

Jukka Räisä

# MAALÄMPÖPUMPPULABORATORIO OPPIMISYMPÄRISTÖNÄ

Opinnäytetyö  
Ympäristötekniikan koulutusohjelma


Toukokuu 2013




**MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU**

Mikkeli University of Applied Sciences

## KUVAILULEHTI

 <b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences	<b>Opinnäytetyön päivämäärä</b>  30.4.2013		
<b>Tekijä(t)</b> Jukka Räisä	<b>Koulutusohjelma ja suuntautuminen</b> <b>Ympäristötekniikan koulutusohjelma / Kes-</b> <b>tävä energiatalous</b>		
<b>Nimeke</b>  Maalämpöpumppulaboratorio oppimisympäristönä			
<b>Tiivistelmä</b>  <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää oppimisympäristö LVI-alan opiskelijoille. Toimeksiantajana oli Mikkelin ammattikorkeakoulu.</p> <p>Työ aloitettiin tekemällä olemassa olevalla maalämpöpumpulla mittauksia ja analysoimalla niitä. Analysoinnin perusteella vanha MLP-laitteisto vaihdettiin uuteen vaihtuventtiilillä toimivaksi laitteeksi. Oppimisympäristö rakennettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun energialaboratorioon. Oppimisympäristö jaettiin kolmeen osakokonaisuuteen: lämmönkeruupiiriin, kylmäainepiiriin ja lauhdutuspiiriin. Näistä laadittiin kytkentäkaaviot, joissa esitettiin tarvittavat laitteet ja mittauspisteet. Osakokonaisuuksiin laadittiin laboratoriotehdävät.</p> <p>Opinnäytetyössä tutkittiin myös nettoalaltaan 150 m<sup>2</sup> pientalon maalämpöpumpun eri SPF-lukujen ja suoran sähkölämmityksen vaikutusta ostoenergiaan ja E-lukuun.</p> <p>Työn tulokset olivat odotusten mukaiset, mutta työlle asetetut tavoitteet saavutettiin vain osittain. Oppimisympäristön suunnitelmat tehtiin. Tarvittavat mittauspisteet merkittiin suunnitelmiin. Suunnitelman mukaista lämpökaivoa ei porattu, joten olemassa oleva lämmönkeruuputkisto jäi käyttöön. Lämmönkeruupiiriin, kylmäainepiiriin ja lauhdutuspiiriin asennettiin mittauspisteet. Oppimisympäristöön liittyvät laboratoriotehdävät laadittiin. Näillä laboratoriotehdävillä oppilaille mahdollistetaan hankkia hyvät tiedot maalämpöpumpun toiminnasta.</p>			
<b>Asiasanat (avainsanat)</b> Termodynamiikka, maalämpöpumppu, viilennys, oppimisympäristö, oppiminen			
<b>Sivumäärä</b> 57+liitteet 4	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;"><b>Kieli</b> suomi</td> <td style="width: 33%;"><b>URN</b></td> </tr> </table>	<b>Kieli</b> suomi	<b>URN</b>
<b>Kieli</b> suomi	<b>URN</b>		
<b>Huomautus (huomautukset liitteistä)</b>			
<b>Ohjaavan opettajan nimi</b>  Aki Valkeapää	<b>Opinnäytetyön toimeksiantaja</b> Mikkelin ammattikorkeakoulu		

## DESCRIPTION

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>		Date of the master's thesis	
Author(s) Jukka Räisä		Degree programme and option Environmental technology, sustainable energy	
Name of the master's thesis Heat pump laboratory as a learning environment			
<p><b>Abstract</b></p> <p>The aim of this thesis was to develop a learning environment for students in HVAC engineering. The work was commissioned by Mikkeli University of Applied Sciences.</p> <p>The work began by measuring and analysing the operation of the existing ground source heat pump. As a result of the analysis the existing heat pump was replaced to a new one. The plan which includes measurement points was drawn up. The learning environment was divided into three differ parts, heat collection, refrigeration system and condensation. The new ground source heat pump operates with a change-over valve.</p> <p>The results were expected and the aims were reached only partially. The ground source heat pump plan was drawn up and necessary measurement points were marked on the plan. The liquid pipes were installed. An assignment on the learning environment was made to students. The students will get comprehensive knowledge and skills of the heat pump operation with this assignment.</p>			
<p><b>Subject headings, (keywords)</b> Ground heat pump, heat source, cooling, learning environment</p>			
Pages 57+annex 4 pieces	Language Finnish	URN	
Remarks, notes on appendices			
Tutor Aki Valkeapää		Master's thesis assigned by Mikkeli University of Applied Sciences	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	1
2	TOTEUTUS JA MENETELMÄT .....	2
3	MAALÄMPÖPUMPPU .....	2
4	LÄMPÖPUMPUN PÄÄKOMPONENTIT JA NIIDEN TOIMINTA .....	6
4.1	Kompressori.....	6
4.2	Paisuntaventtiilit .....	7
4.2.1	Mekaaninen paisuntaventtiili .....	8
4.2.2	Elektroninen paisuntaventtiili .....	9
4.3	Höyrystin, lauhdutin ja tulistuksen poistosiirrin.....	10
4.4	Höyrystyminen ja lauhduttimen lämpötilaprofiili .....	11
4.5	Kylmäaineet.....	14
4.5.1	Kylmäaine R407C.....	14
4.5.2	Kylmäaine R410A .....	15
5	LÄMPÖKERTOIMET.....	15
5.1	Standardin mukaiset testauslämpötilat .....	16
5.2	Maalämpöpumpun lämpökerroin COP.....	16
5.3	SPF-luku .....	19
6	MAALÄMPÖ .....	21
7	LÄMPÖKAIVO.....	23
7.1	Lämpökaivon mitoitus .....	26
7.2	Viilennyksen vaikutus maaperään .....	28
7.3	Lämmönkeruuneste.....	29
8	RAKENNUSTEN ENERGIATEHOKKUUSVAATIMUKSET .....	30
9	MAALÄMPÖPUMPUN VAIKUTUS E-LUKUUN.....	32
10	MAALÄMPÖPUMPPUJEN MYYNTITILASTO SUOMESSA .....	36
11	LVI-LABORATORION OPPIMISYMPÄRISTÖN LÄMPÖPUMPPU .....	38
11.1	Lämmönkeruupiirin mittausjärjestelyt.....	40
11.2	Jäähdytyspiirin mittausjärjestelyt .....	42
11.3	Lämpöpumpun kylmäainepiirin mittausjärjestelyt .....	43
11.4	Lauhdutuspiirin mittausjärjestelyt .....	44

11.5	Tiedonkeruujärjestelmä .....	47
12	MAALÄMPÖPUMPPULABORATORION TEHTÄVÄT.....	49
12.1	Laboratoriotehtävä.....	50
13	POHDINTA .....	52
	LÄHTEET.....	55

#### LIITTEET

- 1 Etyylialkoholi- vesiseoksen  $C_2H_5OH+H_2O$  aineominaisuudet
- 2 R407C log p,h –piirros
- 3 R407C kylläisen höyryn taulukko

## 1 JOHDANTO

Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistavoitteen lisäksi EU on asettanut jäsenmailleen sitovan tavoitteen uusiutuvien energiamuotojen lisäämiseksi. Tavoitteena on lisätä uusiutuvilla energialähteillä tuotetun energian osuus 20 %:iin loppuenergiankäytöstä vuoteen 2020 mennessä /1/. Suomen täytyy nostaa uusiutuvan energian osuus 38 %:iin vuoteen 2020 mennessä. Vuonna 2005 uusiutuvien energialähteiden osuus oli 28,5 % eli tavoitteena on noin 10 % lisäys /2/. Maalämpöpumput (MLP) hyödyntävät maaperään sitoutunutta uusiutuvaa energiaa, joten niiden käyttö edesauttaa Suomea tämän tavoitteen saavuttamisessa.

