



Ismo Tuuliainen

Maalämpöjärjestelmän suunnittelun ja mitoituksen lähtökohdat

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

03.10.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Ismo Tuuliainen
Otsikko:	Maalämpöjärjestelmän suunnittelun ja mitoituksen lähtökohdat
Sivumäärä:	106 sivua + 2 liitettä
Aika:	3.10.2022
Tutkinto:	Insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma:	Talotekniikka
Ammatillinen pääaine:	LVI- tekniikka
Ohjaajat:	LVIA- suunnittelija, yrittäjä, Juha Lehtonen Yliopettaja, Aki Valkeapää

Insinööriyössä selvitettiin maalämpöjärjestelmän suunnitteluun ja mitoitukseen tarvittavat lähtötiedot sekä niiden vaikutus maalämpöjärjestelmän optimaaliseen toimintaan ja laitteistovalintoihin kiinteistökohteissa. Insinööriyön tavoitteena oli luoda LVIA- suunnittelutoimistolle aineisto, joka toimii pohjana maalämpöjärjestelmän suunnittelulle ja mitoitukselle sekä laitevalinnoille.

Työ toteutettiin hyödyntämällä aiheesta olemassa olevaa tietoa. Tietoperustana käytettiin muun muassa aiheeseen liittyvää kirjallisuutta, verkkojulkaisuja, insinööritöitä, diplomitöitä sekä asiantuntijoiden luentoja ja koulutuksia. Insinööriyön alkupuolella keskityttiin maalämpöjärjestelmän suunnittelussa ja mitoituksessa tarvittaviin lähtötietoihin ja niiden merkitykseen maalämpöjärjestelmän toiminnan kannalta. Lämmönlähteenä käytettiin energiakaivoja. Seuraavana käsiteltiin esimerkkien avulla maalämpöjärjestelmän mitoituksen optimointia. Työn keskivaiheilla käytiin myös läpi erilaisten maalämpöpumppujen toimintaperiaatteet ja laitteistovalinnoissa huomioitavat asiat sekä varaajien mitoitus. Loppupuolella esitettiin kytkentäkaavioesimerkkejä ja periaatteita sekä käytiin läpi maalämpöjärjestelmän automaatiolle asettamia vaatimuksia. Myös erilaiset vaihtoehdot jäähdytyksen tuottamiseen maalämpöjärjestelmällä käsiteltiin.

Työn tuloksena syntyi insinööritoimiston LVIA- suunnittelijoiden käyttöön kattava materiaali maalämpöjärjestelmän mitoituksessa – ja suunnittelussa huomioitavista asioista ja niiden vaikutuksesta järjestelmän toimintaan. Tuloksena syntyi myös muutamia perusteltuja malleja putkikytkennöistä, joita hyödynnetään tulevien maalämpökohteiden suunnittelussa. Insinööriyön pohjalta jatketaan maalämpökohteiden suunnittelun kehittämistä Insinööritoimisto LeVIA Oy:ssä.

Avainsanat: maalämpö, energiakaivo, lämpöpumppu, suunnittelu, mitoitus

Abstract

Author: Ismo Tuuliainen
Title: Basis for Design and Dimensioning of Geothermal System
Number of Pages: 106 pages + 2 appendices
Date: 3 October 2022

Degree: Master of Engineering
Degree Programme: Building Services Engineering
Professional Major: HVAC Engineering
Supervisors: Juha Lehtonen, HVAC designer
Aki Valkeapää, Principal Lecturer

This master's thesis mapped the initial data needed for the design and dimensioning of geothermal systems, as well as the effect of the collected data on the optimal operation of the system at and choice of equipment for a residential building. The aim was to create templates for an HVAC design office for the design and dimensioning of geothermal systems and for equipment selection.

The thesis was based on relevant literature, expert lectures and trainings. First, the thesis discussed initial data needed in the design and dimensioning of geothermal systems with boreholes as heatsource, and the significance of the data for the operation of the system. Next, examples of the optimization of the dimensioning of the system were presented and discussed. Furthermore, the operating principles of various ground source heat pumps, and things to be considered when choosing equipment were reviewed and buffer sizing discussed. Options for producing cooling with geothermal systems were also discussed.

The thesis resulted in a comprehensive material for the HVAC designers of the commissioning company. Furthermore, models of pipe connections were also created for the design of future geothermal facilities. Based on the thesis, the development of the design of geothermal systems will be continued at the company.

Keywords: geothermal energy, borehole, heat pump, planning, dimensioning

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lämpöpumppujärjestelmien erityispiirteitä	2
3	Lähtötiedot	6
3.1	Rakennuksen energiankulutus	7
3.1.1	Lämmitysenergian- ja tehontarve	8
3.1.2	Lämpimän käyttöveden energian- ja tehontarve	18
3.1.3	Jäähdytys energian- ja tehontarve	29
3.2	Rakennuksen energiasimulointi	31
3.2.1	Simuloinnin lähtötiedot	32
3.2.2	Simulointimallien luotettavuus	32
3.2.3	Simuloinnin kannalta olennaiset laskentaparametrit	33
3.3	Maa- ja kallioperä lämmönlähteenä	34
3.3.1	Maa- ja kallioperän lämmöntuottoon vaikuttavat tekijät	38
4	Energiakaivokentän suunnittelu ja mitoitus	40
4.1	Kaivokentän muoto	41
4.2	Mitoitus	44
4.2.1	TRT- mittaus (Thermal Response Test, terminen vastetesti)	45
4.2.2	EED (Earth Energy Designer) kaivokenttien suunnittelussa	45
4.2.3	Kollektori	48
5	Tuotantoperustan optimointi	53
5.1	Pysyvyyskäyrä	54
5.2	Lisä- ja varalämpö	56
5.3	Optimointi	58
6	Lämpöpumpputyypit	59
6.1	Kiinteän lauhdutuksen maalämpöpumppu	60
6.2	Tulistusmallinen maalämpöpumppu	62
6.3	Vaihtuvan lauhdutuksen maalämpöpumppu	64
6.4	Lämpöpumpun säätöalue	70

6.5	Kompressorin käynti- ja seisontajaksot	71
6.6	Lämpöpumpun todellinen tehontuotto ja mitoituspiste	71
7	Varaajat	74
7.1	Puskurivaraaja	74
7.2	Lämminvesivaraaja	76
7.2.1	Lämpimän käyttöveden kulutushuipun arviointi	76
7.3	Varaajan lataaminen	79
7.4	Varaajien materiaalit	80
8	Jäähdytys maalämpöjärjestelmällä	81
9	Automaatio	82
10	Putkikytkennät	84
10.1	Varaajien kytkennät	85
10.1.1	Puskurivaraajan kytkennät	85
10.1.2	Lämminvesivaraajan kytkennät	87
10.2	Lämpimän käyttöveden kiertojohdon kytkentä	89
10.3	Jäähdytyksen kytkennät	93
11	Yhteenveto	98
	Lähteet	104
	Liitteet	
	Liite 1: Lämmönjohtavuuden mitoitus tulokset kivilajeittain	
	Liite 2: Tuotantoperustan optimointi Excel- ohjelmalla	

Lyhenteet

- COP: *Coefficient of Performance*. Lämpöpumpun lämpökerroin, joka kertoo kulutetun ja tuotetun energian suhteen.
- EED: *Earth Energy Designer*. Tietokoneohjelma energiakaivokenttien simulointiin.
- GTK: Geologian tutkimuskeskus. Mineraalivarojen arvioinnin, tutkimuksen ja kestävän käytön eurooppalainen huippuosaaja.

1 Johdanto

Insinööriyön tilaajana toimi Insinööritoimisto LeVIA Oy. LeVIA on vuonna 2019 perustettu yrittäjävetoinen insinööritoimisto, jonka palveluihin kuuluvat LVIA-suunnittelu, energiasuunnittelu- ja remontit sekä konsultointi ja valvonta. LeVIA:n palveluksessa työskentelee tällä hetkellä kaikkiaan 14 henkilöä.

Maalämpökohteiden määrän lisääntyessä suunnittelupöydällä, haluttiin pystyä tarjoamaan asiakkaille kiinteistökohteisiin kokonaisvaltaista maalämpöjärjestelmän suunnittelua ja mitoitusta. Kantavana ajatuksena oli myös mitoituksen optimointi ja lähtötietojen vaikutus maalämpöjärjestelmän toimintaan ja sitä kautta laadukkaiden suunnitelmien tuottaminen.

Insinööriyön tavoitteena oli luoda aineisto, joka toimii pohjana maalämpöjärjestelmän suunnittelulle ja mitoitukselle sekä laitevalinnoille kiinteistökohteissa. Lisäksi insinööriyön tavoitteena oli tuottaa työselostusmalli ja kytkentäkaaviomalleja, joita voidaan perustellusti hyödyntää tulevissa maalämpökohteissa. Työ rajattiin lämmönlähteiden osalta käsittelemään pelkästään energiakaivoja.

Lämpöpumppuja myytiin vuonna 2021 noin 129 000 kappaletta, joista maalämpöpumppujen osuus oli noin 10 000 kappaletta (1). Suomessa asumisen osuus energianloppukäytöstä on keskimäärin viidesosa. Tästä noin 68 % käytettiin vuonna 2018 asuinrakennusten tilojen lämmitykseen ja 15 % lämpimän käyttöveden tuottamiseen. Lämmön merkitys energiasektorilla on kokonaisuudessaan suuri, joten lämmityssektorin entistä tarkempaa huomioimista vaaditaan myös Suomen valtion asettamien ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi. Kivihiilen energiakäytön vuonna 2029 kieltävä laki astui voimaan keväällä 2019, joten kivihiilelle on löydettävä korvaavia ilmastoystävällisempiä vaihtoehtoja. Jos lämpöpumppujen toimintaan tarvittava sähkö saadaan tuotettua edullisesti uusiutuvaa energiaa käyttäen, energiakaivojen ja lämpöpumppujen yhdistelmä on sekä ilmastoystävällinen, tehokas lämmitysmuoto että kustannustehokas ratkaisu verrattuna niin sanottuihin perinteisiin lämmitysmuotoihin. Ukrainan sodan

myötä muuttunut Euroopan geopoliittinen tilanne ja sen vaikutus energianhintoihin lisäävät lämpöpumppuratkaisujen kannattavuutta verrattuna muihin lämmitysmuotoihin. Näyttää siltä, että erilaiset lämpöpumppuratkaisut, maalämpö mukaan lukien tulevat lisääntymään entisestään ja ovat vahva kandidaatti perusratkaisuksi laajamittaisellekin lämmitykselle. (2)

2 Lämpöpumppujärjestelmien erityispiirteitä

Lämpöpumpun perusideana on hyödyntää matalalämpötilaista lämmönlähdettä, tässä työssä lämmönlähteenä käsitellään maaperään porattavaa energiakaivoa. Energiakaivossa kiertävällä keruupiirillä maaperään varastoitunut lämpöenergia siirretään lämpöpumpulle, joka tuottaa hyvällä hyötysuhteella sopivanlämpöistä vettä lämmitys- tai jäähdytysverkostoon. (3)

Lämpöpumppujärjestelmiin liittyy erityispiirteitä, joita ei muissa lämmitysjärjestelmissä esiinny. Lämpöpumppujärjestelmä koostuu lämmön/ jäähdytyksen lähteestä, lämpöpumppulaitoksesta ja lämmitys tai jäähdytysverkostoista. Mikäli yksikin edellä mainituista järjestelmän osista toimii heikosti, on sillä suuri vaikutus koko järjestelmän toimintaan ja taloudellisuuteen. Lämpöpumpun suoritusarvot kuten teho ja hyötysuhde vaihtelevat erittäin paljon käyttöolosuhteista ja käyttötavasta riippuen. Lisäksi energiakaivokentän saanto on ajallisesti rajallinen ja herkkä useille eri tekijöille, kuten maaperän ominaisuuksille ja kuorma-profiilin muutoksille. (3)

Mikäli lämmönlähde on alimitoitettu eikä sen kapasiteetti riitä, niin hyvästäkään lämpöpumppulaitoksesta ei saada täyttä hyötyä. Hyötysuhde, teho ja käytettävyys heikkenevät. Jos itse lämpöpumppu ei toimi suunnitellusti, hyvääkään lämmönlähdettä ei pystytä täysimittaisesti hyödyntämään. (3)

Lämpöpumpuilla teho ja hyötysuhde riippuvat täysin siitä, millaisissa olosuhteissa lämpöpumppu toimii. Tehoon ja hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät ovat höyrystymislämpötila sekä lauhtumislämpötila. Höyrystymislämpötila riippuu lämmönlähteen lämpötilasta ja lauhtumislämpötila tuotettavan lämmitysveden

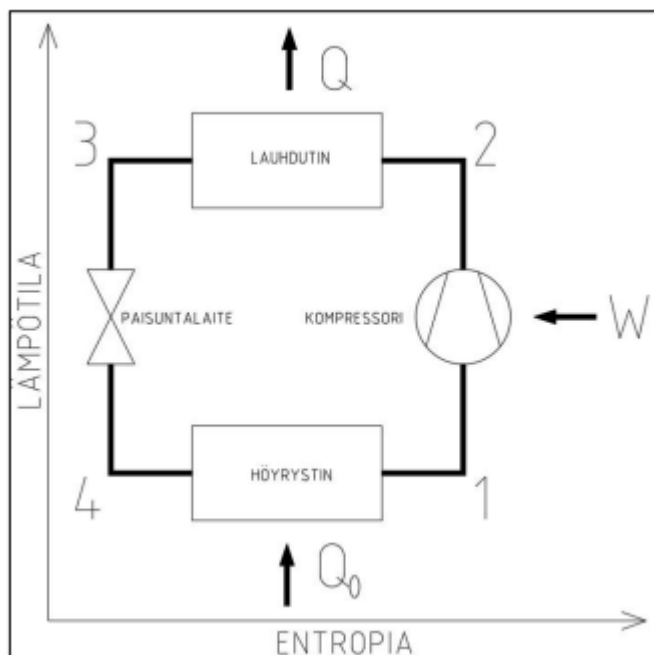
lämpötilasta. Eri lämpöpumppulaitteiden välillä suoritusarvoissa voi olla suuria eroja, mutta olosuhderiippuvuus pätee kaikkiin laitteisiin. (3)

Olosuhteiden vaikutusta lämpöpumppujen lämpökertoimeen (COP), voidaan kuvata käänteisen Carnot- kiertoprosessin avulla. Carnot- kiertoprosessi koostuu neljästä vaiheesta (4, s. 6–7):

1. Isentrooppinen puristus (1–2)
2. Isoterminen puristus (2–3)
3. Isentrooppinen paisunta (3–4)
4. Isoterminen paisunta (4–1)

Isentrooppinen tarkoittaa adiabaattista häviötöntä prosessia, adiabaattisesta systeemistä ei siirry lämpöä ympäristöön. Isotermisessä prosessissa lämpötila pysyy vakiona. (4, s. 6–7)

Kuvassa 1 s. 4 on esitetty Carnot- kiertoprosessin vaiheet, sekä lämpöpumppu- ja kylmäprosessin neljä pääkomponenttia, jotka esiintyvät yleensä myös kaikissa käytännön kompressoritoimisissa lämpöpumppu- ja kylmäprosessia hyödyntävissä systeemeissä. Kuvan alapuolella on selostettu lyhyesti kiertoprosessin eri vaiheet ja tilamuuttujien käyttäytyminen kiertoprosessissa.



Kuva 1. Käänteinen Carnot- prosessi. (5, s. 8)

Isentrooppisessa puristuksessa (1–2) kylmäainetta puristetaan työn määrällä W . Paine ja lämpötila kasvavat, mutta entropia pysyy vakiona. Kylmäaineen tilavuus pienenee. Lämmönsiirtoa systeemin ja ympäristön välillä ei tapahdu. (4, s. 66)

Isotermisessä puristuksessa (2–3) paine kasvaa ja entropia pienenee. Lämpötila pysyy vakiona, koska samanaikaisesti lämpömäärä Q luovutetaan ympäristöön. Kylmäaineen tilavuus pienenee. Tätä vaihetta kutsutaan lauhtumiseksi. (4, s. 66)

Isentrooppisessa paisunnassa (3–4) paine ja lämpötila pienenevät, entropia pysyy vakiona ja kylmäaineen tilavuus kasvaa. Lämmönsiirtoa systeemin ja ympäristön välillä ei tapahdu. (4, s. 66)

Isotermisessä paisunnassa (4–1) paine pienenee ja entropia kasvaa. Lämpötila pysyy vakiona, koska samaan aikaan otetaan ympäristöstä lämpömäärä Q_0 . Kylmäaineen tilavuus kasvaa. Tätä vaihetta kutsutaan höyrytymiseksi. (4, s. 66)

Kuvan 1 käänteinen Carnot- lämpövoimakone kuvaa ideaalista lämpöpumppua ja asettaa teoreettiset toimintaratjat käytännön sovelluksille. Tällöin Carnot lämpöpumpun lämpökerroin määritellään kaavan 1 mukaan. (3)

$$COP_c = \frac{T_L}{T_L - T_H} \quad (1)$$

T_L on lauhtumislämpötila (K)

T_H on höyrystymislämpötila (K)

Todellinen lämpökerroin jää käytännössä aina pienemmäksi kuin Carnot lämpökerroin. Todellinen lämpökerroin voidaan laskea Carnot- lämpökertoimesta ideaalisuuskertoimen avulla (kaava 2). (3)

$$COP = \eta_c \frac{T_L}{T_L - T_H} \quad (2)$$

η_c on ideaalisuuskerroin 0,5...0,8

T_L on lauhtumislämpötila (K)

T_H on höyrystymislämpötila (K)

Taulukossa 1 s. 6 on laskettu teoreettinen lämpökerroin COP_c ja todellinen lämpökerroin COP kahdelle eri höyrystymis- ja lauhtumislämpötilalle, hyödyntäen kaavoja 1 ja 2. Ideaalisuuskertoimena on käytetty arvoa 0,5.

Taulukko 1. Toimintaolosuhteiden vaikutus lämpöpumppujen lämpökertoimeen.

T_L / T_H	+60/ -10 °C	+50/ 0 °C
COP _c teoreettinen	4,8	6,5
COP todellinen	2,4	3,25
Tehoindeksi	100	135

Toimintaolosuhteet vaikuttavat huomattavasti myös saatavaan hyötytehoon. Lisäksi on huomioitava, että käytännön kylmäkoneissa ideaalisuuskerroin paranee toimintaolosuhteiden parantuessa. Tämä korostaa olosuhteiden vaikutusta entisestään. (3)

Maalämpöjärjestelmä tulee aina suunnitella kokonaisuutena. Elinkaarikustannusten ero hyvin ja huonosti toimivan maalämpöjärjestelmän välillä voi olla suurempi kuin alkuinvestointi. (3)

3 Lähtötiedot

Maalämpöjärjestelmä koostuu lämmön- tai jäähdytyksen lähteestä, lämpöpumpulaitoksesta ja lämmitys- sekä jäähdytysverkostoista. Maalämpöjärjestelmien optimaalisen mitoituksen ja suunnittelun kannalta tärkeimmän lähtötietokokonaisuuden muodostavat energialaskelmat tai nykyisin energiasimuloinnit. Energialaskelmilla selvitetään rakennuksen lämmitys-, jäähdytys- ja käyttövesiverkostojen energiankulutus ja tehontarve. Lisäksi on selvitettävä lämmitys- ja jäähdytysverkostojen lämpötilatasot sekä tietoja alueen maaperän ominaisuuksista. (3; 6)

Lämpöpumpun vuosihyötysuhteeseen vaikuttavat oleellisesti verkostojen lämpötilatasot, jotka pitää olla selvillä lämpöpumpun vuotuisen energiantuoton määrittämiseksi. Kuten luvussa kaksi jo todettiin, lämpöpumpun lämpökertoimeen vaikuttavat voimakkaasti höyrystymislämpötila, eli lämmönlähteen lämpötila sekä lauhtumislämpötila eli lämmitys, -jäähdytys ja käyttövesiverkostojen menoveden lämpötila. Mitä pienempi höyrystymis- ja lauhtumislämpötilojen erotus, sitä paremmalla hyötysuhteella lämpöpumppu toimii. Tästä johtuen esimerkiksi lattialämmitysverkosto on patteriverkostoa parempi vaihtoehto maalämpökohteeseen, matalamman menovedenlämpötilan vuoksi. (3)

3.1 Rakennuksen energiankulutus

Kuten aiemmissa luvuissa on tullut esille, lämpöpumppujärjestelmän suoritusarvot kuten teho ja hyötysuhde vaihtelevat erittäin paljon käyttöolosuhteista ja käyttötavasta riippuen, lisäksi energiakaivokentästä saatavan energian määrä on rajallinen ja herkkä mm. kuormitusprofiilin muutoksille. Edellä mainitut asiat on huomioitava myös energian- ja tehontarvetta määritettäessä ja pyrittävä mahdollisimman tarkasti todellisuutta vastaavaan lopputulokseen. (6)

Perinteiset lämmöntuotantojärjestelmät, esimerkiksi kaukolämpö- tai öljylämmitys, eivät ole yhtä herkkiä olosuhteiden tai kuormituksen muutoksille kuin maalämpöjärjestelmä, eivätkä nämä tekijät näin ollen vaikuta ko. järjestelmien investointikustannuksiin yhtä merkittävästi verrattuna maalämpöjärjestelmään. Perinteisissä lämmöntuotantojärjestelmissä suositaankin yleensä 15–30 % ylimitoitusta, jolla varmistetaan tehon- ja energiankattavuus, eikä tällainen ylimitoitus vielä lisää merkittävästi järjestelmien investointikustannuksia. (6)

Maalämpöjärjestelmää voidaan taas ajatella sijoituksena, joka tuo kiinteistölle lisäarvoa, hyödyntäen maaperään varastoitunutta uusiutuvaa energiaa. Lämpöpumppu tuottaa enemmän energiaa kuin kuluttaa, joten järjestelmä maksaa itsensä takaisin verrattuna perinteisiin lämmöntuotantojärjestelmiin. Rakennuksen energian- ja tehontarve vaikuttavat suoraan maalämpöpumpun kokoluok-

kaan ja esimerkiksi energiakaivojen lukumäärään, jotka vaikuttavat suoraan järjestelmän investointikustannukseen ja näin ollen takaisinmaksuaikaan. Maalämpöjärjestelmässä 15–30 %:n ylimitoitus vaikuttaa merkittävästi investointikustannuksiin, alimitoitus taas heikentää järjestelmän toimintaa, joka alentaa hyötysuhdetta ja näin pidentää takaisinmaksuaikaa. Mitä tarkempia teho- ja energialaskelmat tai simuloinnit ovat verrattuna todelliseen kulutukseen, sitä parempaan lopputulokseen maalämpöjärjestelmän toiminnan ja kustannustehokkuuden kannalta on mahdollista päästä. (6)

Lämmitys- ja jäähdytysverkostojen putkimitoitusten suhteen on kuitenkin muistettava, että niiden osalta esimerkiksi 15 %:n ylimitoituksen käyttäminen voi olla järkevää. Tällöin putkistoon jää pelivaraa mahdollisten rakennuksessa myöhemmin tapahtuvien muutosten varalle, ja näin ollen lisätään rakennuksen muuntojoustavuutta.

3.1.1 Lämmitysenergian- ja tehontarve

Lämmitystehon tarve määritellään aina kohdekohtaisesti. Perinteisesti lämmitysjärjestelmät mitoitetaan ympäristöministeriön 1010/2017 asetuksen mukaisesti säävyöhykkeiden mitoittavan ulkolämpötilan mukaan, olettaen lämpötilojen pysyvän staattisessa tilassa. Rakennuksen lämmitystehontarve lasketaan järjestelmäkohtaisesti, joka mahdollistaa tilakohtaisten lämmityslaitteiden valinnan optimoinnin. Perinteisessä energiajärjestelmien mitoituksessa esimerkiksi tilalämmitykselle ja ilmanvaihdon sekä mahdollisille muille järjestelmille määritellään järjestelmäkohtaiset huipputehontarpeet ja nämä summataan huomioidmatta esimerkiksi yhdenaikaisuuksia lämmitysjärjestelmän huipputehontarpeen mitoituksessa. (7, s. 18)

Tilojen lämmitys kattaa johtumis- ja vuotohäviöt sekä tuloilman ja korvausilman lämmityksen. Kokonaistehontarve rakennuksessa saadaan laskemalla yhteen

tilakohtaiset lämmitystekot, tuloilman lämmitystekotarve sekä lämpimän käyttöveden lämmityksen tehontarve. Perinteisessä mitoituksessa ei huomioida aurinkon säteilylämpöä, eikä sisäisiä lämpökuormia, mikäli ne eivät ole merkittäviä ja jatkuvia. (7, s. 18)

Lämmitysenergian kokonaistehontarve lasketaan kaavalla 3.

$$\varphi_{\text{lämmitys}} = \frac{\varphi_{\text{tila}}}{n_{\text{tilalämmitys}}} + \frac{\varphi_{\text{iv}}}{n_{\text{iv}}} + \frac{\varphi_{\text{lkv}}}{n_{\text{lkv}}} \quad (3)$$

$\varphi_{\text{lämmitys}}$ on rakennuksen lämmitystekotarve, W

φ_{tila} on tilojen lämmitysjärjestelmän lämpötehontarve, W

φ_{lkv} on käyttöveden lämmitysjärjestelmän tehontarve, W

$n_{\text{tilalämmitys}}$ on tilalämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusolosuhteissa

n_{lkv} on käyttöveden lämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusolosuhteissa

Tilojen lämmitysjärjestelmän lämpötehontarve lasketaan kaavalla 4.

$$\varphi_{\text{tila}} = \varphi_{\text{joht}} + \varphi_{\text{vuotoilma}} + \varphi_{\text{tuloilma}} + \varphi_{\text{korvausilma}} \quad (4)$$

φ_{tila} on tilojen lämmitysjärjestelmän lämpötehon tarve, W

φ_{joht} on johtumislämpöhäviöt rakennusvaipan yli, W

$\varphi_{\text{vuotoilma}}$ on vuotoilman lämpenemisen lämpötehontarve, W

$\varphi_{\text{tuloilma}}$ on tilan tuloilman lämmittämiseen tarvittava teho, W

$\varphi_{korvausilma}$ on tilan korvausilman lämmittämiseen tarvittava teho, W

Ilmanvaihdon tuloilman lämpenemisen lämpötehotarve lasketaan kaavalla 5.

$$\varphi_{tuloilma} = \rho_i c_{pi} q_{i,tulo} (T_s - T_{sp}) \quad (5)$$

$\varphi_{tuloilma}$ on tilassa tapahtuvan tuloilman lämpenemisen lämpötehotarve, W

ρ_i on ilman tiheys, kg/m³

c_{pi} on ilman ominaislämpökapasiteetti, Ws/(kgK)

$q_{i,tulo}$ on tuloilmavirta, m³/s

T_s on sisäilmanlämpötila, °C

T_{sp} on sisäänpuhalluslämpötila, °C

Koko rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän tarvitsema lämmitysteho lasketaan kaavalla 6.

$$\varphi_{iv} = \rho_i c_{pi} q_{i,tulo} (T_{sp} - T_{lto,mit}) \quad (6)$$

φ_{iv} on ilmanvaihdon lämmityspatterin teho, W

$T_{lto,mit}$ on lämmöntalteenoton jälkeinen tuloilman lämpötila mitoitus-tilanteessa, °C

Ilmanvaihtojärjestelmän lämmityspatterin lämmitysteho lasketaan lämmöntalteenottopatterin jälkeisen tuloilman lämpötilan avulla. Lämmöntalteenoton jälkeiseen tuloilman lämpötilaan vaikuttaa olennaisesti lämmöntalteenoton hyötysuhde. Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde ilmoitetaan koneen normaalilla

käytöllä vuositasolla. Vuosihyötysuhteen avulla lasketaan energiankulutusta, kun taas lämpötilahyötysuhdetta käytetään lämmityksen mitoitustehon laskemisessa. Käytännössä vuosihyötysuhde on poikkeuksetta matalampi verrattuna tuloilmahyötysuhteeseen. Usein laitevalmistajien dokumenteissa esitetään ainoastaan tuloilmahyötysuhde standardin EN308 mukaisesti lämpötilassa 0 °C. (7, s. 19)

Tuloilman lämpötilahyötysuhde voidaan laskea kaavalla 7.

$$n = (T_{lto} - T_u)/(T_p - T_u) \quad (7)$$

T_{lto} on tuloilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen, °C

T_p on poistoilman lämpötila, °C

T_u on ulkoilman lämpötila, °C

Korvausilman lämpenemisen lämpötehotarve lasketaan kaavalla 8.

$$\varphi_{korvausilma} = \rho_i c_{pi} q_{i, korvausilma} (T_s - T_{u, mit}) \quad (8)$$

$\varphi_{korvausilma}$ on korvausilman lämpenemisen lämpötehotarve, W

$q_{i, korvausilma}$ on korvausilmavirta, m³/s

T_s on sisäilman lämpötila, °C

$T_{u, mit}$ on mitoittava ulkoilman lämpötila, °C

Rakennuksen lämmitysjärjestelmien perinteiseen mitoitukseen liitetään niin sanottuja varmuuskertoimia. Ilmanvaihdon osalta näitä ovat muun muassa ilmanvaihtokoneen limitykset ja muuntojoustavuuteen varautuminen sekä oletus, että kaikki ilmanvaihtokoneet toimivat täydellä teholla samanaikaisesti. Limitys on ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton jälkeisen lämmityspatterin mitoituksessa

tehty ylimitoitus. Sillä on tarkoitus varmistaa lämmityspatterin tehon riittävyys kaikissa olosuhteissa ja käyttötilanteissa. Esimerkiksi jos ilmanvaihdon lämmityspatterin limitys on 10 °C, riittää lämmityspatterin teho, vaikka lämmöntalteenottolaitteelta tulisi 10 °C kylmempää ilmaa. Virallista ohjeistusta limityksien suuruudelle tai huomioimiselle ilmanvaihtojärjestelmän kokonaismitoitustehoa määriteltäessä ei ole, vaan ne täytyy huomioida tapauskohtaisesti. (7, s. 20)

Kun tilojen lämmityksen mitoitusteho on saatu selville, voidaan rakennuksen tilojen lämmityksen tarvitsema nettoenergia laskea. Laskennassa käytetään hyväksi Ilmatieteenlaitoksen testivuoden 2012 lämpötilatietoja. Sisälämpötilana voidaan käyttää arvon 21 °C sijasta lämpötilaa 17 °C, tällä pyritään huomiomaan tilaan tulevien lämpökuormien vaikutusta lämmitysenergiantarpeeseen. Eri lämpötiloille lasketaan tehontarve kaavalla 9. (8, s. 4)

$$\Phi_{tark} = \frac{\Phi_{mit}}{t_{s,mit} - t_{u,mit}} * (17 \text{ } ^\circ\text{C} - t_{u,tark}) \quad (9)$$

Φ_{tark} on tarvittava lämmitysteho tarkasteltavassa ulkolämpötilassa, kW

Φ_{mit} on rakennuksen lämmitystehontarve mitoitustilanteessa, kW

$t_{s,mit}$ on mitoittava sisälämpötila, °C

$t_{u,mit}$ on mitoittava ulkolämpötila, °C

$t_{u,tark}$ on tarkasteltava ulkolämpötila, °C

Kaavalla 9 laskettu tehontarve kerrotaan testivuoden 2012 lämpötilojen pysyvyytilaston mukaisilla tuntimäärillä, jolloin saadaan kutakin lämpötilaa vastaava vuotuinen energiankulutus. Ilmatieteen laitos ilmoittaa testivuoden lämpötilojen pysyvyydet siten, että lämpötiloista ilmoitetaan prosenttiosuus desimaalilukuna sille, kuinka suuren osan vuodesta ulkolämpötila on alle kyseisen arvon. Pysyvyyesarvo kylmimmästä lämpötilasta kuumimpaan on desimaaliluku väliltä 0–1.

Energialaskentaa varten lasketaan, montako tuntia vuodesta tarkasteltavaa ulkolämpötilaa esiintyy kaavalla 10. (8, s. 4)

$$(x_{tu} - x_{tu-1}) * 8760h \quad (10)$$

x_{tu} on lämpötilan pysyvyysarvo ulkolämpötilassa t_u

x_{tu-1} on lämpötilan pysyvyysarvo ulkolämpötilassa t_{u-1}

Kutakin lämpötilaa vastaavat vuotuiset energiankulutukset lasketaan vielä yhteen, jolloin saadaan vuotuinen tilojen lämmityksen nettoenergiankulutus $Q_{\text{lämmitys,tilat,netto}}$ selville. Mikäli tila on varustettu lämpöenergiaa suoraa tilaan luovuttavalla järjestelmällä, kuten tulisijalla tai ilmasta ilmaan -lämpöpumpulla, vähennetään ne ensin kokonaisarvosta $Q_{\text{lämmitys,tilat,netto}}$.

Saneerauskohteissa käytetään lähtötietona rakennuksen toteutunutta lämmitysenergian kokonaiskulutusta. Rakennuksen kuluttama lämmitysenergia saadaan kertomalla toteutunut lämmitysenergian kulutus lämmöntuottojärjestelmän hyötysuhteella. Hyötysuhdetta arvioitaessa on kiinnitettävä huomiota, ettei käytetä liian matalaa hyötysuhteen arvoa, joka voisi johtaa uuden järjestelmän alimitoitukseen. Kun tiedetään todellinen energiankulutus, voidaan huipputehontarve arvioida huipunkäyttöajan perusteella. Taulukossa 2 s. 14 on esitetty huipunkäyttöaikoja eri rakennustyypeille. (9)

Taulukko 2. Rakennustyyppien vuotuiset huipunkäyttöajat. (9)

huipunkäyttöaika	h/v (tuntia/vuosi)
asuinrakennukset	2500...3000
liikerakennukset, toimistot	1500...2500
koulut	2000...3000

Huipunkäyttöaika tarkoittaa tuntimäärää, jonka aikana vuoden tuotanto olisi tuotettu lämmöntuotantojärjestelmän nimellisteholla (huipputeholla). Lyhyt huipunkäyttöaika vastaa voimakkaasti vaihtelevaa kulutusta ja pitkä huipunkäyttöaika vastaa puolestaan tasaista kulutusta. Lämmitysteho voidaan laskea kaavalla 11. (9)

$$\Phi_{mit} = \frac{\text{Lämmitys}(kWh/rakennus)}{\text{Lämmityksen huipunkäyttöaika}} \quad (11)$$

Φ_{mit} on rakennuksen lämmitystehontarve, kW

Tilojen nettolämmitysenergiankulutuksen lisäksi on huomioitava lämmönjakelujärjestelmän lämpöenergian tarve. Saneerauskohteissa lämmönjakelujärjestelmän häviöt sisältyvät toteutuneeseen lämpöenergiankulutukseen, mikäli lämmitysverkostoa ei uusita.

