

Aki Peltola

Sairaalarakennuksen maalämpöpumppujärjestelmän valinta

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Talotekniikan koulutusohjelma
Opinnäytetyö
12.5.2011

Tekijä Otsikko	Aki Peltola Sairaalarakennuksen maalämpöpumppujärjestelmän valinta
Sivumäärä Aika	50 sivua + 4 liitettä 12.5.2011
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	talotekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	LVI-tuotantopainotteinen suuntautumisvaihtoehto
Ohjaajat	toimitusjohtaja Jukka Hyttinen DI Johannes Helander yliopettaja Jukka Yrjölä
<p>Insinööriytyön aiheena on sairaalarakennuksen maalämpöpumppujärjestelmän valinta. Työn tarkoituksena oli tutkia kolmea eri kytkentätavoilla toteutettua maalämpöpumppujärjestelmää, ja valita kustannusvertailussa 25 vuoden aikajänteellä halvimmaksi osoittautunut vaihtoehto.</p> <p>Työn pohjana käytettiin sairaalan valmiiksi simuloituja tuntikohtaisia tehontarpeita ja energiankulutustietoja rakennusvaiheesta 1. Simuloinnissa on käytetty mallivuoden 1979 tunnittaisia säätietoja ja simulointiohjelmana IDA Indoor Climate and Energy (IDA-ice) –ohjelmistoa. Porakenttien tiedot saatiin porakenttämitoitusohjelmasta nimeltään Earth Energy Designer (EED).</p> <p>Järjestelmien energiakäyttäytymistä tutkittiin tässä työssä kehitetyn excel-laskentataulukon avulla. Laskentataulukon avulla pystyttiin määrittelemään jokaisen järjestelmän energiajakaumat kuukausittain. Näin saatiin selville esimerkiksi kaukolämmön ja lämpöpumpun osuudet vuotuisesta kokonaisenergiantuotosta.</p> <p>Käyttökustannusvertailussa erot olivat varsin pieniä. Investointikustannuksissa järjestelmät A ja C olivat samanarvoisia. B-järjestelmä oli selvästi kallein investointikustannuksiltaan. Työn lopputuloksena päädyttiin suositteluun kytkentävaihtoehtoa A sen ollessa kokonaisuudessaan halvin ratkaisu kustannusvertailussa.</p>	
Avainsanat	maalämpöpumppu, porakaivo, lämpökerroin

Author Title	Aki Peltola Selection of geothermal heat pump system to hospital
Number of Pages Date	50 pages + 4 appendices 12 May 2011
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation	HVAC Engineering, Production Orientation
Instructors	Jukka Hyttinen, Managing Director Johannes Helander, Master of Science Jukka Yrjölä, Principal Lecturer
<p>The subject of the final year project was to select a geothermal heat pump system to a hospital. The purpose was to study three geothermal heat pump systems (A, B, and C) each executed with a different set of connections, and choose the cheapest option after a cost comparison with a time span of 25 years.</p> <p>The project was based on pre-simulated hourly consumption of power and energy of the hospitals phase one. The simulation was done with the hourly weatherdata of the model year 1979 and the simulationprogramme IDA Indoor Climate and Energy (IDA-ice). The data about the boreholefields were taken from the design programme for boreholefields called Earth Energy Designer (EED).</p> <p>The energy behaviour of the three systems was studied with an Excel spreadsheet developed during this project. The energy distribution of each system was determined with the spreadsheet. This way it was established how much of the total annual energy was produced by district heating and how much by a heat pump.</p> <p>The differences found when comparing the operating costs were quite small. Systems A and C were equal in investment costs and system B was clearly the most expensive one. As the result, it was recommended that the option A should be chosen for the hospital, because it had the lowest total costs.</p>	
Keywords	geothermal heat pump, borehole, coefficient of performance

Sisälllys

1 Johdanto	1
2 Maalämpöpumppu Suomessa	2
3 Maalämpöpumpputekniikka	2
3.1 Maalämpöpumpun toimintaperiaate	2
3.2 Lämpökerroin	3
3.3 Lämpöpumppumitoituksesta	4
3.4 Porakaivomitoituksesta	5
4 Porakaivo lämmönlähteenä	6
5 Espoon sairaalan ensimmäinen rakennusvaihe	9
6 Vertailtavat järjestelmät	11
6.1 Järjestelmän A toimintakuvaus.....	11
6.2 Järjestelmän B toimintakuvaus.....	15
6.3 Järjestelmän C toimintakuvaus.....	18
7 Järjestelmien energiakäyttötymisen tarkastelu	22
7.1 Tuntikohtaisten lämpökertoimen määrittäys	22
7.1.1 Lämmitysverkoston lämpötilojen määrittäys	27
7.1.2 Höyrystimeltä lähtevän liuoksen lämpötilan määrittäys järjestelmässä A ja B....	28
7.1.2.1 Lämpöpumppukäytössä	29
7.1.2.2 Vedenjäähdytinkäytössä	32
7.1.3 Höyrystimeltä lähtevän liuoksen lämpötilan määrittäys järjestelmässä C.....	33
7.1.3.1 Lämpöpumppukäytössä	33
7.1.3.2 Vedenjäähdytinkäytössä	37
7.2 Lämpöpumpulla tuotetun lämmitystehon määrittäys	37
7.3 Järjestelmän A energiajakaumat.....	38
7.4 Järjestelmän B energiajakaumat	41
7.5 Järjestelmän C energiajakaumat	44
8 Järjestelmien kustannusvertailu	47
9 Suositeltava järjestelmä	48
10 Yhteenveto	48
Lähteet	50
Liitteet	

Liite 1: Espoon sairaalan rakennusvaiheistus

Liite 2: Ote järjestelmän A excel-tilukosta

Liite 3: Ote järjestelmän B excel-tilukosta

Liite 4: Ote järjestelmän C excel-tilukosta

1 Johdanto

Uusiutuvien energialähteiden ja ilmaisenergioiden käyttöastetta rakennuksien lämmityksessä ja jäähdytyksessä pyritään lisäämään jatkuvasti. Maailmanlaajuisesti suosiota kasvattava maalämpö on tähän yksi vaihtoehto.

Espoo, useimpien suurimpien suomalaisten kaupunkien tavoin, allekirjoitti sopimuksen energiansäästön tehostamiseksi kauppa- ja teollisuusministeriön kanssa 4.12.2007. Sopimuksen taustalla on vuonna 2006 voimaan tullut energiapalveludirektiivi, joka antaa Suomelle yhdeksän prosentin energiansäästöavoitteen vuosille 2008–2016. (5.)

Tässä selvityksessä tarkasteltavana kohteena toimii Espoon Puolarmetsään rakennettavan uuden sairaalan ja seniorikeskuksen ensimmäinen rakennusvaihe. Kohteessa on tarkoitus tuottaa uusiutuvilla energioilla 1/4 kokonaisenergiantarpeesta. Työn pohjana käytetään sairaalan valmiiksi simuloituja tuntikohtaisia tehontarpeita ja energiankultustietoja rakennusvaiheesta 1. Simuloinnissa on käytetty mallivuoden 1979 säätietoja ja simulointiohjelmana IDA Indoor Climate and Energy (IDA-ice) -ohjelmistoa. Kohteen esisuunnittelussa on päädytty lämmitys- ja jäähdytysenergioiden tuotannossa käyttämään ainakin osittain maasta saatavaa ilmaisenergiaa porakaivomenetelmällä toimivan maalämpöpumpun avulla kaukolämmön ollessa lämmitystilanteessa apulämmönlähde.

Tässä selvityksessä tarkastellaan kolmea eri kytkentätavoilla toteutettua tietyn tyyppistä ja kokoista maalämpöjärjestelmää. Kaikki järjestelmät ovat kallioperästä porakaivomenetelmällä energiaa ottavia laitoksia, mitoitustehöt ja porakentän koko kussakin samat, lisälämmitysratkaisuna toimii kaukolämpö ja järjestelmien tarkastelujakso 25 vuotta.

Tarkoituksena on löytää kytkentävaihtoehtoista kokonaiskustannuksiltaan kannattavin ratkaisu. Lähtökohtana kustannusvertailussa tehontarpeiden lisäksi ovat nykyiset teollisesti tuotetut ja markkinoilla olevat maalämpöpumppulaitteistot, niiden suoritusominaisuudet ja kallioreikien tunnetut simulointimallit sekä laitteiden ja kallioporauksen hintatiedot. Lisäksi vaikuttavat eri energiamuotojen tariffit. Vertailtujen järjestelmien kalliopiiritiedot saadaan Earth Energy Designer-ohjelmasta, joka on tarkoitettu porakenttämitoituksia ja –simulointeja varten.

2 Maalämpöpumppu Suomessa

Maalämpöpumppu on Suomen toiseksi yleisin lämpöpumppujärjestelmä ilmalämpöpumppujärjestelmän jälkeen. Vuonna 2008 maalämpöpumppuja oli asennettu yli 46 000 kappaletta. Määrä on kaksinkertainen vuoden 2003 lukemaan verrattuna, eli alan kasvu on hyvin nopeaa. Maalämmön käyttöä Suomessa on lisännyt mm. energian hinnan nousu. Mitä suurempi talo ja energiankulutus on kyseessä, sitä kannattavampaa on investoida maalämpöön. (7.)

Maalämmöllä tarkoitetaan maaperän tai veden massaan varastoitunutta auringon lämpöenergiaa. Maalämpötekniikassa hyödynnetään lisäksi sekundäärisesti geotermistä energiaa, kun käytetään syvälle ulottuvia lämpökaivoja. Geoterminen energia syntyy maan sisällä tapahtuvista radioaktiivisista hajoamisista. Nykyään yleisin maalämmön talteenottotapa on juuri kallioon porattu lämpökaivo, sillä se tarvitsee pienemmän pinta-alan ja soveltuu lähes kaikille tonttityypeille. (7.)

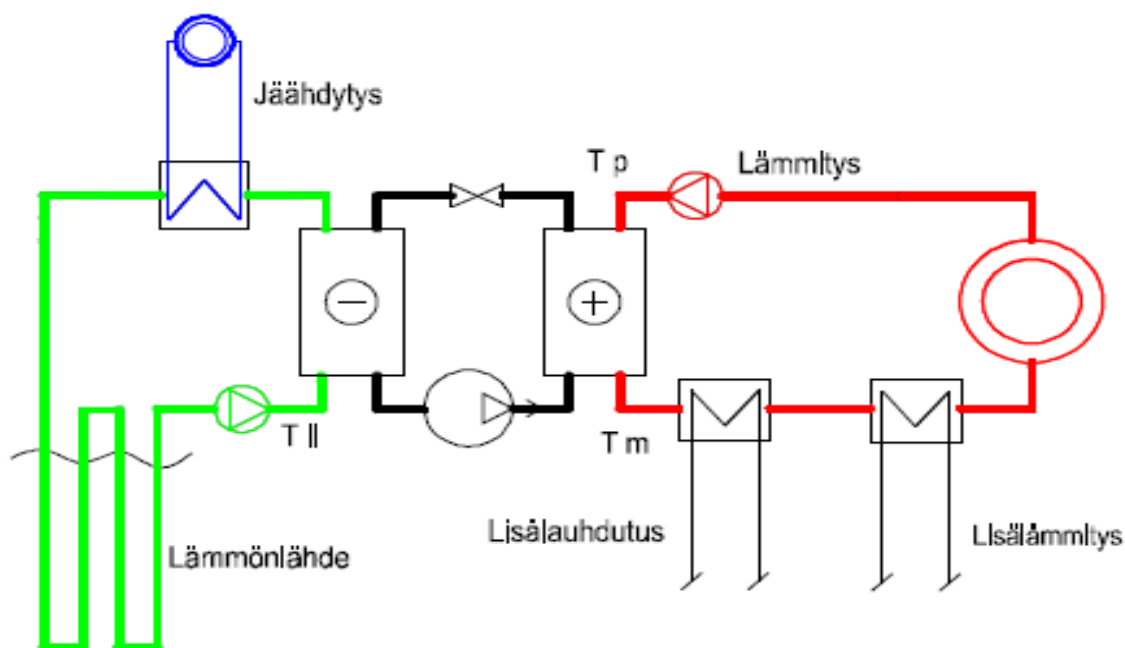
Maalämpöpumppu sopii parhaiten matalan lämpötilan lämmönjakojärjestelmien lämmönlähteeksi, kuten lattialämmitykseen ja ilmalämmitykseen. Maalämpöpumppua voidaan hyödyntää myös käyttöveden lämmittämisessä ja kesällä rakennuksen jäähdyttämisessä. Jäähdyttämällä voidaan parantaa lämpökaivon antoisuutta talvella, kun rakennuksesta tulevaa lämpöä siirretään kesäaikaan kallioperään. Maalämpöpumpun lämmönkeruuputkistoa voidaan käyttää myös vapaajäähdytykseen, mikä tuo mukanaan energiasäästöjä. (7.)

3 Maalämpöpumpputekniikka

3.1 Maalämpöpumpun toimintaperiaate

Kaikki tässä työssä tarkasteltavat maalämpöpumppujärjestelmät on suunniteltu yhdistetyksi sekä lämmitys- että jäähdytyskäyttöön. Toisin sanoen järjestelmä tuottaa suuren osan vuodesta sivutuotteena joko jäähdytys- tai lämmitystehoa toisen tarpeista ollessa määräävämpi. Kuvassa 1 on esitetty kallioperään poratuista kaivoista energiaa ottavan integroidun maalämpöpumppuratkaisun toimintaperiaate. Toiminta perustuu suljetussa kierrossa olevan kylmäaineen olomuodon muutoksiin, höyrystymiseen ja

lauhtumiseen. Höyrystymisen tarkoituksena on ottaa matalassa lämpötilassa olevasta nesteestä lämpöenergiaa (esimerkiksi lämmönkeruuputkistossa kiertävä liuos). Syntynyt höyry kulkee kompressorille, joka puristaa sen korkeaan paineeseen, jolloin höyry lämpenee. Korkeapaineinen ja lämmin höyry nesteytyy lauhduttimessa luovuttaessaan lämpöä. Luovutettu lämpö voidaan käyttää esimerkiksi lämmitysverkoston putkistossa kiertävän veden lämmittämiseen. Joissain lämpöpumpuissa on lisäksi tulistuksen poistovaihtimet, joilla voidaan lämmittää rakennuksen käyttövettä kylmäaineen tulistuslämmöllä. Tulistuslämpö on energiamäärä, joka vapautuu, kun kompressorista lähtevä kuuma, tulistunut höyry jäähtyy lauhtumislämpötilaan. Lauhduttimelta tulevan nesteytyneen kylmäaineen paine ja lämpötila laskevat paisuntaventtiilissä. Samalla osa kylmäaineesta höyrystyy. Nesteen ja höyryn sekoitus päättyy jälleen höyrystimelle, jolloin kierto voi alkaa alusta.



Kuva 1. Maalämpöpumpulla toteutetun yhdistetyn lämmityksen ja jäähdytyksen esimerkkikykentä (1).

3.2 Lämpöerroin

Lämpöpumpun tehokkuutta mitataan lämpökertoimella, COP (Coefficient Of Performance), joka on saadun lämmitystehon suhde tarvittavaan sähkötehoon. Niinpä lämpökertoimella 3 saadaan jokaista 1 kilowatin sähkötehoa kohti lämpötehoa 3 kW. Ener-

giamäärinä mitattuna suhde on sama; 1 kilowattitunnin sähköenergiakulutuksella saadaan lämpöenergiaa 3 kilowattituntia. Tämä voidaan laskea kaavalla 1.

$$\text{COP} = \text{Tuotettu lämpö (kWh)} / \text{Käytetty sähkö (kWh)} \quad (1)$$

Puhuttaessa lämpökertoimesta tulee varmistaa, onko kyse pelkän kompressorin vai koko lämpöpumpun lämpökerroin ja missä olosuhteissa arvo on mitattu. Myös mm. pumpuissa kuluu sähköä kompressorin lisäksi, ja näin ollen koko lämpöpumpun lämpökerroin laskee. Joskus valmistajat ilmoittavat laitteilleen todella korkeitakin lämpökertoimia. Nämä kuitenkin ovat edullisimpiin olosuhteisiin perustuvia ääriarvoja, jotka käytännössä toteutuvat harvoin. Lisäksi pitää muistaa, että olosuhteet vaihtelevat vuoden aikana, samoin lämpöpumpun toiminta-arvot. Tärkein aika on suurimman lämmöntarpeen aika eli talvikausi. Toiminta-arvot tulisi ilmoittaa keskimääräisissä olosuhteissa. Tavallinen taso vuotuiselle keskimääräiselle lämpökertoimelle eli vuosilämpökertoimelle vaihtelee normaaleissa käyttöolosuhteissa 3:n molemmin puolin.

Mitä matalammalla lämpötilatasolla lämpöpumppu luovuttaa lämmön, sitä paremmalla lämpökertoimella se toimii. Taulukossa 1 on esitetty erään kylmäaineella R407C toimivan kompressorin lämpökerroin, kun höyrystymislämpötila on -5 °C ja lauhtumislämpötila vaihtelee välillä 40–60 °C. (4; 9.)

Taulukko 1. Käyntiolosuhteiden vaikutus lämpökertoimeen (4).

Käyntiolosuhteet	Lämpökerroin
-5 / 40°C	3,7
-5 / 45°C	3,3
-5 / 50°C	3,0
-5 / 55°C	2,7
-5 / 60°C	2,4

3.3 Lämpöpumppumitoituksesta

Lämpöpumppu voidaan mitoittaa siten, että kompressorilla tuotetaan kaikki lämpöenergia, jolloin puhutaan täysteholämpöpumpusta. Täystehoisesti mitoitettussa maalämpöpumpussa lisälämmönlähdettä ei tarvita lämmön eikä lämpimän käyttöveden

tuottamiseen. Maalämmön osuus saadaan näin maksimaalisesti hyödynnettyä. Lämmin käyttövesi tehdään tulistinvaihtimella, jolloin sähkövastuksia ei tarvitse ottaa käyttöön. Sähkövastukset ovat varaajassa vain varalämmitysmuotona. (4; 6.)

Osateholämpöpumppu tarvitsee lisälämpöä, joka usein tuotetaan sähköllä tai kaukolämmöllä. Vaikka lämpöpumpun tehoksi valitaan vain osa huipputehosta, sillä saadaan tuotettua suurin osa tarvittavasta lämpöenergiasta, koska todella kylmää on vain suhteellisen lyhyen jakson ajan huolimatta viimeaikaisesta maapallolla tapahtuvasta ilmaston kylmenemisestä. (4; 11; 12.)

On tärkeää huomioida, että oli kyseessä täys- tai osatehomitoitus täytyy maaputkiston mitoitus tehdä aina talon energiatarpeen mukaan. Osatehoisissa lämpöpumpuissa kompressorit käyvät selvästi kauemmin tuottaakseen saman energiamäärän kuin tehokkaammat kompressorit täystehoisissa. (4., 6.)

Työssä tarkasteltavat maalämpöpumppujärjestelmät mitoitetaan jäähdytystehon mukaan. Lämmitystilanteessa loppu lämmöntarve katetaan kaukolämmöllä. Käyttöveden lämmitys toteutetaan myös kaukolämmöllä.

3.4 Porakaivomitoituksesta

Porakaivon syvyys riippuu tarvittavasta lämmitysenergian määrästä. Porakaivosta saatava energian määrä puolestaan riippuu siitä, kuinka paljon vesi siirtää lämpöenergiaa peruskalliosta. Veden virtaus pystytään tosin todentamaan vasta porauksen aikana ja koepumppauksen avulla.

Uudiskohteissa maalämpöjärjestelmän ja porakaivon mitoitus perustuu rakennuksen laskennalliseen lämmitysenergian ja jäähdytysenergian kulutukseen. Rakennuslupaa haettaessa tarvitaan energiatodistus, josta selviää rakennuksen lämmitysenergian- ja jäähdytysenergian kulutustiedot sekä huipputehontarpeet. Mikäli energiatodistus on oikein laadittu, voidaan maalämpöjärjestelmän mitoitus tehdä energiatodistuksen tietoihin perustuen.