Suomessa maalämpöpumppujen määrä on kasvanut koko 2000 -luvun ajan. Tällä hetkellä niitä on käytössä noin 80 000 kpl. Vaihtoventtiilillä toimivien maalämpöpumppujen osuus on noin 70 – 80 % koko määrästä. Vuonna 2012 maalämpöpumppuja myytiin noin 13 000 kpl eli noin 260 milj. euron edestä. /3;4./

Mikkelin ammattikorkeakoulun kampuksella on annettu LVI-tekniikan opetusta jo vuodesta 1967 alkaen, ensin Mikkelin teknisen oppilaitoksen ja sen jälkeen Mikkelin ammattikorkeakoulun nimen alla. Nykyisin talotekniikan opetus tapahtuu pääasiassa kampuksen A-rakennuksessa, joka on rakennettu v. 1995. Tuolloin rakennuksen ensimmäiseen kerrokseen rakennettiin uudet tilat sekä lämmityslaboratoriolle että ilmastointilaboratoriolle. Lämmityslaboratoriossa sijaitsee myös maalämpöpumppu, joka on nyt 17 vuotta vanha ja opetuskäyttöön jo liian iäkäs. Lämpöpumppuvalmistajat ovat kehittäneet tuotteitaan energiatehokkaammiksi. Ennen kaikkea lämmönsiirtimet ja kompressorit ovat kehittyneet.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on kehittää ja uudistaa olemassa olevaa oppimisympäristöä, jolla voidaan tutkia maalämpöpumpun toimintaa. Oppilaille mahdollistetaan hankkia hyvät tietotaidot modernin pientalokokoluokkaa olevan maalämmön ja maalämpöpumpun toiminnasta. Laboratoriotilaan rakennetaan eri komponenteista uusi maalämpöpumppujärjestelmä, josta saadaan noin 8kW:n lämpöteho.

Tutkimuksessa selvitetään maalämpöpumpun ja maalämpöpiirin tarvitsemat mittarit ja mittalaitteet, joilla voidaan tehdä maalämpöpumpun laboratoriomittauksia. Mittalait-

teisiin luetaan lämpötilan ja paineen mittauksiin soveltuvat mekaaniset ja sähköiset mittalaitteet sekä mittalaitteet, joilla selvitetään ainevirtaamia.

Laitteistoon asennettavia mittalaitteita hyödynnetään teettämällä oppilaan oppimista tukevia tehtäviä. Oppimisympäristössä tulee olemaan käytettävissä, nähtävissä ja testattavissa pientalo kokoluokan maalämpöpumppu. Sen avulla opiskelijat voivat oma-kohtaisesti tutustua ja testata, kuinka maasta siirretään lämpöenergiaa rakennusten lämmityksiin.

## **2 TOTEUTUS JA MENETELMÄT**

Tutkimus on sekä teoreettinen että empiirinen. Työ aloitetaan tekemällä olemassa olevalla järjestelmällä mittauksia ja analysoidaan niitä. Näistä saadaan kuva oppimisympäristön toimivuudesta ja mahdollisista parannustarpeista. Tämän jälkeen suunnitellaan MLP:n kytkentäkaaviot uuden oppimisympäristön toteuttamiseksi sekä rakennetaan suunnitelman mukaiset mittausjärjestelyt. Laskentakaavojen perusteella valitaan tarvittavat mittauspisteet. Mittausjärjestelyt jaetaan kolmeen osioon: lämmönkeruupiiriin, kylmäainepiiriin ja lauhdutuspiiriin. Lämmönkeruupiiristä ja lauhdutuspiiristä selvitetään niiden lämpötehot ja lämpöenergiat. Kylmäainepiiristä selvitetään lämpöpumppuprosessin lämpökerroin, COP (Coefficient of Performance).

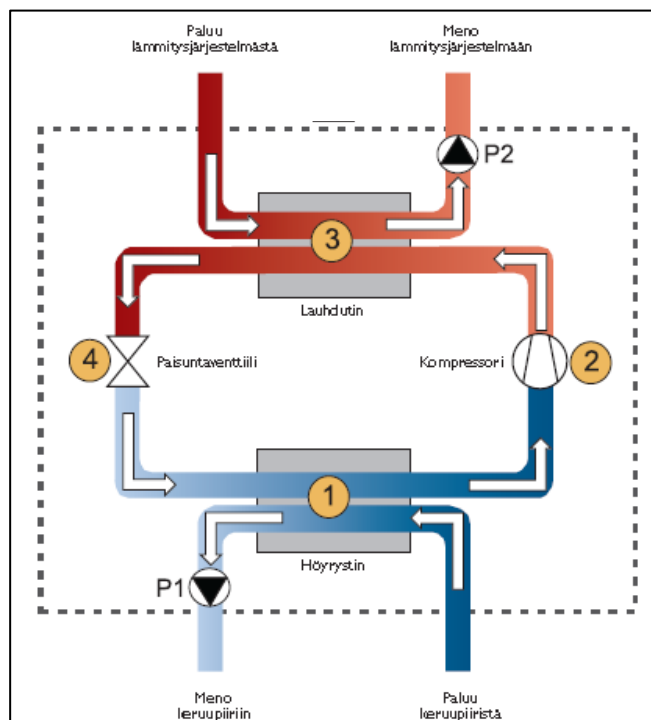
Oppimisympäristössä oppilaille annetaan mittaustehtäviä ennakolta määräytyistä mittauspisteistä, jotka selviävät tämän opinnäytetyön tulevissa osioissa. Mitattavista arvoista analysoidaan MLP:n toimintaa, jolloin oppilaille tarkentuu kuva laitteen toiminnasta.

## **3 MAALÄMPÖPUMPPU**

Luonnossa on runsaasti auringosta peräisin olevaa lämpöenergiaa sitoutuneena maaperään, kalliioon ja vesistöihin. Tämä uusiutuva lämpöenergia on kuitenkin hyvin matalassa lämpötilassa. Jotta alhaisessa lämpötilassa oleva energia saadaan hyödynnettyä rakennuksen ja käyttöveden lämmitykseen, sen lämpötila on saatava korkeammalle tasolle. Tähän tarvitaan lämpöpumpputekniikkaa. Lämpöpumpun toiminta perustuu

koneistossa kiertävän kylmäaineen höyrystymiseen ja lauhtumiseen /5/. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti lämpö siirtyy itsestään korkeassa lämpötilassa olevasta aineesta matalampaan.

Lämpöä kerätään joko maahan, kallioon tai veteen asennetulla lämmönkeruuputkistolla, jossa kiertää jäätymätön, ympäristöystävällinen liuos. Lämmennyt neste kiertää höyrystimen kautta luovuttaen lämpöenergiaa kylmäaineeseen, jolloin kylmäaine höyrystyy sitoen lämpöä. Kompressor imee höyrystimestä tulevan höyryn ja puristaa sen korkeampaan paineeseen, jolloin höyry kuumenee. Lauhduttimessa korkeapaineinen höyry lauhtuu, jolloin vapautunut lämpö siirtyy lauhduttimessa kiertävään veteen. Lauhduttimesta nesteytynyt kylmäaine johdetaan paisuntaventtiiliin. Paisuntaventtiilissä korkeassa paineessa oleva kylmäaine alennetaan matalammalle painetasolle, jolloin se on nesteen ja höyryn seos. Paisuntaventtiilin jälkeen kylmäainekierto jatkuu takaisin höyrystimeen ja kierto alkaa uudelleen /5/. Kuvassa 1 on esitetty pientalon lämpöpumpun osat.