Uudiskohteissa lämmönjakelujärjestelmän lämpöenergian tarve voidaan määrittellä laskemalla. Jos tilan nettolämmitystarve katetaan useammalla lämmönjakojärjestelmällä, järjestelmät tulee laskea erikseen siten, että tilan lämmitysenergian nettotarpeena käytetään laskettavan järjestelmän kattamaa osuutta.

Tällöin tilojen lämmityksen lämpöenergian tarve voidaan laskea kaavalla 12. (10, s. 39–40)

$$Q_{\text{lämmitys,tilat}} = \frac{Q_{\text{lämmitys,tilat,netto}}}{n_{\text{lämmitys,tilat}}} + Q_{\text{jakelu,ulos}} + Q_{\text{varastointi,ulos}} \quad (12)$$

$Q_{\text{lämmitys,tilat}}$ on tilojen lämmityksen lämpöenergian tarve, joka katetaan laskettavalla lämmönjakelujärjestelmällä, kWh/a

$Q_{\text{lämmitys,tilat,netto}}$ on tilojenlämmitysenergian nettotarve, joka katetaan laskettavalla lämmönjakelujärjestelmällä, kWh/a

$Q_{\text{jakelu,ulos}}$ on lämmönjakelujärjestelmän lämpöhäviö lämmittämättömään tilaan, kWh/a

$Q_{\text{varastointi,ulos}}$ on laskettavan lämmönjakelujärjestelmän varastoinnin lämpöhäviö, kWh/a

$n_{\text{lämmitys,tilat}}$ on laskettavan lämmönjakelujärjestelmän hyötysuhde

Lämmönjakelujärjestelmän lämpöhäviö lämmittämättömään tilaan ja varastoinnin lämpöhäviön laskenta on esitetty seuraavassa luvussa 3.1.2. Taulukossa 3 s. 16 on esitetty lämmönjaon- ja luovutuksen ohjearvoja, joita voidaan käyttää, mikäli tarkempia arvoja ei ole tiedossa.

Taulukko 3. Lämmitysjärjestelmien lämmönjaon ja -luovutuksen vuosihyötysuhteiden ja apulaitteiden ominaissähkönkäytön ohjearvoja. (10, s. 41)

Lämmitysratkaisu	Vuosihyötysuhde $n_{\text{lämmitys,tilat}}$	Sähkö e_{tilat} kWh/ (m ² a)
Vesiradiaattorit 45/35°C		
jakojohtot eristetty	0,90	2
jakojohtot eristämätön	0,85	2
Vesiradiaattorit 70/40 °C jakotukilla	0,80	2
Vesiradiaattorit 45/35 °C jakotukilla	0,85	2
Vesikiertoinen lattialämmitys 40/30 °C		
maata vasten rajoittuvassa rak.	0,8	2,5
ryömintätilaa vasten rajoittuvassa rak.	0,8	2,5
ulkoilmaan rajoittuvassa rak.	0,75	2,5
lämpimään tilaan rajoittuvassa rak.	0,85	2,5

Taulukon 3 hyötysuhteissa on otettu huomioon lämmönjakelun ja -luovutuksen häviöt sekä järjestelmän säädön ja lämpökerrostuman vaikutus. Hyötysuhteet on määritetty suhdesäätöisellä säätimellä ($P=2^{\circ}\text{C}$). Mikäli vesikiertoisten järjestelmien mitoituslämpötilat poikkeavat taulukoiduista arvoista, niiden hyötysuhteet voidaan arvioida interpoloimalla taulukkoarvojen perusteella. (10, s. 40)

Ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarve voidaan laskea tulo- ja poistoilman lämpötilahyötysuhteita, ulkoilman lämpötilojen pysyvyyssarvoja ja lämmöntarvelukujen avulla. Tässä työssä laskennassa sovelletaan ympäristöministeriön monistetta 122 ”Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto lämpöhäviöiden tasauslaskennassa”. Säätiötietoina käytetään monisteen mukaisesti Ilmatieteenlaitoksen testivuoden 1979 mukaisia arvoja. (11)

Ilmanvaihtojärjestelmän lämmitysenergian nettotarve lasketaan kaavalla 13.

$$Q_{iv,netto} = Q_{iv,kok} - Q_{LTO} \quad (13)$$

$Q_{iv,netto}$ on ilmanvaihtojärjestelmän lämmitysenergian nettotarve, kWh

$Q_{iv,kok}$ on ilmanvaihtojärjestelmän lämmitysenergian kokonaistarve ilman lämmöntalteenottoa, kWh

Q_{LTO} on lämmöntalteenotolla talteen otettu energia, kWh

Ilmanvaihtojärjestelmän lämmitysenergian kokonaiskulutus $Q_{iv,kok}$ lasketaan kaavalla 14.

$$Q_{iv,kok} = \rho_i c_{pi} q_{i,tulo} (T_{sp} - T_u) \Delta T \quad (14)$$

T_u on ulkoilmanlämpötila, °C

ΔT on aika vuodesta, jolloin ulkolämpötilaa T_u esiintyy, h, lasketaan hyödyntäen edellä esitettyä kaavaa 10.

Ilmanvaihdon lämmöntalteenotolla talteen otettu energia lasketaan kaavalla 15.

$$Q_{LTO} = Q_{iv,kok} n_a \quad (15)$$

n_a on ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde

Ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde lasketaan kaavalla 16.

$$n_a = (R_T * S_T) / S_s \quad (16)$$

n_a on ilmanvaihdon LTO:n vuosihyötysuhde

R_T on ilmanvaihtokoneen tuloilmavirran ja lämmöntalteenoton piiriin kuuluvien poistoilmavirtojen summan suhde

S_T on LTO:n jälkeisen tuloilman lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan välinen lämmöntarveluku lämmityskaudella, Kd

S_s on sisäilman lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan välinen lämmöntarveluku lämmityskaudella, Kd

Laskentamenetelmässä oletetaan, että ilmanvaihtojärjestelmä toimii vakioilmavirralla ja ilmakehäsittelyprosessi koostuu vain ilman lämmityksestä. Lämmitysenergian nettotarve lasketaan jokaiselle ilmanvaihtokoneelle erikseen, koska tuloilman lämmitykseen voidaan käyttää eri energiamuotoa kuin tilojen lämmitykseen. Jos ilmakehäsittelyprosessi sisältää jäädytystä ja kostutusta tai järjestelmä on ilmamääräsäätöinen, energiantarve on laskettava muulla menetelmällä. (11)

3.1.2 Lämpimän käyttöveden energian- ja tehontarve

Lämmityksen tehontarpeen lisäksi on huomioitava käyttöveden lämmityksen tarvitsema teho ja energia. Käyttöveden jatkuvan lämmitystehon arvioinnissa voidaan olettaa käytössä olevan niin suuri varaaja, että energiantarve voidaan jakaa tasaisesti vuorokauden tunneille. Mikäli rakennus on varustettu lämpimän käyttöveden kiertojohtolla tai käyttövesivaraajalla, huomioidaan myös niiden lämpöhäviöt ja lisätään käyttöveden vuotuiseen energiankulutukseen. Näin ollen tehontarve saadaan jakamalla vuotuinen energian kulutus vuoden tunneilla. Olettamalla käyttöveden lämmityksen tehontarve vakioksi voidaan rakennuksen

lämpimänkäyttöveden energiankulutus laskea lämpötilojen pysyvyyden mukaan tunneittain. (8, s. 3)

Saneerauskohteissa käyttöveden lämpöenergiankulutuksena käytetään ensisijaisesti rakennuksen käyttöveden energiamittauksiin perustuvaa arvoa (12).

Mikäli lämpimän käyttöveden lämpöenergiankulutuksen mittaustietoa ei ole saatavilla, voidaan se laskea kulutetun lämpimän käyttöveden määrän perusteella kaavalla 17 (12).

$$Q_{lkv,netto} = 58 * V_{lvk} \quad (17)$$

$Q_{lkv,netto}$ on lämpimän käyttöveden lämpöenergian nettotarve kWh/a

V_{lvk} on kulutettu lämpimän käyttöveden määrä m³/a

58 on veden lämmittämiseen (lämpötilan muutos 50 °C) tarvittava energiamäärä vesi kuutiota kohden kWh/m³

Jos lämpimän käyttöveden kulutus V_{lvk} ei ole tiedossa, oletetaan sen olevan asuinrakennuksissa 40–35 % käyttöveden kokonaiskulutuksesta ja muissa rakennuksissa 30 % käyttöveden kokonaiskulutuksesta (12).

Mikäli veden kokonaiskulutusta ei ole tiedossa, käytetään lämpimän käyttöveden oletusarvona asuinrakennuksissa 600 dm³/brm² vuodessa. Muissa kuin asuinrakennuksessa voidaan käyttää taulukon 4 s. 20 mukaisia arvoja. (12)

Taulukko 4. Lämpimän käyttöveden kulutus rakennustyypeittäin. (12)

Rakennustyyppi	Lämpimän veden kulutus dm ³ / brm ² vuodessa
Toimistorakennus	100
Terveydenhoito	520
Päiväkoti	460
Teatteri ja kirjasto	120
Uimahalli	1800
Myymälä	65
Muut rakennukset	100

Ellei lämpimän veden kulutuksesta ole tarkempaa tietoa, saadaan lämpimän käyttöveden kulutus laskettua kertomalla rakennuksen bruttoala (brm²) taulukon 3 mukaisella arvolla ja jakamalla tulos luvulla 1000. (10.) Tämän jälkeen saadaan lämpimän käyttöveden energiankulutus laskettua kaavalla 7.

Lämpimän käyttöveden kierto- ja varastointiin kuluva energia voidaan laskea kaavalla 18 (10, s. 45).

$$Q_{lkv,kierto} = (\emptyset_{lkv,kierto,omin}L_{lkv} + \emptyset_{lkv,lämmitys,omin}n_{lämmityslaitte}) \frac{t_{lkv,pumppu}365}{1000} \quad (18)$$

$Q_{lkv,kierto}$ on lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviö,
kWh/a

$\emptyset_{lkv,kierto,omin}$ on lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviön
ominaisteho, W/m

L_{lkv} on lämpimän käyttöveden kiertojohdon pituus, m

$\emptyset_{lkv,lämmitys,omin}$ on lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjen
lämmityslaitteiden ominaisteho, W/kpl

$n_{lämmityslaitte}$ on lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjen
lämmityslaitteiden lukumäärä, kpl

$t_{lkv,pumppu}$ on lämpimän käyttöveden kiertojohdon pumpun käyttö-
aika, h/vrk

Kiertojohdon lämpöhäviön ominaistehon ohjearvona voidaan käyttää arvoa 40W/m, mikäli tarkempia laskelmia ei suoriteta. Jos kiertojohdon eristystaso tunnetaan, voidaan käyttää taulukon 5 s. 22 mukaisia arvoja. Pumpun käyttöaikana käytetään arvoa 24 h/vrk. Mikäli lämpimän käyttöveden kierto on kytketty kuivaukseen käytettäviä lämmityslaitteita, joiden lukumäärä ei ole tiedossa, lisätään kiertojohdon lämpöhäviön ominaistehoon +40 W/m. Mikäli lämmityslaitteiden lukumäärä tiedetään, voidaan tarkemman tiedon puuttuessa käyttää yhden lämmityslaitteen tehona arvoa 200 W. (10, s. 45)

Taulukko 5. Lämpimän käyttöveden lämpöhäviön ominaisteho ja lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteiden ominaisteho. (10, s.45)

Eristystaso	Kiertojohtoon lämpöhäviön ominaisteho $\phi_{lkv,kierto,omin}$, W/m
ei tietoa	40
0,5 D	10
1,5 D	6
suojaputki	15
suojaputki + 0,5 D	8
suojaputki + 1,5 D	5
Lämmityslaitteiden lukumäärä	Kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteiden ominaisteho
lukumäärää ei tiedossa	lisäyskiertojohtoon lämpöhäviön ominaistehoon $\phi_{lkv,kierto,omin} + 40$ W/m
lukumäärä tiedossa	lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteiden ominaisteho $\phi_{lkv,lämmitys,omin}$ 200 W/kpl

Taulukossa 5 merkintä 0,5 D tarkoittaa eristyspaksuutta, joka on puolet eristettävän putken ulkohalkaisijasta. Merkintä 1,5 D tarkoittaa eristyspaksuutta, joka on 1,5- kertainen eristettävän putken ulkohalkaisijaan nähden. (10, s. 45.)

Mikäli rakennuksen lämpimän käyttöveden kiertojohdon pituudesta ei ole tarkempaa tietoa, voidaan käyttää taulukon 6 rakennustyyppikohtaista arvoa kiertojohdon ominaispituudelle. Ominaispituuden avulla saadaan kiertojohdon pituus, kun se kerrotaan rakennuksen lämmitetyllä nettoalalla. (10, s. 45)

Taulukko 6. Kiertojohdon pituus. (10, s. 46)

Rakennustyyppi	Kiertojohdon ominaispituus $L_{lkv,omin}$, m/m ²
Erillinen pientalo sekä rivi ja ketjutilat	0,20
Asuinkerrostalo	0,20
Toimistorakennus	0,06
Liikerakennus	0,06
Majoitusliikerakennus	0,25
Opetusrakennus ja päiväkotit	0,20
Liikuntahalli	0,06
Sairaala	0,25

Ellei lämpimän käyttöveden varastoinnin häviöistä ole tarkempaa tietoa, voidaan häviöinä käyttää taulukon 7 mukaista käyttövesisvaraajan lämpöhäviötehoon perustuvaa arvoa (10, s. 44).

Taulukko 7. Lämpimän käyttöveden varastoinnin vuotuinen häviö. (10, s. 44)

Varaajan tilavuus, l	Varaajan lämpöhäviö, $Q_{lkv,varastointi}$, kWh/a	
	40 mm eriste	100 mm eriste
50	440	220
100	640	320
150	830	420
200	1000	500
300	1300	650
500	1700	850
1000	2100	1100
2000	3000	1500
3000	4000	2000

Lämpimän käyttöveden kokonaislämpöenergian tarve saadaan laskettua kaavalla 19.

$$Q_{\text{lämmitys, lkv}} = \frac{Q_{\text{lkv, netto}}}{n_{\text{lkv, siirto}}} + Q_{\text{lkv, varastointi}} + Q_{\text{lkv, kierto}} + Q_{\text{lkv, ulos}} - Q_{\text{lkv, lto}} \quad (19)$$

$Q_{\text{lämmitys, lkv}}$ on lämpimän käyttöveden lämpöenergian tarve, kWh/a

$Q_{\text{lkv, netto}}$ on lämpimän käyttöveden lämpöenergian nettotarve, kWh/a

$n_{\text{lkv, siirto}}$ on lämpimän käyttöveden siirron hyötysuhde

$Q_{\text{lkv, varastointi}}$ on lämpimän käyttöveden varastoinnin lämpöhäviö, kWh/a

$Q_{\text{lkv, kierto}}$ on lämpimän käyttöveden kiertojohtoon lämpöhäviö, kWh/a

$Q_{\text{lkv, ulos}}$ on lämpimän käyttöveden kiertojohtoon lämpöhäviö lämmittämättömään tilaan, kWh/a

$Q_{\text{lkv, lto}}$ on jäteveden lämmöntalteenotolla talteen otettu ja käyttöveden lämmityksessä hyväksikäytetty energia, kWh

Lämpimän käyttöveden siirron hyötysuhde $n_{\text{lkv, siirto}}$ kattaa lämpimän käyttöveden jakojohdon häviöt. Ellei tarkempaa tietoa ole, voidaan siirron hyötysuhteena käyttää taulukon 8 s. 26 mukaista rakennustyyppikohtaista hyötysuhdetta. Taulukossa on esitetty siirron hyötysuhteita jakojohdon eri eristystasoille ja tapaukselle, jossa käytössä on kiertojohto. Eristyspaksaus on ilmoitettu halkaisijaan D suhteutettuna. (10, s. 44)

Taulukko 8. Lämpimän käyttöveden siirron vuosihyötysuhde. (10, s. 44)

Kierto	$n_{kv,siirto}$				
	Ei kiertoa				
Rakennustyyppi	Eristämätön	suojaputkessa	eristetty, perustaso ¹⁾	eristetty, parempi ²⁾	
Erillinen pientalo sekä rivi- ja ketjutilat	0,96	0,75	0,85	0,89	0,92
Asuinkerrostalo	0,97	0,76	0,86	0,90	0,94
Toimistorakennus	0,88	0,69	0,78	0,82	0,85
Liikerakennus	0,87	0,68	0,77	0,81	0,84
Majoitusliikerakennus	0,97	0,76	0,86	0,90	0,94
Opetusrakennus ja päiväkotit	0,89	0,70	0,79	0,83	0,86
Liikuntahalli	0,98	0,77	0,87	0,91	0,95
Sairaala	0,94	0,74	0,84	0,88	0,91
<p>¹⁾ Eristyksen perustaso tarkoittaa eristyspaksuutta 0, D, jossa D on putken halkaisija.</p> <p>²⁾ Eristyksen parempi taso tarkoittaa vähintään eristyspaksuutta 1,5 D, jossa D on putken halkaisija.</p>					

Lämpimän käyttöveden kiertojohtoon lämpöhäviö lämmittämättömään voidaan arvioida käyttämällä taulukon 9 s. 28 ominaislämpöhäviön ohjearvoja, ellei tarkempia arvoja ole tiedossa. Taulukon arvot pätevät yksittäisen rakennuksen ja lämmöntuottoyksikön välisille siirtoputkille. Laajemman alueen siirtoputkien lämpöhäviöt on laskettava erikseen siihen soveltuvalla menetelmällä. (10, s. 42)

Taulukko 9. Lämmönjako- ja LKV- kiertoputkien ominaislämpöhäviön ohjearvoja. (10, s. 42)

Rakennus- tyyppi	Jakoputkien sijoi- tus	Vuotuinen ominaislämpöhäviö ¹⁾ <i>q_{jaketuhäviöt ulos}</i> kWh/ (m a)
Pientalo ²⁾	Jakoputket puolilämpimässä tilassa ⁴⁾	
	- eristämätön	150
	- eristetty	25
	Jakoputket ulkoilman lämpötilassa	
	- eristetty	35
Muu rakennus ³⁾	Jakoputket puolilämpimässä tilassa ⁴⁾	
	- eristämätön	250
	- eristetty	30
	Jakoputket ulkoilman lämpötilassa	
	- eristetty	50
<p>¹⁾ Määritetty lämmönjakoverkoston mitoitustilapötiloilla 70/40 °C.</p> <p>²⁾ Määritetty putkikoolla DN20.</p> <p>³⁾ Määritetty putkikoolla DN40.</p> <p>⁴⁾ Puolilämpimän tilan lämpötila 15 °C</p>		

Lämmön- ja lämpimän käyttöveden jakelujärjestelmän lämpöhäviöt maahan las-
ketaan kaavalla 20.

$$Q_{jaku,ulos} = U'L(T_p - T_{maa})\Delta t/1000 \quad (20)$$

U' on putken lämmönläpäisykerroin pituusyksikköä kohden, W/ (m°C)

L on lämmönjakelujärjestelmän meno- ja paluuputkien yhteenlaskettu pituus maassa, m

T_p on meno- ja paluuputkien keskimääräinen lämpötila laskentajakson aikana, °C

T_{maa} on maan lämpötila laskentajakson aikana, °C

Δt on ajanjakson pituus, h

1000 on kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi.

3.1.3 Jäähdytys energian- ja tehontarve

Rakennuksen tarkka jäähdytystarpeen mitoitus edellyttää yleensä tarkoitukseen soveltuvan energiasimulointiohjelman käyttöä, jolla jäähdytystarpeen laskenta pystytään suorittamaan enintään tunnin pituista aika- askelta käyttäen. Suomen rakennusmääräyskokoelma edellyttää, että useimmille rakennustyypeille tehdään kesäajan huonelämpötilan tarkastelu, jotta mahdollisiin yllilämpöongelmiin voidaan puuttua jo suunnitteluvaiheessa. Kesäajan huonelämpötilat on osoitettava laskennallisesti dynaamisella laskentatyökalulla, joka huomioi rakennuksen muodon, talotekniset järjestelmät sekä sisäiset lämpökuormat. Huonelämpötilan hallintaan voidaan vaikuttaa koneellisen jäähdytyksen lisäksi rakennuksen muodolla, aurinkosuojauksilla, ikkunoiden ominaisuuksilla sekä sijoittelulla. Taulukko 10 s. 30 esittää rakennustyypeille asetetut jäähdytysrajat, joiden merkittävää ylittämistä pyritään välttämään. (7, s. 21)

Taulukko 10. Kesälämpötilatarkasteluissa käytettävät käyttötarkoitukseluokan mukaiset jäähdytysrajat. (13, s. 6)

Käyttötarkoitukseluokka	Jäähdytysraja °C
Erillinen pientalo sekä rivi- ja ketjutalo	27,0
Asuinkerrostalo	27,0
Toimistorakennus	25,0
Liikerakennus	25,0
Majoitusliikerakennus	25,0
Opetusrakennus ja päiväkot	25,0
Liikuntahalli	25,0
Sairaala	25,0

Rakennuksen jäähdytys voidaan toteuttaa tilakohtaisilla laitteilla, ilmanvaihdon kautta tai molempia menetelmiä yhdenaikaisesti hyödyntäen. Jäähdytyksen tehontarve määritetään pääsääntöisesti simuloimalla, sillä tehon tarpeeseen vaikuttaa useampia yhdenaikaisia muuttujia. Jäähdytyksen tehontarve koostuu ulkoisien sekä huonetilassa syntyvien lämpökuormien vaikutuksesta. Tällaisia tekijöitä ovat muun muassa auringon lämpösäteily ikkunoiden ja ulkoseinien kautta sekä ihmisistä, laitteista ja valaistuksesta johtuvat lämpökuormat. Jäähdytystehontarve mitoitetaan tilajäähdytyslaitteiden osalta 100 %:n käyttökatteella. Huonelaitteiden lämpökuormat lasketaan todellisen käytön tai arvioidun tilakäytön mukaan. Sekä kesäajan lämpötilojen laskennassa että jäähdytyslaitteiden suunnittelussa käytetään standardin ISO 15927-4:2005 mukaista energialaskennan testivuotta, tai Ilmatieteenlaitoksen testivuoden säätietoja. (7, s. 22)

Tilajäähdytyslaitteen jäähdytysteho määritellään tyypillisesti dynaamisten simulointiohjelmien avulla, mutta vaihtoehtoisesti mitoitusteho voidaan laskea myös manuaalisesti kaavalla 21 (7, s. 23).

$$\dot{Q}_{kok} = \dot{Q}_{joht} + \dot{Q}_{vuoto} + \dot{Q}_{sis} + \dot{Q}_{aur} \quad (21)$$

\dot{Q}_{kok} on kokonaisjäähdytystarve, W

\dot{Q}_{joht} on johtumislämpökuorma, W

\emptyset_{sis} on sisäisien kuormien aiheuttama lämpökuorma, W

\emptyset_{aur} on auringonsäteilyn aiheuttama lämpökuorma, W

3.2 Rakennuksen energiasimulointi

Vaihtoehtoinen tapa perinteisille tehomitoituksille on energiasimulointi. Energiasimulointiohjelmistoja on kehitetty jo useamman vuosikymmenen ajan ja niitä käytetään yhä yleisemmin kestävän kehityksen kiristyvien vaatimusten sekä energiatehokkuusmääräyksien toimiessa tehokkaana taustavaikuttajana. Energiasimulointiohjelmiä ovat muun muassa TRNSys, DOE-2, Energy Plus tai IDA ICE. Esimerkiksi IDA ICE mahdollistaa yksityiskohtaisen, dynaamisen monivaiheisen simuloinnin, johon voidaan tuoda muun muassa halutut ilmastotiedot, standardit sekä laite- ja materiaalitiedot. (7, s. 25)

Todellisuudessa rakenteissa ja rakenteiden pinnoilla tapahtuva lämmön siirtyminen on dynaamista, eli ilmiö on jatkuvassa muutoksessa. Ulkolämpötila, auringon säteily sekä sisäiset lämpökuormat ovat jatkuvia muuttujia. Dynaaminen energiasimulointi on useiden samanaikaisten tekijöiden huomioidussa lähes välttämätön työkalu, sillä vastaavien laskelmien tuottaminen ilman dynaamista energiasimulointia voisi olla hyvinkin työlästä, ellei mahdotonta. Tästä johtuen energiasimulointiohjelmit ovat tärkeässä roolissa rakennusten energiatehokkaassa suunnittelussa. Rakennuksen käyttämä energiateho kohdistuu yhä suuremmalta osin ilmanvaihdon ja muiden taloteknisten järjestelmien kulutukseen. Tilalämmityksen osuus on ollut ajan kuluessa laskusuhdanteinen. (7, s. 25–26)

Energiasimulointityökaluilla tehtävät simuloinnit voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään: energiasimuloinnit kokonaisuudelle rakennukselle ja teho- sekä olosuhdesimuloinnit yksittäisille tiloille. Energiasimuloinnit kattavat koko vuoden, kun taas teho- ja olosuhdesimuloinnit tehdään mitoituspäivälle. (7, s. 26)

3.2.1 Simuloinnin lähtötiedot

Rakennuksen energiasimulointiin tarvitaan seuraavat lähtötiedot:

Rakennuttaja tai käyttäjän edustaja

- Tilojen käyttöajat, ihmismäärät, laitekuormat

Arkkitehtisuunnittelu

- Taso-, julkisivu, ja leikkauspiirustukset, ikkunoiden g- ja u- arvot, tiedot aurinkosuojauksesta sekä pinta- alat.

Rakennesuunnittelu

- Rakennetyypit, rakenteiden U- arvot, kylmäsiltojen lisäkonduktanssit, ilmanvuotoluku.

LVI- suunnittelu

- Ilmamäärät, lämmitys-, ja jäähdytysrajat, ilmanvaihdon sekä ilmanvaihtokoneiden toimintaperiaate, aikataulu ja lämmöntalteenoton hyötysuhde.

Sähkösuunnittelu

- Valaistustiedot, tieto mahdollisesta tarpeenmukaisesta valaistuksesta ja muista mahdollisista sähkökuormista. (7, s. 26–27)

3.2.2 Simulointimallien luotettavuus

Rakennuksen käyttöä, ihmiskuormia ja valaistusta arvioitaessa voidaan nojata sisäilmastoluokitukseen tai asetuksen mukaisiin arvoihin, ellei tietoa todellisesta

käytöstä ole. Energiasimuloinnin tavoitteena on simuloida rakennuksen energiakulutusta mahdollisimman totuuden mukaisesti. Ennusteissa on kuitenkin havaittu kahden tyyppisiä virheitä; inhimilliset virheet suunnittelussa, rakentamisessa ja energiasimuloinnin mallinnuksessa sekä toisaalta energiasimuloinnin lähtötietojen epätarkkuus tai virheellisyys. Lähtötietojen puutteellisuus voi aiheuttaa energiasimulointimalliin epätarkkuutta, lisäksi rakennuksen vakioidun käytön standardiarvot voivat poiketa todellisesta käytöstä. Usein rakennuksen sijainnin tarkempia ominaisuuksia ei välttämättä sisällytetä energiasimulointimalliin. Asukkaiden tai käyttäjien käyttäytymisellä ja totumuksilla on merkittävä rooli, ja useimmiten simuloinnissa tehdään arvio ihmisen, valaistuksen ja laitteiden toiminnasta. Simulointipohjaisen mitoitusmenetelmän kannalta on oleellista huomioida simulointimallin luotettavuus ja mahdolliset simulointimallin virheet, mikäli simuloinnin tavoitteena on pienentää energijärjestelmien mitoitus-tehoa. (7, s. 27)

3.2.3 Simuloinnin kannalta olennaiset laskentaparametrit

Lämmitystehon simuloinneissa on olennaista huomioida tilojen käyttö ja ilmanvaihdon toiminta. Perinteisessä mitoituksessa ei tilalämmityksen osalta huomioida lämpökuormia, eli toisin sanoen rakennus on tällöin tyhjä. Samanaikaisesti ilmanvaihdon lämmityksen huipputeho kuitenkin mitoitetaan oletuksella, että rakennus on täydellä käytöllä. Tästä on seurauksena melko hallitsemattoman varmuuskertoimen muodostuminen lämmitysjärjestelmän kokonaismitoitustehoon. Tämä ristiriita korostuu entisestään rakennuksissa, joissa ilmanvaihto on toteutettu tarpeenmukaisella ilmanvaihdon säädöllä. Simuloidessa lämmitystehoja vastaavaa ristiriitaa ei synny. Simuloinnin avulla on mahdollista saada lämmöntuotantojärjestelmien mitoituksista hallitumpi perinteiseen menetelmään verrattuna. (7, s. 58)

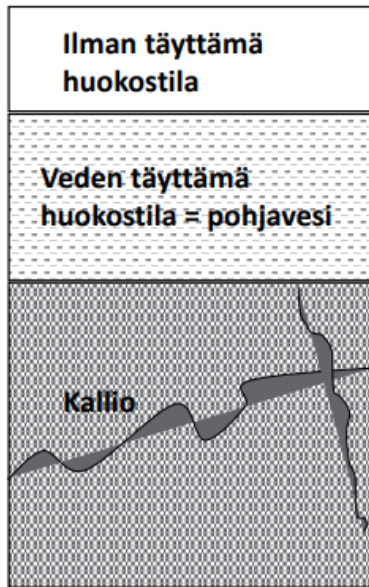
Jäähdytystehon mitoitukseen vaikuttaa oleellisesti ulkoilman entalpia. Ulkoilman entalpia 57 kJ/kg on tyypillisesti käytössä jäähdytysmitoitusten mitoittavana entalpiana Etelä- Suomessa. Lisäksi käyttöprofiilin huomioiminen voi vähentää

jäähdytystarvetta tilajäähdytyksen osalta. Jäähdytyksen simuloinneissa olosuhteet ovat aina dynaamiset, jolloin muutos tapahtuu ainoastaan olosuhteissa, joten niillä on merkittävä vaikutus jäähdytystarpeeseen. Tilalaitteiden osalta myös yhdenaikaisuus tulee huomioitua simuloinneissa, auringon paistaessa vain yhdestä suunnasta kerrallaan. Mikäli rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmää ei ohjata tarpeenmukaisesti, eivät sisäilmasto-olosuhteet vaikuta merkittävästi ilmanvaihdon jäähdytystehontarpeeseen. Sen sijaan tilajäähdytyksen teho reagoi muuttuviin sisäisiin lämpökuormiin. (7, s. 58–59)

3.3 Maa- ja kallioperä lämmönlähteenä

Maa- ja kallioperä toimivat maalämpöjärjestelmien lämmönlähteenä, maa- ja kallioperän ominaisuudet vaikuttavat maasta saatavan energian määrään. Maaperä koostuu kallioperän pinnalla olevasta irtomaasta, ja kallioperä puolestaan on kiveä. Maa- ja kallioperästä voidaan käyttää myös yhteisnimitystä ”maankamara”. Pohjavesi on maaperän huokostilan täyttävä vesi. Kuvassa 2 s. 35 on esitetty maankamaran kerrokset. Geoenergia eli maalämpö saadaan maaperästä, kallioperästä, pohjavedestä ja vesistöistä. (14)

Maanpinta

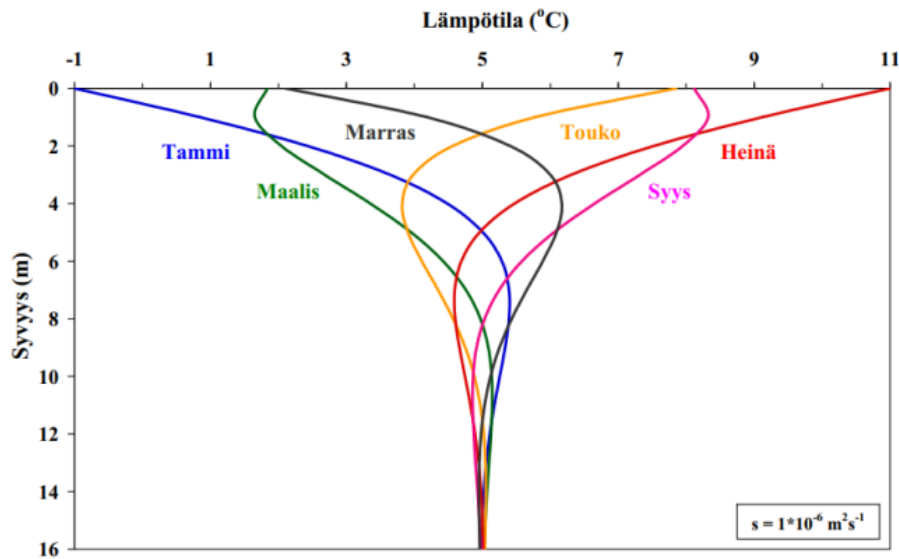


Kuva 2. Maankamaran kerrokset. (14)

Energiakaivo eli lämpökaivo toimii lämmönsiirtimenä maankamarassa; lämpöä siirretään kaivon asennettavan keruuputkiston avulla kallioperästä maalämpöpumpun höyrystymille tai viilennyskaudella lämpöä rakennuksesta maaperään. Energiakaivo porataan kallioperään, kaivon syvyys on tyypillisesti 100–400 metriä. Energiakaivojen etuna on kallioperän tasaisempi lämpötila vuoden ympäri sekä pienempi maapinta-alan tarve verrattuna esimerkiksi maaperään asennettuun vaakakeruuputkistoon. (14; 15, s. 6)

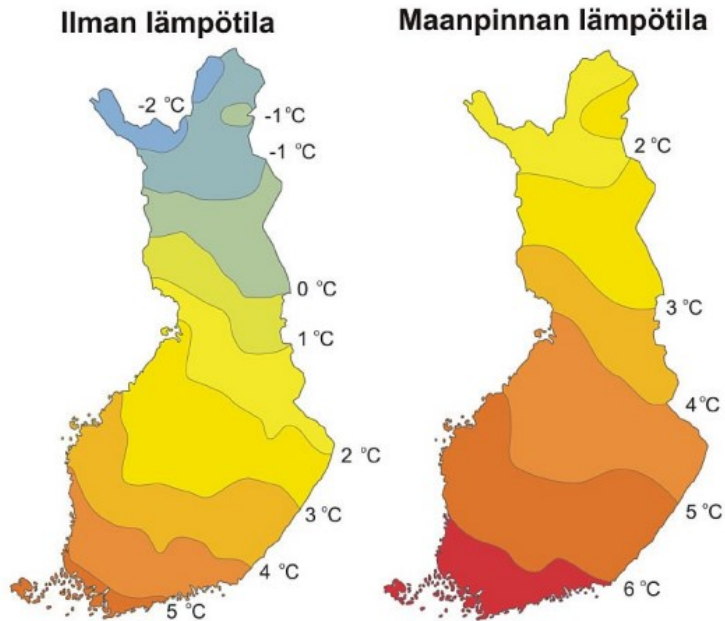
Geoenergian hyödyntämiseen sekä energiakaivon kokonaissyvyyteen vaikuttavia tekijöitä maankamarassa ovat maankamaran lämpötila sekä lämpötekniset parametrit kuten lämmönjohtavuus, maanpinnan lämpötila ja pohjavesi (15, s. 6).

