



Marko Paavola

Lämpöpumppujärjestelmien mitoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

11.11.2023

Tiivistelmä

Tekijä: Marko Paavola
Otsikko: Lämpöpumppujärjestelmien mitoitus
Sivumäärä: 50 sivua
Aika: 11.11.2023

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Talotekniikka
Ammatillinen pääaine: LVI-suunnittelu
Ohjaajat: Kehityspäällikkö Joni Hilpinen
Yliopettaja Aki Valkeapää

Insinööriyössä selvitettiin lämpöpumppujärjestelmien mitoituksen nykytilanteen toimintatapoja sekä ongelmia. Lämpöpumppujärjestelmät ovat yleistyneet nopeaa vauhtia, mutta niiden mitoitukseen ei ole sovittu yleisiä sääntöjä.

Työssä käytiin ensin läpi lämpöpumppujen teoriaa ja erilaisia lämpöpumpputyyppejä, joita markkinoilta löytyy. Tämän jälkeen käytiin läpi lämpöpumppujen mitoitusperusteita ja eri osia, joita kuuluu lämpöpumppujärjestelmien mitoitukseen. Lopuksi perehdyttiin insinööriyössä tarkasteltavan kohteen mitoitukseen.

Lämpöpumppujärjestelmien onnistunut mitoitus perustuu rakennuksen energian- ja lämmitystehontarpeeseen ja näistä energiantarve on mitoituksen kannalta merkittävämpi. Rakennuksen energiantarpeen arvioinnissa tulee lämpöpumppujärjestelmän mitoittajalla olla tarkka käsitys, miten siihen on päädytty. Etenkin jos käytetään simulointimallia mitoituksen lähtötietona, tulee simulointimallin olla tavoite-energiamalli. Lämpöpumppua ei yleensä mitoiteta kattamaan koko rakennuksen energiantarvetta, vaan lisäjärjestelmällä tuotetaan huippukulutuksen aikainen energia. Optimaalinen lämpöpumpun energianpeittoaste voidaan määritellä elinkaarikustannusanalyysillä, jossa verrataan suuremman lämpöpumpun investointia sen suuremman energiapeittoasteen tuomiin säästöihin. Energiakaivoja käytetään usein lämpöpumppujärjestelmän energianlähteenä. Energiakaivojen mitoitus perustuu niistä kerättävään energiämäärään ja maaperän ominaisuuksiin. Energiankaivojen mitoitus tulee tehdä siihen tarkoitettulla mitoitusohjelmalla.

Avainsanat: Lämpöpumppu, Energiakaivo

Abstract

Author: Marko Paavola
Title: Dimensioning of Heat Pump Systems
Number of Pages: 50 pages
Date: 11th November 2023

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

This final year project studied the current practices and challenges involved in sizing heat pump systems as there are no widely accepted guidelines for their sizing although they have rapidly gained popularity.

The project first delved into the theory of heat pumps and explored the different types of heat pumps available in the market. Following that, the fundamental principles of sizing heat pumps and the various components that play a role in determining the appropriate size for heat pump systems were discussed. Finally, the project focused on the sizing process for an existing system.

The results showed that successful sizing of heat pump systems depends on understanding the energy demand and heating power requirements of the building. A heat pump system designer must understand how energy demand and heating power is produced especially when employing a simulation model as the basis for sizing. Determining the optimal energy coverage rate for a heat pump can be achieved through a life cycle cost analysis, comparing the investment in a larger heat pump to the energy savings it provides. Energy wells are often used as the energy source for heat pump systems. Their proper sizing should be carried out using dedicated sizing software.

Keywords: heat pump, boreholes

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lämpöpumppujärjestelmät	2
2.1	Maalämpöpumppu	3
2.2	Ilma-vesilämpöpumppu	10
2.3	Poistoilmalämpöpumppu	14
3	Mitoitus	17
3.1	Energiatekninen mitoitus	17
3.1.1	Lämpöpumpun teho ja energianpeittoaste	17
3.1.2	Maalämpökentän koko	21
3.1.3	Muut asiat	27
3.2	LVI-tekkinen mitoitus	31
3.2.1	Varaajat	31
3.2.2	Muut laitteet	34
4	Esimerkkikohde	42
5	Yhteenveto	48
	Lähteet	49

Lyhenteet

Sulpu: Suomen lämpöpumppuyhdistys.

COP: *Coficient of Performance*. Lämpöpumpun hyötysuhde, joka kuvaa sähkönkäytön ja lämmöntuotannon suhdetta.

PE: Polyeteeni.

SDR: *Standard Dimensional Ratio*. Kuvaa putken halkaisijan ja seinämän-paksuuden suhdetta.

GTK: Geologian tutkimuskeskus.

LTO: Lämmöntalteenotto.

1 Johdanto

Tämä insinööri työ on selvitys lämpöpumppujen mitoituksen eri osa-alueista. Työn tavoitteena on toimia esityönä Sweco Finland Oy:ssä käytössä olevan lämmityskaavioiden mitoitustyökalun kehittämisessä niin, että se soveltuisi myös lämpöpumppujärjestelmien mitoittamiseen. Lisäksi työssä selvitetään, kuinka lämpöpumppujärjestelmiä mitoitetaan ja mitkä ovat suurimmat mitoituksen ongelma-alueet. Insinööri työssä käytetään esimerkkitapausta Helsingin Asumisoikeus Oy:n (myöhemmin HASO) Verkkosaaren uudisrakennuskohdetta, jonka lämmitystavaksi tuli maalämpö ja jonka suunnittelusta Sweco Finland Oy vastasi.

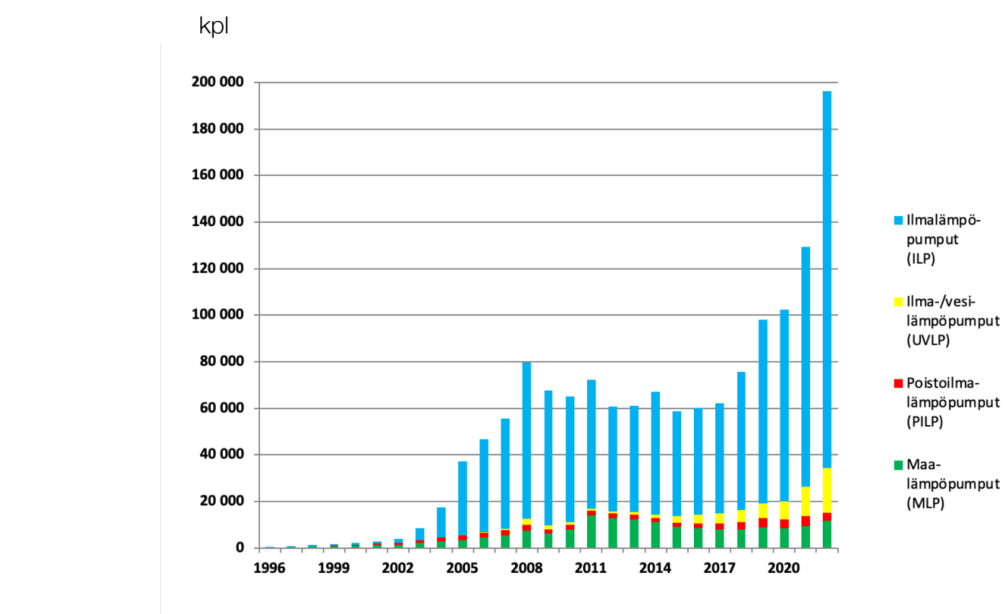
Lämpöpumput ovat yleistyneet viime vuosina useista syistä. Ensinnäkin niiden avulla voidaan vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista ja siirtää lämmitysenergian tuotanto uusiutuville energialähteille, joita ovat esimerkiksi maa-perä, ilma, vesi tai hukkalämpö. Tämä edistää ympäristön kannalta kestävä kehitystä ja vähentää osaltaan lämmöntuotannon hiilidioksidipäästöjä. Toiseksi lämpöpumput ovat tehokkaita ja taloudellisesti järkeviä vaihtoehtoja perinteisille lämmitysjärjestelmille. Ne tarjoavat merkittäviä säästöjä energiakustannuksissa, ja niiden käyttöikä on pitkä. Lisäksi lämpöpumput ovat monipuolisia järjestelmiä, joita voidaan käyttää erilaisiin tarpeisiin, kuten lämmitykseen, jäähdytykseen ja kuivaukseen. Kaikki nämä tekijät ovat edesauttaneet lämpöpumppujen yleistymistä eri puolilla maailmaa.

Lämpöpumppujen räjähdysmäisestä yleistymisestä huolimatta niiden mitoittamiseen ei kuitenkaan ole yleisesti sovittuja pelisääntöjä niin kuin esimerkiksi kaukolämmityksessä. Tässä opinnäytetyössä on tarkoitus käydä aluksi läpi erilaisia markkinoilla olevia lämpöpumppujärjestelmiä, sen jälkeen tuoda esille lämpöpumppujen mitoituksen periaatteita, joilla on suunniteltu toimivia kohteita sekä osaltaan edistää lämpöpumppualan yhtenäistämistä Suomessa. Lopputuotoksena insinööri työn tarkoituksena on myös toimia opintomateriaalina lämpöpumppujen mitoituksesta.

2 Lämpöpumppujärjestelmät

Suomen lämpöpumppuyhdistyksen eli Sulpun tilastojen mukaan vuonna 2022 lämpöpumppujen myynti kasvoi 50 % vuodesta 2021 ja niitä myytiin 196 000 kappaletta. Tästä ylivoimaisesti suurin osuus oli ilmalämpöpumppuja, joita myytiin 160 000 kappaletta. Ilma-vesilämpöpumppuja myytiin 19 000 kappaletta ja maalämpöpumppuja 12 000 kappaletta. Pientalojen poistoilmalämpöpumppuja myytiin vain 3 000–4 000 kappaletta, joka on vähiten kaikista lämpöpumpputyypeistä. Lämpöpumppujen yleistyminen on alkanut 2000-luvun alusta ja jatkunut 2020-luvulle asti. Ilma-vesilämpöpumppujen suosio on noussut vuodesta 2015 alkaen ja on nyt ohittanut maalämpöpumppujen suosion. (1.) Kuvassa 1 on esitetty myydyt lämpöpumput vuosittain 1996 – 2022.

Myydyt lämpöpumput vuosittain, 196.000 kappaletta (2022)



sulpu

Kuva 1. Myydyt lämpöpumput vuosittain (1).

Lämpöpumppualan kasvu Suomessa on jatkunut hyvänä jo vuosia, ja kasvun ennustetaan jatkuvan. EU-tasoisten FIT55- ja RePowerEU-paketin suunnitelmien mukaiseen lämmityksen riittävään sähköistämiseen tarvitaan jo vuonna 2030 50–60 miljoonaa lämpöpumppua. Tämä merkitsee Euroopan nykyisen 20 miljoonan lämpöpumpun kannan kolminkertaistamista seitsemän vuoden aikana. (1.)

2.1 Maalämpöpumppu

Maalämpöpumppu kerää ja jalostaa maaperään, kallioon tai veteen varastoitunutta auringon lämpöä. Yleisimmin lämpö otetaan syvästä porakaivosta. Lämpöpumpun tehokkuutta kuvaa lämpökerroin COP. Se kertoo kuinka paljon pumppu tuottaa lämpöä, verrattuna sen käyttämään sähkötehoon. Lämpöpumpun COP voidaan laskea kaavalla 1. (2.)

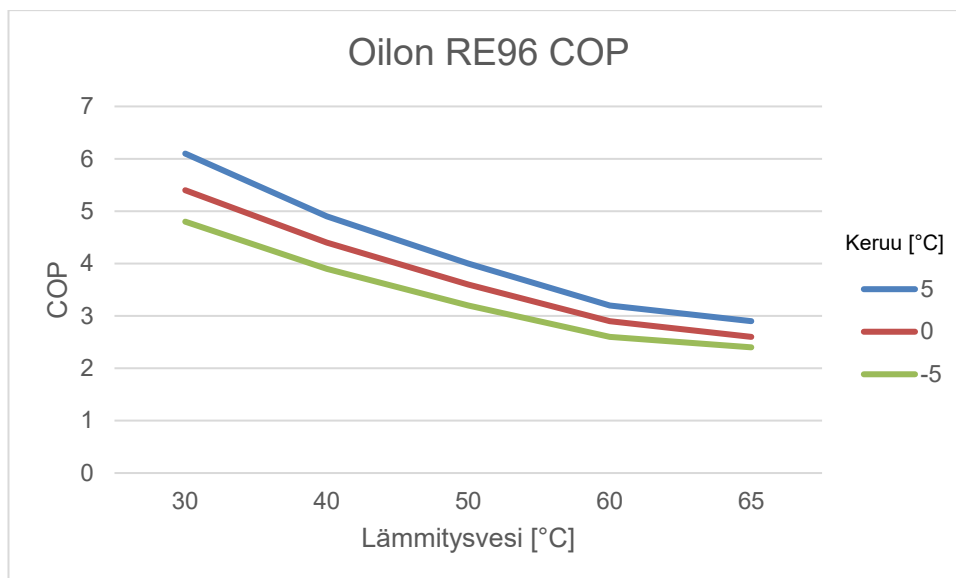
$$COP = \frac{\Phi_l}{P_k} \quad (1)$$

COP on lämpöpumpun lämpökerroin eli hyötysuhde tarkasteltavissa toimintaolosuhteissa (-)

Φ_l on lämpöpumpun lämpöteho (kW)

P_k on kompressorin sähköteho (kW).

Tyypillisesti maalämpöpumpun lämpökertoimen keskiarvo vuositasolla on noin kolme, mutta se muuttuu höyrystymis- ja lauhtumislämpötilojen vaihtuessa. Maalämpöpumpuilla höyrystymislämpötila on suoraan verrannollinen keruunesteen lämpötilaan ja lauhtumislämpötila lämmitysverkoston lämpötilaan. (3.) Kuvassa 2 on esitetty Oilon RE96 -lämpöpumpun COP EN 14511 -standardin mukaan eri lämmitysveden menolämpötiloilla ja keruunesteen paluulämpötiloilla.

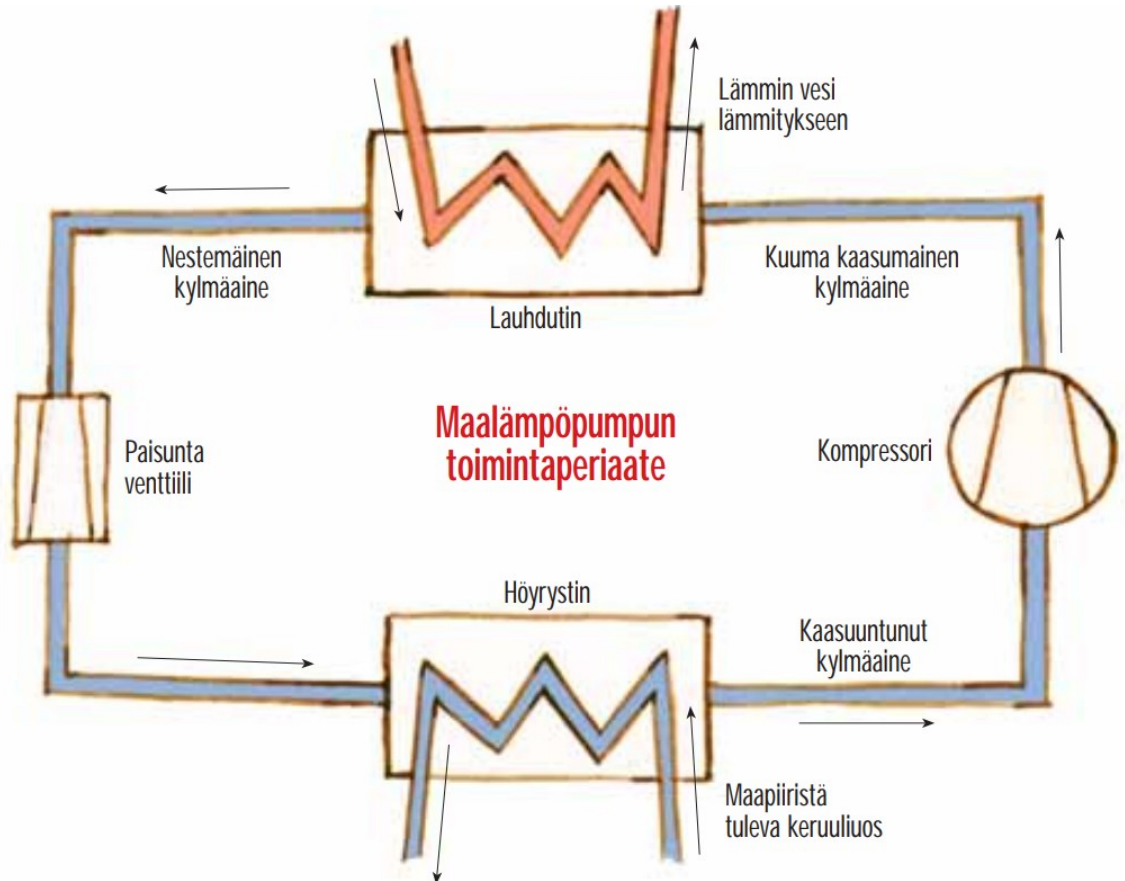


Kuva 2. Oilon RE96 COP eri lämmitysveden ja keruupiirin lämpötiloilla (3).

