinnankytkettyinä esimerkiksi tilälämmitys ja ilmanvaihdon lämmityspatterit.

Lämmönjakojärjestelmiin liittyen hankesuunnitteluvaiheessa päätetään lämmönjaon päätelaitteet, jotka ovat tyypillisesti vesikiertoiset lattialämmityspotket, radiattorit tai ilmalämmityksen osalta ilmanvaihdon tulokanavaan mitoitettava lämmityspatterit. Etenkin toimistorakennuksissa ovat nykyisin suosittuja kattoon asennettavat säteilylämmityspaneelit, joihin voidaan halutessa yhdistää myös jäähdytyksen kylmän veden kierto.

Lämmitystehontarve on vuosien mittaan pienentynyt. Lämmitysverkoston lämpötilat ovat laskeneet perinteisten radiaattoripatteriverkostojen 70/40 °C lämpötiloista (meno-/paluuvesi), esimerkiksi kaukolämpöyhtiöiden nykyisin suosittelemaan 45/30 °C lämpötilatasoon. Ilmanvaihtokoneiden lämmityspatterit mitoitetaan esimerkiksi lämpötiloilla 40/20 °C tai 50/30 °C. Eryteisesti lattialämmityksen suosio on kasvanut, mutta myös muiden lämmönjaon päätelaitteiden valmistajat ovat tehneet tuotekehitystä matalalämpöverkkojen yleistyessä.

### 3.6.1 Radiaattorit

Radiaattorit luovuttavat lämmön tilaan sekä säteilemällä että johtumalla. Kuviossa 12 on esimerkkinä radiaattorimalli C22, joka koostuu kahdesta teräksisestä levystä ja konvektiolamellista. Radiaattorit luovuttavat niissä kiertävän veden lämmön pääasiassa säteilemällä ympäristöön. (Purmo n.d.)



Kuvio 12. Radiaattorin rakenne (Purmo n.d)

Radiaattoriverkoston tyypilliset menoveden mitoituslämpötilat ovat nykyisin 45–60 °C. Energiansäästötavoitteet suosivat lämmitysverkoston alempia lämpötilatasoja. Radiaattorin lämmönluovutusteho on huonompi matalilla lämpötiloilla, jolloin halutun tehon saavuttamiseksi, tulee laitteessa olla huomattavasti enemmän lämmönluovutuspinna-alaa verrattuna korkeampiin lämpötilatasoihin.

### 3.6.2 Lämmityspaneelit

Kattoon asennettavien lämmityspaneelien läpi virtaava vesi luovuttaa lämpönsä säteilemällä tilassa oleville pinnoille, jotka lämpenevät (ks. kuvio 13). Käytännön mitoituksessa on otettava huomioon, että paneeleilla saadaan helposti toteutettua sekä tilan jäähdytys sekä lämmitys. Yleensä esimerkiksi liike- ja toimistorakennuksissa lämmityspaneelit mitoitetaan jäähdytyksen tarpeisiin, jolloin lämmitystehosta saadaan samalla laitteella katettua vain noin puolet. Tästä poikkeuksena ovat asuinrakennukset, jotka mitoitetaan lämmityksen mukaan, jolloin lisätuna saadaan laitteesta riittävä teho myös tilojen viilennykseen.



Kuvio 13. Lämmitys- ja jäähdytyspaneeli tilan katossa (Itula n.d.)

Paneeleiden käytön hyviä puolia ovat esimerkiksi nopea reagointi lämmitystarpeen muutoksiin ja energiatehokkuutta parantavat matalat mitoituslämpötilat. Laitteen keskilämpötila saa olla suositusten mukaan alle 3 m huonekorkeuksilla vain +45 °C. Liian korkea paneelin lämpötila aiheuttaa säteilyepäsymmetriaa, joka tarkoittaa tässä tapauksessa liian suurta pystysuuntaista aistittavaa lämpötilaeroa tilassa. Menoveden maksimilämpötilasuositus on +55 °C. (Itula n.d.)

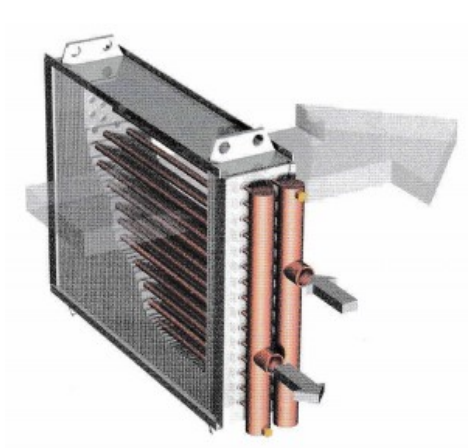
Huonoksi puoleksi paneelien käytölle hyvästä energiatehokkuudestaan huolimatta voidaan mainita niiden vaatima pieni meno- ja paluuvien lämpötilaero eli jäähtymä.

Se voi järjestelmän muiden verkostojen lämpötilatasoista riippuen vaikuttaa huonontavasti myös kaukolämmön jäähtymään.

### 3.6.3 Ilmalämmitys

Ilmalämmitys keksittiin jo öljykriisin jälkeen, mutta teknisen toteutuksen ongelmat, kuten äänieristyksestä tinkiminen, vähensi lämmitysmuodon suosion pitkäksi aikaa. Nykyisin ilmalämmitystä käytetään erityisesti suurta ilmanvaihtoa vaativissa kohteissa, kuten kauppakeskuksissa (Sandberg 2014, 116-117, 349).

Periaatteena on puhaltua lämmitettyä ilmaa ilmanvaihtokanaviston kautta tiloihin. Tyypillisesti tarvittava ilmamäärä on suurempi, kuin normaalin ilmanvaihdon tapauksessa. Ulkoilma lämpenee ennen lämmityspatteria IV-koneen lämmöntalteenottolaitteissa rakennuksesta poistettavan ilman lämmöllä. Loppulämmityksen lämmön talteenoton jälkeen haluttuun tilojen lämpötilaan hoitaa lämmityspatteri (Ekocoil N.d.), jossa lämmönsiirtoaineena on yleisimmin lämmitysverkoston vesi (ks. kuvio 13). Lämmityspatterin meno- ja paluuveden lämpötilat voivat olla lähes samat kuin radiaattiverkostossa, uudisrakennuksissa kaukolämmityksen yhteydessä maksimissaan 60/30. (Sandberg 2014, 117-118; Rakennusten kaukolämmitys 2014.)



Kuvio 14. Ilmanvaihtokoneen lämmönsiirrin eli lämmityspatteri (Sandberg 2014, 170)

### 3.6.4 Verkoston lämpötilatason vaikutus putkikokoon

Lämmitysverkoston putkikokoihin vaikuttaa lähinnä meno- ja paluueden välinen lämpötilaero. Kuten kaavasta 2 nähdään, ovat sekä virtaama että lämpötilaero suoraan verrannolliset lämmitystehoon.

$$Q_{\text{LÄMMITYS}} = q * c_p * \rho * \Delta T \quad (2)$$

missä  $Q_{\text{LÄMMITYS}}$  on lämmitysteho,  $q$  on veden virtaama,  $c_p$  on veden ominaislämpökapasiteetti,  $\rho$  on veden tiheys ja  $\Delta T$  on meno- ja paluueden lämpötilojen erotus.

Käytännössä tämä tarkoittaa, että mikäli halutaan siirtää sama lämmitysteho esimerkiksi radiaattoriverkoston 45/30 °C meno-paluulämpötiloilla 50/30 °C -verkostoon verrattuna, joudutaan virtaamaa kasvattamaan. Tällöin on myös verkoston putkikoon kasvettava, vaikka käytännössä pieniä virtaaman vaihteluita voidaan säätää myös pumppauksen avulla.

## 4 Elinkaarikustannuslaskelmien muuttujat, määrittäminen ja laskeminen

Elinkaarikustannuksia laskemalla voidaan tarkastella, ovatko rakennukseen rakennettavilla järjestelmillä ja laitteilla saadut säästöt suuremmat kuin toteutukseen vaadittavat investointikustannukset. Jos tarjolla on useampi toteutusratkaisu, voidaan edelleen arvioida, mikä vaihtoehdoista on edullisin eli kannattavin (Pulakka, Heimonen, Junnonen & Vuolle 2007, 17).

Investointien kannattavuutta elinkaarikustannusten kannalta päädyttiin tarkastelemaan nykyarvomenetelmällä, jolloin muuttujia ovat kokonaisinvestointikustannukset ja lämpöpumpun käytöllä saavutettavat energiakustannussäästöt. Lisäksi sopiva tarkastelu-aika, diskonttaus korko ja energian hinnan nousun arvioitu korko otettiin huomioon. Koska suunnitellulla optimointilaskurilla oli tarkoitus vertailla ainoastaan tar-

kasteltavan rakennuskohteen lämmitysverkoston lämpötilojen keskinäistä kannattavuutta, voitiin investointikustannuksista jättää pois esimerkiksi huolto- ja asennuskustannukset sekä kaukolämmön liittymiskustannukset. Työssä päädyttiin kiinteään 20 vuoden tarkastelujaksoon, vaikka aika voi vaihdella järjestelmäkohtaisesti ollen esimerkiksi ilma-lämpöpumppujärjestelmissä noin 15 vuotta. Tarkastelujakson energiansäästön eli tuoton diskontattujen arvojen summasta vähennettiin kokonaisinvestoinnin arvo nykyarvon kannattavuuden kaavan 3 mukaan.

$$P = \sum_{k=1}^n \frac{T_k}{(1+i)^k} - I_0 \quad (3)$$

missä  $T_k$  on vuoden  $k$  tuotto vuoden  $n$  lopussa,  $I_0$  on alkuinvestointi ensimmäisen vuoden alussa ja  $i$  on laskentakorko. Kun  $P$  laskettiin jokaiselle tarkasteltavalle menoveden lämpötilatasolle, voitiin tarkastella, minkä lämpötilan tuotto oli suurin.

Optimointilaskurin lämpötilatasojen elinkaarikustannusvertailua varten lasketut investointikustannukset (€/m<sup>2</sup>) olivat:

- maalämpöpumppuinvestointi
- ilma-vesilämpöpumppuinvestointi
- maalämpökaivoinvestointi
- radiaattori-investointi
- lämmityspaneeli-investointi
- ilmvaihdon lämmityspatteri-investointi
- putkikustannusinvestointi

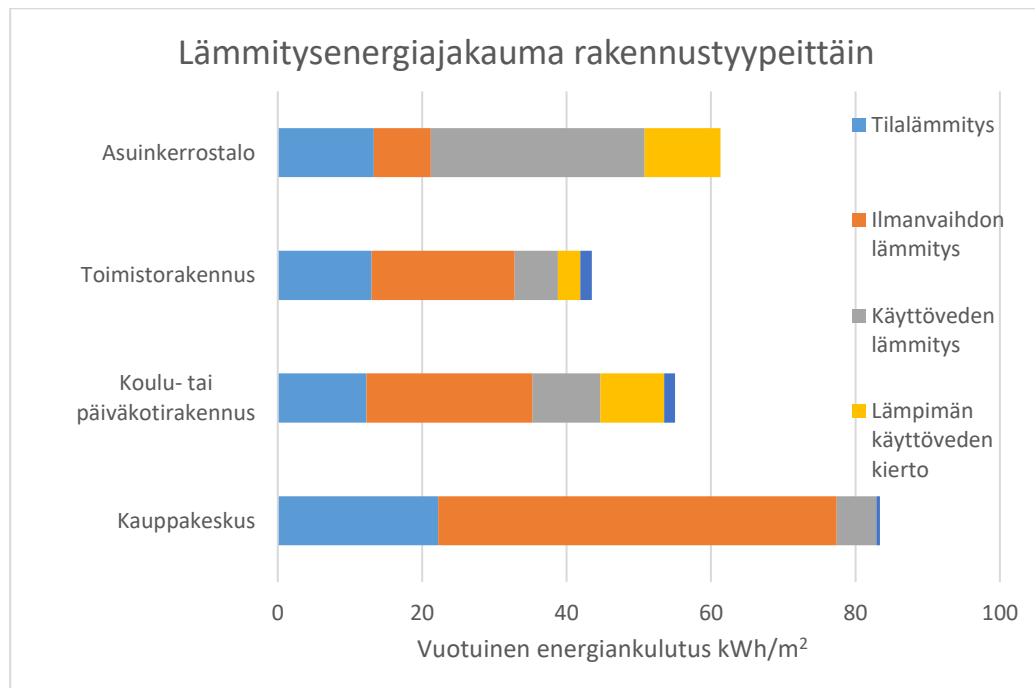
Tarvittava elinkaarenaikaisella lämpöpumpun käytöllä saavutettava säästö (€/m<sup>2</sup>) laskettiin vertailemalla kaukolämmön ja lämpöpumpun hybridiratkaisua pelkkään kaukolämpöratkaisuun. Lämpöpumpulla tuotetun ilmaisenergian osuudesta vähennettiin kompressorin sähköenergian osuus ja tämä erotus kerrottiin kaukolämmön hinnalla.

Koska lopulliseen optimointityökaluun tuli pystyä syöttämään rakennuksen pinta-ala, oli jokainen elinkaarikustannuslaskentaa varten tuleva muuttuja määriteltävä ne-  
liökohtaisena arvona.

#### 4.1 Rakennustyyppit ja niiden lähtötiedot

Eri rakennustyyppeihin liittyvä lähtöaineisto perustuu Sweco Talotekniikan omiin tietokantoihin ja projekteihin. Lämmitysteho- ja energijakaumatiedot ovat rakennuksille energiansimulointiohjelmilla (IDA ICE ja Riuska) laskennallisesti saatuja arvoja määräystenmukaisin suunnittelulähtötiedoin säävyöhykkeen 1 mitoitusulkolämpötilassa  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Rakennustyyppit edustavat nykyisten säädösten mukaisia energiatehokkaita uudisrakennuksia. Tuntitehojen laskennassa on otettu huomioon Ilmatieteen laitoksen testisäävuoden 2012 lämpötilat.

Koska sopivia rakennettuja kohteita tietoineen ei helposti löytynyt, päädyttiin suunnitteilla oleviin uudiskohteisiin, joille oli energiansimulointiohjelmien avulla määriteltä laskennalliset vuotuiset energiankulutukset ( $\text{kWh/m}^2$ ) ja lämmityksen tuntitehot lämmitettävää pinta-alayksikköä kohti ( $\text{W/m}^2$ ). Tiedot oli eritelty tilojen, ilmanvaihdon, oviverhokoneiden ja lämpimän käyttöveden valmistuksen sekä lämpimän käyttöveden kiertojohdon osalta erikseen. Jotta opinnäytetyön tulokset olisivat luotettavammin yleistettävissä, jätettiin rakennuksista pois kaikki projektikohtaiset erikoisratkaisut, kuten standarditasosta poikkeavat eristetasot, poikkeavat ilmastointiratkaisut, pihojen sulatuslämmitykset ja suuret serveritilat. Rakennustyyppien energiankulutusten jakaumat on esitetty kuviossa 15.



Kuvio 15. Tyyppirakennusten vuotuiset lämmitysenergiat (kWh/m<sup>2</sup>)

## 4.2 Lämmityksen tuntitehojen määrittely lämpöpumpputarkasteluihin

Lämmityksen osalta lämpöpumpun mitoitusstehon määrittämiseen ja energiakustannuslaskentaan huomioitiin tilalämmityksen, ilmanvaihdon lämmityksen, oviverhokoneiden ja käyttöveden lämmityksen tehojen osuudet jokaisella vaihtoehtoisella lämpötilatasolla. Oviverhokoneiden hintoja ei otettu mukaan kustannustarkasteluun.

Vaihtoehtoisiksi lämpötilatasoiksi valittiin viisi menoveden vertailulämpötilaa eli 40, 45, 50, 55 ja 60 °C. Kunkin tarkasteltavan lämpötilan tapauksessa laskettiin ensin yhteen mallilaskelmista saadut lämmitystarpeen tuntitehot, jotka olivat tilateho, ilmanvaihdon lämmityksen teho, oviverhokoneen lämmitysteho ja käyttöveden lämmityksen teho. Käyttövesi lämmitettiin vertailulämpötiloihin ja loppulämmitys 58 °C:een tehtiin kaukolämmöllä. Lämpimän käyttöveden kiertojohdon osuutta ei huomioitu teholaskelmissa, koska sen oletettiin lämpenevän suoraan kaukolämmöllä.



Käyttöveden lämmitystehoiksi ei voitu valita suoraan energianlaskentaohjelmistojen lähtöarvoja, koska vesi täytyi vielä lämmittää kultakin lämpötilatasolta määräysten mukaiseen loppulämpötilaan +58 °C. Vertailulaskelmissa haluttiin eritellä kaksi vaihtoehtoista kytkentää kaukolämpöön. Ensimmäinen oli Energiateollisuus ry:n suosittelema K1/2013:n mukainen kytkentä välisiirtimellä (ks. kuvio 9). Toisessa kytkennässä lämpöpumpun tuottaman lämpimän veden virtausta säädellään kolmitieventtiilin avulla ja kaukolämmönsiirrin voidaan ohittaa tarvittaessa kokonaan (ks. kuvio 10).

Kummassakin tapauksessa lähtökohta jokaisen lämpötilatason laskennalle oli simuloitu tuntinen käyttöveden lämmitysteho. Oletettiin, että käyttöveden lämmitys +8 °C:sta +58 °C:een vastaa 100 % energiasimuloinnin lämmitystehoa. Tällöin esimerkiksi veden lämmitys rinnankytkennän tapauksessa (Ei K1-mukainen kytkentä) lämpötilatasolle +45 °C vastaa 74 % käyttöveden lämmityksen kokonaistehosta. Taulukossa 3 on esitetty prosenttiosuudet, joiden mukaan lämpimän käyttöveden tuntitehojen osuudet kokonaistehosta laskettiin kullekin viidelle lämpötilatasolle. K1-mukaisessa kytkennässä oletetaan, että lämpöpumpun tuottamalla lämmöllä voidaan kaukolämmön välisiirtimessä lämmittää lämpötilaväli +33– +55 °C.