Vuodenajat vaikuttavat maankamaran lämpötilaan vain noin 15–20 metrin syvyyteen asti. Kuvassa 3 s. 36 on esitetty maankamaran lämpötilan vaihtelua eri vuodenaikojen mukaan. (15, s. 7)



Kuva 3. Maanpinnan laskennallinen lämpötilan vaihtelu vuodenaikojen mukaan. (13, s. 7)

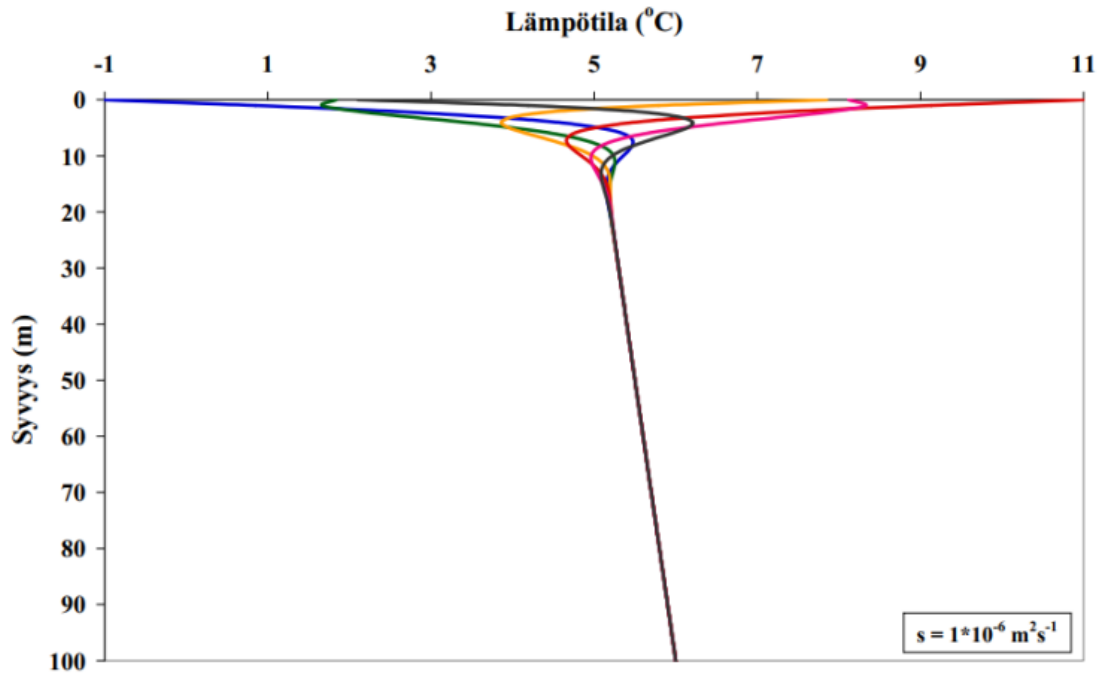
Maankamaran keskilämpötila on riippuvainen alueen ilman vuotuisesta keskilämpötilasta, joka vaihtelee Suomessa leveyspiirien mukaan. Kuvassa 4 on esitetty Suomen ulkoilman ja maanpinnan vuotuiset keskilämpötilat. Kuvan mukaan maanpinnan lämpötila on keskimäärin 2 °C korkeampi kuin ulkoilman lämpötila. (15, s. 7)



Kuva 4. Ilman ja maanpinnan vuotuinen keskilämpötila. (15, s. 8)

Kuten edellä jo todettiin, maankamaran lämpötila on noin 15–20 metrin syvyydessä maanpinnasta vakio vuodenajasta riippumatta, ja lämpötila tällä syvyydellä on maanpinnanlämpötilan vuodenaikaisvaihteluiden keskiarvo. Syvemmälle mentäessä maankamaran lämpötila kasvaa Suomessa keskimäärin 1–1,5 °C / 100 m; tätä lämpötilan nousua syvyyden suhteen kutsutaan geotermiseksi gradientiksi. (15, s. 8; 14)

Kuvassa 5 on esitetty häiriöttömän maankamaran teoreettinen lämpötila syvyydellä 0–100 m, kun geoterminen gradientti on huomioitu. Kuvan mukaan ulkoliiman vuodenaikaiset vaihtelujen vaikutukset loppuvat 15–20 m syvyydessä. Syvemmälle mentäessä maankamaran lämpötila määräytyy alueen maanpinnan keskilämpötilasta ja geotermisestä gradientista. Näin ollen alueen maanpinnan keskilämpötilan ja geotermisen gradientin avulla voidaan arvioida maankamaran lämpötilaa tietyllä alueella. (15, s. 8)



Kuva 5. Maankamaran laskennallinen lämpötila 0–100 m syvyydellä. Maanpinnan keskilämpötila 5 °C. (15, s. 9)

3.3.1 Maa- ja kallioperän lämmöntuottoon vaikuttavat tekijät

Suomessa maapallon sisältä tuleva geoterminen lämpövuoto on vain 0,03–0,05 W/m², joka vastaa Suomessa havaittuja geotermisiä gradientteja. Pienellä lämpövuolla ei ole juurikaan merkitystä geoenergian hyödyntämisessä. Lämpövuoto on Etelä- Suomen alueella noin 0,05 W/m². (15, s. 9)

Maankamaran lämmöntuottoon vaikuttaa lämpötilan ohella oleellisesti kivilajien lämmönjohtavuus. Suomessa kivilajien lämmönjohtavuus on keskimäärin noin 3,2 W / Km. Energiakaivoista saatava lämpöenergia perustuu pääasiassa kalliosta johtuvaan lämpöön, joten kivilajien lämmönjohtavuus on merkittävä energiakaivon mitoittamiseen vaikuttava tekijä. (14)

Maankamaran lämmönjohtavuuden lisäksi lämpöenergian siirtymiseen maankamarasta keruunesteeseen vaikuttaa energiakaivon lämpöresistanssi. Lämpöresistanssin arvo määrää keruunesteen ja energiakaivon seinämän välisen

lämpötilaeron tietyllä lämmönsiirtoarvolla. Lämpöresistanssin arvoon vaikuttavat muun muassa energiakaivon täyteaine, lämmönkeruuputken materiaali, geometria ja sijainti kaivossa, lämmönsiirtonesteen virtaama sekä energiakaivon halkaisija. Energiakaivon lämpöresistanssilla voi olla suuri vaikutus järjestelmän tehokkuuteen, ja sen arvon tulisi olla mahdollisimman pieni. Tyypillinen lämpöresistanssin arvo on noin 0,08–0,10 mK / W vesitäytteiselle energiakaivolle, josta otetaan lämpöä ja lämmönkeruuputkena käytetään halkaisijaltaan 40 mm muoviputkea. Lämpöresistanssin arvolla on suuri merkitys kohteissa, joissa energiakaivoja ladataan suurilla tehoilla ja korkeilla lämpötiloilla sekä otettaessa energiakaivokentästä suuria tehoja matalilla lämpötiloilla. (15, s. 10)

Pohjavedellä on myös merkitystä energiakaivon lämmönsiirtoon. Pohjoismaissa energiakaivot yleensä täyttyvät luonnollisesti pohjavedellä, eikä kaivoja täytetä täyteaineella. Veden lämmönjohtavuus on 0,6 W / mK ja ilman vain 0,026 W / mK. Näin ollen pohjaveden pinnan syvyydellä on olennainen merkitys energiakaivosta hyödynnettävissä olevaan osaan. Yleisesti puhutaan aktiivisyvyydestä eli syvyydestä, joka on pohjaveden ympäröimänä vuoden ympäri, ja lämmönsiirtoa kallioperän ja keruunesteen välillä tapahtuu. Suomessa pohjaveden pinta on yleensä 1–4 metrin syvyydessä maanpinnasta, mutta harjuissa ja kallioperässä syvyys saattaa olla jopa 20 metriä. Pohjaveden pinta vaihtelee hieman (noin 0,1–1 m) vuodenaikojen mukaan. (15, s. 11)

Pohjaveden virtaukset voivat vaikuttaa energiakaivon lämmön tuotantoon. Maansuuntainen pohjaveden virtaus voi kuljettaa energiakaivokentän ympäriltä pohjaveteen sitoutunutta lämpöenergiaa kaivokentän alueelle, ja näin nostaa energiakaivokentän lämpötilaa. Toisaalta ladattaessa energiakaivokenttää, pohjaveden virtauksella voi olla haitallisia vaikutuksia sen kuljettaessa lämpöenergiaa pois kaivokentän alueelta. Pohjaveden virtaus on erityisen haitallista, silloin jos energiakaivoja hyödynnetään porakaivovarastoina, joiden varastointilämpötila on korkea. (15, s. 11)

Ladattaessa energiakaivoja lämmönsiirto aiheuttaa luonnollisen konvektion täyteaineena olevassa pohjavedessä ja ympäröivässä vettä läpäisevässä maankamarassa. Luonnollista konvektiota esiintyy erityisesti korkeissa lämpötiloissa ja suurissa lämmönsiirtoarvoissa esimerkiksi ladattaessa energiakaivoa aurinkolämmöllä. Luonnollisen konvektion ansiosta energiakaivon lämpöresistanssi laskee ja lämmönsiirto tehostuu lämmönsiirtonesteen ja kalliomassan välillä. (15, s. 11)

4 Energiakaivokentän suunnittelu ja mitoitus

Energiakaivokentästä puhutaan silloin, kun maalämpöjärjestelmää varten porataan useita energiakaivoja. Tällöin energiakaivojen määrän ja syvyyden mitoitus on tehtävä tarkoitukseen soveltuvalla mallinnusohjelmalla, esimerkiksi EED, GHLEPro tai IDA-ICE Boreholes. Mallinnuksen avulla selvitetään energiakaivojen lämpötilataso halutulla ajanjaksolla sekä esitetään lämpötilatason kehittymisen tämän ajanjakson aikana. Simuloitavan ajanjakson aikana käytetään yleensä 25 tai 50 vuoden ajanjaksoa. Ohjelman on otettava huomioon muun muassa energiakaivojen välisen etäisyyden ja niiden muodostaman konfiguraation vaikutukset, kaivosta otettavan ja sinne ladattavan energian sekä kallioperän lämmönsiirtoon vaikuttavat ominaisuudet. (16, s. 5)

Lämpöpumppuvalmistajien omat mitoitusohjelmat ovat pääasiassa tarkoitettu pienempien kohteiden ja yksittäisten kaivojen mitoitukseen. Ohjelmat perustuvat yleensä taulukoituihin vakioarvoihin, jolloin laskenta ei huomioi lähellä toisiaan olevien energiakaivojen vaikutusta toisiinsa. (16, s. 5)

Energiakaivot porataan yleensä suoraan alaspäin, mutta myös vinoporaus on mahdollista. Vinoreikiä käytetään ahtaissa paikoissa, silloin kun kaksi tai useampia porareikiä porataan lähemmäksi kuin 15 metriä toisistaan. Vinoreikien lähtöpisteiden minimietäisyys toisistaan on 5 metriä. Vierekkäisten vinoreikien aktiivisyvyys lasketaan kohdasta, jossa reikien etäisyys on vähintään 15 metriä toisistaan. Vierekkäisten porareikien kulman määrittää energiakentän suunnittelija. Porauskalustoa pystyy yleensä kallistamaan maksimissaan noin 10 astetta.

Kuvassa 6 on esitetty porareian suositeltavat minimietäisyydet eri kohteisiin. (16, s. 5; 17, s. 25)

Kohde	Suosittelu minimietäisyys
Energiakaivo	15 m*
Lämpöputket ja kaukolämpöjohdot	3 m**
Kallioporakaivo	40 m
Rengaskaivo	20 m
Rakennus	3 m
Kiinteistön raja	7,5 m*
Kiinteistökohtaisen jätevedenpuhdistamon purkupaikka	Kaikki jätevedet 30 m, Harmaat vedet 20 m ^[14]
Viemärit ja vesijohdot	3 m (omat putket)-5 m (muiden putket)**
Tunnelit ja luolat	25 m, etäisyys selvitetään tapauskohtaisesti

* porareian ollessa pystysuora

** etäisyys riippuu maaperän laadusta, kaivusyvyydestä ja kaivantoon sijoitettavista putkista

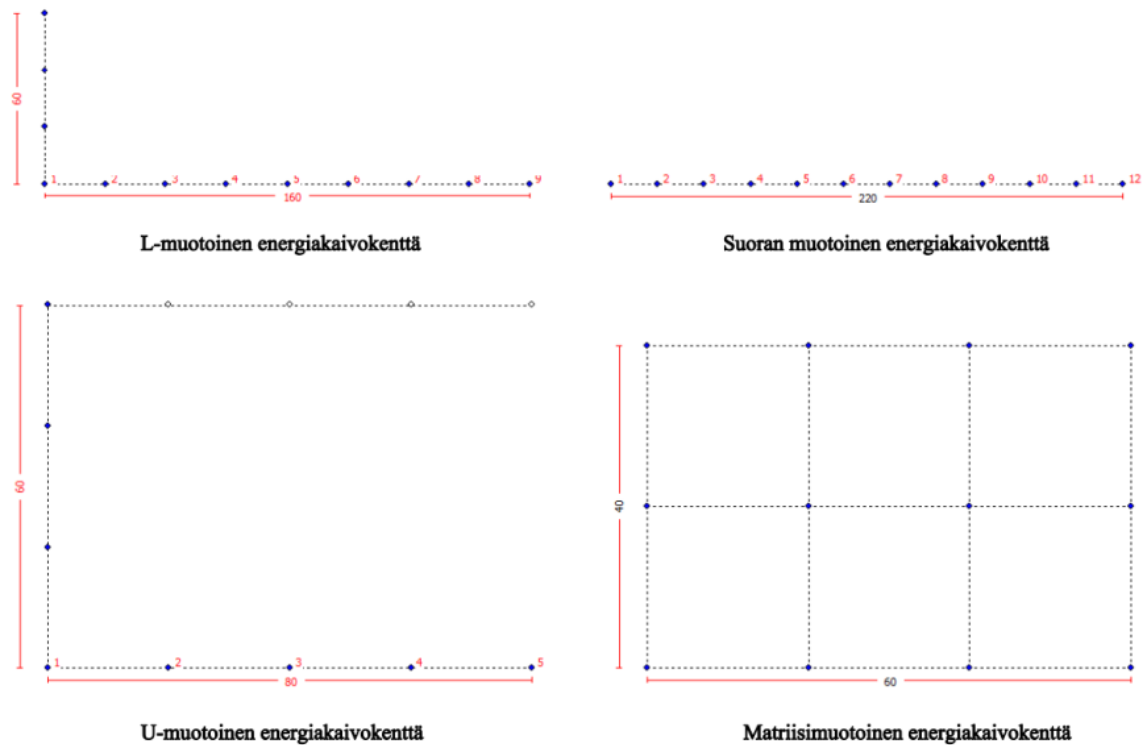
Kuva 6. Porareian suositeltavat minimietäisyydet. (17, s. 25.)

4.1 Kaivokentän muoto

Ideaalitapauksessa energiakaivokentän nettolämpötase on lähes nolla, eli maankamarasta otetaan ja sinne ladataan yhtä paljon lämpöä vuoden aikana. Tällöin keruunesteen lämpötilan vuosivaihteluita ei juurikaan ole, vaan lämpötila vaihtelee vain vuoden aikojen mukaan. Kylmissä ilmaistoissa, kuten Suomessa, energiakaivokenttiä käytetään pääsääntöisesti lämmitykseen, eli maankamarasta otetaan lämpöä enemmän kuin sinne siirretään lämpöä. Tästä johtuen energiakaivokentän lämpötila laskee ajan myötä, mikä laskee myös maalämpöjärjestelmän hyötysuhdetta. (15, s. 14)

Energiakaivokentän muoto vaikuttaa suuresti kaivokentän lämpötilan kehitykseen. Vaikka eri muotoisia kaivokenttiä kuormitettaisiin yhtenäisesti, on niillä erilainen lämpötilakehitys. Tämä johtuu vierekkäisten kaivojen termisten vaikutusalueiden vaikutuksesta ajan mittaan toisiinsa. Nettolämpötaseeltaan epätasapainoisen energiakaivokentän optimaalisessa muodossa energiakaivoilla on mahdollisimman vähän lämmönsiirtopinta- alaa toisiaan vasten. (15, s. 15)

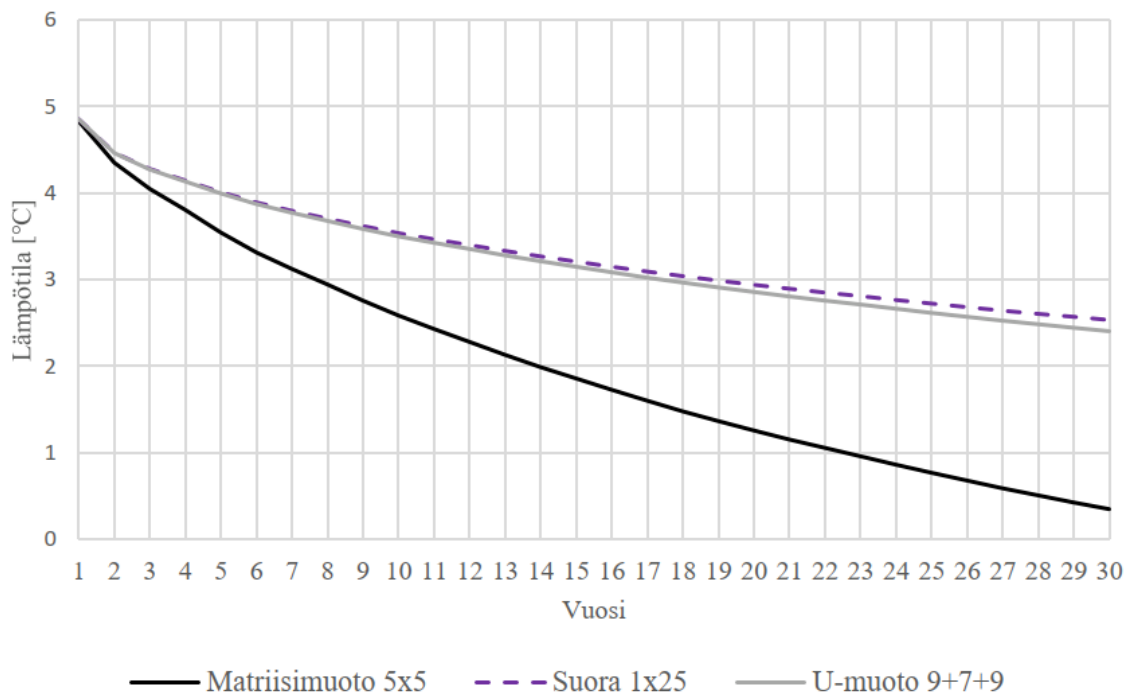
Tehokkuudeltaan parhaimmat kaivokenttäkonfiguraatiot nettolämpötaseeltaan epätasapainoisen energiakaivokentän kannalta ovat muun muassa suora, L-muoto ja U-muoto. Kaivokenttien muotoja on havainnollistettu kuvassa 7 s. 42. Lisäksi kaivojen keskinäisen etäisyyden tulee olla riittävän suuri, koska se vaikuttaa merkittävästi energiakaivojen tuottoon pitkällä aikavälillä. (15, s. 15)



Kuva 7. Erimuotoisia energiakaivokenttiä. (15, s. 15)

Mikäli kaivokentän kaikkia kaivoja kuormitetaan yhtä paljon, kaivokentän keskimäiset kaivot jäähtyvät nopeammin kuin ympärillä olevat energiakaivot. Tämä johtuu siitä, että ympärillä olevat energiakaivot estävät kentän ulkopuolelta tulevan lämmön siirtymisen kohti kentän keskimäisiä kaivoja. Toisaalta maankamaran matalampi lämpötila kaivokentän keskellä pienentää myös geotermistä gradienttia kentän keskimäisten energiakaivojen osalta ja pienentää niiden tuottamaa lämpöenergian määrää. Matriisimuotoiset kentät soveltuvat käytettäväksi, kun nettolämpötase on lähes nolla. (15, s. 15–16)

Kuvassa 8 s. 43 on esitetty matriisi-, suora- ja U-muotoisen kaivokentän vuotuisen keruunesteen lämpötilan kehitys 30 vuoden ajalta. Kuvassa esitettyjen tuloksien simuloinnissa on käytetty energiakaivojen aktiivisyvyytenä 300 metriä, energiakaivojen keskinäisenä etäisyytenä 20 metriä, ja vuotuinen tuntikohtainen kuormitusprofiili on muodostettu TRY2012 säävyöhyke I-II tuntitason tilaston pohjalta teoreettiselle rakennukselle. Energiakaivokentän keruunesteen lämpötila on simuloitu EED: llä. (15, s. 16)



Kuva 8. Erimuotoisten 25 energiakaivon energiakenttien keruunesteen lämpötilakehitys 30 vuoden ajalta. (15, s. 16)

Kuvasta 8 nähdään kaivokentän muodon vaikutus keruunesteen lämpötilaan, kun kenttiä on kuormitettu yhtäläisesti. Etenkin matriisimuotoisen kentän heikkous tulee hyvin esiin.

4.2 Mitoitus

Energiakaivojen oikea mitoitus on olennaista kaivosta saatavan energian riittävyyden ja koko maalämpöjärjestelmän toiminnan kannalta. Näin ollen mitoituksella on vaikutusta myös maalämpöjärjestelmän vuosittaisiin rahallisiin säästöihin. Pahimmat virheet mitoituksessa voivat johtaa kaivojen jäätymiseen ja siitä johtuvaan keruuputkiston rikkoontumiseen. Yksittäisiä kaivoja mitoitetaan usein niin sanotuilla peukalosäännöillä perustuen oletettuihin kWh/m tai W/m arvoihin. Kaivokenttien mitoitus ei kuitenkaan onnistu peukalosäännöillä. Energiakaivokenttien mitoituksessa on huomioitava muun muassa vierekkäisten kaivojen vaikutus tehokkuuteen, lämmönsiirtoon vaikuttavat tekijät kuten kivilajin lämmönjohtavuus ja kallion lämpötilaprofiili. (17)

Energiakaivojen ja –kaivokenttien alimitoitus johtaa pahimmassa tapauksessa kaivon tai kaivon osan jäätymiseen. Tällöin keruuputkisto kaivossa puristuu lyttyyn ja lämmönkeruunesteen kierto hidastuu tai estyy. Putkiston rikkoontuessa lämmönkeruunestettä voi vuotaa maankamaraan tai sisälle rakennukseen. Kaivo sulaa todennäköisesti, kun lämmönotto kaivosta lopetetaan, mutta lämpötilatason palautuminen kestää kauan. Korjaavana toimenpiteenä voi olla uusien kaivojen poraus viereen, yhdistäminen olemassa olevaan järjestelmään ei välttämättä ole ongelmatonta. Tällaiset reilut alimitoitukset ovat Suomessa kuitenkin harvinaisia. (14; 18)

Lievän alimitoituksen seurauksena energiakaivosta saadaan vähemmän energiaa kuin on suunniteltu. Tällöin kaivon lämpötila laskee nopeammin kuin ideaalitilanteessa, jolloin lämpöpumppu tarvitsee enemmän sähköä tarvittavan energiamäärän tuottamiseen ja lämpöpumpun hyötysuhde laskee. Lievä alimitoitus on todennäköisesti melko yleistä ja jää usein käyttäjältä huomaamatta. Tilanne huonontuu hiljalleen muutaman ensimmäisen vuoden aikana. (14)

Energiakaivojen ylimitoitus ei ole lämpöpumppujärjestelmän toiminnan kannalta haitallista, kunhan huomioidaan esimerkiksi keruuputkiston painehäviön vaiku-

tus lämpöpumpun mitoituksessa. Ylimiöitus vaikuttaa lähinnä investointikustannuksiin, joilla on vaikutusta järjestelmän takaisinmaksu-aikaan. Toisaalta syvemmästä kaivosta saadaan pitemmällä aikavälillä enemmän ilmaisenergiaa, jolloin lämpöpumppu tarvitsee vähemmän sähköä, ja tästä seuraa kustannussäästöjä pitkällä aikavälillä. Mitä suurempi on energian tarve, sitä tärkeämpää on, ettei kaivokenttä olisi ainakaan alimitoitettu. (18)

4.2.1 TRT- mittaus (Thermal Response Test, terminen vastetesti)

TRT- mittaus on menetelmä, jolla voidaan selvittää tehollinen lämmönjohtavuus energiakaivossa ennen kaivon käyttöönottoa. Tehollinen lämmönjohtavuus käsittää lämmönjohtumisen kivessä ja veden mukana siirtyvän lämpöenergian. Mittaustuloksen perusteella ratkaistaan myös kaivon lämpövastus. Tuloksia hyödynnetään kaivokentän tarkassa mitoituksessa. TRT- mittaus on ainoita tapoja, jolla voidaan varmistua mitoitusparametrien oikeellisuudesta. (14)

Testin aikana simuloidaan energiakaivon toimintaa lämmönnotossa. Koekaivoa lämmitetään vakioteholla. Mitä parempi lämmönjohtavuus kaivossa on, sitä paremmin lämpötilan nousu tasoittuu. Mittauksen suositeltu kesto on kolme vuorokautta, ja systeemi on eristettävä ulkoilman vaikutuksilta. Mikäli alustava kaivomäärä on suuri ja porausalue laaja ja geologialtaan vaihteleva, niin kaksi tai kolmekin erillistä TRT- mittausta on perusteltua tehdä. TRT- mittausta ei tulisi aloittaa koekaivon porauksen jälkeen ennen kuin lämpötilatasot ja virtaukset kaivossa ovat normalisoituneet. Normalisoituminen voi viedä yli kaksi viikkoaakin porauksesta. TRT- mittauksen tekeminen on kannattavaa jo alle 100 kW:n järjestelmissä. Osa rakennuttajista vaatii mittauksen. (14)

4.2.2 EED (Earth Energy Designer) kaivokenttien suunnittelussa

Tässä työssä energiakaivokenttien laskentaa- ja mallinnusta käsitellään EED-ohjelmiston kautta. EED on Suomessa ja Ruotsissa yleisimmin käytetty ohjelmisto kaivokenttien suunnittelussa, ohjelma pohjautuu yliopistojen pitkään tutkimustyöhön.

Simulointia varten tarvittavat lähtötiedot ovat perustiedot kohteen lämmitysjärjestelmästä, kohteen vuotuinen lämmitys- ja jäähdytysenergian tarve, kaivokentälle käytettävissä oleva pinta-ala, lämmönsiirtoon vaikuttavat tekijät, kuten kivilajin lämmönjohtavuus, kallion lämpötila ja energiakaivojen ominaisuudet (mikäli TRT-mittaus on tehty, käytetään ohjelmassa koekaivon tietoja).

Ensimmäisessä vaiheessa ohjelmistoon asetetaan maa- ja kallioperän lämmönsiirtoon vaikuttavat ominaisuudet. Mikäli paikallista TRT-mittausta ei ole tehty, maankamaraan liittyvissä tiedoissa voidaan hyödyntää esimerkiksi Geologian tutkimuskeskuksen GTK:n Hakku-verkkopalveluun tallennettua aineistoa, josta löytyy muun muassa aluekohtaisia tietoja kallioperän kivilajeista. Lisäksi esimerkiksi Helsingin kaupunki on julkaissut Helsingin geoenergiapotentiali-selvityksen, josta löytyy tietoa muun muassa Helsingin kallioperän kivilajeista ja niiden lämmönjohtavuuksista. Liitteessä 1 on esitetty mittauksiin perustuvia kivilajien lämmönjohtavuuksia Suomessa. (18; 19; 20)

Seuraavaksi asetetaan kaivokentän ominaisuudet, kuten esimerkiksi kollektorin putkityyppi ja kaivon halkaisija. Putkityyppi voi olla koaksiaali, tavallinen U-putki, tupla U-putki tai tripla-U. EED:ssä on valittavana 797 erilaista kaivokenttää, joista kaikki tosin ovat symmetrisiä. Kaivokentän muoto ja kaivojen lukumäärä voi vielä tässä vaiheessa olla mielivaltainen. Optimoinnilla lasketaan myöhemmin tarvittavien kaivojen määrä. Vinokaivo täytyy tarvittaessa approksimoida vertikaalisena. Tässä vaiheessa kaivojen halkaisija täytyy lukita. Jos mitoituksessa käytetään lähtötietona TRT-mittausta, käytetään koekaivon halkaisijaa. Myös täytteen lämmönjohtavuuden arvo sekä keruuputken tilavuusvirtaus lämpökaivoon asetetaan tässä vaiheessa. Suomessa täytteenä toimii yleensä vesi, jonka lämmönjohtavuus on $0,60 \text{ W/(mK)}$. Täytteen lämmönjohtavuudella, keruuputken virtaamalla ja putken tyypillä on merkitystä keruunesteen keskimääräiseen lämpötilaan T_f ainoastaan, jos EED:n annetaan itse laskea kaivon lämpövastus. Kaikkia edellä mainittuja tekijöitä tarvitaan lämpövastuksen laskemiseen, näin ollen niillä on vaikutusta kaivon keskimääräiseen lämpötilaan T_f :ään. (18)

Seuraavaksi ohjelmaan määritellään kaivon lämpövastus ja lämmönsiirtonesteen ominaisuudet. Kuten edellä jo todettiin, EED voi joko itse laskea teoreettisen kaivon lämpövastuksen, tai voidaan käyttää tunnettua arvoa, joka on selvitetty kallion TRT- mittauksella. Vesitäytteisessä kaivossa lämpöä liikkuu myös veden liikkeen mukana, joten kaivon mitattu lämpövastus on lähes poikkeuksetta parempi kuin EED:n laskema teoreettinen vastus. EED olettaa veden kiinteäksi aineeksi. Lämmönsiirtonesteen ominaisuudet vaikuttavat lämpökaivon lämpövastukseen eli lämmön siirtymiseen. Tyypillisesti kaivoissa kiertää 28 % Naturet- maalämpöliuos, jonka tiedot voi poimia suoraan ohjelmasta löytyvän kysymysmerkin takaa. (18)

Seuraavaksi asetetaan lämmitys- ja jäähdytystarpeet. Ohjelmaan voidaan syöttää lämpöpumpulla tuotettava vuotuinen lämmitys- ja jäähdytysenergia sekä lämpöpumpun vuosihyötysuhteen arvo, jolloin ohjelma laskee maasta otettavan energiamäärän. Maasta otettava energia voidaan syöttää myös suoraan, jolloin lämpöpumpun vuosihyötysuhdetta ei tarvitse syöttää ohjelmaan, vaan lämmityksen ja jäähdytyksen oletetaan tapahtuvan suoraan lämmönvaihtimen kautta. (18)

Ohjelmaan on mahdollista syöttää myös kuukausittaiset huipputehot, jos ne ovat tiedossa. Huipputeho asetetaan yksikössä kW, lisäksi sen arvioitu kesto tunteina on kirjattava. EED olettaa huipputehontarpeen olevan aina kuun lopussa "kesto"- sarakkeeseen syötetyn ajan. Tämä optio on hyödyllinen silloin, jos energiakaivoilla halutaan tuottaa myös huipputehot. Uusimmassa EED- versiossa lämpötehon voi asettaa myös tunnin tarkkuudella, jolloin myös huipputehot tulevat tarkemmin huomioitua. (18)

Simulaatiojaksolla määritetään, kuinka monen vuoden päähän EED simuloi keruunesteen lämpötilan. Tässä voidaan myös määritellä kentän käyttöönotto-kausi ja miltä jaksolta EED:n toivotaan tulokset näyttävän. (18)

Nyt kun lämmönsiirtoon vaikuttavat parametrit on asetettu ja lämpöpumpulta ha-
luttava energia tiedossa, voidaan aloittaa kaivokentän optimointi. EED:ssä opti-
mointi voidaan tehdä automaattisesti,” Ratkaise lämpökaivon syvyys- Opti-
mointi”- toiminnolla. Simuloinnin tulee aina toteuttaa tietyt reunaehdot keruunes-
teen lämpötilan suhteen. Talvella keruunesteen keskimääräinen lämpötila T_f ei
saa laskea liikaa eikä kesällä mahdollisen jäähdätyksen aikana kohota liian kor-
keaksi. Keruunesteen hyvä keskimääräinen minimi lämpötilan arvo on 25 vuo-
den simulointi jaksolla $-1,0\text{ °C}$ ja 50 vuoden simulointijaksolla $-1,5\text{ °C}$. Kun syöt-
tötiedot on asetettu, voidaan suorittaa optimointi. Optimointia varten annetaan
kaivolle käytettävissä oleva alue esimerkiksi $50\text{ m} \times 100\text{ m}$, kaivojen etäisyyden
vaihtelu väli esimerkiksi $5\text{--}20\text{ m}$ ja kaivon maksimi syvyys esimerkiksi 300 m ,
sekä kaivojen maksimi lukumäärä. Optimointi käy läpi jokaisen kenttämuodon
797 vaihtoehdosta ja valitsee määritettyihin lähtötietoihin soveltuvat kenttämuo-
dot. (18)

Simuloinnissa löydetään yleensä useita vaihtoehtoisia kenttäsuunnitelmia,
joissa vaihtelevat kaivojen määrä, kaivojen kokonaissyvyys ja kentän muoto.
Optimaalisin kenttävaihtoehto valitaan aina tapauskohtaisesti.