Kuvasta voidaan havaita, että alhaisemmalla lämmitysveden lämpötilalla COP on huomattavasti parempi kuin korkealla lämpötilalla. Suuren lämmityspinta-alan ansiosta vesikertoisen lattialämmityksen menoveden lämpötila on alhainen, usein noin 35 °C mitoitusulkolämpötilalla, jolloin myös lämpöpumpun lauhdutuslämpötilaa voidaan pitää alhaisena koko lämmityskauden ajan. Tämän takia lämpöpumppu soveltuu hyvin vesikiertoisen lattialämmityksen kanssa käytettäväksi. Keruunesteen lämpötilalla ei ole niin suurta merkitystä COP-arvoon, koska se ei muutu vuoden aikana niin paljon kuin lämmitysverkoston lämpötila. Tulee kuitenkin huomioida, että energiakaivoista keskimäärin saatavan nesteen lämpötila laskee kaivon elinkaaren aikana ja huonontaa lämpöpumpun COP-arvoa. (3.)

Lämpöpumpun tärkeimmät osat ovat kompressori, paisuntaventtiili sekä kaksi lämminvaihdinta: höyrystin ja lauhdutin. Monissa lämpöpumpuissa on lisäksi tulistuslämmön poistovaihdin ja isommissa lämpöpumpuissa alijäähdytin. Lämmönlähteestä lämpö siirtyy kylmäaineeseen höyrystimen matalassa paineessa ja lämpötilassa. Kompressori puristaa höyrystimessä höyrystyneen ja tulistuneen kylmäaineen korkeampaan paineeseen ja lämpötilaan. Lauhduttimen korkeassa paineessa kylmäaineeseen sitoutunut lämpö ja kompressorin puristustyö poistetaan kylmäaineesta ja siirretään rakennuksen lämmitysverkostoon.

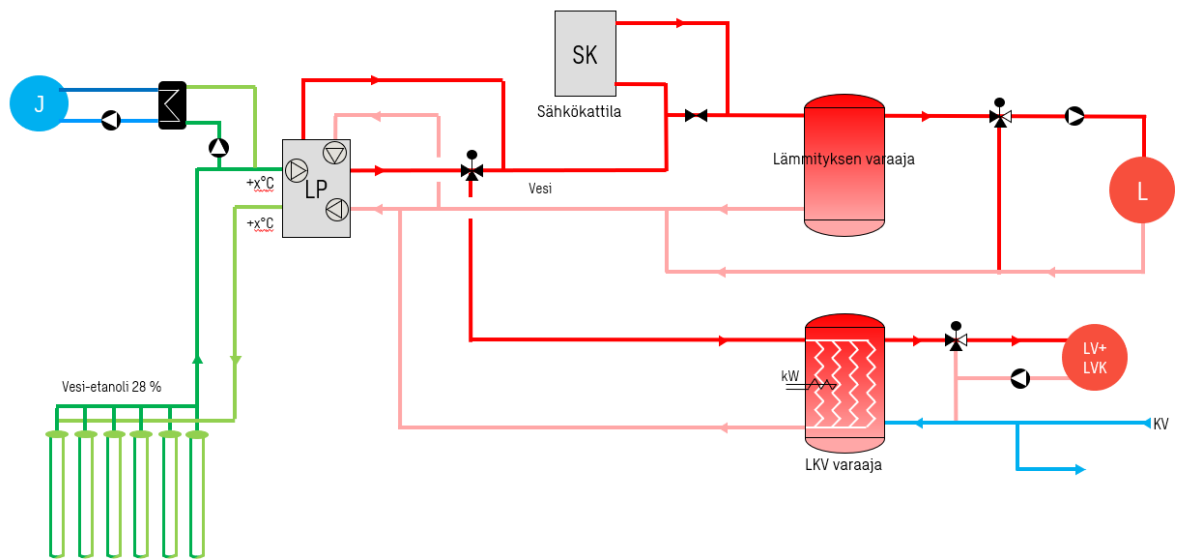
Kylmäaineilla on erilaisia höyrystymis- ja lauhtumislämpötiloja, jolla on merkitystä, kun halutaan valita lämpöpumppu, joka tuottaa tietyn lämpöistä lämmitysvettä. (2; 4.) Kuvassa 3 on esitetty maalämpöpumpun toimintaperiaate.



Kuva 3. Maalämpöpumpun toimintaperiaate (2).

Lämpöpumpuissa käytetään 100 kW:n lämmitystehoon asti hermeettisiä mäntä- ja scroll-kompressoreita. Suuremmilla tehoilla käytetään yleisemmin puolihermeettisiä mäntäkompressoreita. Kokemusten mukaan hermeettiset scroll-kompressorit ovat merkistä riippumatta herkempiä märälle imuhöyrylle kuin hermeettiset mäntäkompressorit. Hermeettiset kompressorit ovat tiiviin hitsatun kuoren sisällä, eikä kompressoria ei ole mahdollista korjata, vaan se pitää vaihtaa sen vikaantuessa. Puolihermeettisissä kompressoreissa on mahdollista korjata ja vaihtaa yksittäisiä osia. (5.)

Lämpöpumpuissa käytetään yleensä levylämmönsiirtimen tyyppisiä lauhduttimia ja höyrystimiä niiden pienen tilantarpeen ja hyvän hinta-laatusuhteen vuoksi. Varsinaisen lauhduttimen lisäksi joissakin lämpöpumpuissa on ns. tulistuksen poistovaihdin, jonka avulla lämmitetään lämmin käyttövesi lauhtumislämpötilaa kuumemmaksi. Koneiston lämpökerrointa voidaan parantaa myös alijäähdyttimellä, jolla esimerkiksi esilämmitetään käyttövettä, lämmitetään uima-allasta tai pidetään pihakäytävä sulana. (5.) Kuvassa 4 on esitetty maalämpöpumpun esimerkkikytkentä.



Kuva 4. Maalämpöpumppu tulistuksen poistolla + sähkökattila + passiivi jäähdytys, käyttövesi kierukkavaraajalla (7).

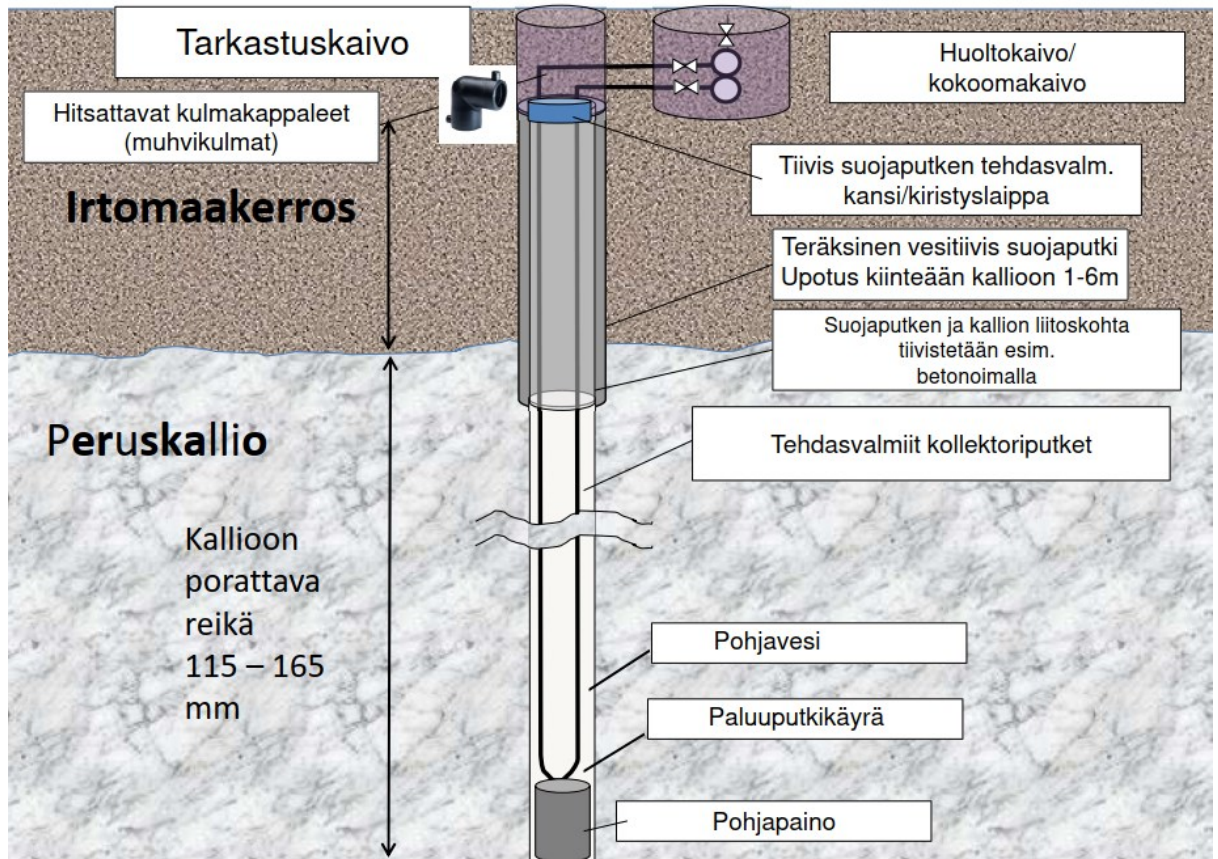
Maaperän lämmönkeräysjärjestelmissä käytetään suljettua kiertoa, jossa kiertää 20–28 % etanoli. Optimaalinen lämpötilan muutos höyrystimessä on 3–4 K, ja tämän takia keruupiirin lämpeneminen maassa pyritään saamaan 3 K. Keruupiirin oikea mitoitus vaikuttaa yhtä paljon järjestelmän toimintaan kuin itse lämpöpumppu ja sen teho. Mitoitukseen vaikuttavat myös talon vaatima lämmitysteho sekä maaperän ominaisuudet. (4.) Taulukossa 1 on esitetty veden sekä etanolisekoitteiden Naturet 20 % ja Naturet 30 % ominaisuudet.

Taulukko 1. Veden ja etanoliliuoksen aineominaisuudet (4).

Ominaisuudet 0 °C lämpötilassa	Aine		
	Vesi	Naturet 20 %	Naturet 30 %
Jäätymispiste [°C]	0	-11	-19
Tiheys [kg/m ³]	1000	976	965
Kinemaattinen viskositeetti [m ² /s]	1,7*10 ⁻⁶	1,7*10 ⁻⁶	1,7*10 ⁻⁶
Ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]	4,22	3,83	3,64

Kallioon poraaminen on helpompaa ja halvempaa kuin maahan poraaminen, sillä maahan porattaessa porareikään on työnnettävä suojaputki, joka pitää reiän auki ja estää pintavesien pääsyn pohjaveteen. Veden saanto lisää lämpökaivosta saatavan energian määrää, mutta kaivon ei tarvitse tuottaa vettä. Mikäli vettä ei saada, kaivo yleensä täytetään vedellä. (4.) Kuvassa 5 on esitetty lämpökaivon rakenneperiaate.

Lämpökaivon rakenneperiaate



Kuva 5. Lämpökaivon rakenneperiaate (4).

Tyypillisesti lämpökaivojen syvyydet vaihtelevat n. 120–350 metrin välillä, mutta tulevaisuudessa lämpökaivojen syvyyden voidaan olettaa kasvavan, koska poraustekniikka kehittyy ja käytettävissä oleva energiakentän pinta-ala pienentyy. Porakaivojen sijoittelussa onkin tärkeää huomioida etäisyys muista kaivoista, rakennuksista, tontin rajoista sekä viemäreistä ja johdoista. Taulukossa 2 on esitetty Helsingin rakennusvalvonnan ohjeistuksen mukaiset etäisyysrajoitukset.

Taulukko 2. Maalämpökaivon suositeltavat minimietäisyydet (6).

Maanpäälliset rakenteet	Suosittelut minimietäisyys	Maanalaiset rakenteet	Suosittelut minimietäisyys
Maalämpökaivo	15 m*	Tunneli	2 x 25 m**
Porakaivo	40 m*	Kalliotila	20 m*
Rengaskaivo	20 m*	Raakavesitunneli	50 m**
Rakennus	3 m*		
Tontin raja	7,5 m*		
Kiinteistökohtainen jätevedenpuhdistamo	Kaikki jätevedet 30m, Harmaat vedet 20 m*		
Viemärit ja vesijohtot	5 m*		

Maalämpöpumpuissa on käytössä muutamia vaihtoehtoisia ratkaisuja. Tulistuslämmön erikseen hyödyntävä lämpöpumppu, ns. ruotsalaismallinen vaihtuvan lauhdutuksen lämpöpumppu ja varaajamallinen lämpöpumppu. (5.)

Maalämpöpumpun kylmäkierron lauhdelämmöstä on 15–20 % korkealämpötilaista tulistuslämpöä, jolla vesi voidaan lämmittää jopa lämpötilaan 80–85 °C. Kun maalämpöpumpussa on tulistinpiiri, lämmin käyttövesi esilämmitetään lämmitysvaraajassa eli vesisäiliössä, josta lämmönjakoverkoston menevä vesi otetaan. Esilämmitetyn käyttöveden lämpötila nostetaan tämän jälkeen tulistinpiirissä. Varaaja on usein kaksiosainen ja siinä lämmitykseen käytettävä alempi- lämpöinen vesi on varaajan alaosassa ja käyttöveden lämmitykseen käytettävä korkeampi lämpöinen vesi on varaajan yläosassa. Varaajan ylä- ja alaosa ovat erotettu toisistaan reikälevyllä. Lämpö otetaan kompressorista tulevasta höyrysteestä ja kuumasta kylmäaineesta erillisellä lämmönsiirtimellä. Tulistinlämmönsiirtimellä varustetun lämpöpumpun etu on se, että sen lämpökertoimeen

vaikuttava lauhtumislämpötila pysyy jatkuvasti niin alhaisena kuin lämmitystarve sallii. (5.)

Vaihtuvan lauhtituksen lämpöpumpuissa vettä lämmitetään eri lämpötiloihin riippuen siitä, lämmitetäänkö käyttöveden vai lämmitysveden verkostoa. Vaihtuvan lauhtituksen maalämpöpumppujen etu on, että lauhtuttimen lämpötila voi olla hyvin alhainen huonetiloja lämmitettäessä ja lämpöpumppu toimii hyvällä lämpökertoimella. Jos käyttövesivaraajan lämpötila on alhainen, vettä lämmitetään lauhtuttimesta saatavalla lämpimällä vedellä, jonka lämpö on noin +55 °C. Lämmitysverkostoon lämpöä ei mene silloin lainkaan. (2; 5.)

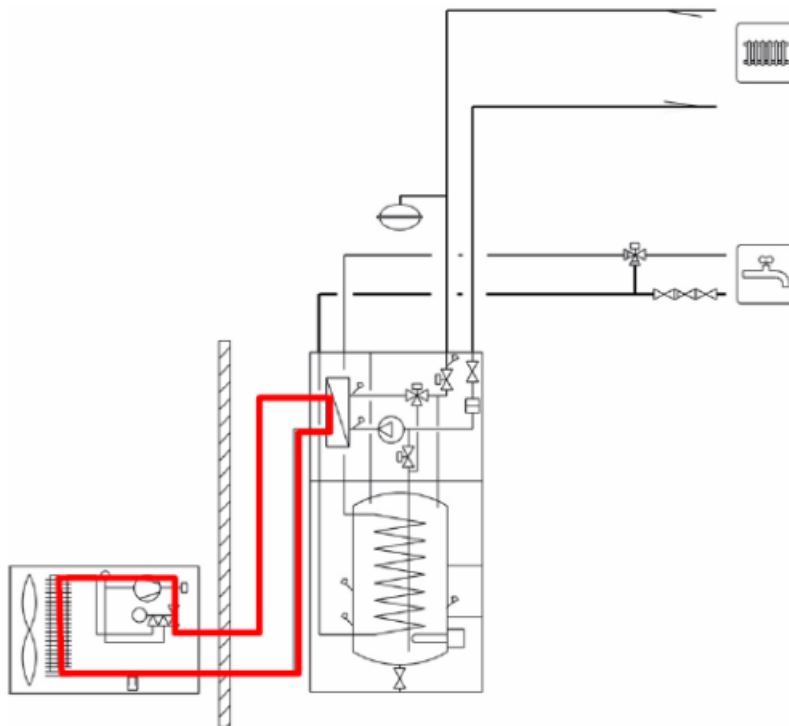
Kaksoisvaippavaraajissa lauhtutinputkistoa kierrätetään lämpöeristetyn varaajan ulko-osan läpi, jolloin sisemmässä varaajassa oleva käyttövesi lämpenee. Ulkovaipassa olevaa lämmintä vettä käytetään lämmitysverkostossa. Käyttövesikierukallisissa ratkaisuisissa lämmin käyttövesi lämmitetään käyttövesikierukassa, joka on lämpöpumpussa olevan lämmitysvaraajan sisällä. Varaajamallissa lämpöpumpuissa voidaan myös hyödyntää korkeampaa tulistuslämpöä tuomalla lauhtutusputket ensin varaajan yläosaan. (5.)

Kaikissa ratkaisuisissa lämpötilaa nostetaan tarvittaessa sisäänrakennetulla sähkövastuksella tai rinnakkaisella lämmitysjärjestelmällä.