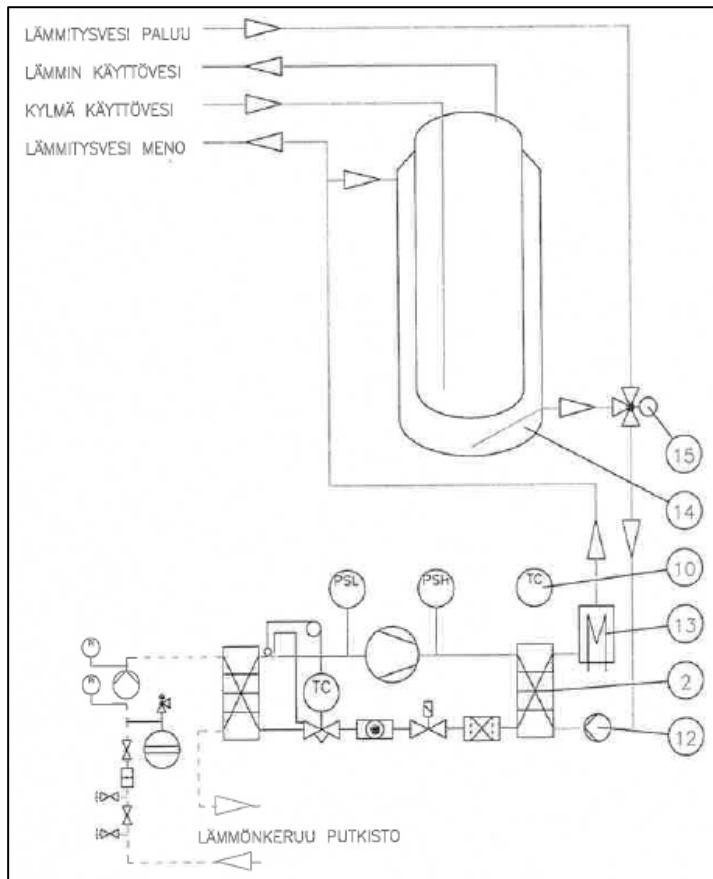
**KUVA 1. Maalämpöpumpun pääosat ja kiertoprosessi /6/**

Katkoviiva rajaa lämpöpumpun kylmäainepiiriin. Pientalokohteissa samaan pakettiin kuuluvat yleensä myös lämmönkeruu- ja lämmityspiirin pumput P1 ja P2. Pumput voidaan asentaa myös paluupuolelle riippuen järjestelmästä. /6/

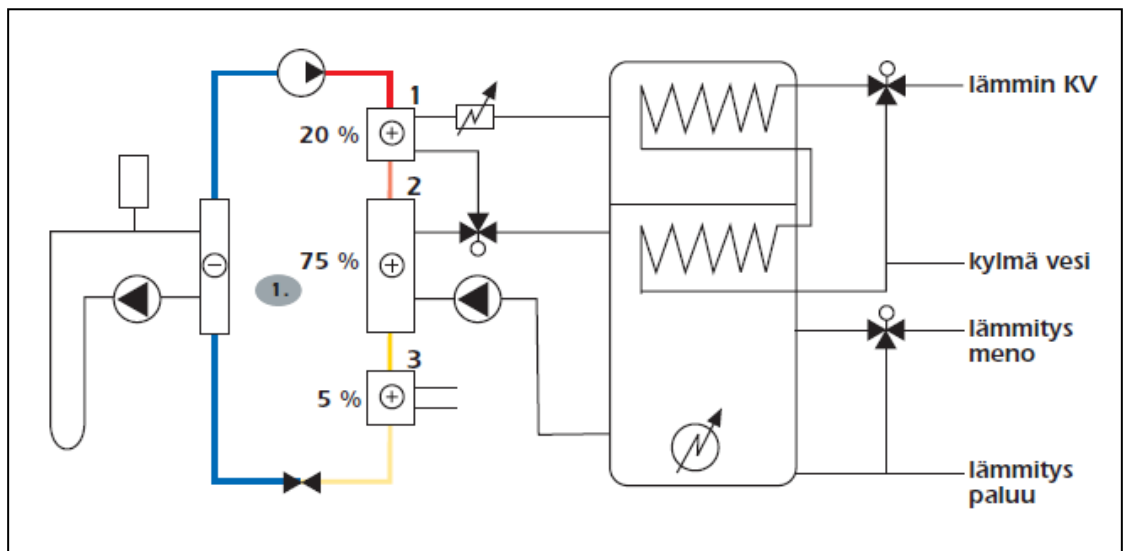


Markkinoilla on saatavana pieniä lämpöpumppuja joko vaihtoventtiili tai tulistuksen poistolämmönsiirrin -periaatteella toimivia laitteita. Vaihtoventtiiliohjauksella varustetuissa lämpöpumpuissa vaihtoventtiili ohjaa lämmitetyn veden joko talon lämmitysjärjestelmään tai lämminvesivaraajaan. Lämminvesivaraajassa lämmitetään rakennuksen käyttövesi. Yleensä pientalolämpöpumpuissa priorisointi on toteutettu siten, että ensin lämmitetään käyttövesi ja sen jälkeen lämmitysvesi. Kuvassa 2 on esitetty vaihtoventtiilillä varustetun pientalon lämpöpumpun toimintaperiaate.

Tulistuksenpoistolämpöpumpussa lämmön varastointiin on kaksi päätapaa: käyttöveden varastointi tai lämmitysveden varastointi. Lauhduttimina toimivat kaksi erillistä lämmönsiirintä, tulistuksenpoistosirrini ja varsinainen lauhdutin. Tulistuksenpoistosirttimessä vedellä jäähdytetään kuumakaasua, jolloin osa sen lämmöstä siirtyy veteen. Kuumakaasu ei kuitenkaan jäähy nesteeksi. Veteen siirtynyt lämpö ohjataan energiavaraajan yläosaan tai erilliseen käyttövesivaraajaan, jossa käyttövesi lämmitetään. Käyttövesi lämmitetään putkikierukan avulla ensin varaajan viileämmässä alaosassa ja loppulämmitys yläosan kuumalla vedellä /7/. Jäähdytynyt kylmäaine virtaa lauhduttimeen, jossa kuumakaasulle tapahtuu faasimuutos: kylmäainehöyrystä nesteeksi. Lauhduttimessa kylmäaineen lämpö siirtyy veteen, joka johdetaan varaajan keskiosaan. Kuvassa 3 on esitetty erään laitevalmistajan toimintaperiaate tulistuksenpoistolämpöpumpusta.