4.2.3 Kollektori

Kollektorilla tarkoitetaan energiakaivoon asennettavaa lämmönkeruuputkistoa,
jonka sisällä kiertää lämmönkeruuneste. Yleisimmin käytetty kollektorityyppi on
kaivoon asennettava U- putki. Kollektorin ominaisuuksilla ja mitoituksella on vai-
kutusta energiakaivon lämmönsiirtoon sekä kollektorin aiheuttamaan painehävi-
öön. Kaikki edellä mainitut tekijät vaikuttavat myös osaltaan maalämpöjärjestel-
män hyötysuhteeseen, optimaalisella kollektorin mitoituksella päästään parha-
seen lopputulokseen. (14; 21)

Kollektori tulee mitoittaa siten, että keruunesteen virtaus kollektoriputkessa on
riittävän suuri, jotta virtaus on turbulენტista. Laminaarinen virtaus huonontaa
lämmönsiirtoa huomattavasti. (18)

Putken aiheuttamaan lämpövastukseen vaikuttavat putkimateriaali, putken halkaisija sekä seinämävahvuus. EED- ohjelmasta löytyy valmiina yleisimmät putkityypit ja niiden tiedot, joiden perusteella ohjelma laskee putken aiheuttaman lämpövastuksen. Ohjelma laskee myös kollektorin sisäisen lämpövastuksen, joka riippuu siitä, miten putket asettuvat kaivoon. Täyteaineena energiakaivoissa on pääosin pohjavesi, jonka lämmönjohtavuus on noin 0,6 W/Km. Kallion keskimääräinen lämmönjohtavuus on noin 3,2 W/Km, joten vesi aiheuttaa vastusta lämmönsiirrolle. Mitä vähemmän vettä putkien ja kaivon seinämän välissä on, sitä pienempi on lämpövastus. Halkaisijaltaan mahdollisimman pieni kaivo on näin ollen lämmönsiirron kannalta paras. Yleisin porareian halkaisija energia-kaivossa on 115 mm. Putket eivät kuitenkaan saisi koskettaa toisiaan, vaan niiden välissä tulee olla täyteainetta. Toisissaan kiinni olevat putket muodostavat termisen oikosulun. Yleisimmät kollektorien putkikoot ovat 40 mm, 45 mm ja 50 mm. Käytettäessä suurempia putkia, vaativat ne myös halkaisijaltaan suuremman reiän. (14; 18)

Lämpöpumput on suunniteltu toimimaan tietyllä keruunesteen nimellisvirtaamalla, jolla kaivoon menevän ja kaivosta tulevan keruunesteen lämpötilaero on noin 3 °C. Pienemmällä virtaamalla keruunesteen lämpötilaero kasvaa, ja tästä johtuen lämpöpumpun hyötysuhde huononee keruunesteen lämpötilan laskiessa. Lämpöpumppujen ns. vakio kiertopumpuilla energiakaivokentän maksimi painehäviö saa yleensä olla n. 70–90 kPa. Energiakaivokentän korkea painehäviö kasvattaa kiertopumpun energiankulutusta, mikä huonontaa osaltaan maalämpöjärjestelmän hyötysuhdetta. Syvemmissä kaivoissa käytetään suurempia, esimerkiksi 45 mm:n tai 50 mm:n kollektoreita, kohtuullisen painehäviön ja riittävän virtaaman varmistamiseksi. (21)

EED- ohjelmasta ei saada suoraan kollektorin painehäviötä selville, vaan se täytyy laskea erikseen hyödyntäen esimerkiksi Excel- taulukkolaskentaohjelmaa. Kuvassa 9 s. 50 on esitetty painehäviön laskenta Excel- taulukkolaskentaohjelmalla. Laskennassa on sovellettu Colebrook- Whiten kaavaa. Kaava 22 pätee koko turbulenttisella alueella, ja sen antamat tulokset vastaavat riittävän tar-

Reynoldsin luvulla Re kuvataan virtauksen luonnetta, jos $Re \leq 2300$ virtaus on pyörteetöntä eli laminaarista ja pyörteistä eli turbulენტista kun $Re > 3000$. Ylimenovyöhykkeellä $2300 \leq Re < 3000$ on virtaus luonteeltaan epämääräistä. Kollektoriputkia mitoitettaessa on huomioitava, ettei Re laske alle 2300:n, jolloin virtaus olisi laminaarista ja lämmönsiirto heikentyisi. EED- ohjelma huomioi Reynoldsin luvun ja ilmoittaa, mikäli se laskee alle 2300:n. Myös kuvan 9 Exceltaulukossa Reynoldsin luku on laskettu. Reynoldsin luku lasketaan kaavalla 23. (18; 22, s. 346–348)

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu_1} \quad (23)$$

v on virtaus nopeus, m/s

ν_1 on virtaavan aineen kinemaattinen viskositeetti, m^2/s

d on putken sisähalkaisija, m

Virtausnopeus putkessa v , voidaan laskea kaavalla 24. (24)

$$v = q/A$$

q on keruunesteen virtaama putkessa, m^3/s

A on putken poikkipinta- ala, m^2

Dynaaminen paine putkessa p_d , voidaan laskea kaavalla 25.

$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (25)$$

ρ on nesteen tiheys, kg/m

v on virtaus nopeus, m/s

Kuvassa 9 putken painehäviö R , Pa/m, saadaan laskettua kaavalla 26.

$$R = \lambda \frac{l}{d} p_d \quad (26)$$

λ on kitkavastuskerroin

l on putkenpituus, 1 m

d on putken sisähalkaisija, m

Taulukossa 11 on esitetty erikokoisille kollektoreille tavoitevirtaamat, joilla virtaus ei ole laminaarista ja painehäviö Pa/m pysyy kohtuullisena. Taulukon 11 arvot toimivat yhtenä huomioitavana lähtökohtana kollektoria mitoittaessa.

Taulukko 11. Kollektorin tavoitevirtaamat. (9)

Putkikoko	Tavoitevirtaama
PE 40 x 2,4 mm	0,40...0,50 l/s
PE 45 x 2,6 mm	0,45...0,70 l/s
PE 50 x 3,0 mm	0,5...0,8 l/s

Lämpöpumpuille ilmoitetaan höyrytimesten tarvitsema keruunesteen nimellisvirtaama höyrytimesten läpi. Esimerkiksi 60 kW:n maalämpöpumput vaativat yleensä noin 3 l/s nimellisvirtaaman. Esimerkiksi 40 mm:n kollektorilla saadaan vielä järkevästi 0,5 l/s virtaama, jolloin energiakaivoja tarvittaisiin kuusi kappaletta. Isompaa putkikokoa käytettäessä kaivojen määrää saadaan pienennettyä. Kun tämän lisäksi tiedetään tarvittava energiakaivon syvyys, voidaan mitoittaa kohteeseen optimaalisin kollektorin koko, kollektorin painehäviö ja virtaama huomioiden.

5 Tuotantoperustan optimointi

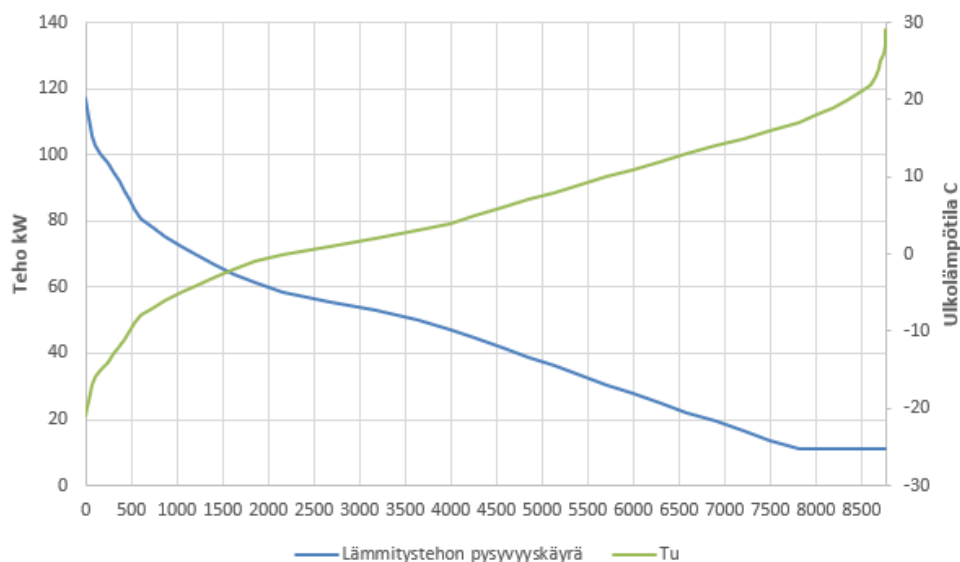
Tuotantoperustan optimoinnilla tarkoitetaan tässä työssä maalämpöjärjestelmän optimaalisen mitoitusasteen selvittämistä. Lämpöpumppujärjestelmän kokonaisuus muodostuu lämpöpumpun tuottaman lämmön ja lisälämmön summana. Järjestelmää on tarkasteltava aina kokonaisuutena, lisälämpöä unohtamatta, kallis lisälämpö voi syödä lämpöpumppuinvestoinnin säästöt. Lisälämpöä valittaessa on kiinnitettävä huomioita energian lisäksi myös tehon hintaan. Maalämpöjärjestelmissä mitoitusaste on noussut niin korkeaksi, että lisälämmön energiaosuus on usein todella pieni. Tällöin energian hinnalla on vähäinen merkitys, mutta lisälämmöllä tuotettavan huipputehon myötä tehon hinnan merkitys on suuri. (23)

Investoinniltaan kalliin maalämpölaitoksen teho on järkevää optimoida siten, että saavutetaan pääoma- ja käyttökustannusten elinkaariminimi. Energioiden ja tehon hinnan noustessa ja lämpöpumpputekniikan ominaishinnan laskiessa, optimointi johtaa nykyisin usein maalämpölaitoksissa hyvin korkeisiin, jopa 95...100 %:n energiankattavuuteen. Optimointiin vaikuttavat lisäksi tulevaisuuden näkymät, esimerkiksi nousevat energianhinnat johtavat korkeampaan mitoitusasteeseen, joten optimoinnissa pitäisi pystyä ennustamaan myös tulevaisuutta. Korkeat energian hinnat johtavat myös energiatehokkaampiin ratkaisuihin, jolloin sekä lämmitykseen että jäähdytykseen hyödynnettävän ilmaisenergian osuus suurenee. Myös minimitehon tarve on huomioitava ja laitoksen toimittava ongelmitta myös minimiteholla, jota voi esiintyä jopa 4–5 kuukautena vuodessa. (23)

Maalämpöjärjestelmän optimaalisella mitoisteholla saavutetaan järjestelmän mitoitusoptimi, jolloin pääoma, + käyttökustannukset ovat minimissään. Optimiin vaikuttavat muun muassa lisäenergian hinta sekä hintarakenne. Järjestelmän pääoma- ja käyttökustannuksiin vaikuttavat esimerkiksi tehomaksujen laskutusperuste, maalämpöjärjestelmän ominaisinvestointi (€/ kW) sisältäen myös lämmönlähteen, lämpökuorman profiili ja pysyvyys, jäähdytyskuorma, jäähdytyste-hon hinta, pääoman hinta ja investointituet. (23)

5.1 Pysyvyyskäyrä

Pysyvyyskäyrä toimii perustyökaluna rakennuksen lämmön kulutuksen ja-kauman eli lämmön kulutusprofiilin määrittämisessä. Asuinrakennusten lämmityskuorma on tyypillisesti riippuvainen pelkästään ulkoilman lämpötilasta, jolloin lämmityskuorma noudattaa hyvin määrämuotoista aikajakaumaa, josta saadaan pysyvyyskäyrä, kun tuntitehot järjestetään suuruusjärjestykseen. Kuvassa 10 on havainnollistettu asuinkerrostalon pysyvyyskäyrää. Muun tyyppisissä rakennuksissa kuin asuinrakennuksissa esimerkiksi ilmanvaihdon käyttö vaikuttaa tehoihin ja pysyvyyskäyrän muotoon. Lämpöpumpun mitoitusta varten on kohteen lämmön kulutusprofiili selvitettävä. Ulkolämpötilan jakauma johtaa siihen, että pienilläkin osatehoilla voidaan kattaa suuri energiaosuus. (23)

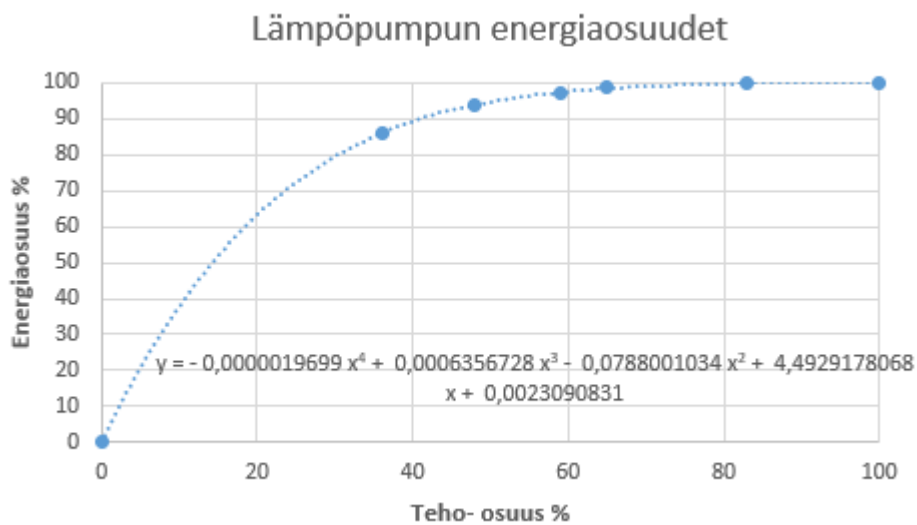


Kuva 10. Asuinkerrostalon pysyvyyskäyrä.

Kuvan 10 pysyvyyskäyrä on laadittu Excel- taulukkolaskentaohjelmalla hyödyntäen aiemmin esitettyjä kaavoja 9 ja 10, sekä Ilmantieteenlaitoksen testivuoden 2012 mukaisia lämpötilojenpysyvyysarvoja vyöhykkeellä I-II (Vantaa). Pysyvyyskäyrän hännänhuipun muodostaa käyttöveden lämmitys, joka muodostaa kesäkuukausina lähes ainoan lämpökuorman, uudistaloissa lämpimän käyttöveden osuus on kasvanut lämmöntarpeen pienentyessä. Kuvassa 10 on esitetty erään Etelä- Suomessa sijaitsevan asuinkerrostalon pysyvyyskäyrä. Kuvasta

voidaan lukea myös lämmitystehontarve eri ulkolämpötiloissa, mikä on myös hyödyllinen tieto lämpöpumpun mitoitus-tehoa määritettäessä, varsinkin kun jotkin asiakkaat voivat vaatia lämpöpumpun tehon kattavuutta tiettyyn ulkolämpötilaan asti.

Kuvissa 11 ja 12 s. 56 on esitetty maalämpöpumpun tuottama energiasuus eri osatehoilla. Eritehoisten lämpöpumppujen energiantuottoa on tarkasteltu Oilon Selection Tool- lämpöpumppujen mitoitusohjelmalla.



Kuva 11. Lämpöpumpun energiasuudet.

Energiantuottoa tarkasteltiin muutamalla eri osateholla. Tulosten perusteella piirrettiin Excel- ohjelmalla trendiviiva, joka on esitetty kuvassa 11.

teho- osuus	energia- osuus	lisälämpö
%	%	%
10	38	62
20	63	37
30	79	21
40	89	11
50	95	5
60	98	2
70	99,1	1
80	99,9	0,1
90	100	0
100	100	0

Kuva 12. Trendiviivan perusteella lasketut energiaosuudet.

Trendiviivan yhtälöä hyödyntäen ratkaistiin eri teho- osuuksilla tuotettu energiaosuus sekä tarvittava lisälämpö, tulokset on esitetty kuvassa 12. Kuten kuvista 11 ja 12 selkeästi nähdään, jo pienillä osatehoilla päästään maalämpöpumpulla suureen energiankattavuuteen rakennuksen kokonaislämmitysenergian tarpeesta.

5.2 Lisä- ja varalämpö

Lämpöpumppujärjestelmää on tarkasteltava ja suunniteltava aina kokonaisuutena, lisä- ja varalämmön tuotanto on yksi osa kokonaisuutta. Osatehomitoitussa järjestelmässä tarvitaan aina lisälämpöä tarvittavan mitoitustehon saavuttamiseksi. Lisäksi lämpöpumppujärjestelmissä varaudutaan yleensä häiriötilanteisiin varalämmönlähteellä. Varautumisesta häiriötilanteisiin on keskusteltava aina myös asiakkaan kanssa, jotkut voivat edellyttää, että varalämmönlähde on mitoitettava täystehoiseksi, tällä pyritään takaamaan lämmöntuottojärjestelmän toimintavarmuutta. Maalämpöpumpun toiminnan kannalta kriittinen osa on lämpöpumpun kompressorit. Varsinkin suuremmissa asuinkehteissa voi olla järkevää suunnitella maalämpöjärjestelmä siten, että se sisältää useampia pieniä lämpöpumppuyksiköitä kompressoreineen tai sellaisen suuremman lämpöpumpun, joka toimii esimerkiksi kahdella kompressorilla. Tällöin voidaan olettaa, että

yhden kompressorin rikkoontuessa muut kompressorit jatkavat toimintaansa. Useammalla kompressorilla saadaan lisättyä maalämpöjärjestelmän toimintavarmuutta ja tällöin varalämmönlähteen mitoitusastetta voidaan myös pienentää. (23; 24)

Mahdollisia vara- ja lisälämmön tuotantotapoja ovat muun muassa kaukolämpö, sähkö, kevytöljykattila ja kaasukattila, myös kulutusjousto ja lämpövarastot. Lisä- ja varalämmön ei tulisi aiheuttaa kustannuksia silloin, kun niitä ei käytetä. Lisäksi ylösajo ja säätö on oltava helppoa ja nopeaa. Talvella lisälämmöllä on pystyttävä tuottamaan korkeampaa lämpötilaa kuin lämpöpumpulla, eli priimaamaan lämpöpumpun lämpöä korkeampaan lämpötilaan. Peruskytkenä malli lisälämmölle on sarjakytkenä. Poikkeuksena on kaukolämpö, jota käytettäessä yksinkertaista sarjakytkenää ei hyväksytä, koska silloin kaukolämmön jäähtymä jää heikoksi. (23)

Öljy on ollut tähän mennessä kokonaisuudessaan paras ja taloudellisin lisälämpömuoto suurissa kohteissa, joissa on ollut mahdollisuus säilyttää vanha öljylaitos tai asentaa uusi laitos. Lisälämmönkulutus on yleensä vähäistä, joten suuressakin kohteessa riittävät pienet säilöt. Saneerauskohteessa vanhat maassa olevat säiliöt voidaan korvata pienillä sisäsäiliöillä. Myös fossiilinen öljy voidaan jatkossa korvata uusiutuvilla nestemäisillä polttoaineilla, jolloin saadaan poistettua öljykattilan vähäisetkin päästöt. (23)

Yleisin lisälämpö pienissä kohteissa ja asuintalossa on sähkö, koska laitteet ovat pieniä, edullisia, sekä helposäätöisiä ja vaivattomia käyttää. Pienissä kohteissa riittävät usein lämmityksen ja käyttöveden osalta sähkövastukset varajissa, kun taas suuremmissa kohteissa, joissa tehon tarve on suuri, suositellaan erillistä portaittaisella säädöllä ja tehonrajoitusautomaatiikalla varustettua sähkökattilaa. Sähkökattila voidaan usein kytkeä suoraan menoputkeen, sillä kattilan painehäviö on yleensä pieni. Sähkökattila kannattaa olla varustettu sisäisellä ulkolämpötilaohjatulla tehoportaisiin perustuvalla lämpötilan säädöllä. Näin saadaan optimoitua sähkötehonkulutusta tarpeen mukaiseksi. Sähkölämmityksen

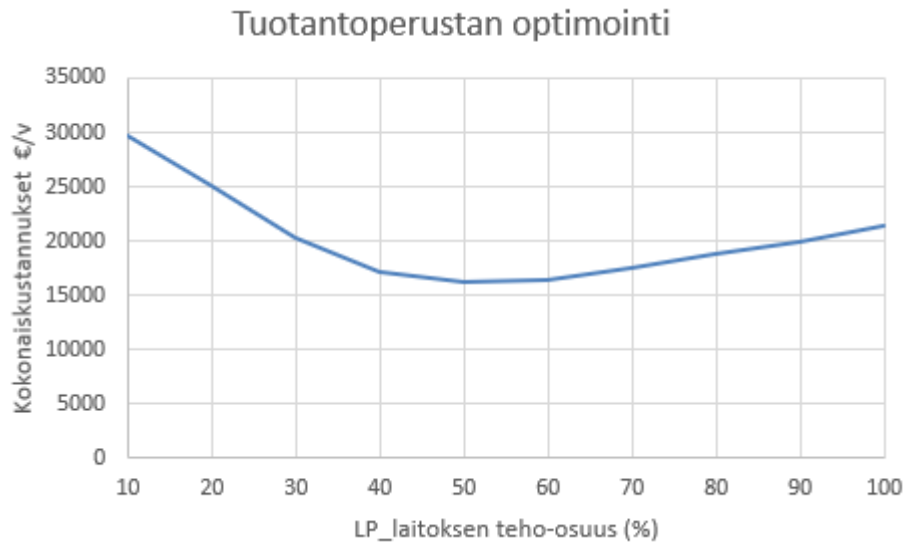
ongelmana on tehomaksujen hintatason ja laskutusperusteiden vaihtelu. Tehomaksu esimerkiksi määräytyy korkeimman tuntitehon perusteella seuraavat 0,5–1 vuotta tai voi määräytyä kuukausi kerrallaan korkeimman mitatun tuntitehon perusteella. Saneerauskohteissa sähköliittymän ja liittymäkaapelin vahvistaminen saattaa tulla kalliiksi, joten hinta kannattaa selvittää etukäteen sähkön jakelijalta. (23)

Kaukolämpö sopii kustannusrakenteeltaan heikosti lisälämmöksi. Normaali kaukolämpötariffi kuvastaa koko tuotantorakenteen hintaa, ei pelkästään huippulämmön. Useilla kaukolämpöyhtiöillä on erillinen lisälämpötariffi, mutta hintataso voi muodostua todella korkeaksi normaalista poikkeavan tehomaksujen laskutustavan vuoksi. Kaukolämmönkäyttö lisälämpönä pitää varmistaa kaukolämmön myyjän kanssa ja lämmitysjärjestelmän suunnitelmat on hyväksyttävä aina lämmön myyjällä. Mikäli kaukolämmön käyttö lisälämpönä ei kannata, on suunnitelmissa varauduttava irtautumaan kaukolämmöstä kokonaan. Kaukolämmön tekniset haasteet liittyvät riittävän jäähdytysasteen aikaan saamiseen ja talojohtojen lämpimänä pitoon. (23)

5.3 Optimointi

Tuotantoperustan optimoinnissa voidaan käyttää hyväksi aiemmin käsiteltyä teho- ja energiaosuuksien riippuvuutta sekä tästä muodostuvaa lisälämmön osuutta. Kun lisälämmön hinta on selvillä, voidaan sen kustannusvaikutus eri teho- osuuksilla laskea. Lisäksi tarvitaan maalämpöjärjestelmän ominaishinta muodossa €/ kW, sisältäen myös lämmönlähteen. Tällä hetkellä maalämpöjärjestelmän ominaishinta on 1500–2200 € / kW. Maalämpöjärjestelmän ominaishinnan avulla saadaan järjestelmän investointikustannus selville ja voidaan laskea investointikustannuksen vuosierä halutulla laskenta- ajalla. Lämmityskustannukset eri teho- osuuksille saadaan laskemalla yhteen vuotuiset pääomakustannukset sekä lisälämmöstä aiheutuvat kustannukset. Näin saadaan selville teho- osuus, jolla saadaan alhaisimmat vuotuiset kustannukset. Liitteessä 2 on havainnollistettu laskentaa hyödyntämällä Metropolian lämpöpumppukurssilla

laadittua Excel- taulukkoa. Taulukossa huomioidaan laitoksen investointikustannukset, sekä lisälämmön kustannukset. Tuloksena saadaan kuvan 13 mukainen kaavio.



Kuva 13. Lämpöpumppulaitoksen teho- osuuden vaikutus vuotuisen kokonaiskustannukseen.

Kuvassa 13 on esitetty maalämpöjärjestelmän vuotuiset kokonaiskustannukset eri teho- osuuksilla. Kohteen mitoitusteho on 71 kW ja lisälämmönlähteenä käytetään öljykattilaa. Maalämpöjärjestelmän ominaishintana on käytetty 2000 €/kW. Kuvasta 13 nähdään, että tämänhetkisillä hinnoilla 50 % teho- osuudella päästään alhaisimpaan vuosikustannukseen. Mikäli öljynhintaa nousee esimerkiksi kaksin kertaiseksi, olisi tällöin 60 % osatehomitoitus vuotuisilta kokonaiskustannuksiltaan edullisin. Mitä kalliimpaa on lisälämmön hinta, sitä suurempi on lämpöpumpun mitoitusoptimiteho. Öljyyn verrattuna optimiteho on suurempi, kun lisälämpönä on sähkö (23).

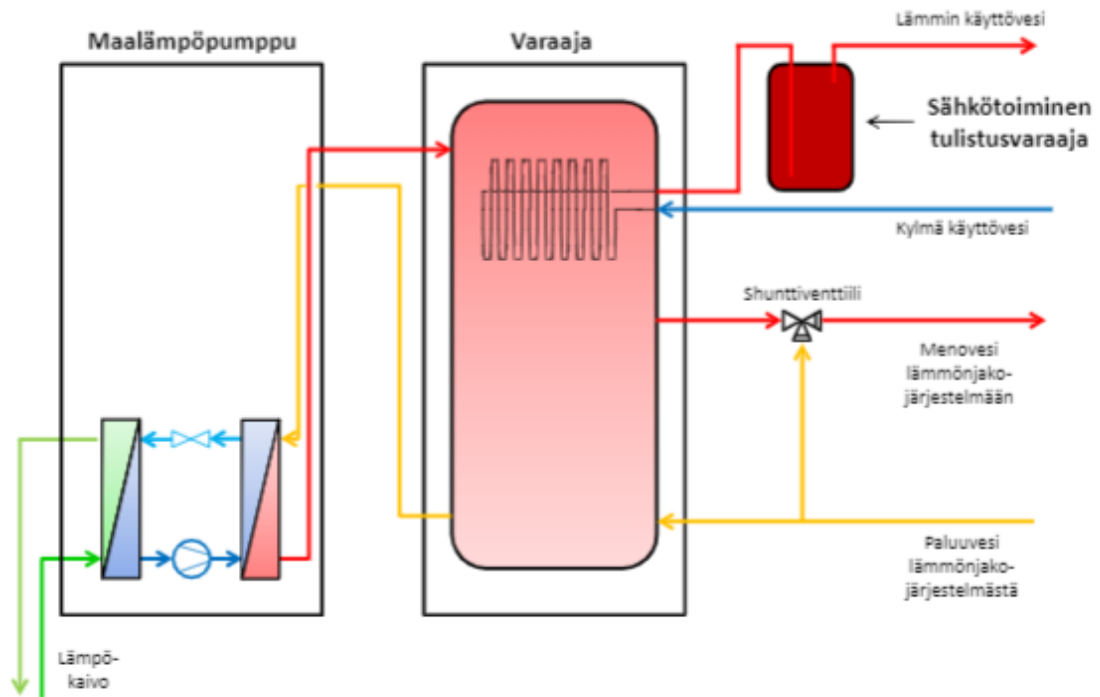
6 Lämpöpumpputyypit

Lämpöpumppujen merkkipohjaiset erot ovat yleensä pieniä pumpputyypin ollessa samoja. Laitteissa käytettävät komponentit ovat käytännössä kaikkien laitevalmistajien saatavilla ja ovat näin ollen usein samoja tai ominaisuuksiltaan

vastaavia. Maalämpöpumppujen toimintaperiaate on eri pumpputyypeissä samankaltainen; eroja on muun muassa pumpputyypin tavassa ohjata maalämmöllä lämmitettyä vettä tilojen ja käyttöveden lämmitykseen. Yleisimpiä pumpputyyppejä ovat kiinteän lauhdutuksen maalämpöpumppu, tulistusmaalämpöpumppu ja vaihtuvan lauhdutuksen maalämpöpumppu. Seuraavissa luvuissa on käyty läpi eri maalämpöpumpputyypit järjestyksessä vanhimmasta uusimpaan. (25, s. 5)

6.1 Kiinteän lauhdutuksen maalämpöpumppu

Kiinteän lauhdutuksen järjestelmässä lämpöpumpulla lämmitetty vesi ohjataan kokonaisuudessaan erilliseen varaajaan. Lämpöä ohjataan varaajasta yhtä aikaa sekä lämmitykseen että käyttöveden. Lämmitysverkostoon menevän veden lämpötila säädetään säätöventtiilin avulla, käyttövesi lämmitetään varaajan yläosassa olevan kierukan avulla. Jos varaaja on riittävän iso, saadaan pumpulle pitkiä käyntijaksoja, jolloin kompressoria rasittavia käynnistyskertoja syntyy vähän ja kompressori kestää pitempään. Kiinteälauhduksellisen järjestelmän periaate on esitetty kuvassa 14 s. 61. Kiinteälauhduksellisen pumpun kanssa voidaan hyödyntää helposti muita lämmönlähteitä ohjaamalla niiden tuottama lämpö samaan varaajaan. (25, s. 5)



Kuva 14. Kiinteälauhdutteisen järjestelmän periaate. (25, s. 5)

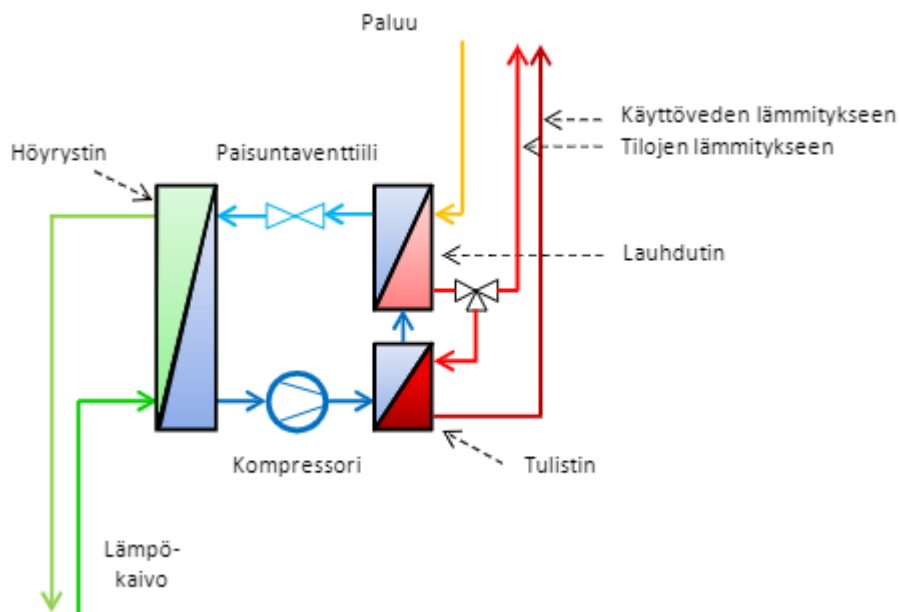
Kiinteälauhdutteista pumppua ohjataan yleensä käyttöveden lämmitystarpeen mukaan. Tällöin iso varaaja on pidettävä lämpimänä ympäri vuoden, jotta riittävä lämpimän käyttöveden saanti saadaan varmistettua. Lämpöpumput kuluttavat sitä enemmän sähköä, mitä kuumempaa vettä ne tuottavat, joten on kiinteälauhdutteisen lämpöpumpun sähkönkulutus muita pumpputyyppejä suurempi. (25, s. 5–6)

Isossa varaajassa lämpö kerrostuu helposti lämpimän veden noustessa varaajan yläosaan. Kerrostumista tehostaa lämmitysjärjestelmässä viilenneen paluuveden palautuminen varaajan alaosaan. Lämpötilaero varaajan ylä- ja alaosan välillä voi ajoittain nousta jopa 30 asteeseen. Varaajan yläosasta saadaan lämpöä lämmitykseen ja käyttöveteen pitempään ilman lämpöpumpun käynnistymistä. Toisaalta kun varaajan lämpö on käytetty, käy pumppu pitkään lämmittäessä varaajaa. Tämä vähentää käynnistyskertoja ja pidentää pumpun käyttöikää. (25, s. 6)

Huono puoli on se, että lämpöpumpun käynnistyminen sekoittaa varaajan lämpötilakerrostuman pumpun käynnistyttyä. Viileämpi vesi sekoittuu yläosan lämpimämmän veden kanssa, eikä käyttövesikierukan ympärille saada riittävästi lämpöä, joten käyttöveden lämpötila laskee. Ison varaajan tilavuuden takia tilanne kestää pitkään. Tämän takia järjestelmä varustetaan usein pienellä sähkötoimisella tulistusvaraajalla, jolla tuotetaan puuttuva lämpö käyttöveteen. (25, s.6)