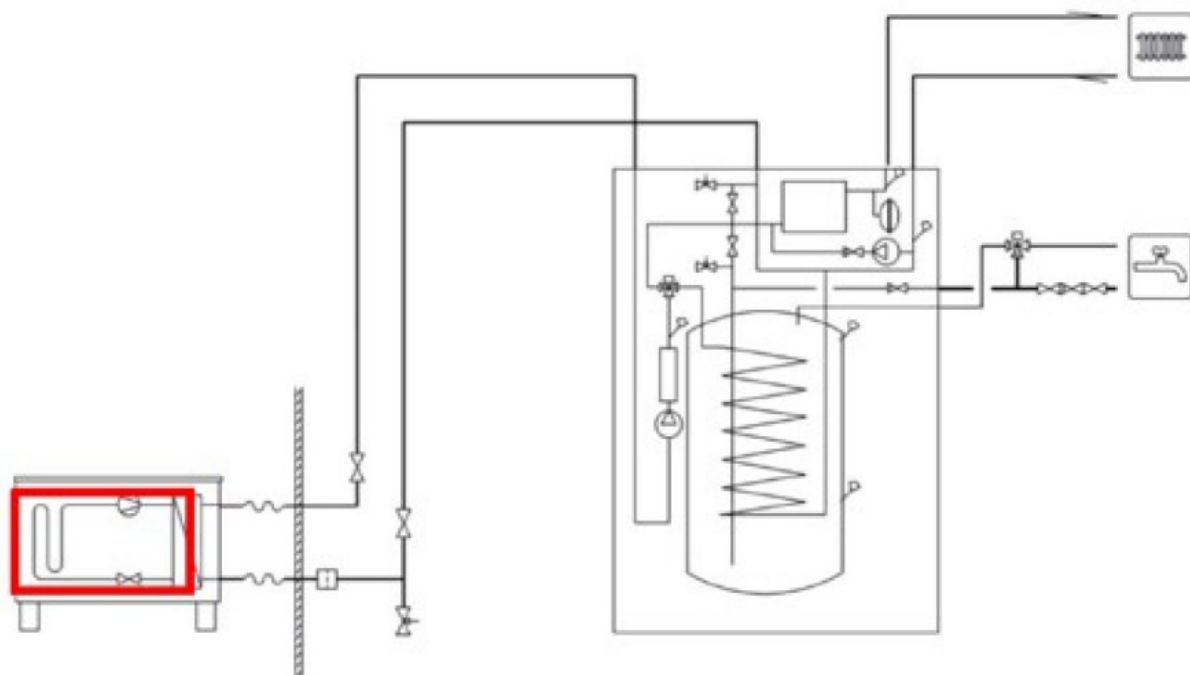
2.2 Ilma-vesilämpöpumppu

Ilma-vesilämpöpumppu siirtää lämpöenergiaa ulkoilmasta veteen. Ulkoilman lämpötilan pysyvyys antaa suhteellisen hyvät lähtökohdan myös Suomen oloissa ilma-vesilämpöpumpuille, koska suurin osa vuoden tunneista (noin 75 %) on 0 °C:n yläpuolella. Vesi lämmitetään samalla periaatteella kuin maalämpöpumpuissakin. Ilma-vesilämpöpumppu eroaa maalämpöpumpusta siinä, että energian keruupiiri on korvattu ulkoyksiköllä, jossa puhallin kierrättää ulkoilmaa höyrystimen läpi. Ilman lämpö siirtyy höyrystimessä kylmäaineeseen, joka muuttuu kaasuksi. Kompressori puristaa kaasun korkeampaan paineeseen, ja kaasu kuumenee kylmäaineesta riippuen jopa +120- asteiseksi. Monoblock-

tekniikalla toimivissa laitteissa lauhduttimessa lämpö siirtyy lämpöjohtopiiriin veteen ja lämmin vesi siirtyy sisäyksikköön. Split-tekniikalla toimivissa laitteissa sisäyksikköön siirtyy kuuma kaasu. Monoblock-tekniikan etuna on varsin korkea hyötysuhde. Split-tekniikan etu on puolestaan erittäin turvallinen toteutustapa, koska kylmäaine ei voi missään olosuhteissa jäätymä. (4.) Kuvassa 6 on esitetty Split ilmavesilämpöpumpun toimintaperiaate ja kuvassa 7 Monoblock ilmavesilämpöpumpun.



Kuva 6. Split ilma-vesilämpöpumppu (4).



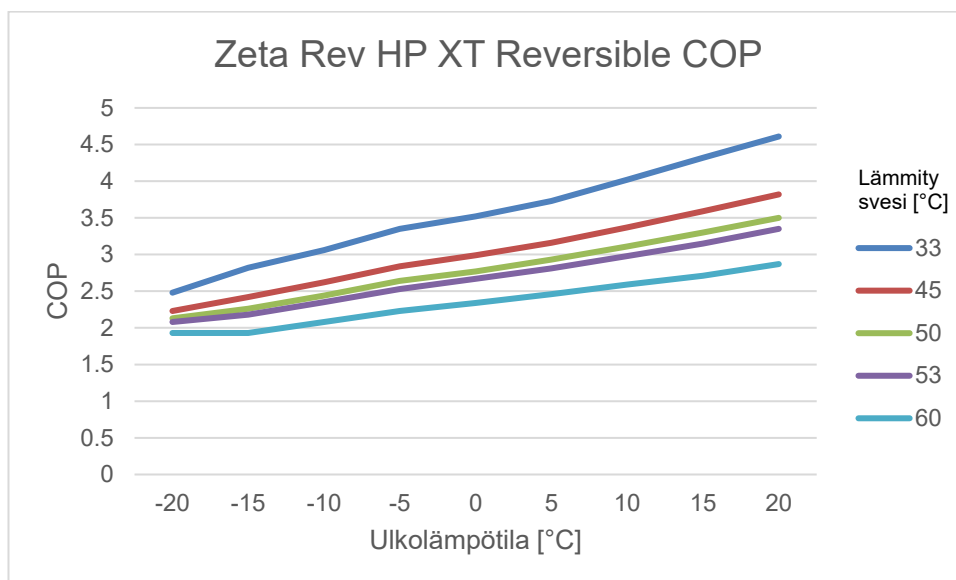
Kuva 7. Monoblock ilma-vesilämpöpumppu (4).

Ilmaa lämmönlähteenään käyttävillä lämpöpumpuilla on yleisesti heikompi hyötysuhde kuin maalämpöpumpuilla johtuen useasta tekijästä, jotka ovat seuraavat:

- Alhaisempi lämmönlähteen lämpötila kylmänä vuodenaikana, minkä takia höyrystyslämpötila on matala.
- Riittämätön lämmönsiirto ilmasta höyrystimeen.
- Ilmalla on alhainen volumetrinen lämpökapasiteetti, ja siksi tarvitaan suhteessa suuret puhaltimet liikuttamaan ilmaa.
- Energiaa pitää käyttää sulattamaan ilmankosteudesta tiivistynyt ja jäätynyt vesi höyrystimen lämmönsiirtimeltä. (8.)

Kuvassa 8 on esitetty Zeta Rev HP XT Reversible -ilma-vesilämpöpumpun COP eri ulkolämpötiloilla ja lämmitysveden lämpötiloilla. Toisin kuin maalämpöpumpuilla, joissa keruunesteen lämpötila pysyy suhteellisen tasaisena eikä vaikuta hyötysuhteeseen merkittävästi, ilma-vesilämpöpumpuilla ulkoilman lämpötilan vaihteluilla on suuri vaikutus hyötysuhteeseen. Sulatusjaksojen käyttämää energiaa ei kuvassa ole otettu huomioon, mutta erään olemassa olevan kohteen

mitattuun dataan perustuen höyrystimen lämmönsiirtimen sulatus huonontaa hyötysuhdetta jopa noin 20 %. (9.)



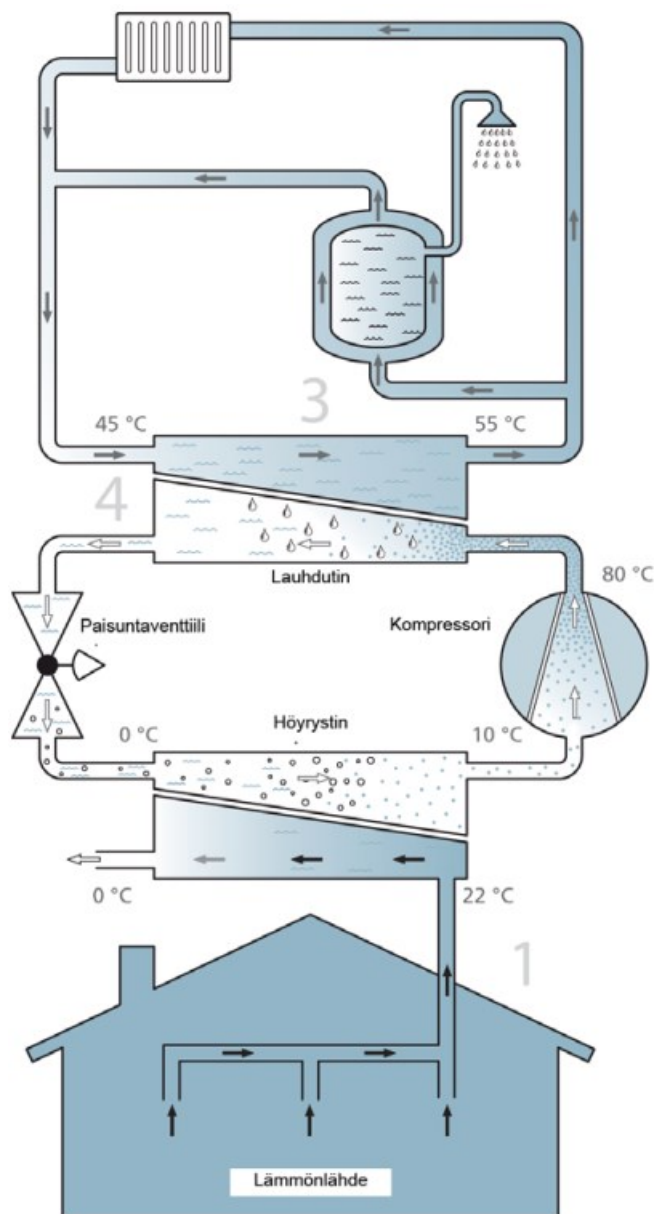
Kuva 8. Zeta Rev HP XT Reversible -ilma-vesilämpöpumpun COP eri ulkolämpötiloilla ja lämmitysveden lämpötiloilla (10).

Ilmavesilämpöpumpulla on kuitenkin huomattavasti pienemmät investointikustannukset kuin maalämpöpumpulla, joten tietyissä tilanteissa se on kannattavampi investointi ja soveltuu sellaisiin kohteisiin joihin energiakaivojen poraaminen ei ole mahdollista. Se on kannattamatonta esimerkiksi heikon kallioperän lämmönjohtavuuden vuoksi tai jos tontille mahtuva kaivomäärä on hyvin pieni suhteessa lämmitystarpeeseen. Ilma-vesilämpöpumppu tuottaa vähiten energiaa silloin, kuin lämmitystarve on suurimmillaan. Tämän takia järjestelmä tarvitsee rinnalleen täydelle lämmitystarpeelle mitoitettun toisen lämmitysjärjestelmän, joka hoitaa lämmöntuotannon -15/-20 °C ulkolämpötiloissa. Pientaloissa yleensä varajärjestelmänä käytetään ilma-vesilämpöpumpun omia sähkövastuksia, jolloin lämmitystarve katetaan kovimpien pakkasten aikana sähköllä. Suuremmissa kohteissa varajärjestelmänä toimii joko erillinen sähkökattila tai esimerkiksi kaukolämpö. Ulkoilmaa voidaan käyttää myös lisälämmönlähteenä maalämpöjärjestelmässä, jolloin kaivomäärää voidaan pienentää ja korvata niitä ulkoyksiköillä. Tämä vaatii kuitenkin erikoisjärjestelyjä lämpöpumppujen kytkennässä. Ulkoyksiköt vievät tilaa ulkona ja aiheuttavat melua, jotka seikat pitää

ottaa suunnittelussa huomioon. Ilma-vesilämpöpumput ovat olleet invertteri ohjattuja jo pitkään, kun maalämpöpumput ovat vasta viime vuosina alkaneet siirtymään invertteri ohjaukseen. Invertteri eli taajuusmuuttaja ohjattu lämpöpumppu säättää kompressorin kierroksia lämmitystarpeen mukaan. (8; 11.)

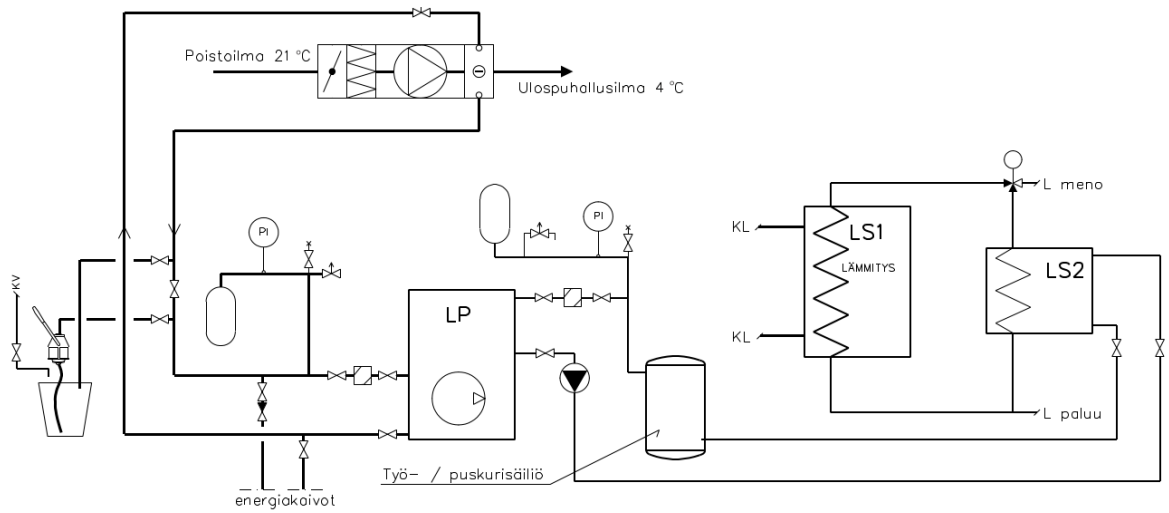
2.3 Poistoilmalämpöpumppu

Poistoilmalämpöpumpuissa energianlähteenä käytetään rakennuksen ilmanvaihdon jäteilman lämpöä, joka koostuu osin rakennuksen sisäisistä lämmönlähteistä ja osin ulkoilmasta peräisin olevasta uusiutuvasta energiasta. Poistoilman energiasisältö riippuu sisäilman lämpötilasta ja kosteudesta. Toteutusvaihtoehtoja on kaksi erilaista. Ensimmäinen vaihtoehto on lämmönsiirtimeen perustuvan LTO-laitteen korvaaminen tai täydentäminen poistoilmalämpöpumpulla, jolloin lämpö siirretään tuloilmaan ja/tai lämmitysveteen. Toinen vaihtoehto on hajautettu lämmön talteenotto erillisistä poistoilmakoneista/huippuimureista, joista talteen saatu lämpö kerätään nesteeseen, joka tuodaan lämpöpumpun höyrystimelle, jonka jälkeen lauhduttimelta saatavaa lämpöä voidaan hyödyntää lämmitysvedessä. Poistoilmalämpöpumppu vaatii riittävän suuren ilmavirran ja riittävän korkean poistoilman lämpötilan toimiakseen. Vaikka lämpöpumput ovat kokonaisuutena yleistyneet, ovat pientaloihin tarkoitettujen poistoilmalämpöpumppulaitteiden myyntimäärät pienentyneet. Vanhoissa kerrostaloissa poistoilmalämpöpumppu-LTO-ratkaisut, joissa vanhan huippuimurin tilalle asennetaan LTO-patterin ja säädettävän poistoilmapuhaltimen yhdistelmä, ovat kuitenkin yleistyneet. (1; 4.) Kuvassa 9 on esitetty poistoilmalämpöpumpun toiminta.



Kuva 9. Poistoilmalämpöpumpun toimintaperiaate (12).

Poistoilmalämpöpumpputjärjestelmä kattaa parhaimmillaan noin puolet talon lämmitysenergian tarpeesta, mutta käytännössä saanto voi jäädä selvästi pienemmäksi. Lämmitystehon kattavuus pelkällä poistoilmalämpöpumpulla on vain luokkaa 20–25 %, jonka takia lisälämmön tarve on suuri. Tämän takia järjestelmän mitoitusastetta kannattaa usein nostaa ottamalla mukaan lämpökaivoja, jolloin kaivomitoitus tapahtuu yleensä tehoperusteisesti. (12.) Kuvassa 10 on esitetty poistoilmalämpöpumpputjärjestelmä, jossa lämmönlähteinä toimivat rinnan energiakaivot ja poistoilma.



Kuva 10. Poistoilmalämpöpumpun kytkentäkaavio (12).