**KUVA 2. Vaihtoventtiiliperiaatteella toimiva maalämpöpumppu /5/**



**KUVA 3. Aktiivisen tulistustekniikan toimintaperiaate /8/**

## 4 LÄMPÖPUMPUN PÄÄKOMPONENTIT JA NIIDEN TOIMINTA

Maalämpöpumpun pääkomponentit kylmäaineprosessissa ovat höyrystin, kompressor, lauhtutin ja paisuntaventtiili. Lämmönkeruuputkisto siirtää maasta tai vesistöstä saatavaa lämpöenergiaa höyrystimelle. Lämmitysputkistoon lämpö siirtyy lauhduttimessa. Perinteinen lämpöpumpppu-prosessi perustuu hiilivetypohjaisten kylmäaineiden höyrystymiseen matalassa paineessa ja lauhtumiseen korkeassa paineessa. Eri kylmäaineiden hyvyys muuttuu eri toimintalämpötiloissa. Lämpötilatasot vaihtelevat lämmöntarpeen ja järjestelmän mukaan. /9./

### 4.1 Kompressor

Kompressorin tehtävä on kylmäaineen paineen korottaminen höyrystymispaineesta (höyrystymislämpötilasta) lauhtumispaineeseen (lauhtumislämpötilaan). Paine-eron vaikutuksesta kylmäaineneste virtaa lauhduttimesta höyrystimeen paisuntaventtiin kautta. /5./

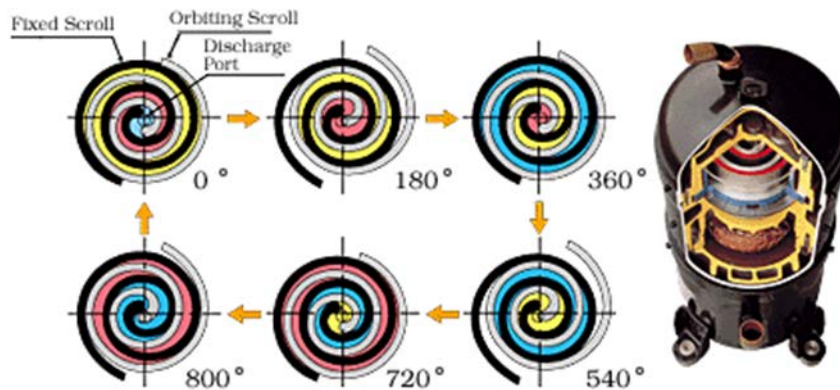
*Hermeettisessä kompressorissa sähkömoottori ja kompressor ovat tiiviin, hitsatun kuoren sisällä. Hermeettiset kompressorit ovat yleensä imukaasujäähdytteisiä. Yleisimpiä hermeettisiä kompressoreita ovat pienet mäntä- ja kierukkakompressorit (scroll-kompressor). Hermeettisiä mäntäkompressoreja käytetään mm. kotitalouksien jää- ja pakastinkaapeissa sekä pienissä kaupan kylmälaitteissa ja kylmähuoneissa. Niitä on käytetty aiemmin myös ilmastoinnin jäähdytyslaitteissa. Hermeettisiä scroll-kompressoreita käytetään nykyisin maalämpöpumpuissa, ilma-vesilämpöpumpuissa, pienemmissä vedenjäähdytyskoneissa, tulo- ja kierrätysilmaa jäähdyttävissä suora-höyrystyskoneistoissa sekä kaappi- ja vakioilmastointikoneissa. Ne ovat syrjäyttäneet lähes kokonaan mäntäkompressorit. Mäntäkompressorin verrattuna scroll-kompressorissa on huomattavasti vähemmän liikkuvia osia ja käynti on huomattavasti värinättömämpi. /10, s. 148 – 150./*

Scroll-kompressorissa kylmäainehöyryn puristus tapahtuu kahden kierukan välissä. Kierukoista toinen on kiinteä ja toinen liikkuva (kuva 4). Liikkuva osa tekee epäsymmetristä edestakaisliikettä, jolloin kierukoiden väliin imetty kylmäainehöyry puristetaan lähemmäksi scrollin keskustaa. Kylmäainehöyryn tilavuus pienenee ja samalla se kuumenee. Höyry purkaantuu ulos scrollin keskellä olevasta paineaukosta. Kuvassa 5

on esitetty vaiheittain kompressorin puristustoiminta. Scroll-kompressor voi olla osittain tai täysin imukaasujäähdytteinen./11./



**KUVA 4. Scroll-kompressorin kierukat/12/**



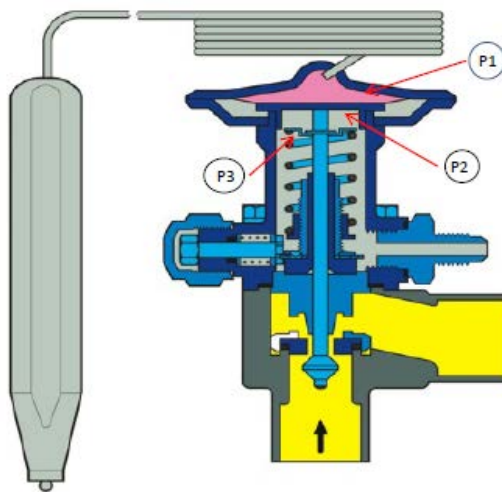
**KUVA 5. Scroll kompressorin puristustoiminta vaiheittain /13/**

## 4.2 Paisuntaventtiilit

Kylmäainekierrossa paisuntaventtiili erottaa kompressorin matala- ja korkeapainepuolen toisistaan. Paisuntaventtiili ja höyrystin muodostavat kokonaisuuden. Paisuntaventtiilin toimintaa ohjaa höyrystimen jälkeen vallitseva tulistuneen kylmäaineen lämpötila. Höyrystimen jälkeen mitattu tulistuslämpötila ohjaa paisuntaventtiilin kautta tapahtuvaa kylmäaineen ruiskutusta höyrystimeen. Paisuntaventtiilin on oltava mahdollisimman nopeatoiminen, jotta se pystyy pitämään höyrystimessä tulistuneen kylmäainehöyryn lämpötilan lähes vakiona. Siten estetään kylmäainenesteeseen pääsy kompressoriin. Paisuntaventtiilit voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin: mekaaniseen ja elektroniseen. /5;10./

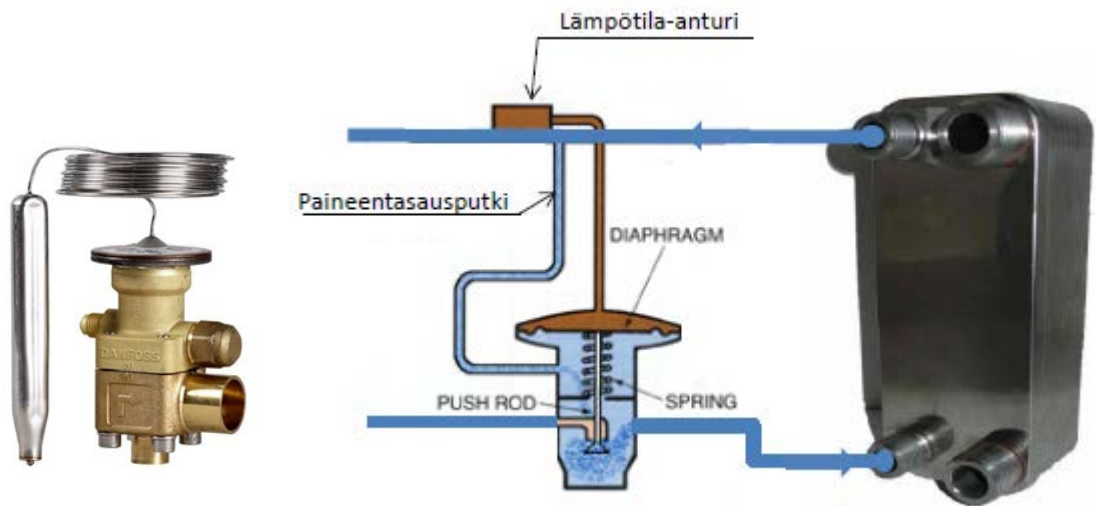
#### 4.2.1 Mekaaninen paisuntaventtiili

Mekaaninen paisuntaventtiili koostuu termostaattisesta elementistä ja venttiilirungosta, jotka on erotettu toisistaan kalvolla. Anturi on yhdistetty termoelementtiin kapillaariputkella. Rungossa on venttiili-istukka ja jousi. Kuvassa 6 on näytetty, kuinka termostaattisen paisuntaventtiilin toimintaa ohjaa kolme eri peruspainetta. Kalvon yläpuolinen anturipaine (P1) vaikuttaa venttiiliä avaavasti. Kalvon alapuolinen höyrystinpaine (P2) vaikuttaa venttiiliä sulkevasti. Jousipaine (P3), joka myös vaikuttaa kalvon alapuolella, vaikuttaa venttiiliä sulkevasti. Paisuntaventtiilin säätäessä vallitsee tasapaino kalvon yläpuolisen anturipaineen sekä kalvon alapuolella vaikuttavien höyrystymispaineen ja jousipaineen välillä. Tulistusta säädetään jousen avulla. /11./