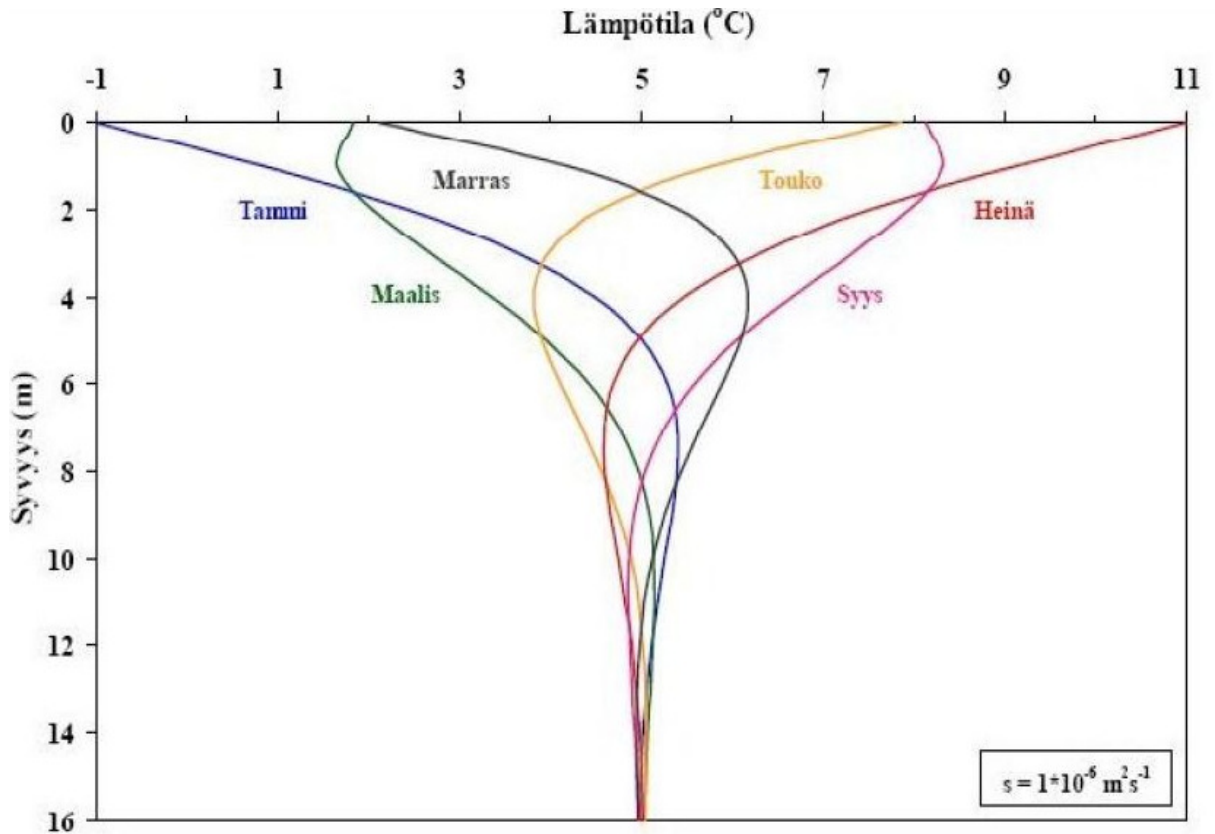
Porakaivon halkaisija on tyypillisesti 100–150 mm. Tavanomaisin porakaivon halkaisija on 115 mm. Vanhemmalla tekniikalla tehtävät porakaivot ovat tyypillisesti halkaisijaltaan suurempia (esimerkiksi 150 mm). Lämpökaivon halkaisijalla ei tutkitusti ole merkittävää vaikutusta lämmönkeruuputkiston energiatehokkuuteen. Ruotsissa vuonna 2008 valmistuneen tutkimuksen mukaan maalämpöjärjestelmän lämpökaivon halkaisijalla on varsin pieni merkitys lämmönkeruujärjestelmän tehokkuudessa. Halkaisijaltaan pienempi porakaivo on hieman suuremman halkaisijan porakaivoa tehokkaampi. Tämä selittyy sillä, että lämpökaivossa oleva vesi toimii ainoastaan lämmönsiirtäjänä kalliosta lämmönkeruuputkistoon. Mitä vähemmän vettä on kallion ja lämmönkeruuputkiston välissä, sitä tehokkaampaa on porakaivossa lämmön siirtyminen kalliosta lämmönkeruuputkistoon ja lämmönkeruunesteeseen. (7; 10.)

4 Porakaivo lämmönlähteenä

Maan pinnan lämpötila vaihtelee vuodenaikojen mukaan. Noin 15 metrin syvyydessä ja siitä alaspäin lämpötila on vuodenaikasta riippumaton. Paikkakuntaakohtainen maaperän lämpötila noudattaa vuosittaista ilman keskilämpötilaa. Se voidaan laskea likimääräisesti seuraavalla kaavalla:

$$T(\text{maa}) \approx 0,71 * T(\text{ilman vuosittainen keskiarvo}) + 2,93 \quad (2)$$

Kallioperän lämpötila Etelä-Suomessa 100 metrin syvyydessä on noin 7–8 °C. Kuvassa 2 on esitetty erään paikkakunnan maa- ja kallioperän lämpötilat vuodenaikasta ja syvyydestä riippuen. (2)



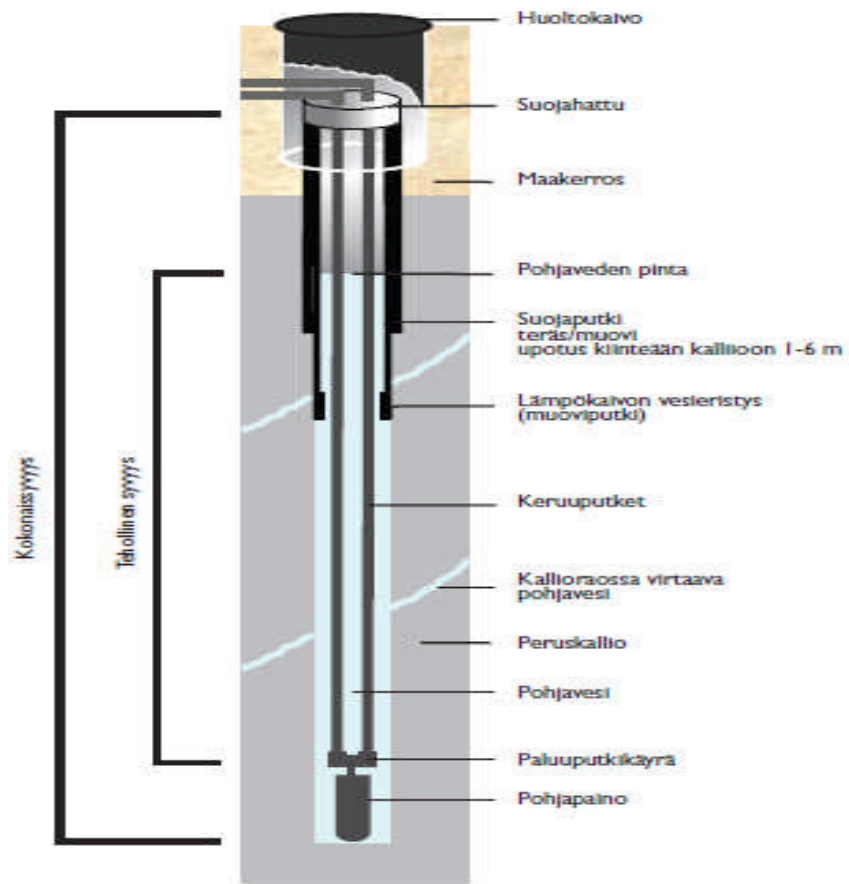
Kuva 2. Maa- ja kallioperän lämpötilat vuodenaajat ja syvyys huomioiden (2).

Porakaivoratkaisussa kaivon upotetaan lähes pohjaan saakka ulottuvat muoviputket, jotka liitetään alapäästään silmukaksi messinkisellä U-kappaleella, johon myös kiinnitetään kaivosyvyiden mukaan laskennallisesti määritetty paino. Painon tehtävänä on vetää putket suoraan alas vettä täynnä olevassa kaivossa. Suurissa järjestelmissä, kuten Espoon sairaalassa, porataan kallioon kaivoja tarvittava määrä ja kaivot kytketään rinnakkaisiksi putkisilmukoiksi erillisessä ulkoisessa kytkentäkaivossa. Jos kallion päällä on irtomaata, joudutaan tämä osuus varustamaan suoja-putkella, mikä nostaa kustannuksia. Suoja-putki on tarpeen myös estämään pintaveden vapaa pääsy porareikään, jossa se saattaisi liata pohjavettä.

Porakaivomenetelmällä porakaivon energiasaanti on noin kaksinkertainen putkimetriä kohti verrattuna maahan kaivettuun vaakaputkeen. Lisäksi vältetään mittavilta kaivaustöiltä tontilla ja saadaan pitkäikäinen, toimintavarma, routimaton ja helposti ilmatettava järjestelmä. Porakaivon yhtenä haittapuolena on ainakin korkea hinta. (8; 9.)

Lämpökaivon aktiivisella tai tehollisella syvyydellä tarkoitetaan sitä osaa kaivosta, joka on koko vuoden ajan veden peitossa. (8.)

Kuvassa 3 on esitetty poikkileikkaus yhdestä lämpökaivosta, jossa on hyödynnetty 2-putkijärjestelmää.



Kuva 3. Lämpökaivon poikkileikkaus (13).

Kuvassa 4 on esitetty poikkileikkaus suurkohteen porakaivokentästä.



Kuva 4. Porakaivokentän poikkileikkaus suurkohteessa.

5 Espoon sairaalan ensimmäinen rakennusvaihe

Työssä tarkasteltavaan sairaalan ensimmäiseen rakennusvaiheeseen sisältyy lehväosat kokonaisuudessaan, aulasta 28 % ja kellarista 52 %, jolloin kokonaisalaksi tulee yhteensä noin 35 200 m². Liitteessä 1 on esitetty havainnollistava kuva sairaalasta ja sen rakennusvaiheistuksesta. IDA-ice:n simuloineilla saatiin ensimmäisen rakennusvaiheen mitoitustehot ja tuntikohtaiset (mallivuosi 1979) tehotiedot sekä lämmityksen että jäähdytyksen osalta. Tuntikohtaisten tehotietojen avulla pystyttiin selvittämään järjestelmien energiatiedot. Lisäksi tiedossa on mallivuoden tuntikohtaiset ulkoilman lämpötilat.

Rakennusvaiheen 1 mitoituslämmitystehoksi saatiin 2600 kW, josta lämpöpumpulla on tarkoitus tuottaa noin 700 kW. Lopputeho tuotetaan kaukolämmöllä. Mitoitusjäähdytystehoksi saatiin 800 kW.

Lämmin käyttövesi on ajateltu tuotettavan kaukolämmöllä, ja sen tuottamiseen tarvittavia energiamääriä ei tässä selvityksessä ole huomioitu lainkaan.

IDA-ice-simulointiohjelmasta saadut rakennusvaiheen 1 tuntikohtaisten tehojen perusteella lasketut kuukausittaiset energiankulutustiedot selviävät taulukosta 2. Taulukossa mainitut ideaaliset jäähdytys- ja lämmityslaitteet tarkoittavat huonejäähdyttimiä ja -lämmittämiä.

Taulukko 2. Rakennusvaiheen 1 kuukausittaiset energiankulutustiedot IDA-ice-simulointiohjelman mukaan, MWh.

RAKENNUSVAIHEEN 1 KUUKAUSITTAISET ENERGIANKULUTUSTIEDOT, MWH							
Kuukausi	IV jäähdytys-patterit	Teknisten tilojen jatkuva jäähdytys	Ideaaliset jäähdytys-laitteet	Jäähdytys yhteensä	IV lämmitys-patterit	Ideaaliset lämmitys-laitteet	Lämmitys yhteensä
1	0	22	0	22	548	221	769
2	0	20	0	20	556	188	744
3	0	22	0	22	331	140	471
4	0	22	0	22	225	85	309
5	30	22	4	56	69	36	105
6	92	22	12	125	5	7	12
7	22	22	2	46	2	16	18
8	74	22	5	101	2	13	15
9	0	22	0	22	46	46	92
10	0	22	0	22	170	106	276
11	0	22	0	22	239	148	388
12	0	22	0	22	397	189	586
Yhteensä	217	263	22	502	2 589	1 195	3 784

Luvussa 7 on käsitelty lisää järjestelmien teho- ja energiatarkastelua.

Porakentille käytettävissä oleva pinta-ala ensimmäisessä vaiheessa on noin 17 000 m².

6 Vertailtavat järjestelmät

6.1 Järjestelmän A toimintakuvaus

Järjestelmä on lämpöpumppukojeisto, joka palvelee rakennuksen jäähdytys- ja lämmitystarpeita. Käyttöveden lämmitys toteutetaan kokonaisuudessaan kaukolämmöllä. Kojestolla on kaksi erillistä käyttötilaa:

- vedenjäähdytinkäyttö (jäähdytys)
- lämpöpumppukäyttö (lämmitys).

Jäähdytyskauden alkaessa suoraan maaperästä saatavaa vapaajäähdytystä pyritään hyödyntämään mahdollisimman pitkään. Vapaajäähdytys toimii ilman koneellista jäähdytystä.

Järjestelmä on rakennettu siten, että lämmönkeruuliuospiiri on yhdistetty sekä höyrystin- että lauhdutuspuolen putkiin. Lauhdutuspuolella lämmönkeruuliuos- ja lämmityspiirin erottaa lauhdutuslämmönsiirtimet (LS). Myös höyrystinpuolella on lämmönsiirtimet erottamassa jäähdytyspiirin ja lämmönkeruuliuospiirin toisistaan.

Jos vapaajäähdytyksellä kyetään tuottamaan rakennuksen kaikki tarvittava jäähdytys-teho ja samanaikaisesti lämmitysverkostossa on lämmöntarvetta, toimii kojeisto lämpöpumppukäytöllä. Jäähdytyskauden lämpöpumppukäytössä jäähdytysenergiaa tuotetaan vapaajäähdytyksen lisäksi lämpöpumppukäytössä syntyvällä ilmaisjäähdytysenergialla. Käytännössä lämmitysverkostossa on ympäri vuoden lämmöntarvetta, kesäheiteilläkin. Kesäaikainen lämmöntarve voidaan todeta taulukosta 2 (IDA-ice:n simulointitulokset).

Kojeisto toimii jäähdytyskaudella vedenjäähdytinkäytöllä, kun vapaajäähdytys ja ilmaisjäähdytys eivät enää riitä kattamaan jäähdytystarvetta. Lämmitysverkoston jäähdytyskauden aikainen lämmöntarve katetaan tässä tapauksessa vedenjäähdytinkäytössä syntyvällä ilmaislauhteella. Ylimääräinen ilmaislauhde siirretään lauhdutuslämmönsiirtimien välityksellä lämmitysvesipiiristä maaperän kautta kiertävään liuospiiriin, josta

ylimääräinen lämpö luovutetaan maaperään. Jäähdytysverkoston menoliuoksen lämpötila pidetään asetusarvossaan ohjaamalla kompressorien käyntiä lämpöpumpun höyrystinpuolelle tulevan ja höyrystinpuolelta lähtevän liuoksen lämpötilojen perusteella.

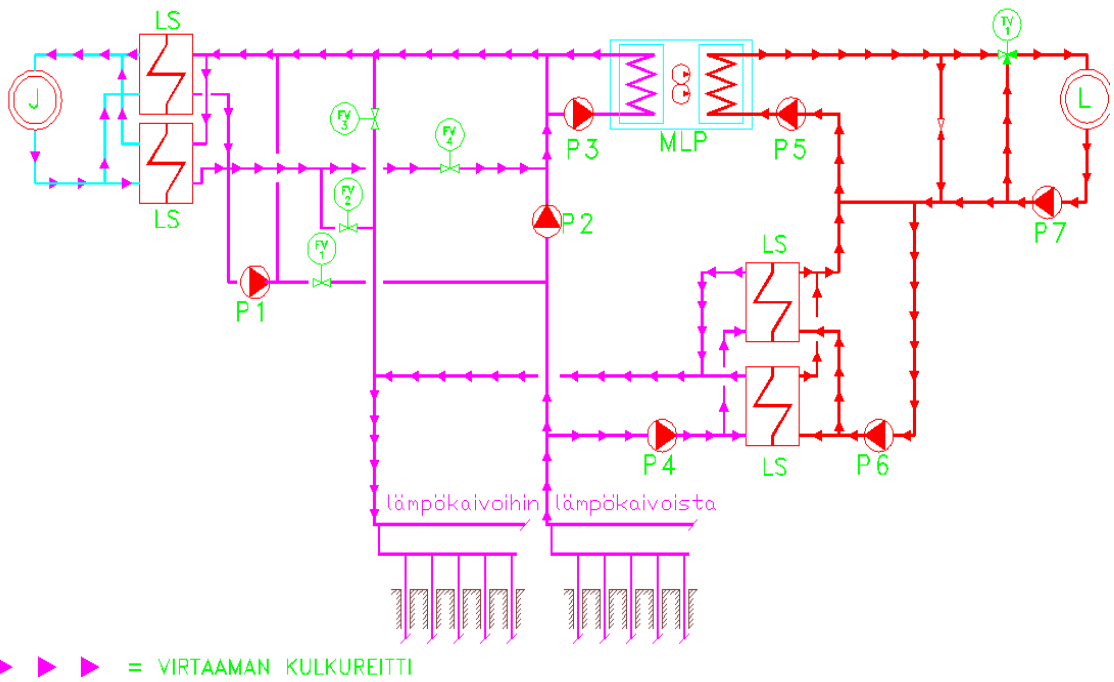
Kojeisto toimii lämmityskaudella lämpöpumppukäytöllä lämmitystarpeen ollessa suurempi kuin jäähdytystarpeen ja jäähdytystarpeen vaatiman sähkötehon summa. Toisin sanoen siis jäähdytystarpeen ja sen vaatiman sähkötehon summa on yhtä kuin lauhdusteho, ja jos näin tuotetulla lauhdutusteholla (ilmaislauhdetta) ei kyetä kattamaan lämmitysverkoston tehontarvetta, on kojeen toiminta vaihdettava lämpöpumppukäytölle. Lämmityskauden lämpöpumppukäytössä lämmitysverkoston menoveden lämpötila pidetään asetusarvossaan samoin tavoin kuin höyrystinpuolella eli ohjaamalla kompressorien käyntiä lauhdutinpuolen lämpötilojen perusteella. Tarvittaessa käytetään lisälämmönlähteenä kaukolämpöä.

Lämmityskauden aikana jäähdytystarvetta on sairaalan teknisillä tiloilla, joiden jäähdytystarve on ympärivuotista. Höyrystinpuolella ylimääräinen kojeiston jäähdyttämä (ilmaisjäähdytystä) maapiirin paluuliuos ajetaan takaisin maahan ja tarvittava määrä liuosta kierrätetään lämmönsiirtimien kautta jäähdytysverkoston veden jäähdyttämiseksi. Tarvittaessa lämmönsiirtimeltä tulevaa lämpimämpää maapiirin menoliuosta shuntataan paluupuolelle. Jäähdytysverkoston lämmönsiirtimeltä tuleva liuos ajetaan suoraan lämpökaivoista tulevaan (maalämpöpumpulle menevään) putkeen. Tulevaa liuosta ei tässä järjestelmässä kierrätetä maaperän kautta jäähtymässä lämpöpumppukäytön aikana. Näin pystytään vaikuttaman positiivisesti lämpökertoimeen.

Kuvissa 5–8 on esitetty järjestelmän toiminnan periaate eri käyttötilanteissa.

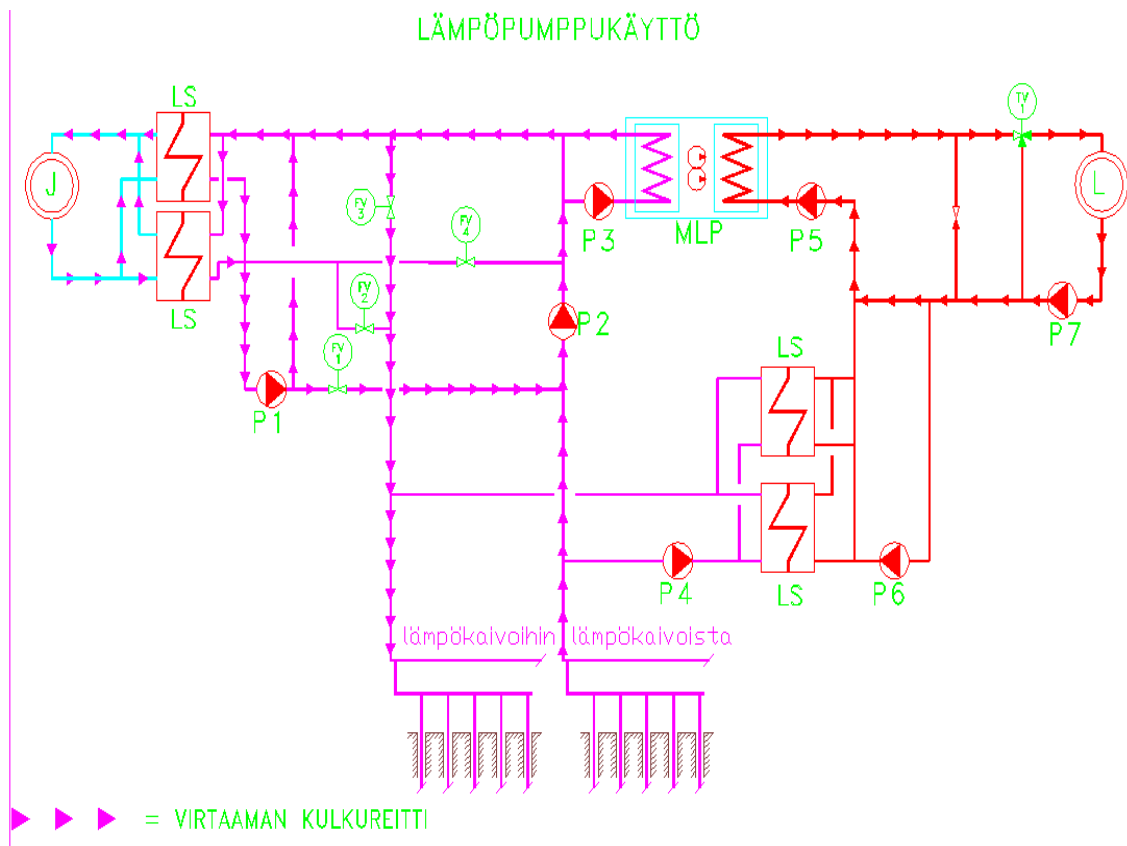
Taulukossa 3 on esitetty venttiilien käyttötilat ja taulukossa 4 pumppujen käyttötilat eri tilanteissa.