3 Mitoitus

Oikeat lähtötiedot, hyvä suunnittelu ja mitoitus, ammattitaitoinen asennus sekä huolellinen valvonta ja käyttöönotto ovat edellytyksiä toimivan lämpöpumppujärjestelmän aikaansaamiseksi. Säästö suunnittelu- ja toteutusvaiheessa voi aiheuttaa moninkertaiset käyttökustannukset ja johtaa siihen, että lämmitysjärjestelmä toimii puutteellisesti. Vaikka lämpöpumput ovat yleistyneet kovalla vauhdilla, niiden toiminnan ja mitoituksen ymmärrys ei ole edennyt samaa tahtia. Ymmärryksen puutetta esiintyy tilaajien, urakoitsijoiden ja suunnittelijoiden puolella. (13.)

Tässä luvussa käydään läpi lämpöpumppujärjestelmien mitoituksen perusteita.

3.1 Energiatekninen mitoitus

Lämpöpumppujen mitoitus alkaa lähtötiedoista, joita ovat mm. rakennuksen energiankulutus, lämmitystehontarve, lämpimän käyttöveden kulutus, kalliopeuran tyyppi ja pintamaan paksuus, käytettävissä oleva tontin pinta-ala sekä lämmitysjärjestelmän lämpötilatasot. Lisäksi on huomioitava, tuleeko rakennukseen jäähdytystä ja mikä on jäähdytyksen energian- ja tehontarve. Joskus tavoiteltava energianpeittoaste voi olla myös lähtötieto, mutta yleensä optimaalinen energianpeittoaste määräytyy elinkaarilaskennan perusteella. Lisäksi etenkin peruskorjauskohteissa käytettävissä oleva lämmönjakohuoneen tila ja sähköliittymän kapasiteetti saattavat asettaa rajoituksia suunnitteluun tai lisätä lämpöpumppujärjestelmän kustannuksia. Maalämpöjärjestelmän toteutettavuuteen vaikuttavat myös tärkeät pohjavesialueet, mahdolliset maanalaiset rajoitteet sekä pilaantunut maaperä. (14.)

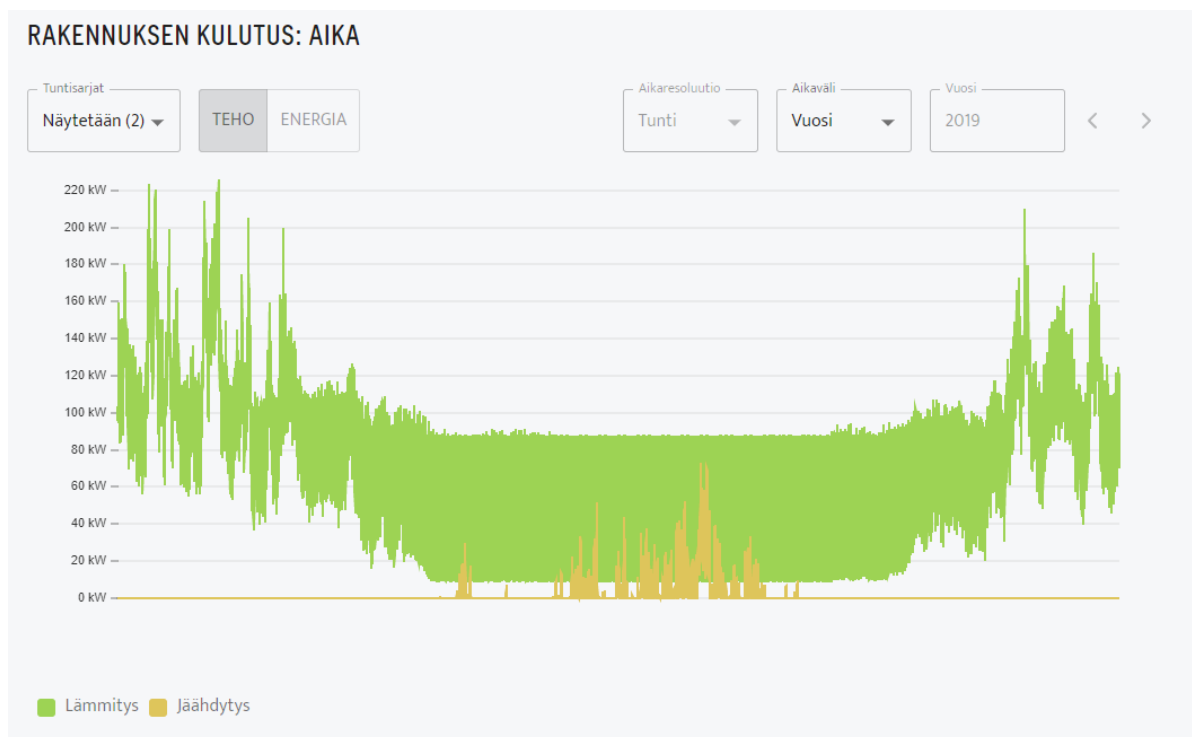
3.1.1 Lämpöpumpun teho ja energianpeittoaste

Toisin kuin esimerkiksi kaukolämmöllä, jossa käytetään mitoitusulkolämpötilan lämmitystehontarvetta mitoitukseen, lämpöpumppu ja energiakaivokenttä mitoitetaan nykyään energiankulutukseen perustuen. Energiankulutusdatan tulisi olla

tuntitasoista, jotta energianpeittoasteen laskenta tapahtuu luetettavasti. Tämän vuoksi lämpöpumppujärjestelmän mitoitusprosessi on haastavampi ja rakennuksen energiankulutus on tärkein lähtötieto.

Energiankulutus saadaan, joko toteutuneesta energiankulutuksesta tai simuloimalla esimerkiksi IDA-ICE-simulointiohjelmalla. Mitatussa kulutuksessa on hyvä käyttää esimerkiksi kolmen viimeisen vuoden keskiarvoa, jolloin eri vuosien sää- ja käyttövaihtelut saadaan tasoitettua. Mitatussa kulutuksessa on usein haasteita mittaustarkkuuden kanssa etenkin öljylämmityskohteissa, joissa öljyn kulutusta seurataan yleensä vain täyttöjen yhteydessä, joita saattaa olla vain kerran vuodessa. Myös öljykattilan hyötysuhde on epävarmuustekijä rakennuksen kulutusta arvioidessa. Peruskorjauskohteissa tehdään usein myös muita toimenpiteitä, jotka pienentävät lämmitystarvetta merkittävästi. Niiden vaikutus tulisi huomioida lämpöpumppumitoituksessa käyttämällä kalibroitua simulointi- tai laskentamallia, jossa simulointimalli ensin kalibroidaan ensin nykyisen tilanteen mukaan, jonka jälkeen mallissa simuloidaan energiankulutus suunniteltujen parannustoimenpiteiden jälkeen.

Simuloitaessa energiankulutusta tulee simulointisäädädata valita lähimmän vertailupaikkakunnan perusteella. Simulointimallien, referenssi kiinteistöjen ja erilaisien työkalujen avulla mitattukulutus on mahdollista jakaa kuukausi- tai tuntikohtaiseksi kulutukseksi, joka auttaa mitoituksessa. Puhtaasti simulointimalliin perustuvassa kulutuksessa tulee ottaa huomioon, että simulointimalli on tavoite-energiamalli eikä esimerkiksi E-lukulaskentamalli, jossa ilmanvaihto, käyttö ja säävyöhyke on standardisoitu. Standardikäyttöön perustuvat simulointimallit eroavat toteutuneesta kulutuksesta huomattavasti. Tampereen yliopiston tekemän selvityksen mukaan mitattu kulutus oli keskimäärin 48 % suurempaa kuin simuloitu. Myös tavoite-energiamallin kulutus on usein pienempi kuin toteutunut kulutus. Simulointimallien tuottamaa energiankulutusdataa on helpompi käsitellä erillisessä työkalussa kuin itse simulointiohjelmassa. (15.) Kuvassa 11 on esitetty HASO Verkkosaaren tuntikohtainen lämmityksen ja jäädytyksen tarve yhden vuoden ajalta. Kulutusdata on tuotettu tavoite-energiasimulointimallilla Sweco Finlandin toimesta.

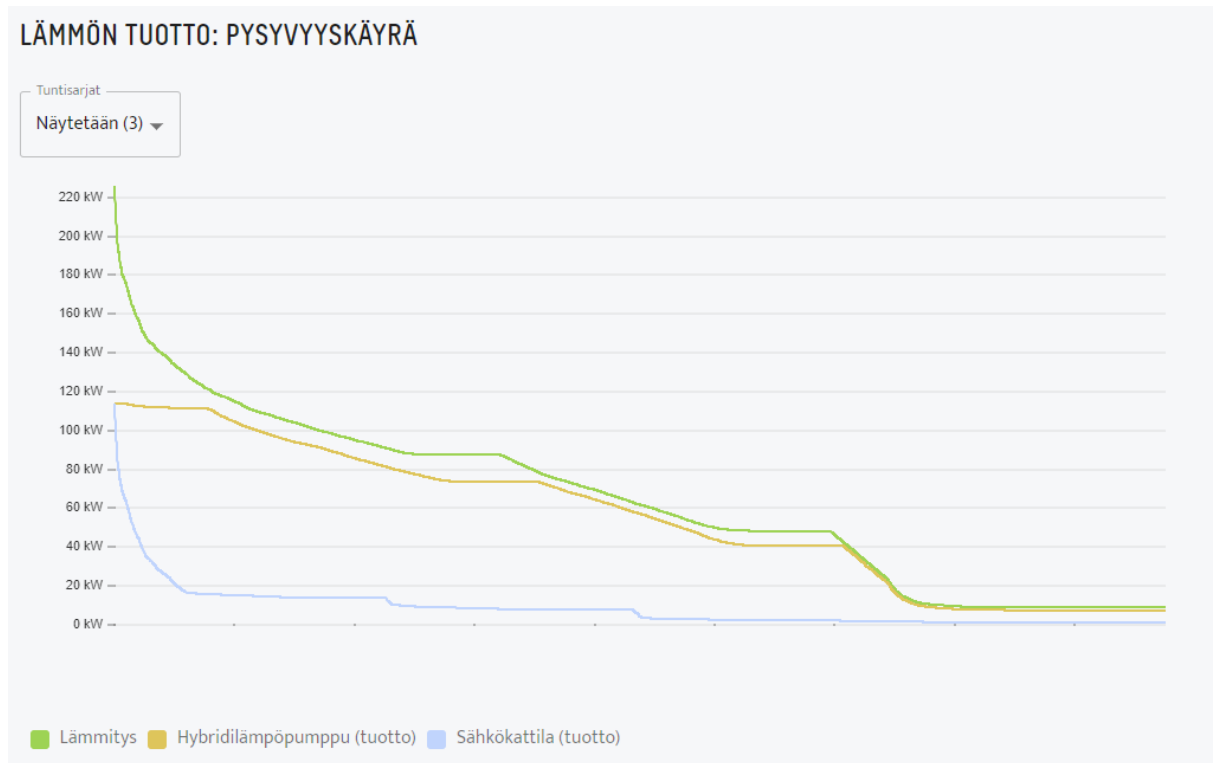


Kuva 11. HASO Verkkosaari lämmityksen ja jäähdytyksen tuntikohtainen kulutus.

Rakennuksen lämmitysteho saadaan laskemalla yhteen tilalämmityksen, ilmanvaihdon (IV) ja lämpimän käyttöveden (LKV) lämmityksen tehontarve. Lämpöpumppua ei suuremmissa kiinteistöissä mitoiteta täydelle lämmitystehontarpeelle, vaan rinnalla on aina lisälämmitysjärjestelmä. Lämpimän käyttöveden lämmitys on erillinen muun kiinteistön lämmityksestä. Käytännössä lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaamasta saatavaa tehontarvetta ei yleensä kannata laskea suoraan mukaan lämpöpumpun tehomitoitukseen, koska lämpöpumpun teho kasvaisi tarpeeseen nähden liian suureksi. Lämpimän käyttöveden tarve on järkevää hoitaa varaajilla niin, että lämmityskäytön aikana käyttöveden varaajiin varataan lämmintä käyttövettä tulevaa tarvetta varten. Käyttöveden kulutuksen arviointi onkin tärkeä lähtötieto varaajien ja lämpöpumpun toiminnan mitoituksessa.

Optimaalinen lämpöpumpun energianpeittoaste voidaan määrittellä elinkaari kustannusanalyysillä, jossa verrataan suuremman lämpöpumpun investointia sen suuremman energiapeittoasteen tuomiin säästöihin. Yleensä erillistä

elinkaarikustannusanalyysiä ei tehdä, vaan riittävänä nyrkkisääntönä maalämpöpumpuilla tavoitellaan yli 90 %:n ja ilmavesilämpöpumpuilla yli 70 % energianpeittoastetta. Lämpöpumppujen energiapeittoasteen optimaalinen mitoitustaso eli piste, johon asti energiapeittoasteen kasvatus on vielä kannattavaa, voidaan katsoa lämmityksen pysyvyyskäyrästä. Pysyvyyskäyrän loivalla osuudella voidaan energianpeittoastetta kasvattaa ennen kuin käyrä lähtee jyrkkään nousuun. Kuvassa 12 esitetään HASO Verkkosaaren lämmityksen pysyvyyskäyrä, jossa on eroteltu lämpöpumpun ja sähkökattilan osuudet lämmöntuotannosta. Kuvasta voidaan havaita, että lämpöpumpun teho on valittu niin, että lämmitystekohantarve ei ole vielä lähtenyt jyrkkään nousuun. HASO Verkkosaassa lämpöpumpun arvioitu energianpeittoaste kokonaiskulutuksesta on 87 %. Lämmitysjärjestelmä kohtaisesti tarkasteltuna lämpöpumpun energianpeittoaste on IV-lämmityksessä 85 %, tilalämmityksessä 97 %, LKV-lämmityksessä 80 % ja LKV-kiertohäviöissä 79 %. LKV-lämmitysten pienemmät osuudet johtuvat niiden korkeammista lämpötilatasoista, joiden tuottaminen lämpöpumpulla on haasteellista ja useimmat lämpöpumppujärjestelmien kytkentätavat eivät voi lämmitellä merkittävässä määrin lämpimän käyttöveden kiertohäviöitä. Kuvassa 12 on esitetty HASO Verkkosaaren lämmityksen pysyvyyskäyrä.



Kuva 12. HASO Verkkosaaren lämmityksen pysyvyyskäyrä.

3.1.2 Maalämpökentän koko

Ennen kuin energiakaivokenttää lähdetään mitoittamaan, tulee selvittää maaperän laatu ja käytävissä oleva tontin pinta-ala. Maaperän laatua voidaan tarkastella esimerkiksi GTK:n internet-palvelusta, jossa on kattavasti esitetty irtomaan paksuus ja kallion laatu eri puolilla Suomea. Irtomaan paksuudella on merkittävästi vaikutusta porauskustannuksiin ja kallion laadulla kalliosta saatavaan energiaan. Paksu savikerros voi hankaloittaa porakaivon toimintaa, koska teräpaalu saattaa alkaa liikkumaan. Myös ruhjekerrokset tuovat poraukseen hankaluutta, ja niitä tulisi välttää. Yleensä on kannattavaa tehdä maaperän terminen vastetestti (TRT-mittaus), jossa selvitetään maaperän lämmönjohtavuus ja energiakaivon lämpövastus. Mitoitusta voidaan tehdä myös taulukkoarvojen perusteella. (6.)

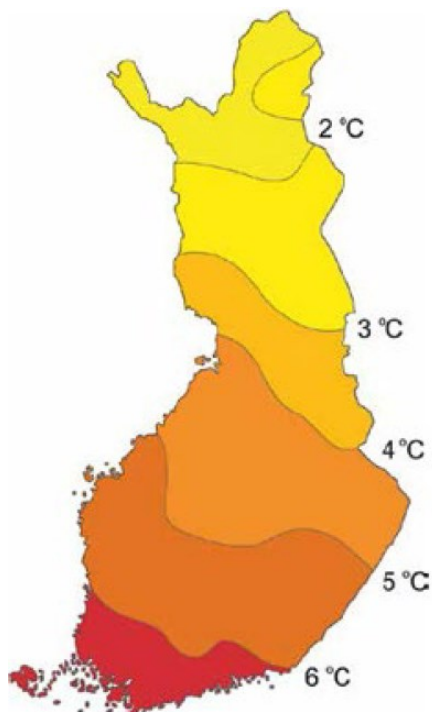
Taulukossa 3 on esitetty eri kalliolajien volumetrinen lämpökapasiteetti C ja lämmönjohtavuus k . Kallion lämmönjohtavuus vaihtelee huomattavasti eri

kalliolajien kesken ja jopa saman kalliolajin sisällä. Taulukkoarvoihin perustuvaa mitoitusta tehtäessä on hyvä käyttää konservatiivisesti arvioituja arvoja, jotta kenttää ei alimitoiteta käyttämällä liian optimistisia arvoja. (6.)

Taulukko 3. Kalliolajien ominaisuuksia (6).

Kivilajien tekniset arvot	Helsingin geoenergiapotentiaali (2019)		Earth Energy Designer -ohjelman suositusarvot	
	C	k	C	k
Graniitti	1.905	3.2	2.4	3.4
Kiillegneissi	1.967	2.87	2.1	2.9
Kvartsi-maasälpagneissi	2.021	3.1	-	-
Granodioriitti	1.952	3.17	2.6	3.3
Amfiboliitti	2.106	2.66	2.6	2.9

Myös rakennuksen sijainti kartalla vaikuttaa mitoitukseen. Ulkoilman ja samalla maaperän keskimääräinen lämpötila laskee mitä pohjoisemmaksi mennään. Kuvassa 13 on esitetty maanpintalämpötila Suomessa.