**KUVA 6. Paisuntaventtiilissä vaikuttavat paineet /11/, modifioitu**

Ulkoisella paineentasauksella tasataan paine paisuntaventtiilissä ja höyrystimen jälkeen. Ulkoista paineentasausta käytetään aina, jos höyrystyminen painehäviö on suuri. Nykyisin yleisesti käytettävien levylämmönsiirtimien yhteyteen on syytä asentaa ulkoisella paineentasauksella varustetut paisuntaventtiilit. Paisuntaventtiili asennetaan nesteputkeen virtaussuunnassa höyrystimen eteen ja venttiilin lämpötila-anturi kiinnitetään höyrystimen jälkeiseen imuputkeen mahdollisimman lähelle höyrystintä. Ulkoisella paineen tasauksella varustettujen venttiilien paineentasausputki liitetään imuputkeen välittömästi lämpötila-anturin jälkeen. Kuva 7 on näytetty kapillaariputken ja lämpötila-anturin oikea asennuspaikka. /11./



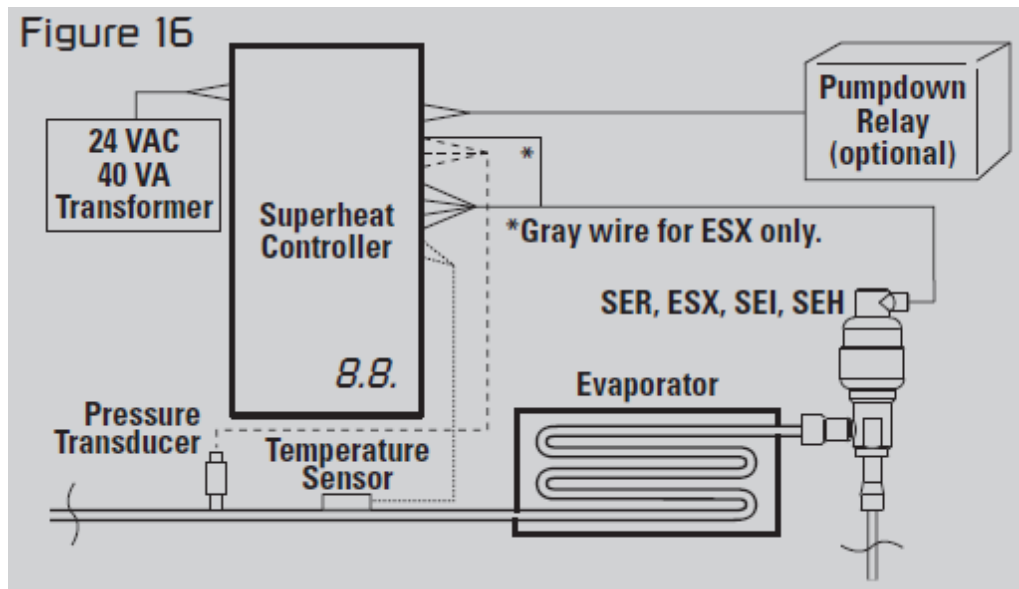
**KUVA 7. Ulkoisella paineentasauksella varustettu mekaaninen paisuntaventtiili /11/, modifioitu**

#### 4.2.2 Elektroninen paisuntaventtiili

Elektroninen paisuntaventtiili on nopeatoimisempi kuin mekaaninen paisuntaventtiili. Tästä johtuen se ei tarvitse erillistä ulkoista paineentasausputkea. Elektroninen paisuntaventtiili vaatii kuitenkin 4-6 K tulistuksen toimiakseen hyvin. Jos tulistus on edellä mainituissa rajoissa, elektroninen paisuntaventtiili mukautuu tarkasti järjestelmän vaatimaan kuormaan. Elektronisen paisuntaventtiilin pääosat ovat säädin, sähköisesti toimiva venttiili sekä lämpötila- ja paineanturi. Säädin määrittää paine- ja lämpötilamittauksen perusteella kylmäaineen tulistumisen ja tämän perusteella ohjaa paisuntaventtiilin toimintaa. Kuvassa 8 on juotosliitoksin varustettu elektroninen paisuntaventtiili. Kuvassa 9 on kaaviokuva elektronisen paisuntaventtiilin ohjauksesta. /11;14./



**KUVA 8. Elektroninen paisuntaventtiili /11;15/**



KUVA 9. Elektronisen paisuntaventtiilin osat /16/

### 4.3 Höyrystin, lauhdutin ja tulistuksen poistosiirrin

Nykyisin höyrystimet, lauhduttimet ja tulistuksenpoistosiirtimet ovat pääsääntöisesti levylämmönsiirtimiä. Niillä on erinomainen kyky siirtää lämpöä pieneen tilavuuteen nähden sekä kylmäaine- että nestepuolella. Lämmönsiirtimet kytetään vastavirtaperiaatteella, jotta saadaan mahdollisimman tehokas lämmönsiirtyminen. Materiaalina on yleensä käytetty haponkestävää terästä (AISI 316). Pienet siirtimet on koottu ohuista aaltolevyistä, jotka on tyhjiöjuotettu toisiinsa käyttämällä juotosmateriaalina kuparia. Isommissa on käytössä myös tiivisteellisiä siirtimiä. Kuvassa 10 on esitetty levylämmönsiirtimen siirrinlevyt ja kovajuotetun siirtimen poikkileikkaus. /17./



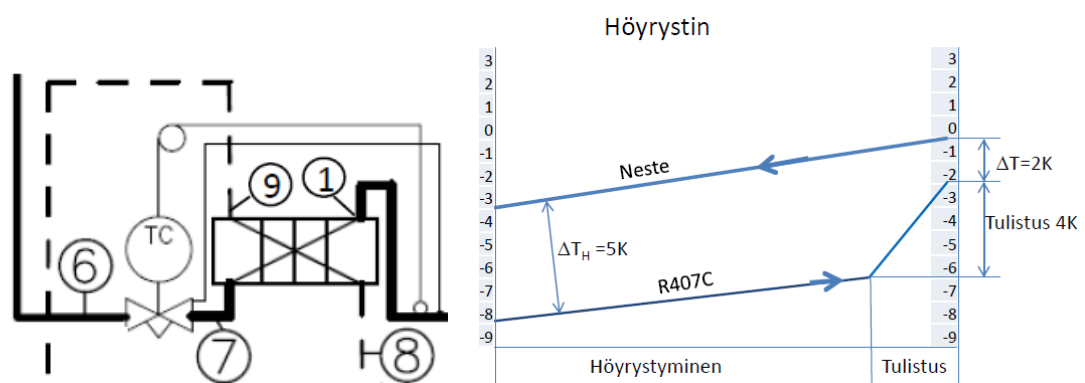
KUVA 10. Levylämmönsiirrin höyrystimenä, lauhduttimena ja tulistuksenpoistosiirtimenä /18;17/

Höyrystimessä matalassa paineessa oleva kylmäaine höyrystyy ja tulistuu. Höyrystymisen mahdollistaa lämmönkeruupiiristä tuleva lämmönkeruuneste. Höyrystin on lämmönsiirrin, joka siirtää korkeammassa lämpötilassa olevasta lämmönkeruupiirin nesteestä lämpöenergiaa matalammassa lämpötilassa olevalle kylmäainepuolelle. Lauhduttimessa korkeassa paineessa ja korkeassa lämpötilassa oleva kuumakaasu (kylmäaine) luovuttaa lämpöenergiaa siirtimen nestepuolelle. Samalla se lauhtuu ja vaihtaa olomuotoa ollen lauhduttimen lopussa nesteenä.