Taulukko 3. Tarkasteltavien lämpötilatasojen lämpimän käyttöveden (min +8 °C, max +58 °C) teho-osuudet käyttöveden lämmityksen kokonaistehosta kahdella eri kaukolämmön kytkentävaihtoehdolla

Lämpötilataso	Ei KL välisiirrintä (Ei K1-mukainen kytkentä)	KL välisiirrin (K1-mukainen kytkentä)
40	64 %	14 %
45	74 %	24 %
50	84 %	34 %
55	94 %	44 %
60	100 %	44 %

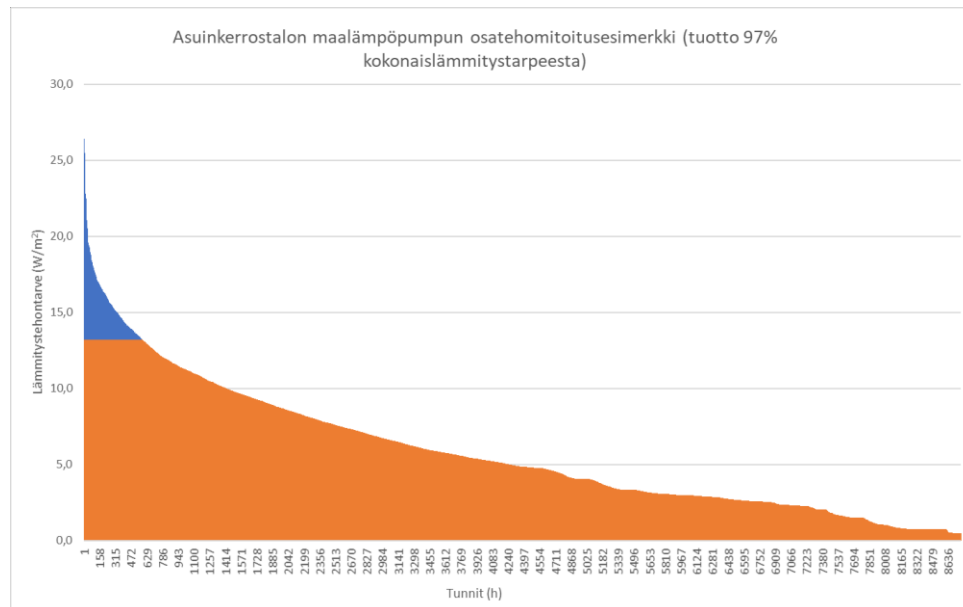
### 4.3 Maalämpöpumpun tuoman säästön laskeminen

Lämpöpumpun sähköenergiankulutus saatiin laskettua lämpöpumpun tehontuotosta määrittelemällä ensin laskennalliset lämpökertoimet kylmäprosessien tarkasteluun tarkoitetun ohjelman avulla. Elinkaarikustannuslaskelmissa tarvittu energiankustannussäästö laskettiin vähentämällä kaukolämmöllä lämmitettävästä lämpöpumpun

tuottoa vastaavasta kokonaisenergiakustannuksesta lämpöpumpun lisälämmityskustannuksen osuus (kaukolämmöllä) ja kompressorin sähköenergiakustannus.

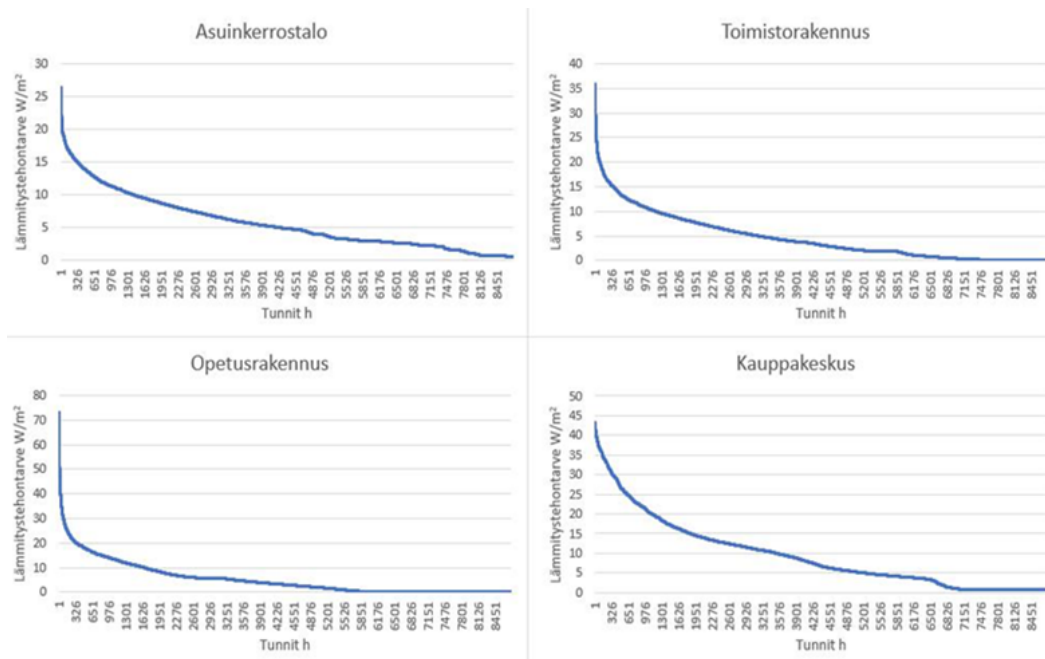
#### 4.3.1 Maalämpöpumpun tehomitoitus

Kun tarvittavan lämmitystarpeen kokonaistuntitehojen jakaumat koko vuodelle oli laskettu, määritettiin jokaiselle lämpötilatasolle yksinkertaisella pysyvyyssäätöarvella sopiva lämpöpumpun osatehomoitus ( $W/m^2$ ) ja edelleen tuotto. Mitoitus tapahtui Excel-ohjelmalla laskemalla siten, että määritettiin energianpeittoasteeksi kaikilla rakennustyypeillä ja lämpötilasoilla 97 %. Kuviossa 16 on esimerkki asuinkerrostalon osatehomoituksesta. Suurin osa vuoden lämmitysenergiasta (alaosa) tuotetaan lämpöpumpulla ja loput (yläosa) lisälämmöllä.



Kuvio 16. Asuinkerrostalo, maalämpöpumpun osatehomoituksen periaate

Kuten kuviosta 17 nähdään, vaihtelee huipunkäyttöaika eli suurimman lämmitystehontarpeen ajallinen osuus rakennustyypeittäin. Tämä vaikutti lämpöpumpun tehomitoitukseen niin, että esimerkiksi opetusrakennuksen laite oli tarpeen mitoittaa pienemmälle osateholle kuin asuinkerrostalon lämpöpumppu, jotta haluttu energiankattavuus saavutettiin.



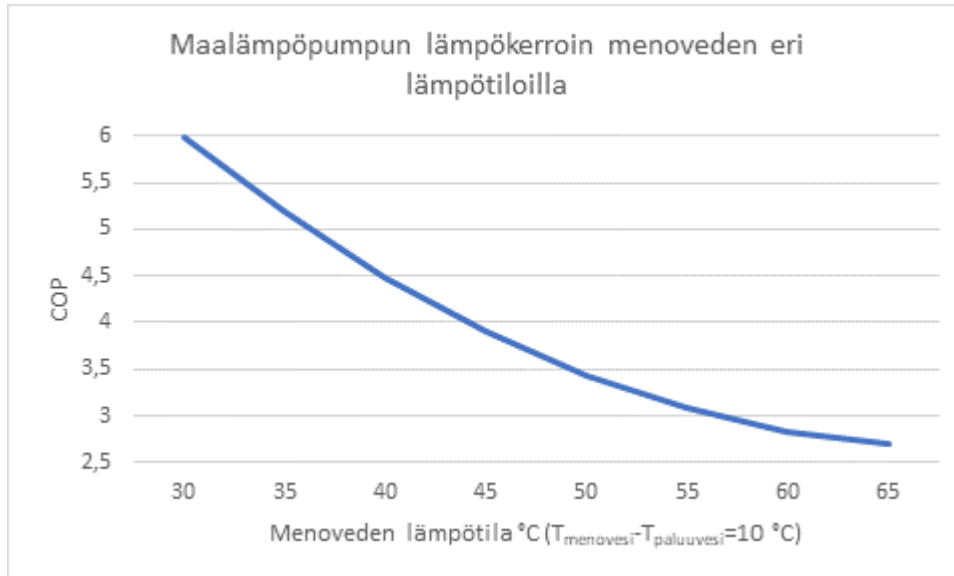
Kuvio 17. Kokonaisenergioiden pysyvyyskäyrät rakennustyypeittäin, sisältävät lämpimän käyttöveden kierron

#### 4.3.2 Maalämpöpumpun COPin määrittäminen

Maalämpöpumpun lämpökertoimien määrittelyssä käytettiin apuna Coolpack v1.5.0 -sovellusta (Ipu n.d.), johon voitiin syöttää halutut kylmäprosessin toimintapisteiden arvot. Tuloksena saatiin kylmäaineella R410A laskettu log p-h-kaavio ja kylmäkerroin, josta saatiin lämpökerroin lisäämällä lukuun yksi. Oleellista oli valita höyrystyslämpötila muutamia asteita alemmaksi ( $-5\text{ °C}$ ), kuin keruupiirin lämpötila (noin  $0\text{--}+3\text{ °C}$ ). Lisäksi lauhtumislämpötilan tuli olla noin kolme astetta lämmitysverkostosta palaavan veden lämpötilaa korkeampi. Tässä työssä oletettiin, että lämpöpumppu toimii lauhduttimessa kiertävän lämmitysverkoston veden lämpötilaerolla  $\Delta T = 10\text{ °C}$ .

Liitteessä 1 on esitetty esimerkinäkymä laskentaohjelmasta, kun määritellään lämpökerrointa menoveden lämpötilatasolle  $40\text{ °C}$ . Tällöin höyrystyslämpötilalla  $33\text{ °C}$  saatiin lämpökertoimen arvoksi noin 4,9. Samalla periaatteella määritettiin muiden työssä tarvittavien lämpötilatasojen lämpökertoimet. Vertailu lämpöpumppuvalmis-

tajien ilmoittamiin arvoihin eri toimintapisteissä osoitti, että Coolpack-ohjelmalla laskennallisesti määritellyt arvot olivat kauttaaltaan melko suuria, joten niitä päädyttiin pienentämään noin 10 %. Kuviossa 18 on esitetty kootusti työssä käytetyt arvot.



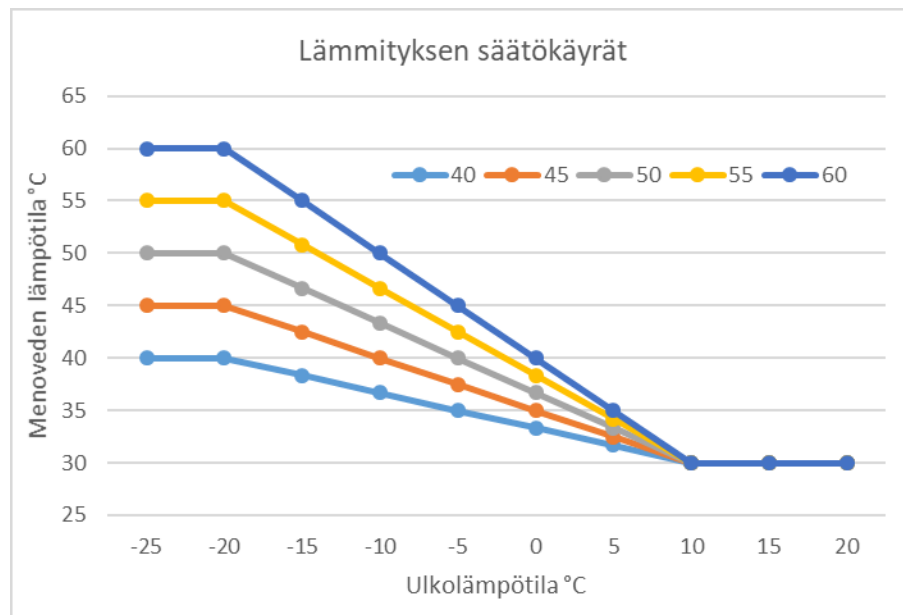
Kuvio 18. Työssä käytetyt lämpökertoimien arvot maalämpöpumpulle

#### 4.3.3 Maalämpöpumpun kokonaissähkötehon laskeminen

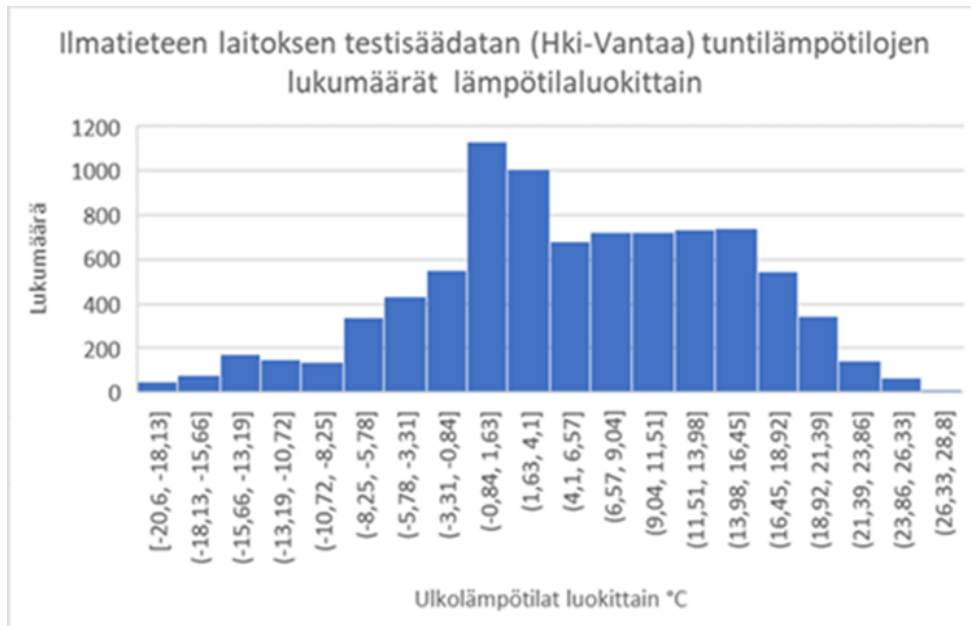
Tuntiset sähkötehot laskettiin (ks. kaava 1) jakamalla lämpöpumpun tuntiset tuotto-  
tehot menoveden lämpötilaa vastaavilla lämpökertoimilla (ks. kuvio 18). Lämpimän  
käyttöveden tuoton sähkötehon osuus saatiin suoraan vakio­lämpökertoimilla, mutta  
tilojen ja ilmanvaihdon kohdalla tuli ottaa huomioon ulkolämpötilakompensointi.  
Koska yleensä tilojen ja ilmanvaihdon lämmityksessä menoveden lämpötilaa laske-  
taan sään lauhtuessa, on sillä COP:in kasvamisen kautta vaikutusta lämpöpumpun ku-  
luttamaan sähköenergian määrään.

Useimmiten maksimilämpötila menovedelle määritellään mitoitusulkolämpötilaan,  
josta se vähitellen laskee kohti sopivaa lämpötilapistettä, jossa lämmitystarve lakkaa.  
Nyt kuitenkin määriteltiin säätökäyriksi yksinkertaiset kuvion 19 mukaiset suorat,  
jossa maksimimenoveden lämpötilat (+40°C– +60 °C) ovat noin -20 °C:ssa ja minimi

(+30 °C) noin +10 °C:ssa ja sitä lämpimämmässä. Alempi ulkolämpötilapiste määräytyi simuloitujen lähtötietojen tuntisista lämmitystehoista, jotka tilojen ja ilmanvaihdon osalta pienenevät tuolloin lähelle nollaa. Ottaen huomioon, että alhaisia ulkolämpötiloja on tilastollisesti tarkastellen hyvin pieni osuus Ilmatieteen laitoksen testivuoden 2012 lämpötiloista (ks. kuvio 20), ei kokonaislämpökertoimiin tule suurta virhettä. Tällä tarkastelulla voitiin korjata myös hieman tässä työssä huomioimatta jätettyjä järjestelmien lämpöhäviöitä.



Kuvio 19. Maalämpöpumpun lämpökertoimen vaihtelun laskentaan käytetyt ulkolämpötilan kompensointikäyrät eri lämmitysveden lämpötilatasoilla

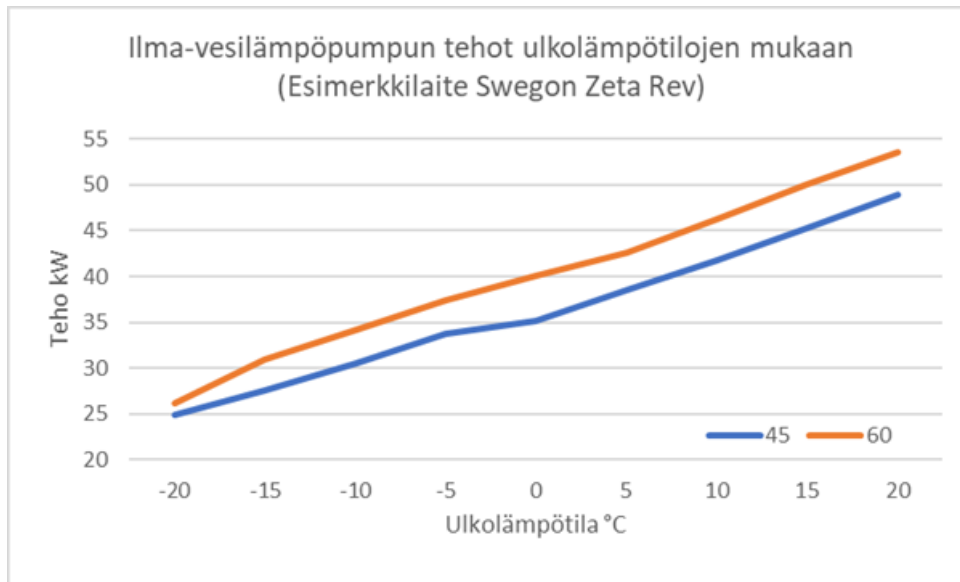


Kuvio 20. Testisäävuoden 2012 ulkolämpötilojen lukumäärät eri lämpötilaluokittain, muokattu aineistosta (Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa n.d.)