Kuva 13. Maan pintalämpötila Suomessa (16).

Energiakaivoa voidaan käyttää myös jäähdytykseen, jolloin lämpöä siirretään rakennuksesta energiakaivoon. Jäähdytys voidaan hoitaa suoralla vapaajäähdytyksellä, jossa maapiirinkeruuneste kiertää suoraan jäähdytyspattereissa. Toinen vaihtoehto on välillinen vapaajäähdytys, jossa keruupiirin ja jäähdytyspiirin välissä on lämmönsiirrin. Välillisessä vapaajäähdytyksessä jäähdytyspiirissä voidaan käyttää nesteenä puhdasta vettä. Vapaajäähdytyksellä, jossa jäähdytysvettä varataan puskurivaraajaan, on mahdollista tuottaa suurempi osa myös yksittäisistä jäähdytystehohuipuista. (14.)

Jäähdytyksen tuotantovaihtoehtona on myös aktiivijäähdytys, jossa lämpöpumpun höyrystimellä tuotetaan kylmää. Tällöin lauhdutuksen pitää tapahtua joko maapiiriin, mikä voi olla haastavaa tai johonkin muualle kuten ulkolauhduksista ilmaan. Aktiivijäähdytyksessä ulkolauhduksimen kanssa on suositeltavaa käyttää vapaajäähdytystä maakentästä, jolloin kenttää voidaan ladata ja myös pienentää jäähdytykseen kuluva sähköenergia. (14.)

Vapaajäähdytystä käytettäessä jäähdytysjärjestelmän mitoituslämpötilat ovat korkeammat kuin vedenjäähdytyskoneella toteutettaessa, esimerkiksi 12/17 °C, koska keruupiiristä saatavan nesteen lämpötila voi nousta loppu kesästä melko korkeaksi, jolloin sitä ei voida hyödyntää matalampi lämpötilaisessa jäähdytysverkostossa. Jäähdytysjärjestelmän putkien ja jäähdytyslaitteiden mitoituksessa on tämän vuoksi noudatettava erityistä huolellisuutta. (14.)

Jäähdytystilanteessa kaivoja ladataan jäähdytyksen lauhde-energialla, jolloin lämmitykseen tarvittava kaivomäärä pienentyy. Tämä toimii silloin, kun energiakaivokenttä mitoitetaan lämmityksen mukaan ja jäähdytykseen otetaan niin paljon kuin kaivoista on saatavissa. Jos järjestelmä pitää mitoittaa niin että kaikki jäähdytys otetaan maapiiristä, tulee siitä usein mitoitusta määräävä tekijä kaivojen määrän kasvattamiseen. Yksi ratkaisu on, että vain IV-verkoston jäähdytys tuotetaan vapaajäähdytyksellä maapiiristä ilman erillisiä varaajia, jolloin tilakohtaisia jäähdytyslaitteita ei tarvita. Vapaajäähdytystä voidaan käyttää myös tilajäähdytyksessä esim. lattiaviilennyksessä tai säteilijäjäähdytyksessä, koska näissä jäähdytysveden lämpötila tasot ovat normaalia korkeampia.

Tilajäähdytyksen huipputehontarve on yleensä pienempi mutta energiankulutus suurempi kuin IV-jäähdytyksellä, riippuen ilmamääristä. Pieni tehontarve suhteessa energiantarpeeseen on erittäin sopiva ominaisuus vapaajäähdytykselle, koska vapaajäähdytyksessä kaivoista saatava teho on rajoittunut. IV-jäähdytystarve voidaan laskea, kun tiedetään ilmamäärä, käyntiaika, ulkoilman- ja sisäänpuhallusilman lämpötila, mutta tilajäähdytyksen tarve pitää dynaamisesti simuloida. (14.)

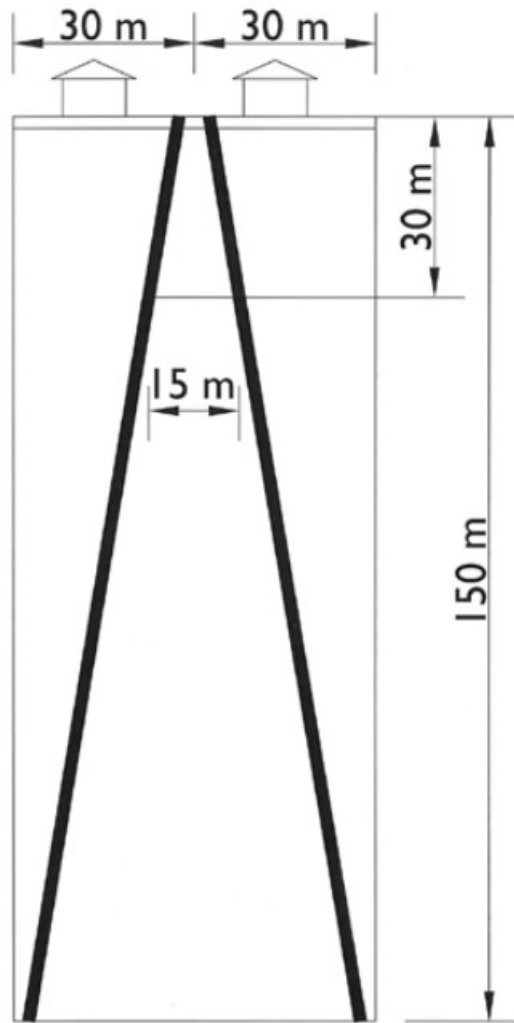
Maalämpöpumpun energiakentälle aiheuttama rasitus ei ole suoraan rakennuksen lämmitystarve, koska lämpöpumpun energianpeitto on alle 100 % ja koska kompressorin tuottamaa lämpöä ei tarvitse ottaa maasta. Kun rakennuksen energiankulutuksesta, lämmityksen tehoista, halutusta energiapeitosta, jäähdytystarpeesta ja maaperän laadusta on jonkinlainen käsitys, voidaan aloittaa energiakentän mitoitus. Yksittäisen kaivon tapauksessa taulukkoarvoihin perustuvan mitoituksen virhemarginaali on pienempi kuin useamman kaivon kaivokenttää mitoittaessa. Energiakaivokentän määrän ja syvyyden mitoitus kannattaa kuitenkin tehdä erikseen siihen tarkoitetulla mitoitus-/mallinnusohjelmalla, joita ovat esimerkiksi EED, GHLEPro tai IDA-ICE Boreholes. Yksittäisen reiän energiamäärän taulukkoarvon voidaan Etelä-Suomessa käyttää 100 kWh/m ja tehomitoituksessa max. 30 W/m. Luvut kertovat energiakaivosta kerättävästä energiasta ja tehosta. Energiakaivokenttien mitoitusprosessi on usein iteratiivinen missä lähtöarvojen rajoitusten takia kaivokentästä ei saada täsmälleen haluttua. Kaivokentän pienentämiseksi pitää joko pienentää lämpöpumpun energiapeittoa tai miettiä lisälämmönlähteitä kuten poistoilmaa tai esimerkiksi jäähdytyksen lisäämistä rakennukseen. Kun maapiiriä käytetään jäähdytykseen, jäähdytyskaudella voidaan ladata kaivokenttään energiaa. Myös lämpöpumpun vuosihyötysuhteella on vaikutusta, kuinka paljon energiasta otetaan energiakentästä. Lämpöpumpun parempi hyötysuhde tarkoittaa suurempaa kaivokenttää ja suurempaa investointia. Kaivokentän jäähtyminen mallinnetaan halutun ajanjakson ajalta. Tässä yleisesti käytetään 25:tä ja/tai 50:tä vuotta, koska näin pitkällä aikajaksolla kaivokentän lämpötila tasaantuu sellaiselle tasolle, josta voidaan tehdä päätelmiä sen kestävydestä. Mallinnus ottaa huomioon kallioperän lämmönsiirtoon vaikuttavat ominaisuudet, energiakaivojen välisen etäisyyden ja

niiden muodostaman konfiguraation, sekä kaivoista otettavan ja sinne ladattavan energian. Mallinnusohjelma osaa laskea tarvittavat etäisyydet, syvyydet ja konfiguraation, mutta näihin on hyvä asettaa reunaehtoina sellaiset asiat mitä halutaan. Lähtötietoina syötettävien tietojen jälkeen tarkasteltava muuttuja on lämmönkeruunesteen lämpötila keskimäärin ja huippu kuorman aikana. Myös ylimmällä lämpötilalla on merkitystä, jos halutaan käyttää passiivista maakylmää. (6; 14; 17.) Taulukossa 4 on esitetty lämmönkeruunesteen tavoitelämpötiloja mallinnukseen.

Taulukko 4. Lämmönkeruunesteen tavoitelämpötiloja.

Aika [vuotta]	Alin lämpötila keskimäärin [°C]	Alin lämpötila huippu [°C]	Ylin lämpötila keskimäärin [°C]	Ylin lämpötila huippu [°C]
25	0	-2	+12	+12
50	-1	-3	+12	+12

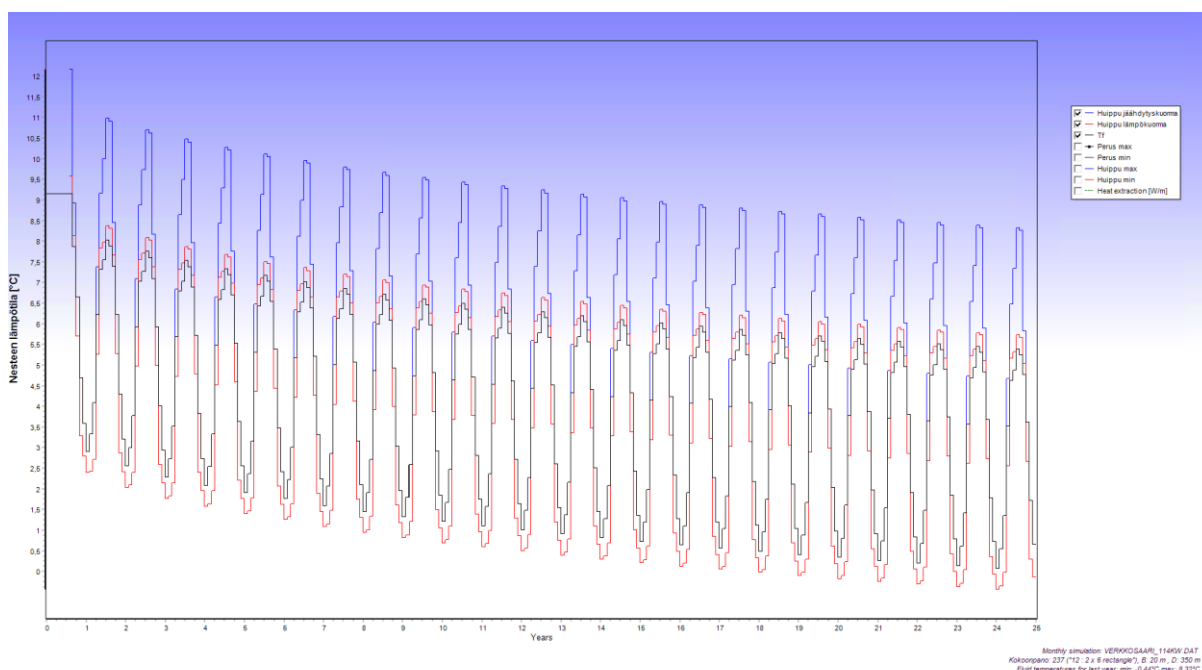
Energiakaivon porareikä porataan yleensä suoraan alaspäin, jolloin kaivojen lähtöpisteet ovat kauempana kuin 15 metrin päässä toisistaan. Vinoreikiä käytetään ahtaissa paikoissa silloin, kun kaivoja porataan lähemmäksi kuin 15 metrin päähän toisistaan ja kun halutaan pitää maatyöt mahdollisimman vähäisinä. (16.) Kuvassa 14 on esitetty esimerkki kahden vierekkäisen vinoreiän välistä kaltevuuskulmasta.



Kuva 14. Esimerkki kahden vierekkäisen vinoreiän välisestä kaltevuuskulmasta. (16.)

Tarvittava etäisyys määräytyy energiakentän mallinnuksessa, mutta yleisesti käytetään 20:tä metriä. Vinoreikien lähtöpisteet eivät kuitenkaan saa olla viittä metriä lähempänä toisiaan. Porattaessa energiakaivo 10 asteen kulmaan 200 metriä syvän reiän loppupää sijaitsee 35 metriä sivussa porauskohdasta. Yleensä porakalustoa voidaan kallistaa maksimissaan noin 10 astetta. Ahtaissa paikoissa joudutaan usein myös joustamaan kaivokentän konfiguraatiosta ja asettamaan kaivot epäsuotuisaan muodostelmaan, jolloin ne vaikuttavat toisiinsa "varastaen" toisiltaan energiaa. 4 x 5 -konfiguraatiolla kaivokenttä voi tarvita jopa 23 % enemmän aktiivisyvyyttä kuin 1 x 20 -konfiguraatiolla. (14.)

Kuvassa 15 on esitetty HASO Verkkosaaren kaivokentän simulointi EED-ohjelmalla. Kuvasta voidaan havaita, että kaivokentällä tuotetun keruunesteen keskimääräinen lämpötila huippulämpökuormalla on 25 vuoden jälkeen noin 0 °C:n luokkaa ja huippujäähdytyskuorman aikana alle 12°C.



Kuva 15. HASO Verkkosaaren kaivokentän simulointi.

Kentän sopivuus jäähdytyskäyttöön parantuu ajan kuluessa kentän keskimääräisen lämpötilan laskiessa. Keruunesteen keskimääräinen lämpötila 7 vuoden jälkeen on huippujäähdytystilanteessa 10 °C.

3.1.3 Muut asiat

Eräs tavallisimmista puutteellisesti ymmärretyistä lämpöpumpputekniikan osaluista on lämpötilojen merkitys lämpöpumpun toiminnalle. Peruslämpöpumpun tekniset ominaisuudet rajoittavat lämmitysverkkoon menevän veden maksimilämpötilan noin +60 °C:een. Tämä on 10...30 astetta vähemmän kuin vanhojen öljylämmitteisten taloyhtiöiden lämmityspatterit tarvitsisivat pitääkseen talon lämpimänä myös kovilla pakkasilla. Vanhoissa kohteissa joudutaankin usein vaihtamaan rakennuksen lämmityspatterit termostaattiventtiileineen suurempiin

maalämpösaneerauksen yhteydessä. Poistoilmalämpöpumppujen tapauksessa lämpötilatasot muodostuvat harvemmin ongelmaksi, sillä lämpöpumppua käytetään vain päälämmönlähteen, esimerkiksi kaukolämmön, tukena. Myös maalämpöjärjestelmiä tehdään hybridijärjestelminä, jolloin lämmitysveden lämpötilan noston yli 60 °C:een hoitaa lisäjärjestelmä kuten sähkökattila tai kaukolämpö. (14.)

Lämpöpumppujärjestelmät toimivat paremmalla hyötysuhteella alhaisemmalla lämmitysveden lämpötilalla, ja siksi rakennuksen lämmitysverkoston lämpötila tulisi saada mahdollisimman alhaiseksi. Lattialämmityksessä lämmitysverkoston lämpötila pystytään aina pitämään alhaisena, ja tämän vuoksi se soveltuu hyvin lämpöpumppujen kanssa käytettäväksi. Patterilämmityksen kanssa verkoston menolämpötilaan vaikuttaa patterien lämmönluovutus pinta-ala. Patterit sijoitetaan normaalisti ikkunoiden alle, jolloin ikkunoiden korkeus ja ikkunan alle jäävä tila rajoittavat patterien pinta-alaa. Usein tilan puutteen vuoksi joudutaan käyttämään paksuja kolmilehtisiä pattereita ja 60-asteista lämmitysvettä mitoituspisteessä, jolloin lämpöpumppujärjestelmän vuosihyötysuhde laskee verrattuna esimerkiksi lattialämmitykseen. (14.)

Lämpötilatasoilla on myös suuri merkitys lämpöpumpun energiaperusteeseen. Jos lämmitysverkoston mitoituspisteen lämpötilatasot ovat lämpöpumpun tuotannon lämpötiloja korkeammat, loppuu lämpöpumpun verkostoon tuottama teho jossain vaiheessa. Peruslämpöpumppujen lisäksi markkinoilla on ns. HT-lämpöpumppuja, missä HT tarkoittaa korkeaa lämpötilaa (High Temperature), ja ne pystyvät tuottamaan 80 °C:n lämpötiloja, mutta myös näissä pumpuissa hyötysuhde korkeilla lämpötiloilla on huonompi kuin alhaisimmilla lämpötilatasoilla. (14.)