6.2 Tulistusmallinen maalämpöpumppu

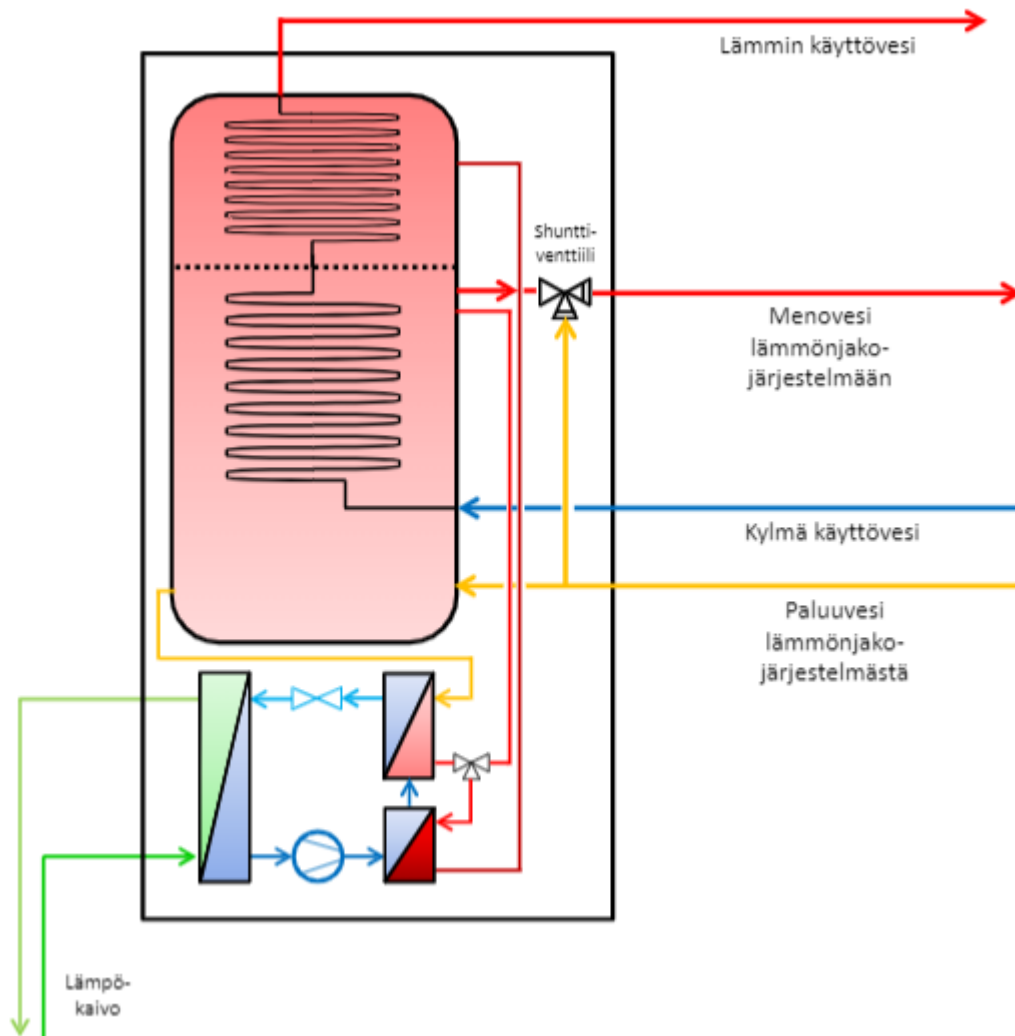
Tulistusmallisissa lämpöpumpuissa on lauhduttimen lisäksi heti kompressorin jälkeen sijoitettu toinen lämmönvaihdin, jota kutsutaan tulistimeksi. Tulistimella kompressorin tuottamasta kuumakaasusta otetaan heti kuumin osa talteen siirtämällä lämpöä lauhduttimessa esilämmitettyyn veteen. Tällöin saadaan tuotettua pieniä määriä jopa 70–90 -asteista lämpöä käyttöveteen. Jäljelle jäänyt lämpö ohjataan lauhduttimen kautta tilojen lämmitykseen. Tulistusmallisen maalämpöpumpun toimintaperiaate on esitetty kuvassa 15. (25, s. 6)



Kuva 15. Tulistusmallisen maalämpöpumpun toimintaperiaate. (25, s. 6)

Tulistusmallisessa järjestelmässä lämminvesivaraaja on jaettu kahteen osaan. Tulistimesta saatu lämpö ohjataan varaajan yläosaan ja lauhduttimelta saatava lämpö varaajan alaosaan. Osien välissä on reikälevy, joka sallii veden liikkumisen osien välillä, mutta pitää osien lämpötilat erilaisina, eli lämpökerrostumat eivät sekoitu. Tulistusmallisen järjestelmän periaate on esitetty kuvassa 16. (25, s. 7)

Käyttöveden esilämmitys tapahtuu syöttämällä vettä varaajan alaosaan sijoitetun käyttövesikierukan läpi. Esilämmitetty vesi johdetaan varaajan yläosassa sijaitsevaan kierukkaan, jossa vesi tulistetaan ja johdetaan käyttövesiverkoston. (25, s. 7)

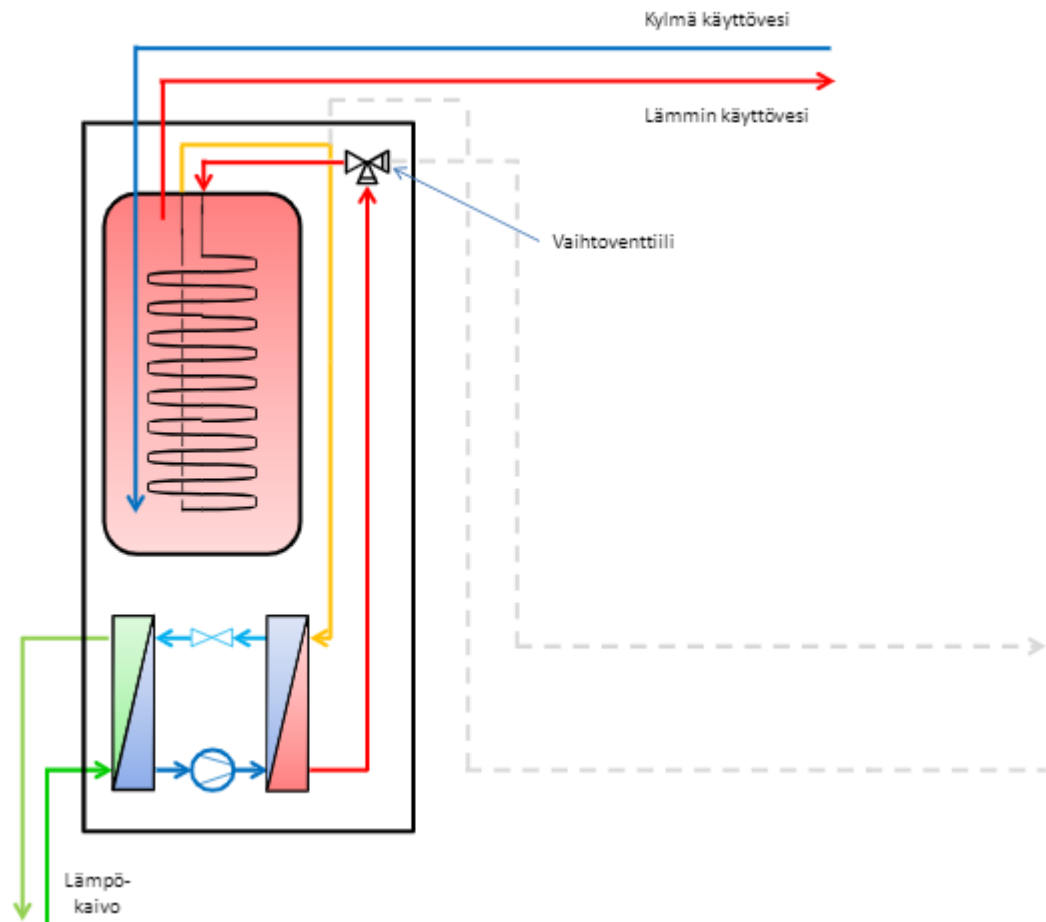


Kuva 16. Tulistusmallisen järjestelmän periaate. (25, s. 7)

Tulistinta käytettäessä saadaan käyttöveteen lämpöä tilojen lämmittämisen sivutuotteena. Mitä vähemmän lauhduttimessa esilämmitettyä vettä johdetaan tulistimeen, sitä kuumempaa vettä saadaan. Tuotettaessa matalalämpöistä vettä lämmitysverkostoon, saadaan samalla lämmintä käyttövettä matalalla kompressoripaineella ja pienellä sähkönkulutuksella. Tämä parantaa maalämpöpumpun lämpökerrointa. Tulistimen teho on vain noin 15–20 % kompressorin tehosta, joten suurin osa tehosta ohjautuu lauhduttimeen. Lämmityskaudella lauhduttimen tuottamaa lämpöä käytetään tilojen lämmittämiseen, mutta lämmityskauden ulkopuolella tulistuksesta syntyvä hyöty hiipuu, kun lämmitystarvetta ei ole. Lämmitettäessä kesällä käyttövettä, lämmitetään myös varaajan alaosaa, mutta syntyvää lämpöä ei saada hyödynnettyä tilojen lämmitykseen. Tätä rinnakkaistoimivuutta voidaan pitää tulistuspumpun huonona puolena. Tulistin vie kuumimman osan tuotetusta lämmöstä käyttöveteen; olisi eduksi, jos kovimmillakaan pakkasella lämmitysjärjestelmään ei tarvitsisi syöttää kuumimpia menoveden lämpötiloja. Myös varaajan mitoitukseen kannattaa kiinnittää huomiota, sillä isommalla varaajalla voi paremmin eliminoida rinnakkaistoimivuuden tuomia haittoja. (25, s. 7)

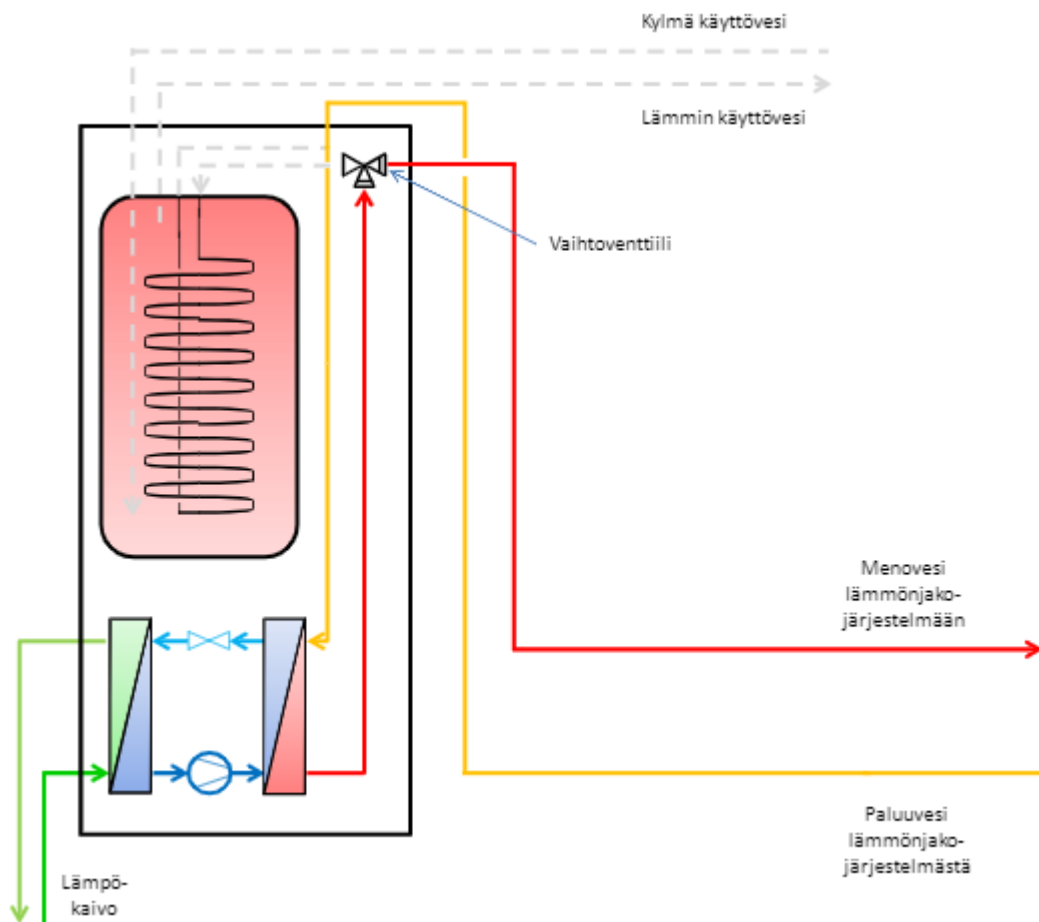
6.3 Vaihtuvan lauhdutuksen maalämpöpumppu

Vaihtuvalauhduhteisessa maalämpöjärjestelmässä lämpöä tuotetaan tarpeen mukaan joko käyttöveteen tai tilojen lämmittämiseen. Lämmitettäessä käyttövettä kohdistetaan maalämpöpumpun koko teho hetkellisesti käyttövesivaraajan lämmittämiseen. Kuvassa 17 s. 65 varaaja lämmitetään kierukalla, jolloin kierukan läpi kulkeva kuuma vesi lämmittää varaajassa olevan käyttöveden nopeasti tavoitelämpötilaan. Varaajan lämmitys voidaan toteuttaa myös kierrättämällä varaajassa olevaa vettä lämpöpumpun lauhduttimen läpi ja johtamalla käyttövesi kierukan läpi, jolloin varaajasta siirtyy lämpöä kierukassa virtaavaan käyttöveteen. Kohdistamalla lämpöpumpun koko teho käyttöveden lämmitykseen, lämmintä vettä saadaan nopeasti lisää, ja käyttövesivaraajien koko voi olla pienempi. (25, s. 8)



Kuva 17. Käyttöveden lämmitys vaihtuvalauhdutteisella järjestelmällä. (25, s. 8)

Kuvassa 18 s. 66 on esitetty tilojen lämmittäminen vaihtuvalauhdutteisella järjestelmällä. Kun käyttövesivaraajan tavoitelämpötila on saavutettu, kääntyy pumpun tuottaman lämpimän veden suunta vaihtoventtiilin avulla rakennuksen lämmitysverkostoon. Mikäli lämmitystarvetta on pumpun käy ja tuottaa lämpöä lämmitysverkostoon. (25, s. 8)



Kuva 18. Tilojen lämmittäminen vaihtovalauhdutteisella järjestelmällä. (25, s. 8)

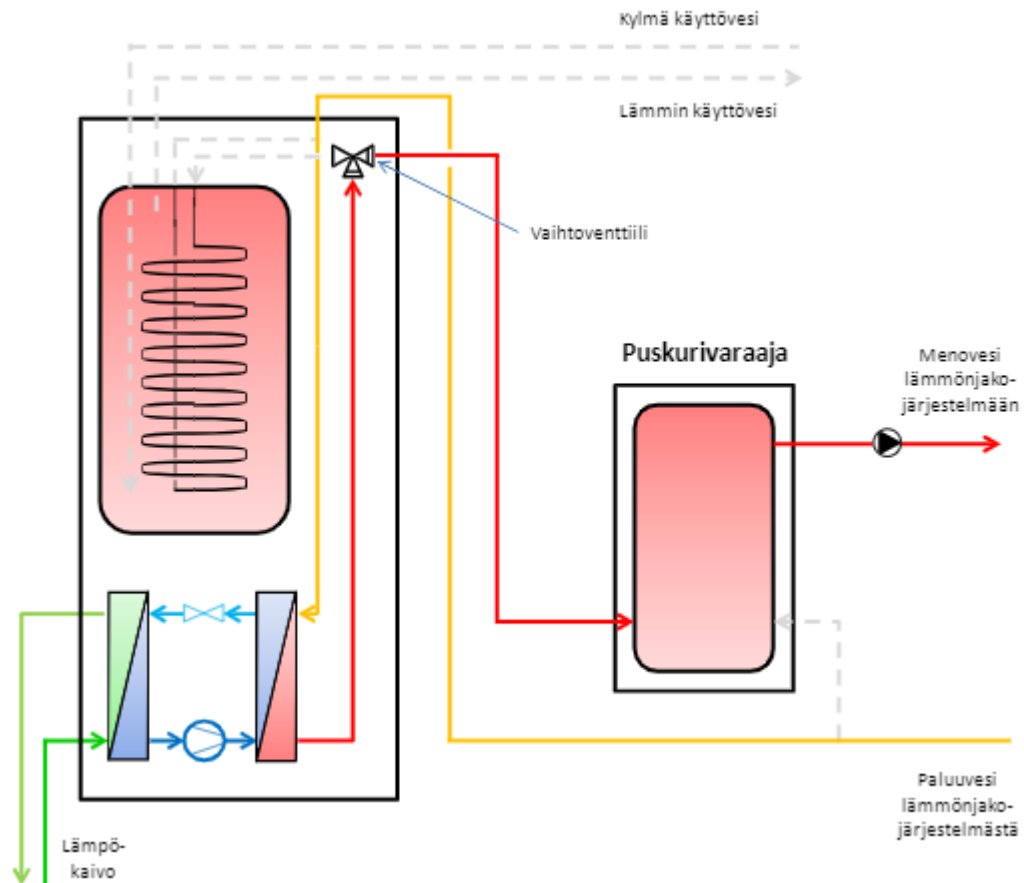
Vaihtovalauhdutteinen pumppu tuottaa lämmön suoraan oikean lämpöisenä lämmitysverkostoon ulkolämpötilan ohjaamana. Lämmityskaudella kovia pakkausia, jolloin tarvitaan korkeaa menoveden lämpötilaa, on vain harvoin, ja näin ollen vaihtuvan lauhdutuksen pumpulla voidaan tuottaa matalalämpöistä vettä pitkiä jaksoja. Tämä parantaa maalämpöpumpun vuosihyötysuhdetta, ja lämpöä tuotetaan vain tarpeen mukaan. Tästä johtuen järjestelmän sähkökulutus suhteessa käytettyyn energiaan on edellisiä pumppumalleja pienempi. (25, s. 8)

Lämpöpumpun käyttöikään vaikuttaa merkittävästi käynnistyskertojen määrä. Laitteiston automaattinen voitelu toimii parhaiten lämpöpumpun käydessä lämpimänä, eikä käyminen tällöin juurikaan rasita laitteistoa. Käynnistyksen jälkeen kylmän laitteiston voitelu toimii heikommin, mikä aiheuttaa laitteiston kulumista.

Vaihtuvalauhdutteinen pumppu hyödyntää lämmönjakoverkoston vesimassaa sekä rakennuksen rakenteita käyntijaksojen säätelyyn. Käydessään lämpöpumppu lämmittää lämmitysverkostossa olevan veden jonkin verran tavoitelämpötilaa lämpimämmäksi ja pidentää näin käyntiaikaansa. Pumpun ollessa pysähtyneenä, antaa se laskea menoveden lämpötilaa hieman tarvittavaa alemmaksi ja siirtää näin käynnistystä hieman eteenpäin. (25, s. 9)

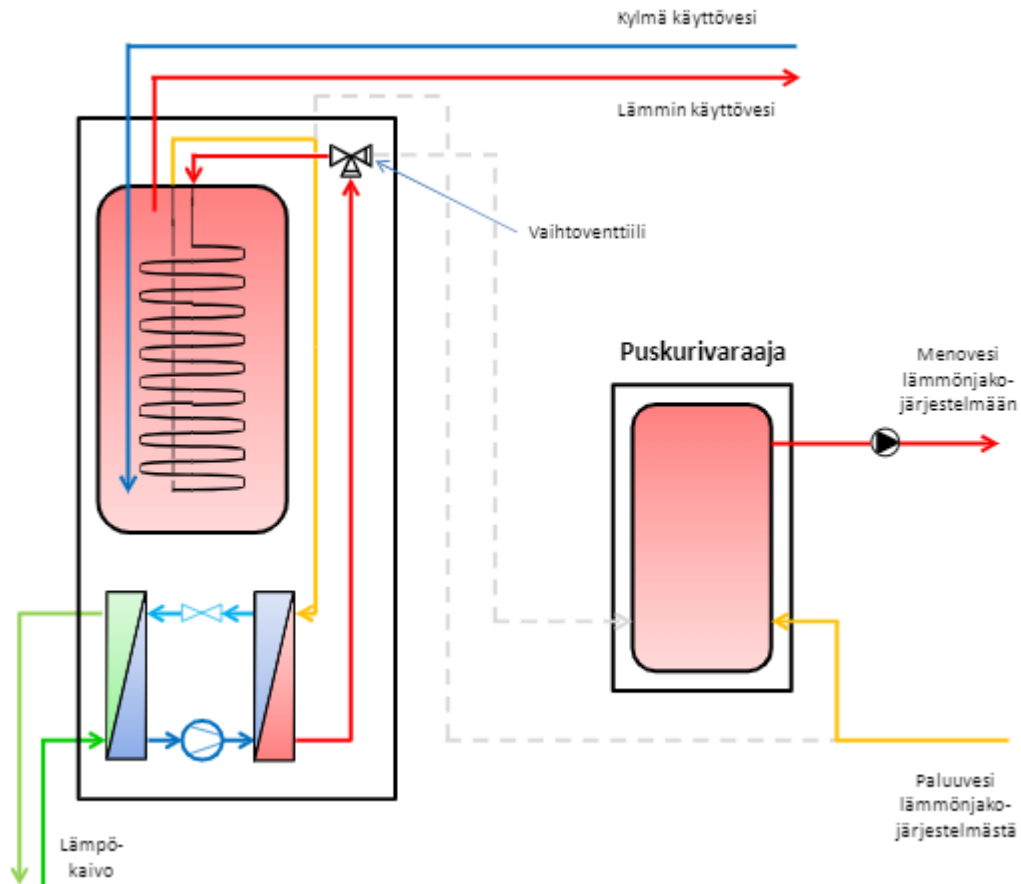
Varsinkin patterilämmitteisessä vanhassa rakennuksessa, jossa on ollut alun perin esimerkiksi öljylämmitys, käyntijaksot jäävät usein liian lyhyiksi. Patterit on mitoitettu korkeille lämpötiloille ja ovat tällöin pienemmät, jolloin niiden vesitilavuus on myös pieni. Maalämpöpumppu nostaa nopeasti patteriverkoston lämmitys veden lämpötilan haluttuun arvoon ja sammuu. Tämän jälkeen patterit luovuttavat lämmön tilaan nopeasti, ja lämpöpumppu käynnistyy uudelleen. Tiheät käynnistykset kuluttavat maalämpöpumpun kompressoria, ja sen käyttöikä lyhenee. (25, s. 9)

Lämmitysverkoston vesimäärää on kuitenkin mahdollista lisätä varustamalla lämmitysverkosto puskurivaraajalla. Kuvassa 19 s. 68 havainnollistetaan puskurivaraajan toimintaperiaate tilojen lämmityksessä. Oikean kokoisen varaajan valinnalla varmistetaan pitkät käyntijaksot lämpöpumpulle ja pidennetään sen käyttöikä. Käynnistyskertojen vähenemisen myötä paranee myös laitteiston lämpökerroin. (25, s.9)



Kuva 19. Puskurivaraajan toimintaperiaate tilojen lämmityksessä. (25, s. 9)

Puskurivaraaja mahdollistaa myös lämmitysverkoston jatkuvan kierron puskurivaraajan kautta silloin, kun lämpöpumppu lämmittää käyttövettä. Puskurivaraaja vähentää verkoston lämpötilavaihteluita ja niistä johtuvia häiritseviä ääniä. Puskurivaraajan toimintaperiaate lämmitettäessä käyttövettä on esitetty kuvassa 20 s. 69.



Kuva 20. Puskurivaraajan toimintaperiaate lämmitettäessä käyttövettä. (25, s. 10)

Nykyisin asuinrakennuksissa käytettävät lämpöpumput ovat vaihtuvalauhdutteis-pumppuja, joilla tuotetaan lämpöä vuorotellen sekä käyttöveden lämmittämiseen että tilojen lämmittämiseen. Suuremmissa asuinrakennuksissa varaajien määrä ja koko vaihtelevat lämmityksen ja käyttöveden tarpeiden mukaan. Usein suuremmissa asuinrakennuksissa on myös käyttövedenkiertojohto, jonka lämmön tarve täytyy kattaa. Eri lämpöpumpputoimittajilla on omat vakioidut kytkentämallinsa, joissa eroja eri toimittajien välillä aiheuttaa usein lämpimän käyttöveden lämmityksen toteutus. Lämpöpumppujen perustoimintaperiaate on kuitenkin aina samanlainen lämpöpumpputyypin ollessa samat.

6.4 Lämpöpumpun säätöalue

Nykyaikaisten lämpöpumppujen kompressorien tehonsäätö voidaan toteuttaa kolmella päämenetelmällä: vakioehto, invertterisäätö sekä usean kompressorin laitteet (26, s. 17).

Vakioehtokäytöllä, eli niin sanotulla on/off -käytöllä, lämpöpumpun kompressori tuottaa lämpöä aina vakioehtolla. Vakioehto- ohjaus edellyttää, että järjestelmän mitoituksessa varmistetaan kompressorille riittävän pitkät käynti- ja lepojaksot myös silloin, kun rakennuksen tehon tarve on pieni. Muutoin riskinä on laitteiston enneaikainen hajoaminen liian lyhyiden käynti- ja lepojaksujen vuoksi. (26, s. 17)

Invertterikäyttö mahdollistaa lämpöpumpun lämpötehon säädön, kierroslukuohjatulla kompressorilla. Tyypillisesti lämpötehon säätöalue on 40–100 % lämpöpumpun nimellistehosta. Ulkolämpötilan pysyvyyden perusteella lämmitysjärjestelmän tehontarve on alle puolet mitoitustehosta noin 70 % vuodesta, mikä on huomioitava myös invertteripumppujen järjestelmämitoituksessa. Toisaalta invertterisäädöstä huolimatta pumppujen latauspiirin virtaama on oltava suuri, mikä on huomioitava suunnittelussa. (26, s. 17)

Usean kompressorin lämpöpumput on toteutettu tyypillisesti kahdella kompressorilla, jolloin saavutettavat tehoportaat ovat 50 % ja 100 %. Suurempiin järjestelmiin on mahdollista lisätä useita alistettuja lämpöpumppuyksiköitä. Alistettuja lämpöpumppuyksiköitä ohjaa määrääväksi yksiköksi valittu lämpöpumppu. Alistamisella estetään lämpöpumppujen turha samanaikainen käynnistyminen ja varmistetaan vuorottelun avulla käyttötuntien tasaaminen yksiköiden välillä. Vuorottelulla voidaan pidentää järjestelmän huoltoväliä. (26, s. 18)

Usean kompressorin järjestelmä voidaan toteuttaa myös siten, että käytetään kompressoreita, joissa on invertterit. Tällöin saavutetaan laaja tehonsäätöalue 20–100 %. Huoltovälin pidentämisen lisäksi useampi kompressori lisää myös järjestelmän toimintavarmuutta, kun järjestelmän toiminta ei ole riippuvainen

pelkästään yhdestä kompressorikoneikosta. Kiinteistökokoluokan järjestelmät toteutetaan lähes aina useampikompressorisella käytöllä. (26, s. 18)

6.5 Kompressorin käynti- ja seisontajaksot

Liian lyhyiksi mitoitettut käynti- ja seisonta jaksot aiheuttavat lämpöpumpun enenaikaisen vioittumisen. Sekä scroll- että mäntäkompressorille suositellaan enintään 12 käynnistystä tunnissa. Käyntijakson pituus on minimissään kaksi minuuttia, jotta moottori jäähtyy riittävästi käynnistyksen jälkeen. Seisontajakso on vähintään kolme minuuttia, jotta moottori jäähtyy riittävästi ennen seuraavaa käynnistystä. Käynnistäminen rasittaa myös laakereita, koska voitelu ei toimi kunnolla käynnin alussa. Lisäksi maalämpöpumpputoimittajilla on omat suosituksensa käynti- ja lepojaksoiden pituudelle, jotka ovat yleensä 5–10 minuuttia ja 10–20 minuuttia. (24; 26, s. 18)

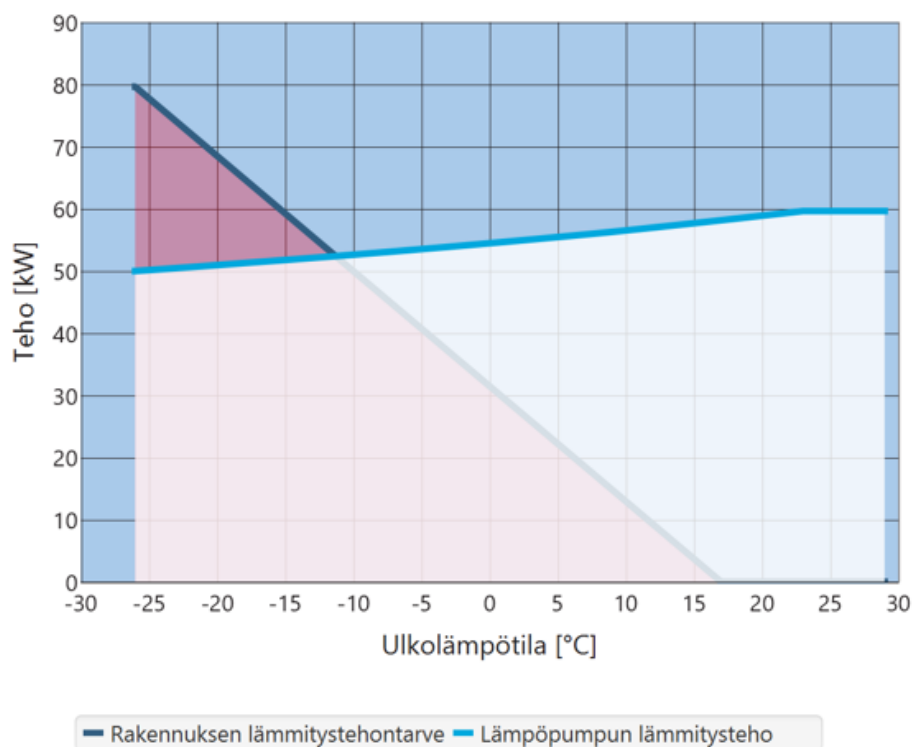
Kuormitetun kompressorin jäähdytys tapahtuu kylmäaineen kaasuvirran avulla ja kompressorin pysähtyessä jäähdytys loppuu. Kompressorin tarvitsee riittävän ajan pysähtyneenä jäähtyä ulkopuolisen lämmönluovutuksen avulla. (26, s. 18)

Laitteiston elinkaarelle käyntijakson pituuden yläraja ei ole yleensä kriittinen tekijä. Kompressorit on yleensä suunniteltu mekaanisesti 60 000 tunnin käyntijälle tai 300 000 käynnistyskerralle. Käynnistysvälin ollessa maltillinen on laboratorioskokeissa päästy jopa 500 000 käynnistykseen. Ohjeellinen kompressorin vuotuinen käyntiaika on 3500–4000 tuntia. Kylmäaineprosessin käynnistysvaihe kuluttaa enemmän sähköä kuin tasainen käyntijakso, joten käyntijaksoiden riittävä pituus parantaa myös järjestelmän energiatehokkuutta. (24; 26, s.18)

6.6 Lämpöpumpun todellinen tehontuotto ja mitoituspiste

Lämpöpumpun mitoituspiste määritetään lämmitystehon tarpeen ja todellisen lämpöpumpun tuottaman tehon perusteella. Lämpöpumppujen nimellistehot on

määritetty standardien mukaisissa olosuhteissa, jotka poikkeavat usein todellisista mitoitusolosuhteista. Tämän vuoksi lämpöpumpun ilmoitettua nimellisteho ei voi käyttää mitoituspisteen määrittämiseen. Kuvassa 21 esitetyn maalämpöpumpun todellinen lämmitysteho mitoitusilanteessa on 83 % maalämpöpumpulle ilmoitetusta nimellistehosta (60 kW), jos lisälämmönlähde mitoitettaisiin nimellistehon perusteella, jäisi lämmöntuotanto alitehoiseksi.

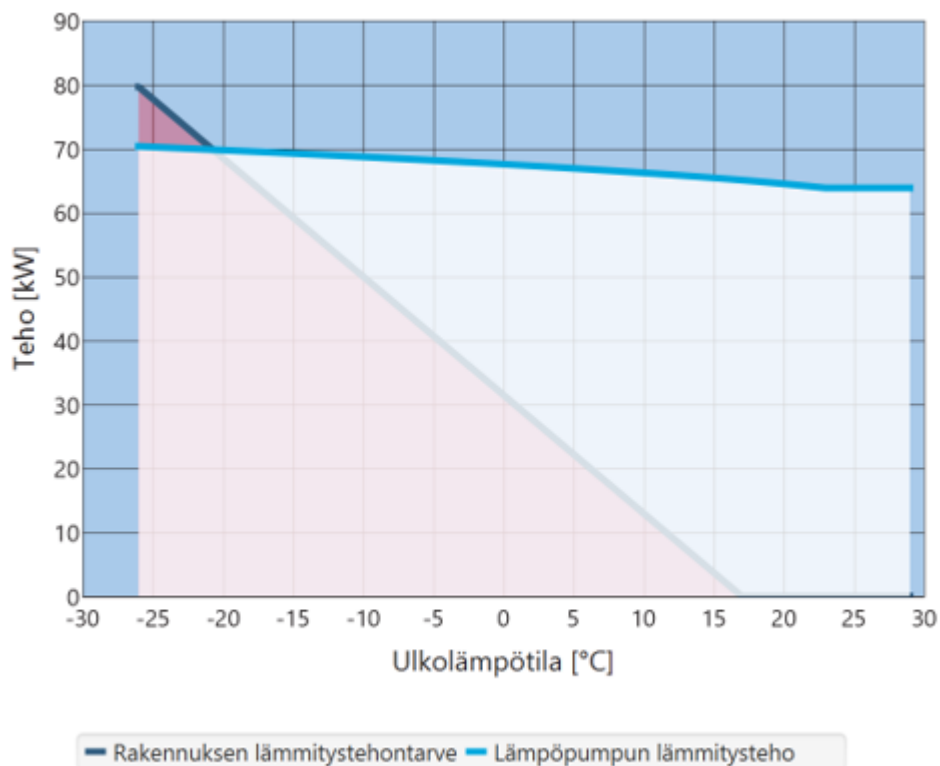


Kuva 21. Mitoituspisteen määrittely lämmitystarpeen ja tuoton perusteella 60/30 lämmitysverkostossa.