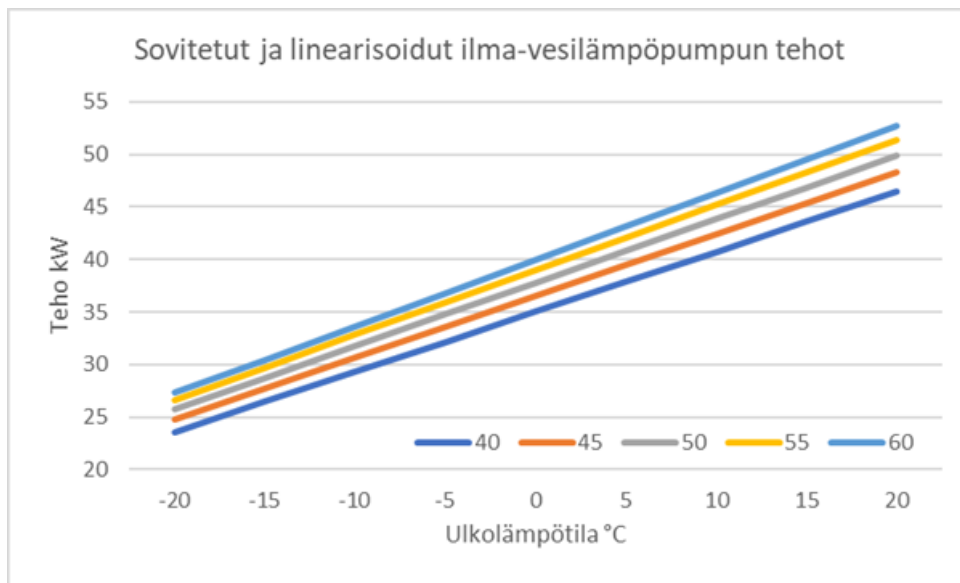
#### 4.4 Ilma-vesilämpöpumpun säästön laskeminen

##### 4.4.1 Ilma-vesilämpöpumpun tehomitoitus

Tehomitoituksessa helpoin tapa oli etsiä laadukas ilma-vesilämpöpumppu, josta oli saatavilla tietoja eri toimintapisteissä. Kuviossa 21 nähdään valitun laitemallin tehon käyttäytyminen eri ulkolämpötilojen mukaan, kun tuotetaan joko 45 °C tai 60 °C lämmitysvettä. Huomataan, että korkeampaa lämpötilaa tuotettaessa laitteelta vaaditaan enemmän suorituskykyä. Jotta tiedot soveltuisivat tämän työn käyttöön, oli tehokäyriä yksinkertaistettava ja tehtävä oletukset muiden kolmen lämpötilatason tehojen käyttäytymisestä ulkolämpötilan funktiona. Laitteen arvoja hyväksi käyttäen laadittiin Excel:illä kuvion 22 mukaiset sovitesuorat, interpoloinnit ja ekstrapoloinnit puuttuville tehoille. Suorat kuvaavat riittävällä tarkkuudella tehojen käyttäytymistä ulkolämpötilan mukaan.



Kuvio 21. Ilma-vesilämpöpumpun tietojen laskennassa käytetyn esimerkkilaitteen lämmitystehojen käyttäytyminen ulkolämpötilan mukaan eri menoveden lämpötiloilla



Kuvio 22. Ilma-vesilämpöpumpun tietojen laskennassa tarvittujen lämmitystehojen käyttäytyminen ulkolämpötilan mukaan käytetyn esimerkkilaitteen tietoihin perustuen

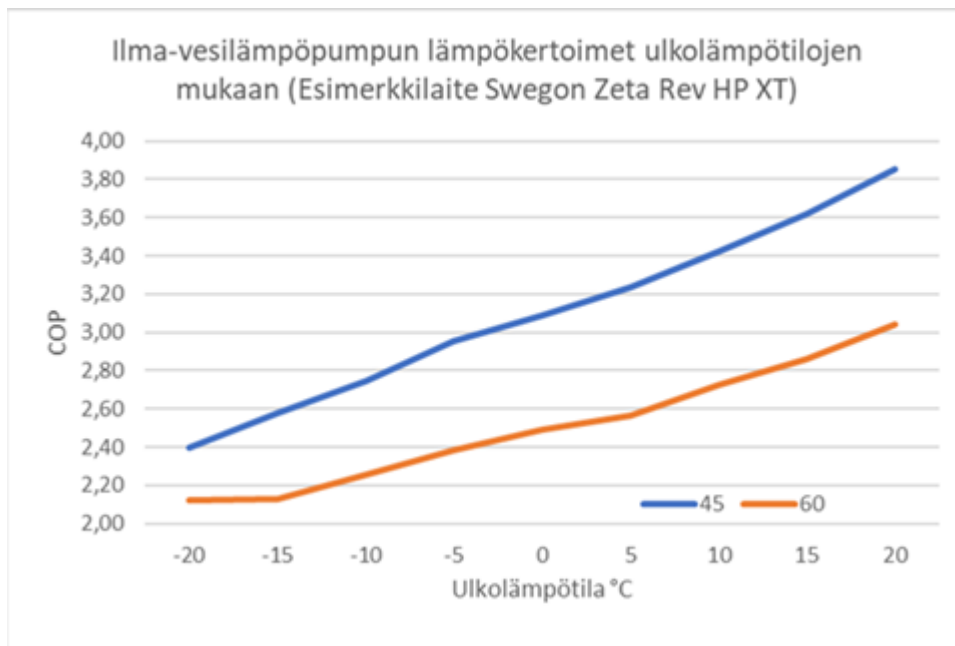
Tehosuorien yhtälöitä käytettiin arvioitaessa sekä ilma-vesilämpöpumpun mitoitusta että tuoton vaihtelua ulkolämpötilan mukaan eri verkostojen lämpötilasoilla. Etsittiin rakennustyyppin simuloitu lämmitystehontarve kullakin menoveden lämpötilalla noin  $-20\text{ °C}$  lämpötilassa. Siirtämällä kuvion 22 mukaisia suoraa y-akselin suunnassa sopivasti, päästiin kiinni kulloiseenkin  $-20$  asteen mitoitustehoon ja sitä kautta rakennustyyppikohtaisiin tuntitehontuottoihin vuoden ajalta. Tässä oli huomioitava tarkastellun tehoyksikön vaihto kilowatista  $\text{W/m}^2$ :in.

Koska lämpöpumpun tehontuotto kasvaa ulkolämpötilan kasvaessa, jossain vaiheessa tuotto ylittää rakennuksen lämmitystehontarpeen. Joka tunnille oli nyt siis laskettu lämpötilakohtainen lämmitystehontarve ja lämpöpumpun tuotto. Yli tarpeen menevät arvot vähennettiin pois, jolloin jäljelle jäivät lämmitystehot lämpöpumpun sähkötehon osuuden määrittelemiseksi lämpökertoimen avulla. Lisäehtona ja apuna edellä kuvatussa menetelmässä käytettiin ilma-vesilämpöpumpun haluttua vuosituottoa (tarvittavien tuntituottojen summa), joka määriteltiin kattamaan 97–98 % kunkin  $40\text{--}60\text{ °C}$  lämpötilatason lämmitysenergiantarpeesta.

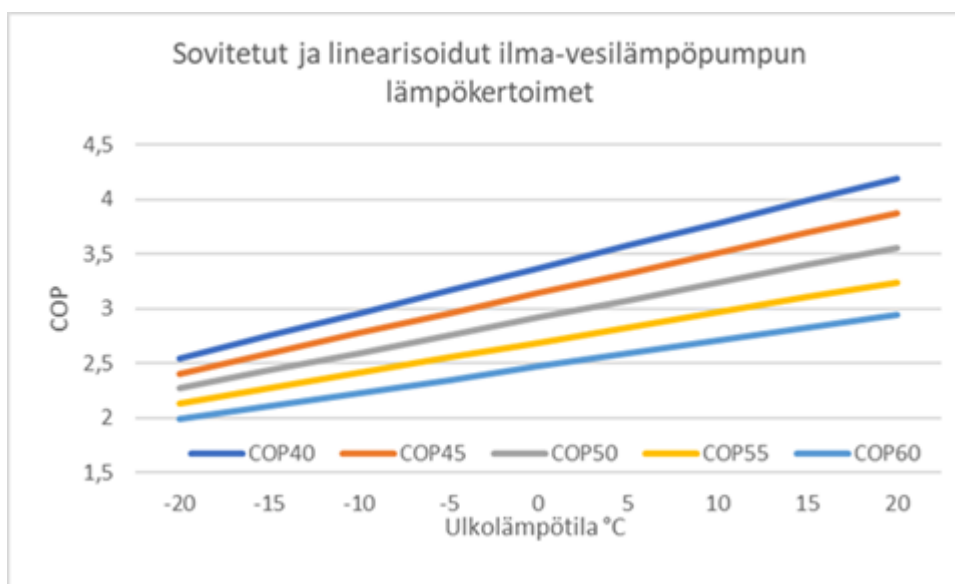
#### 4.4.2 Ilma-vesilämpöpumpun COPin määrittäminen

Samaan tapaan kuin tehomitoituksen tapauksessa, käytettiin lämpöpumpun lämpökertoimien määrittämisessä kuvion 21 tehoja vastaavia valitun esimerkkilaitteen lämpökertoimien arvoja kahdelle eri menoveden lämpötilalle (ks. kuvio 23). Lämpökertoimessa on huomioitu kompressorien ja puhaltimien tehot ja pumppaustehot laitteen sisäisten painehäviöiden kompensoimiseksi. Esimerkkilaitte pystyy tuottamaan vain  $+55\text{ °C}$  lämpöistä vettä  $-20$  pakkasasteessa, mistä johtuu  $+60\text{ °C}$  menovesikäyrän lämpökertoimien tasaantuminen matalilla lämpötiloilla. Työssä kuitenkin haluttiin lämpökertoimen arvo myös  $60$ -asteiselle vedelle, joten se saatiin ekstrapoloimalla suoran muiden arvojen avulla. Kuten tehosuorien tapauksessa, saatiin samalla menetelmällä kaikki kuviossa 24 nähtävät menoveden lämpötilojen suorat määriteltä. Kuvioista 22 ja 24 voidaan päätellä, että menoveden lämpötilan nosto tapahtuu käytännössä tehoa kasvattamalla ja kompressoriin syötetyn sähköenergian lisäyksellä, jolloin lämpökerroin pienenee.





Kuvio 23. Ilma-vesilämpöpumpun tietojen laskennassa käytetyn esimerkkilaitteen lämpökertoimien käyttäytyminen ulkolämpötilan mukaan



Kuvio 24. Ilma-vesilämpöpumpun lämpökertoimien käyttäytyminen ulkolämpötilan mukaan perustuen esimerkkilaitteen tietoihin

Näitä saatujen suorien yhtälöitä voitiin nyt käyttää kunkin tarkasteltavan menoveden lämpötilatason tuntisten sähkötehon kulutuksien laskemiseen.

#### 4.4.3 Vesi-ilmalämpöpumpun kokonaissähkötehon laskeminen

Kun ilma-vesilämpöpumpulta tarvittut tuntiset tuotot ja vastaavat lämpökertoimet oli saatu laskettua, päästiin laskemaan kompressorin tuntiset sähkötehot. Kuvion 24 hyötysuhteiden vakiolämpötilakäyrät sopivat nyt sähkötehojen osalta vain käyttöveden lämmityksen laskemiseen. Samat suorat eivät kelvanneet tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystehojen tapauksessa, koska menoveden lämpötilat laskisivat alemmiksi kuin matalimman 40 °C lämpötilatason suora. Ongelma ratkaistiin lisäämällä kuvioon karkeasti vielä 35 °C ja 30 °C suorat. Nyt voitiin määritellä kullekin lämpötilatasolle hyötysuhteen huomioivat yksilölliset säätökäyrät niin, että alkupisteet olivat kunkin lämpötilatason kohdalla -20 °C:ssa ja kaikkien lämpötilakäyrien loppupiste lämpötilasuoran 30 °C ulkolämpötilan pisteessä +10 °C. Tämä piste vastaa samoin kuin maalämpöpumpun säätökäyrän kohdalla tilannetta, jolloin tilojen lämmitysteho on lähes nolla. Hyötysuhteeksi tässä pisteessä arvioitiin 4,5. Esimerkiksi lämpötilatasolla 60 °C hyötysuhteen suoran alkupisteen COP oli noin 2 ja loppupisteen 4,5. Nyt saatiin laskettua ulkolämpötilasta eri tavoin riippuvat lämpöpumpun sähkötehot tilojen ja käyttöveden teho-osuuksista.

#### 4.5 Investointikustannukset

Päätelaite- ja IV-lämmityspatterihintojen määrittämistä varten laskettiin tilalämmitystehontarve säävyöhykkeen 1 mitoitusulkolämpötilassa eli -26 °C:ssa. Tämä tehtiin soveltamalla suora pistekuvaajaan, jossa x-akselilla olivat ulkolämpötilat ja y-akselilla tilalämmityksen ulkolämpötiloja vastaavat koko vuoden tuntitehot. Ekstrapoloimalla suora -26 asteeseen saatiin pisteen avulla määritettyä tarvittu mitoituslämmitysteho. Arvoihin lisättiin vielä varmuutta 15 %. Rakennustyyppikohtaiset tehot ovat taulukossa 4.

Taulukko 4. Tilalämmitystehot rakennustyypeittäin

<b>Tilalämmityksen teho mitoitusulkolämpötilassa W/m<sup>2</sup></b>	
<b>Asuinkerrostalo</b>	<b>10,62</b>
<b>Toimistorakennus</b>	<b>18,52</b>
<b>Opetusrakennus</b>	<b>15,39</b>
<b>Kauppakeskus</b>	<b>7,17</b>

Radiaattoreiden, lämmityspaneelien ja ilmanvaihdon pattereiden lämpötilaeroina niiden lämmönluovutustehoa ja neliökohtaisia hintoja arvioitaessa käytettiin taulukon 5 arvoja.

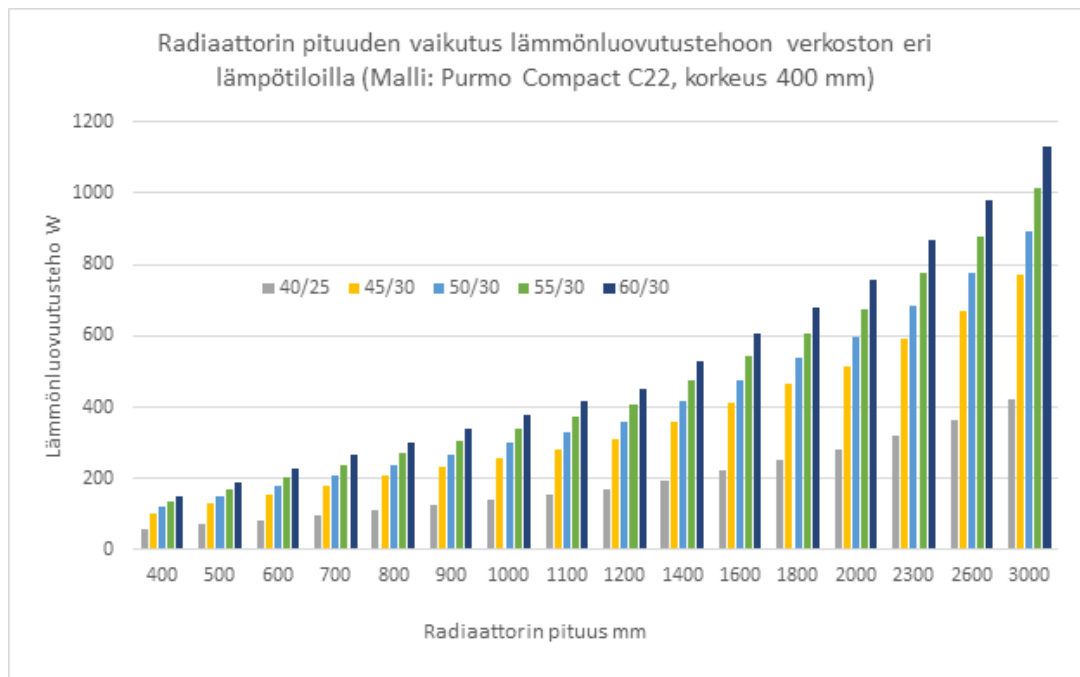
Taulukko 5. Työssä käytetyt maalämpöpumpun toisiopuolen ja lämmitysverkostojen lämpötilaerot

Työssä käytetyt lämpötilaerot ( $T_{\text{menovesi}}/T_{\text{paluuvesi}}$ ) °C			
Maalämpöpumppu	Radiaattoriverkosto	Lämmityspaneelit	Ilmanvaihdon lämmitys
40/30	40/25	40/33	40/25
45/35	45/30	45/35	-
50/40	50/30	50/37	50/35
55/45	55/30	55/39	-
60/50	60/30	60/40	60/40

#### 4.5.1 Radiaattorit

Koska lopullisessa laskurissa tarvittiin neliökohtaisia hinta-arvioita, ei taulukon 4 tietoja voitu suoraan käyttää radiaattoreiden tehojen ja edelleen hintojen määrittelyyn. Päädyttiin oletamaan yhden huonetilan pinta-alaksi 25 m<sup>2</sup>. Näin saatiin jokaiselle rakennustyyppille kullekin yksi vakioarvo patterin lämmönluovutustehoksi. Esimerkiksi asuinkerrostalon radiaattorilta vaadittiin 266 W lämmitysteho laskutoimituksen  $25 \text{ m}^2 * 10,62 \text{ W/m}^2 = 266 \text{ W}$  mukaisesti.