#### 4.4 Höyrystyminen ja lauhduttimen lämpötilaprofiili

Mitoitusarvoina lämpöpumppuprosessille annetaan maapiirin paluulämpötila, höyrystimen tulistus, lämmönsiirtimien lämpötilaerot sekä lämmitysjärjestelmän paluueden lämpötila. Höyrystimessä lämmönkeruunesteen meno ja paluu lämpötilaeroksi annetaan  $\Delta T_{HN} = 3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Lauhduttimen lämmönsiirtonesteelle (vedelle) käytettävä lämpötilaero riippuu lämmityspiirin lämpötiloista, vaihteluväli on  $\Delta T_{LN} = 5 - 10 \text{ }^\circ\text{C}$ . /19/

Kuvassa 11 on esitetty höyrystimen mittauspisteet ja lämpötilaprofiilit. Painehäviöt oletetaan nollassi. Höyrystin toimii vastavirtaperiaatteella. Kuvassa 10 on esimerkki mainitusta lämmönsiirrin tyypistä. Höyrystimestä lähtevän kylmäainehöyryn ja maasta tulevan lämmönkeruunesteen lämpötilaeroksi (kuvassa  $\Delta T$ ) oletetaan  $2^\circ\text{C}$ . Kylmäaineen tulistus höyrystimessä on  $4^\circ\text{C}$ .



**KUVA 11. Höyrystimen lämpötilaprofiilit ja kytkentä mittauspisteineen**

Höyrystimen teho voidaan laskea kaavalla (1), kun tunnetaan kylmäaineen massavirta ja entalpiaero ennen ja jälkeen höyrystimen. Höyrystimen teho lämmönkeruupiirin puolelta voidaan laskea kaavalla (2), kun tunnetaan lämmönkeruunesteen, tiheys, tilavuusvirta ja lämpötilaero ennen ja jälkeen höyrystimen.



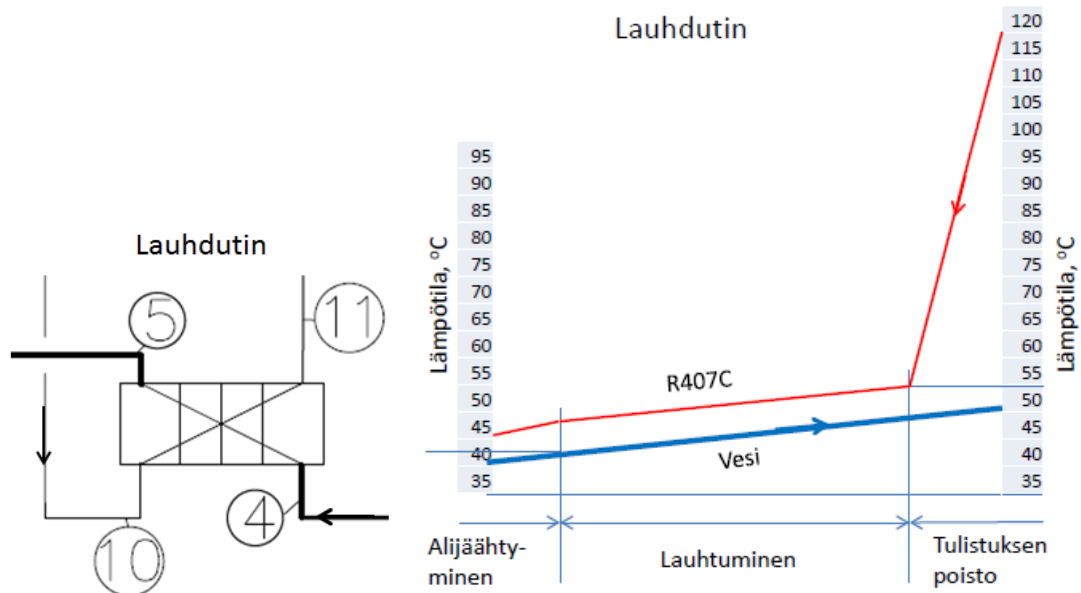
$$\phi_{HC} = q_m(h_1 - h_7) \quad (1)$$

$\phi_{HC}$	höyrystimen kylmäteho kylmäaineen puolelta, kW
$q_m$	kylmäaineen massavirta, kg/s
$h_1$	kylmäaineen entalpia höyrystimen jälkeen, kJ/kg
$h_7$	kylmäaineen entalpia ennen höyrystintä, kJ/kg

$$\phi_{HN} = q_v c_p \rho (T_8 - T_9) \quad (2)$$

$\phi_{HN}$	höyrystimen lämpöteho lämmönkeruunesteen puolelta, kW
$q_v$	lämmönkeruunesteen tilavuusvirta, m <sup>3</sup> /s
$c_p$	lämmönkeruunesteen ominaislämpökapasiteetti, kJ/kg °C
$\rho$	lämmönkeruunesteen tiheys, kg/m <sup>3</sup>
$T_8$	lämmönkeruupiiristä tulevan nesteen lämpötila, °C
$T_9$	lämmönkeruupiiriin menevän nesteen lämpötila, °C

Kuvassa 12 on esitetty lauhduttimen mittauspisteet ja lämpötilaprofiilit. Painehäviöt oletetaan nolllaksi. Lauhdutin toimii vastavirtaperiaatteella. Lauhduttimessa kyllläisen kylmäainehöyryn ja lähtevän lämmitysveden lämpötilaeroksi oletetaan myös 3°C. Lisäksi alijäähtyminen lauhduttimessa oletetaan nolllaksi. Halutut lauhtumis- ja höyrystymislämpötilatasot vakiopaineessa saadaan, kun tiedetään lämmitys- ja lämmönkeräyspuolten lämpötilat ja valitaan lämmönsiirtimien lämpötilaerot ja höyrystimen tu-  
listus.