VEDENJÄÄHDYTYNKÄYTTÖ

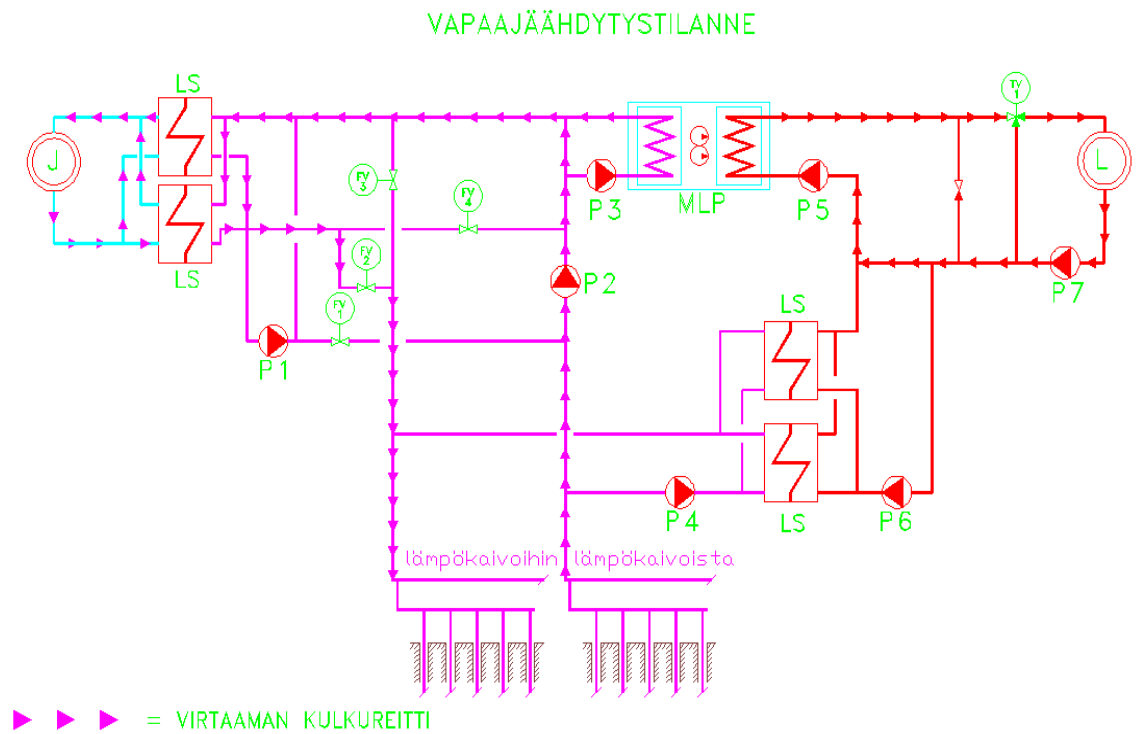


Kuva 5. Järjestelmän toimintaperiaate vedenjäähdytinkäytössä.

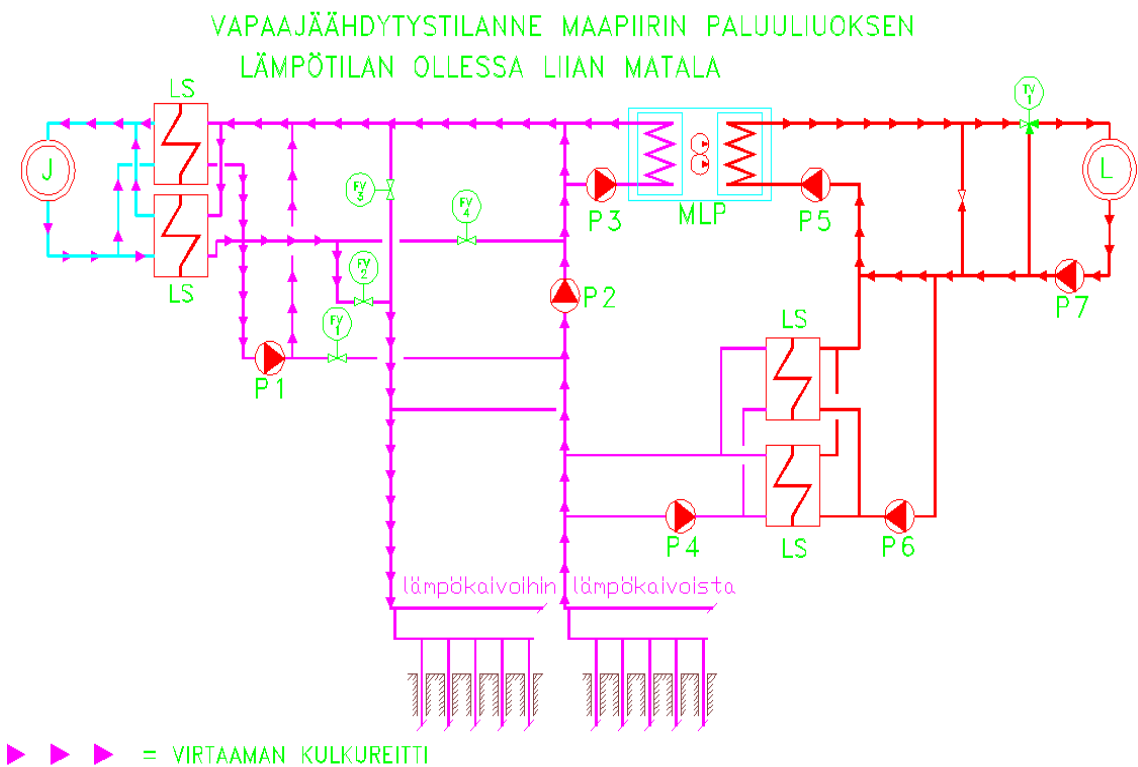
LÄMPÖPUMPPUKÄYTTÖ



Kuva 6. Järjestelmän toimintaperiaate lämpöpumppukäytössä.



Kuva 7. Järjestelmän toimintaperiaate vapaajäähdytystilanteessa.



Kuva 8. Järjestelmän toimintaperiaate vapaajäähdytystilanteessa maapiirin paluuliuksen lämpötilan ollessa liian matala.

Taulukko 3. Venttiilien käyttötilat.

Venttiilit	FV 1	FV 2	FV 3	FV 4
VJK-käyttö	kiinni	kiinni	kiinni	auki
Vapaajäähdytys	kiinni	auki	kiinni	kiinni
Lämpöpumppukäyttö	säätö	kiinni	auki	kiinni

Taulukko 4. Pumppujen käyttötilat.

Pumput	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
VJK-käyttö	seis	seis	käy	käy	käy	käy	käy
Vapaajäähdytys	*	käy	**	seis	**	seis	**
Lämpöpumppukäyttö	käy	käy	käy	seis	käy	seis	käy

*) käy, jos maapiirin paluuliuksen lämpötila liian alhainen

***) käy, koska vähäistä lämmöntarvetta esiintyy jäähdytyskaudellakin

6.2 Järjestelmän B toimintakuvaus

Järjestelmä on lämpöpumppukojeisto, joka palvelee rakennuksen jäähdytys- ja lämmitystarpeita. Käyttöveden lämmitys toteutetaan kokonaisuudessaan kaukolämmöllä. Kojestolla on kaksi erillistä käyttötilaa:

- vedenjäähdytinkäyttö (jäähdytys)
- lämpöpumppukäyttö (lämmitys).

Lisäksi hyödynnetään vapaajäähdytystä jäähdytyskaudella. Vapaajäähdytyksessä voidaan tarvittava jäähdytysteho ottaa lämmityskauden jälkeen suoraan maasta ilman koneellista jäähdytystä.

Järjestelmä on rakennettu siten, että lämmönkeruuliuospiiri on yhdistetty ainoastaan höyrystinpuolen putkistoon. Jäähdytys- ja liuospiiri on erotettu tässäkin tapauksessa lämmönsiirtimillä toisistaan.

Jos vapaajäähdytyksellä kyetään tuottamaan kaikki tarvittava jäähdytysteho, ja samanaikaisesti lämmitysverkostossa on lämmöntarvetta, kojeisto toimii lämpöpumppukäytöllä. Jäähdytyskauden lämpöpumppukäytössä jäähdytysenergiaa tuotetaan vapaajäähdytyksen lisäksi lämpöpumppukäytössä syntyvällä ilmaisjäähdytysenergialla. Käytännössä

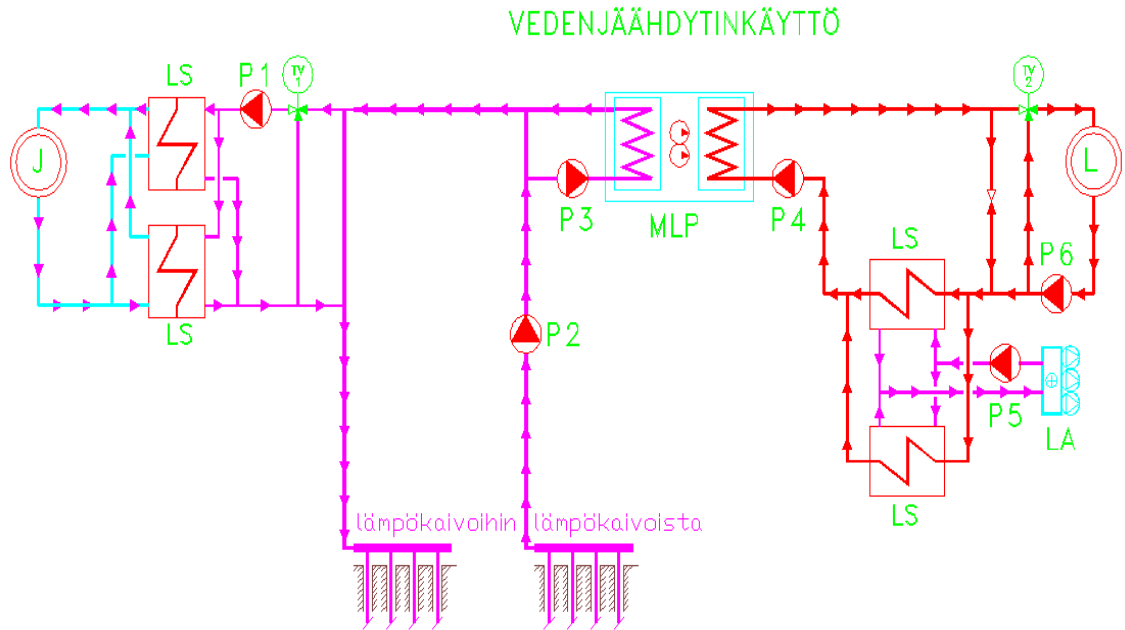
lämmitysverkostossa on ympäri vuoden lämmöntarvetta, kesähelteilläkin. Kesäaikainen lämmöntarve voidaan todeta taulukosta 2 (IDA-ice:n simulointitulokset).

Kojeisto toimii jäähdytyskaudella vedenjäähdytinkäytöllä, kun vapaajäähdytys ja ilmaisjäähdytys eivät riitä kattamaan jäähdytystarvetta. Lämmitysverkoston jäähdytyskauden aikainen lämmöntarve katetaan tässä tapauksessa vedenjäähdytinkäytössä syntyvällä ilmaislauhteella. Ylimääräinen ilmaislauhe siirretään lauhdutuslämmönsiirtimen välityksellä lämmitysvesipiiristä vesiglykolipiiriin, josta ylimääräinen lämpö taas luovutetaan liuosjäähdyttimen kautta ulkoilmaan. Jäähdytysverkoston menoliuoksen lämpötila pidetään asetusarvossaan ohjaamalla kompressorien käyntiä lämpöpumpun höyrystinpuolelle tulevan ja höyrystinpuolelta lähtevän liuoksen lämpötilojen perusteella.

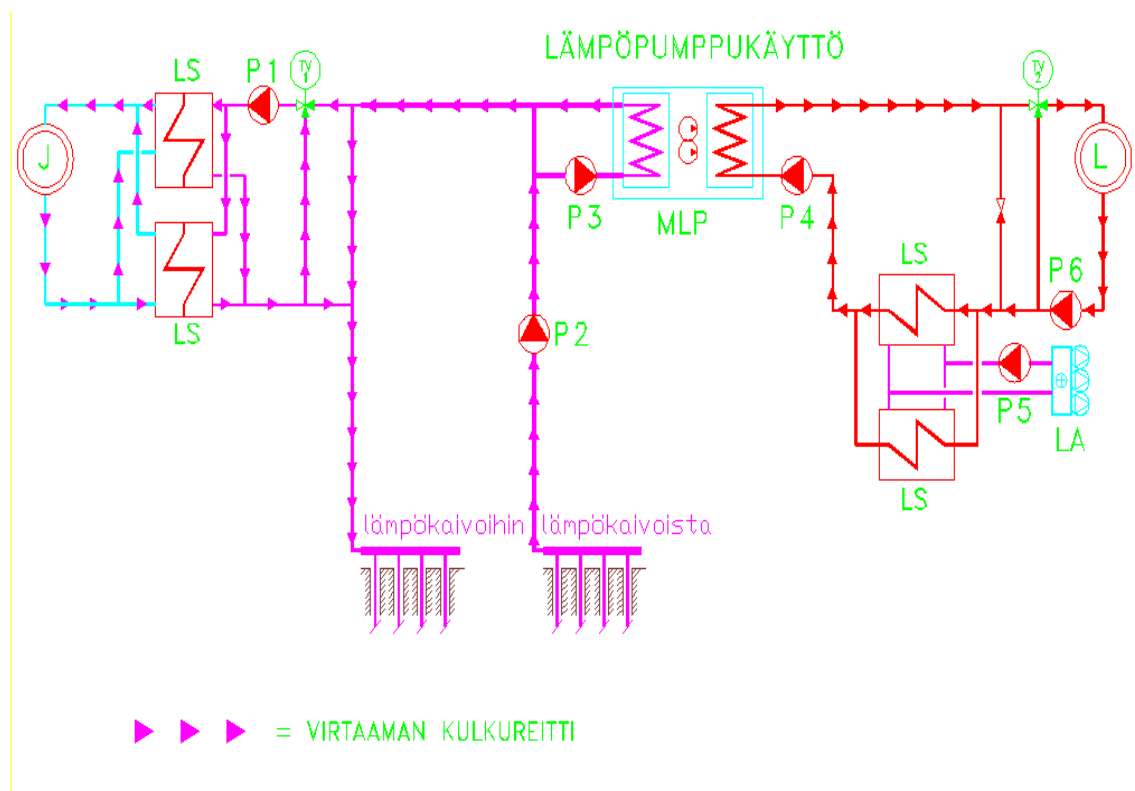
Kojeisto toimii lämmityskaudella lämpöpumppukäytöllä lämmitystarpeen ollessa suurempi kuin jäähdytystarpeen ja jäähdytystarpeen vaatiman sähkötehon summa. Toisin sanoen siis jäähdytystarpeen ja sen vaatiman sähkötehon summa on yhtä kuin lauhdusteho, ja jos näin tuotetulla lauhdusteholla (ilmaislauhdetta) ei kyetä kattamaan lämmitysverkoston tehontarvetta, on kojeen toiminta vaihdettava lämpöpumppukäytölle. Lämmityskauden lämpöpumppukäytössä lämmitysverkoston menoveden lämpötila pidetään asetusarvossaan samoin tavoin kuin höyrystinpuolella eli ohjaamalla kompressorien käyntiä lauhdutinpuolen lämpötilojen perusteella. Myös tässä vaihtoehdossa käytetään kovilla pakkasilla lisänä kaukolämpöä. Höyrystinpuolella ylimääräinen kojeiston jäähdyttämä (ilmaisjäähdytystä) maapiirin paluuliuos ajetaan takaisin maahan ja tarvittava määrä liuosta kierrätetään lämmönsiirtimien kautta jäähdytysverkoston veden jäähdyttämiseksi (sairaalan tekniset tilat). Tarvittaessa lämmönsiirtimeltä tulevaa lämpimämpää maapiirin menoliuosta shuntataan paluupuolelle.

Kuvissa 9–11 on esitetty järjestelmän toiminnan periaate virtausnuolien avulla eri käyttötilanteissa.

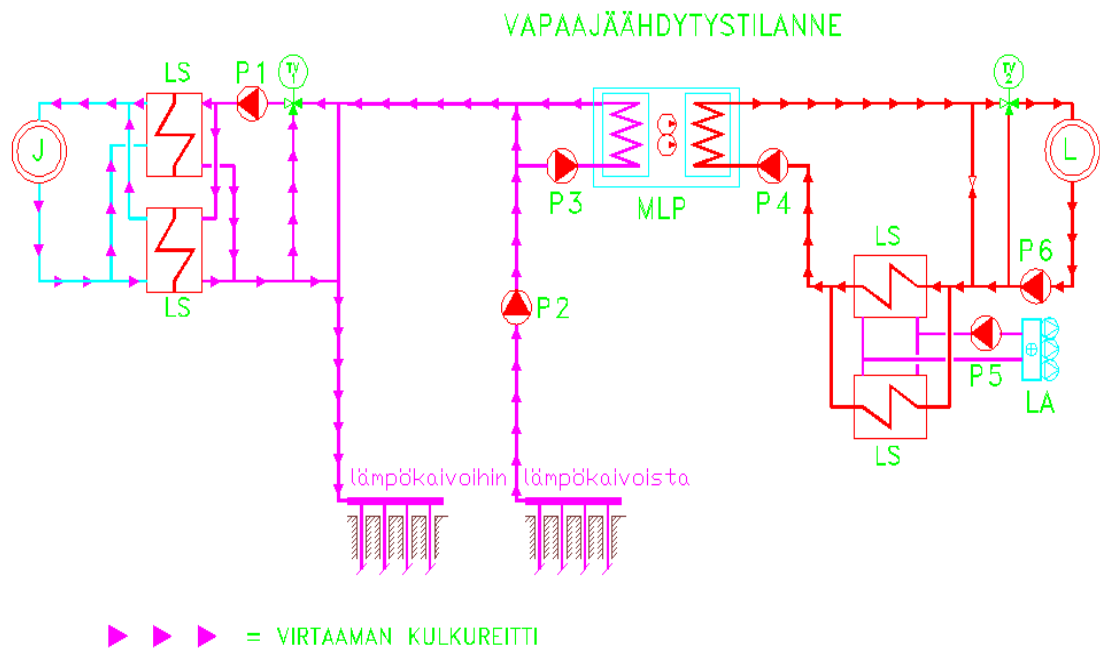
Taulukossa 5 on esitetty pumppujen käyttötilat eri tilanteissa.



Kuva 9. Järjestelmän toimintaperiaate vedenjäähdytinkäytössä.



Kuva 10. Järjestelmän toimintaperiaate lämpöpumppukäytössä.



Kuva 11. Järjestelmän toimintaperiaate vapaajäähdytystilanteessa.

Taulukko 5. Pumppujen käyttötilat.

Pumput	P1	P2	P3	P4	P5	P6
VJK-käyttö	käy	käy	käy	käy	*	käy
Vapaajäähdytys	käy	käy	**	**	seis	**
Lämpöpumppukäyttö	käy	käy	käy	käy	seis	käy

*) käy kompressorin käydessä

***) käy, koska vähäistä lämmöntarvetta esiintyy jäähdytyskaudellakin

6.3 Järjestelmän C toimintakuvaus

Järjestelmä on lämpöpumppukojeisto, joka palvelee rakennuksen jäähdytys- ja lämmitystarpeita. Käyttöveden lämmitys toteutetaan kokonaisuudessaan kaukolämmöllä. Kojestolla on kaksi erillistä käyttötilaa:

- vedenjäähdytinkäyttö (jäähdytys)
- lämpöpumppukäyttö (lämmitys)

Lisäksi hyödynnetään vapaajäähdytystä jäähdytyskaudella. Vapaajäähdytyksessä voidaan tarvittava jäähdytysteho ottaa lämmityskauden jälkeen suoraan maasta ilman koneellista jäähdytystä.

Järjestelmä on variaatio kahdesta edellä esitetystä lämpöpumppuratkaisusta. Siinä on pyritty huomioimaan kahden edellisen järjestelmän parhaat puolet eli järjestelmän A lauhde-energian ajoa maaperään sekä järjestelmän B vapaajäähdytyksen maksimointia. Järjestelmällä on kaksi energiakenttää, lauhdutuspuolella ja höyrystyspuolella kummallakin omansa. Kentät on yhdistetty toisiinsa.

Jos vapaajäähdytyksellä kyetään tuottamaan rakennuksen kaikki tarvittava jäähdytysteho, ja samanaikaisesti lämmitysverkostossa on lämmöntarvetta, toimii kojeisto lämpöpumppukäytöllä. Lämpöpumppukäytössä energiaa otetaan maasta kummastakin porakentästä. Tällöin maapiirit yhdistävien putkien venttiilit ovat auki. Jäähdytyskauden lämpöpumppukäytössä jäähdytysenergiaa tuotetaan vapaajäähdytyksen lisäksi lämpöpumppukäytössä syntyvällä ilmaisjäähdytysenergialla. Käytännössä lämmitysverkostossa on ympäri vuoden lämmöntarvetta, kesähelteilläkin. Kesäaikainen lämmöntarve voidaan todeta taulukosta 2 (IDA-ice:n simulointitulokset).

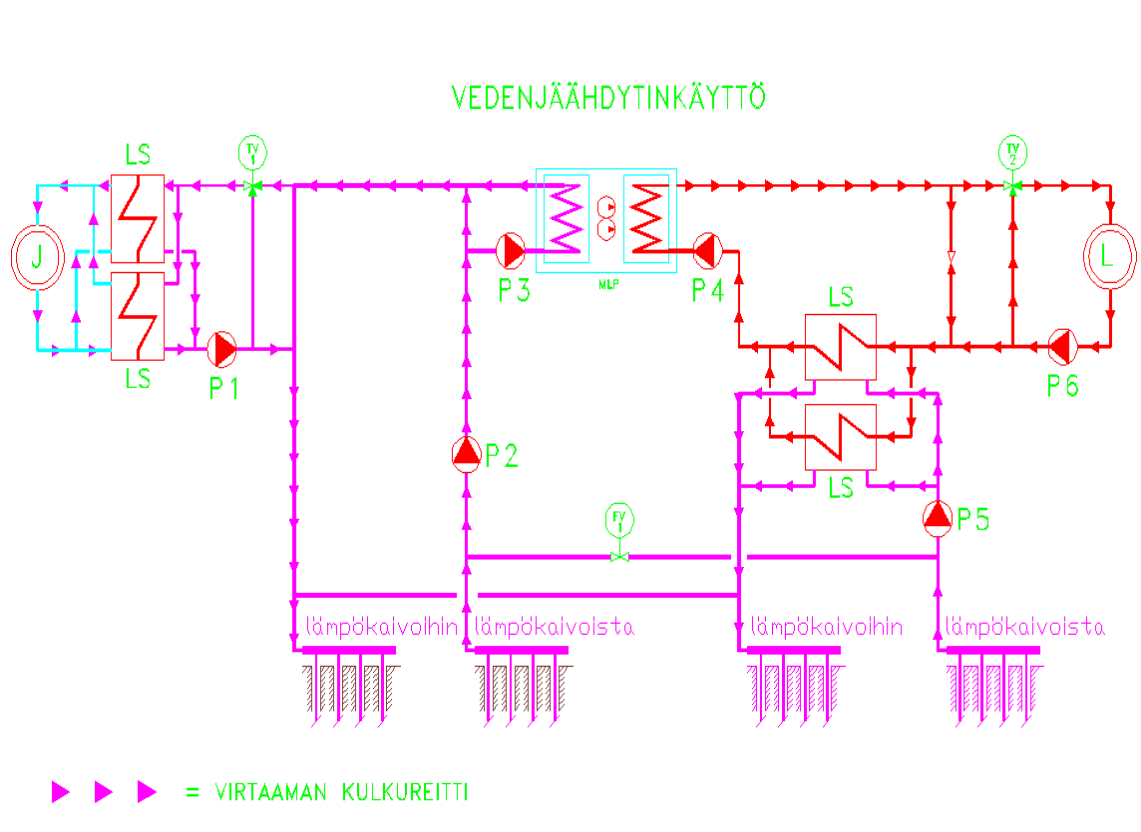
Kojeisto toimii jäähdytyskaudella vedenjäähdytinkäytöllä, kun vapaajäähdytys ja ilmaisjäähdytys eivät riitä kattamaan jäähdytystarvetta. Lämmitysverkoston jäähdytyskauden aikainen lämmöntarve katetaan tässä tapauksessa vedenjäähdytinkäytössä syntyvällä ilmaislahdeella. Ylimääräinen ilmaislahde siirretään lauhdutuslämmönsiirtimen välityksellä lämmitysvesipiiristä maapiiriin, josta lämpö taas luovutetaan maaperään. Vedenjäähdytinkäytössä energiaa otetaan ainoastaan vapaajäähdytyskentästä. Tällöin maapiirit yhdistävien putkien venttiilit ovat suljettuina. Jäähdytysverkoston menoliuksen lämpötila pidetään asetusarvossaan ohjaamalla kompressorien käyntiä lämpöpumpun höyrystinpuolelle tulevan ja höyrystinpuolelta lähtevän liuoksen lämpötilojen perusteella.