Radiaattoreiden lämmönluovutuskykyä lähdettiin selvittämään patterivalmistajan Excel-pohjaisella työkalulla, johon sijoitettiin lähtöarvoina meno- ja paluueden lämpötilat ja haluttu huonelämpötila (Teholaskuri n.d). Valittiin päätelaitemalliksi C22. Käytettiin taulukon 5 radiaattoriverkoston lämpötila-arvoja ja koottiin eri pituisten radiaattoreiden lämmönluovutustehot 300–500 mm korkuisista laitteista. Laitteiden pituudet vaihtelivat 400–3000 mm välillä. Kuviossa 25 on esimerkkinä esitetty 400 mm korkean radiaattorin lämmönluovutustehot pituuden mukaan eri verkostolämpötiloilla. Lämpötilatason laskiessa vaaditaan samalta radiaattorilta enemmän pituutta tehovaatimuksen täyttymiseen. Esimerkiksi asuinkerrostalon 266 W teho saadaan 40/25 °C -verkostossa noin 2000 mm pitkistä patterista, kun 60/30 °C -mitoituksella saman lämmitystehon luovuttamiseksi tarvitaan laitteelle vain 800 mm pituutta. Pitempi patteri nostaa investointikustannuksia huomattavasti.



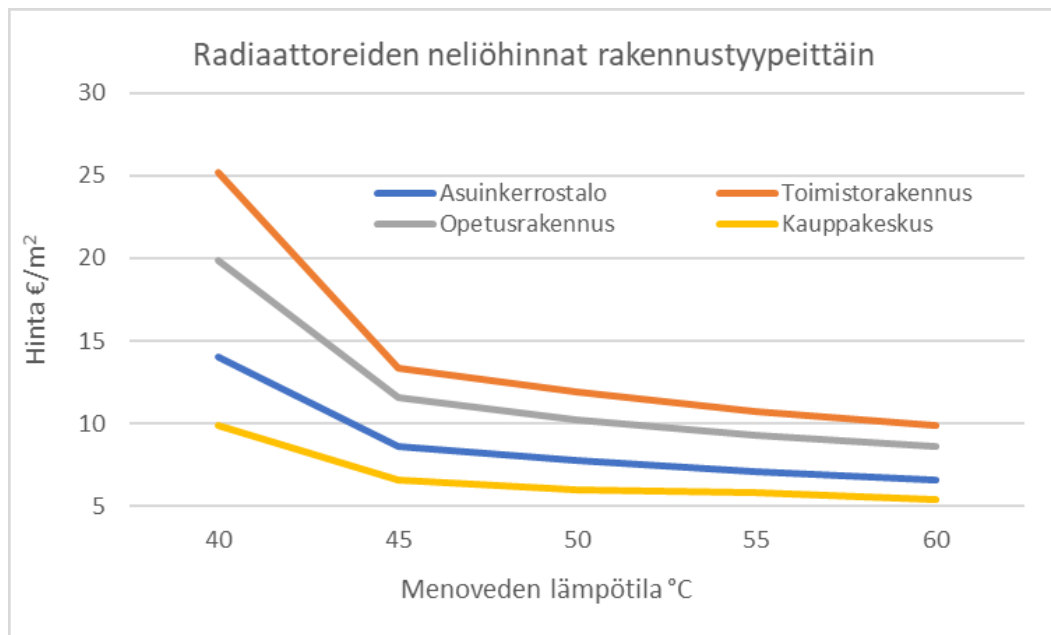
Kuvio 25. Radiaattorin pituuden vaikutus lämmönluovutustehoon

Kun eri kokoisten radiattoreiden lämmönluovutustehot ja samalla hinnat oli taulukoitu, voitiin poimia sopivantehoisten ja -kokoisten mallien hintatiedot. Esimerkkinä on esitetty asuinkerrostalon kootut laitehintatiedot taulukossa 6.

Taulukko 6. Esimerkki työssä käytettyjen asuinkerrostalon radiattorihintojen määräytymisestä eri verkostojen lämpötiloilla

<b>C22-laitemallin hinnat €, kun lämmönluovutustehovaatimus 266 W</b>					
	<b>40/25</b>	<b>45/30</b>	<b>50/30</b>	<b>55/30</b>	<b>60/30</b>
<b>korkeus 300</b>	<b>372,50</b>	<b>222,10</b>	<b>198,10</b>	<b>175,20</b>	<b>164,80</b>
<b>korkeus 400</b>	<b>346,80</b>	<b>210,10</b>	<b>180,70</b>	<b>167,00</b>	<b>157,20</b>
<b>Korkeus 450</b>	<b>346,20</b>	<b>213,20</b>	<b>197,50</b>	<b>184,00</b>	<b>170,50</b>
<b>Korkeus 500</b>	<b>336,90</b>	<b>215,10</b>	<b>202,00</b>	<b>183,90</b>	<b>166,20</b>
<b>Hintakeskiarvo</b>	<b>350,60</b>	<b>215,13</b>	<b>194,58</b>	<b>177,53</b>	<b>164,68</b>

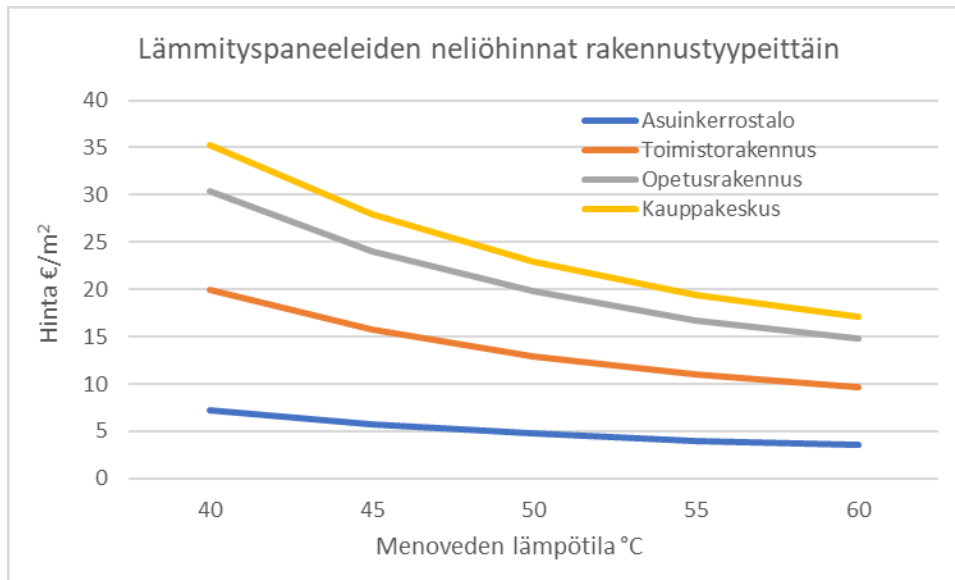
Näistä keskiarvohinnoista saatiin radiattoreiden neliökohtaiset hinnat jakamalla ne lähtötilanteen pinta-alaletuksella 25 m<sup>2</sup>. Samalla edellä selostetulla tavalla määriteltiin kaikkien rakennustyyppien neliökohtaiset radiattorihinnat (ks. kuvio 26).



Kuvio 26. Radiaattoreiden neliökohtaiset hinnat rakennustyypeittäin eri lämpötilatasoilla

#### 4.5.2 Lämmityspaneelit

Lämmityspaneelien neliökohtaisia hintoja lähdettiin arvioimaan samalla periaatteella kuin radiattoreiden tapauksessa eli rakennustyyppien tilatehoista (ks. taulukko 4) ja määrittelemällä yhden tilan pinta-alaksi 25 m<sup>2</sup>. Paneelivalmistajan mitoitushjelmalla (Itucalc n.d.) kartoitettiin, montako yleisimmin käytettyä, mitoiltaan 600x3000 mm paneelia tarvitaan, jotta eri lämpötilatasojen (ks. taulukko 5) tilälämmityksen tehontarpeet saadaan katettua. Mitoituksessa tuli huolehtia, että meno- ja paluuvien lämpötilaero aiheuttaisi putkistoon riittävän turbulenttisen virtauksen (ks. taulukko 5). Kun tiedettiin yhden paneelin hinta, suhteutettiin hinta lämmönluovutustarpeita vastaaviin paneelien lukumääriin. Lopulliset neliöhinnat (ks. kuvio 27) saatiin jakamalla asetetun tilan pinta-alalla 25 m<sup>2</sup>.



Kuvio 27. Lämmityspaneelien neliökohtaiset hinnat rakennustyypeittäin eri lämpötilatasoilla

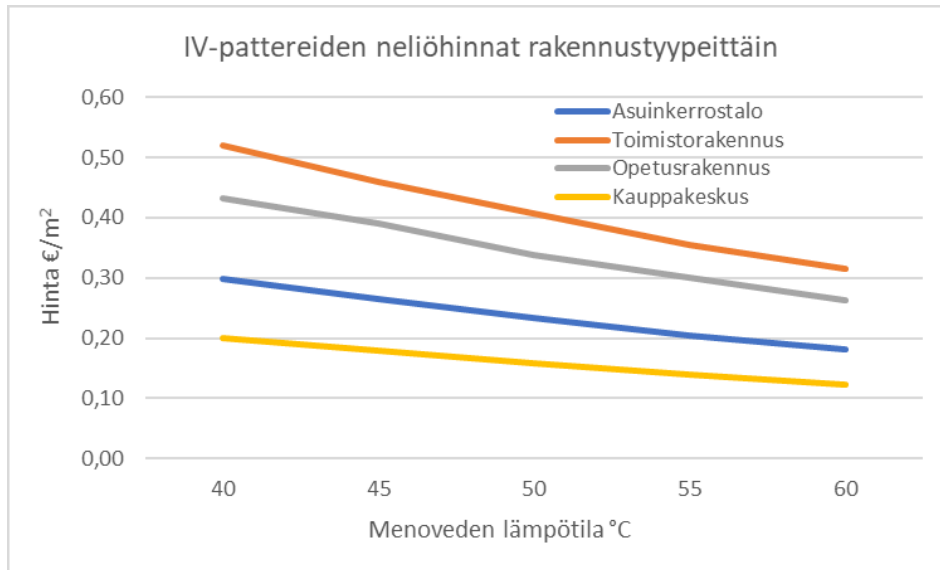
#### 4.5.3 Ilmalämmitys

Ilmalämmityksen tapauksessa tarkasteltiin ainoastaan IV-koneeseen asennettavien lämmityspattereiden hintoja eri menoveden lämpötiloilla. Oletettiin, että ilmanvaihdon päätelaitteet eli tuloilmahajottajat tiloissa soveltuisivat myös ilmalämmityksen tarpeisiin. Edelleen oli tarkoitus tarkastella ilmalämmitystä ainoastaan tilatehojen näkökulmasta varsinaisen ilmanvaihdon tehon osuuden jäädessä investointien ulkopuolelle.

Laitetoimittajan hinta-arviot saatiin noin 60 kW tehoisille pattereille, jotka oli mitoitettu 40/25 °C -, 50/35 °C - ja 60/40 °C -verkostojen meno- ja paluueden lämpötiloille. Muiden päätelaitetarkastelujen tapaan käytettiin hyväksi kunkin rakennustyyppin neliökohtaista tilalämmitystehoa mitoitussulkolämpötilassa (ks. taulukko 4). Laitteen neliöhinta saatiin kertomalla lämmitysteho ( $W/m^2$ ) kunkin lämpötilatason kilowattikohtaisella hinnalla kaavan 4 mukaisesti.

$$IV - \text{patterin neliöhinta} \left( \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right) = \frac{\text{Laitteen hinta (€)}}{\text{Laitteen lämmitysteho (kW)}} * \frac{\text{Tilalämmitysteho} \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)}{1000} \quad (4)$$

Menoveden 45 °C ja 55 °C lämpötiloja vastaavat neliöhinnat interpoloitiin muiden verkostolämpötilojen avulla. Neliökohtaiset hinnat on esitetty kuviossa 28.



Kuvio 28. Ilmanvaihdon lämmityspatterin neliökohtaiset hinnat rakennustyypeittäin eri lämpötilatasoilla

#### 4.5.4 Putkistokustannukset

Putkistokustannukset määritettiin radiaattoriverkoston lämpötiloissa. MagiCAD-ohjelmalla piirrettiin verkoston putket ja kokeiltiin muutamalla lämmitysteholla, kuinka suuret putkikoot ohjelma mitoittaa eri lämpötilatasoille. Alla olevasta taulukosta 7 nähdään mitoitettut koot.

Taulukko 7. MagiCAD:illa määritetyt putkikoot vertailulämpötiloille eri lämmitystehoilla

Putkikoot (DN) eri verkoston lämpötiloilla lämmitystehon mukaan					
Lämmitysteho kW	40/25	45/30	50/30	55/30	60/30
10	25	25	25	25	20
30	40	40	32	32	32
50	50	50	50	40	40
100	65	65	65	50	50
200	80	80	80	65	65
350	100	100	100	80	80
700	125	125	125	100	100

Tämän osa-alueen kustannusten laskenta oli työn haastavin tehtävä. Koska tärkeintä oli saada eri lämpötilatasojen aiheuttamat kustannukset mahdollisimman luotettavasti vertailukelpoiksi, ei tämä tarkastelu ollut aivan aukoton. Taulukosta 7 nähdään, kuinka putkikoko muuttuu kerran jokaisen tarkastellun lämmitystehon kohdalla. Lämpötilataso, jossa muutos tapahtuu, vaihtelee tehon mukaan. Esimerkiksi 30 kW:n tapauksessa siirtyä pienempään kokoon tapahtuu lämpötilavälillä 45–50 °C, kun taas suuremmilla tehoilla välillä 50–55 °C. Voidaan siis olettaa, että sekä 40 °C että 60 °C verkostojen tulokset ovat putkikustannusten suhteen luotettavimmat ja epävarmuutta puolestaan aiheuttaa keskimmäisten lämpötilojen kohdalla putkikoon vaihtumisen tarkka kohta.

Jonkinlainen arvio tuli kuitenkin kustannuksista tehdä, joten taulukon 7 pohjalta tehtiin putkiko'oista laajennettu taulukko lämmitystehoilla 10–1000 kW. Määritettiin 10 kW:n tarkkuudella tilalämmitystehoja vastaavien putkikokojen hinnat. Toimittajan hinnaston ja toimeksiantajan valmiin laskentataulukon perusteella saatiin listattua teräsputkille yksikköhinnat asennuksineen. Asennuksen hinta kasvaa putkikoon kasvaessa, joten sillä on merkitystä lopulliseen kustannusvertailuun.

Ollennainen työssä käytetty tieto oli Haahtelan Kustannustieto TAKU-ohjelmasta saatu putkikustannushinta 12 €/brm<sup>2</sup>. Ensin hintaa pienennettiin 15 % vastaamaan lämmitettyä nettopinta-alaa ja kiinnitettiin sitten niin, että arvo vastasi 100 kW:n lämmitystehoa. Edelleen oletettiin tämän tehon vastaavan 60/30 °C -verkoston putkikoko DN50 ja teräsputken hintaa 9,32 €/m. Nyt saatiin skaalattua muiden putkihintojen avulla kaikille putkiko'oille kertoimet (ks. taulukko 8). Näitä arvoja käyttäen saatiin optimointilaskuriin tarvittavat putkikustannukset laskettua kaavalla:

$$\text{Putkikustannus (€)} = \text{hintakerroin} * 10,2 \left( \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right) * \text{rakennuksen pinta - ala (m}^2\text{)} \quad (5)$$



Taulukko 8. Putkikustannusten laskentaan määritellyt hintakertoimet

Putkikoko DN	Hintakerroin
15	0,526
20	0,381
25	0,498
32	0,621
40	0,695
50	1,000
65	1,245
80	1,867
100	2,393
125	4,399
150	5,011

#### 4.5.5 Lämpöpumput

Lämpöpumppujen hintatietoja saatiin yleisimmiltä laitevalmistajilta ja SWECO:n omista dokumenteista. Koska lopulliseen optimointilaskuriin tuli liittää mahdollisuus syöttää haluttu pinta-ala, oli odotettavissa laajan skaalan tarve lämpöpumppujen tehoille. Hintoja yksittäisille suurempitehoisille laitteille oli saatavilla vain noin 100 kW tehoon asti. Tämän vuoksi suurempien tehojen kustannustarkastelu vaati pienempien lämpöpumppujen tehojen ja siten myös hintojen summaamista. Sekä todelliset että yhteen lasketut lämpöpumpputehot ja niitä vastaavat hinnat taulukoitiin, ja laadittiin riittävän suuren tehoalueen kattava hinnasto.

#### 4.5.6 Lämpökaivot

Lämpökaivokustannuksen neliökohtainen hinta saatiin laskettua ottamalla huomioon lämpöpumpun lämmitysenergiantuotto, lämpöpumpun kompressorin kuluttama energia, arvio maaperästä saadusta energiamäärästä ja arvio porakaivokustannuksen yksikköhinnasta. Työssä arvioitiin maasta saatavaksi vuosienenergiaksi 100 kWh/m ja porakaivon kustannukseksi 27 €/m. Lämpökaivokustannuksen neliöhinta arvio saatiin kaavalla:

$$\text{Lämpökaivokustannus} \left( \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right) = \frac{(\text{LP tuottama lämpöenergia} - \text{LP sähköenergiankulutus}) \left( \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right)}{\text{Maasta saatava lämpöenergia} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{m}} \right)} * \\ \text{Porakaivokustannus} \left( \frac{\text{€}}{\text{m}} \right) \quad (6)$$

#### 4.6 Optimointityökalun luominen

Helpoin tapa hyödyntää lähtötiedoista saatuja välituloksia ja Excel-taulukoita elinkaarilaskennassa, oli suunnitella myös tavoitteena ollut optimointityökalu Excel-pohjaiseksi. Lopullisen laskentatyökalun toiminnallinen rakenne ja ulkoasu hahmottuivat vähitellen työn edetessä. Laskuri perustuu Sweco:n omaan elinkaarikustannusten nykyarvolaskentapohjaan, josta muokattiin tarkoitukseen sopiva.