Ulkolämpötilan laskiessa rakennuksen lämpöenergian tarve kasvaa, jolloin lämmönluovuttimien tehoa kasvatetaan korottamalla verkoston lämpötiloja. Kuva 21 osoittaa, että lämmitysverkoston lämpötilojen nosto heikentää lämpöpumpun tuottoa, ja näin ollen myös hyötysuhde heikkenee. Lämpöpumpun tuottoon vaikuttavat myös lämmönlähteen lämpötilan vaihtelut. Maalämpöpumpun ollessa kyseessä, ulkoilman lämpötilojen vaihtelut eivät vaikuta yhtä merkittävästi lämmönlähteen lämpötilaan kuin esimerkiksi ilmavesilämpöpumpuissa, joissa ulkoil-

man lämpötilan vaikutus on merkittävä. Kuvassa 21 esitetty lämpöpumpun antoteho on määritelty Oilon Selection Tool- mitoitusohjelmalla. Mitoitus on tehty Eli 60-mallisella lämpöpumpulla. Lämmitysverkoston lämpötiloina on käytetty 60/30 °C ja keruunesteen lämpötilan on oletettu olevan 0/-3 °C. Käyttöveden lämmitystä ei ole huomioitu.

Markkinoilla on myös maalämpöpumppuja, jotka on varustettu EVI (enhanced vapour injection, economizer) -tekniikalla. Näiden EVI-pumppujen etuna on, että niillä pystytään tuottamaan suuremmalla teholla korkealämpöistä vettä verrattuna tavanomaisiin lämpöpumppuihin. Kuvassa 22 on esitetty EVI-tekniikalla varustetun lämpöpumpun todellinen tuotto samoissa olosuhteissa kuin aiemmin kuvassa 21 esitettyllä tavanomaisella lämpöpumpulla.



Kuva 22. Mitoituspisteen määrittely lämmitystarpeen ja tuoton perusteella 60/30 lämmitysverkostossa EVI-tekniikkaa hyödyntävällä maalämpöpumpulla.

Kuva 22 osoittaa EVI-tekniikan tuottaman hyödyn lämpöpumpun tuottaessa korkealämpöistä vettä lämmitysverkostoon, jolloin lämpöpumpun tehon tuotto ei laske, kuten tavanomaisella kompressoritekniikalla varustetulla lämpöpumpulla.

7 Varaajat

Maalämpöjärjestelmät varustetaan tyypillisesti lämmityksen puskurivaraajalla ja käyttöveden lämminvesivaraajalla. Puskurivaraajan avulla pyritään varmistamaan lämpöpumpulle suotuisat toimintaolosuhteet lämpökuormien vaihdellessa ulkoisten tekijöiden vaikutuksesta. Lämminvesivaraajan avulla varmistetaan lämpimän käyttöveden riittävyys kulutushuipun aikana.

7.1 Puskurivaraaja

Puskurivaraajan avulla pystytään takamaan lämpöpumpulle riittävän pitkät käyntijaksot sekä varmistamaan, että lauhduttimen läpi saadaan johdettua riittävä tilavuusvirta joka tilanteessa. Lämpötilaero lauhduttimessa on tyypillisesti 5° C, jos lämmönjako on toteutettu lattialämmitysverkostolla ja 7–10° C, jos lämmönjako on toteutettu patteriverkostolla. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi vakio-ohjatussa lämpöpumpussa vesivirta lauhduttimen läpi on pidettävä vakiona. Esimerkiksi patteriverkostossa meno- ja paluuv veden lämpötilaero voi olla jopa 30° C, kun taas lämpöpumpun toiminnan kannalta lämpötilaero lauhduttimessa täytyy olla 7–10 °C, tämän toteuttaminen ilman puskurivaraajaa ei onnistu. Voidaan todeta, että lämpöpumppu ei voi toimia perinteisen lämmitysverkoston yhteydessä ilman puskurivaraajaa. Myös järjestelmissä, joissa lämpötilaerot vastaavat toisiaan, on varaaja tarpeen lämmönluovuttimien säätötavasta johtuen. Lämmönluovuttimien toimintaa ja tehoa säädetään tilavuusvirtaa rajoittamalla. Tilavuusvirran laskiessa esimerkiksi lämpökuorman johdosta saattaa lämpöpumppu mennä vikatilaan riittämättömän höyrystyksen tai virtausvahdin vuoksi. (26, s. 23)

Puskurivaraajan koko on kriittinen lähinnä leudolla ulkolämpötilalla. Lämmitystarpeen ollessa merkittävää, ei varaajan koko ole enää yhtä kriittinen. Latauspiirien virtaamat ja näin ollen myös varaajien virtaamat ovat tyypillisesti niin suuria, ettei puskurivaraajaan synny lämpötilakerrostumaa. (26, s. 29)

Puskurivaraajan ylimitoitus aiheuttaa tarpeetonta viivettä lämpötilan muutokseen varaajassa. Puskurivaraajien lämpötila pidetään yleensä mahdollisimman matalana siten, että lämpötila vastaa lämmitysverkoston lämpötilaa. Ylimitoitettun puskurivaraajan lämpötilan muutos kestää liian kauan, jolloin lämmitysverkostoon ei saada haluttua lämpötilaa ilman liian pitkää viivettä. Tämän seurauksena saattaa aiheutua turhaa lisälämmön käyttöä. (26, s. 29)

Puskurivaraaja mitoitetaan lyhimmän sallitun käyntijakson perusteella. Varaajan pienin latausteho on lämpöpumppujärjestelmän pienimmän antotehon ja samanaikaisen lämmitystarpeen erotus. Varaajan oltavan riittävän suuri salliakseen lämpöpumpun lyhimmän käyntijakson toteutumisen varaajan halutun lämpötilamuutoksen puitteissa. (26, s. 29)

Puskurivaraajan tilavuus voidaan laskea kaavalla 27.

$$V = T\phi/c\Delta T \quad (27)$$

V on varaajan tilavuus, dm³

T on lämpöpumpun lyhyimmän sallitun käyntijakson aika, s

ϕ on lämpöpumpun teho, kW

c on veden ominaislämpökapasiteetti, 4,2 kJ/kg K

ΔT on lämpötila ero varaajassa, K

7.2 Lämminvesivaraaja

Lämpöpumppujärjestelmällä tuotettava huippulämpötila on tyypillisesti alhaisempi verrattuna perinteisiin lämmöntuotantojärjestelmiin, jonka vuoksi lämmintä vettä on varastoitava kulutus huippuja varten. Lämminvesivaraajan koko valitaan lämpimän käyttöveden tarpeen mukaan. Lämpimän käyttöveden kulutus huippu on kriittinen tekijä lämminvesivaraajan kokoa mitoitettaessa, sillä lämmin käyttövesi ei saa loppua kesken. Lämminvesivaraajat varustetaan yleensä myös sähkövastuksella tai muulla lisälämmönlähteellä, jolla lämmitystehoa ja veden lämpötilaa saadaan tarvittaessa nostettua, ellei maalämpöjärjestelmällä saada tuotettua tarpeeksi riittävän lämpöistä käyttövettä. Käyttövesiverkostosta saatavissa olevan lämpimän käyttöveden lämpötila on oltava vähintään 55 °C (27, s. 3). Kohteissa, joissa on lämpimän käyttöveden kiertojohto, lämmityslaitteistolta lähtevän veden lämpötila tulisi olla vähintään 58 °C, jotta kiertojohtoon aiheuttamat häviöt eivät laske veden lämpötilaa alle 55 °C (28).

7.2.1 Lämpimän käyttöveden kulutushuipun arviointi

Asuinrakennuksen kulutushuippu voidaan arvioida esimerkiksi talukkoarvojen ja asukasmäärän perusteella. Kuvassa 23 s. 77 on esitetty tyypillisiä veden kulutuslukuja ja kulutusjakauma asuintalossa. Saneerauskohteessa hyödynnetään todellisia kulutustietoja.

Toimenpide	Kulutus (dm ³ /krt)	Osuus kesim. kulutuksesta (%)
Peseytyminen		39
- suihku	60-90	
- ammekylpy	250-300	
WC:n huuhtelu	4/6/9	26
Ruoanlaitto- ja Astioiden pesu	2-6	5
- pesukone	15-20	22
-käsipesu, altaassa	30-60	
-käsipesu, juoksevalla vedellä	80-120	
Vaatteiden pesu	35-65dm ³ /kg	13
Auton pesu	150-200	-

Kuva 23. Veden kulutuslukuja ja kulutusjakauma asuintaloissa. (29, s. 10)

Kuten kuvasta 23 nähdään peseytyminen muodostaa suurimman osuuden asuintalojen veden kulutuksesta. Asuinkerrostalon ollessa kyseessä voidaan kulutushuipun ajatella muodostuvan siitä, että useampi asukas on samaan aikaan suihkussa esimerkiksi aamulla ennen töihin lähtöä tai että lauantai-iltana useampi asukas on lämmittänyt saunan ja käy pesulla. Ajatellaan, että pahimmassa tapauksessa kerrostalon asukkaat kävisivät suihkussa kahden tunnin aikana. Jos kerrostalossa on 40 asuntoa ja asunnossa keskimäärin kaksi asukasta, on asukasmäärä yhteensä 80. Kuvan 23 mukaisesti oletetaan, että suihkussa käynti kuluttaa vettä 90 dm³ asukasta kohti, eli suihkussa kuluu kahden tunnin aikana 37° C vettä yhteensä 7200 dm³. Tarvittava 55° C:n veden määrä voidaan ratkaista yhtälöllä 28.

Suihkusta tuleva 37° C vesi tuotetaan sekoittamalla lämminvesivaraajasta saatavaan 55 °C veteen vesijohtoverkon 5°C vettä. Tällöin 55° C:n veden määrä X saadaan laskettua yhtälöstä 28.

$$7200dm^3 * 37^{\circ}C = X * 55^{\circ}C + (7200dm^3 - X) * 5^{\circ}C$$

$$X = \frac{7200dm^3 * (37-5)^{\circ}C}{(55-5)^{\circ}C} = 4608dm^3 \quad (28)$$

Mikäli lämminvesivaraajan vesi on viileämpää, tarvitaan sitä enemmän.

Lasketaan seuraavaksi kaavan 29 avulla, paljonko lämpöpumppu tuottaa lämmintä käyttövettä kahden tunnin aikana.

$$V_{pumppu} = T_{pumppu} \emptyset / c \Delta T \quad (29)$$

V_{pumppu} on lämpöpumpun tuottaman lämpimän veden tilavuus, dm^3

T_{pumppu} on lämpöpumpun käyntiaika, jonka se lämmittää käyttövettä, s

\emptyset on lämpöpumpun teho, kW

c on veden ominaislämpökapasiteetti, 4,2 kJ/kg K

ΔT on kylmän ja tuotettavan lämpimän veden lämpötilaero, K

Oletetaan, että rakennus on varustettu vaihtuvalauhdutteisella maalämpöpumpulla, joka pystyy tuottamaan lämpöä 80 kW:n teholla vuorotellen sekä lämmitysverkostoon että käyttöveteen. Lämpöpumppu tuottaa lämmintä vettä kahden tunnin aikana seuraavasti:

$$\frac{80kJ}{s} * 2 * 3600s / (50K * \frac{4,2kJ}{kgK}) = 2743kg \sim dm^3$$

Tällöin varaajassa pitää olla lämmintä 58°C vettä:

$$4608dm^3 - 2743dm^3 = 1865 dm^3$$

Laskelman perusteella valitaan varaajan tilavuudeksi 2000 dm^3 , joka saavutetaan esimerkiksi kahdella 1000 litran varaajalla. Jos varaajassa oleva vesi on

viileämpää tai lämpötilakerrostuma sekoittuu, tarvitaan varaajakapasiteettia enemmän. Esilämmittämällä kylmää käyttövettä puskurivaraajassa, voidaan parantaa lämpimän käyttöveden tuottoa. Esilämmitys pienentää kylmän ja tuotettavan lämpimän veden lämpötilaeroa, jolloin samalla lämpöpumpputeholla tuotettavan lämpimän veden määrä kasvaa.

7.3 Varaajan lataaminen

Käyttövesivaraajaa voidaan ladata joko kierrättämällä varaajassa olevaa vettä lämpöpumpun lauhduttimen läpi tai varaajassa olevan kierukkalämmönvaihtimen läpi. Ensin mainitun lataustavan ollessa kyseessä, lämpö siirretään varaajassa olevan käyttövesikierukan avulla käyttöveteen tai käytetään ulkoista levylämmön siirrintä lämmön siirtämiseksi varaajasta käyttöveteen.

Käytettäessä kierukkaa lämmön siirtämiseksi lämpöpumpun lauhduttimelta varaajaan, saadaan tällöin varaajaan tuotettua valmista lämmintä käyttövettä. Tällöin varaajatilavuuden ollessa suuri on kuitenkin vaarana, että varaajan alosaan jää pitkäksi aikaa viileämmän veden kerrostuma, joka voi aiheuttaa legionellariskin. Legionellat ovat luonnon bakteereja, jotka pystyvät lisääntymään lämpimässä käyttövedessä, jos veden lämpötila ei ole riittävän korkea. Legionellat lisääntyvät veden lämpötilan ollessa 20–45 °C. Suurissa asuinkiinteistöissä käytetään ratkaisuja, joissa käyttövesi lämmitetään erillisessä siirtimessä tai varaajassa olevassa kierukassa, eikä varastoida järjestelmässä. Tällöin lämmintä käyttövettä ei seiso tarpeettomasti järjestelmässä. (30)

Suuremmissa asuinkiinteistöissä käytetään tyypillisesti vaihtoehtoa, jossa varaaja ladataan kierrättämällä varaajassa olevaa vettä lämpöpumpun lauhduttimen kautta. Näin ollen käyttövesi johdetaan varaajassa olevien kierukoiden läpi, joissa varaajasta siirtyy lämpöä käyttöveteen. Tässä tapauksessa varaajassa olevan veden lämpötilan on oltava korkeampi, koska kierukoiden asteisuus voi olla jopa 5–8 °C, eli varaajasta ulos tulevan käyttöveden lämpötila on 5–8 °C alhaisempi kuin varaajan lämpötila (Henkilökohtainen puhelinkeskustelu

15.2.2022 Kaukora Oy:n projektimyöntipäällikkö Arttu Eskolan kanssa). Kierukaratkaisua hyödynnetään usein myös käyttöveden esilämmityksessä, jolloin puskurivaraajaan asennetaan käyttövesikierukka. Kylmä käyttövesi johdetaan ensin esilämmityskierukan läpi ja sen jälkeen lämminvesivaraajalle. Kierukat suositellaan sijoitettavaksi varaajaan pystysuuntaisesti. Tämä parantaa lämpötilakerrostumista varaajassa. Kierukoita voidaan kytkeä useampia sarjaan tai rinnan. Esimerkiksi kahdella pystysuuntaisella sarjaan kytketyllä kierukalla saadaan varaajan koko kapasiteetti alhaalta ylös hyödynnettyä. Pelkästään varaajan yläosaan sijoitetut kierukat viilentävät varaajan yläosan nopeasti ja varaajasta saatavan veden lämpötila laskee. (28)

Vaihtoehtona käyttövesikierukalle, on siirtää lämminvesivaraajaan varastoitu lämpö ulkoisen levylämmönsiirtimen avulla käyttöveteen. Tämä ratkaisu vaatii aina oman kiertovesipumpun varaajan ja lämmönsiirtimen välille. Levylämmönsiirtimen etuna kierukkaan verrattuna on sen pienempi asteisuus. Levylämmönsiirtimen asteisuus on tyypillisesti 2–3° C, jolloin sen läpi ei tarvitse johtaa yhtä lämmintä vettä kuin kierukan läpi, että saavutetaan haluttu käyttöveden lämpötila. (30)

7.4 Varaajien materiaalit

Käytettävien vesien laatu vaikuttaa siihen, millaisella korroosiosuojauksella varustettu varaaja kannattaa valita. Valittavana on yleensä kolme eri vaihtoehtoa.

Kun kiinteistöön tuleva vesi tulee kunnallisesta vesilaitoksesta, käytetään useimmiten ruostumattomasta teräksestä (RST) valmistettuja varaajia. Ne ovat helppohoitoisia ja kestäviä kun vesi tulee kunnallisesta vesilaitoksesta. Joissain porakaivo-, lähde- tai järvidesissä voi olla korkea kloridipitoisuus, joka aiheuttaa pistesyöpymiä ruostumattomaan teräkseen. Kloridipitoisuuden haitat korostuvat, mikäli veden kalkkipitoisuus on suuri. (25, s. 12–13)

Varaaja voidaan pinnoittaa myös emalipinnoitteella. Näin syntyy ohut kova kalvo varaajan pintaan, varaajassa olevan veden ja teräksen välille. Tämän johdosta varaajaa voidaan käyttää lähes kaikkien vesilaatujen kanssa. Varaajan painevaihtelut aiheuttavat kuitenkin pieniä halkeamia kovaan joustamattomaan emalipintaan. Tämän seurauksena vesi voi päästä kosketuksiin emalin alla olevan teräksen kanssa. Emalipinnoitetussa varaajassa käytetään lisäkorroosion suojana suoja- anodia. Anodista liukenee suoja- ainetta halkeamiin, jotka peittyvät kalsium- ja magnesiumyhdisteillä. Anodin kulumista on seurattava säännöllisesti ja anodi on uusittava tarpeen vaatiessa. (25, s. 12–13)

Kolmantena vaihtoehtona on kuparivuoratut varaajat. Kupari on puolijaloa metallia ja kestää lähes kaikkia vesilaatuja, eikä suoja- anodia tarvita. Mikäli veden kloridipitoisuus on korkea, on emalivaraaja suositeltavampi. Veden korkea happamuus voi aiheuttaa kuparin liukenemista, jonka seurauksena vesikalusteet värjäytyvät vihreäksi. (25, s. 12–13)

8 Jäähdytys maalämpöjärjestelmällä

Maalämpöjärjestelmän energiatehokkuus on parhaimmillaan, kun sekä lämpöä että jäähdytystä hyödynnetään. Maalämpöjärjestelmän jäähdytyspotentiaali on samaa luokkaa kuin lämmityspotentiaali, joten jäähdytyksen hyödyntäminen parantaa olennaisesti investoinnin hyödyntämisisettä ja kannattavuutta. Jäähdytyskäyttö lisää maalämpöjärjestelmän lämmityspotentiaalia ja lämmityskäyttö taas jäähdytyspotentiaalia, parantaen samalla lämmöntuotannon käyttötaloutta. Ajettaessa jäähdytyksestä syntyvä lämpö energiakaivokenttään, kentästä on saatavissa edullisempi ja kompaktimpi, millä on merkitystä etenkin ahtailla kaupunkitonteilla. Jäähdytyksen vaikutus energiakaivokenttään on tarkasteltava tarkemmin esimerkiksi EED- simulointiohjelmistolla. (31)

Maalämpöjäähdytystä on mahdollista tuottaa kolmella eri tavalla; vapaajäähdytyksenä, lämmöntuotannon sivutuotteena ja aktiivijäähdytyksenä lämpöpumpuilla.

Vapaajäähdytystä hyödynnetään energiakaivojen avulla maaperästä saatavalla maakyilmällä. Sähköä tarvitaan tällöin vain liuoksen kierrättämiseen, joten COP voi olla jopa 50. Energiakaivosta on saatavissa noin 10-asteista liuosta teholla 15–20 W/m noin yhden työpäivän ajan. Mikäli jäähdytys tehon tarve on suurempi ja halutaan taata tietynlainen olosuhde, on käytettävä lisäksi koneviilennystä. Kaikki yli 40W/m ja sitä lähentelevä tehontarve on suoraan tehtävä koneviilennyksellä. (31)

Lämmöntuotannon sivutuotteena jäähdytystä saadaan tuotettua silloin, kun on yhtäaikainen lämmitys- ja jäähdytystarve. Tällöin lämpöpumpulla otetaan keruuliuksesta lämpöä lämmitykseen ja vastaavasti viilentynyttä keruuliuosta käytetään jäähdytykseen, jolloin keruuliuos lämpiää ja näin parantaa lämpöpumpulla tuotettavan lämmityksen tehoa ja hyötysuhdetta. Kokonaishyötysuhde voi nousta jopa 800 %:iin, eli COP on tällöin 8. (31)

Aktiivijäähdytystä käytetään, kun viilennystarve on suuri, eikä vapaajäähdytys yksinään riitä. Tällöin käytetään lämpöpumpua tuottamaan tarpeeksi viileää vettä jäähdytysverkostoon. Käytettäessä koneviilennystä lämmitystarve on minimissään ja viilennyksessä syntyvä lauhdelämpö ajetaan energiankaivojen välityksellä maaperään. Tämän johdosta maaperän lämpötila elpyy lämmityskautta varten. Huomioitava on kuitenkin, että lauhdelämmön purkupiirissä on oltava säätö lauhdelämmön pitämiseksi rajoissa (20...30°C). Maaperä toimii tehokkaana lauhduttimena, joten jäähdytyksen COP voi olla jopa 4–5,5. (31)

9 Automaatio

Ohjekortin LVI 11-10624 (16, s. 5) mukaan suuren maalämpöjärjestelmän energiatehokas toiminta varmistetaan jatkuvalla etävalvonnalla ja -ohjauksella. Etävalvonta mahdollistaa nopean puuttumisen järjestelmässä ilmeneviin häiriöihin.

Ympäristöministeriön asetuksen 718/2020 (32, s. 2–3) mukaan rakennuksen automaatio- ja ohjausjärjestelmä on suunniteltava siten, että sillä pystytään oh-

jaamaan ja valvomaan rakennuksen energiankulutuksen kannalta keskeisiä teknisiä järjestelmiä ja laitteita energiankäytön optimoimiseksi. Rakennuksen automaatio- ja ohjausjärjestelmät on toteutettava siten, että ne toimivat käyttötarkoituksensa mukaisesti ja varmistavat omalta osaltaan hyvän, terveellisen ja turvallisen sisäilmaston aikaansaamisen energiatehokkaasti. Rakennuksen automaatio- ja ohjausjärjestelmä suunnitellaan yhteensopivaksi rakennuksen teknisten järjestelmien kanssa. Suunnittelussa on otettava huomioon sisäolosuhteiden tavoitearvot, rakennustyyppi ja energiansäästömahdollisuus.

Maalämpöjärjestelmässä edellä mainittujen tavoitteiden saavuttaminen toimivan etävalvonnan avulla edellyttää automaatio- ja ohjausjärjestelmältä vähintään seuraavien parametrien seuranta:

- maalämpöpumppujen tuottaman energian mittaus
- maalämpöpumppujen kuluttaman energian mittaus
- lisälämmityksen kuluttaman energian mittaus
- energiakaivojen tai keruupiirin lämpötilojen mittaus
- keruupiirin paineen mittaus
- lauhdutinpiirin lämpötilojen mittaus
- lauhdutinpiirin paineen mittaus
- ulkolämpötilan mittaus.

Suuret kiinteistöt varustetaan usein rakennusautomaatiojärjestelmällä, jolloin maalämpöjärjestelmä liitetään kiinteistön valvonta- alakeskukseen, jonka kautta maalämpöjärjestelmän toimintaa pystytään valvomaan. Hälytyksen sattuessa valvonta- alakeskuksen kautta tieto siirtyy huoltoyhtiölle. Mikäli kiinteistöä ei varusteta rakennusautomaatiojärjestelmällä, maalämpöjärjestelmän etävalvonta

voidaan toteuttaa laitetoimittajan tarjoamalla etäseurantapalvelulla. Laitetoimittajalta on varmistettava, että seurantapalvelu sisältää kaikki tarvittavat parametrit. Etäseurantapalveluun on sisällyttävä myös asiantunteva huoltopalvelu, mahdollisten ongelmatilanteiden varalta. (16, s. 5)

Jos kyseessä on saneerauskohde, on sen automaatiojärjestelmän toiminta selvitettävä ja varmistettava onko maalämpöjärjestelmää mahdollista liittää olemassa olevaan automaatiojärjestelmään.

Tarvittavat automaatiopisteet- ja mittaukset esitetään maalämpöjärjestelmän kytkentäkaaviossa.

10 Putkikytkennät

Maalämpöjärjestelmä kytketään yleensä lämmitys- käyttövesi- ja jäähdytysverkostoihin. Putkikytkennät esitetään kytkentäkaaviossa, lisäksi kaaviossa esitetään putkikoot, virtaamat, toimintalämpötilat, kiertovesipumput, varaajat, paisuntasäiliöt, säätöventtiilit, vara- ja lisälämmönlähteet sekä tarvittavat anturit ja muut mittaus- ja säätölaitteet.

Laitetoimittajilla on usein omat vakiokytkentänsä, joita esimerkiksi tavanomaisissa asuinkiinteistöissä voidaan hyödyntää. Yhtä oikeaa kytkentätapaa ei ole, vaan toimivaan lopputulokseen voidaan päästä erilaisilla kytkennöillä. Sopivan kytkennän määrittämiseen vaikuttavat lämpöpumpun ominaisuudet, lämmitys- ja jäähdytysverkostojen ominaisuudet sekä lämpimän käyttöveden tarve. Myös lisälämmönlähde ja käytettävissä oleva tila voivat vaikuttaa kytkentätapaan.

Tässä luvussa käydään läpi peruskytkentöjä, ajatellen kerrostalo kokoluokkaa olevia asuinrakennuksia. Peruskytkentöjä voidaan soveltaa myös muun tyyppisissä rakennuksissa.

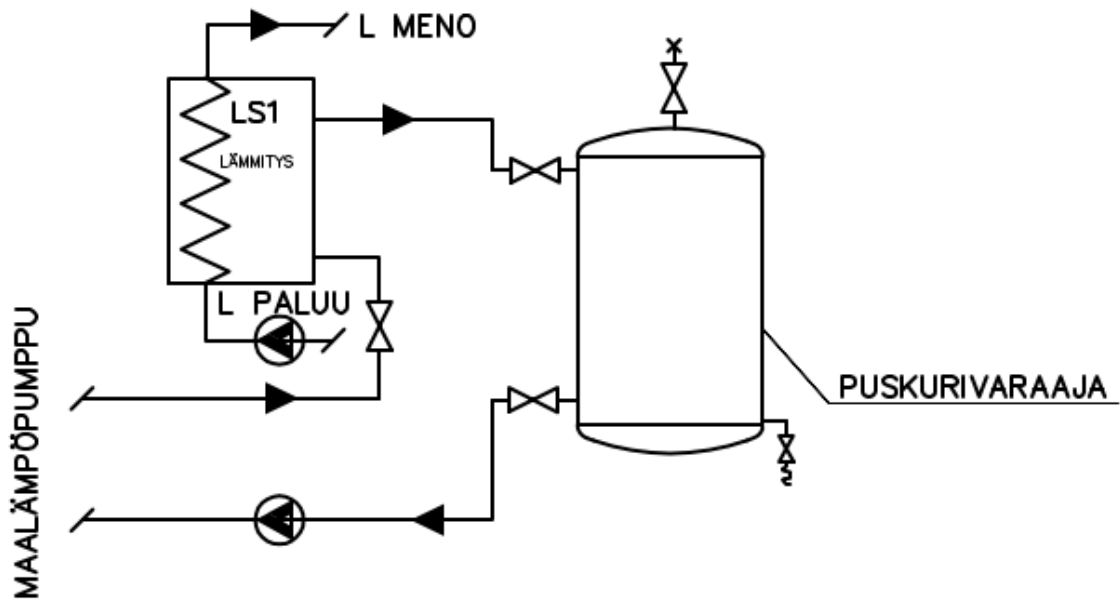
10.1 Varaajien kytkennät

Haluttu virtaama puskurivaraajan ja lämpöpumpun välillä saadaan toteutettua oikeanlaisella kytkennällä. Tällöin varmistetaan, että lämpöpumpun lauhduttimelle voidaan tuottaa tarvittava virtaama ja lämpötilaero, vaikka lämmitysverkoston toiminta arvot ovat poikkeavat lämpöpumpun toiminta-arvoista.

Lämminvesivaraajat voidaan kytkeä rinnan tai sarjaan. Mikäli varaajat on varustettu kierukoilla, käytetään rinnankytkentää, jolloin varaajiin saadaan muodostettua lämpötilakerrostuma, ja kuumin vesi on varaajan yläosassa. Sarjaan kytketyissä varaajissa ei synny lämpötilakerrostumaa, vaan varaajissa oleva vesi on saman lämpöistä. Sarjaan kytkettyjä varaajia ei yleensä varusteta kierukoilla.

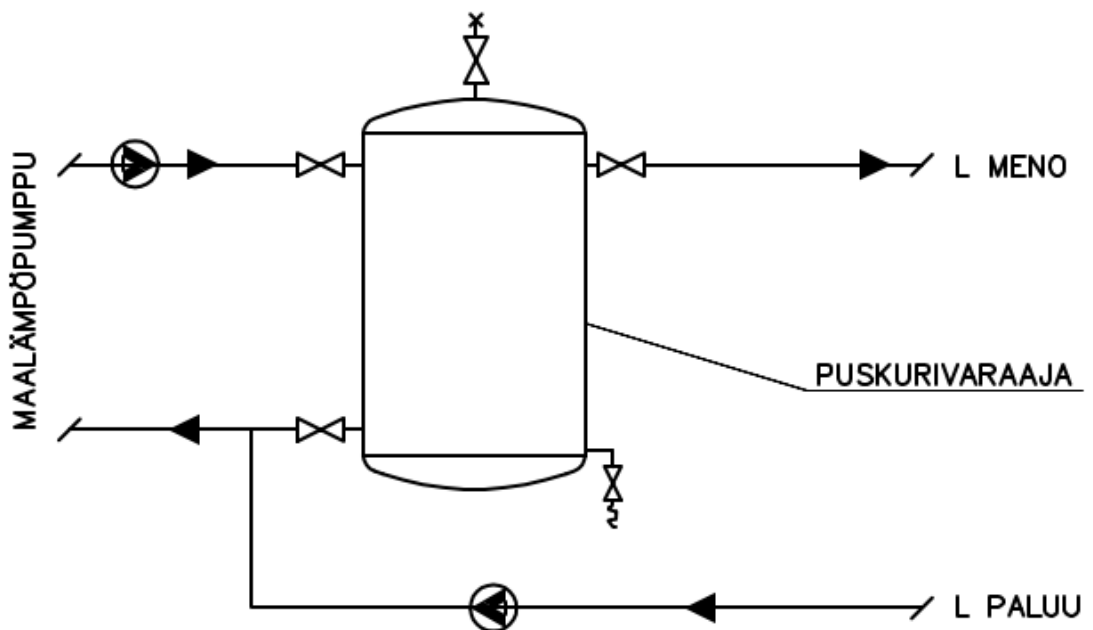
10.1.1 Puskurivaraajan kytkennät

Puskurivaraajan kytkentä voidaan toteuttaa kolmi- tai neliputkikytkennällä tavanomaisessa kiinteistökohteessa, jossa puskurivaraajalla varmistetaan riittävän vesitilavuuden lisäksi haluttu virtaama lämpöpumpun lauhduttimen läpi. Mikäli puskurivaraajaa käytetään ainoastaan verkoston vesitilavuuden kasvattamiseen, voidaan kytkentä toteuttaa myös yksinkertaisemmalla kaksiputkikytkennällä (kuva 24, s. 86).



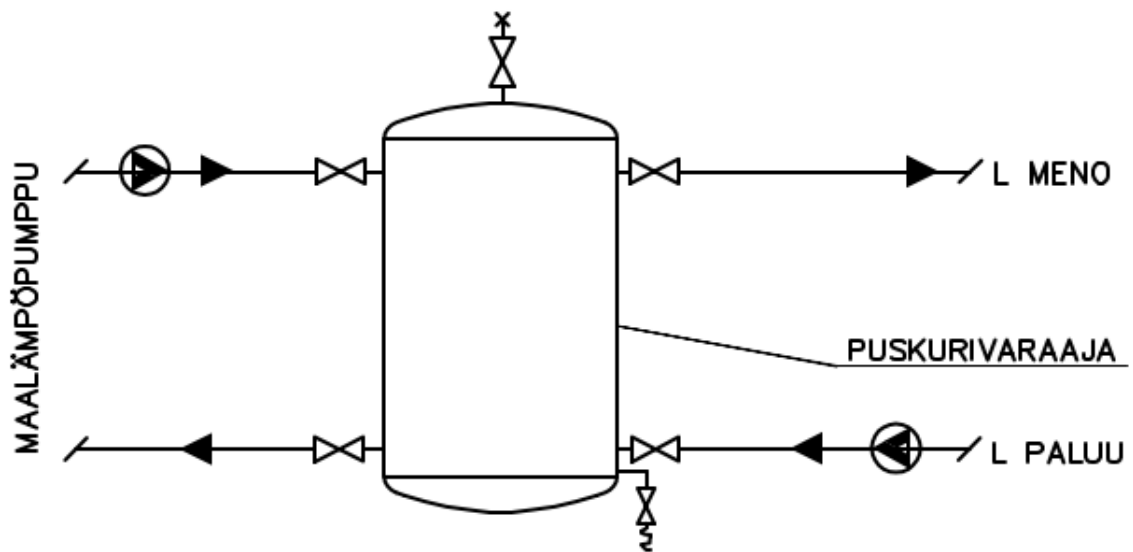
Kuva 24. Puskurivaraajan kaksiputkikytkentä. (16, s. 9)

Puskurivaraajan kaksiputkikytkennällä saadaan varmistettua riittävä vesitilavuus verkostossa ja näin ollen lämpöpumpulle riittävän pitkät käyntijaksot. Kuvan 24 tapauksessa käytettäessä lämmityksen lämmönsiirintä, saadaan lämpöpumpun lauhduttimelle haluttu virtaama. Kuvassa 25 on esitetty kolmiputkikytkentä.