Kojeisto toimii lämmityskaudella lämpöpumppukäytöllä lämmitystarpeen ollessa suurempi kuin jäähdytystarpeen ja jäähdytystarpeen vaatiman sähkötehon summa. Toisin sanoen siis jäähdytystarpeen ja sen vaatiman sähkötehon summa on yhtä kuin lauhdusteho, ja jos näin tuotetulla lauhdutusteholla (ilmaislahdetta) ei kyetä kattamaan

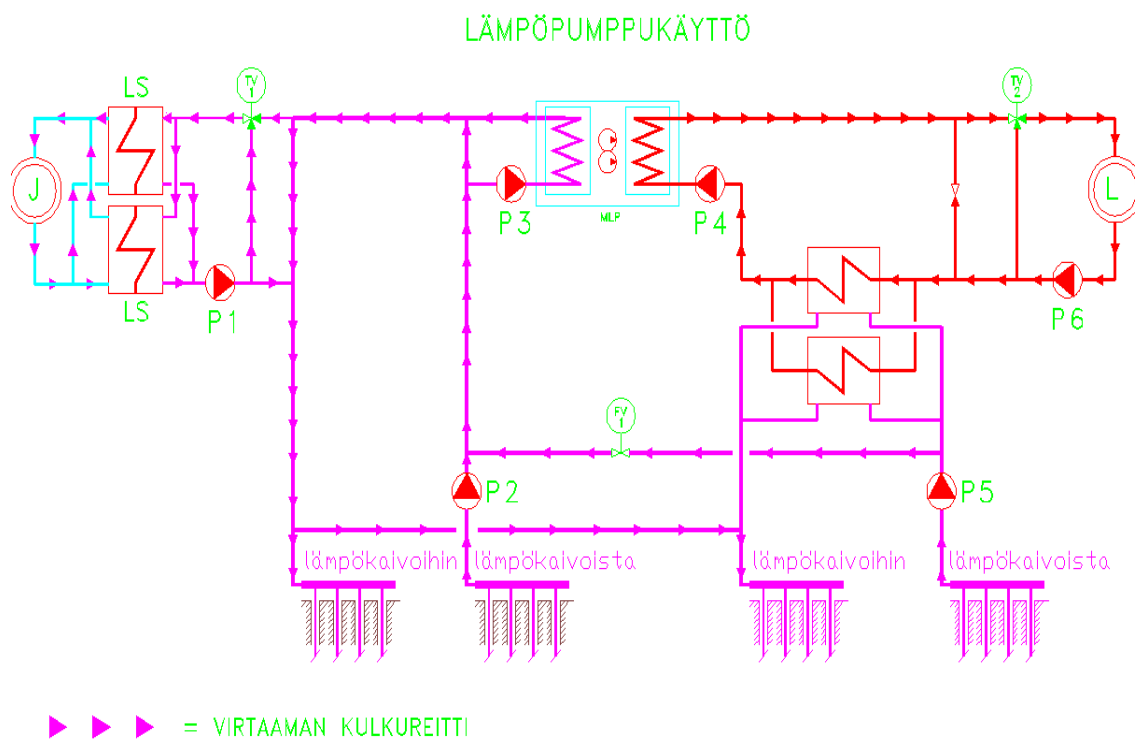
lämmitysverkoston tehontarvetta, on kojeen toiminta vaihdettava lämpöpumppukäytölle. Lämmityskauden lämpöpumppukäytössä lämmitysverkoston menoveden lämpötila pidetään asetusarvossaan samoin tavoin kuin höyrystinpuolella eli ohjaamalla kompressorien käyntiä lauhdutinpuolen lämpötilojen perusteella. Myös tässä vaihtoehdossa käytetään tarvittaessa lisänä kaukolämpöä. Höyrystinpuolella ylimääräinen kojeiston jäähdyttämä (ilmaisjäähdytystä) maapiirin paluuliuos ajetaan takaisin maahan koko porakenttään, ja tarvittava määrä liuosta kierrätetään lämmönsiirtimien kautta jäähdytysverkoston veden jäähdyttämiseksi (tekniset tilat). Tarvittaessa lämmönsiirtimeltä tulevaa lämpimämpää maapiirin menoliuosta shuntataan paluupuolelle.

Kuvissa 12–14 on esitetty järjestelmän toiminnan periaate virtausnuolien avulla eri käyttötilanteissa.

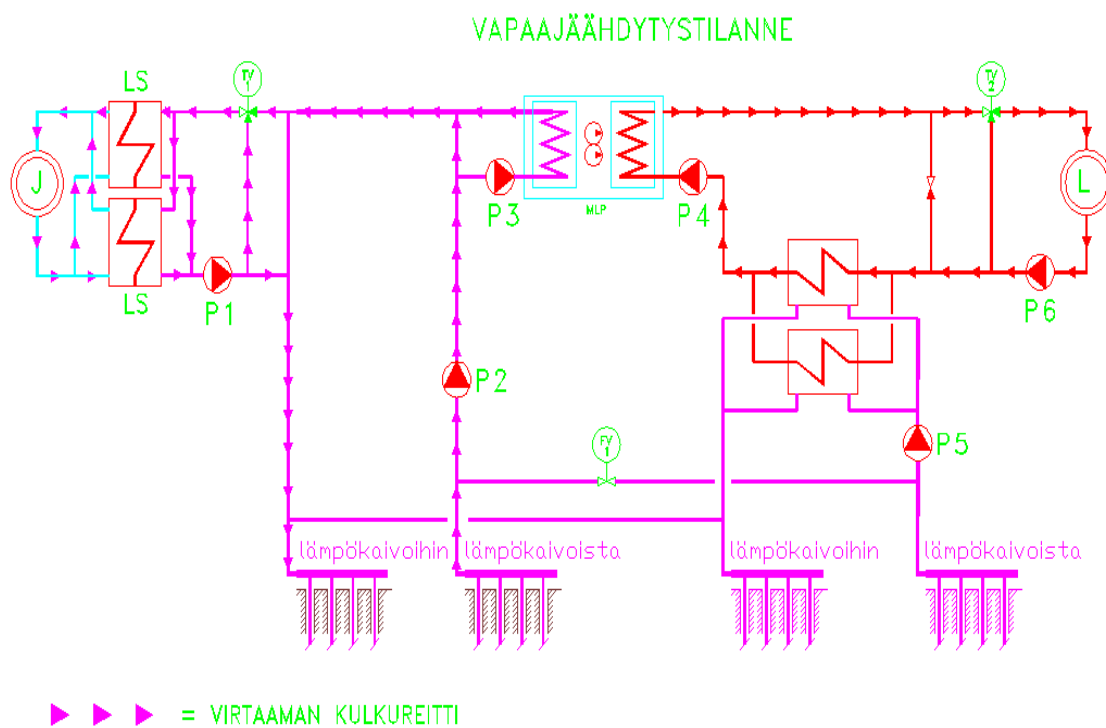
Taulukossa 6 on esitetty pumppujen käyttötilat eri tilanteissa.



Kuva 12. Järjestelmän toimintaperiaate vedenjäähdytinkäytössä.



Kuva 13. Järjestelmän toimintaperiaate lämpöpumppukäytössä.



Kuva 14. Järjestelmän toimintaperiaate vapaajäähdytystilanteessa.

Taulukko 6. Pumppujen käyttötilat.

Pumput	P1	P2	P3	P4	P5	P6
VJK-käyttö	käy	käy	käy	käy	*	käy
Vapaaäähdytys	käy	käy	**	**	seis	**
Lämpöpumppukäyttö	käy	käy	käy	käy	seis	käy

*) käy kompressorin käydessä

***) käy, koska vähäistä lämmöntarvetta esiintyy jäähdytyskaudellakin

7 Järjestelmien energiakäyttämisen tarkastelu

Lämmitysenergiaa saadaan kaukolämmöstä, lämpöpumppukäytöstä sekä vedenjäähdytinkäytössä syntyvästä ilmaisesta lauhde-energiasta. Jäähdytysenergiaa puolestaan voidaan saada vapaaäähdytyksestä, vedenjäähdytinkäytöstä sekä lämpöpumppukäytössä syntyvästä ilmaisesta höyrystinenergiasta.

Koska tiedossa on tuntikohtaiset energiankulutustiedot, voidaan tutkia, millä tavoin lämmitys- tai jäähdytysenergiaa kulloinkin tuotetaan. Tätä varten luotiin excel-tilukko jokaiselle järjestelmälle. Ote kunkin järjestelmän excelistä on esitetty liitteissä 2–4. Seuraavassa on selvitetty, millä tavoin järjestelmien energiakäyttämistä tarkasteltiin excel-tilukon laskelmien perusteella.

7.1 Tuntikohtaisten lämpökertoimen määrittäminen

Jotta lämpöpumppu- ja vedejäähdytinkäytön kuluttama sähkö saadaan selville, tulee tietää lämpökertoimet. Esimerkiksi yhden tunnin tarvittava sähköteho lämpöpumppukäytössä saadaan laskettua jakamalla kyseisen tunnin tarvitsema lämpöpumpun teho saman tunnin lämpökertoimella. Samalla tavalla lasketaan vedenjäähdytinkäytön tarvitsemat tuntikohtaiset sähkötehot.

Tuntikohtaisten lämpökertoimien määrittämistä varten muodostettiin kaava, joka olettaa lämpökertoimen muuttuvan lineaarisesti lämpötilaeron vaihdella. Kaavan luonnissa selvitetiin maalämpöpumpun lämpötilaerot ja lämpökertoimet sekä epäedullisimmassa että suotuisimmassa lämmitystilanteessa. Lämpötilaeroissa tarkasteltiin lauhduttimelle palaavan lämmitysverkoston veden lämpötilan ja höyrystimeltä lähtevän keruuliuksen

lämpötilan eroja. Epäedullisimmassa tilanteessa höyrystimeltä lähtevän liuoksen lämpötila on -3 °C ja lauhduttimelle palaavan veden lämpötila 35 °C , jolloin lämpötilaeroksi saadaan 38 °C . Lämpökertoimeksi samassa pisteessä saatiin 3,9. Suotuisimman lämmitystilanteen vastaavat arvot ovat 0 °C ja 20 °C , jolloin lämpötilaeroksi saadaan 20 °C ja lämpökertoimeksi 5,7. Apuna käytettiin Carrier Oy:n ECAT-valintaohjelmaa. Ohjelmaan syötettiin mitoitus tiedot tietylle laitteelle, jolloin saatiin muun tiedon lisäksi lämpökertoimet selville kussakin laitteen tehoportaassa. Kaavaa muodostettaessa käytettiin lämpökertoimen arvoa, jonka ECAT-ohjelma antoi maalämpöpumpun toimiessa täydellä teholla. Näin tehtiin, koska todettiin, että maalämpöpumpun toimiessa osatehoilla lämpökertoimet heilahtelevat eikä lineaarisuutta esiinny. Näin ollen voidaan todeta, että lämpökerrointa on tässä laskennassa kuvattuna riippuvana ainoastaan lämpötilaerosta.

Taulukosta 7 nähdään ECAT-ohjelmalla suoritettu osatehoajo eräälle lämpöpumppulaitteelle. Taulukosta 8 selviää edullisimmissa olosuhteissa tehty ajo samaisella laitteella kuin osatehoajossakin, ja taulukosta 9 nähdään epäedullisimmissa olosuhteissa tehty laiteajo.

Taulukko 7. ECAT-valintaohjelman erään laitteen osatehoajo.

* Evaporator				
Leaving T.	0		°C	
Delta T.	3		K	
Entering T.	3		°C	
* Condenser				
Entering T.	30		°C	
Delta T.	5		K	
Leaving T.	35		°C	
* T.H.R	690		kW	
* Part Load				
-1-	-2-	-3-	-4-	-5-
100	30	549	149	3,69
90	30	496	130	3,8
71	30	374	107	3,5
60	30	306	78	3,9
50	30	244	68	3,58
35	30	200	51	3,89
25	30	136	38,9	3,5
14	30	93	32,8	2,84
-1- Theoretical Unloading step (%)				
-2- Entering Condenser Temperature (°C)				
-3- Gross capacity (kW)				
-4- Unit absorbed power (kW)				
-5- COP				

Taulukossa T.H.R tarkoittaa lauhdutintehoa kyseisillä lämpötila-arvoilla. Taulukon alaosassa sarake 1 on tehoporras, sarake 2 on lauhduttimelle palaavan nesteen lämpötila, sarake 3 on jäähdytysteho, sarake 4 on sähköteho ja sarake 5 on kylmäkerroin. Lämpökerroin = kylmäkerroin + 1.

Taulukko 8. ECAT-valintaohjelman erään laitteen ajo edullisimmissa lämmitysolosuhteissa.

* Evaporator				
Leaving T.	0		°C	
Delta T.	3		K	
Entering T.	3		°C	
* Condenser				
Entering T.	20		°C	
Delta T.	5		K	
Leaving T.	25		°C	
T.H.R.	718		kW	
* Part Load				
-1-	-2-	-3-	-4-	-5-
100	20	596	127	4,7
-1-Theoretical Unloading step (%)				
-2-Entering Condenser Temperature (°C)				
-3-Gross capacity (kW)				
-4-Unit absorbed power (kW)				
-5-COP				

Taulukko 9. ECAT-valintaohjelman erään laitteen ajo epäedullisimmissa lämmitysolosuhteissa.

* Evaporator				
Leaving T.	-3		°C	
Delta T.	3		K	
Entering T.	0		°C	
* Condenser				
Entering T.	35		°C	
Delta T.	5		K	
Leaving T.	40		°C	
T.H.R.	622		kW	
* Part Load				
-1-	-2-	-3-	-4-	-5-
100	35	468	162	2,88
-1-Theoretical Unloading step(%)				
-2-Entering Condenser Temperature(°C)				
-3-Gross capacity(kW)				
-4-Unit absorbed power(kW)				
-5-COP				

Kuvasta 15 nähdään lämpökerroin lämpötilaerosta riippuvaisena. Suoran arvot saadaan laskettua kaavalla 3.

$$\text{COP} = a - k * b \quad (3)$$

jossa a on COP-arvo, kun ΔT (lauhduttimelle palaavan ja höyrystimeltä lähtevän nesteen lämpötilaero) on 0 °C

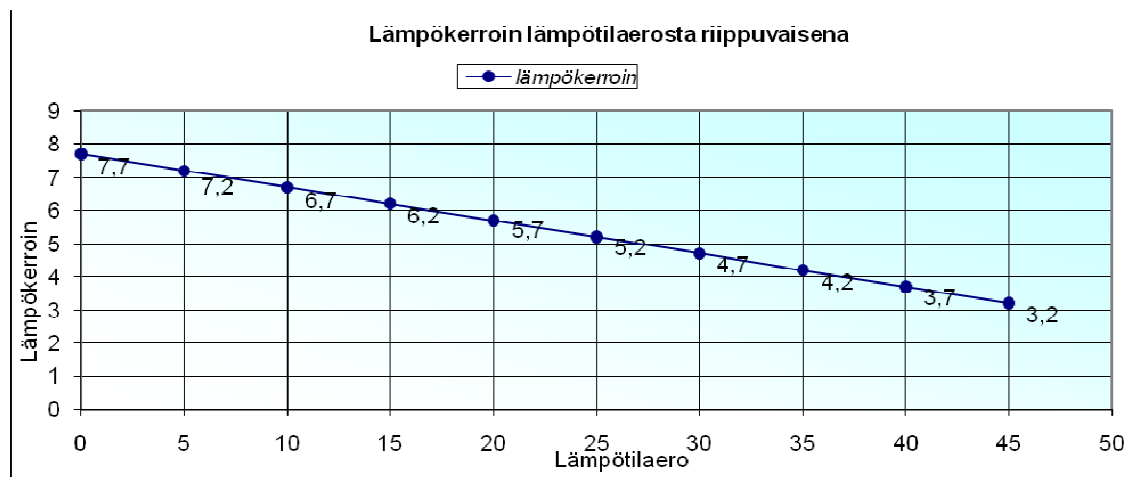
k on suoran kulmakerroin

b on lauhduttimelle palaavan ja höyrystimeltä lähtevän nesteen lämpötilaero, °C

Kulmakerroin määritetään kaavalla 4. Valitaan lämpötilaeroksi 40 °C, jolloin kuvasta nähdään, että lämpökerroin on 3,7.

$$k = (7,7 - 3,7) / 40 \text{ °C} = 0,1/\text{°C} \quad (4)$$

Kaavan tuloksesta selviää, että kulmakerroin on 0,1. Tämä tarkoittaa, että lämpötilaeron muuttuessa asteella, muuttuu lämpökerroin 0,1 yksikköä.



Kuva 15. Lämpökerroin lämpötilaerosta riippuvaisena.

7.1.1 Lämmitysverkoston lämpötilojen määrittäminen

Lämmitysverkoston lämpötilat voidaan laskea jokaiselle tunnille taulukon 10 avulla. Taulukossa ulkoilman lämpötilaksi on valittu esimerkkilaskelmia varten $-18,5 \text{ °C}$. Kaavalla 5 voidaan laskea lämmitysverkoston menoveden lämpötila ja kaavalla 6 lämmitysverkoston paluulämpötila, jota myös lämpökerrointa määritettäessä tarvitaan, edellä mainitulla ulkoilman lämpötilalla.

Poikkeuksen muodostaa B-järjestelmä vedenjäähdytinkäytössä, sillä tällöin käytetään ulkoilmalauhdutinta. Näin ollen lauhduttimelle palaava veden lämpötila lasketaan kaavalla 7, kun on VJK-käyttö.

Taulukko 10. Lämmitysverkoston meno- ja paluulämpötilojen laskentataulukko.

	maksimi	interpol.	minimi
ulko	-26	-18,5	20
meno	55	50,1	25
paluu	35	32,6	20

$$T_{\text{meno}} = 55 \text{ °C} - (-18,5 \text{ °C} - (-26 \text{ °C})) / (20 \text{ °C} - (-26 \text{ °C})) * (55 \text{ °C} - 25 \text{ °C}) = 50,1 \text{ °C} \quad (5)$$

$$T_{\text{paluu}} = 35 \text{ °C} - (-18,5 \text{ °C} - (-26 \text{ °C})) / (20 \text{ °C} - (-26 \text{ °C})) * (35 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) = 32,6 \text{ °C} \quad (6)$$

$$T_{\text{paluu}} = \varnothing_{\text{ilmaan}} / \varnothing_{\text{lauhduutin}} * \Delta T_{\text{lauhduutin}} + T_{\text{ulkoilma}} \quad (7)$$

jossa $\varnothing_{\text{ilmaan}}$ on VJK-käytössä ilmaan lauhdutettava teho, kW
 $\varnothing_{\text{lauhduutin}}$ on ulkolauhduutimen nimellisteho, kW
 $\Delta T_{\text{lauhduutin}}$ on ulkolauhduutimen nimellislämpötilaero, °C
 T_{ulkoilma} on ulkoilman lämpötila, °C

Ulkolauhduutimen nimellisteho on 960 kW. Tämä on saatu ECAT:n laiteajolla, jossa on käytetty jäähdytystehona nimellistä 800 kW:n tehoa. Ulkolauhduutimen nimellislämpötilaero on 8 °C.

7.1.2 Höyrystimeltä lähtevän liuoksen lämpötilan määrittäminen järjestelmässä A ja B

Höyrystimeltä lähtevää tunnitista lämpötilaa määritettäessä tulee ottaa huomioon onko järjestelmä lämpöpumppu- vai vedejäähdytinkäytöllä. Seuraavassa on esitetty laskelmat kummassakin tilanteessa.

7.1.2.1 Lämpöpumppukäytössä

Lämpöpumppukäytössä höyrystimeltä lähtevän liuoksen lämpötila laskettiin seuraavasti:

$$T_{\text{lähtevä höyr.}} = T_{\text{maapiiri}} - \Delta T_{\text{maapiiri}} / 2 \quad (8)$$

jossa T_{maapiiri} on maapiirin lämpötila, °C

$\Delta T_{\text{maapiiri}}$ on maapiirin meno- ja paluuliuoksen lämpötilaero, °C

Maapiirin lämpötilaeroksi on valittu 3 °C. Lämpötilaero jaetaan kahdella, jotta saadaan keskimääräinen liuoksen lämpötila. Näin menetellään, sillä EED-ohjelma (Earth Energy Designer) käyttää samoin keskimääräistä liuoksen lämpötilaa laskelmissaan.