Laskurin pääsivulle tulivat valittaviksi rakennuskohteen lähtötiedot. Pudotusvalikoihin sisällytettiin rakennustyyppit, lämpöpumpputyypit, kaukolämmön lämpimän käyttöveden kytkentävaihtoehdot ja päätelaitevaihtoehdot. Manuaalisesti syötettäväksi tulivat rakennuksen pinta-ala, diskonttaus korko, energiahintojen nousun korko ja energian hinnat. Tarkastelujaksoksi kiinnitettiin 20 vuotta.

Optimointilaskurin välilehdille koottiin aiemmin lasketut ja määritellyt välitulokset eli rakennustyyppien neliökohtaiset perustiedot kahdella käyttöveden kaukolämpökytkennällä sekä päätelaite-, putki-, ja lämpöpumppuhinnat (ks. liitteet 2–6 ja kuviot 26–28). Lämpöpumppuhintataulukkoa ei voitu liitteissä esittää sen suuren koon vuoksi. Edelleen omille välilehdilleen laadittiin päävälilehden rakennuskohtaisten syöttötietojen mukaan päivittyvät taulukot päätelaitehinnoille, lämpöpumppujen hinnoille, lämpökaivokustannuksille, putkikustannuksille ja energiansäästökustannuksille. Laskuri muokattiin tekemään elinkaarilaskennan laskutoimitukset poimimalla lähtötietojen määräämät tarvittavat arvot eri välilehdiltä. Lopuksi laskenta haki kannattavimman lämpötilatasovaihtoehdon tulosruutuun.

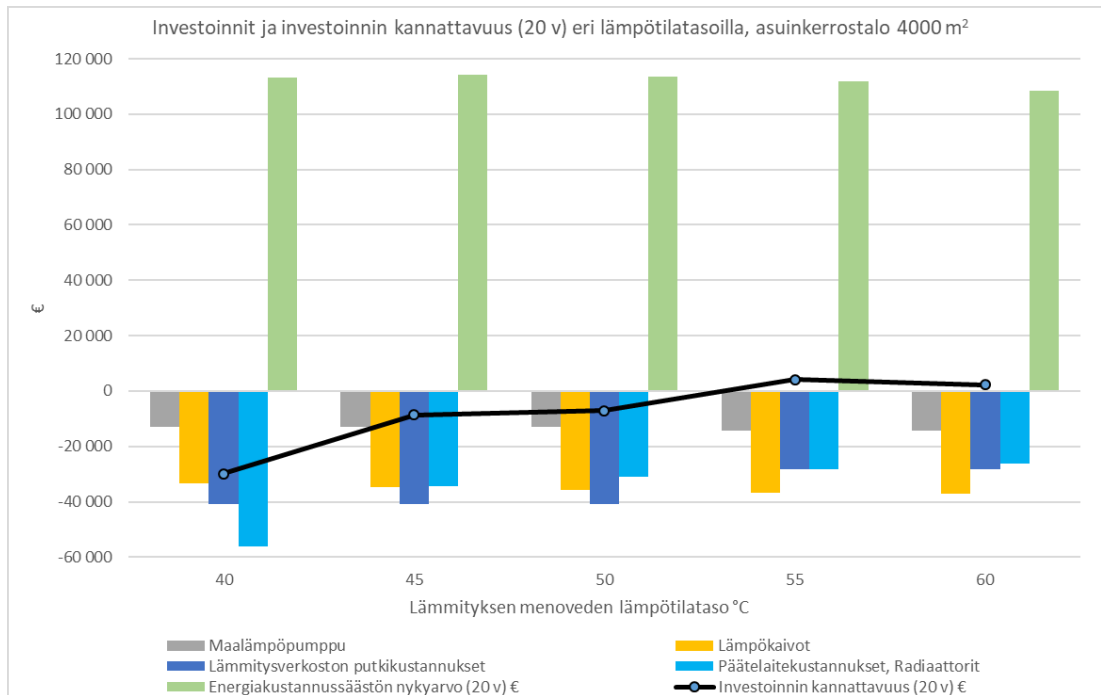
## 5 Tulokset

### 5.1 Kustannustehokkain lämpötilataso

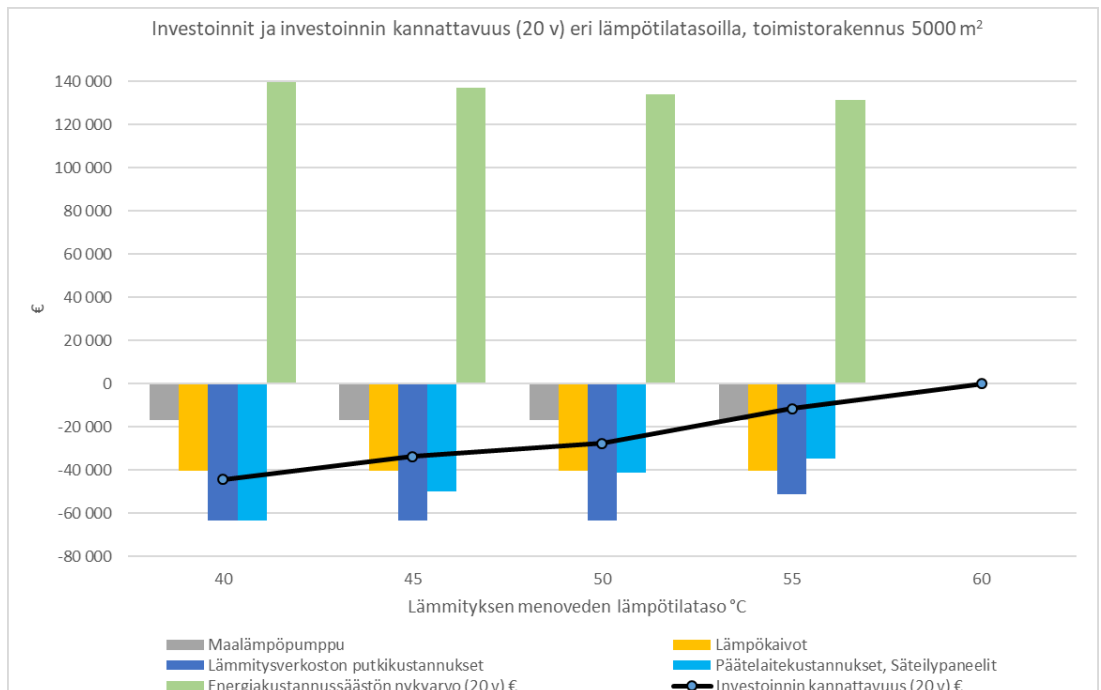
Tuloksena saatiin sujuvasti toimiva ja helppokäyttöinen optimointilaskuri kustannustehokkaimman menoveden lämpötilan määrittämiseksi. Laskuriin syötetyillä rakennuksen lähtötiedoilla saatiin määritettyä tavoitteena ollut elinkaarikustannuksiltaan kannattavin lämmitysverkoston menoveden lämpötilataso. Laskurissa ovat nähtävillä kaikki tarvittavat muuttujat, välitulokset ja elinkaarikustannusten laskenta-arvot, joista voidaan tarkastella tulokseen vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi laskuri piirtää havainnollistavia kuvaajia valituilla lähtöarvoilla. Liitteessä 7 on esitetty laskurin päänäkökymä, jossa ovat näkyvissä myös syötetyillä esimerkkivalinnoilla saadut laskentatulokset.

Saatava kustannustehokkain lämpötilataso vaihtelee hieman lähtötietovalintojen mukaan. Eri kombinaatioita kokeilemalla painottuivat tulokset selkeästi menoveden lämpötilan korkeampiin arvoihin 55 °C ja 60 °C kolmella rakennustyyppillä eli asuinkerrostalolla, toimistorakennuksella ja opetusrakennuksella. Kauppakeskuksen osalta laskuri antoi suurilla pinta-alan syöttötiedoilla myös matalampia arvoja 40–50 °C.

Kuvioissa 29 ja 30 on esitetty energiakustannussäästön nykyarvot, investointikustannukset ja kannattavuuskäyrät kahdessa eri rakennuskohteessa. Investoinnin kannattavuus on selvästi parempi verkoston korkeammilla lämpötilatasoilla maalämpöpumppujärjestelmässä sekä asuinrakennuksessa (radiaattorit) että toimistorakennuksessa (lämmityspaneelit). Lämmityspaneelien suositeltu menoveden maksimilämpötila on 55 °C, joten korkein lämpötilataso puuttuu tarkastelusta kuviossa 29.



Kuvio 29. Investoinnit ja kannattavuus esimerkkivalinnoin asuinkerrostalossa (Ei K1-mukainen kytkentä)



Kuvio 30. Investoinnit ja kannattavuus esimerkkivalinnoin toimistorakennuksessa (Ei K1-mukainen kytkentä)

Ilma-vesilämpöpumppujen osalta laskurin tulokset näyttävät pienempiä eroja kannattavuudessa eri lämpötilatasojen välillä, mutta muuten tulokset ovat yhdenmukaiset maalämmön kanssa.

Lämpimän käyttöveden osalta kaukolämmön siirrintyyppin valinnalla ei ollut suurta vaikutusta tuloksiin.

### 5.1.1 Putkikustannusten vaikutus tuloksiin

Kokeilemalla laskurin lähtötietovalintojen eri kombinaatioita huomattiin, että lämpötilatasolla 50 °C on lähes toistuvasti selvä notkahdus kannattavuudessa. Tämä nähdään selvästi myös edellä esitetyistä esimerkkikuvioista (ks. kuviot 29 ja 30). Laskurin laskenta-arvoja tarkemmin tutkittaessa ilmeni, että putkikustannusten vaikutus vertailulaskelmiin voi olla merkittävä. Putkikustannusten muutoskohdan ongelmaa oli pohdittu jo investointikustannuksia määritettäessä (ks. taulukko 7 ja liite 2). Äkillinen suuri pudotus siirryttäessä yhtä korkeammalle lämpötilatasolle aiheuttaa virhettä tulokseen. Mikäli joillain tietyllä syöttötietokombinaatiolla laskurin tulos oli 55 °C, saattoi lämpötilatason 50 °C putkikustannusten manuaalinen pienentäminen 55 °C tasoa vastaavaksi antaa optimoiduksi tulokseksi lämpötilatason 50 °C. Tämän vuoksi myös tämä menoveden lämpötila tulee ottaa huomioon yhtenä potentiaalisena lämmitysverkoston suunnitteluvaihtoehtona, mikäli laskennan tulokseksi saadaan korkeampi lämpötilataso.

### 5.1.2 Lämmönjaon laitteiden vaikutus tuloksiin

Kuten kuvioista 29 ja 30 nähdään, on lämmönjaon päätelaitteiden kustannuksilla merkittävä vaikutus optimoinnin tulokseen. Kustannukset kasvavat selkeästi lämpötilojen pienentyessä. Erityisesti radiaattori-investointi 40/25 °C -verkostossa dominoi laskelmia. Ilmalämmityspattereiden osalta ongelmaksi muodostuivat niiden käytön rajaus vain tilalämmityksen teho-osuuteen, mikä johti alhaisiin neliöhintoihin (ks. kuvio 28) ja häviävän pieniin investointikustannuksiin esimerkiksi kauppakeskuksen tapauksessa. Ilmalämmitysvalinnan kohdalla optimoinnin tulos riippuu täysin muista muuttujista.

### 5.1.3 Energiakustannussäästöt

Välitulostaulukossa liitteissä 3–6 on esitetty kullekin rakennustyyppille lämpöpumpulla saatavat neliökohtaiset energiakustannussäästöt. Yleisesti voidaan todeta, että muiden rakennustyyppien kuin asuinkerrostalon kohdalla säästö kasvaa menoveden lämpötilan laskiessa. Tulos oli yllättävä, mutta se johtuu selkeästi käyttöveden tehoisuuden lämmityksestä vain kunkin tarkastelutason lämpötilaan asti, esimerkiksi vain 40 °C:eseen. Loppulämmityksestä kaukolämmöllä +58 °C asti tulee sitä suurempi lisälämmityskustannus, mitä alempi on lähtölämpötilataso. Tällöin lisälämmityskustannukset dominoivat alemmilla lämpötilatasoilla kokonaissäästöissä asuinkerrostalon tapauksessa. Myös kiertojohdon kuluttaman suuren energiamäärän tuottaminen kaukolämmöllä huonontaa lämpöpumpun tuomaa säästöä muihin rakennustyyppihin verrattuna (ks. kuvio 15). Manuaalisesti kokeilemalla eivät alempien lämpötilatasojen säästöjen parantamiset kuitenkaan tuo asuinkerrostalon varsinaiseen tulokseen eli kustannustehokkaimpaan lämpötilatasoon muutosta.

Kauppakeskuksen alhaiset optimoidut lämpötilatasot tietyillä valinnoilla johtuvat sekä lämpimän käyttöveden kiertojohdon puuttumisesta että päätelaiteinvestoinnin pienuudesta. Tilalämmityksen osuus kauppakeskuksissa on pieni verrattuna IV-lämmitykseen (ks. kuvio 15). Lämpöpumpulla saatavat säästöt ovat huomattavasti suuremmat kuin muilla rakennustyypeillä (ks. liite 6). Suurilla pinta-alan syöttötiedoilla kasvavat matalien lämpötilojen energiakustannussäästöt niin suuriksi, että vastaavilla investointikustannuksilla ei enää ole samanlaista merkitystä kuin muiden rakennustyyppien tapauksessa.

### 5.1.4 Maalämpökaivokustannukset

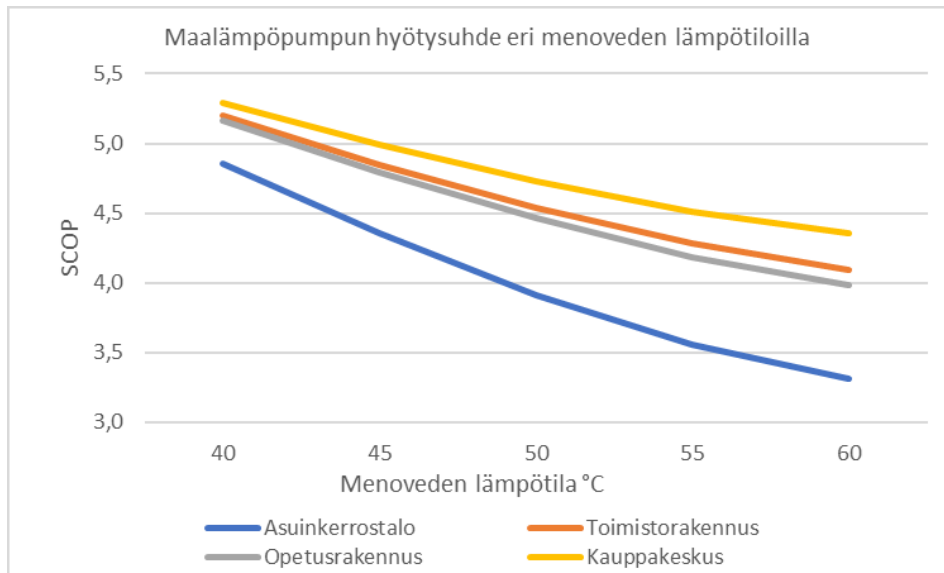
Yhtenä kiinnostavana huomiona laskelmista voidaan mainita maalämmön lämpökaivokustannusten vaihtelu rakennustyyppien energiantarpeen, lämmitysverkoston lämpötilatasojen ja vuosihyötysuhteiden mukaan (ks. liitteet 3–6). Tämä ei näy määräävävä tekijänä etsittäessä kustannustehokkainta lämpötilatasoa. Lämpökaivojen riittävä mitoitus tulee kuitenkin muistaa maalämpöpumppujärjestelmiä suunniteltaessa, koska lämmönlähteen ehtymättömyys on yksi tärkeimmistä maalämpöpumppujärjestelmän tehokkaan toiminnan edellytyksistä.

## 5.2 Lämpöpumppujen vuosihyötysuhteet

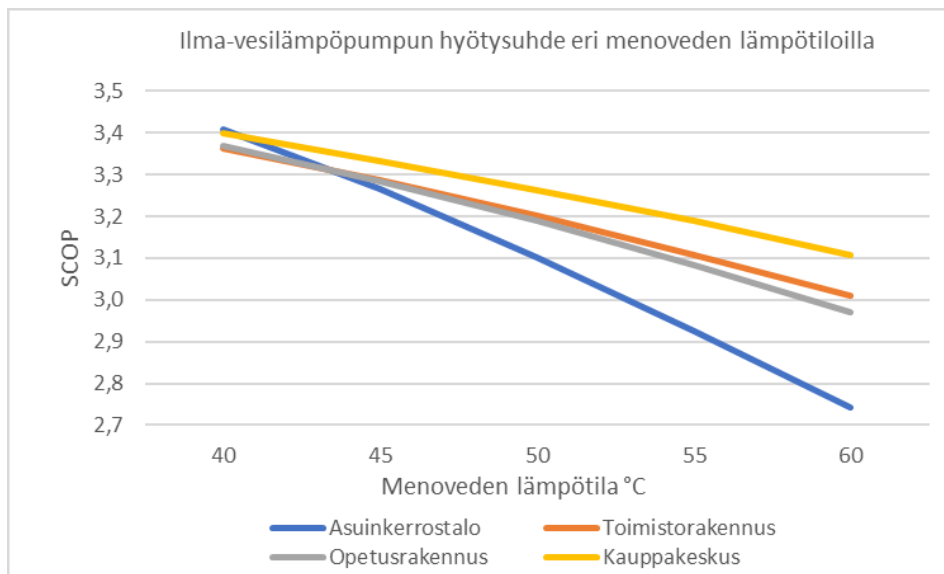
Työssä käytetyt Ilmatieteen laitoksen testivuoden 2012 lämpötilatiedot ja toisaalta energiasimulointiohjelmat mahdollistivat lämpöpumppujen hyötysuhteiden tarkan laskemisen tunneittain. Kun lämpöpumppujen energiantuotot ja sähköenergiankulutukset tiedettiin, oli helppo laskea lämpöpumpputyypin vuosihyötysuhteet, joissa lämmin käyttöveden tuotto ja tilojen lämmitys oli erikseen huomioitu. Kaikki lasketut SCOPit ovat nähtävissä tulostaulukoissa 3–6.