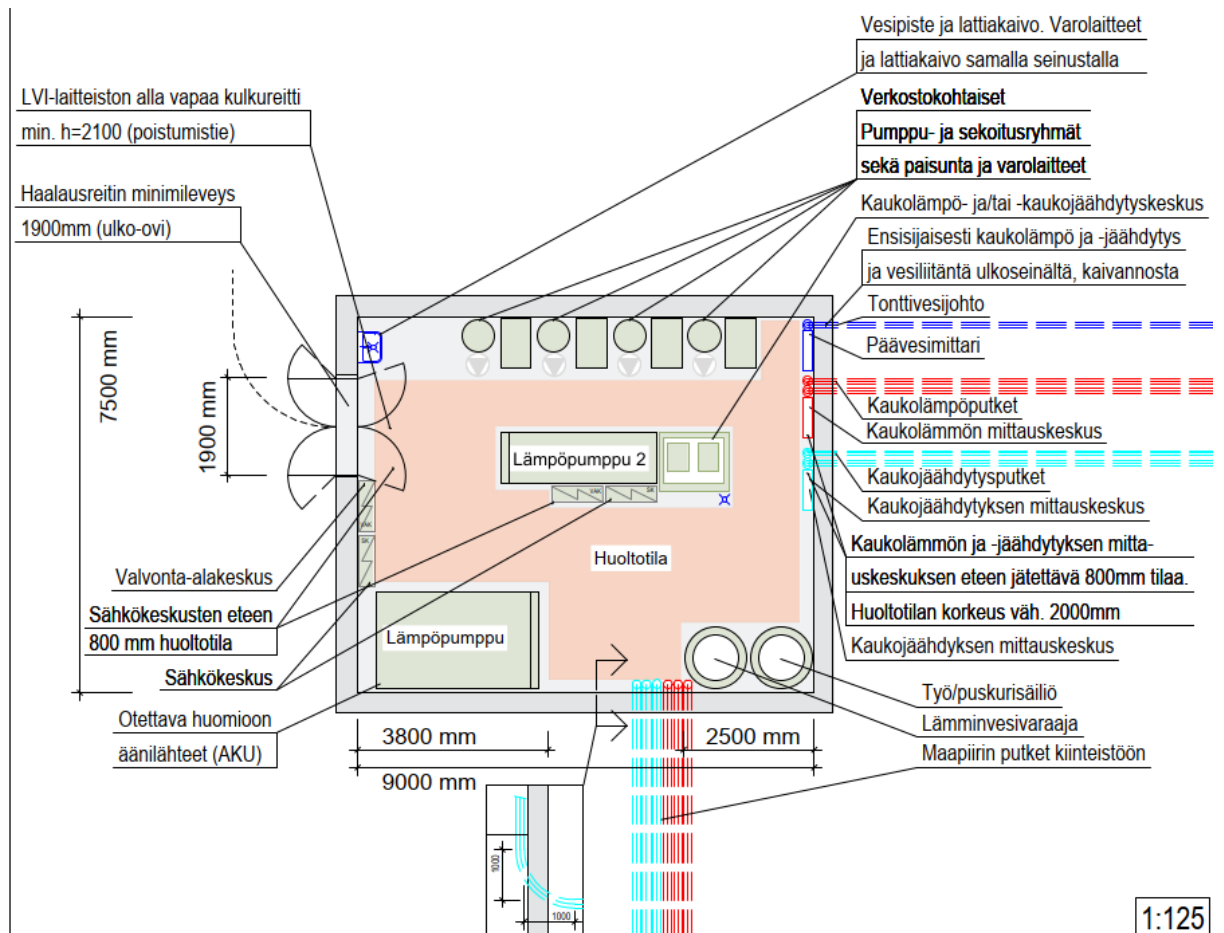
Perusparannuskohteissa asennustilojen sopivuus ja kuljetusreittien toimivuus tulee varmistaa etukäteen. Järjestelmää on usein hankala saada mahtumaan ilman joidenkin rakenteiden purkamista. Myös uudisrakennuskohteissa tilantarve tulee määrittää riittävän varhaisessa suunnitteluprosessin vaiheessa, jolloin ei välttämättä ole tiedossa tarkempia suunnittelun lähtötietoja.

Lämpöpumppuratkaisuissa, joissa on mukana lisälämpöjärjestelmä, on lämmönjakohuoneen tilantarve suurempi kuin yhden lämmönlähteen ratkaisuisa. Myös lämpöpumppujärjestelmien varaajat vievät tilaa enemmän kuin esimerkiksi kaukolämmössä, missä varaajia ei tarvita. (6.) Kuvassa 16 on esitetty lämmönjakohuoneiden vähimmäistilantarpeita eri kiinteistötyypeissä.

Rakennustyyppi	Vähimmäistilantarve, m ²	Huomiot
Pientalot	2 (integroitu varaaja)-	Jos maalämpölaitteiden kanssa samaan tilaan sijoitetaan esim. sähkökeskus, ilmanvaihtolaitteita, jäähdytysjärjestelmiä, lisälämmönlähteitä esim. kaukolämpökeskus tai muita laitteita, niille on varattava erikseen riittävästi tilaa.
Asuinkerrostalot	20 ...	
Toimistorakennukset	40 ...	

Kuva 16. Lämmönjakohuoneiden vähimmäistilantarpeita (6).

Kuvassa 17 on esitetty tilanvarausesimerkki suurelle hybridilämmitysjärjestelmälle yli 10 000 m²:n kokoisessa opetusrakennuksessa, jossa samaan tilaan on sijoitettu lämpöpumput, kaukolämmönsiirtimet, varaajat ja sähkökeskukset.



Kuva 17. Esimerkki suuren hybridijärjestelmän tilantarpeesta opetusrakennuksessa.

Lämpöpumppujen tarvitseman sähkön huipputehon merkitys usein unohtetaan. Lämpöpumppu kasvattaa aina kiinteistön sähkötehotarvetta, oli aiempaan lämmitysjärjestelmänä ollut sitten öljylämmitys tai kaukolämpö. Myös mahdollisen sähköisen lisälämmitysjärjestelmän kuten sähkökattilan tai varaajan sähkövastusten vaikutus pitää ottaa huomioon. Sähköliittymän koko tulee aina tarkastaa ja tarvittaessa suurentaa ennen urakan aloittamista. Liittymästä ja sähkötekni-
sistä muutoksista aiheutuvat kustannukset pitää huomioida myös lämpöpumpun kannattavuus- ja takaisinmaksuaikalaskelmissa. (14.)

3.2 LVI-tekniinen mitoitus

3.2.1 Varaajat

Lämmitys-, käyttövesi- ja jäähdytysverkostoihin voidaan asentaa puskuri-/työsäiliö, jolla varmistetaan sekä riittävä vesitilavuus että virtaama lämpöpumpun lauhduttimen/höyrystimen läpi. Lisäksi puskurisäiliö toimii lämpöpumpun käyntiä tasaavana tekijänä tasoittamalla lämmitystarpeen tehopiikkejä, vähentämällä käynnistyskertoja sekä pidentämällä yksittäistä käyntiaikaa. Pidemmät käyntijaksot kasvattavat lämpöpumpun käyttöikä. Riittävän suuri puskurivaraaja tasoittaa lämmityksen pysyvyyssäyrää ja parantaa siten lämpöpumpun energianpeittoastetta ja siten taloudellista kannattavuutta. Lämmitysverkoston puskurisäiliön tilavuus voidaan mitoittaa 40 litraa alinta tehoporrasta kohden. Nestetilavuuden riittävyys tarkistetaan valittavan laitteen mukaan. Puskurisäiliön mitoitukseen vaikuttavat mm. ilmanvaihdon lämmityksestä tai oviverhopuhaltimista aiheutuvat hetkelliset suuret lämmitystehon tarpeet. Puskurisäiliössä voi myös olla vastuksia, jolloin se toimii lisälämmönlähteenä. (14.)

Lämpöpumppujärjestelmissä käyttövesi lämmitetään varaajiin, jotta lämpöpumpun tehoa ei tarvitse kasvattaa kohtuuttoman suureksi. Tarvittava käyttövesivaraajien tilavuus voidaan arvioida joko siten, että asukasta kohden varataan noin 40–50 litraa varaajatilavuutta, tai siten, että koko rakennuksen lämpimän käyttöveden päivän tarpeesta 50 % pystytään syöttämään varaajaan. Käyttövesivaraajan tarvittava koko voidaan myös yrittää laskea tarkemmin, jos tiedetään yhtäaikainen suihkukäytön määrä tai vaihtoehtoisesti lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaama ja lämpöpumpun sekä käyttöveden sähkövastusten latausteho. Lämpimän käyttöveden huippuvirtaama lasketaan kaavalla 2. (14; 17.)

$$q_{LKV} = \text{määrä} * \text{virtaama} * \text{osuus} \quad (2)$$

q_{LKV} on lämpimän käyttöveden huippuvirtaama tai mitoitusvirtaama (dm^3/s)

määrä on suihkujen määrä (kpl)

virtaama on suihkun virtaama (dm^3/s)

osuus on lämpimän veden osuus suihkun virtaamasta (%).

Virtaama on yleensä 12 l/min eli 0,2 l/s. Lämpimän veden osuus suihkun vedestä määrittelee suihkun lämpötilan. Osuudella 54 % suihkuveden lämpötila on 37 °C ja osuudella 60 % suihkuveden lämpötila on 40 °C. Huippuvirtaaman jälkeen voidaan laskea lämpimän veden suora lämmitystarve kaavalla 3:

$$\phi_{LKV,suora} = q_{LKV} * \rho * c_p * (T_{LV} - T_{KV}) \quad (3)$$

$\phi_{LKV,suora}$ on lämpimän veden suora lämmitystarve (kW)

ρ on veden tiheys (kg/dm³)

c_p on veden ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)

T_{LV} on lämpimän veden lämpötila (°C)

T_{KV} on kylmän veden lämpötila (°C).

Veden tiheytenä voi käyttää 1 kg/dm³ ja ominaislämpökapasiteettina 4,2 kJ/kgK. Lämpimän veden lämpötila on yleensä 60 °C ja kylmän veden 10 °C. Lämpimän veden lisälämmityksen tehontarve lasketaan kaavalla 4:

$$\phi_{LKV,lisä} = \phi_{LKV,suora} - \phi_{LP} - \phi_{SV} \quad (4)$$

$\phi_{LKV,lisä}$ on lämpimän veden lisälämmityksen tarve (kW)

ϕ_{LP} on lämpöpumpun lauhduttimen lämmitysteho (kW)

ϕ_{SV} on sähkövastuksen lämmitysteho (kW).

Kun tiedetään lämpimän veden lisälämmityksen tehontarve, voidaan laskea sen tarvitsema energia kaavalla 5

$$Q_{LKV} = \phi_{LKV,lisä} * jakson\ pituus \quad (5)$$

Q_{LKV} on lämpimän veden energiatarve (kWh)

jakson pituus = suihkun käyttöjakson pituus (h).

Suihkun käyttöjakson vaihteluväli on 5–20 minuuttia ja arvioina voidaan käyttää 12:ta minuuttia, joka on 0,2 h. Tarvittava varaajan tilavuus voidaan lopulta laskea kaavalla 6.

$$\text{varaaja tilavuus} = \frac{Q_{LKV} \cdot 3600}{\rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{varaaja,max}} - T_{\text{varaaja,min}})} \quad (6)$$

varaaja tilavuus on varaajan laskennallinen tilavuus (m³)

T_{varaaja,max} on veden maksimilämpötila varaajassa (°C)

T_{varaaja,min} on veden minimilämpötila varaajassa (°C).

Veden maksimilämpötila on lämpöpumpun mukaan 60 °C ja siitä ylöspäin. Jos lämpöpumpussa on erillinen tulistuksenpoisto, voidaan varaajan maksilämpötilaa nostaa, jolloin tarvittava varaajakoko pienenee. Veden minimilämpötilana voidaan käyttää 35 °C, jolloin suihkusta tulee vielä haaleaa vettä käyttöjakson lopussa. Varaajan kooksi valitaan seuraava koko pyöristettynä ylöspäin. Jos lämmin käyttövesi tuotetaan varaajan sisällä olevilla kierukoilla, pitää varaajakapasiteetin mitoituksessa ottaa huomioon asteisuus- ja lämmönsiirtoerot, jolloin tarvittava varaajakoko kasvaa. Tässä laskennassa oletetaan, että suihkujen käyttö on saman aikaista, mutta käytännössä suihkujen käyttö ajoittuu pidemmälle ajanjaksolle. Varaajan tilavuus voidaan laskea myös tällä ajanjaksolla tarvittaman lämpimän veden määrän kautta, jolloin kaavan 6 Q_{LKV} arvioidaan toisella tavalla. Esimerkiksi vedenkulutusta voidaan arvioida asukas pohjaisesti olettamalla, että kulutus on 0,16 m³/asukas vettä 2 tunnin aikana.

Lämpimän käyttöveden kiertoveden lämmittämistä ei yleensä hoideta lämpöpumpulla, vaan varaajan sähkövastuksilla tai erillisellä tulistuslämmönsiirtimellä. Tämä johtuu lämpöpumpun kylmäainekierron rajoituksista. Koska lämpimän käyttöveden kierto on palatessaan noin 55 °C, lämpöpumpun lauhduttimen jälkeistä kylmäaineen lämpötilaa ei voida laskea tarvittavan alhaiselle tasolle, joka johtaa usein lämpöpumpun toiminnan häiriintymiseen ylipainesuojauksen takia. Kun lämpöpumpulla on muutakin lämmityskuormaa ei lauhduttimen ylipaine ole ongelma mutta jos lämmitetään pelkästään lämpimän käyttöveden kiertoa lauhduttimen jälkeinen paine, nousee liian suureksi.

Tarkemmalla tavalla laskiessa joudutaan tekemään paljon oletuksia suihkun käytön pituudesta, lämpötilataseista ja siitä, kuinka alhaiseksi veden lämpötilan voi antaa laskea, joten nyrkkisääntöihin perustuva mitoitus on suosittua. (14.)

3.2.2 Muut laitteet

Lämmönkeruuputkistona voidaan käyttää tavallista muovista vesijohtoputkea tai markkinoilla olevia erityisesti keruuputkistoksi tarkoitettuja tuotteita. Keruuputkiksi tarkoitettut tuotteet voivat olla sisäpinnaltaan rihlattuja. Sisäpinnan rihlaus parantaa keruunesteen sekoittumista etenkin alhaisilla virtausnopeuksilla. Maa-lämmön keruuputkistoille ei ole olemassa vaatimuksia, joita sen täytyisi täyttää esimerkiksi materiaalien tai paineluokan suhteen. Kaivokentän simulointiohjelmat antavat tulokseksi tarvittavan yhteenlasketun aktiivisyvyyden, kuinka monta kappaletta kaivoja tarvitaan ja mitkä ovat yksittäisten kaivojen syvyydet. Simulointiohjelmassa tulee valita lähtötiedoksi keruuputken koko. Lämmönkeräysputkien virtaus pyritään mitoittamaan turbulentsuuden rajalle. Virtauksen ominaisuutta kuvaa Reynoldsin luku, joka on dimensioton suure. Maapiirin keruuputkiston virtauksessa pyritään saavuttamaan Reynoldsin luku 2300–3000, kompromissina painehäviön minimoinnin ja lämmönsiirron maksimoinnin välillä. Täydellisen turbulentsuuden virtaus saavutetaan vasta yli 4000:n Reynoldsin luvulla. Yleisimmin käytössä olevat keruuputket ovat PE 40 x 2,4 mm, PE 45 x 2,6 mm ja PE 50 x 3,0 mm, jossa PE tulee sanasta polyeteeni ja ensimmäinen lukema on putken ulkohalkaisija ja toinen seinämäpaksuus. Mitä suurempi putken ulkohalkaisija, sitä paksumpi seinämä sillä on. Paksumpi seinämä lisää putken lämpövastusta, mutta suuremman pinta-alan takia lämmönsiirtopinta-ala on kuitenkin suurempi. (4; 8.) Taulukossa 5 on esitetty putkityypit ja niiden perinteisesti tavoitellut virtaamat yhdessä muiden teknistentietojen kanssa.

Taulukko 5. Putkityyppien ominaisuudet (4).