Kuva 25. Puskurivaraajan kolmiputkikytkentä. (16, s. 9)

Kuvan 25 kytkennällä saadaan varmistettua maalämpöpumpulle riittävät käyntijaksot ja veden virtaus takaisin lämpöpumpun lauhduttimelle. Tilanteissa, joissa lämmitysjärjestelmän mitoitusvirtaama on suurempi kuin lämpöpumpun ilmoittama maksimivirtaama lauhduttimen läpi, kytketään puskurivaraaja rinnan lämmitysjärjestelmän kanssa, jolloin liiallinen virtaus lämpöpumpun lauhduttimelle saadaan estettyä. Kuvassa 26 on puolestaan esitetty neliputkikytkennän periaate.

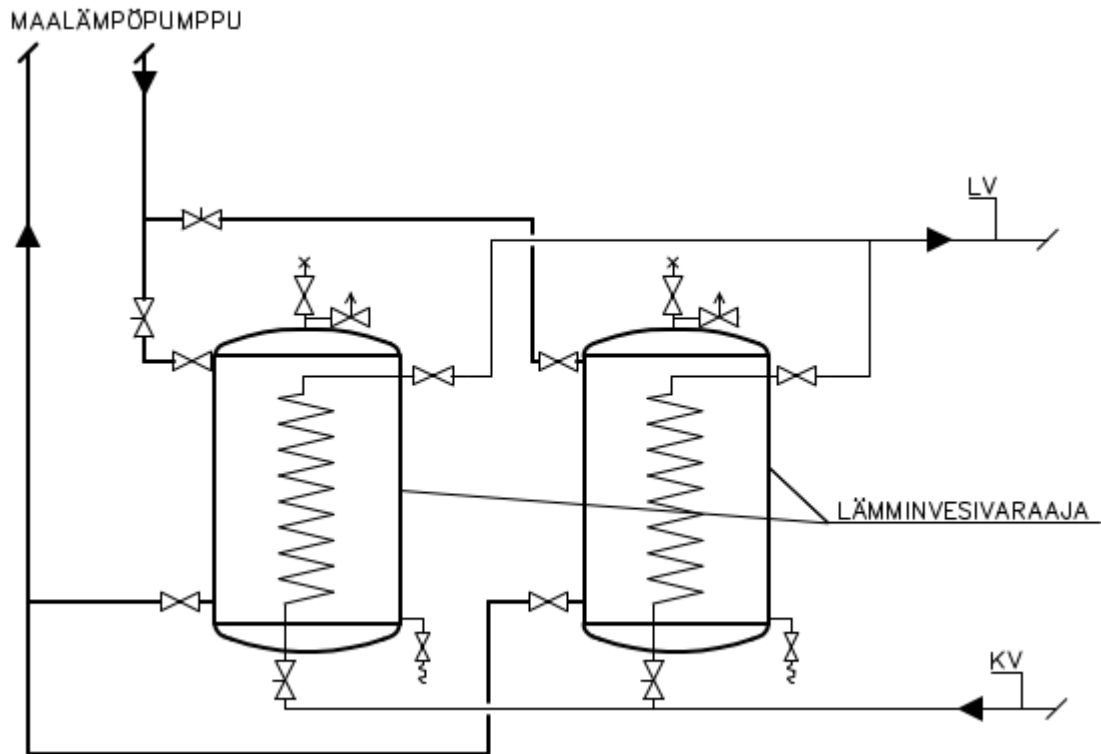


Kuva 26. Puskurivaraajan neliputkikytkentä.

Puskurivaraajan neliputkikytkennällä saadaan varmistettua lämpöpumpun lauhduttimelle riittävä virtaus sekä käyntijaksot, lämmitysverkoston ominaisuuksista riippumatta. Huono puoli kytkennässä on, että varaajassa oleva vesi sekoittuu herkästi.

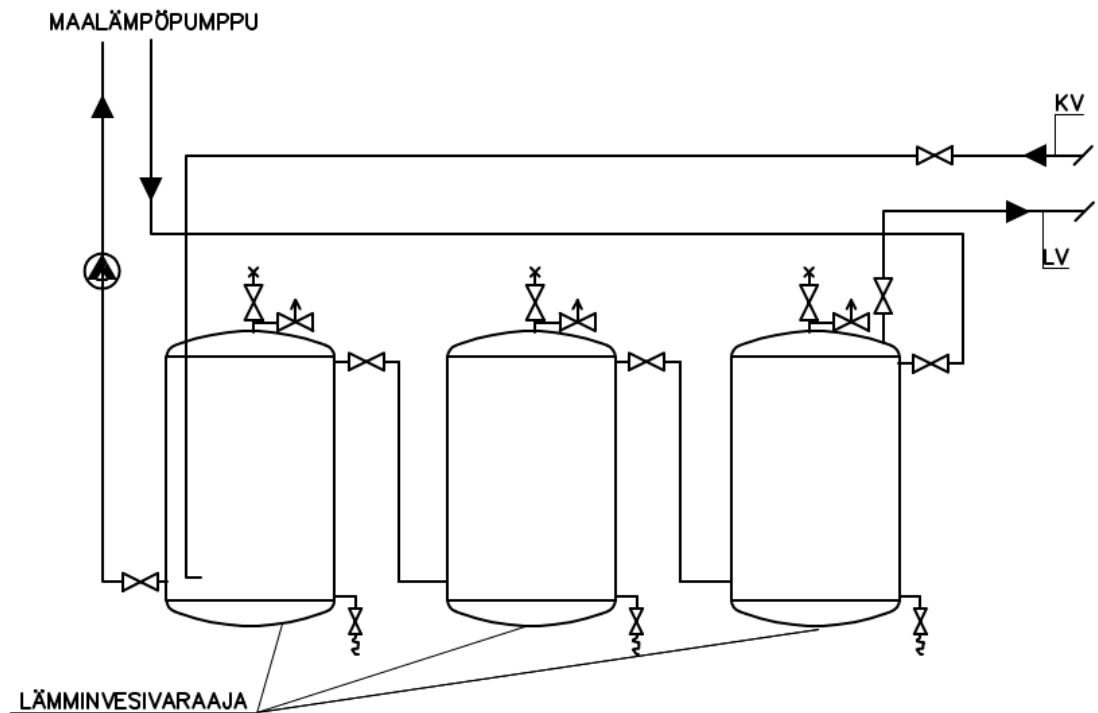
10.1.2 Lämminvesivaraajan kytkennät

Kiinteistökohteissa tarvitaan usein kaksi tai useampia lämminvesivaraajia lämpimän käyttöveden kulutushuippuja varten. Lämminvesivaraajat kytketään tällöin tyypillisesti sarjaan tai rinnan lämpöpumpun kanssa. Lämminvesivaraajien rinnankytkentää havainnollistetaan kuvassa 27 s. 88.



Kuva 27. Lämminvesivaraajien rinnankytkentä.

Rinnankytkentää käytetään, kun varaajat varustetaan kierukoilla. Mikäli putkikytkennät ovat epäsymmetriset, säädetään virtaamat varaajiin ja kierukoihin linjasäätöventtiilien avulla. Varaajiin muodostuu lämpötilakerrostuma, jolloin varaajan alaosassa on viileämpää vettä ja lämpimin vesi nousee varaajan yläosaan. Lämpötilakerrostuman etuina ovat, että koko varaajaa ei tarvitse lämmitellä kuumaksi, jolloin sen lataaminen on nopeampaa ja lämpimän veden varastoinnin häviöt ympäristöön pienemmät. Pystymallisella kierukalla saadaan hyödynnettyä varaajan lämpöenergia kokonaisuudessaan ja tehostettua lämpötilakerrostuman muodostumista. Kuvassa 28 s. 89 on esitetty seuraavana käsiteltävä lämminvesivaraajien sarjakytkentä.



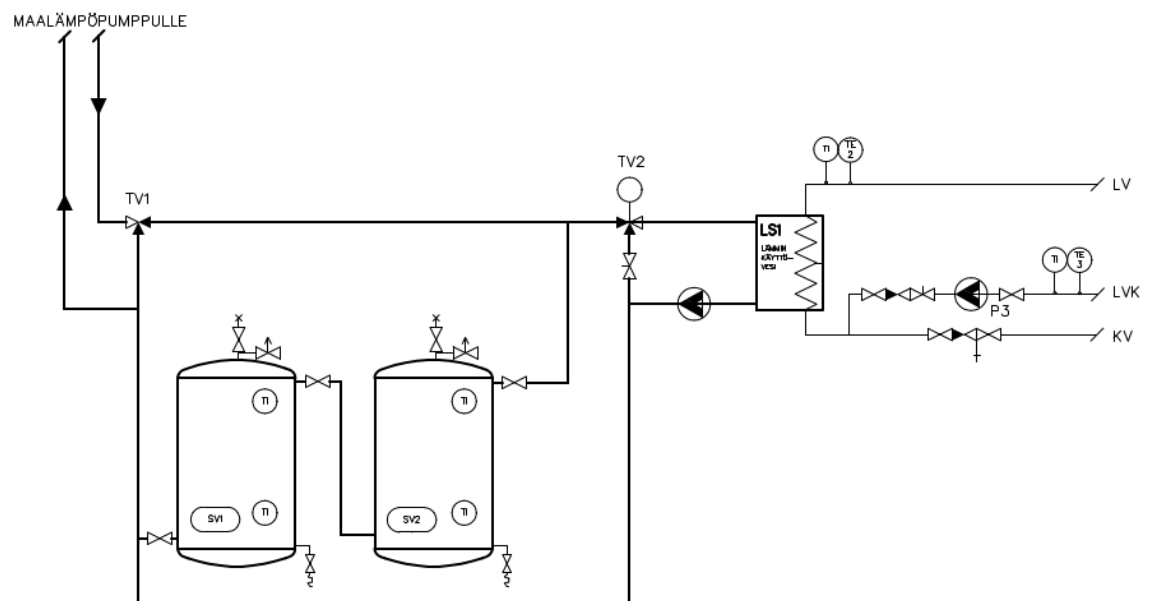
Kuva 28. Lämminvesivaraajien sarjakytkentä.

Kytettäessä varaajat sarjaan, varaajiin ei muodostu lämpötilakerrostumaa, vaan varaajat ovat täynnä saman lämpöistä vettä. Etuna rinnan kytkentään verrattuna on, että lämmintä käyttövettä saadaan enemmän. Toisaalta kun varaajat ovat täynnä lämmintä vettä, varastoinnin häviöt ympäristöön ovat suuremmat. Myös varaajien lataaminen on hitaampaa verrattuna edellä esitettyyn rinnankytkentään. Tyypillisesti sarjaan kytkettyjä varaajia ladataan lämmönsiirtimen välityksellä tai lämpöä siirretään lämmönsiirtimellä varaajista käyttöveeseen, nämä kaksi kytkentätapaa esiintyvät vaihtelevasti eri lämpöpumpputoimittajien kytkentäkaavioissa.

10.2 Lämpimän käyttöveden kiertojohdon kytkentä

Pitkien etäisyyksien vuoksi lämmin käyttövesipiiri varustetaan kiertovesipumpulla, tällöin kytkentä tulee toteuttaa siten, ettei varaajassa olevaa lämpimän ve-

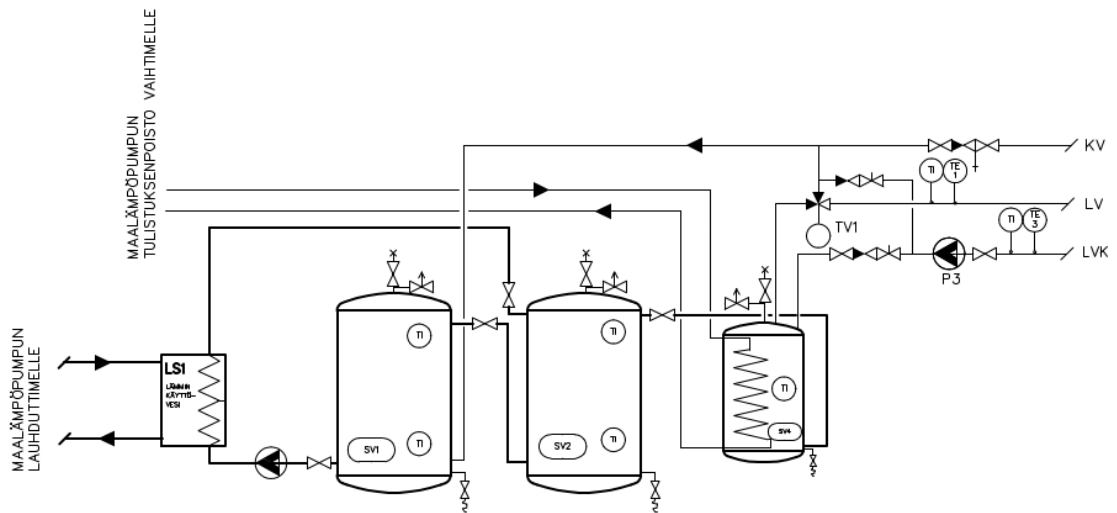
den kerrostumaa sekoiteta. Lämpimän käyttöveden kierron häviöt voidaan kat-
 taa maalämpöpumpulla, sähköllä (varaaja tai sähkökattila) tai kaukolämmöllä.
 Lämpimän käyttöveden kierron putkikytkennät poikkeavat toisistaan käytettävän
 lämmitystavan perusteella. Käyttövesijärjestelmästä saatavan lämpimän käyttö-
 veden lämpötilan on oltava vähintään 55° C ja enintään 65° C. Tästä johtuen
 järjestelmä varustetaan aina säätöventtiilillä, joka pitää lämpimän käyttöveden
 menolämpötilan asetusarvossa. Kuvassa 29 on esitetty sarjaan kytketyt läm-
 minvesivaraajat, joista lämpöä siirretään lämmönsiirtimen välityksellä käyttöve-
 siverkostoon. (16, s. 10; 25, s. 3)



Kuva 29. Kiertojohtoon kytkentäperiaate lämmönsiirtimeen. (16, s. 10)

Kuvan 29 oikeassa reunassa lämpimän käyttöveden kiertopumppu P3 käy jat-
 kuvasti. Säätöventtiilin TV2 avulla pidetään LV- verkostoon lähtevän veden läm-
 pötila lämpötilamittarin TE2 asetusarvon mukaisena. Säätöventtiili TV1 toimii la-
 tausventtiilinä, joka aukeaa varaajien suuntaan, kun maalämpöpumpulta tulee
 riittävän lämmintä vettä. Varaajissa on sähkövastukset SV1 ja SV2, jotka käyn-
 nistyvät, mikäli maalämpöpumpulta ei saada riittävää lämmitystehoa.

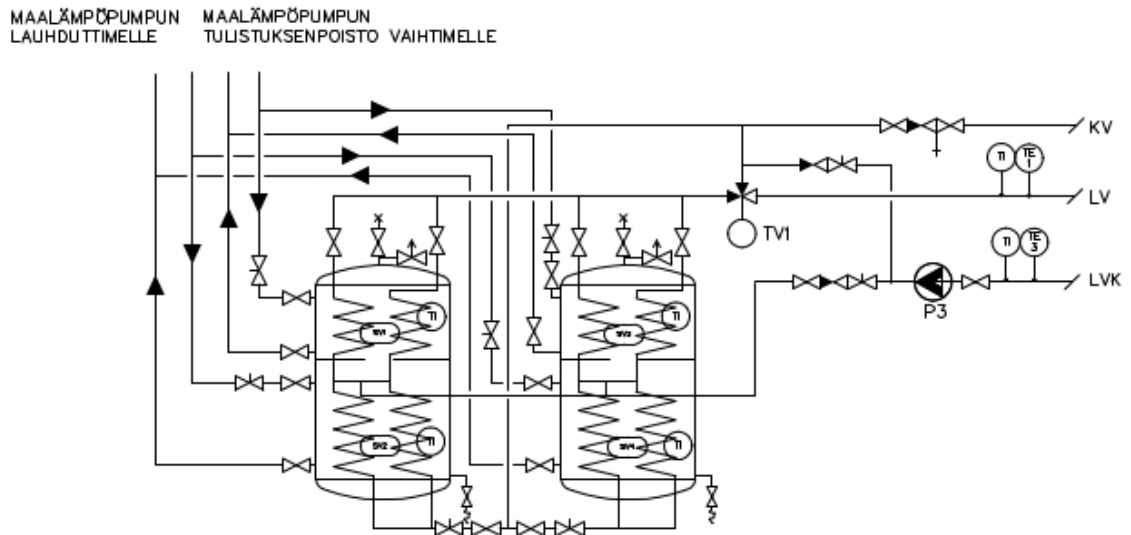
Kuvassa 30 on esitetty sarjaan kytketyt lämminvesivaraajat, joista lämminvesi johdetaan pienempään tulistusvaraajaan ja sieltä edelleen käyttövesiverkoston.



Kuva 30. Kiertojohdon kytkentä erilliseen tulistusvaraajaan. (16, s. 10)

Kuvassa 30 lämminvesivaraajien lataus tapahtuu maalämpöpumpulla erillisen lämmönsiirtimen LS1 välityksellä. Tarvittaessa käytetään varaajissa olevia sähkövastuksia SV1 ja SV2. Lämpimän käyttöveden kiertopumppu P3 käy jatkuvasti. Säästöventtiili TV1 pitää LV- verkostoon lähtevän veden lämpötilamittarin TE1 asetusarvon mukaisena. Lämpimänkäyttöveden kierto johdetaan kokonaan tai osittain tulistusvaraajan kautta takaisin LV- verkostoon. Tulistusvaraajaa ladataan maalämpöpumpun tulistuksenpoistovaihtimella ja tarvittaessa käytetään sähkövastusta SV3.

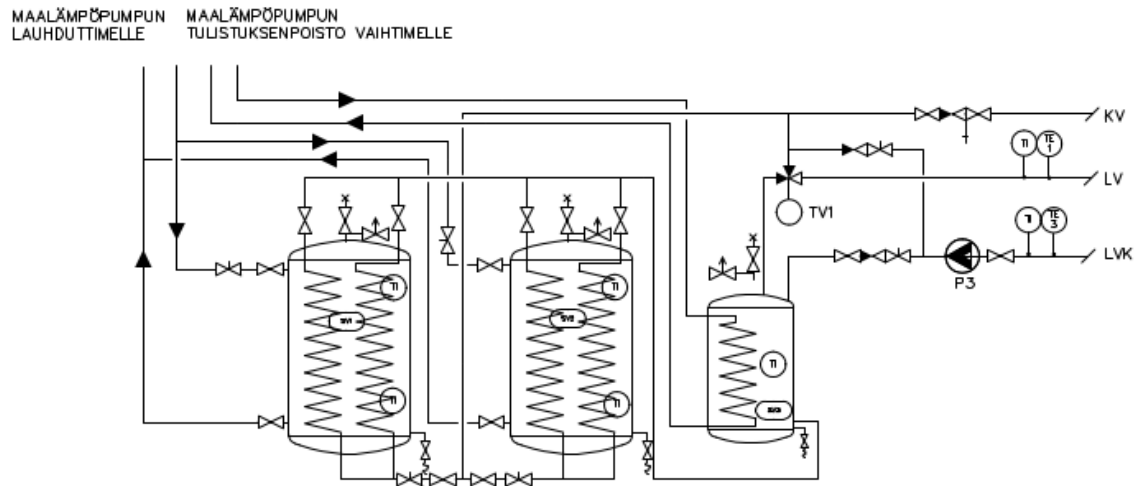
Kuvassa 31 s. 92 on esitetty rinnan kytketyt kierukkavaraajat, jotka on varustettu välilevyllä. Välilevyn ansioista varaajan yläosa pysyy lämpimämpänä verrattuna varaajan alaosaan.



Kuva 31. Kiertojohton kytkentä tulistusvaraajiin.

Kuvassa 31 varaajan yläosaa ladataan maalämpöpumpun tulistuksenpoistovaihtimelta saatavalla korkealämpoisellä vedellä ja alaosa puolestaan lauhduttimella tulevalta matalampilämpoisellä vedellä. Käyttövesi lämpiää kulkiessaan varaajassa olevien kierukoiden läpi. Sekä varaajan ylä-, että alaosassa on sähkövastukset, joita käytetään tarvittaessa riittävän lämmitystehon takaamiseksi. Lämpimän käyttöveden kiertopumppu P3 käy jatkuvasti, johtaen kiertoveden kokonaan tai osittain varaajien yläosan kierukoidenkautta takaisin LV- verkostoon. Säästöventtiili TV1 pitää LV- verkostoon lähtevän veden lämpötilan lämpötilamittarin TE1 mukaisessa arvossa.

Kuvassa 32 on esitetty vaihtoehtoinen kytkentä kierukkavaraajille, jossa edellä esitetystä kytkennästä poiketen käyttöveden priimaus hoidetaan erillisellä pienemmällä tulistusvaraajalla.



Kuva 32. Kiertojohdon kytkentä kierukkavaraajiin.

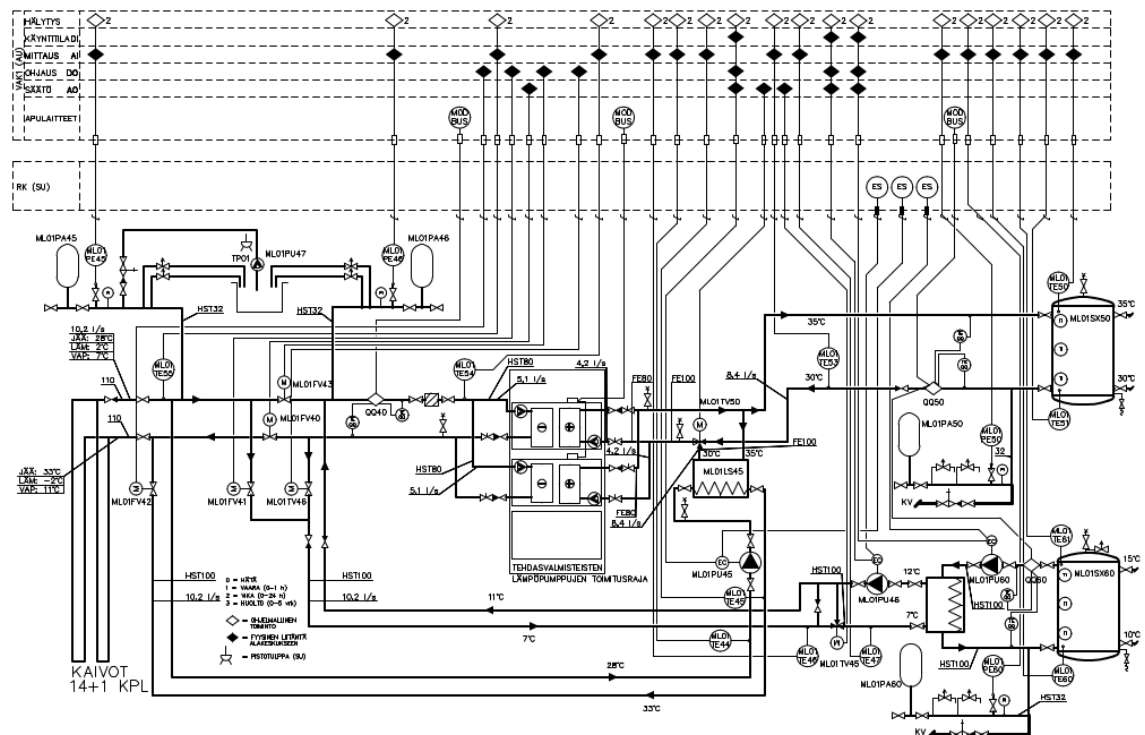
Kuvassa 32 isompia varaajia ladataan maalämpöpumpun lauhduttimelta saatavalla lämmöllä ja tulistuksenpoistovaihtimelta saatava korkealämpöisempi vesi johdetaan kierukan välityksellä erilliseen tulistusvaraajaan. Käyttövesi johdetaan isommissa varaajissa olevien kierukoiden kautta tulistusvaraajaan ja edelleen LV- verkostoon. Lämpimän käyttöveden kiertopumppu käy jatkuvasti ja kierto johdetaan kokonaan tai osittain tulistusvaraajan läpi ja edelleen LV- verkostoon. Säästöventtiili TV1 pitää LV- verkostoon lähtevän veden lämpötilan lämpömittarin TE1 asetusarvon mukaisena.

10.3 Jäähdytyksen kytkennät

Tässä luvussa on esitetty kytkentäperiaatteet vapaa - ja aktiivijäähdytykselle. Kuvassa 33 s. 94 on aktiivijäähdytyksen kytkentäkaavio; kuvassa esitetyllä kytkennällä voidaan ajaa yhteensä neljää erilaista toimintoa. Toiminnot ovat lämmitys, vapaajäähdytys, aktiivijäähdytys ja lämmitysjäähdytys. Lisäksi kaaviossa on esitetty tarvittavat automaatiopisteet. Kuvan 33 mukaista kytkentää on tarkastellut myös Lari Seppälä insinööriyössään ”Lämmitys- ja jäähdytyskaavioiden toiminnallisuuden dynaamiset tarkastelut maalämpökytkennässä”, Seppälä tarkasteli kytkentää muun muassa dynaamisesti simulointiohjelman avulla. Seppälän Insinööriyössä pääpaino oli nimenomaan jäähdytyspuolen toimivuuden tarkas-

telussa ja toiminnan optimoinnissa; kytkentä todettiin kuitenkin myös kokonaisuudessaan toimivaksi. Kuvan 33 s. 94 kytkentä on monimutkainen ja sisältää useita piirejä ja toimintoja. Seppälän tekemä tarkastelu vastaavanlaisesta kytkennästä tukee kuitenkin esitetyn kytkennän toiminnallisuutta. (33, s. 23–24)

Kuvassa 34 s. 97 on esitetty pelkästään vapaajäähdytystä hyödyntävä kytkentäperiaate. Kytkentä on huomattavasti yksinkertaisempi, ja pienemmissä maalämpökohteissa yleensä hyödynnetäänkin pelkkää vapaajäähdytystä.



Kuva 33. Maalämpö- ja kylmä, kytkentäkaavio esimerkki. (33, s. 19)

Kuvan 33 kytkentäkaaviossa vasemmalla kuvataan energiakaivot syvillä lenkeillä, joita tässä esimerkissä on 14 kappaletta kohteessa. Seuraavana vasemmalta oikealle katsottaessa nähdään lämmönkeruupiirin paisunta-astiat. Lämmönkeruupiiri sisältää alkoholipitoista keruunestettä. Kuvan keskellä on rinnan asennetut maalämpöpumput, joita on kaksi kappaletta. Maalämpöpumppujen sisällä olevat miinus-merkit kuvaavat höyrystimiä ja plus-merkit lauhduttimia. Maalämpöpumpulta oikealle, kiinteistöön päin lähtevä piiri sisältää vettä. Edel-

leen oikealle päin mentäessä tulee vastaan lämmityksen ja jäähdytyksen lämmönsiirtimet ML01LS45 sekä ML01LS46. Viimeisenä vesi kuljetetaan joko lämmityksen puskurivaraajaan ML01SX50 tai jäähdytyksen puskurivaraajaan ML01SX60. Puskurisäiliöistä vesi johdetaan halutulla kiinteistön lämmitys- tai jäähdytysjärjestelmään. (33, s. 19)

Maalämpökytkennässä on kolme eri päätoimintoa ja yksi yhdistelmä. Nämä ovat lämmitys, vapaajäähdytys, aktiivijäähdytys ja lämmitysjäähdytys. Kytkenä saadaan toimivaksi, kun venttiilit ja muut toimilaitteet ovat liitetty esimerkiksi valvonta- alakeskukseen (VAK), josta automaatio ohjaa venttiilien asentoa mm. lämpötila- anturien perusteella tiettyjen asetusarvojen rajoissa. (33, s. 20)

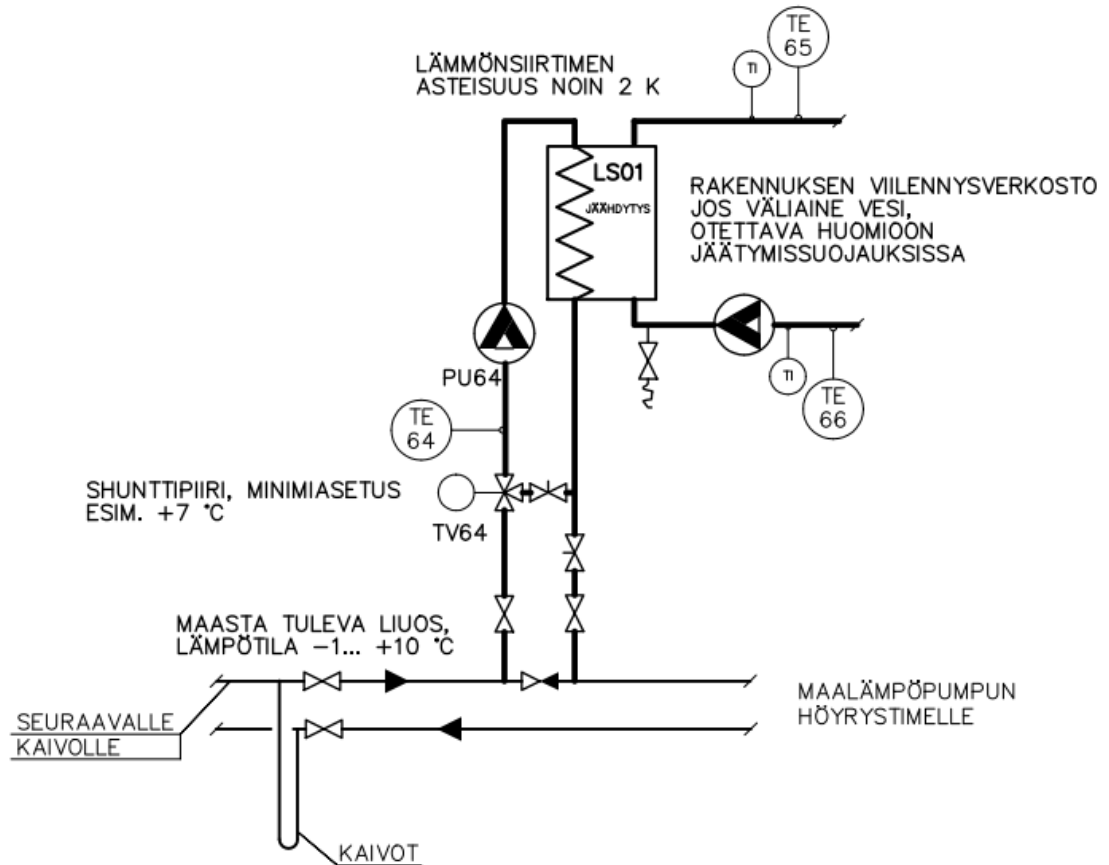
Lämmitystilassa kiinteistöllä on vain lämmitystarve. Lämmitystilassa maalämpöpumpun kompressori on päällä, keruuneste kulkee venttiilien FV40 ja FV43 kautta ja luovuttaa lämpökaivoista kerätyn lämmön maalämpöpumpun höyrystimessä kylmäainekiertoon. Maalämpöpumpun lauhduttimessa kylmäaine luovuttaa lämmön kiinteistön nestekiertoon. Lämmennyt vesi kuljetetaan puskurisäiliöön TE50 asetusarvon mukaisessa lämpötilassa. Lämmitystilassa ei tarvita jäähdytyksen tai lämmityksen lämmönsiirtimiä, eikä piirien toimilaitteita, vaan ainoastaan maalämpöpumpun sisällä olevia pumppuja. (33, s. 20)

Kun kiinteistössä ei ole lämmitystarvetta, voi järjestelmä siirtyä vapaajäähdytystilaan. Tällöin ainoat sähköä kuluttavat osat järjestelmässä ovat jäähdytyspiirin kiertovesipumput ja säätökäytössä olevat moottoriventtiilit. Vapaajäähdytystä on mahdollista käyttää silloin, kun kiinteistössä on ainoastaan jäähdytystarve, ja kaivoista palaavaan keruunesteen lämpötila on alle TE55- lämpömittarin asetusarvon, esim. 7 °C. Vapaajäähdytystilassa venttiilit FV43 ja TV46 menevät kiinni, jolloin keruuneste kiertää venttiiliin FV41 kautta jäähdytyssiirtimelle. Jäähdytyspiirin kolmitieventtiili TV45 on säätökäytössä ja se ohjaa nestettä siirtimeen ja siirtimen ohi pitäen puskurivaraajan SX60 lämpötila- anturin TE60 asetusarvossaan, esimerkiksi 10°C. Tämän jälkeen neste palaa jäähdytyspiiriltä kokonaan tai osittain pumpun PU46 kautta maalämpöpumppuun ja edelleen energiakaivoihin menonesteinä. Vapaajäähdytystilassa maalämpöpumpussa

tapahtuu ainoastaan keruupiirin nestekiertoa. Kompressor ei käy, koska kaikki tarvittava jäähdytysteho saadaan suoraan maasta. Kun vapaajäähdytyksellä lämpömittari ML01TE46 on yli raja-arvon, esimerkiksi 9 °C, määritetyn viiveen ajan, siirtyy järjestelmä aktiivijäähdytystilaan. Tämä tapahtuu silloin, kun maasta ei enää saada otettua riittävän kylmää keruunestettä esimerkiksi loppukesästä. Tällöin maalämpöpumpun kompressor käynnistyy, ja sen avulla saadaan tuotettua lämpömittarin TE46 asetusarvon lämpöistä nestettä jäähdytyslaitteelle. Tässä aktiivijäähdytystilassa kiinteistöllä on myös vain jäähdytystarve. (33, s. 20–21)

Aktiivijäähdytyksessä nestekierto tapahtuu jäähdytyslaitteen ja sekä lämmitys-
laitteen kautta, jolloin venttiilit FV40 ja FV41 menevät kiinni ja kierrot tapahtu-
vat venttiilien TV46 ja FV42 kautta. Jäähdytyspiirin kierto kulkee maalämpö-
pumpun ja TV46 venttiilin kautta jäähdytyslaitteelle, jossa säätöventtiili TV45
pitää puskurivaraajan SX60 veden lämpötilamittarin TE60 asetusarvon mukai-
sena ohjaamalla nesteen jäähdytyslaitteeseen ja osin sen ohitse. Samaan aikaan
maalämpöpumppu tuottaa lauhdetta ja lämmittää lämmitysvettä. Lämmennyt
vesi johdetaan kokonaan lämmityslaitteen LS45 kautta takaisin maalämpö-
pumppuun. Lämmityslaitteessa lämmennyt keruuneste pumpataan pumpulla
PU45 takaisin kaivoihin ja siellä jäähdyttyään takaisin lämmityslaitteeseen LS45.
(33, s. 21)

Neljäs tilanne on, kun järjestelmältä pyydetään yhtä aikaa sekä jäähdytystä, että
lämmitystä. Kylmäpuoli toimii tällöin vapaajäähdytyksen tavoin lukuun ottamatta
sitä, että kompressor on päällä ja myös venttiili FV43 on auki. Tällöin keruu-
neste kulkee osittain venttiilin FV41 sekä jäähdytyslaitteen LS46 kautta, jonka
jälkeen se yhdistyy takaisin laitteen ohittaneeseen liukseen heti venttiilin
FV43 jälkeen. Tämän jälkeen kierto jatkuu vapaajäähdytyskierron tavoin, ja
maalämpöpumpulta lähtevä keruuneste johdetaan kaivoihin. Lämmityspuolella
kierto tapahtuu kokonaisuudessaan maalämpöpumppujen ja lämmityksen pus-
kurivaraajan SX50 kautta ja laitteeseen johtava venttiili TV50 on kiinni. Näin ollen
kiinteistöön saadaan tuotettua samanaikaisesti vettä lämmitystä ja jäähdytystä
varten. (33, s. 21.)