Kuvioissa 31 ja 32 on esitetty esimerkkinä maalämpöpumpun ja ilma-vesilämpöpumpun vuosihyötysuhteet, kun kyseessä on kolmitieventtiilillä tehty rinnankytkentä kaukolämpöön lämpimälle käyttövedelle (Ei K1-mukainen kytkentä). Vaikka lämpöpumpputyypin hyötysuhteet eivät olekaan suoraan vertailukelpoiset, koska toinen perustuu teoreettiselle ja toinen käytännön pohjalle, voidaan kuvioista havaita niiden yhdenmukaiset käyttäytymiset menoveden lämpötilamuutosten mukaan. Edelleen voidaan karkeasti todeta maalämpöpumpun hyötysuhteiden olevan oletuksien mukaisesti korkeampia ja vaihtelun eri lämpötilatasojen välillä suurempaa. Ilma-vesilämpöpumpun SCOP:ien erot eri lämpötilatasojen välillä rakennuksissa, joissa on vähäinen käyttöveden kulutus, ovat melko pienet.

Koska tilojen ja ilmanvaihdon ulkolämpötilakompensointi nostaa lämpöpumpun hyötysuhdetta sään lauhtuessa, ovat todelliset vuosihyötysuhteet paremmat, kuin hetkelliset COP:it. Esimerkiksi verrattaessa kuviossa 31 esitettyjä maalämmön vuosihyötysuhteita vastaaviin työssä esitettyihin hetkellisten COP:ien arvoihin (ks. kuvio 18) huomataan, että rakennustyyppistä riippuen erot voivat olla noin 0,4–0,8. Asuin-kerrostalon kohdalla lämpimän käyttöveden lämmityksen suurin osuus muihin rakennustyyppisiin verrattuna puolestaan pienentää vuosilämpökerrointa oleellisesti.



Kuvio 31. Maalämpöpumpun vuosihyötysuhteet (Ei K1-mukainen LKV-kytkentä)



Kuvio 32. Ilma-vesilämpöpumpun vuosihyötysuhteet (Ei K1-mukainen LKV-kytkentä)

Ilma-vesilämpöpumpun SCOP:eissa (ks. kuvio 32) huomio kiinnittyy asuinkerrostalon jyrkästi laskevaan käyrään. Menoveden lämpötilan 40 °C kohdalla hyötysuhteen arvo on parempi kuin muilla rakennustyypeillä. Tätä selittää parhaiten lämpimän käyttöveden valmistus asuintaloissa myös kesäaikaan, kun tilojen lämmitykseen kuluva lämmöntarve on kaikilla rakennustyypeillä minimissään. Toisin kuin maalämmössä ilma-



vesilämpöpumpun hyötysuhde paranee lämpimän käyttöveden tuoton tapauksessa, kun ulkolämpötilat nousevat. Koko vuotuinen lämmitystehontarve huomioon ottaen asuinkerrostalojen lämpimän käyttöveden kesäajan lämmitys etenkin matalille lämpötilatasoille siis nostaa vuosihyötysuhdetta ilma-vesilämpöpumpulla verrattuna muihin rakennustyyppeihin.

Yleisesti tässä työssä lasketut vuosihyötysuhteen arvot vaikuttaisivat järkeviltä ja luotettavilta sijoittuen ympäristöministeriön julkaisemien alhaisempien arvojen (ks. taulukot 1 ja 2) ja toisaalta joidenkin laitevalmistajien ilmoittamien korkeampien arvojen väliin.

### 5.3 Muita huomioita

Energianpeittoasteen vaatimuksella 97 % saatiin maalämpöpumpuille eri vaihtoehdoissa osastehoiksi 35–65 % tarvittavista kokonaislämmitystehontarpeista. Tämä vastaa hyvin yleistä nyökkisääntöä noin 50 %:n osatehomitoituksesta.

Ilma-vesilämpöpumpun mitoituksessa oli lähtökohtana noin 97–98 %:n energianpeitto tarvittavista energioista kullekin lämpötilatasolle, jotta vertailu olisi energioiden osalta yhdenmukainen. Tämä lähtökohta johti siihen, että eri rakennustyyppeihin valittavien lämpöpumppujen nimellistehojen (+7 °C:ssa) suhde tarvittavaan maksimilämmitystehoon vaihteli suuresti (ks. liitteet 3–6). Suhteet olivat noin 50–130 % rakennustyyppistä ja lämpimän käyttöveden kytkennästä riippuen. Tämä on merkittävä huomio, koska ulkolämpötilassa -20 °C kaikissa tapauksissa kunkin lämpöpumpun tehontuotto vaihteli noin 30–50 % välillä kokonaislämmitystarpeesta. Tämä viittaa siihen, että ilma-vesilämpöpumpun mitoituksessa kannattaa kiinnittää huomiota siihen, halutaanko painottaa säästöä energianpeittoasteen mukaan muuttuvissa lämpöpumpun investointikustannuksissa vai energiakustannuksissa.

## 6 Johtopäätökset ja tulosten pohdintaa

Peilaten tutkimuksen lähtökohtiin voidaan saatujen tulosten perusteella todeta, että kaikki määritellyt tavoitteet saavutettiin. Toimeksiantajan tarvitsema optimointilaskuri saatiin toteutettua. Laskurilla saadaan selvitettyä rakennuskohteen kustannustehokkain lämpötilataso kaukolämpöön liitettyssä lämpöpumppujärjestelmässä. Tärkeimpien tavoitteiden ohella saatiin myös muita optimointityökalun jatkokehitystyön kannalta kiinnostavia tuloksia, kuten maalämpöpumpun ja ilma-vesilämpöpumpun vuosihyötysuhteet.

Tulosten perusteella on kustannustehokkaampaa tuottaa lämpöpumpulla kaukolämmön hybridilämmitysjärjestelmässä energiatehokkuuden kannalta epäedullisia korkeampia menoveden lämpötiloja 50–60 °C. Tämä pätee erityisesti, kun kyseessä ovat vesikiertoisilla radiaattoreilla ja lämmityspaneeleilla toteutetut uudisrakennusten lämmitysratkaisut asuinkerrostaloissa, toimistorakennuksissa tai opetusrakennuksissa. Laskuriin syötettävistä rakennuskohteen lähtötietovalinnoista riippuen kahden vierekkäisen lämpötilatason välillä ei välttämättä ole suurta euromääräistä eroa, joten jää suunnittelijan vastuulle päättää, mikä lämpötilataso on järjestelmän kokonaisuuden kannalta järkevin toteuttaa.

Vaikuttaisi siltä, että optimoinnin tulos määräytyy pääasiassa investointikustannusten perusteella. Vaikka lämpöpumpulla saavutetaan järjestelmän elinkaaren aikana suuri energiansäästö, eivät erot vertailulämpötilatasojen välillä ole välttämättä kovin merkittäviä. Kokonaisuutena elinkaarikustannuksen erot määräytyvät selvimmin lämmönjaon laitteiden selvistä hintaeroista eri lämpötilatasojen välillä ja putkikustannusten suuresta kokonaiskustannusvaikutuksesta. Etenkin alin työssä tarkasteltu 40 °C:en lämpötilataso aiheuttaa tarkasteltujen lämmönjaon laitteiden osalta suurimman investointikustannusvaikutuksen suhteessa muihin lämpötilatasoihin. Lämpöpumpulla saatavat energiakustannussäästöt alkavat tasoittaa investointikustannusten aiheuttamia eroja vertailulämpötilatasojen välillä vasta, kun elinkaarikustannusten tarkastelu-aika on riittävän pitkä.

Kauppakeskuksen tilalämmitystehon osuus oli rakennustyypeistä pienin suhteessa ilmanvaihdon lämmitystehon osuuteen, joten päätelaitteiden kustannukset jäävät laskurissa vähäiseksi verrattuna muihin investointeihin ja energiakustannussäästöihin. Suurilla pinta-aloilla energiakustannussäästöt dominoivat selvästi matalilla lämpötilatasoilla suhteessa investointikustannuksiin. Tällöin optimointilaskuri antoi tulokseksi yleisestä linjasta poiketen myös 40 °C ja 45 °C lämpötilatasoja.

Kehitystyön edetessä ilmeni, että kauppakeskus ei välttämättä sovellu samanlaiseen tarkasteluun muiden tässä työssä käsiteltyjen rakennustyyppien kanssa. Kauppakeskusten osalta lämmitysjärjestelmät on voitu jakaa useaan lämmityksen kannalta erilaiseen palvelualueeseen. Myös ilmanvaihdon lämmityksen suurempi osuus tilalämmitykseen verrattuna poikkeaa muista tässä työssä käsitellyistä kohteista. Tämän vuoksi liike- ja kauppakeskusten tarkasteluun optimointilaskurilla tulee suhtautua kriittisesti.

## 6.1 Luotettavuuden tarkastelu

Tuloksena saadun optimointityökalun laskennan lähtötiedot perustuvat suureen määrään erilaista analysoitua numeerista data-aineistoa. Työvaiheet vaativat useita eri menetelmiä ja yksinkertaistuksia, joten tulosten luotettavuuteen tuli kiinnittää huomiota. Lähtökohtana työssä oli etsiä tekijät, jotka vaikuttaisivat eroihin eri vertailulämpötilojen välillä, kun kyseessä on sama yhden tietyn kohteen lämmitysjärjestelmä. Näiden tekijöiden löytäminen helpotti myös luotettavuuden arviointia, koska työn tavoite ei ollut vertailla keskenään esimerkiksi eri rakennustyyppien antamia tuloksia.

Käytettyä lähtödataa eri rakennustyyppien tuntitehojen ja energiankulutusprofiilien suhteen vidaan pitää melko luotettavina. Tiedot perustuivat laskennallisiin, asetusten mukaisin suunnitteluarvoin saatuihin simulointituloksiin suunnitteilla olevista kohteista. Rakennustyyppien käyttötarkoitusten erot tulivat aineistosta hyvin esiin.

Maalämpöpumpun mitoitukseen käytetty pysyvyyskäyrämenetelmä on yleisesti käytössä ja saadut osatehojen suuruusluokat vastasivat sekä kirjallisuudesta löytyviä tietoja että asiantuntijoiden arvioita. Maalämpöpumpun hyötysuhteen laskennassa käytetty teoreettinen lähestymistapa johti epäilyttävän suuriin COP:ien arvoihin, joita tämän vuoksi pienennettiin eri lähteistä löytyvien vertailuarvojen perusteella.

Ilma-vesilämpöpumpun mitoitus ja lämpökertoimien määritykset perustuivat yhden todellisen laitteen teho- ja lämpökerrointietoihin. Kyseessä oli tehokas, uusinta tekniikka sisältävä laite, joten tulokset eivät välttämättä ole yleistettävissä kaikille markkinoilla oleville ilma-vesilämpöpumpuille. Itse mitoituksessa ja COP:ien määrityksissä jouduttiin tekemään yksinkertaistuksia, mutta koska laskentamenetelmät olivat kaikille lämpötilatasoille samat, eivät ne vaikuta oleellisesti tuloksiin. Esimerkiksi lämpöpumpun vuosihyötysuhteet olivat samansuuntaiset lähteistä löytyvien arvojen kanssa.

Investointikustannusten kohdalla ongelmia aiheutti lämpöpumppujen hintojen epälineaarinen vaihtelu laitteen tehon mukaan. Optimointilaskurin tulosten mukaan lämpöpumpun hinnan muutokset eri lämpötilatasojen välillä tietyn rakennuskohteen lähtöarvoilla ovat kuitenkin suhteellisen pienet, eikä niillä ole tulokseen suurta vaikutusta.

Lämmönjaon päätelaitteiden kustannusten kasvu kaikilla vaihtoehtoilla verkoston menoveden lämpötilan laskiessa ei ollut yllätys. Huomiota herättää kuitenkin radiaattoreiden neliöhinnan suuri kasvu, kun verkoston lämpötilat muuttuvat 45/30 °C:sta 40/25 °C:een. Kuitenkin juuri tämä hintatarkastelu oli muihin laitteisiin verrattuna luotettavin, koska lämmönluovutustehot eri lämpötilatasoilla perustuvat useiden eri kokoisten lämmönluovutustehovaatimukset täyttävien radiaattoreiden hintatietoihin ja laitevalmistajan teholaskuriin.

Suurin havaittu laskurin toimintaan vaikuttava yksittäinen virhelähde on putkiverkoston hintojen määrityksen menetelmä, joka aiheuttaa hyppäyksen putkikustannuksiin suuremmilla tilalämmitystehoilla lämpötilatasojen 50 °C ja 55 °C välillä. Tietyillä las-

kurin lähtötietovalinnoilla ja suurilla pinta-aloilla tämä aiheuttaa 50 °C:en lämpötilassa putki-investointikustannuksen suuren kasvun ja täten kannattavuuden laskua suhteessa muihin lämpötilatasoihin. Menetelmää olisi hyvä tältä osin korjata ja tarkentaa, jotta optimointituloksen luotettavuutta voitaisiin parantaa.

Elinkaarikustannusten luotettavuutta energiansäästölaskelmissa paransivat manuaalisesti syötettävissä olevat sähkön ja kaukolämmön hinnat, jotka voivat vaihdella suuresti energiayhtiöittäin. Hintoja ei laskurissa kuitenkaan eritelty tulevaisuuden energian hintojen nousun osalta, vaan käytettiin yhtä yhteistä korkoprosenttia. Tätä voisi laskurissa vielä kehittää.

## 6.2 Optimointityökalun käytön rajoitukset ja jatkokehitys

Suunnitellulla laskurilla voidaan melko luotettavasti karkealla tasolla arvioida lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötilan optimaalisuutta elinkaarikustannusten näkökulmasta. Täytyy kuitenkin huomioida, että laskuri on kehitetty ainoastaan lämpötilatasojen keskinäiseen vertailuun. Se perustuu vain tekijöihin ja muuttujiin, joiden arvot vaihtelevat verkoston lämpötilan mukaan ja joilla on arveltu olevan vaikutusta tämän vaihtelun kautta joko järjestelmän investointikustannuksiin tai energiakustannussäästöön.

Laskuria ei ole tarkoitettu eri lämmitysjärjestelmien, rakennustyyppien tai erikokoisten rakennusten vertailuun eikä eksaktien kustannusten, energiakustannussäästöjen tai takaisinmaksuaikojen laskemiseen. Työkalu ei myöskään sovellu saneerauskohteiden lämmitysverkoston lämpötilaoptimointiin, koska peruslähtökohdiltaan laskelmat perustuvat nykyasetusten mukaisten energiatehokkaiden rakennusten suunniteluarvoihin.

Laskuria voidaan kuitenkin tarvittaessa kehittää palvelemaan myös edellä mainittuja tällä hetkellä epäsoivia tarkoituksia. Laskuriin voisi lisätä mahdollisuuden syöttää lähtötiedoiksi esimerkiksi lämmityksen vuosienergiankulutuksen ja lämpimän käyttöveden tilojen lämmityksestä poikkeavan lämpötilatason. Haluttaessa myös lämpimän veden kiertojohdon osuus tulisi valinnaiseksi. Lämpöpumppujen tulistuslämmön

osuuden hyödyntämistä käyttöveden lämmityksessä voisi erikseen tarkastella. Lisäksi sähkön ja kaukolämmön tulevat hintakehitykset olisivat eriteltävissä toisistaan nykyisen yhteisen hintaennusteen sijaan. Työn laajuuden vuoksi tarkastelu rajattiin koskemaan vain säävyöhykettä 1. Optimointityökalun laskentaa pystyisi laajentamaan myös muille Suomen säävyöhykkeille.

Laskurin elinkaarilaskennan ja lähtötietomäärittelyjen periaatteita olisi mahdollista kehittää eteenpäin eri lämmitysmuotojen vertailun tarpeisiin lämpöpumppujen käytön näkökulmasta. Tällöin ei siis vertailtaisi enää lämpötilatasoja, vaan järjestelmiä, jolloin tarkasteluihin olisi tarpeen ottaa mukaan nykyisessä versiossa pois jätetyt tekijät, kuten asennus- ja huoltokustannukset, laitteiden uusimiskustannukset ja kaukolämmön liittymiskustannukset.

### 6.3 Vähähiilisyystavoitteet ja optimointitulos

Kehittämistutkimuksena tehdyn työn tarkasteluissa yhdistyivät kolme eri osa-aluetta, energiatehokkuus, materiaalitehokkuus ja kustannustehokkuus. Kun palataan tämän työn alkuun ja vähähiilisen rakentamisen tavoitteisiin tulevaisuudessa, voidaan tuloksien perusteella todeta, että elinkaarikustannusten määrittäessä rakentamisen valintoja, ei oleellisinta energiatehokkuuden parantamisen tavoitetta välttämättä täysin saavuteta. Korkea menoveden mitoitustilalämpötila vähentää materiaalien käyttöä lämmönjakoverkostossa, mikä on materiaalitehokkuuden kannalta hyvä asia. Lämpöpumppu tuottaa suuren määrän ilmaisenergiaa lämpötilatasosta riippumatta parantaen lämmöntuotannon energiatehokkuutta ja vähentäen hiilijalanjälkeä. Lämpöpumpun parhaimpaan hyötysuhteeseen ja energiatehokkuuteen ei tämän tutkimuksen tulosten perusteella kuitenkaan päästä. Kustannustehokkain optimaalinen lämpötilataso siis toisaalta vähentää materiaalien käyttöä, mutta toisaalta nostaa lämpöpumpun kompressorin sähkönkulutusta.