**KUVA 12. Lauhduttimen mittauspisteet ja lämpötilaprofiilit**

Lauhduttimen teho voidaan laskea kaavalla (3), kun tunnetaan kylmäaineen massavirta ja entalpiat ennen ja jälkeen lauhduttimen. Lauhduttimen teho lämmityspiirin puolelta voidaan laskea kaavalla (4), kun tunnetaan lämmityspiirin tilavuusvirta sekä meno ja paluuveden lämpötilat.

$$\phi_{LC} = q_m(h_4 - h_5) \quad (3)$$

$\phi_{LC}$  lauhduttimen lämpöteho kylmäaineen (kuumakaasun) puolelta, kW

$q_m$  kylmäaineen massavirta, kg/s

$h_4$  kylmäaineen entalpia ennen lauhdutinta, kJ/kg

$h_5$  kylmäaineen entalpia lauhduttimen jälkeen, kJ/kg

$$\phi_{LN} = q_v c_p \rho (T_{11} - T_{10}) \quad (4)$$

$\phi_{LN}$  lauhduttimen luovuttama lämpöteho veteen, kW

$q_v$  veden tilavuusvirta, m<sup>3</sup>/s

$c_p$  veden ominaislämpökapasiteetti, kJ/kg °C

$\rho$  veden tiheys, kg/m<sup>3</sup>

$T_{11}$  lämmityspiirin lähtevän veden lämpötila, °C

$T_{10}$  lämmityspiiristä palaavan veden lämpötila, °C

## 4.5 Kylmäaineet

Kylmäaineet ovat nesteytettyjä kaasuja. Ne muuttavat olomuotoaan nestemäisestä kaasumaiseksi ottaessaan vastaan lämpöä ja kaasumaisesta nestemäiseksi luovuttaessaan lämpöä ympäristöön. Olomuodon muutoksella saadaan siirrettyä suuria lämpökuormia suhteellisen pienellä kylmäaineen massavirralla. /20, s.1./

Nykyisin käytettävien kylmäaineiden on oltava ympäristöystävällisiä kloorittomia yhdisteitä. Yleisesti käytössä olevat seoskylmäaineet ovat ns. HFC-aineita /5/. Kylmäaineseokset jaetaan faasinmuutuskäyttäytymisensä perusteella atseotrooppisiin ja tseotrooppisiin seoksiin. Esimerkiksi R410A koostuu kahdesta eri kylmäaineesta joiden höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuvat lähes vakiolämpötilassa, joten se on atseotrooppinen kylmäaineseos. R407C koostuu kolmesta eri yksikomponenttisestä kylmäaineesta, jonka höyrystymisen ja lauhtumisen yhteydessä tapahtuu lämpötilan muutos, joten se on tseotrooppinen kylmäaineseos. Tseotrooppisilla kylmäaineilla on erilaiset koostumukset kaasun- ja nestefaasissa faasimuutoksen aikana, koska seoskylmäaineen eri osa-aineet höyrystyvät ja lauhtuvat puhtaina aineina eri lämpötiloissa. Höyrystymisessä herkemmin höyrystyvät osa-aineet muuttuvat nopeammin, jolloin lämpötilan on nouseva höyrystymisen jatkumiseksi loppuun. Höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuvat tietyllä lämpötilavälillä, vaikka paine pysyy vakiona. Tätä kutsutaan lämpötilaliukumaksi. Liukuma kasvaa paineen laskiessa. Lämpötilan muutos höyrystymisessä on kuitenkin yleensä pienempi kuin lauhtumisessa, koska paisunta-venttiilissä menetetään osa kokonaisliukumasta. /21, s.5./

Lämpöpumpuissa käytetään yleisesti HFC -kylmäaineita, jotka eivät aiheuta otsonikatoa, mutta ne ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja. HFC -kylmäaineita ja niiden seoksia ovat mm. R410a, R134a, R404A ja R407C. Tässä opinnäytetyössä on selvitetty ainoastaan yleisimmin pienissä maalämpöpumpuissa käytössä olevat kylmäaineet, R407C ja R410A.

### 4.5.1 Kylmäaine R407C

R407C on kylmäaineseos, jonka komponentteina on käytetty 23 p-% R32( $\text{CH}_2\text{F}_2$ ), 25 p-% R125( $\text{CHF}_2\text{CF}_3$ ) ja 52 p-% R134a ( $\text{CH}_2\text{FCF}_3$ ). Kylmäaine ei sisällä klooria, joten se on ympäristöystävällinen seos. Se on tseotrooppinen seos, jolla on hyvä kylmäker-

roin. Haittapuolena on suuri lämpötilaliukuma, noin  $3,5 \dots 7,5^\circ\text{C}$  /20/. Suuri liukuma on otettava huomioon laitoksen suunnittelussa. R407C on tänä päivänä (2012) yleinen kylmäaine maalämpöpumpuissa. Jokaisella seoksen puhtaalla komponentilla on oma toisistaan poikkeava lämmönsiirtokerroin. Koko seoksen lämmönsiirtokerroin on näiden keskiarvoa pienempi. Sen etuna ovat muun muassa alhainen puristusaine ja hyvä lämpökerroin. /5;10./

#### 4.5.2 Kylmäaine R410A

Kylmäaine R410A on atseotrooppinen kylmäaineseos, joka koostuu kahdesta kylmäainekomponentista, R32( $\text{CH}_2\text{F}_2$ ) ja R125 ( $\text{CHF}_2\text{CF}_3$ ). R410A:ssa molempia aineosia on yhtä paljon. Suurin haitta on korkea puristusaine. Tämä vaatii järjestelmässä käytettäviltä komponenteilta suurta paineen kestävyyttä. Sen etuna ovat mm. hyvä tilavuustuotto ja laaja käyttöalue sekä erittäin pieni lämpöliukuma. R410A tulistuu huomattavasti enemmän kuin R407C. Tämä on etu maalämpöpumpussovelluksissa, joissa hyödynnetään tulistuksen poistoa tietyllä lämpötila-alueella. /20./

## 5 LÄMPÖKERTOIMET

Lämpöpumppujen yhteydessä käytetään yleisesti termiä lämpökerroin. Termi kuvaa lämpöpumpun tehokkuutta. Esimerkiksi lämpökerroin kolme tarkoittaa, että lämpöä saadaan kolme kertaa enemmän kuin mitä laite kuluttaa sähköenergiaa. Mitä vähemmän lämpötilaa joudutaan nostamaan lämpöpumpulla, sitä vähemmän energiaa kuluu.

Lämpöpumppujen tehokkuutta kuvataan lämpökertoimella. Standardin SFS-EN 14511-1(2011) mukaan lämpökertoimelle käytetään lyhennettä COP (Coefficient of Performance). Se voidaan laskea joko pelkästään kompressorille tai maalämpöpumpulle. Toinen lämpöpumppujen tehokkuutta kuvaava termi on kausisuorituskykykerroin (SPF-luku). Kirjainyhdistelmä SPF tulee englannin kielen termistä ”Seasonal Performance Factor”. /21./

## 5.1 Standardin mukaiset testauslämpötilat

Standardin SFS-EN 14511-2 mukaisissa testausolosuhteissa maalämpöpumppujen nimellisteho  $\Phi_{LP}$  ilmoitetaan lämmönkeruupiirin paluunesteen lämpötilalla 0 °C ja lämmönjakoverkoston menoveden lämpötilalla 35 °C. Jos edellä mainitut lämpötilat poikkeavat edellä mainituista, on ne otettava huomioon lämpöpumpun mitoituksessa. Standardi SFS-EN 14511-2 määrittelee eri laitteille neljä eri testilämpötilaa, jotka määräytyvät laitteiden luovuttaman lämmön mukaan: matala (W35), keskimääräinen (W45), korkea (W55) ja erittäin korkea (W65). Standardin SFS-EN 14511-2 taulukoissa 7-10 on annettu testausolosuhteissa käytettävien höyrystimien ja lauhduttimien lämpötilat. Hyödyllisintä on mahdollisimman korkea lämmönoton lämpötila ja mahdollisimman matala lämmönkäytön lämpötila. /22./

## 5.2 Maalämpöpumpun lämpökerroin COP

COP arvo ilmoittaa, kuinka paljon lämpöpumpulla saadaan tuotettua lämpöä suhteessa käytettyyn sähköön, joka tarvitaan pyörittämään kompressoria ja muita apulaitteita. Lämpöpumpun lämpökerroin määritellään lämpötehon ja sähkötehon suhteessa kaavan (5) mukaisesti. /23./

$$COP = \frac{\Phi_{saatu}}{P_{komp.} + P_{apu}} \quad (5)$$

$COP$  lämpöpumpun lämpökerroin

$\Phi_{saatu}$  saatu lämpöteho, W

$P_{komp.}$  kompressorin ottama sähköteho, W

$P_{apu}$  apulaitteiden ottama sähköteho, W.