Kuva 34. Vapaajäädytysen kytkentäperiaate. (31)

Kuvassa 34 on esitetty kytkentäperiaate, kun kiinteistön jäähdytykseen hyödynnetään maalämpöjärjestelmän yhteydessä ainoastaan vapaajäädytystä. Kytkentä on huomattavasti yksinkertaisempi ja siten myös edullisempi toteuttaa verrattuna kuvan 33 kytkentään.

Vapaajäädytyksessä jäähdytys siirtimen kolmitieventtiili TV64 on säätökäytössä ja ohjaa nestettä siirtimeen ja sen ohi pitäen nesteen lämpötilan TE64 asetusravossa. Tämän jälkeen neste palaa jäähdytys siirtimeltä kokonaan tai osittain pumpun PU64 avulla maalämpöpumppuun ja edelleen energiakaivoihin menesteenä.

11 Yhteenveto

Insinööriyön tavoitteena oli luoda LVIA- suunnittelutoimistolle aineisto, joka toimii pohjana maalämpöjärjestelmän suunnittelulle ja mitoitukselle sekä laitevalinnoille. Aineiston perusteella pitäisi pystyä hahmottamaan maalämpöjärjestelmä kokonaisuutena, järjestelmän toimintaan vaikuttavat tekijät, sekä suunnittelemaan ja mitoittamaan mahdollisimman optimaalisesti toimiva maalämpöjärjestelmä kiinteistökokoluokan kohteeseen. Lisäksi insinööriyön tavoitteena oli tuottaa työselostusmalli ja kytkentäkaaviomalleja, joita voidaan perustellusti hyödyntää tulevissa maalämpökohteissa.

Työssä käytiin läpi lämpöpumpun toimintaperiaate sekä maalämpöjärjestelmän suunnitteluun ja mitoitukseen tarvittavat lähtötiedot että myös niiden vaikutus maalämpöjärjestelmän toimintaan. Työssä käsiteltiin myös energiakaivokenttien mitoittamiseen tarvittavat lähtötiedot ja niiden vaikutus sekä energiakaivojen sijoittelun vaikutus energiakaivokentän toimintaan. Energiakaivoihin liittyy myös kollektoriputki, jonka optimaalinen mitoitus työssä esitettiin. Energiakaivokenttien simulointia käsiteltiin EED- ohjelmiston avulla. Tuotantoperustan optimoinnissa määritettiin pysyvyyskäyrää hyödyntäen optimaalinen lämpöpumpputeho, jolloin kohteen maalämpöjärjestelmän vuotuiset käyttö- ja pääomakustannukset ovat minimissään. Työssä esitettiin myös erilaiset lämpöpumpputyypit ja niiden hyvät ja huonot puolet. Myös lämpöpumppujen tehonsäätöalueet ja mahdollisuudet käsiteltiin sekä lämpöpumpun mitoituspisteen määrittäminen. Tämän jälkeen työssä perehdyttiin lämminvesi- ja puskurivaraajien toimintaan ja mitoitukseen maalämpöjärjestelmässä sekä lämminvesivaraajien materiaaleihin. Seuraavana käsiteltiin jäähdytystä maalämpöjärjestelmällä ja käytiin läpi erilaiset mahdollisuudet jäähdytyksen tuottamiseen. Lopuksi esitettiin vielä vaatimukset maalämpöjärjestelmän automaatio- ja valvontajärjestelmälle sekä esitettiin putkikytkentöjä. Putkikytkennöissä esitettiin varaajien ja käyttöveden kierron kytkentäperiaatteita sekä kokonainen kytkentäkaavioesimerkki, jossa tarkasteltiin jäähdytyksen ja lämmityksen tuotantoa. Teorian tukena työssä käytettiin kuvia, taulukoita ja esimerkkilaskelmia.

Maalämpöpumpun hyötysuhteeseen eli COP-arvoon vaikuttavat höyrystymislämpötila ja lauhtumislämpötila. Mitä pienempi näiden välinen erotus on, sitä paremmalla hyötysuhteella maalämpöpumppu toimii. Höyrystymislämpötila riippuu energiakaivokentästä tulevan lämmönkeruunesteen lämpötilasta ja lauhtumislämpötila puolestaan lämmitys- tai jäähdytysverkostojen menoveden lämpötilasta. Tästä johtuen esimerkiksi lattialämmitysverkosto on patterilämmitysverkostoa parempi vaihtoehto maalämpökohteeseen.

Maalämpöjärjestelmän mitoituksen kannalta tärkeimmän lähtötietokokonaisuuden muodostavat rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien sekä lämpimän käyttöveden energian- ja tehon tarve. Mitä lähemmäs todellista kulutusta energia- ja tehomitoituksella päästään, sitä parempaan lopputulokseen maalämpöjärjestelmän toiminnan ja kustannustehokkuuden kannalta on mahdollista päästä. Uudiskohteissa rakennuksen energian- ja tehontarpeet määritetään laskennallisesti, joko perinteisellä menetelmällä tai energiasimuloinnilla. Saneerauskohteissa käytetään rakennuksen toteutuneita kulutustietoja. Jäähdytysenergian- ja tehon tarpeen määrittämiseen käytetään simulointia.

Perinteisessä mitoituksessa ei huomioida lämpökuormia, ja ilmanvaihto mitoitetaan oletuksella, että rakennus on täydellä käytöllä. Tämä yhdistelmä aiheuttaa mitoitukseen hallitsemattoman varmuuskertoimen, etenkin, jos rakennus on varustettu tarpeen mukaisella ilmanvaihdolla. Simuloinnilla pystytään huomioimaan rakennuksen lämpökuormat ja ilmanvaihdon toiminta. Simuloinneissa on kuitenkin kiinnitettävä huomioita luotettavuuteen, muun muassa puutteelliset tai virheelliset lähtötiedot heikentävät simuloinnin luotettavuutta. Jäähdytystehon mitoitukseen vaikuttaa oleellisesti ulkoilman entalpia. Lisäksi käyttöprofiilin huomioiminen voi vähentää jäähdytystarvetta tilajäähdytyksen osalta. Jäähdytyksen simuloinneissa olosuhteet ovat aina dynaamiset, jolloin muutos tapahtuu ainoastaan olosuhteissa, joten niillä on merkittävä vaikutus jäähdytystarpeeseen.

Energiankaivojen mitoitusta varten on selvitettävä mahdollisimman tarkasti alueen maankamaran tiedot. Tonttikohtaisia tietoja maankamarasta voidaan selvittää TRT- mittauksen avulla, jolla saadaan selville energiankaivon tehollinen

lämmönjohtavuus. Energiakaivokenttien mitoitus on tehtävä tarkoituksen mukaisella simulointiohjelmalla, joka huomioi energiakaivojen vaikutukset toisiinsa. Simulointiohjelmaa käytettäessä on kiinnitettävä huomiota lähtötietojen oikeellisuuteen. Myös sijoittelulla on vaikutusta energiakaivojen lämpötilan kehitykseen. Suoran muotoinen, L- kirjaimen ja U- kirjaimen muotoiset kaivokentät ovat parhaita vaihtoehtoja, koska niissä keruunesteen lämpötilan lasku on vähäisintä. Energiakaivoon asennettava kollektoriputki on mitoitettava siten, että virtaus on turbulentiasta ja että kollektorin painehäviö ei kasva kohtuuttoman suureksi.

Tuotantoperustan optimoinnilla tarkoitetaan maalämpöjärjestelmän optimaalisen mitoitusasteen selvittämistä. Lämpöpumppujärjestelmän kokonaistalous muodostuu lämpöpumpun tuottaman lämmön ja lisälämmön summana. Mitä kalliimpaa on lisälämmön hinta, sitä suurempi on lämpöpumpun mitoitusoptimiteho.

Maalämpöpumppujen toimintaperiaate on eri pumpputyypeissä samankaltainen, eroja on mm. pumpputyypien tavassa ohjata maalämmöllä lämmitettyä vettä tilojen ja käyttöveden lämmitykseen. Yleisimpiä pumpputyyppejä ovat kiinteän lauhdutuksen maalämpöpumppu, tulistusmaalämpöpumppu ja vaihtuvan lauhdutuksen maalämpöpumppu. Nykyaikaisten lämpöpumppujen kompressorien tehonsäätö voidaan toteuttaa kolmella päämenetelmällä: vakioteho, invertterisäätö sekä usean kompressorin laitteet. Vakiotehokäytöllä eli niin sanotulla on/off -säädöllä lämpöpumpun kompressori tuottaa lämpöä aina vakioteholla. Invertterikäyttö mahdollistaa lämpöpumpun lämpötehon säädön kierroslukuohjatulla kompressorilla. Tyypillisesti lämpötehon säätöalue on 40–100 % lämpöpumpun nimellistehosta. Usean kompressorin lämpöpumput on toteutettu tyypillisesti kahdella kompressorilla, jolloin saavutettavat tehoportaat ovat 50 % ja 100 %. Usean kompressorin järjestelmä voidaan toteuttaa myös siten, että käytetään kompressoreita, joissa on invertterit. Tällöin saavutetaan laaja tehonsäätöalue 20–100 %.

Lämpöpumpun mitoitusaste määritetään lämmitystehon tarpeen ja todellisen lämpöpumpun tuottaman tehon perusteella. Lämpöpumppujen nimellistehot on

määritetty standardien mukaisissa olosuhteissa, jotka poikkeavat usein todellisista mitoitusolosuhteista. Tämän vuoksi lämpöpumpun ilmoitettua nimellisteho ei voi käyttää mitoituspisteen määrittämiseen. Maalämpöpumpun tehontuoton eri tilanteissa voi selvittää hyödyntämällä maalämpöpumpputoimittajien mitoitusohjelmia.

Maalämpöjärjestelmät varustetaan lämmityksen puskurivaraajalla ja käyttöveden lämminvesivaraajalla. Puskurivaraajan avulla pyritään varmistamaan lämpöpumpulle suotuisat toimintaolosuhteet lämpökuormien vaihdellessa ulkoisten tekijöiden vaikutuksesta. Lämminvesivaraajan avulla varmistetaan lämpimän käyttöveden riittävyys kulutushuipun aikana. Käyttövesivaraajaa voidaan ladata, joko kierrättämällä varaajassa olevaa vettä lämpöpumpun lauhduttimen läpi tai varaajassa olevan kierukkalämmönvaihtimen läpi. Ensin mainitun lataustavan ollessa kyseessä, lämpö siirretään varaajassa olevan käyttövesikierukan avulla käyttöveteen tai käytetään ulkoista levylämmön siirrintä lämmön siirtämiseksi varaajasta käyttöveteen.

Maalämpöjäähdytystä on mahdollista tuottaa kolmella eri tavalla; vapaajäähdytyksenä, lämmöntuotannon sivutuotteena ja aktiivijäähdytyksenä lämpöpumpuilla. Vapaajäähdytyksessä hyödynnetään energiakaivojen avulla maaperästä saatavilla olevaa maakyilmää. Sähköä tarvitaan tällöin vain liuoksen kierrättämiseen, joten COP voi olla jopa 50. Lämmöntuotannon sivutuotteena viilennystä saadaan tuotettua silloin, kun on yhtäaikainen lämmitys- ja jäähdytystarve. Tällöin lämpöpumpulla otetaan keruuliuoksesta lämpöä lämmitykseen ja vastavasti viilentynyttä keruuliuosta käytetään jäähdytykseen, jolloin keruuliuos lämpiää ja näin parantaa lämpöpumpulla tuotettavan lämmityksen tehoa ja hyötysuhdetta. Kokonaishyötysuhde voi nousta jopa 800%: n eli COP on tällöin 8. Aktiivijäähdytystä käytetään, kun viilennystarve on suuri, eikä vapaajäähdytys yksinään riitä. Tällöin käytetään lämpöpumpua tuottamaan tarpeeksi viileää vettä jäähdytysverkostoon.

Maalämpöjärjestelmän automaatio- ja ohjausjärjestelmä on suunniteltava siten, että maalämpöjärjestelmän toimintaa pystytään valvomaan ja vikatilanteen satuessaa huoltoyhtiö saa siitä tiedon. Automaatiojärjestelmällä on pystyttävä seuraamaan maalämpölaitteiston energiankulutusta- ja tuottoa sekä optimoimaan järjestelmän toimintaa mahdollisimman energiatehokkaaksi. Maalämpöjärjestelmässä edellä mainittujen tavoitteiden saavuttaminen toimivan etävalvonnan avulla edellyttää automaatio- ja ohjausjärjestelmältä vähintään seuraavien parametrien seuranta: maalämpöpumppujen tuottaman energian mittaus, maalämpöpumppujen kuluttaman energian mittaus, lisälämmityksen kuluttaman energian mittaus, energiakaivojen tai keruupiirin lämpötilojen mittaus, keruupiirin paineen mittaus, lauhdutinpiirin lämpötilojen mittaus, lauhdutinpiirin paineen mittaus ja ulkolämpötilan mittaus.

Insinööriyön lopussa on esitetty putkikytkentäperiaatteita- ja esimerkkejä. Puskurivaraaja on mahdollista liittää järjestelmään kaksi, - kolme- tai neliputkikytkennällä. Kaksiputkikytkentää käytetään, kun halutaan lisätä lämmityspiirin vesitilavuutta. Kolme- ja neliputkikytkennällä pyritään varmistamaan myös sopiva virtaama maalämpöpumpun lauhduttimelle. Käyttövesivaraajat voidaan kytkeä joko rinnan tai sarjaan. Rinnankytkentää käytettäessä varaajat varustetaan kierukoilla, kun taas sarjaan kytkettyjä varaajia ei yleensä varusteta kierukoilla, koska sarjakytkennässä lämpötilakerrokset pääsevät sekoittumaan herkästi. Mikäli lämpöpumppu on varustettu tulistuksenpoistovaihtimella, käytetään käyttöveden lämmittämiseen myös erillistä tulistusvaraajaa. Kiinteistöissä, joissa on käyttövedenkiertojohto, on sen kytkentä huomioitava. Työssä on esitelty myös kone- ja vapaajähdytyksen kytkennät sekä lämmitysjäähdytys.

Insinööriyötä tehdessä kävi ilmi selvästi se, kuinka laaja- alaista tietoa maalämpöjärjestelmän suunnittelu, mitoittaminen ja optimointi vaatii. Pieneltä tuntuva muutos maalämpöjärjestelmän lähtötietoihin tai toiminta- arvoihin voi vaikuttaa suuresti koko järjestelmäntoimintaan. Samalla selvisi myös, kuinka paljon työlämpi maalämpöjärjestelmän suunnitteluprosessi on verrattuna esimerkiksi kaukolämpöön. Työn tuloksena syntyikin insinööritoimiston LVIA- suunnittelijoi-

den käyttöön kattava materiaali maalämpöjärjestelmän mitoituksessa – ja suunnittelussa huomioitavista asioista ja niiden vaikutuksesta järjestelmän toimintaan. Työn tuloksena syntyi myös muutamia perusmalleja putkikytkennöistä, joita hyödynnetään maalämpökohteiden suunnittelussa.

Alun perin työssä oli ajatuksena keskittyä enemmän kytkentäkaavioiden käsittelyyn ja tuottaa muun muassa maalämpöjärjestelmän työselostusmalli. Toisaalta LVIA- suunnittelijan rooli maalämpökohteissa vaihtelee työtilauksen mukaan paljonkin. Toimeksiantoon voi sisältyä maalämpöjärjestelmän suunnittelu kokonaisuudessaan tai toisessa ääripäässä pelkästään lämmitysverkostojen suunnittelu ja jonkun toisen suunnitteleman maalämpölaitteiston ja kaivokentän yhteen sovittaminen. Toisinaan LVIA- suunnittelijaa pyydetään vain kommentoimaan saatua tarjousta maalämpöjärjestelmästä. Insinööritoimisto LeVIA: alla pidettiin tärkeänä, että LVIA- suunnittelija pystyy hahmottamaan maalämpöjärjestelmän kokonaisuutena ja ymmärtää eri osa- alueiden vaikutuksen toisiinsa, jolloin on mahdollista toimia vaihtelevissa rooleissa maalämpöjärjestelmän suunnitteluun liittyen. Näin ollen insinööriyössä päätettiin keskittyä perusteellisemmin maalämpöjärjestelmän mitoitukseen, suunnitteluun- ja optimointiin vaikuttaviin tekijöihin ja niiden vaikutuksiin ja keventää kytkentäkaavioihin keskittyvää osiota sekä maalämmön työselostus jätettiin työstä kokonaan pois. Näin työtä saatiin myös hieman rajattua, työn laajuus pääsi tästä huolimatta kuitenkin yllättämään.

Insinööriyön pohjalta jatketaan maalämpökohteiden suunnittelun kehittämistä Insinööritoimisto LeVIA Oy:ssä. Työn pohjalta jatketaan kytkentäkaaviomallien kehittämistä sekä työselostuksen laatimista. Työn avulla kehitetään myös maalämpökohteiden suunnittelua helpottavia Excel- taulukkolaskentaan perustuvia työkaluja. Tämä kehitystyö on vielä kesken, joten sen tuloksia ei julkaistu tässä insinööriyössä. Maalämpökohteiden määrä jatkaa kasvuaan tulevaisuudessa, ja myös maalämpökohteiden suunnittelun optimointi on tulevaisuudessa entistä tärkeämpi aihe.

Lähteet

- 1 Hirvonen, Jussi. 2022. Lämpöpumput. Suomen Lämpöpumppuyhdistys SULPU ry. Verkkokoulutus. 19.3.2022.
- 2 Setälä, Niina. 2020 Lämpöä maan alta. Tekniikka & Talous. Alma Media Oyj.
- 3 Kauppila, Kari. 2021. EnerSys CM Oy. LP erityispiirteet. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Espoo. Luento 19.3.2021.
- 4 Aittomäki, Antero. 2012. Kylmäteknikka. 4. Painos. Porvoo: Bookwell Oy.
- 5 Muukkonen, Juha-Petteri. 2019. Lämpöpumppulaitoksen lämpökerroinmitaus ja levylämmönsiirtimen uusiminen. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/172513/Muukkonen_Juha-Petteri.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Luettu 18.2.2022.
- 6 Kauppila, Kari. EnerSys CM Oy. 2021. Suuren lämpöpumppu hankkeen suunnittelu ja toteutus. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Espoo. Luento 19.3.2021.
- 7 Honkala, Susanna. 2021. Rakennusten energiasuunnittelun simulointipohjainen mitoitusmenetelmä. Diplomityö. Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto. Energiateknikka. LUTPub. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/162479/diplomityo_honkala_susanna.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Luettu 5.1.2022.
- 8 Järvinen, Jaakko. 2018. Vesi- ilmalämpöpumpun mitoitus. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/157377/jarvinen_jaakko_2.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Luettu 15.2.2022.
- 9 Valkeapää, Aki. 2021. Lämpöpumppulaitoksen päämitoitus ja alustava kaihokentän mitoitus ja tuotantopohjan optimointi. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Espoo. Luento 16.3.2021.
- 10 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2018. Suomen rakentamismääräyskokoelma, energiatehokkuus. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 11 Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto lämpöhäviöiden tasauslaskennassa. 2003. Ympäristöministeriön moniste 122. Helsinki: ympäristöministeriö.

- 12 Laskukaavat: Lämminkäyttövesi. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energiankaytto/kulutuksen_normitus/laskukaavat_lammin_kayttovesi>. Luettu 25.2.2022.
- 13 Ympäristöministeriön asetus 1010/2017 uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. 2017. Helsinki: Suomen säädöskokoelma.
- 14 Huusko, Asmo. 2021. Geologian tutkimuskeskus GTK. Geoenergia. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Espoo. Luento 20.11.2021.
- 15 Ranta-Korpi, Matias. 2018. Aurinko- ja ilmalämmön hyödyntäminen maalämpöjärjestelmän energiatehokkuuden parantamisessa. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Energiatekniikka. Aaltodoc. <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/33736/master_Ranta-Korpi_Matias_2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Luettu 20.3.2022.
- 16 Ohjekortti LVI 11-10624 Maalämpöpumput kiinteistöjärjestelmät. 2018. RT- kortisto.
- 17 Juvonen, Janne & Lapinlampi, Toivo. 2013. Energiakaivo. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 18 Leppäharju, Nina. 2021. EED- kaivomitoitustyökalu. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Espoo. Luento 19.02.2021.
- 19 Hakku- palvelu. Verkkoaineisto. Geologian tutkimuskeskus. <<https://hakku.gtk.fi/>>. Luettu 15.1.2022.
- 20 Kallio, Jarmo; Korhonen, Kimmo; Wennerström, Maarit; Sallasmaa, Olli & Witick, Isa. 2019. Helsingin geoenergiapotentiaali. Helsinki: Helsingin kaupunki.
- 21 Turbocollector. Verkkoaineisto. Muovitech. <https://www.muovitech.com/productdocs/FI_TC45.pdf>. Luettu 15.2.2022.
- 22 White, F.M. 2003. Fluid Mechanics. 5. Edition. New York: McGraw-Hill.
- 23 Kauppila, Kari. 2021. Tuotantoperustan optimointi. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Espoo. Luento 19.3.2021.
- 24 Kaappola, Esko. 2020. Lämmönlähteet. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Espoo. Luento 01.10.2020.

- 25 Lehtinen, Jari. 2013. Maalämpöpumpun ja maalämmön valinta. Verkkoaineisto. Lämpövinkki Oy. <https://hugepdf.com/download/maalmpumpun-ja-maalmmn-valinta_pdf>. Luettu 21.3.2022.
- 26 Rantanen, Mikko. 2015. Lämpöpumppulämmitysjärjestelmän mitoitus ja laitevalinnat. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta. <<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/88825/Mikko%20Rantanen%20Lampopumppulammitysjarjestelman%20mitoitus%20ja%20laitevalinnat.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Luettu 2.2.2022.
- 27 Ympäristöministeriön asetus 1047/2017 rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista. 2017. Verkkoaineisto. Suomen säädöskokoelma. <<https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/sk20171047.pdf>>. 28.12.2017. Luettu 30.3.2022.
- 28 Vesi- ja viemärlaitteistot- opas, päivitetty. 2022. Verkkoaineisto. Talotekniikka info. <<https://talotekniikkainfo.fi/vesi-ja-viemarilaitteistot-opas/6-veden-lampotila>>. 22.6.2022. Luettu 18.9.2022.
- 29 Lintula, Reijo. 2022. LVISK- kalenteri. Helsinki: Suomen Kalenterit Oy.
- 30 Käyttöveden lämpötila ja laatu. 2019. Verkkoaineisto. Talotekniikka info. <<https://talotekniikkainfo.fi/esimerkit/kayttoveden-lampotila-ja-laatu>>. Luettu 18.9.2022.
- 31 Kauppila, Kari. 2021. EnerSys CM Oy. Jäähdytys maalämpölaitteistolla. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Espoo. Luento 19.3.2021.
- 32 Ympäristöministeriön asetus 718/2020 eräiden rakennusten teknisten järjestelmien energiatehokkuuden vaatimuksista. 2020. Verkkoaineisto. Suomen säädöskokoelma. <<https://www.edilex.fi/saadosko-koelma/20200718.pdf>>. 28.10.2020. Luettu 30.3.2022.
- 33 Seppälä, Lari. 2019. Lämmitys- ja jäähdytyskaavioiden toiminnallisuuden dynaamiset tarkastelut maalämpökytkennässä. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/262120/Sep-pala_Lari.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Luettu 10.2.2022.

Lämmönjohtavuuden mittaustulokset kivilajeittain

Kuvassa 1 on esitetty tuloksia Geologian tutkimuskeskuksen geofysiikan osastolla tehdyistä lämmönjohtavuusmittauksista, joita on tehty vuosina 1964–1994.

KIVILAJILUOKKIEN TILASTOLLISET TUNNUSLUVUT							
Yhteensä 2230 näytettä	N	KESKI-	KESKI-	MED.	MOODI	VAIHTELUVÄLI	
		ARVO	HAJ.			MIN.	MAX.
SYVÄKIVET	1094						
GRANIITTI	192	3,55	0,52	3,67	3,78	1,63	4,93
GRANODIORIITTI	249	3,19	0,41	3,25	3,27	2,01	5,09
TONALIITTI	114	3,72	0,30	3,16	2,96	2,05	5,52
RAPAKIVI	24	3,16	0,45	3,72		2,92	4,17
SYENITOIDI	94	2,57	0,30	2,52	2,39	2,12	4,05
ALKALIKIVI JA KARBONATIITTI	116	2,43	0,34	2,44	2,33	1,27	3,37
GABROIDI	104	2,71	0,50	2,67	2,50	0,57	4,40
DIORITOIDI	47	2,44	0,44	2,37	2,31	1,66	3,49
ANORTOSIITTI	9	1,83	0,26	1,80	1,89	1,54	2,44
ULTRAMAFISET SYVÄKIVET	118	3,46	0,85	3,60	3,07	1,41	5,29
PEGMATIITTI	26	3,11	0,63	3,09	3,55	2,06	4,60
JUONIKIVET	24						
JUONIKVARTSI	4	6,17	1,46	6,19		4,74	7,56
EPIDOOTTIJUONI	1	2,77				2,77	2,77
DIABAASI	20	2,61	0,37	2,51	2,29	2,13	3,36
VULKAANISET KIVET	168						
VULKANIITTI	168	3,38	1,03	3,09	2,54	1,95	6,93
EMÄKSINEN VULKANIITTI	78	2,85	0,47	2,86	2,82	1,95	4,58
ULTRAEMÄKSINEN VULKANIITTI	34	3,62	0,67	3,57	3,81	2,48	4,91
METAVULKANIITTI	38	4,56	1,20	4,85	4,01	2,53	6,93
TUFFIITTI JA TUFFI	14	2,80	0,69	2,49	2,19	2,03	3,74
SEDIMENTTIKIVET	60						
HIEKKAKIVI	51	3,35	0,93	3,28	3,19	1,05	5,21
SAVIKIVI	9	1,78	0,14	1,82		1,59	1,97
METAMORFISET KIVET	876						
METAMORFISET HIEKKAKIVET	21	4,27	1,34	4,94		2,07	6,19
LIUSKE	290	3,41	1,50	3,10	3,05	1,35	9,68
TALKKILIUSKE	15	8,06	1,62	8,34		3,44	9,68
FYLLIITTI	24	3,10	0,61	3,17	2,90	1,89	5,15
KIILLELIUSKE	173	2,80	0,78	2,74	3,05	1,35	8,63
LEPTIITTI	11	3,65	0,25	3,58	3,57	3,31	4,17
MUSTALIUSKE	67	4,02	1,15	3,91	4,08	2,08	9,56
GNEISSI	373	3,19	1,12	3,03	2,64	0,99	10,56
SARVIVÄLKE- JA AMFIBOLIGNEISSI	60	2,95	0,72	2,93	2,65	0,99	6,03
PYROKSEENI- JA DIOPSIDIGNEISSI	5	2,64	0,52	2,62		2,10	3,20
KORDIERIITTI GNEISSI	32	3,44	1,03	3,41	2,02	1,52	4,90
KIILLEGNEISSI	216	2,99	0,76	2,96	3,24	1,50	5,99
GRANIITTI GNEISSI	41	3,52	0,37	3,62	3,50	2,64	4,09
GRAFIITTI GNEISSI	11	7,00	2,96	6,73		2,81	10,56
MIGMATIITTI	17	3,30	0,31	3,30	3,27	2,56	3,66
METAMORFINEN ULTRAMAFIITTI	45	3,15	1,13	2,79	2,70	1,24	6,81
VIHREÄKIVI JA -LIUSKE	10	3,40	1,40	3,03		2,09	7,05
AMFIBOLIITTI	69	2,59	0,75	2,41	2,26	1,37	4,70
KARSI	29	5,49	1,77	4,79		3,16	8,87
METAMORFISET KALKKIKIVET	10	3,33	0,37	3,41	3,47	2,70	3,87
KATAKLASTISET KIVILAJIT	12	3,60	1,17	3,40		1,98	5,92
MALMIT	8						
MALMIT	8	2,94	0,56	2,84		2,16	3,66

Kuva 1. Lämmönjohtavuuden mittaustulokset kivilajeittain.

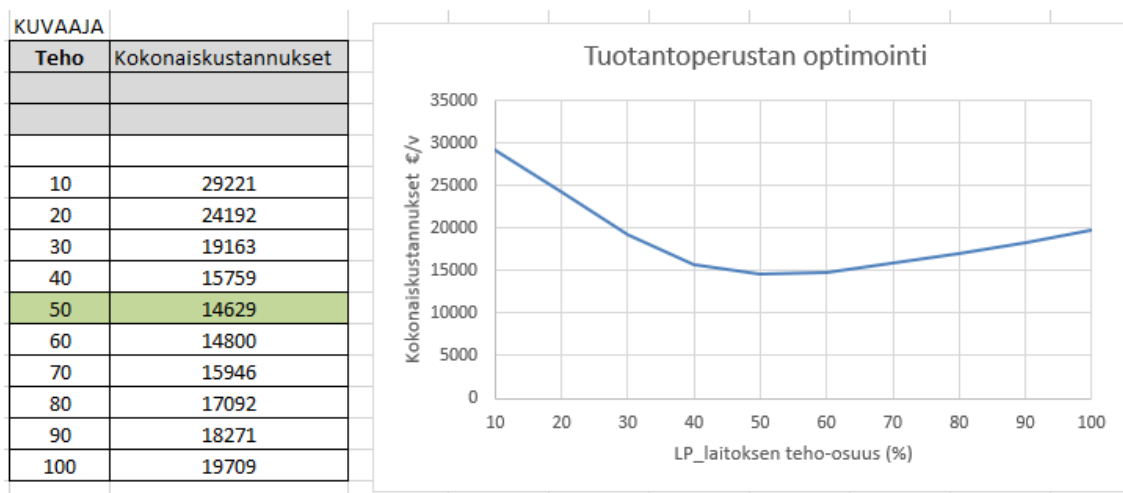
Tuotantoperustan optimointi Excel- ohjelmalla

Kuvassa 1 on esitetty tuotantoperustan optimoinnin laskentaa Excel- ohjelmaa hyödyntäen.

TUOTANTOPERUSTAN OPTIMOINTI										
LÄHTÖTIEDOT										
Tuotettava energia vuodessa (kuorma)				0,2 GWh/v						
Huipun käyttöaika			200 MWh							
Lämpöpumppulaitoksen huipputeho			2800 h							
			0,07 MW							
			71 kW							
Lämpöpumppulaitoksen ominaishinta			2000 €/kW							
Korko			6,00 %							
Laskenta-aika			15,00 v							
Annuiteettikerroin			0,103 %							
Sähkön hinta			100 €/MWh							
LP-laitoksen COP			4							
LP-laitoksella tuotetun lämmön hinta			25,0 €/MWh							
Öljyn hinta			1,5 €/l							
Öljyn lämpöarvo			10 kWh/l							
Öljykattilan hyötysuhde			80 %							
Öljykattilalla tuotetun lämmön hinta			187,5 €/MWh							
Teho	Energia	LP-laitoksen teho	LP-laitoksella tuotettu energia	Öljykattilalla tuotettu energia	LP-laitoksen investointikust.	vuosierä	LP-laitos	Öljykattila	Yht.	
%	%	kW	MWh/v	MWh/v	€	€/v	€/v	€/v	€/v	€/MWh
0	0	0	0	200	0	0	0	37500	37500	188
10	30	7	60	140	14286	1471	1500	26250	29221	146
20	50	14	100	100	28571	2942	2500	18750	24192	121
30	70	21	140	60	42857	4413	3500	11250	19163	96
40	85	29	170	30	57143	5884	4250	5625	15759	79
50	93	36	186	14	71429	7354	4650	2625	14629	73
60	97	43	194	6	85714	8825	4850	1125	14800	74
70	98	50	196	4	100000	10296	4900	750	15946	80
80	99	57	198	2	114286	11767	4950	375	17092	85
90	99,9	64	200	0,2	128571	13238	4995	37,5	18271	91
100	100	71	200	0	142857	14709	5000	0	19709	99

Kuva 1. Tuotantoperustan optimointi excel- ohjelmalla.

Kuvassa 2 on esitetty kuvaajan avulla kuvan 1 mukaisen laskennan tulokset. Tuloksista nähdään, että kyseisessä tapauksessa 50%: n teho- osuus kokonais-
tehontarpeesta olisi taloudellisesti optimaalinen mitoitus, kun lisälämpönä on
öljy.



Kuva 2. Optimoinnin tulokset.