Oleellinen johtopäätös tuloksista on, että lämmitysverkoston investointikustannukset kuluttavat selvästi lämpöpumpuilla saatavaa säästöä matalilla lämmityksen menoveden lämpötiloilla. Olettamus siitä, että verkoston matalan lämpötilan tuottaminen on aina kannattavaa, ei siis pidä kokonaistaloudellisesti paikkaansa. Tällä lopputulemalla

ei tietenkään poisteta lämpöpumpun käytön tuomia hyötyjä rakennuksen elinkaaren aikana hiilijalanjäljen pienentämisen ja erityisesti energiatehokkuuden kannalta. Ilmaisenergian hyödyntämisen tuomat säästöt ostoenergiaan verrattuna ovat kuitenkin vuosittain ja erityisesti laitteiston elinkaaren aikana huomattavat.

Yleinen mielipide lämpöpumpuista on, että oikein mitoitettuina, asennettuina ja käytettyinä, mukaan lukien huolellinen automaatio suunnittelu koko järjestelmässä, ne säästävät energiaa ja ovat hyvä investointi kiinteistöille. Jokainen lämpöpumppuhan kinta täytyy kuitenkin suunnitella yksilöllisesti. Järjestelmät etenkin isompiin kohteisiin vaativat riittävää ymmärrystä esimerkiksi sopivan laitteen ja kylmäaineen valinnasta, tulevasta lämmitysjärjestelmästä ja sen lämpötilatasojen merkityksestä järjestelmän tehokkaalle toiminnalle.

## Lähteet

A 1009/2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdesta. Suomen säädöskokoelma. 13.10.2020. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009>. Ajantasainen lainsäädäntö.

A 1010/2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Suomen säädöskokoelma. Viitattu 13.10.2020. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>. Ajantasainen lainsäädäntö.

Aalto, E., Alijoki T., Hakala, P., Hirvelä A., Kaappola E., Mentula J. & Seinelä A. 2012. Kylmätekniikka. 4. p. Toim. A. Aittomäki. Suomen Kylmäyhdistys ry. Porvoo: Bookwell.

Asumisen energiankulutus. 2019. Tilastokeskuksen Suomen virallinen tilasto. Verkkojulkaisu. Viitattu 15.10.2020. [https://www.stat.fi/til/asen/2018/asen\\_2018\\_2019-11-21\\_fi.pdf](https://www.stat.fi/til/asen/2018/asen_2018_2019-11-21_fi.pdf).

Ekocoil. N.d. Lamellipatterit. Valmistajan tuotetietosivusto. Viitattu 15.10.2020. [http://www.ekocoil.fi/assets/lamellipatterit\\_uusi\\_pohja.pdf](http://www.ekocoil.fi/assets/lamellipatterit_uusi_pohja.pdf).

Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. N.d. Ilmatieteen laitoksen avoin data rakennusten energiankulutusten vertailuun. Viitattu 18.6.2020 <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky>.

Energian hinnat. 2020. Tilastokeskuksen Suomen virallinen tilasto. Verkkojulkaisu. Viitattu 20.10.2020. [https://www.stat.fi/til/ehi/2020/02/ehi\\_2020\\_02\\_2020-09-10\\_fi.pdf](https://www.stat.fi/til/ehi/2020/02/ehi_2020_02_2020-09-10_fi.pdf).

Esimerkki lämpöpumpun laskemisesta. 2018. Esimerkki poistoilma- ja ilma-vesilämpöpumpun laskemisesta Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskentaohjeen mukaisesti. Energiatodistusoppaan 2018 liite. Ympäristöministeriö. Viitattu 19.10.2020. [https://www.motiva.fi/files/16491/Esimerkki\\_poistoilma\\_ ja\\_ilma-vesi\\_-lampopumpun\\_laskemisesta\\_Rakennuksen\\_energiankulutuksen\\_ ja\\_lammitystehontarpeen\\_laskenta-ohjeen\\_mukaisesti.pdf](https://www.motiva.fi/files/16491/Esimerkki_poistoilma_ ja_ilma-vesi_-lampopumpun_laskemisesta_Rakennuksen_energiankulutuksen_ ja_lammitystehontarpeen_laskenta-ohjeen_mukaisesti.pdf). Motiva.

EU A 517/2014. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus fluoratuista kasvihuonekaasuista. Viitattu 14.10.2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=RO>. EU:n ajantasainen lainsäädäntö.

Hakala, P. & Kaappola, E. 2013. Kylmälaitoksen suunnittelu. 3. p. Tampere: Opetushallitus.

Hwang, Y., Xu, X., Radermacher, R. & Pham, H. M. 2012. Performance Measurement of R32 Vapor Injection Heat Pump System. International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1261. Purdue:n yliopiston verkkojulkaisu. Viitattu 18.10.2020. <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/1261>.



- IDA ICE. N.d. IDA Indoor Climate and Energy-energiasimulointiohjelman esittely. Viitattu 9.7.2020. <https://www.equa.se/en/ida-ice>.
- Ilmasto- ja energiastrategia. 2020. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisema hallitusohjelman mukainen valtioneuvoston valmisteleva ilmasto- ja energiastrategia. Viitattu 22.10.2020. <https://tem.fi/ilmasto-ja-energiastrategia>.
- Ipu. N.d. Coolpack v1.5.0-simulointisovellus kylmäteknisiin järjestelmiin. Viitattu 27.10.2020. <https://www.ipu.dk/products/coolpack/>.
- Itucalc. N.d. Itulan mitoitusohjelma lämmitys- ja jäähdytyspaneelille. Viitattu 12.8.2020. <https://www.itula.fi/itucalc>.
- Itula. N.d. Itugraf-lämmitys- ja jäähdytyspaneelit. Valmistajan laitetietoa. Viitattu 15.10.2020. [https://www.itula.fi/sites/default/files/2020-02/ItuGraf%20yleis-esite%202020%201.1\\_1.pdf](https://www.itula.fi/sites/default/files/2020-02/ItuGraf%20yleis-esite%202020%201.1_1.pdf).
- Juvonen J. & Lapinlampi T. 2013. Energiakaivo. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas. Ympäristöministeriön julkaisu. Viitattu 22.10.2020. [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO\\_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Jylhä, K., Kalamees, T., Tietäväinen, H., Ruosteenoja, K., Jokisalo, J., Hyvönen, R., Ilomets, S., Saku, S. & Huttila, A. 2011. Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista. Ilmatieteen laitoksen raportteja, 2011:6. Verkkoversio ISBN 978-951-697-756-3 (pdf). Viitattu 18.6.2020. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/33069>.
- Järvinen, J. 2018. Vesi-ilmalämpöpumpun mitoitus. Opinnäytetyö. Insinööri (AMK). Talotekniikan tutkinto-ohjelma. Metropolia ammattikorkeakoulu. Viitattu 22.10.2020. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2018121020797>.
- Kaappola, E., Hirvelä, A., Jokela, M. & Kianta, J. 2018. Kylmätekniiikan perusteet. 8. painos. Helsinki: Opetushallitus.
- Kananen, J. 2015. Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja 212. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- Kananen, J. 2019. Opinnäytetyön ja pro gradun pikaopas. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja 262. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- Ketola J., Lairi V., Laulumaa M. & Nieminen J. 2017. Talotekniikka. Helsinki: Sanoma Pro.
- Kianta, J. 2018. Kylmätekniiikan käsikirja. Tampere.
- Korona romahdutti energian hinnan. 2020. YLE- uutissuomalaisen uutisartikkeli 12.5.2020. Viitattu 20.10.2020. <https://yle.fi/uutiset/3-11346848>.

Laitinen, A., Tuominen, P., Holopainen, R., Tuomaala, P., Jokisalo, J., Eskola, L. & Siiren, K. 2014. Renewable energy production of Finnish heat pumps. 126 s. Espoo: VTT. 22.10.2020. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2014/T164.pdf>.

LVI 11-10624. 2018. Maalämpöpumput. Perustietoja maalämpöpumppujärjestelmästä. Rakennustiedon LVI-ohjekortti. Viitattu 22.10.2020. <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/LVI%2011-10624>. RT-kortisto.

Lähes nollaenergiarakennus. N.d. Rakennusteollisuuden verkkosivu. Viitattu 15.10.2020. <https://www.rakennusteollisuus.fi/Rakennusteollisuus-RT/Rakentamisen-kehittaminen/Tutkimushankkeita-rakentamisen-energiatehokkuudesta/Lahes-nollaenergiatalo-nZEB/>.

Minghong, Y., Baolong W., Xianting L., Wenxing S. & Leping Z. 2015. Evaluation of two-phase suction, liquid injection and two-phase injection for decreasing the discharge temperature of the R32 scroll compressor. International Journal of Refrigeration, 59, 269-280. Verkkoversio. Viitattu 18.10.2020. <http://manuscript.elsevier.com/S0140700715002479/pdf/S0140700715002479.pdf>

Pulakka, S., Heimonen, I., Junnonen, J.-M. & Vuolle, M. 2007. Talotekniikan elinkaarikustannukset. VTT Tiedotteita, Research Notes 2409, 58 s. + liitteet 3 s.

Purmo. N.d. Vesikiertoiset radiaattorit. Viitattu 15.10.2020. <https://www.purmo.com/fi/tuotteet/vesikiertoiset-radiaattorit.htm>.

Rakennusten kaukolämmitys. 2014. Määräykset ja ohjeet. Energiateollisuus ry:n julkaisu K1/2013. Viitattu 15.10.2020. [https://energia.fi/files/502/JulkaistuK1\\_2013\\_20140509.pdf](https://energia.fi/files/502/JulkaistuK1_2013_20140509.pdf).

Riuska. N.d. Energiasimulointiohjelman esittely. Viitattu 9.7.2020. [https://www.magicad.com/en/mc\\_software/magicad-comfort-energy/#features-for-autocad](https://www.magicad.com/en/mc_software/magicad-comfort-energy/#features-for-autocad).

RT RakMK-103174. 2018. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Suomen rakennusmääräyskokoelma. Ympäristöministeriö. RT ohjekortti. Viitattu 14.10.2020. <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%20RakMK-103174>. RT-kortisto.

RT 07-11299. 2018. Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunniteluohjeet ja tuotevaatimukset. RT-ohjekortti. Rakennustieto. Viitattu 24.9.2020 <https://www.sisailmayhdistys.fi/Julkaisut/Sisailmastoluokitus>. RT-kortisto.

Sandberg, E. 2014. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointitekniikka osa 1. Talotekniikka-Julkaisut.

SULPU ry. N.d. Suomen lämpöpumppuyhdistyksen tilastoja. Viitattu 15.10.2020. <https://www.sulpu.fi/tilastot>.

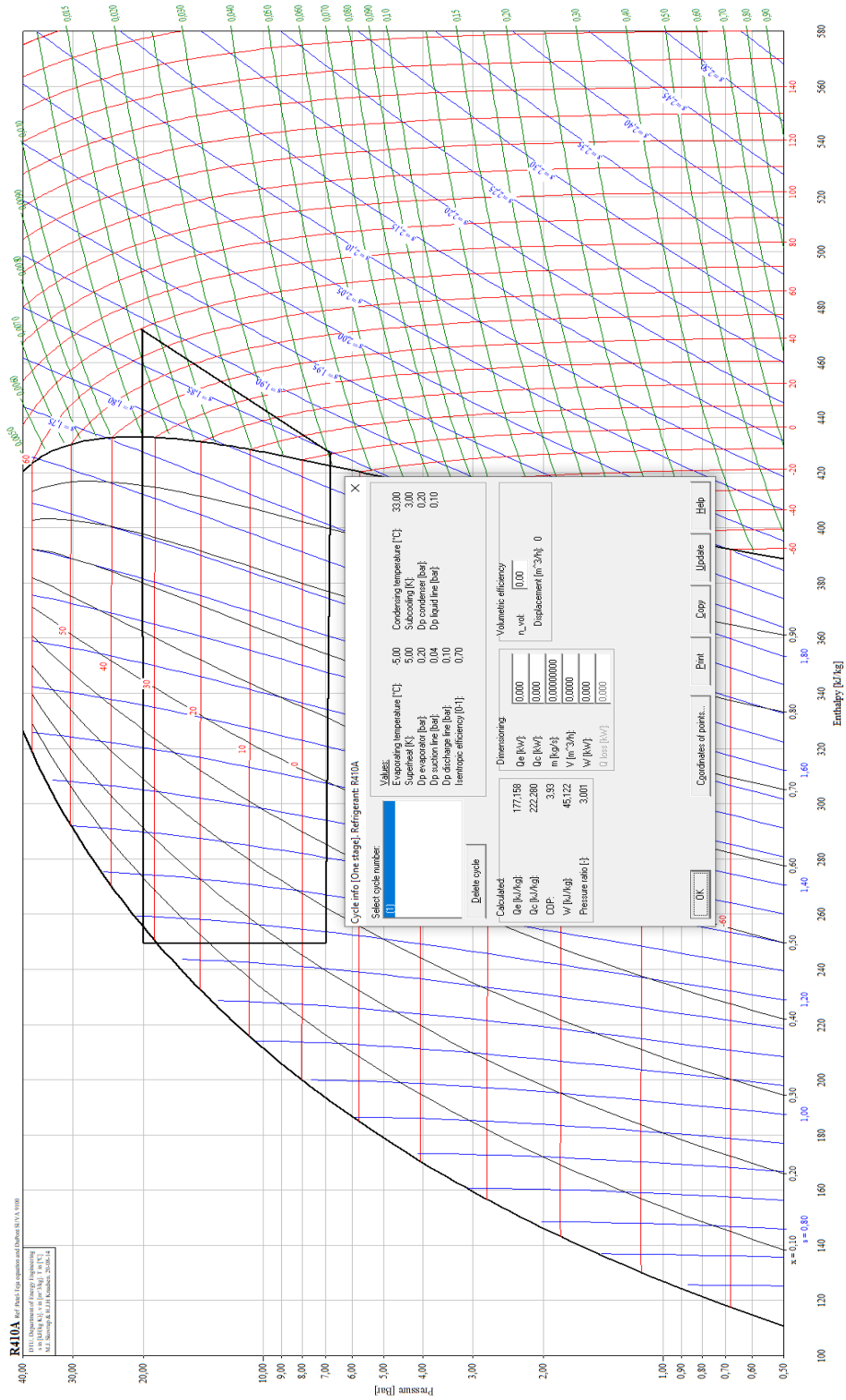
Teholaskuri. N.d. Laittevalmistajan laskuri vesikiertoisten radiaattoreiden teholaskentaan. Viitattu 12.8.2020. <https://www.purmo.com/fi/ladattavat-tiedostot/teholaskentaohjelmat.htm>.

Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035. 2020. Rakennusteollisuuden julkaisu. Osa 4. Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisuuden tiekartta 2020–2035–2050. Lopullinen versio. Viitattu 27.8.2020. [https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys\\_uudet/rt\\_4.-raportti\\_vahahiilisuuden-tiekartta\\_lopullinen-versio\\_clean.pdf](https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys_uudet/rt_4.-raportti_vahahiilisuuden-tiekartta_lopullinen-versio_clean.pdf)

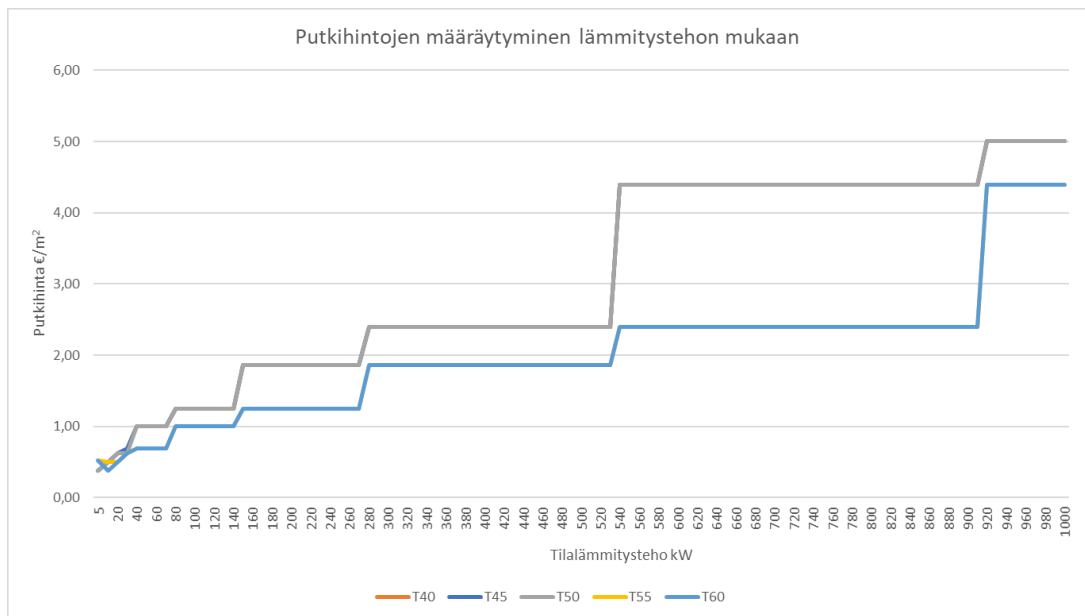
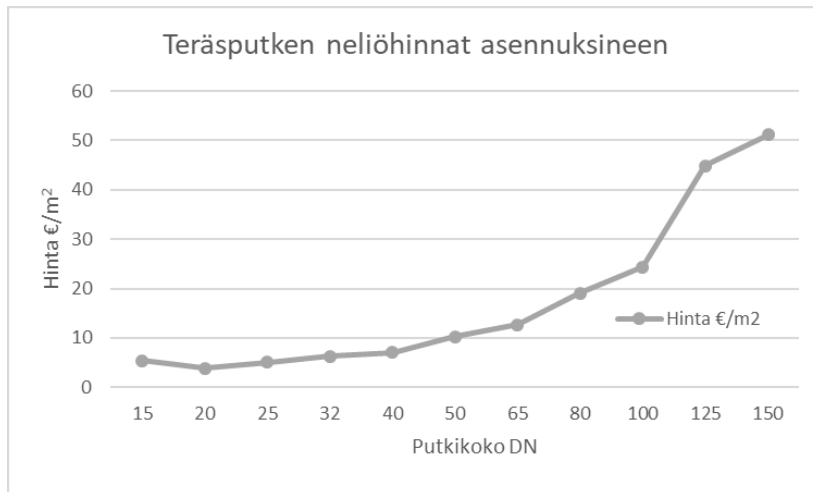
Wang, Y., Ye, Z. & Cao, F. 2018. Performance Investigation of Two-stage Heat Pump with Vapor Injection Using R410A as Working Fluid. International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1905. Viitattu 18.10.2020. <https://docs.lib.purdue.edu/iracc/1905>.