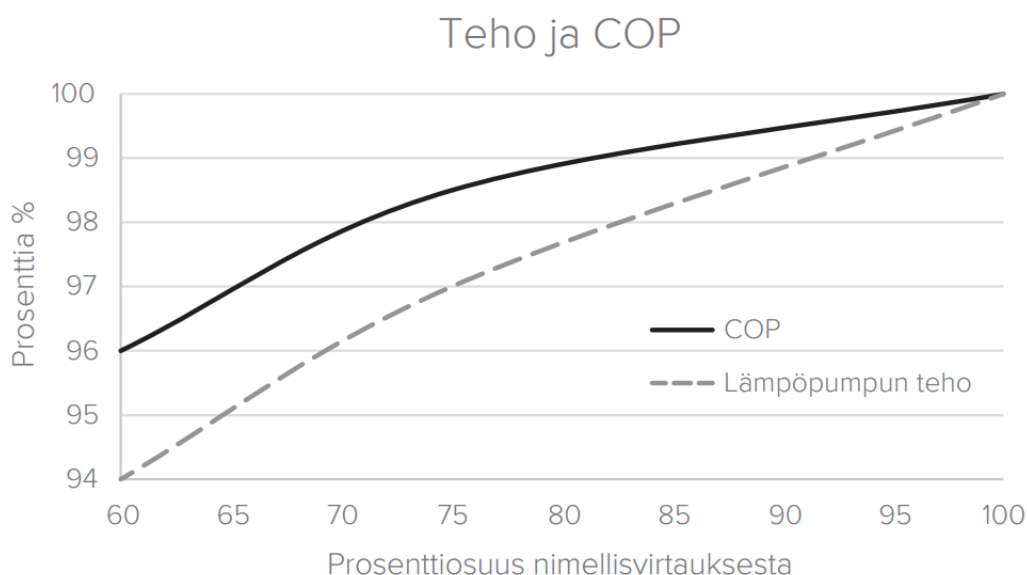
Laskentalämpötila		0 C		Liuos etanoli 28 p-%			
Kin.visk. Etanoli 28 p-%		6,50E-06 m ² /s					
Tiheys		970 kg/m ³					
<i>Putkityyppi</i>	<i>Virtaus l/s</i>	<i>Ds mm</i>	<i>As m²</i>	<i>Virt.nop. m/s</i>	<i>Re</i>	<i>Kitkak.</i>	<i>Painehäv. Pa/m</i>
PE 40 x 2,4 mm	0,45	35,2	0,00097	0,46	2504	0,039	114
PE 45 x 2,6 mm	0,55	39,8	0,00124	0,44	2707	0,041	98
PE 50 x 3,0 mm	0,70	44	0,00152	0,46	3116	0,044	102

Tavoitevirtaamissa on jonkin verran liikkumavaraa ja, kuten taulukosta 6 huomataan, tavoitevirtaamilla PE 40 ja 45 -putkilla Reynoldsin luku on alhaisempi kuin PE 50 -putkella. Kokemusperäisesti tiedetään, että välillä perinteiset tavoitevirtaamat eivät ole riittäneet. Koska toimitaan virtauksen suhteen alueella, jossa laminaarinen virtaus on muuttumassa turbulenttiseksi PE 40 ja 45 -putkilla olisikin hyvä nostaa virtaamaa perinteisistä tavoitevirtaamista, jotta saavutetaan varmemmin turbulenttinen alue. PE 40 -putkella virtaamalla 0,55 l/s ja PE 45 -putkella virtaamalla 0,6 l/s ollaan hieman yli 3000:n Reynoldsin luvussa mutta painehäviö kasvaa myös huomattavasti, mikä tulee ottaa huomioon kiertopumpun mitoituksessa. (4.)

Kaivon halkaisijan määrittelee pitkälti käytettävä porauskalusto, mutta koska kaivontäyttöaineena pääosin oleva vesi aiheuttaa vastusta lämmönsiirrolle, tulisi putkien ja kaivon seinämän väli olla mahdollisimman pieni. Tämän vuoksi halkaisijaltaan mahdollisimman pieni kaivo on lämmönsiirron kannalta paras. Yleisin kaivon halkaisija on tällä hetkellä 115 mm. Keruuputket sijoittuvat kaivoon sattumanvaraisesti. 40 mm:n kollektorilla on 115 mm:n kaivossa enemmän tilaa, joten lämpövastus vaihtelee melko paljon. Suuremmilla kollektoreilla tilaa on selvästi vähemmän, joten lämpövastus eri kaivoissa on hyvin lähellä toisiaan. (18.)

Myös lämpöpumpun nimellisvirtaamalla on vaikutusta kaivomäärään ja kollektorin kokoon. Jos nimellisvirtaama on esim. 3 l/s ja tarvittava kokonaiskaivosyvyys on 1200 m, niin 5 x 240 m kaivokombinaatiolla virtaama / kaivo on 0,6 l/s. PE 40

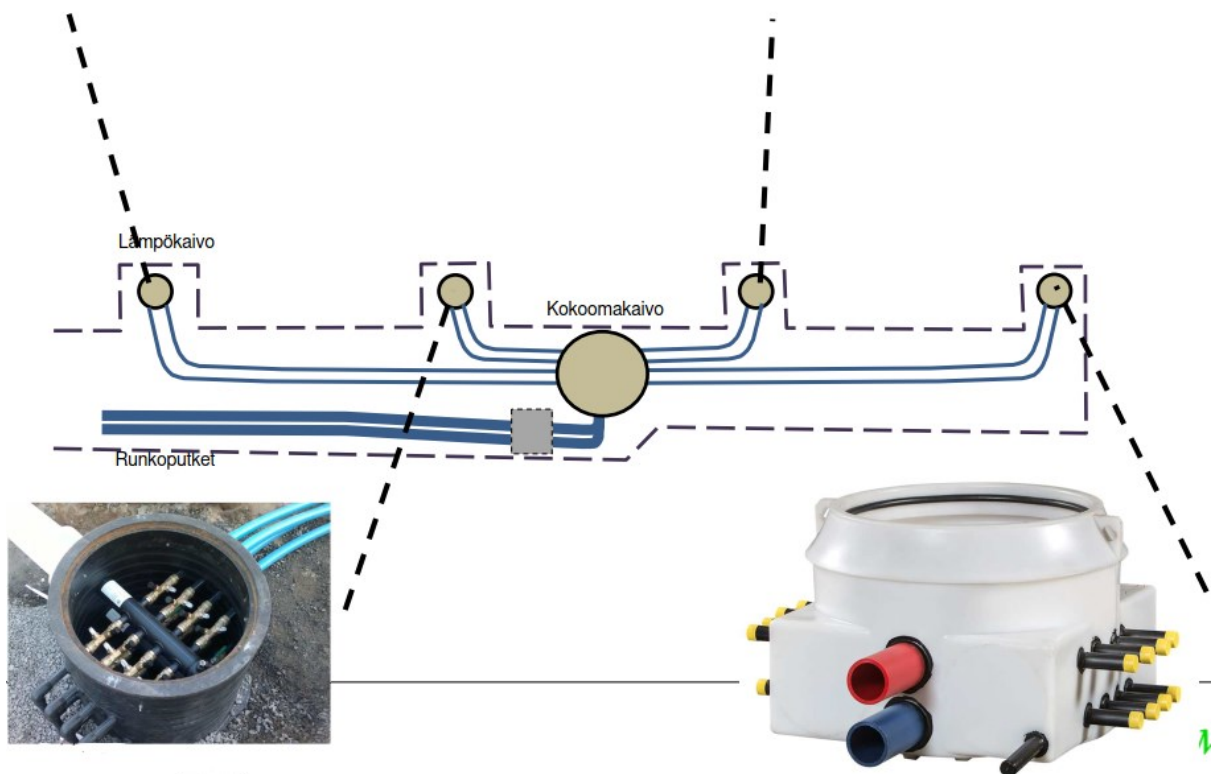
-putkityypillä tulee tässä tapauksessa liian suuret painehäviöt, jolloin tulee käyttää PE 45 -kolektoriputkea. 1200 m kokonaissyvyys voidaan jakaa myös 4 x 300 m kaivokombinaatioon, mutta tällöin kaivokohtainen virtaaman tulee olla tasolla 0,75 l/s, jolloin oikea kollektorin koko on PE 50. Virtauksen pienentäminen lämpöpumpun nimellisvirtaamasta kasvattaa energiakaivokenttään menevän ja palaavan nesteen lämpötilaeroa. Kun keruunesteen lämpötilaero kasvaa, lämpöpumpun höyrystymislämpötila laskee. Alempi höyrystymislämpötila vähentää lämpöpumpun tehoa ja pienentää hyötysuhdetta. Yli 4 asteen keruunesteen lämpötilaerolla hyötysuhde ja teho laskevat nopeammin kuin pienemmällä lämpötilaerolla. (18.) Kuvassa 18 on esitetty nimellisvirtaaman prosenttiosuuden ja tehon sekä hyötysuhteen riippuvuus.



Kuva 18. Nimellisvirtauksen suhde hyötysuhteeseen ja lämpöpumpun tehoon (18).

Energiakaivoilta maalämpöpumpulle tulevia putkia kutsutaan siirto- tai runkoputkiksi. Runkoputket voidaan mitoittaa, kun tiedetään kokoomakaivolta lämmönjako huoneeseen tuleva virtaama. Virtaus saadaan, kun lasketaan yhteen kokoomakaivoon yhdistettyjen energiakaivojen virtaamat. Lämmityspiirien virtaamat saadaan laskettua, kun tiedetään lämmitysverkostojen teho ja lämpötilatasot. Kun virtaamat ovat tiedossa, voidaan mitoittaa putkien koot. Energiakaivon

suojaksi asennetaan suojakaivo, jonka avulla itse energiakaivon pää- sekä energiakaivolta lähtevien siirtoputkien liitokset suojataan ulkoisilta vaikutuksilta. Energiakaivot voidaan kytkeä joko kokoomakaivoon tai jakotukkiin lämpöpumpun vieressä. Siirtoputket asennetaan loivaan kaltevuuskulmaan kohti kokoomakaivoa tai jakotukkia, niin että järjestelmässä oleva ilma kertyy ilmausyhteillä varustettuun kohtaan. Siirtoputkisto suositellaan eristettäväksi koko matkaltaan. Siirtoputkien eristämällä vähennetään energiahäviöitä sekä vältetään tarpeeton lämmönsiirto meno- ja paluuputkien välillä. Siirtoputkien materiaalina käytetään usein PE 100 SDR17 -putkia eli suuren tiheyden polyeteenimuoviputkia, missä PE100 on putken materiaali ja SDR kuvaa putken ulkohalkaisijan suhdetta seinämäpaksuuteen. PE100 SDR17 -putket ovat seinämäpaksuudeltaan ohuempia kuin vanhemman muovimateriaalin paineputket, minkä takia DN110 kokoisen PE100 SDR17 -putken virtauspinta-ala on 6,5 % suurempi kuin saman paineluokan ja DN-koon PE80 SDR13,6 -putkella. Virtauspinta-alan ollessa suurempi myös painehäviöt ovat pienemmät. Lämmönjakuhuoneen sisäpuolella käytetään perinteisesti hitsattavia teräsputkia sekä keruun että lämmityspiirien puolella. Siirtoputkien kaivannon syvyys vaihtelee sen mukaan, mitä toimintoja putkiston yläpuolelle tullaan sijoittamaan. Viheralueilla kaivuussyvyudeksi riittää 40 cm, mutta liikennealueilla tarvitaan vähintään 1 metri. (4.) Kuvassa 19 on esitetty esimerkki kaivoryhmänrakenteesta.



Kuva 19. Esimerkki kaivoryhmän rakenteesta (4).

Putkien mitoittamisessa pyritään yleensä mahdollisimman pieneen painehäviöön. Putken painehäviön laskenta aloitetaan laskemalla virtausnopeus putkessa kaavalla 7.

$$v = \frac{q_v}{A} \quad (7)$$

v on virtausnopeus (m/s)

q_v on tilavuusvirtaus putkessa (m³/s)

A on putken virtauspinta-ala (m²/s).

Tämän jälkeen lasketaan Reynoldsin luku kaavalla 8.

$$Re = \frac{v \cdot d_h}{\nu} \quad (8)$$

Re on Reynoldsin luku (-)

d_h on hydraulinen halkaisija (m)

ν on kinemaattinen viskositeetti (m^2/s).

Tämän jälkeen ratkaistaan kitkavastuskerroin λ käyttämällä esim. Excel goalseek toimintoa kaavasta 9.

$$0 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} + 2 * \lg \left[\frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k/d_h}{3,71} \right] \quad (9)$$

λ on kitkavastuskerroin (-)

k on karheus (m).

Lopuksi voidaan laskea painehäviö putkessa kaavalla 10.

$$\Delta p_\lambda = \lambda * \frac{l}{d_s} * \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (10)$$

l on putken pituus (m)

ρ on nesteen tiheys (kg/m^3).

Yleensä keruuputken, runkoputken ja lämmönjakohuoneen sisäpuolisen osuuden muodostaman kiertopiirin yhteenlasketun painehäviön halutaan olevan alle 100 kPa pienemmillä kentillä, mutta suuremmilla kentillä painehäviöksi sallitaan yli 100 kPa, koska suuremmilla pumpuilla integroidut kiertopumput pystyvät suurempaan nostokorkeuteen. Suuremmat painehäviöt nostavat myös keruunesteen pumppauksen sähkönkulutusta, mikä huonontaa lämpöpumpun vuosihyötysuhdetta. Tämän takia runkoputken kooksi kannattaa valita sellainen putkikoko, jolla on alle 100 Pa/m painehäviötä. (4.)

Lämmitysverkoston säätöventtiili voidaan mitoittaa, kun tiedetään säädettävän piirin painehäviö ja virtaama. Keruupiiriin ei tule säätöventtiiliä. Säätöventtiilin mitoittava k_v -arvo lasketaan kaavalla 11

$$k_v = \frac{3,6 * q_{100}}{\sqrt{\Delta p_{100}/100}} \quad (11)$$

k_v on venttiilin mitoittava k_v -arvo (-)

q_{100} on mitoittava vesivirtaama (m^3/h)

Δp_{100} on painehäviö säädettävässä verkoston osassa (bar).

Venttiilejä on saatavissa k_{vs} -arvoilla 0,25 / 0,4 / 0,63 / 1 / 1,6 / 2,5 / 4 / 6,3 / 10 / 16 / 25 / 40, ja näistä valitaan lähimpänä laskennallista k_v -arvoa oleva venttiili.

Valitun venttiilin aiheuttama todellinen painehäviö lasketaan kaavalla 12.

$$\Delta p_{sv} = \left(\frac{q_{100} * 3,6}{k_{vs}} \right)^2 \quad (12)$$

Δp_{sv} on valitun venttiilin aiheuttama todellinen painehäviö (bar)

k_{vs} on valitun venttiilin k_v -arvo (-).

Lopuksi tarkistetaan, että valitulla venttiilillä on riittävän suuri vaikutusaste eli auktoriteetti kaavalla 13.

$$\beta = \frac{\Delta p_{sv}}{\Delta p_{sv} + \Delta p_{100}} \quad (13)$$

Säätöventtiilin karan iskupituuden ja sen säätämän tilavuusvirran välinen suhde voi olla joko lineaarinen tai logaritminen. Mahdollisimman tasaisen säädön takaamiseksi lineaarisen ominaiskäyrän venttiilin vaikutusaste tulisi olla yli 0,5 ja logaritmisen ominaiskäyrän venttiilin noin 0,2. Käyttöveden lämmityksessä virtaamamuutokset ovat erittäin nopeita ja huippuvirtaaman käyttöaika suhteellisen lyhyt, joten valittavan säätöventtiilin vaikutusasteen on oltava mahdollisimman suuri. (19.)

Putkistojen ja säätöventtiilien mitoittamisen jälkeen on tiedossa virtaama sekä painehäviöt, minkä jälkeen voidaan mitoittaa keruu- ja lämmityspiirien kiertopumppujen sähkötehot. Yleisesti keruupiirissä käytetään lämpöpumpun integroitua kiertovesipumppua mutta joskus tarvitaan sarjaan kytkettävä avustava

kiertovesipumppu, ns. piiskapumppu, jos keruupiirin painehäviö kasvaa liian suureksi integroidun kiertovesipumpun nostokorkeuteen nähden. Lämmitysverkostoihin tulee lähes aina omat kiertopumput. Pumpun tarvitsema sähköteho lasketaan kaavalla 14.

$$P_o = \frac{\Delta p \cdot q_v}{\eta} \quad (14)$$

P_o on pumpun sähköverkosta ottama teho (kW)

Δp on kokonaispaineen tuotto (kPa)

q_v on tilavuusvirta (m^3/s)

η on pumpun kokonaishyötysuhde (-).

Pumpun kokonaishyötysuhteelle voidaan käyttää arviota 0,5. Pumppujen valinnassa käytetään valmistajan ohjelmia, joilla saadaan valittua pumpun tyyppi.

4 Esimerkkikohde

Esimerkkikohteena käytetään Helsingin Asumisoikeus Oy:n (HASO) Verkkosaaren uudisrakennuskohdetta, jonka lämmitystavaksi tuli maalämpö ja jonka suunnittelusta Sweco Finland Oy vastasi. Tässä luvussa käydään läpi HASO Verkkosaaren toteutuneen järjestelmän eri osa-alueita.

HASO Verkkosaaren järjestelmän mitoituksen lähtötietoina käytettävät energiankulutukset simuloitiin IDA-ICE ohjelmalla. Simulointimalli oli enemmän todellisuutta vastaava tavoite-energiamalli. Rakennuksen lämmitystarve on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. HASO Verkkosaaren lämmitystarve.

Kuukausi	Energian tarve (MWh)	Huipputeho (kW)	Huipputehon käyttöaika (h)	LKV:n energiantarve (MWh)
tammikuu	61	174	7	26
helmikuu	54	162	7	24
maaliskuu	41	147	5	26
huhtikuu	13	67	4	25
toukokuu	0	4	3	26
kesäkuu	0	3	2	25
heinäkuu	0	0	4	26
elokuu	0	1	3	26
syyskuu	1	14	3	25
lokakuu	16	71	5	26
marraskuu	41	158	6	25
joulukuu	53	151	6	25
Yhteensä	280	174		308

HASO Verkkosaassa hyödynnetään vapaajäähdytystä maapiiristä ilmanvaihdon jäähdyttämiseen, joka samalla lataa energiakenttää. Simuloitu jäähdytystarve on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. HASO Verkkosaari jäähdytystarve.