Maapiirin lämpötilan määrittäminen

Maapiirin lämpötila laskettiin kaavalla 9.

$$T_{\text{maapiiri}} = T_{\text{maa}} + \dot{Q}_{\text{maahan}} / l_{\text{maapiiri}} / \lambda \quad (9)$$

jossa T_{maa} on maaperän lämpötila, °C

\dot{Q}_{maahan} on lämpövirta maahan, W

l_{maapiiri} on porareikien yhteispituus, m

λ on kaivon lämpöteho, W/m*K

Porareikien yhteispituus ja kaivon lämpöteho on saatu EED-ohjelmasta eräästä optimointisimuloinnin vaihtoehdosta Espoon sairaalan lähtötiedoilla. Porareikien yhteispituudeksi saatiin kyseisellä kokoonpanolla 34 000 metriä ja lämpötehoksi 7,3 W/m*K.

Maaperän lämpötilan määrittäminen

Maaperän lämpötila laskettiin kaavalla 10.

$$T_{\text{maa}} = T_{\text{maa alkutilanne}} + \dot{Q}_{\text{maahan}} / 1000 * \beta / l_{\text{maapiiri}} \quad (10)$$

jossa $T_{\text{maa alkutilanne}}$ on maaperän lämpötila ensimmäisen tunnin aikana, °C
 \dot{Q}_{maahan} on lämpövirta maahan, W
 1000 on kerroin, jolla yksikkö saadaan MWh:ksi
 β on maan jäähtymä lämpövirran funktiona, °C/MWh/m
 l_{maapiiri} on porareikien yhteispituus, m

Maaperän lämpötila ensimmäisen tunnin kohdalla ja maan jäähtymä lämpövirran funktiona on saatu EED-ohjelmasta edellä mainitulla optimointikokoonpanolla. Lämpötilaksi saatiin siis 5,6 °C ja maan jäähtymäksi lämpövirran funktiona 6,6 °C/MWh/m.

Maahan menevän lämpövirran määrittäminen

Kun selvitetään lämpövirtaa maahan, tulee ottaa huomioon onko kyseessä lämpöpumppu- vai vedenjäähdytinkäyttö. Lämpövirta maahan lämpöpumppukäytössä laskettiin kaavalla 11.

$$\dot{Q}_{\text{maahan}} = -\dot{Q}_{\text{lämpöpumppu}} + \dot{Q}_{\text{lämpöpumppu säh.}} + \dot{Q}_{\text{jäähd.}} \quad (11)$$

jossa $\dot{Q}_{\text{lämpöpumppu}}$ on lämpöpumpulla tuotettu teho, kW
 $\dot{Q}_{\text{lämpöpumppu säh.}}$ on lämpöpumpun sähköteho, kW
 $\dot{Q}_{\text{jäähd.}}$ on jäähdytystehontarve, kW

Lämpöpumpulla tuotetun tunnittaisen lämmitystehon määrittäminen on esitetty kappaleessa 7.2. Lämpöpumppukäytöllä tuotetusta tehosta tulee vähentää sähköteho ja jäähdytystehontarve. Sähköteho vähennetään, koska se menee lauhdutuspuolelle eikä sisälly näin ollen höyrystinpuolen porakenttään ajettavaan lämpövirtaan. Jäähdytystehontarve vähennetään myös, sillä jäähdytystehontarpeen verran tehoa lämpöpumppukäytön ilmaisjäähdytyksestä kierrätetään jäähdytysverkoston kautta, jolloin sieltä saadaan lämpöä, eikä tämä teho näin ollen ole maan kannalta negatiivista. Miinusmerkki laiteaan kaavan eteen sen takia, että lämpöpumppukäytössä syntyvä höyrystinpuolen lämpövirta maahan on maaperää jäähdyttävää eli negatiivista energiaa.

Lämpövirta maahan VJK-käytössä järjestelmässä A on vapaajäähdytyksellä tuotetun tehon osuuden sekä vedenjäähdyttimellä tuotetun osuuden ja sen sähkötehon osuuden

summa. Tästä summasta tulee vähentää VJK-käytössä hyödynnettävän ilmaislauhteen osuus.

Lämpövirta maahan VJK-käytössä järjestelmässä B on vapaajähdytyksellä tuotetun tehon osuus. Tässä siis huomioidaan ainoastaan vapaajähdytyksen osuus, sillä kompressorilla tuotettu loppu jäähdytysteho on maan energiataseen kannalta merkityksetöntä ja ylimääräinen lauhde ajetaan ulkoilmaan.

Vapaajähdytyksellä tuotetun tehon määrittäminen

Seuraavassa on selvitetty, kuinka vapaajähdytyksellä tuotettu teho on määritetty.

Jos jäähdytystehontarpeen ja lämpöpumppukäytössä hyödynnettävän ilmaisjäähdytyksen erotus on pienempi kuin maassa oleva sen hetkinen vapaajähdytyskapasiteetti, vapaajähdytyksellä tuotettu teho on edellä mainitun jäähdytystehontarpeen ja lämpöpumppukäytössä hyödynnettävän ilmaisjäähdytyksen erotus. Tässä tilanteessa siis voidaan hyödyntää vapaajähdytystä, jos lämpöpumppukäytön ilmaisjäähdytyksellä ei pystytä tuottamaan kaikkea jäähdytystehontarvetta. Jos vapaajähdytyskapasiteetti yhdessä ilmaisjäähdytyksen kanssa ei riitä tuottamaan kaikkea tarvittavaa jäähdytystehoa, on siirryttävä vedenjäähdytinkäyttöön.

Vapaajähdytyskapasiteetti eli maaperässä saatavissa oleva vapaajähdytysteho laskettiin kaavalla 12.

$$\dot{Q}_{\text{vapaajähhd.}} = \alpha * (T_{\text{jäähd.verk.}} - T_{\text{maa}}) \quad (12)$$

jossa α on maalämpöjärjestelmän kokonaiskonduktanssi huomioituna höyrystinpuolen lämmönsiirtimien ja porareikien vastus, kW/°C
 $T_{\text{jäähd.verk.}}$ on jäähdytysverkoston lämpötila, °C
 T_{maapiiri} on maan lämpötila, °C

Jäähdytysvesiverkoston lämpötilojen määrittäminen on esitetty kappaleessa 7.1.2.2. Maalämpöjärjestelmän lämmönjohtavuudeksi vastustekijät huomioiden saatiin 153 kW/°C. Se saatiin laskettua kaavalla 13.

$$\alpha = 1 / ((1 / (\lambda / 1000 * l_{\text{maapiiri}})) + (\Delta T_{\text{LS höyr.}} / \emptyset_{\text{LS höyr.}})) \quad (13)$$

jossa λ on kaivon lämpöteho, W/m*K
 1000 on kerroin, jolla saadaan watit muutettua kilowateiksi
 l_{maapiiri} on porareikien yhteispituus, m
 $\Delta T_{\text{LS höyr.}}$ on höyrystinpuolen lämmönsiirtimien lämpötilaero, °C
 $\emptyset_{\text{LS höyr.}}$ on jäähdytyslämmönsiirtimien teho, kW

Höyrystinpuolen jäähdytysvesiverkoston ja liuospiirin erottavan jäähdytyslämmönsiirtimien lämpötilaero on 2 °C. Jäähdytyslämmönsiirtimien teho on yhteensä 800 kW.

7.1.2.2 Vedenjäähdytinkäytössä

Vedenjäähdytinkäytössä höyrystimeltä lähtevän nesteen lämpötila laskettiin kaavalla 14.

$$T_{\text{lähtevä höyr.}} = T_{\text{jäähd.verk.}} - \Delta T_{\text{LS höyr.}} \quad (14)$$

jossa $T_{\text{jäähd.verk.}}$ on jäähdytysverkoston lämpötila, °C
 $\Delta T_{\text{LS höyr.}}$ on höyrystinpuolen lämmönsiirtimien lämpötilaero, °C

Jäähdytysvesiverkoston lämpötila pidetään vakiona +14 °C (kaavassa T_1) ulkolämpötilaan +16 °C (kaavassa T_3) asti. Tämän jälkeen aletaan jäähdytysverkoston vettä jäähdyttämään kaavan 14 mukaisesti ulkolämpötilaan 26 °C:sta asti. Vettä ei jäähdytetä kylmemmäksi kuin +12 °C.

$$T_{\text{jäähd.verk.}} = T_1 - (T_2 - T_3) * k \quad (15)$$

jossa T_1 on jäähdytysvesiverkoston vakio lämpötila +16 °C:een asti, °C
 T_2 on ulkolämpötila, °C
 T_3 on ulkolämpötila, johon asti jäähdytysverkoston veden lämpötila on vakio +14 °C, °C
 k on jäähdytysverkoston veden lämpötilamuutoskerroin

Lämpötilamuutoskerroin saadaan selville seuraavasta laskelmasta:

$$(14 \text{ °C} - 12 \text{ °C}) / (26 \text{ °C} - 16 \text{ °C}) = 0,2 \quad (16)$$

7.1.3 Höyrystimeltä lähtevän liuoksen lämpötilan määrittäminen järjestelmässä C

7.1.3.1 Lämpöpumppukäytössä

Lämpöpumppukäytössä höyrystimeltä lähtevän nesteen lämpötila laskettiin seuraavasti:

$$T_{\text{lähtävä höyr.}} = (T_{\text{maapiiri lauhd.}} + T_{\text{maapiiri vapaajähd.}}) / 2 - \Delta T_{\text{maapiiri}} / 2 \quad (17)$$

jossa $T_{\text{maapiiri lauhd.}}$ on maapiirin lämpötila lauhdutuspiirissä, °C
 $T_{\text{maapiiri vapaajähd.}}$ on maapiirin lämpötila vapaajähdytyspiirissä, °C
 $\Delta T_{\text{maapiiri}}$ on maapiirin meno- ja paluuliuoksen lämpötilaero, °C

Maapiirien lämpötilojen määrittäminen

Maapiirin lämpötila lauhdutuspiirissä laskettiin kaavalla 18.

$$T_{\text{maapiiri lauhd.}} = T_{\text{maa lauhd.}} + (\emptyset_{\text{maahan lauhd. ilman jäähd.kuorm.}} + \emptyset_{\text{maahan lauhd. jäähdytyskuormasta}}) / l_{\text{maapiiri lauhd.}} * 1000 / \lambda \quad (18)$$

jossa $T_{\text{maa lauhd.}}$ on maaperän lämpötila lauhdutus kentässä, °C
 $\emptyset_{\text{maahan lauhd. ilman jäähd.kuorm.}}$ on lämpövirta maahan lauhdutus kentässä ilman jäähdytyskuormaa, kW
 $\emptyset_{\text{maahan lauhd. jäähdytyskuormasta}}$ on lämpövirta maahan lauhdutus kentässä jäähdytyskuormasta, kW
 $l_{\text{maapiiri lauhd.}}$ on porareikien pituus lauhdutus kentässä, m
 1000 on kerroin, jolla saadaan kilowattit muutettua wateiksi
 λ on kaivon lämpöteho, W/m*K

Porareikien pituus lauhdutus kentässä on 17 000 metriä eli puolet kokonaismäärästä. Kaivon lämpöteho on sama kuin muissakin järjestelmissä eli 7,3 W/m*K.

Maapiirin lämpötila vapaajähdytyspiirissä laskettiin kaavalla 19.

$$T_{\text{maapiiri vapaajähd.}} = T_{\text{maa vapaajähd.}} + (\emptyset_{\text{maahan vapaajähd. ilman jäähd.kuorm.}} + \emptyset_{\text{maahan vapaajähd. jäähdytyskuormasta}}) / l_{\text{maapiiri vapaajähd.}} * 1000 / \lambda \quad (19)$$

jossa $T_{\text{maa vapaajähd.}}$ on maaperän lämpötila vapaajähdytyskentässä, °C
 $\emptyset_{\text{maahan vapaajähd. ilman jäähd.kuorm.}}$ on lämpövirta maahan vapaajähdytyskentässä ilman jäähdytyskuormaa, kW
 $\emptyset_{\text{maahan vapaajähd. jäähdytyskuormasta}}$ on lämpövirta maahan vapaajähdytyskentässä jäähdytyskuormasta, kW
 $l_{\text{maapiiri vapaajähd.}}$ on porareikien pituus vapaajähdytyskentässä, m
 λ = kaivon lämpöteho, W/m*K

Porareikien pituus vapaajähdytyskentässä on 17 000 metriä eli puolet kokonaismäärästä. Kaivon lämpöteho on sama kuin muissakin järjestelmissä eli 7,3 W/m*K.

Maaperän lämpötilojen määrittäminen

Maaperän lämpötila lauhdutuskentässä laskettiin kaavalla 20.

$$T_{\text{maa lauhd.}} = T_{\text{maa alkutilanne lauhd.}} + \emptyset_{\text{maahan kok.}} / 1000 * \beta / l_{\text{maapiiri kok.}} + \emptyset_{\text{maahan lauhd. jäähdytyskuormasta}} / 1000 * \beta / (l_{\text{maapiiri kok.}} - l_{\text{maapiiri lauhd.}}) \quad (20)$$

jossa $T_{\text{maa alkutilanne lauhd.}}$ on maaperän lämpötila ensimmäisen tunnin aikana lauhdutuskentässä, °C
 $\emptyset_{\text{maahan kok.}}$ on lämpövirta maahan koko kentässä, kW
 1000 on kerroin, jolla yksikkö saadaan MWh:ksi
 β on maan jäähtymä lämpövirran funktiona, °C/MWh/m
 $l_{\text{maapiiri kok.}}$ on porareikien yhteispituus, m
 $\emptyset_{\text{maahan lauhd. jäähdytyskuormasta}}$ on lämpövirta maahan lauhdutuskentässä jäähdytyskuormasta, kW
 $l_{\text{maapiiri lauhd.}}$ on porareikien pituus lauhdutuskentässä, m

Maaperän lämpötila vapaajähdytyskentässä laskettiin kaavalla 21.

$$T_{\text{maa vapaajäähd.}} = T_{\text{maa alkutilanne vapaajäähd.}} + \frac{\dot{Q}_{\text{maahan kok.}}}{1000} * \beta / l_{\text{maapiiri kok.}} + \frac{\dot{Q}_{\text{maahan vapaajäähd.}}}{1000} * \beta / l_{\text{maapiiri vapaajäähd.}} \quad (21)$$

jossa $T_{\text{maa alkutilanne vapaajäähd.}}$ on maaperän lämpötila ensimmäisen tunnin aikana vapaajäähdytyskentässä, °C

$\dot{Q}_{\text{maahan kok.}}$ on lämpövirta maahan koko kentässä, kW

1000 on kerroin, jolla yksikkö saadaan MWh:ksi

β on maan jäähtymä lämpövirran funktiona, °C/MWh/m

$l_{\text{maapiiri kok.}}$ on porareikien yhteispituus, m

$\dot{Q}_{\text{maahan vapaajäähd. jäähdityskuormasta}}$ on lämpövirta maahan vapaajäähdytyskentässä jäähdityskuormasta, kW

$l_{\text{maapiiri vapaajäähd.}}$ on porareikien pituus vapaajäähdytyskentässä, m

Maahan menevien lämpövirtojen määrittäminen

Kun selvitetään lämpövirtaa maahan, tulee ottaa huomioon, onko kyseessä lämpöpumppu- vai vedenjäähdytinkäyttö. Lämpöpumppukäytössä on käytössä koko kenttä, ja siihen ajettava lämpövirta ilman jäähdityskuorman huomiointia lasketaan seuraavasti:

$$\dot{Q}_{\text{maahan kok.}} = - \dot{Q}_{\text{lämpöpumppu}} + \dot{Q}_{\text{lämpöpumppu säh.}} \quad (22)$$

jossa $\dot{Q}_{\text{lämpöpumppu}}$ on lämpöpumpulla tuotettu teho, kW

$\dot{Q}_{\text{lämpöpumppu säh.}}$ on lämpöpumpun sähköteho, kW

Lämpöpumpulla tuotetun tunnittaisen lämmitystehon määrittäminen esitetään luvussa 7.2. Lämpöpumppukäytöllä tuotetusta tehosta tulee vähentää tässä tapauksessa sähköteho. Sähköteho vähennetään, koska se menee hyödyksi lauhdutuspuolelle. Miinusmerkki laitetaan kaavan eteen sen takia, että lämpöpumppukäytössä syntyvä lämpövirta maahan on maaperää jäähdyttävää eli negatiivista energiaa.

Koska käytössä on koko porakenttä, on lämpövirta sekä lauhdutus- että vapaajäähdytyskenttään jaettu kummankin kentän maapiirien lämpötilojen suhteessa. Lämpövirta lauhdutuskenttään kokonaislämpövirrasta ilman jäähdityskuormaa on laskettu seuraavasti:

$$\dot{Q}_{\text{maahan lauhd.}} = \dot{Q}_{\text{maahan kok.}} * (T_{\text{maapiiri lauhd.}} / T_{\text{maapiiri lauhd.}} + T_{\text{maapiiri vapaajäähd.}}) \quad (23)$$

jossa $\dot{Q}_{\text{maahan kok.}}$ on lämpövirta maahan koko kentässä, kW

$T_{\text{maapiiri lauhd.}}$ on maapiirin lämpötila lauhdutuskentässä, °C

$T_{\text{maapiiri vapaajäähd.}}$ on maapiirin lämpötila vapaajähdytyskentässä, °C

Lämpövirta vapaajähdytyskenttään kokonaislämpövirrasta laskettiin samoin tavoin lämpötilojen suhteessa.

$$\dot{Q}_{\text{maahan vapaajäähd.}} = \dot{Q}_{\text{maahan kok.}} * (T_{\text{maapiiri vapaajäähd.}} / T_{\text{maapiiri lauhd.}} + T_{\text{maapiiri vapaajäähd.}}) \quad (24)$$

Lämpövirta lauhdutuskenttään vedenjäähdytinkäytössä saadaan, kun vedenjäähdyttimen ja sen sähkötehon osuuden summasta vähennetään lämmitysverkostoon hyödyksi menevä lauhdeteho.

Lämpövirta maahan vapaajähdytyskentässä jäähdytyskuormasta tarkoittaa sekä lämpöpumppukäytön aikaista ilmaisjäähdytystä, että vapaajähdytyksellä tuotettua energiaa. Näistä kumpikin on maaperän kannalta lämmittävää energiaa.

Vapaajähdytyksellä tuotetun tehon määrittäminen

Vapaajähdytyksellä tuotetun tehon määrittäminen on tehty samaan tapaan kuin muissakin järjestelmissä. Vapaajähdytyskapasiteetti on laskettu järjestelmässä seuraavalla kaavalla:

$$\dot{Q}_{\text{vapaajäähd.}} = \alpha * (T_{\text{jähd.verk.}} - T_{\text{maapiiri vapaajäähd.}}) \quad (25)$$

jossa α on maalämpöjärjestelmän lämmönjohtavuus huomioon otettuna höyrystinpuolen lämmönsiirtimien ja porareikien vastus, kW/°C

$T_{\text{jähd.verk.}}$ on jäähdytysverkoston lämpötila, °C

$T_{\text{maapiiri vapaajäähd.}}$ on maapiirin lämpötila vapaajähdytyskentässä, °C

Järjestelmässä C maapiirin pituutena maalämpöjärjestelmän lämmönjohtavuutta laskettaessa käytetään 17 000 metriä eli vapaajähdytyspiirin pituutta.

7.1.3.2 Vedenjäähdytinkäytössä

Höyrystimeltä lähtevä lämpötila vedenjäähdytinkäytössä lasketaan samoin kuin kahdessa muussakin järjestelmässä.

7.2 Lämpöpumpulla tuotetun lämmitystehon määrittäminen

Tuntikohtaisten lämpöpumpun lämmitystehojen määrittämistä varten muodostettiin kaava samaan tapaan kuin lämpökertoimien osalla Carrierin ECAT-mitoitusohjelman avulla käyttämällä mitoituksessa tiettyä laitetta. Epäedullisimmassa tilanteessa (ΔT 38 °C) lämpöpumpun tehoksi saatiin 622 kW. Suotuisimmassa lämmitystilanteessa (ΔT 20°C) lämpöpumpun tehoksi saatiin 718 kW.

Kuvasta 16 nähdään lämpökerroin lämpötilaerosta riippuvaisena. Kaavasta 26 voidaan laskea lämpöpumpun tuottama teho lämpötilaerosta riippuvaisena.

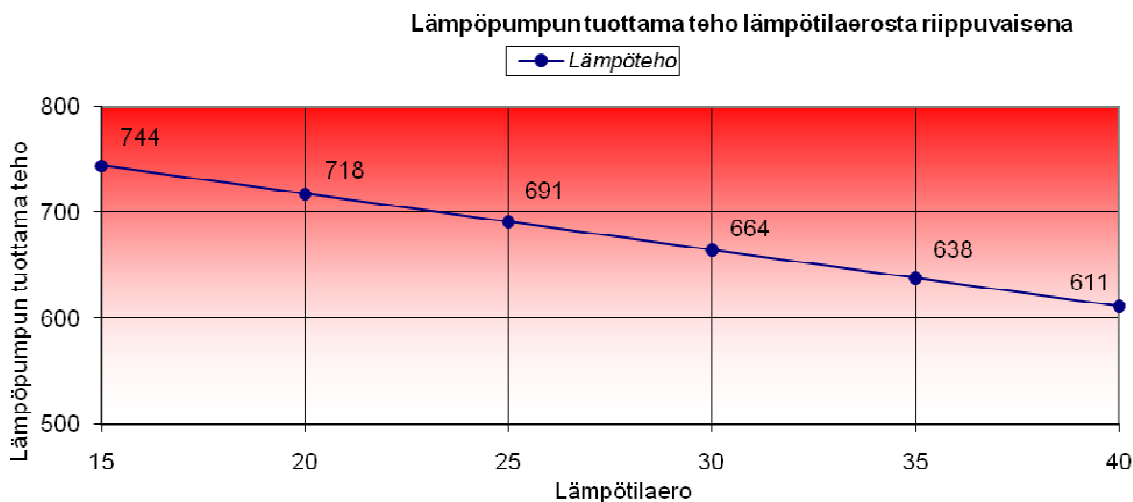
$$\dot{Q}_{\text{lämpöpumppu}} = 622 \text{ kW} + 5,3 \text{ kW/K} * (38 \text{ °C} - \Delta T) \quad (26)$$

jossa 622 on lämpöpumpun teho epäedullisimmassa ΔT :ssä, kW
 5,3 on tehon riippuvuus lämpötilaeron muutoksesta, kW/°C
 38 on epäedullisimman tilanteen ΔT
 ΔT on lauhduttimelle palaavan ja höyrystimeltä lähtevän nesteen lämpötilaero, °C

Kaavassa esiintyvä vakioluku 5,3 kW/°C (tehon riippuvuus lämpötilaeron muutoksesta) on laskettu ECAT:n kahden ajon perusteella seuraavasti:

$$(718 \text{ kW} - 622 \text{ kW}) / (38 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) = 5,3 \text{ kW/°C} \quad (27)$$

Sanallisesti selittäen tarkoitetaan siis sitä, että jokainen asteen muutos lämpötilaerossa tarkoittaa tehon muutosta 5,3 kW:n verran.