# Liitteet

## Liite 1. Coolpack-ohjelmalla tehty lämpökertoimen laskentaesimerkki



Liite 2. Putkihinnat putkikokojen ja tehojen mukaan (Alemmassa kuviossa ovat ylemmällä käyrällä päällekkäin lämpötilatasot 40, 45 ja 50 °C (T40, T45 ja T50) ja alemmalla käyrällä 55 ja 60 °C (T55 ja T60))



Liite 3. Asuinkerrostalo, välituloksia (Käytetyt energian hinnat:  
kaukolämpö 70 €/MWh ja sähkö 100 €/MWh)

<b>Asuinkerrostalo (LKV 48% kok.energiasta)</b>						
(Esimerkkihinnat kaukolämpö 70€/MWh, sähkö 100 €/MWh)						
<b>Maalämpöpumppu, EI K1-mukaista kytkentää (LKV 100%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	61260	61260	61260	61260	61260	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	40122	43081	46041	49000	50775	Wh/m2
LP tuottama energia	38925	41792	44636	47514	49235	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	8011	9599	11401	13351	14870	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	1,56	1,36	1,16	0,96	0,84	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	0,80	0,96	1,14	1,34	1,49	€/m2
LP energiakustannussäästö	1,92	1,97	1,98	1,99	1,96	€/m2
Lämpöpumpun teho	11,6	12,0	12,4	12,9	13,2	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	8,35	8,69	8,97	9,22	9,28	€/m2
SCOP (sis. LKV)	4,86	4,35	3,92	3,56	3,31	
LP teho/maxlämmitysteho	52 %	51 %	50 %	50 %	50 %	
<b>Maalämpöpumppu, K1-mukainen kytkentä (LKV noin 50%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	61260	61260	61260	61260	61260	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	25326	28285	31244	34204	34204	Wh/m2
LP tuottama energia	24571	27452	30323	33169	33169	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	4808	5918	7220	8674	9177	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	2,57	2,37	2,17	1,97	1,97	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	0,48	0,59	0,72	0,87	0,92	€/m2
LP energiakustannussäästö	1,24	1,33	1,40	1,45	1,40	€/m2
Lämpöpumpun teho	10,3	10,5	10,7	10,9	10,9	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	5,34	5,81	6,24	6,61	6,48	€/m2
SCOP (sis. LKV)	5,11	4,64	4,20	3,82	3,61	
LP teho/maxlämmitysteho	60 %	58 %	56 %	54 %	54 %	
<b>Ilma-vesilämpöpumppu, EI K1-mukaista kytkentää (LKV 100%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	61260	61260	61260	61260	61260	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	40122	43081	46041	49000	50775	Wh/m2
LP tuottama energia	39094	42064	45029	47991	49889	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	11467	12887	14519	16415	18200	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	1,55	1,34	1,14	0,93	0,80	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	1,15	1,29	1,45	1,64	1,82	€/m2
LP energiakustannussäästö	1,59	1,66	1,70	1,72	1,67	€/m2
Lämpöpumpun teho	24,5	25,3	26,2	27,1	28,2	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	-	-	-	-	-	
SCOP (sis. LKV)	3,41	3,26	3,10	2,92	2,74	
LP teho/maxlämmitysteho	109 %	107 %	106 %	105 %	107 %	
<b>Ilma-vesilämpöpumppu, K1-mukainen kytkentä (LKV noin 50%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	61260	61260	61260	61260	61260	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	25326	28285	31244	34204	34204	Wh/m2
LP tuottama energia	24521	27511	30498	33478	33584	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	7330	8451	9736	11225	11834	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	2,57	2,36	2,15	1,94	1,94	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	0,73	0,85	0,97	1,12	1,18	€/m2
LP energiakustannussäästö	0,98	1,08	1,16	1,22	1,17	€/m2
Lämpöpumpun teho	23,1	24,0	25,0	25,9	26,8	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	-	-	-	-	-	
SCOP (sis. LKV)	3,35	3,26	3,13	2,98	2,84	
LP teho/maxlämmitysteho	129 %	128 %	127 %	126 %	130 %	

Liite 4. Toimistorakennus, välituloksia (Käytetyt energian hinnat:  
kaukolämpö 70 €/MWh ja sähkö 100 €/MWh)

<b>Toimistorakennus (LKV 14% kok.energiasta)</b>						
(Esimerkkihinnat kaukolämpö 70€/MWh, sähkö 100 €/MWh)						
<b>Maalämpöpumppu, EI K1-mukaista kytkentää (LKV 100%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	43512	43512	43512	43512	43512	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	38207	38807	39407	40007	40367	Wh/m2
LP tuottama energia	37071	37638	38233	38797	39165	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	7134	7765	8426	9066	9570	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	0,45	0,41	0,37	0,33	0,30	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	0,71	0,78	0,84	0,91	0,96	€/m2
LP energiakustannussäästö	1,88	1,86	1,83	1,81	1,78	€/m2
Lämpöpumpun teho	15,2	15,2	15,3	15,3	15,4	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	8,08	8,07	8,05	8,03	7,99	€/m2
SCOP (sis. LKV)	5,20	4,85	4,54	4,28	4,09	
LP teho/maxlämmitysteho	42 %	42 %	43 %	43 %	43 %	
<b>Maalämpöpumppu, K1-mukainen kytkentä (LKV noin 50%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	43512	43512	43512	43512	43512	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	35207	35807	36407	37007	37007	Wh/m2
LP tuottama energia	34151	34755	35358	35959	35959	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	6482	7024	7576	8126	8429	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	0,66	0,61	0,57	0,53	0,53	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	0,65	0,70	0,76	0,81	0,84	€/m2
LP energiakustannussäästö	1,74	1,73	1,72	1,70	1,67	€/m2
Lämpöpumpun teho	15	15,1	15,2	15,3	15,3	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	7,47	7,49	7,50	7,51	7,43	€/m2
SCOP (sis. LKV)	5,27	4,95	4,67	4,43	4,27	
LP teho/maxlämmitysteho	42 %	42 %	42 %	43 %	43 %	
<b>Ilma-vesilämpöpumppu, EI K1-mukaista kytkentää (LKV 100%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	43512	43512	43512	43512	43512	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	38207	38807	39407	40007	40367	Wh/m2
LP tuottama energia	37600	38126	38659	39194	39503	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	11185	11604	12075	12608	13122	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	0,41	0,38	0,34	0,30	0,28	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	1,12	1,16	1,21	1,26	1,31	€/m2
LP energiakustannussäästö	1,51	1,51	1,50	1,48	1,45	€/m2
Lämpöpumpun teho	30,7	30,7	30,7	30,7	30,8	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	-	-	-	-	-	
SCOP (sis. LKV)	3,36	3,29	3,20	3,11	3,01	
LP teho/maxlämmitysteho	85 %	85 %	85 %	85 %	86 %	
<b>Ilma-vesilämpöpumppu, K1-mukainen kytkentä (LKV noin 50%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	43512	43512	43512	43512	43512	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	35207	35807	36407	37007	37007	Wh/m2
LP tuottama energia	34227	34780	35346	35919	35862	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	10218	10580	10986	11444	11717	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	0,65	0,61	0,57	0,53	0,54	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	1,02	1,06	1,10	1,14	1,17	€/m2
LP energiakustannussäästö	1,37	1,38	1,38	1,37	1,34	€/m2
Lämpöpumpun teho	27,9	28,1	28,4	28,7	28,9	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	-	-	-	-	-	
SCOP (sis. LKV)	3,35	3,29	3,22	3,14	3,06	
LP teho/maxlämmitysteho	78 %	78 %	79 %	80 %	80 %	

Liite 5. Opetusrakennus, välituloksia (Käytetyt energian hinnat:  
kaukolämpö 70 €/MWh ja sähkö 100 €/MWh)

<b>Opetusrakennus (LKV 17% kok energiasta)</b>						
(Esimerkkihinnat kaukolämpö 70€/MWh, sähkö 100 €/MWh)						
<b>Maalämpöpumppu, EI K1-mukaista kytkentää (LKV 100%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	54884	54884	54884	54884	54884	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	42757	43692	44627	45562	46123	Wh/m2
LP tuottama energia	41478	42385	43289	44192	44738	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	8037	8848	9706	10567	11234	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	0,94	0,87	0,81	0,75	0,71	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	0,80	0,88	0,97	1,06	1,12	€/m2
LP energiakustannussäästö	2,10	2,08	2,06	2,04	2,01	€/m2
Lämpöpumpun teho	25,3	25,4	25,5	25,6	25,7	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	9,03	9,05	9,07	9,08	9,05	€/m2
SCOP (sis. LKV)	5,16	4,79	4,46	4,18	3,98	
LP teho/maxlämmitysteho	36 %	35 %	35 %	35 %	35 %	
<b>Maalämpöpumppu, K1-mukainen kytkentä (LKV noin 50%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	54884	54884	54884	54884	54884	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	38081	39016	39951	40887	40887	Wh/m2
LP tuottama energia	36942	37842	38753	39663	39663	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	7024	7682	8382	9091	9436	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	1,26	1,19	1,13	1,07	1,07	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	0,70	0,77	0,84	0,91	0,94	€/m2
LP energiakustannussäästö	1,88	1,88	1,87	1,87	1,83	€/m2
Lämpöpumpun teho	24,9	24,9	25	25,1	25,1	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	8,08	8,14	8,20	8,25	8,16	€/m2
SCOP (sis. LKV)	5,26	4,93	4,62	4,36	4,20	
LP teho/maxlämmitysteho	36 %	36 %	36 %	36 %	36 %	
<b>Ilma-vesilämpöpumppu, EI K1-mukaista kytkentää (LKV 100%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	54884	54884	54884	54884	54884	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	42757	43692	44627	45562	46123	Wh/m2
LP tuottama energia	41383	42289	43194	44097	44710	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	12283	12876	13544	14302	15052	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	0,95	0,88	0,82	0,76	0,71	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	1,23	1,29	1,35	1,43	1,51	€/m2
LP energiakustannussäästö	1,67	1,67	1,67	1,66	1,62	€/m2
Lämpöpumpun teho	37,2	37,6	38,0	38,5	39,4	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	-	-	-	-	-	
SCOP (sis. LKV)	3,37	3,28	3,19	3,08	2,97	
LP teho/maxlämmitysteho	52 %	52 %	53 %	53 %	54 %	
<b>Ilma-vesilämpöpumppu, K1-mukainen kytkentä (LKV noin 50%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	54884	54884	54884	54884	54884	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	38081	39016	39951	40887	40887	Wh/m2
LP tuottama energia	36882	37795	38706	39616	39682	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	11008	11509	12068	12699	13087	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	1,26	1,20	1,13	1,07	1,06	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	1,10	1,15	1,21	1,27	1,31	€/m2
LP energiakustannussäästö	1,48	1,49	1,50	1,50	1,47	€/m2
Lämpöpumpun teho	37,2	37,6	38,0	38,5	39,4	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	-	-	-	-	-	
SCOP (sis. LKV)	3,35	3,28	3,21	3,12	3,03	
LP teho/maxlämmitysteho	54 %	54 %	55 %	55 %	56 %	



Liite 6. Kauppakeskus, välituloksia (Käytetyt energian hinnat:  
kaukolämpö 70 €/MWh ja sähkö 100 €/MWh)

<b>Maalämpöpumppu, EI K1-mukaista kytkentää (LKV 100%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	83372	83372	83372	83372	83372	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	81385	81937	82489	83041	83372	Wh/m2
LP tuottama energia	78965	79488	80012	80535	80849	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	14923	15927	16920	17845	18553	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	0,31	0,27	0,24	0,20	0,18	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	1,49	1,59	1,69	1,78	1,86	€/m2
LP energiakustannussäästö	4,04	3,97	3,91	3,85	3,80	€/m2
Lämpöpumpun teho	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	17,29	17,16	17,03	16,93	16,82	€/m2
SCOP (sis. LKV)	5,29	4,99	4,73	4,51	4,36	
LP teho/maxlämmitysteho	65 %	65 %	64 %	64 %	64 %	
<b>Maalämpöpumppu, K1-mukainen kytkentä (LKV noin 50%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	83372	83372	83372	83372	83372	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	78625	79177	79729	80281	80281	Wh/m2
LP tuottama energia	76256	76780	77349	77872	77872	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	14318	15233	16142	16976	17496	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	0,50	0,46	0,42	0,38	0,38	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	1,43	1,52	1,61	1,70	1,75	€/m2
LP energiakustannussäästö	3,91	3,85	3,80	3,75	3,70	€/m2
Lämpöpumpun teho	27,6	27,6	27,7	27,7	27,7	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	16,72	16,62	16,53	16,44	16,30	€/m2
SCOP (sis. LKV)	5,33	5,04	4,79	4,59	4,45	
LP teho/maxlämmitysteho	65 %	65 %	65 %	65 %	65 %	
<b>Ilma-vesilämpöpumppu, EI K1-mukaista kytkentää (LKV 100%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	83372	83372	83372	83372	83372	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	81385	81937	82489	83041	83372	Wh/m2
LP tuottama energia	78587	79164	79740	80315	80865	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	23126	23751	24434	25187	26013	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	0,33	0,29	0,25	0,21	0,18	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	2,31	2,38	2,44	2,52	2,60	€/m2
LP energiakustannussäästö	3,19	3,17	3,14	3,10	3,06	€/m2
Lämpöpumpun teho	39,1	39,5	40,0	40,5	41,4	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	-	-	-	-	-	
SCOP (sis. LKV)	3,40	3,33	3,26	3,19	3,11	
LP teho/maxlämmitysteho	91 %	92 %	93 %	94 %	96 %	
<b>Ilma-vesilämpöpumppu, K1-mukainen kytkentä (LKV noin 50%)</b>						
	40	45	50	55	60	
Kokonaisenergia (sis.LKV kierto)	83372	83372	83372	83372	83372	Wh/m2
Energia tarkast. lämpötilatasolla	78625	79177	79729	80281	80281	Wh/m2
LP tuottama energia	75885	76461	77036	77611	77833	Wh/m2
Kompressorin kuluttama energia	22372	22940	23557	24232	24843	Wh/m2
Lisälämmityskustannus KL tai muu	0,52	0,48	0,44	0,40	0,39	€/m2
Sähköenergiakustannus LP	2,24	2,29	2,36	2,42	2,48	€/m2
LP energiakustannussäästö	3,07	3,06	3,04	3,01	2,96	€/m2
Lämpöpumpun teho	38,9	39,3	39,8	40,3	41,2	W/m2
Maalämpökaivoinvestoinnin hinta	-	-	-	-	-	
SCOP (sis. LKV)	3,39	3,33	3,27	3,20	3,13	
LP teho/maxlämmitysteho	91 %	92 %	93 %	94 %	96 %	

## Liite 7. Optimointilaskurin ulkoasu esimerkkilähtötietovalinnoin

Elinkaarioptimointi		Lämmitysverkoston lämpötilatasojen optimoiminen lämpöpumpputjärjestelmässä				29.11.2020	SWECO
<b>Rakennuksen lähtötiedot</b>		<b>Valinnat</b>		<b>Optimoinnin tulos</b>			
Rakennustyyppi		Toimistorakennus		Optimaalinen lämmitysverkoston lämpötilataso on <b>60 °C</b>			
Lämpöpumputyyppi		Maalämpöpumppu					
LKV kaukolämpökytkentä		K1-mukainen					
Päätelaitetyyppi		Radiaattorit					
<b>Rakennuksen lämmitettävä pinta-ala</b>		<b>5 000</b>	m <sup>2</sup>				
<b>Muut lähtötiedot</b>							
Tarkastelujakso (kiinteä)	20	vuotta					
Diskonttauskerro	3,5 %						
Energiahintojen nousu	3,0 %						
<b>Energian hinnat</b>							
Sähkön hinta	0,10	€/kWh					
Kaukolämmön hinta	0,07	€/kWh					
<b>Laskennan tulos, investoinnin kannattavuus (20 v) €</b>							
Järjestelmä	40	45	50	55	60		
Alkuinvestoinnit €	-243 469	-184 438	-177 197	-158 799	-154 476		
Energia- ja investointisäästö (20 v) €	160 837	159 734	158 541	157 342	154 551		
<b>Investoinnin kannattavuus (20 v) €</b>	<b>-82 632</b>	<b>-24 704</b>	<b>-18 656</b>	<b>-1 457</b>	<b>75</b>		
<b>Investoinnit (€), alv 0%</b>							
	40	45	50	55	60		
Maalämpöpumppu	16 700	16 700	16 700	16 700	16 700		
Lämpökaivot	37 353	37 436	37 506	37 574	37 166		
Lämmitysverkoston putkikustannukset	63 476	63 476	63 476	51 000	51 000		
Päätelaitekustannukset, Radiaattorit	125 940	66 825	59 515	53 525	49 610		
<b>Yhteensä</b>	<b>243 469</b>	<b>184 438</b>	<b>177 197</b>	<b>158 799</b>	<b>154 476</b>		
<b>Energia- ja investointisäästö lämpöpumpulla 20 vuoden aikana (€)</b>							
	40	45	50	55	60		
LP säästö KL verrattuna	174 235	173 041	171 748	170 450	167 426		
<b>Yhteensä, €</b>	<b>174 235</b>	<b>173 041</b>	<b>171 748</b>	<b>170 450</b>	<b>167 426</b>		
<b>Yhteensä, €/vuosi</b>	<b>8 712</b>	<b>8 652</b>	<b>8 587</b>	<b>8 522</b>	<b>8 371</b>		