Kuukausi	Energian tarve (MWh)	Huipputeho (kW)	Huipputehon käyttöaika (h):
tammikuu	0	0	24
helmikuu	0	0	24
maaliskuu	0	0	24
huhtikuu	0	3	1
toukokuu	1	24	6
kesäkuu	2	40	5
heinäkuu	6	59	4
elokuu	4	51	9
syyskuu	0	9	2
lokakuu	0	0	24
marraskuu	0	0	24
joulukuu	0	0	24
Yhteensä	13	59	

Lämpöpumpun tehoksi on valittu 114 kW, joka on lämmitystehon peiton osalta 52 % ja lämmitysenergian peiton osalta 87 %. Jos katsotaan pelkästään ilmanvaihdon- ja tilalämmitystä, tehonpeitto on noin 60 %. Energianpeittoasteen laskennassa on huomioitu kytkentätavan rajoitteet lämpimän käyttöveden lämmityksen osalta. Loppu lämmitys tuotetaan 180 kW sähkökattilalla.

Varaajia kohteessa on 2 kappaletta. Toinen varaaja on 4 m³:n käyttövesivaraaja ja toinen varaaja 2 m³ lämmityksen puskurivaraaja. Päivittäinen simuloitu lämpimän käyttöveden lämmitystarve on 843 kWh, josta 75 % on käyttöveden lämmitystä ja 25 % kierron häviöitä. Käyttövesivaraajaan pystytään varaamaan 232 kWh energiaa, joka on 28 % päivän tarpeesta. Käyttövesivaraajan koko asukasta kohden on 22 litraa. Maalämpöpumpusta voidaan hyödyntää tulistuslämpöä, jolloin varaajan lämpötila pystytään pitämään kuumempänä kuin normaalisti ja tämän takia varaajan koko voidaan pitää suhteessa pienempänä. Puskurivaraajan koko on 142 litraa/kW alinta tehoporasta kohden.

Energiakenttä koostuu 12 energiakaivosta, jotka ovat 350 m syviä. Tämä on yhteensä 4200 m aktiivisyvyyttä. Maalämpöpumpun energiakentälle aiheuttama rasitus on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. HASO Verkkosaari maalämpökentän raskuus.

MAALÄMPÖKENTÄN RASITUS ^	Kerätty lämpö MWh	Kerätty lämpö kW	Syötetty lämpö MWh	Syötetty lämpö kW
tammikuu	52	86	-	-
helmikuu	44	86	-	-
maaliskuu	42	85	-	-
huhtikuu	21	62	0	1
toukokuu	14	49	1	33
kesäkuu	14	48	2	57
heinäkuu	14	47	7	58
elokuu	14	47	6	81
syyskuu	14	52	0	11
lokakuu	23	64	-	-
marraskuu	39	85	-	-
joulukuu	49	86	-	-
Yhteensä	341	-	16	-
Maksimi	-	86	-	81

* Taulukon arvot ovat suoria maalämpökentästä kerättäviä ja sinne syötettäviä lämpömääriä ja -tehoja. Kerätty lämpö ei sisällä kompressorisähköä. Syötetty lämpö sisältää kompressorisähkön, jos jäähdytys on määritetty lämpöpumpulla aktiivijäähdytykseksi. Jos käytät näitä arvoja EED-ohjelmassa, valitse "suora"-painike sekä lämmitykselle että jäähdytykselle.

Taulukossa 9 on esitetty maalämpökentän ominaislukuja. Ominaislämmönkeruu kertoo maalämpökentästä kerättävän energian ja tehon suhteesta kokonaiskaivosyvyyteen ja ominaislämmöntuotto kertoo lämpöpumpun tuotannon energian ja tehon suhteesta kokonaiskaivosyvyyteen. Ominaislämmöntuotto on aina suurempi koska siinä on mukana lämpöpumpun kompressorin sähköteho. Ominaislämmönsyöttö kertoo kohteen ilmanvaihdon jäähdytyksen energiankulutuksen ja tehon suhteesta kokonaiskaivosyvyyteen.

Taulukko 9. HASO Verkkosaari maalämpökentän ominaislukuja.

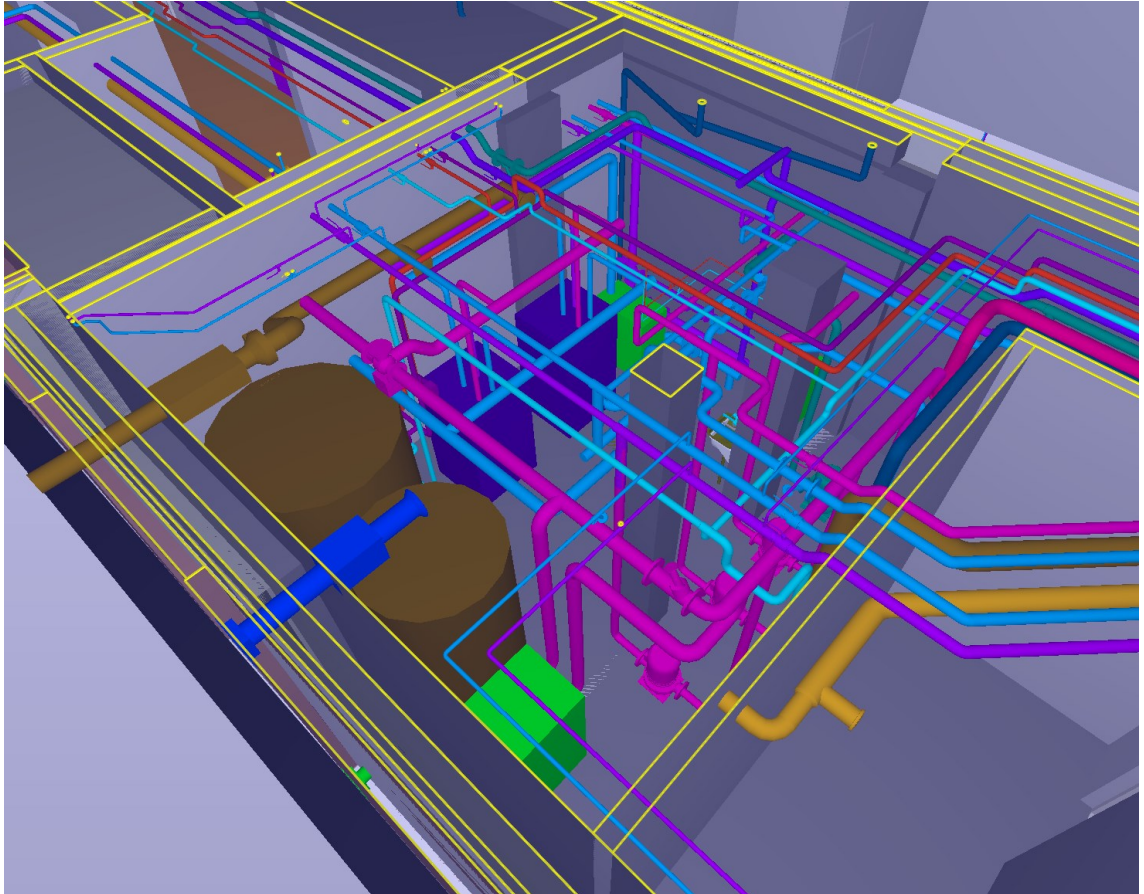
	kWh/m	W/m
Ominaislämmönkeruu	81	21
Ominaislämmöntuotto	115	27
Ominaislämmönsyöttö	4	19

Lämmitykseen verrattuna jäähdytyksen tehon ja energian ominaisluvut ovat vahvasti tehopainotteisia. Tämän takia, jos maalämpöjärjestelmää mitoitetaan jäähdytyksen mukaan, tulee jäähdytyksen tehontarpeesta usein mitoittava tekijä energiakaivomäärän kasvattamiseen.

Keruuputket ovat PE40 -putkia ja kaivokohtainen virtaama on mitoitettu 0,55 dm³/s. Kaivokentässä on kaksi kokoomakaivoa, joiden virtaama on 3,3 dm³/s/kaivo ja niiltä lämmönjakohuoneeseen menevät putket ovat PE90 -putkia. Lämmönjakohuoneessa kokoomakaivoilta tulevat putket yhdistyvät ja jatkavat DN100 -teräsputkina.

Kohteessa on kolme lämmitysverkostoa, lämpimän käyttöveden lämmitys ja ilmanvaihdon jäähdytysverkosto. Lämmitysverkostojen lämpötilatasot ovat: radi-aattoriverkosto 45°C/30°C, IV-lämmitys 45°C/25°C ja lattialämmitys 30°C/27°C. Lämpimän käyttöveden lämmitys on mitoitettu 58...60°C:een. Ilmanvaihdon jäähdytysverkoston lämpötilatasot ovat 12°C/18°C. Putkikoot lämmönjakohuoneessa ovat lämmityspuolella pääosin DN100 -teräsputkea ennen haaroittamista yksittäisille verkostoille. Jäähdytyspuolella putkikoko on pääosin DN80 -teräsputkea.

Kohteen lämmönjakohuone on 39,5 m²:n kokoinen. Alla olevassa kuvassa 20 on esitetty lämmönjakohuone tietomallista otettuna.



Kuva 20. HASO Verkkosaari lämmönjakohuone.

Järjestelmässä on kolme 3-tieventtiiliä, jotka säätävät vapaajäähdytystä, käyttövettä ja lattialämmitystä sekä lämmitysverkoston vaihtventtiili, joka määrää tuotetaanko lämmitystä vai lämmintä käyttövettä. 3-tieventtiilien mitoituksen on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. HASO Verkkosaari 3-tieventtiilit.

3-TIEVENTTIILIT		Vapaajäähdytys	Käyttövesi	Lattialämmitys
Tunnus		LJLP01 FV80	LV01 FV40	LL01 FV40
Valmistaja				
Malli				
Virtaus	dm ³ /s	6,50	2,30	2,04
Painehäviö	kPa	14	27	21
Koko / Kvs-arvo	DN / kPa	65 / 63	40 / 16	40 / 16

Järjestelmässä on yhteensä kuusi kiertopumppua, jotka palvelevat IV-viilennystä, maapiirin korotusta, lämmityslatausta, käyttöveden kiertoa, sähkökattilan kiehunneestoa ja patterilämmitystä. Pumppujen mitoitukset on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. HASO Verkkosaari kiertopumput.

KIERONESTEPUMPUT		IV-viilennys	Maapiirin korotus	Lämmityslataus	Käyttöveden kierto	SK: kiehunneestoa	Patterilämmitys
Tunnus		JIV01 PU50	LJLP01 PU80	LLP01 PU40	LVK01 PU40	LLP01 PU41	L01 PU40
Valmistaja		Grundfos	Grundfos	Grundfos	Grundfos	Grundfos	Grundfos
Malli		MAGNA3 50-180 F	MAGNA3 65-150 F	MAGNA3 40-150 F	MAGNA3 25-80 F	ALPHA2 32-80	MAGNA3 40-150 F
Virtaus	dm ³ /s	4	6,5	5,72	0,9	0,8	3,36
Nostokorkeus	kPa	96	125	60	60	20	90
Moottorin ottama teho	kW	0,8	1,3	0,7	0,2	0,1	0,7
Virtalaji	V / A	230 / 3,45	230 / 6,18	230 / 2,80	230 / 1,02	230 / 0,50	230 / 2,80

5 Yhteenveto

Insinööriyön tavoite oli toimia koosteena lämpöpumppujen toiminasta ja taustoitaa Sweco Finland Oy:n mitoitustyökalun kehittämistyötä. Insinööriyötä ei voida käyttää suoraan mitoitustyökalun kehittämiseen, vaan aiheesta on tarpeen tehdä yksityiskohtaisempi selvitys. Taustamateriaalina kehitystyölle insinööriyö saavuttaa tavoitteensa.

Insinööriyötä tehdessä tuli esille, että lämpöpumppujärjestelmien mitoitus on peruseriaatteiltaan erilaista kuin kaukolämpöjärjestelmien mitoitus. Kaukolämpöjärjestelmien mitoituksessa voidaan käyttää karkeita nyrkkisääntöjä mitoituspisteen perusteella, kun taas lämpöpumppujärjestelmien mitoitus perustuu energiankulutukseen. Energiankulutuksen perusteella mitoittaminen tuo kuitenkin lisähaasteita mitoitusprosessiin, sillä lämpöpumppujärjestelmän mitoittajalla täytyy olla tarkka käsitys siitä, miten mitoitettavan kohteen energiankulutus on mallinnettu.

Mallinnukseen perustuvat energiankulutukset ovat yleensä pienempiä kuin mitatut kulutukset, vaikka kyseessä olisi tavoite-energiamalli. Tämä johtuu siitä, että mallinnuksessa käytettyihin oletuksiin ja arvioihin liittyy usein epävarmuutta. Lisäksi järjestelmän käyttö ja käyttöolosuhteet voivat poiketa suunnittelun lähtökohdista. Tämä voi johtaa siihen, että suunniteltu järjestelmä ei toimi tehokkaasti tai taloudellisesti.

Nykyään suunnitteluprosessi on pirstaloitunut pieniin osiin, ja jokainen suunnittelija odottaa saavansa kaikki tarvittavat tiedot lähtötietoina. Tämä voi kuitenkin olla ongelma, sillä eri osapuolilla on erilaisia näkemyksiä ja tulkintoja siitä, mitä tiedot sisältävät. Suunnitteluprosessin tulisi olla enemmän yhteistyötä, jotta kaikki osapuolet ymmärtävät toistensa tarpeita ja tavoitteita. Tämä auttaisi varmistamaan, että suunniteltu järjestelmä toimii mahdollisimman tehokkaasti ja taloudellisesti ja että se täyttää asiakkaan tarpeen.

Lähteet

- 1 Lämpöpumppujen myynti. 2023. Verkkoaineisto. Suomen lämpöpumppuyhdistys Sulpu Ry. <<https://www.sulpu.fi/lampopumppuja-myyntiin-viimevuonna-lahes-200-000-kappaletta-kasvu-50/>>. Luettu 1.3.2023.
- 2 Lämpöä omasta maasta. 2012. Verkkoaineisto. Motiva Oy ja Suomen lämpöpumppuyhdistys Sulpu Ry. <https://www.sulpu.fi/wp-content/uploads/2021/05/Motiva-Lampoa_omasta_maasta-1.pdf>. Luettu 1.3.2023.
- 3 Lämpöpumpun asennus- ja käyttöohje. 2019. Verkkoaineisto. Oilon Oy. <https://oilon.com/wp-content/uploads/2020/03/Oilon_kiinteist%C3%B6l%C3%A4mp%C3%B6pumppujen_asennus_ja_k%C3%A4ytt%C3%B6hje_kaikki_mallit_FI.pdf>. Luettu 20.3.2023.
- 4 Valkeapää, Aki. 2022. Lämpöpumput ja lämpöpumppulaitokset. Opintomateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 5 Kaappola, Esko. 2019. Kylmälaitoksen suunnittelu. 4., uudistettu painos. Tampere: PunaMusta Oy.
- 6 Laasonen, Niina; Penttinen, Mika; Heinilä Maritta; Hilpinen, Joni; Ruuskanen, Henri; Mattila, Ville; Raninen, Mikko; Ojala, Tarja; Miettinen, Eija 2019. Maankäytön suunnittelu ja maalämpö. Kaupunkiympäristön aiheistoja 2020:1. Verkkoaineisto. Sweco Talotekniikka Oy ja Sweco Ympäristö Oy. <https://www.hel.fi/hel2/ksv/liitteet/2020_kaava/5066_9_Maalamposelvitys_Sweco_2019.pdf>. Luettu 13.3.2023.
- 7 Lämpöpumppujen periaatekaaviot. 2022. Yrityksen sisäinen aineisto. Sweco Finland Oy.
- 8 Banks, David. 2012. An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling. E-kirja. New York: John Wiley & Sons.
- 9 Erään kohteen toteutuneet COP mittaukset. 2023. Yrityksen sisäinen aineisto. Sweco Finland Oy.
- 10 COP ja antotehotaulukoita. 2022. Yrityksen sisäinen aineisto. Sweco Finland Oy.
- 11 RIL 265-2014 Uusiutuvien lähienergioiden käyttö rakennuksissa. 2014 Suomen Rakennusinsinöörien liitto. Tampere: Tammerprint.

- 12 Poistoilmalämpöpumput Kiinteistöjärjestelmät. 2021. RT 103316. Rakennustieto.
- 13 Kianta, Jani. 2017. Yksi lämpöpumppu, kiitos. Verkkoaineisto. Talotekniikkalehti. <<https://talotekniikka-lehti.fi/yksi-lampopumppu-kiitos/>>. Luettu 24.3.2023.
- 14 Maalämpöpumput Kiinteistöjärjestelmät. 2018. LVI 11-10624. Rakennustieto.
- 15 Ruusala, Annu & Vinha, Juha. 2017. Koulujen ja päiväkotien lasketut ja toteutuneet energiankulutukset. Verkkoaineisto. Tampereen teknillinen yliopisto <<https://research.tuni.fi/uploads/2019/02/3646594c-ruusala-etvinha-2017-koulujen-ja-paivakotien-laskettu-ja-toteutunut-rakennusfysiikka-2017.pdf>>. Luettu 18.4.2023.
- 16 Ympäristöopas 2013 Energiakaivo. 2013. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Luettu 15.3.2023.
- 17 Mattila, Ville. 2023. Projektipäällikkö. Sweco Finland Oy, Helsinki. Haastattelu 18.3.2023.
- 18 Turbocollector tuote-esite. 2023. Verkkoaineisto. Ab MuoviTech Finland Oy. <https://www.muovitech.com/productdocs/FI_TC45.pdf>. Luettu 20.4.2023.
- 19 Lämmitysverkoston säätöventtiilien mitoitus. 1989. LVI 12-10126. Rakennustieto.