Kuva 16. Lämpökerroin lämpötilaerosta riippuvaisena.

7.3 Järjestelmän A energiajakaumat

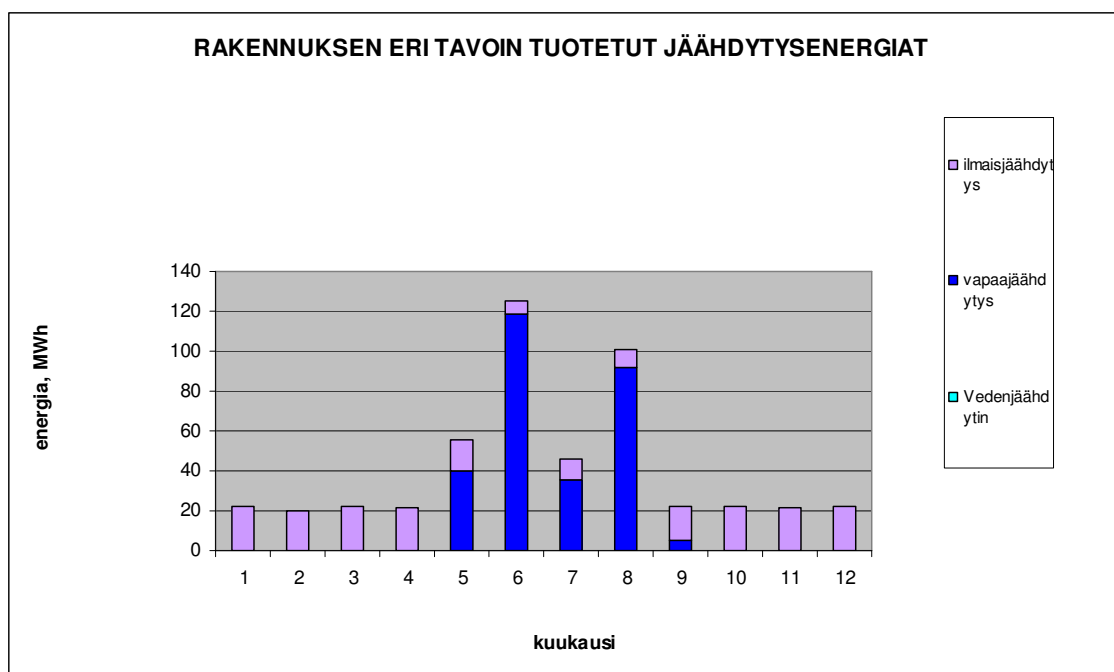
Kuvista 17–20 nähdään excel-taulukon laskelmista saatua grafiikkaa A-järjestelmän osalta. Kuvasta 17 selviävät rakennuksen eri tavoin tuotetut jäähdytysenergiat. Tässä järjestelmässä maasta saatavaa vapaajäähdytysenergiaa voidaan hyödyntää erittäin paljon jäähdytyskaudella, eikä vedenjäähdytinkäyttöä tarvita oikeastaan lainkaan. Lämmityskaudella hyödynnetään lämpöpumpunkäytön ilmaisjäähdytystä teknisten tilojen jäähdytykseen.

Kuvasta 18 nähdään rakennuksen eri tavoin tuotetut lämmitysenergiat. Lämpöpumpunkäytöllä voidaan tuottaa suurin osa rakennuksen lämmitysenergiasta. Huippupakkasilla myös kaukolämmölle on tarvetta. Vedenjäähdytinkäytössä syntyvää ilmaislauhdetta ei vuoden aikana juurikaan saada hyödynnettyä lämmitysverkostossa, vaan joudutaan ajamaan maaperään johtuen kesäaikaisesta vähäisestä lämmöntarpeesta sekä vähäisestä vedenjäähdytinkäytöstä. Vedenjäähdytinkäytössä syntyvä ilmaislauhdeenergia siis koostuu tuotetun jäähdytysenergian ja siihen kuluneen sähköenergian summasta.

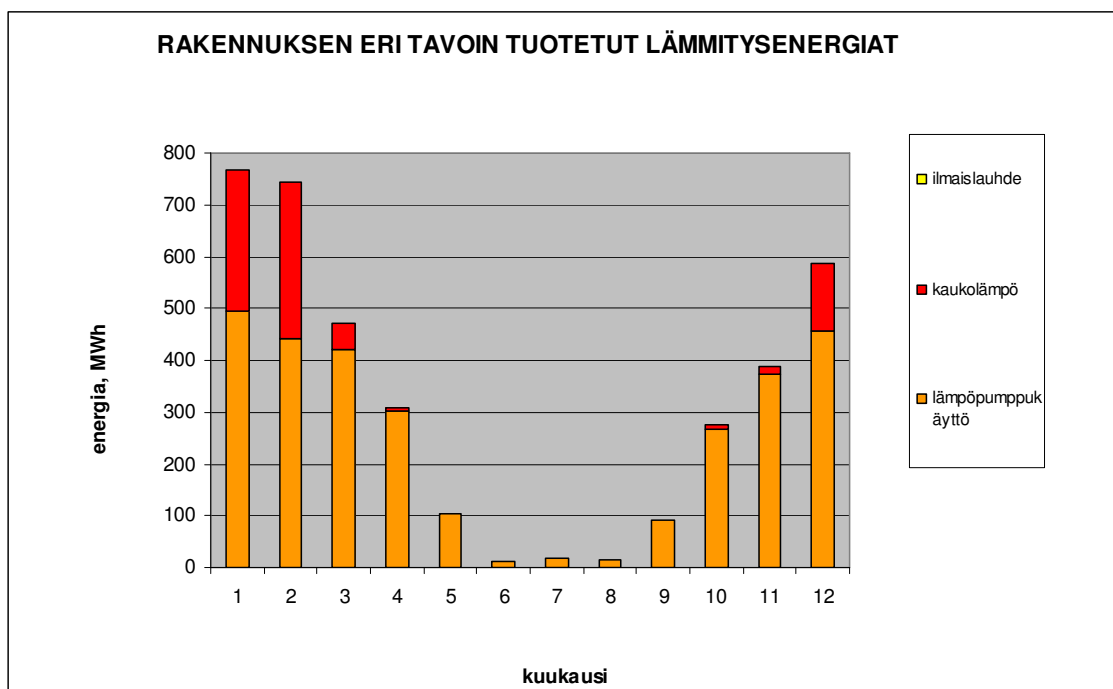
Kuvassa 19 on esitetty maahan menevät ja maasta otettavat energiamäärät. Maahan ajettava energia on maaperää lämmittävää rakennuksen jäähdytyslaitteilta palaavaa energiaa vapaajäähdytyskäytössä. Lisäksi lämpöpumpunkäytön jäähdytysverkostossa hyödynnettävä ilmaisjäähdytys on maaperää lämmittävää energiaa. Maasta otettavaa

eli maaperää jäähdyttävää energiaa hyödynnetään lämpöpumppukäytössä. Tämä on siis lämpöpumppukäytössä syntyvää jäähdytysverkostossa hyödyntämätöntä ilmaisjäähdytysenergiaa, joka kiertää maaperän kautta takaisin lämpöpumpulle. Koska maasta otettava energiamäärä on huomattavasti suurempi kuin maahan ajettava maaperää lämmittävä energiamäärä, tämä johtaa maaperän jäähtymiseen vuosien varrella. Lämpöpumppukäytön kannalta tämä ei ole hyvä asia, koska lämpökerroin huononee. Maan negatiivinen tase johtuu siis siitä, että vuosittain tarvittavaa jäähdytysenergiaa on rakennuksessa huomattavasti vähemmän kuin lämmitysenergiaa.

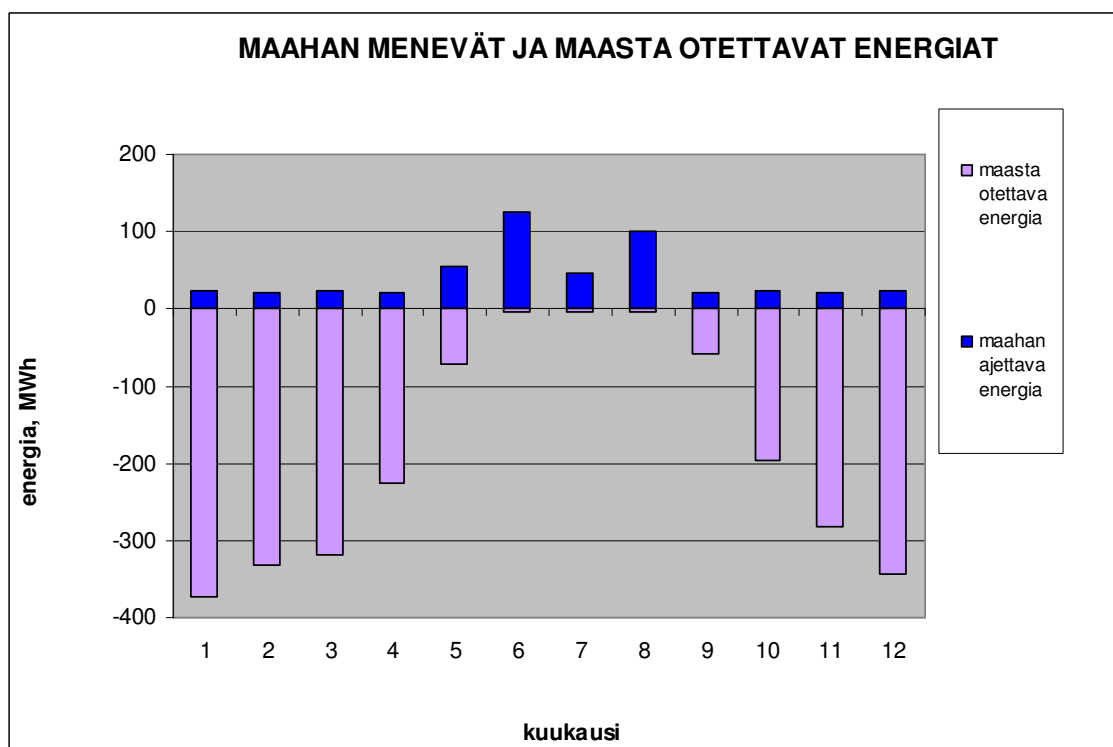
Kuvasta 20 nähdään kulutettu sähköenergia sekä lämpöpumppu- että vedenjäähdytin-käytössä.



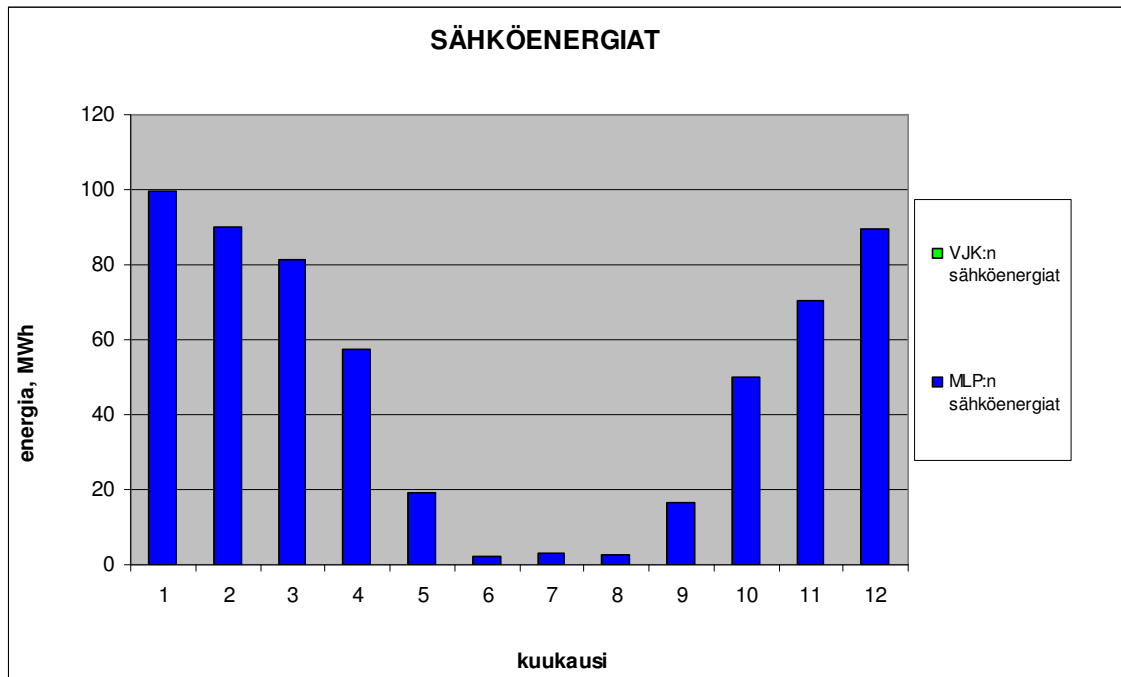
Kuva 17. Rakennuksen eri tavoin tuotetut jäähdytysenergiat, MWh.



Kuva 18. Rakennuksen eri tavoin tuotetut lämmitysenergiat, MWh.



Kuva 19. Maahan menevät ja maasta otettavat energiat, MWh.



Kuva 20. Kojeiston kuluttama sähköenergia, MWh.

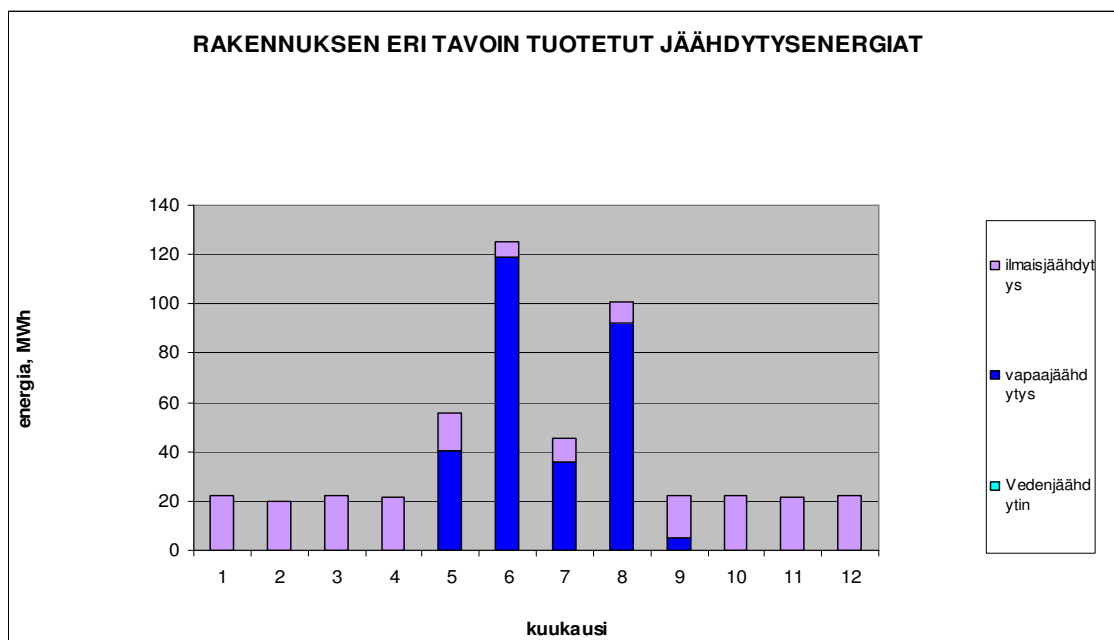
7.4 Järjestelmän B energiajakaumat

Kuvista 21–25 nähdään excel-taulukon laskelmista saatua grafiikkaa B-järjestelmän osalta. Kuvasta 21 selviävät rakennuksen eri tavoin tuotetut jäähdytysenergiat. Myös tässä järjestelmässä maasta saatavaa vapaajäähdytysenergiaa voidaan hyödyntää erittäin paljon jäähdytyskaudella, eikä vedenjäähdytinkäyttöä tarvita oikeastaan lainkaan. Lämmityskaudella hyödynnetään lämpöpumppukäytön ilmaisjäähdytystä teknisten tilojen jäähdytykseen.

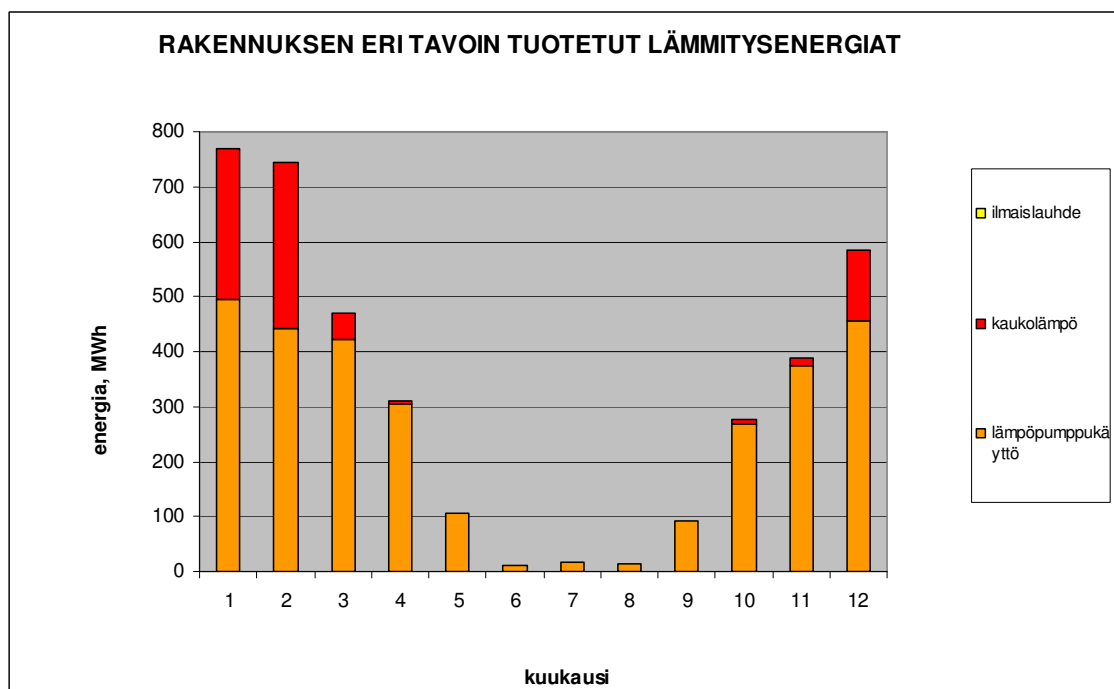
Kuvasta 22 nähdään rakennuksen eri tavoin tuotetut lämmitysenergiat. Vedenjäähdytinkäytössä syntyvää ilmaislauhdetta ei vuoden aikana juurikaan saada hyödynnettyä lämmitysverkostossa, johtuen kesäaikaisesta vähäisestä lämmöntarpeesta sekä vähäisestä vedenjäähdytinkäytöstä. Kuvasta 23 nähdään, että suurin osa ilmaislauhteesta lauhdutetaan ulkoilmaan.

Kuvassa 24 on esitetty järjestelmän maahan menevät ja maasta otettavat energiamäärät.

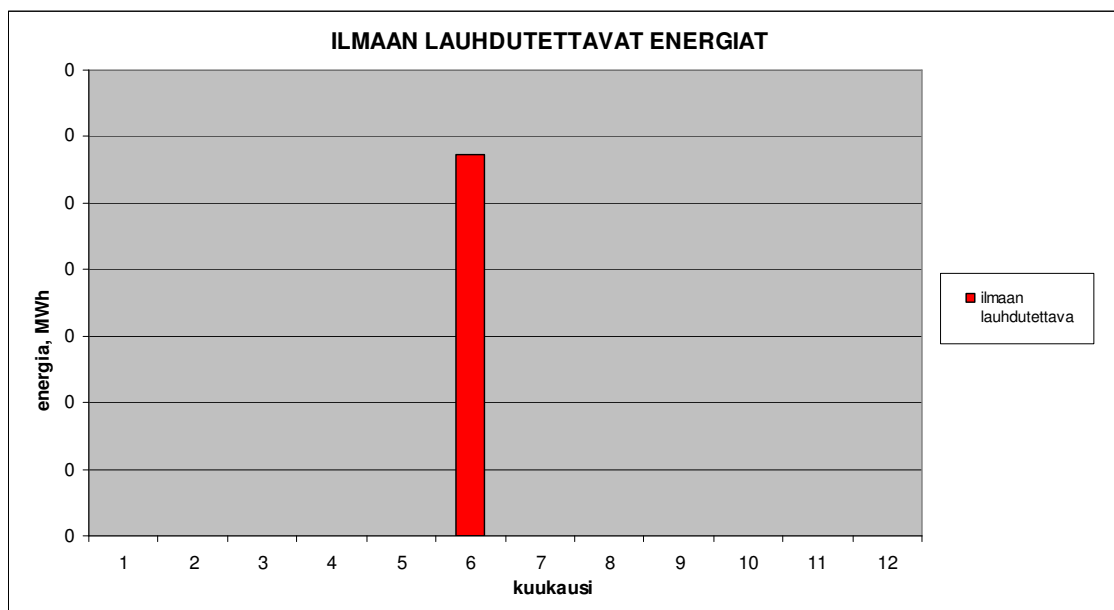
Kuvasta 25 nähdään kulutettu sähköenergia sekä lämpöpumppu- että vedenjäähdytin-
käytössä.



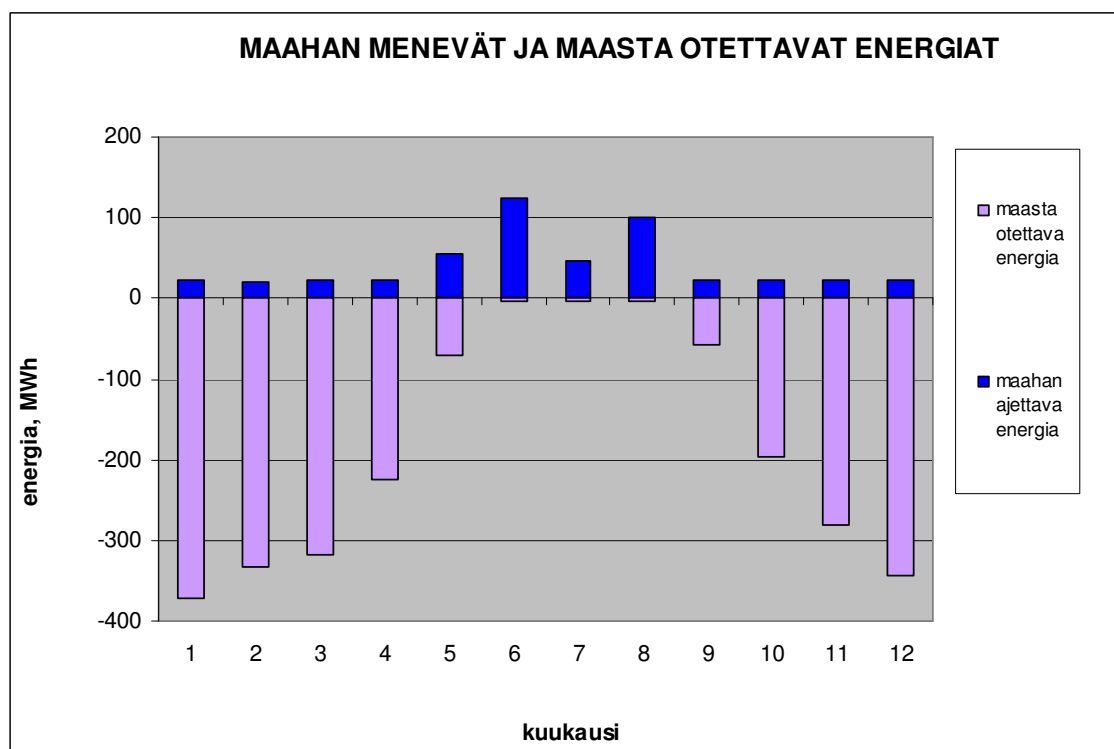
Kuva 21. Rakennuksen eri tavoin tuotetut jäähdytysenergiat, MWh.



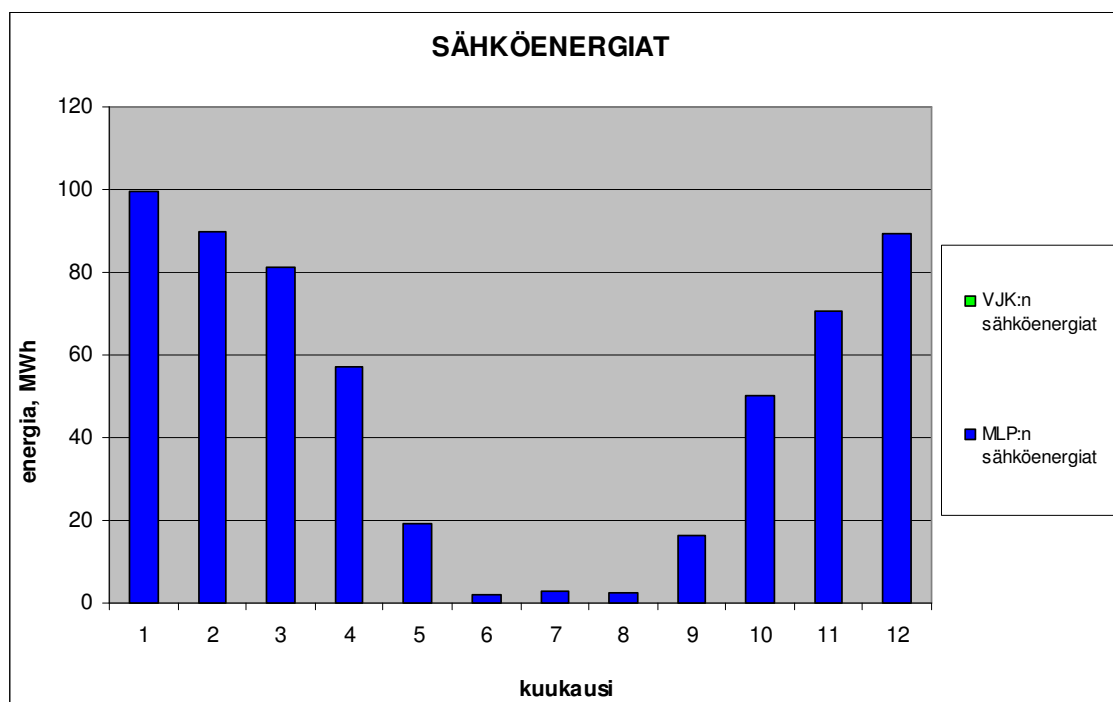
Kuva 22. Rakennuksen eri tavoin tuotetut lämmitysenergiat, MWh.



Kuva 23. Ilmaan lauhdutettava energia, MWh.



Kuva 24. Maahan menevät ja maasta otettavat energiat, MWh.



Kuva 25. Kojiston kuluttama sähköenergia, MWh.

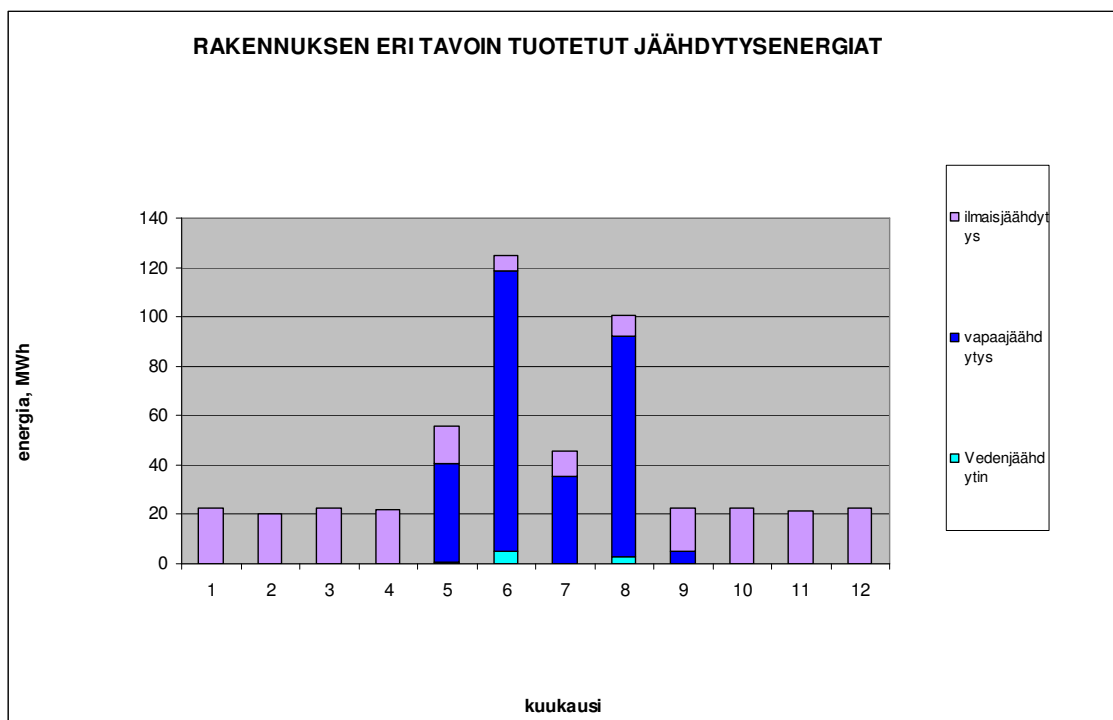
7.5 Järjestelmän C energiajakaumat

Kuvista 26–30 nähdään excel-taulukon laskelmista saatua grafiikkaa C-järjestelmän osalta. Kuvasta 26 selviävät rakennuksen eri tavoin tuotetut jäähdytysenergiat. Tässäkin järjestelmässä maasta saatavaa vapaajäähdytysenergiaa voidaan hyödyntää jäähdytyskaudella enimmäkseen. Vedenjäähdytinkäyttö on todella vähäistä. Lämmityskaudella hyödynnetään lämpöpumpunkäytön ilmaisjäähdytystä teknisten tilojen jäähdytykseen.

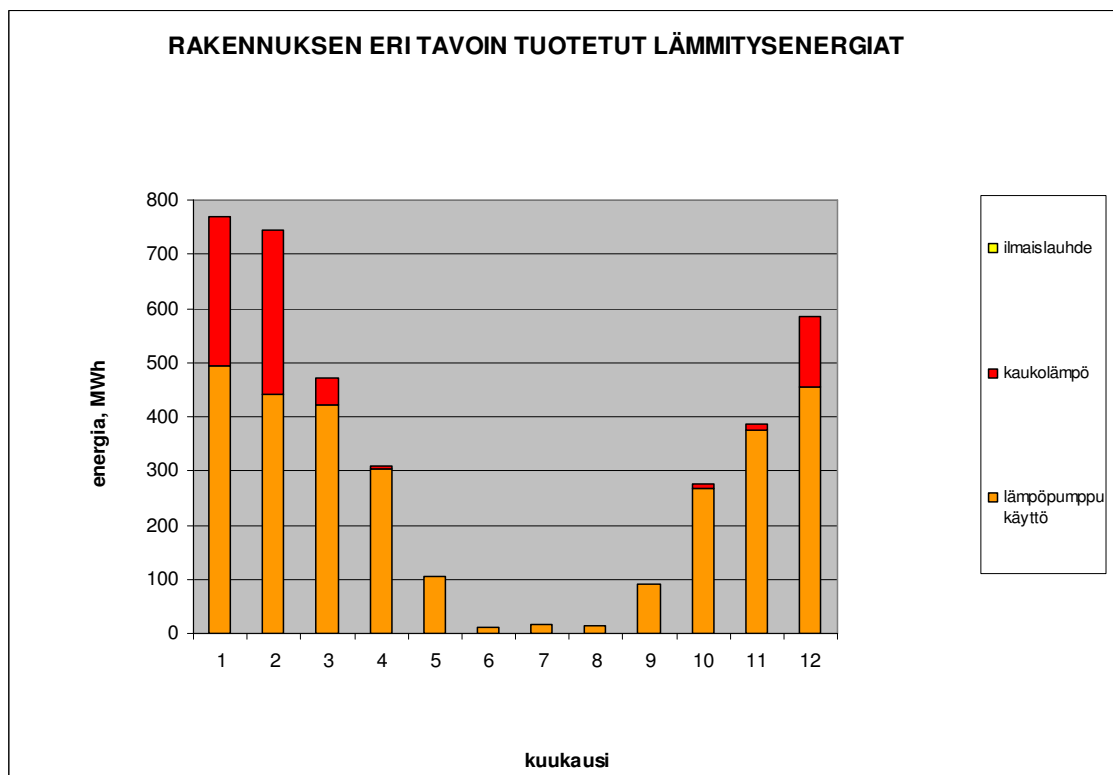
Kuvasta 27 nähdään rakennuksen eri tavoin tuotetut lämmitysenergiat. Vedenjäähdytinkäytössä syntyvää ilmaislauhdetta ei vuoden aikana juurikaan saada hyödynnettyä lämmitysverkostossa johtuen kesäaikaisesta vähäisestä lämmöntarpeesta sekä vähäisestä vedenjäähdytinkäytöstä.

Kuvasta 28 nähdään maahan menevät ja maasta otettavat energiamäärät lauhdutus-kentässä ja kuvasta 29 vapaajäähdytyskentässä.

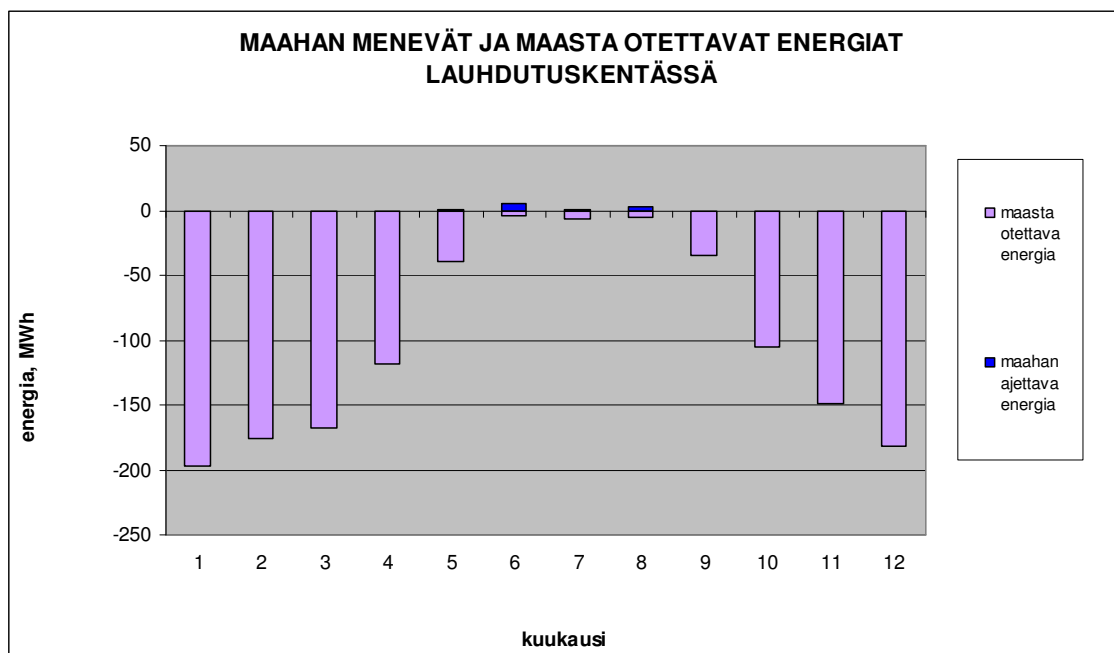
Kuvasta 30 nähdään kulutettu sähköenergia sekä lämpöpumppu- että vedenjäähdytin-
käytössä.



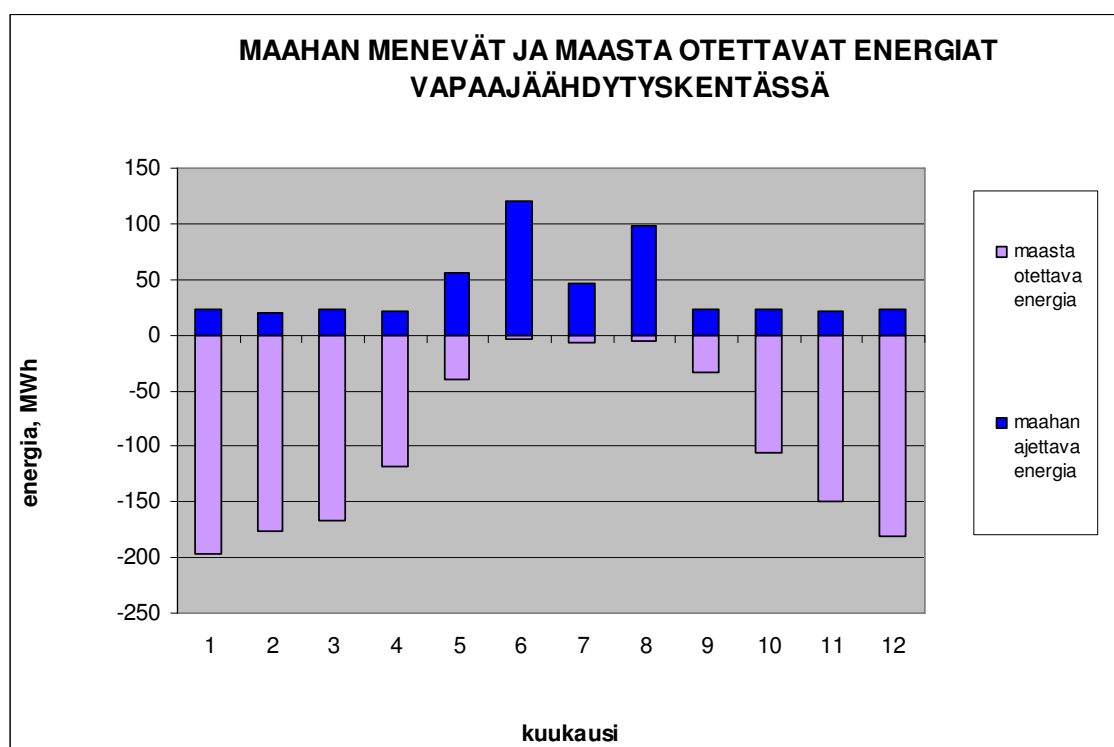
Kuva 26. Rakennuksen eri tavoin tuotetut jäähdytysenergiat, MWh.



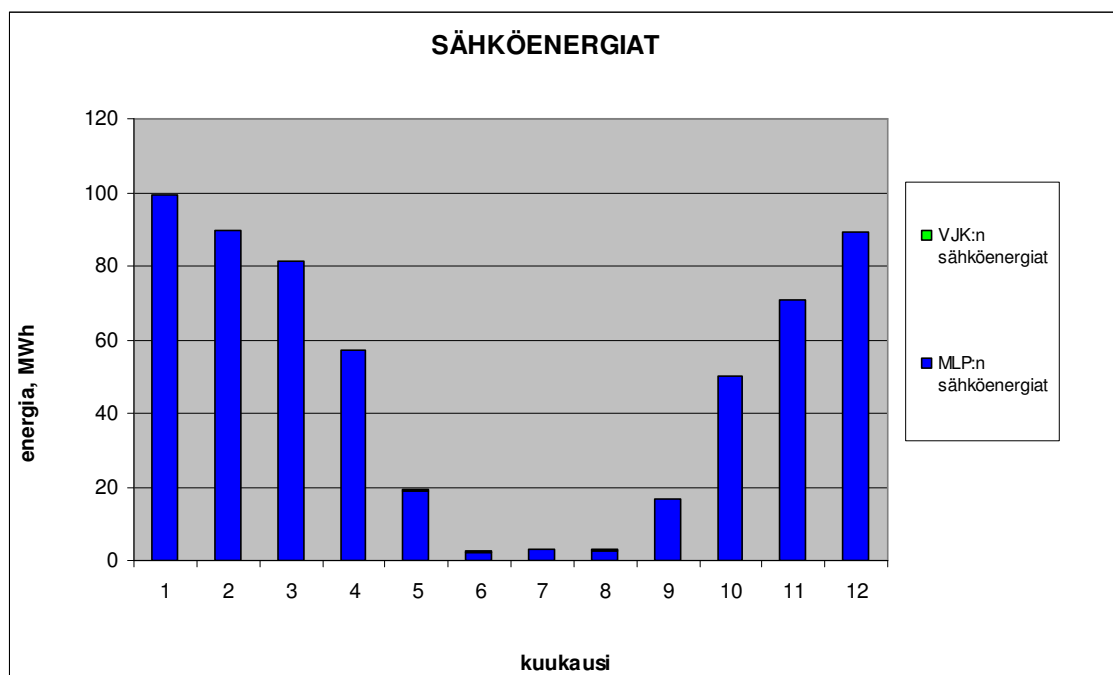
Kuva 27. Rakennuksen eri tavoin tuotetut lämmitysenergiat, MWh.



Kuva 28. Maahan menevät ja maasta otettavat energiat lauhdutuskentässä, MWh.



Kuva 29. Maahan menevät ja maasta otettavat energiat vapaajäähdytyskentässä, MWh.



Kuva 30. Kojeiston kuluttama sähköenergia, MWh.

8 Järjestelmien kustannusvertailu

Kustannusvertailussa huomioitiin järjestelmien investointikustannukset ja käyttökustannukset. Järjestelmien käyttöiäksi on ajateltu 25 vuotta. Kustannustiedot nähdään taulukosta 11. Investointikustannuksiin sisältyvät lämpöpumput, lämmönsiirtimet, porareivät sekä järjestelmässä B liuosjäähdyttimet. Lisäksi mukaan on laskettu laitteistojen vaatima teknisen tilan tarve, jonka hintana on käytetty 2000 €/m².

Energiakustannuksia määritettäessä kaukolämmön hintana on käytetty arvoa 50 €/MWh ja sähkön hintana 80 €/MWh.

Taulukko 11. Järjestelmien kustannustiedot

Järjestelmä	A	B	C
Käyttökustannukset (€/a)	85 304	85 304	85 412
Käyttökustannukset 25 a	2 132 601	2 132 602	2 135 308
Investointikustannukset (€)	1 205 762	1 430 076	1 205 762
Kokonaiskustannukset 25 a	3 338 363	3 562 678	3 341 070

9 Suositeltava järjestelmä

Kustannusvertailun 25 vuoden ajalta sekä energijakaumataulukoiden vertailun perusteella suositeltava maalämpöpumppujärjestelmä Espoon sairaalarakennukseen on järjestelmä A halvimpana vaihtoehtona. Energijakaumataulukot eivät juuri eroa toisistaan, ja esimerkiksi vapaajäähdytyksen osuus järjestelmillä on suurinpiirtein samaa luokkaa. Tämä johtuu siitä, että sairaalan jäähdytysverkoston lämpötilat voidaan pitää melko korkeina, ja että rakennuksen jäähdytysenergian tarve lämmitysenergiantarpeeseen verrattuna on pieni. Näin ollen maasta saatavaa vapaajäähdytystä on tarjolla myös järjestelmässä A runsaasti, sillä tällaisessa järjestelmässä maaperä jäähtyy jatkuvasti. Vedenjäähdytinkäyttö on todella vähäistä, joten lauhdelämpö ei pääse maaperää lämmittämään.

10 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli tutkia kolmea eri kytkentätavoilla toteutettua maalämpöjärjestelmää ja ehdottaa parasta ratkaisua järjestelmien keskinäisen kustannusvertailun ja maaperän energiataseiden tutkimisen jälkeen Espoon Puolarmetsään rakennettavaan sairaalan ja seniorikeskuksen uudisrakennukseen.

Työn lähtötietoina käytettiin IDA Indoor Climate and Energy (IDA-ice) -ohjelman suorittamia tunnittaisia teho- ja energiasimulointeja. Lähtötietojen rinnalle kehiteltiin järjestelmäkohtaiset excel-taulukot, joista nähtiin järjestelmien tunnittaiset teho-/energiakäyttämistiedot. Energiakulutustietojen perusteella saatiin selvitettyä käyttökustannukset ja järjestelmien pääkomponenttien hintaselvityksellä koottiin kasaan investointikustannukset.

Lopputuloksena vertailusta päädyttiin ehdottamaan kytkentävaihtoehtoa A. Kyseinen vaihtoehto tuntui työn alkuvaiheessa ajateltuna kaikkein huonoimmalta vaihtoehdolta, koska oletettiin, että vapaajäähdytystä ei saada juurikaan hyödynnettyä vedenjäähdytinkäytössä sivutuotteena syntyvän lauhde-energian maahan ajon takia. Kuitenkin rakennuksen vähäinen jäähdytysenergiantarve lämmitysenergiantarpeeseen verrattuna (maaperä jäähtyy) sekä jäähdytysverkoston korkeat lämpötilat, ja sitä kautta veden-

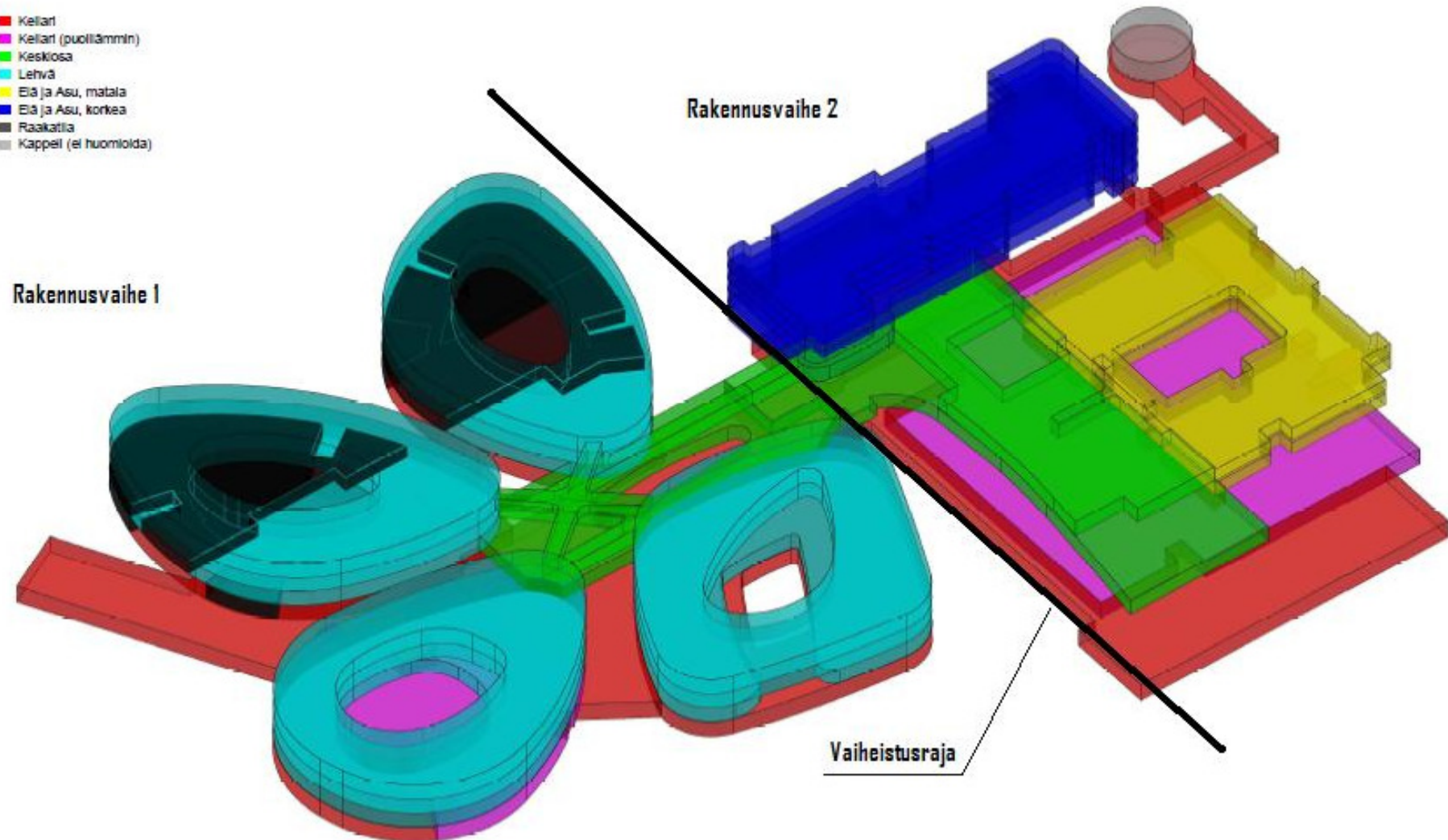
jäähdytinkäytön vähäinen tarve mahdollistivat tässä tilanteessa järjestelmän A paremmuuden kahteen muuhun kytkentään nähden.

Lähteet

- 1 Maalämpöpumppu 2011. Verkkodokumentti. Tampereen teknillinen yliopisto. <<http://www.tut.fi/units/me/ener/julkaisut/LP-integrointi.pdf>>. Luettu 6.1.2011.
- 2 Kallio, Jarmo 2008. Maa- ja kalliolämpö (geoenergia) suurkohteissa. Verkkodokumentti. Geologian tutkimuskeskus. <http://projects.gtk.fi/export/sites/projects/energiaseminaari/esitykset/12-Kallio_Jarmo-Kalajoki.pdf>. Luettu 13.1.2011.
- 3 Maalämpöpumppu 2011. Verkkodokumentti. Suomen Porauspalvelu Oy. <<http://www.suomenporauspalvelu.fi/maalampo>>. Luettu 7.1.2011.
- 4 Hakala, P., Kaappola, E. 2007. Kylmälaitoksen suunnittelu. Opetushallitus.
- 5 Energiankäytön tehostaminen 2007. Verkkodokumentti. Espoon kaupunki. <<http://www.espoo.fi/default.asp?path=1;28;11866;7969;63047;78551;78553>>. Luettu 23.1.2011.
- 6 Maalämpöpumpun mitoitus ja valinta 2004. Verkkodokumentti. Rakentaja.fi. <<http://www.rakentaja.fi/index.asp?s=/kuluttaja/lampoassa/rr2004/mitoitusjavalinta.htm>>. Luettu 23.1.2011.
- 7 Juvonen, Janne 2009. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Verkkodokumentti. <<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=108367>>. Luettu 24.1.2011.
- 8 Maalämpöpumppu 2011. Verkkodokumentti. SULPU. <http://www.sulpu.fi/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=114>. Luettu 31.1.2011.
- 9 Aittomäki, Antero 2001. Lämpöpumppulämmitys Verkkodokumentti. Tampereen teknillinen yliopisto. <<http://www.tut.fi/units/me/ener/julkaisut/LP-opas.PDF>>. Luettu 10.1.2011.
- 10 Maalämpö 2011. Verkkodokumentti. Senera Oy. <<http://www.senera.fi/Maalampo>>. Luettu 10.1.2011
- 11 Corbyn, Piers 2011. Ilmastoasiaa Verkkodokumentti. Weather Action. <<http://www.weatheraction.com/pages/pv.asp?p=wact3&fsize=0>>. Luettu 24.1.2011.
- 12 Ilmastoasiaa 2010. Verkkodokumentti. Youtube.com. <http://www.youtube.com/watch?v=kYGWaxDT_6U>. Luettu 24.1.2011
- 13 Junkala Mika. Maalämpöpumppulämmitys Ikea tavarataloissa. Verkkodokumentti. Tampereen teknillinen korkeakoulu. <<https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/8000/Junkala.Mika.pdf?sequence=2>>. Luettu 7.1.2011.

Liite 1: Espoon sairaalan rakennusvaiheistus

- Kellari
- Kellari (puolilämmin)
- Keskiosia
- Lehvä
- Elä ja Asu, matala
- Elä ja Asu, korkea
- Raakatila
- Kappeili (ei huomioida)



Liite 2: Ote järjestelmän A excel-taulukosta

								JÄRJESTELMÄ A																
								JÄÄHDYTYSENERGIAA																
Kuukausi	Aika, tuntia	Ulkoilman lämpötila	lämpövirta maahan karkeasti lämpöpumppukäytössä, kW	maan lämpötila	maapiirin lämpötila	jäähdytysverkon lämpötila	vapaajäähdytyskapasiteetti	Lämpöpumppukäyttö ON(1)/OFF(0)	Lämpöpumppukäytöllä tuotetun lämmön osuus, kW	Lämpöpumpun sähköteho lämmityskäytössä, kW	Kaukolämmön osuus, kW	Vedenjäähdytinkäytön hyödynnettävä ilmaislauhde, kW	VJK-käytössä maahan ajettava lauhde, kW	Vedenjäähdytinkäyttö ON(1)/OFF(0)	Vedenjäähdyttimeen osuus, kW	vedenjäähdytyksen sähköteho	lämpöpumppukäytössä syntyvä jäähdytysteho	Lämpöpumppukäytön hyödynnettävä ilmaisjäähdytys, kW	Lämpövirta maahan lämpöpumppukäytössä, kW	Vapaajäähdytyksen osuus, kW	Lauhduttimelle palaava	Höyrystimeltä lähtevä	COP (lämpö)	kylmäkerroin
1	0	-18,5	-454	5,7	3,9	14	1 551 273	1	663	142	933	0	0	0	0	0	522	30	-492	0	32,6	2,4	4,7	3,7
1	1	-18,5	-492	5,7	3,7	14	1 574 705	1	663	142	919	0	0	0	0	0	521	30	-491	0	32,6	2,2	4,7	3,7
1	2	-18,5	-491	5,7	3,7	14	1 574 040	1	663	142	922	0	0	0	0	0	521	30	-491	0	32,6	2,2	4,7	3,7
1	3	-19,5	-491	5,7	3,7	14	1 574 023	1	661	143	1 032	0	0	0	0	0	518	30	-488	0	32,9	2,2	4,6	3,6
1	4	-20,5	-488	5,7	3,7	14	1 572 636	1	659	143	1 111	0	0	0	0	0	516	30	-486	0	33,2	2,2	4,6	3,6
1	5	-21,4	-486	5,7	3,7	14	1 571 232	1	658	144	1 164	0	0	0	0	0	514	30	-484	0	33,5	2,2	4,6	3,6
1	6	-22,0	-484	5,7	3,7	14	1 569 987	1	657	144	1 152	0	0	0	0	0	513	30	-483	0	33,7	2,2	4,6	3,6
1	7	-22,5	-483	5,7	3,8	14	1 569 141	1	656	144	1 481	0	0	0	0	0	511	30	-481	0	33,9	2,3	4,5	3,5
1	8	-22,9	-481	5,7	3,8	14	1 568 472	1	655	145	1 475	0	0	0	0	0	511	30	-481	0	34,0	2,3	4,5	3,5
1	9	-22,1	-481	5,7	3,8	14	1 567 902	1	657	144	1 344	0	0	0	0	0	512	30	-482	0	33,7	2,3	4,6	3,6
1	10	-21,3	-482	5,7	3,8	14	1 569 099	1	658	144	1 253	0	0	0	0	0	514	30	-484	0	33,5	2,3	4,6	3,6
1	11	-20,4	-484	5,7	3,7	14	1 570 284	1	659	143	1 166	0	0	0	0	0	516	30	-486	0	33,2	2,2	4,6	3,6
1	12	-20,3	-486	5,7	3,7	14	1 571 520	1	660	143	1 095	0	0	0	0	0	517	30	-487	0	33,1	2,2	4,6	3,6
1	13	-20,2	-487	5,7	3,7	14	1 571 672	1	660	143	1 076	0	0	0	0	0	517	30	-487	0	33,1	2,2	4,6	3,6
1	14	-20,0	-487	5,7	3,7	14	1 571 830	1	660	143	1 076	0	0	0	0	0	517	30	-487	0	33,0	2,2	4,6	3,6
1	15	-20,4	-487	5,7	3,7	14	1 572 119	1	659	143	1 159	0	0	0	0	0	516	30	-486	0	33,2	2,2	4,6	3,6

Liite 3: Ote järjestelmän B excel-taulukosta

			JÄRJESTELMÄ B																						
			MAA					LÄMMITYSENERGIAA							JÄÄHDYTYSENERGIAA										
kuukausi	Aika, tuntia	Ulkoilman lämpötila	lämpövirta maahan karkeasti, kW	maan lämpötila	maapiirin lämpötila	jäähdytysverkon lämpötila	vapaajäähdytyskapasiteetti, W	Lämpöpumppukäyttö ON(1)/OFF(0)	Lämpöpumppukäytöllä tuotetun lämmön osuus, kW	Lämpöpumpun sähköteho lämmityskäytössä, kW	Kaukolämmön osuus, kW	Vedenjäähdytinkäytön hyödynnettävä ilmaislauhe, kW	VJK-käytössä ilmaan lauhdutettava teho, kW	Vedenjäähdytinkäyttö ON(1)/OFF(0)	Vedenjäähdyttimen osuus, kW	vedenjäähdytyksen sähköteho	lämpöpumppukäytössä syntyvä jäähdytysteho	Lämpöpumppukäytön hyödynnettävä ilmaisjäähdytys, kW	Lämpövirta maahan lämpöpumppukäytössä, kW	Vapaajäähdytyksen osuus, kW	Lauhduttimelle palaava	Höyrystimeltä lähtevä	COP (lämpö)	kylmäkerroin	
1	0	-18,5	-454	5,7	3,9	14	1 551 273	1	663	142	933	0	0	0	0	0	522	30	-492	0	32,6	2,4	4,7	3,7	
1	1	-18,5	-492	5,7	3,7	14	1 574 705	1	663	142	919	0	0	0	0	0	521	30	-491	0	32,6	2,2	4,7	3,7	
1	2	-18,5	-491	5,7	3,7	14	1 574 040	1	663	142	922	0	0	0	0	0	521	30	-491	0	32,6	2,2	4,7	3,7	
1	3	-19,5	-491	5,7	3,7	14	1 574 023	1	661	143	1 032	0	0	0	0	0	518	30	-488	0	32,9	2,2	4,6	3,6	
1	4	-20,5	-488	5,7	3,7	14	1 572 636	1	659	143	1 111	0	0	0	0	0	516	30	-486	0	33,2	2,2	4,6	3,6	
1	5	-21,4	-486	5,7	3,7	14	1 571 232	1	658	144	1 164	0	0	0	0	0	514	30	-484	0	33,5	2,2	4,6	3,6	
1	6	-22,0	-484	5,7	3,7	14	1 569 987	1	657	144	1 152	0	0	0	0	0	513	30	-483	0	33,7	2,2	4,6	3,6	
1	7	-22,5	-483	5,7	3,8	14	1 569 141	1	656	144	1 481	0	0	0	0	0	511	30	-481	0	33,9	2,3	4,5	3,5	
1	8	-22,9	-481	5,7	3,8	14	1 568 472	1	655	145	1 475	0	0	0	0	0	511	30	-481	0	34,0	2,3	4,5	3,5	
1	9	-22,1	-481	5,7	3,8	14	1 567 902	1	657	144	1 344	0	0	0	0	0	512	30	-482	0	33,7	2,3	4,6	3,6	
1	10	-21,3	-482	5,7	3,8	14	1 569 099	1	658	144	1 253	0	0	0	0	0	514	30	-484	0	33,5	2,3	4,6	3,6	
1	11	-20,4	-484	5,7	3,7	14	1 570 284	1	659	143	1 166	0	0	0	0	0	516	30	-486	0	33,2	2,2	4,6	3,6	
1	12	-20,3	-486	5,7	3,7	14	1 571 520	1	660	143	1 095	0	0	0	0	0	517	30	-487	0	33,1	2,2	4,6	3,6	
1	13	-20,2	-487	5,7	3,7	14	1 571 672	1	660	143	1 076	0	0	0	0	0	517	30	-487	0	33,1	2,2	4,6	3,6	
1	14	-20,0	-487	5,7	3,7	14	1 571 830	1	660	143	1 076	0	0	0	0	0	517	30	-487	0	33,0	2,2	4,6	3,6	
1	15	-20,4	-487	5,7	3,7	14	1 572 119	1	659	143	1 159	0	0	0	0	0	516	30	-486	0	33,2	2,2	4,6	3,6	

Liite 4: Ote järjestelmän C excel-taulukosta

Kuukausi	Aika, tuntia	Ulkoilman lämpötila	MAA										JÄRJESTELMÄ C																	
			lämpövirta maahan karkeasti koko kentässä ilman jäähdytyskuormaa, kW	lämpövirta maahan lauhdutuskentässä jäähdytyskuormasta	lämpövirta maahan lauhdutuskentässä koko kentän osuudesta ilman jäähdytyskuormaa	lämpövirta maahan karkeasti vapaajäähdytyksen- tässä jäähdytyskuormasta	lämpövirta maahan vapaajäähdytyksessä koko kentän osuudesta ilman jäähdytyskuormaa	maan lämpötila, LAUHDUTUSKENTÄSSÄ	maan lämpötila, VAPAAJÄÄHDYTYSKENTÄSSÄ	maapiirin lämpötila, LAUHDUTUSPIIRI	Maapiirin lämpötila, VAPAAJÄÄHDYTYSPIIRI	jäähdytysverkon lämpötila	vapaajäähdytyskapasiteetti, kW	Lämpöpumpunkäyttö ON(1)/OFF(0)	Lämpöpumpunkäytöllä tuotetun lämmön osuus, kW	Lämpöpumpun sähköteho lämmityksessä, kW	Kaukolämmön osuus, kW	Vedenjäähdytyksen hyödynnettävä ilmaislauhde, kW	VJK-käytössä lauhdekehtään ajettava lämpövirta, kW	Vedenjäähdytyksen käyttö ON(1)/OFF(0)	Vedenjäähdyttimeen osuus, kW	vedenjäähdytyksen sähköteho jäähdytyksessä	lämpöpumpunkäytössä syntyvä jäähdytysteho	Lämpöpumpunkäytön hyödynnettävä ilmaisjäähdytys, kW	Vapaajäähdytyksen osuus, kW	Lauhdukselle palaava	Höyrystimeltä lähtevä	COP (lämpö)	kylmäkerroin	
1	0	-18,5	-484		-242		-242	5,7	5,7	3,8	3,8	14	971	1	663	142	934	0	0	0	0	0	0	521	30	0	32,6	2,3	4,7	3,7
1	1	-18,5	-521	0,0	-260	30	-260	5,7	5,7	3,6	3,8	14	962	1	663	142	919	0	0	0	0	0	0	521	30	0	32,6	2,2	4,7	3,7
1	2	-18,5	-521	0,0	-260	30	-260	5,7	5,7	3,6	3,8	14	962	1	663	142	922	0	0	0	0	0	0	521	30	0	32,6	2,2	4,7	3,7
1	3	-19,5	-521	0,0	-260	30	-260	5,7	5,7	3,6	3,8	14	962	1	661	143	1 032	0	0	0	0	0	0	518	30	0	32,9	2,2	4,6	3,6
1	4	-20,5	-518	0,0	-259	30	-259	5,7	5,7	3,6	3,9	14	961	1	659	143	1 111	0	0	0	0	0	0	516	30	0	33,2	2,2	4,6	3,6
1	5	-21,4	-516	0,0	-258	30	-258	5,7	5,7	3,6	3,9	14	960	1	658	144	1 164	0	0	0	0	0	0	514	30	0	33,5	2,2	4,6	3,6
1	6	-22,0	-514	0,0	-257	30	-257	5,7	5,7	3,6	3,9	14	959	1	657	144	1 152	0	0	0	0	0	0	513	30	0	33,7	2,2	4,6	3,6
1	7	-22,5	-513	0,0	-256	30	-256	5,7	5,7	3,6	3,9	14	959	1	656	144	1 481	0	0	0	0	0	0	511	30	0	33,9	2,3	4,5	3,5
1	8	-22,9	-511	0,0	-256	30	-256	5,7	5,7	3,6	3,9	14	958	1	655	145	1 475	0	0	0	0	0	0	511	30	0	34,0	2,3	4,5	3,5
1	9	-22,1	-511	0,0	-255	30	-255	5,7	5,7	3,6	3,9	14	958	1	657	144	1 344	0	0	0	0	0	0	512	30	0	33,7	2,3	4,6	3,6
1	10	-21,3	-512	0,0	-256	30	-256	5,7	5,7	3,6	3,9	14	959	1	658	144	1 253	0	0	0	0	0	0	514	30	0	33,5	2,3	4,6	3,6
1	11	-20,4	-514	0,0	-257	30	-257	5,7	5,7	3,6	3,9	14	960	1	659	143	1 166	0	0	0	0	0	0	516	30	0	33,2	2,2	4,6	3,6
1	12	-20,3	-516	0,0	-258	30	-258	5,7	5,7	3,6	3,9	14	960	1	660	143	1 095	0	0	0	0	0	0	517	30	0	33,1	2,2	4,6	3,6
1	13	-20,2	-517	0,0	-258	30	-258	5,7	5,7	3,6	3,9	14	960	1	660	143	1 076	0	0	0	0	0	0	517	30	0	33,1	2,2	4,6	3,6
1	14	-20,0	-517	0,0	-258	30	-258	5,7	5,7	3,6	3,9	14	961	1	660	143	1 076	0	0	0	0	0	0	517	30	0	33,0	2,2	4,6	3,6
1	15	-20,4	-517	0,0	-259	30	-259	5,7	5,7	3,6	3,9	14	961	1	659	143	1 159	0	0	0	0	0	0	516	30	0	33,2	2,2	4,6	3,6