Lämpöpumpun apulaitteiden  $P_{apu}$  ottamaan tehoon lasketaan pumppujen ja säätömootoreiden tarvitsema sähköteho /24/.

Lämpöpumpun lämpökertoimen teoreettinen maksimiarvo on Carnot'n lämpökerroin. Carnot'n lämpökerroin riippuu vain lauhdumislämpötilasta ja höyrystymislämpötilasta. Lämpötilat annetaan absoluuttisina lämpötiloina, kuten kaavassa 6 on esitetty.

$$COP_{crnt} = \frac{T_L}{T_L - T_H} \quad (6)$$

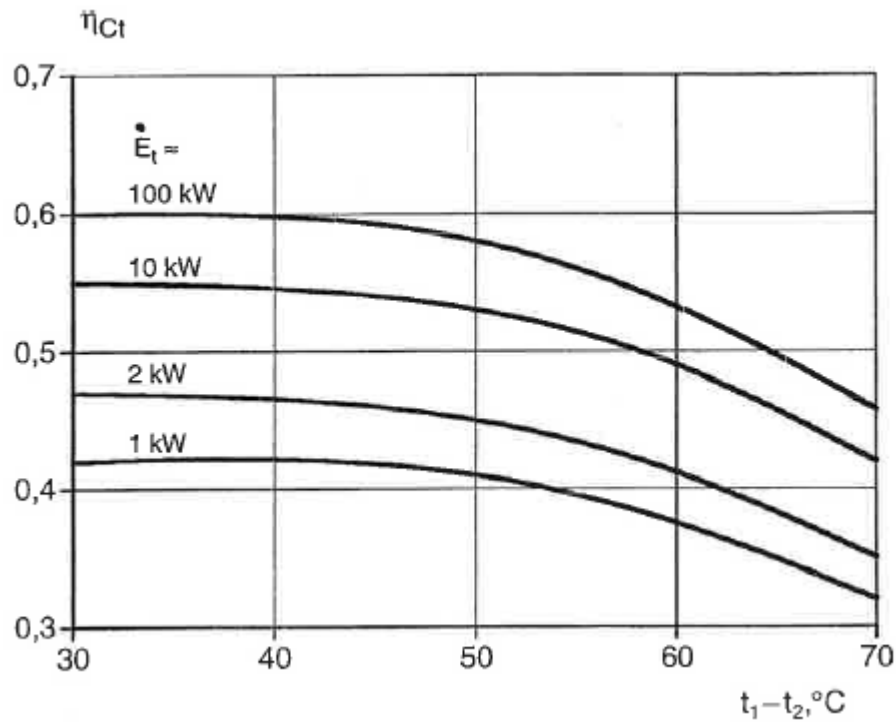
$COP_{crnt}$	carnot lämpökerroin
$T_L$	lauhtumislämpötila, K
$T_H$	höyrystymislämpötila, K.

Todellinen lämpöpumppu ei kuitenkaan ole koskaan häviötön eikä se toimi Carnot'n lämpöpumpun tavoin. Todellisen lämpöpumpun lämpökerroin on aina Carnot'n lämpökerrointa huomattavasti pienempi. Todellisen lämpöpumpun lämpökertoimen suuruutta voidaan arvioida kertomalla Carnot-lämpökerroin Carnot-hyvyyskerroimella  $\eta_{crnt}$ . Tällöin yhtälö saa muodon:

$$COP_{1t} = \eta_{crnt} \times COP_{crnt} \quad (7)$$

$COP_{1t}$	todellinen lämpökerroin
$\eta_{crnt}$	Carnot -hyvyyskerroin

Carnot -hyvyyskerroin riippuu kylmäaineesta ja kompressorin hyvydestä. Kompressorin ottoteho (koko) sekä lauhtumis- ja höyrystymislämpötilojen ero vaikuttavat myös Carnot -hyvyyskerroimeen /25//Granryd 2009/. Esimerkiksi lämpöpumpussa on kompressorin, jonka ottoteho on 2 kW. Lauhtumislämpötilan ja höyrystymislämpötilan erotus on 40 °C. Lauhtumislämpötila on 35 °C. Tällöin kuvasta 13 voidaan lukea Carnot -hyvyyskerroimeksi 0,46. Carnot -hyvyyskerroin paranee, kun lämpöpumpun teho kasvaa.



**KUVA 13. Carnot-hyvyyskertoimen  $\eta_{crnt}$  arvoja riippuen höyrystymis- ja lauh-  
tumislämpötilan välisestä lämpötilaerosta ( $t_1-t_2$ ) ja kompressorin ottotehosta  $P_e$ ,  
kun lauhumislämpötila  $T_L \sim 35$  °C /25/**

Mikäli lämpöpumpun lauhumis- ja höyrystymislämpötiloja ei tunneta, ne voidaan laskea kaavoilla 8 ja 9.

$$T_L = T_{L1} + \Delta T_L \quad (8)$$

$T_L$  lauhtumislämpötila, °C

$T_{L1}$  lauhduttimen läpi virtaavan lämmönsiirtoaineen (nesteen) lämpötila, °C

$\Delta T_L$  kylmäaineen ja lämmönsiirtoaineen lämpötilaero lauhduttimessa, °C.

$$T_H = T_{H1} - \Delta T_H \quad (9)$$

$T_H$  höyrystymislämpötila, °C

$T_{H1}$  höyrystimen läpi virtaavan lämmönsiirtoaineen (nesteen) lämpötila, °C

$\Delta T_H$  kylmäaineen ja lämmönsiirtoaineen lämpötilaero höyrystimessä, °C.

Jos edellä mainittuja kylmäaineen ja lämmönsiirtoaineen lämpötilaeroja ei tunneta, laskelmissa voidaan käyttää seuraavia likimääräisiä arvoja. Lauhduttimessa voidaan käyttää  $\Delta T_L = 10\text{K}$  ja höyrystimessä  $\Delta T_H = 5\text{K}$  /6/. Kylmäaine R407C, jolla on suuri lämpöliukuma, höyrystymis- ja lautumislämpötilalla tarkoitetaan lämpötilaa kylläisen höyryn käyrällä. Eli lämpötilaa, joka on ns. dew point -pisteessä./5./

### 5.3 SPF-luku

SPF-luku tarkoittaa lämpöpumpun vuoden keskimääräistä lämpökerrointa, joka on lämpöpumpulla tuotetun vuotuisen energian suhde lämpöpumpun sekä apulaitteiden vuotuisen sähkönkulutukseen. Lämpöpumpun suorituskyky riippuu lämmönlähteen lämpötilatasosta, joten maalämpöpumpun SPF -lukuun vaikuttaa lämmönkeruupiirin lämpötilataso. /6./

Lämmönjakoverkoston menoveden lämpötilan noustessa lämpöpumpun suorituskyky heikkenee ja SPF-luku pienenee. Vesikiertoisen lämmönjakojärjestelmän paluueden lämpötila vaikuttaa myös lämpöpumpun suorituskykyyn, jos maalämpöpumpun lautumispainetta ohjataan paluueden lämpötilan mukaan. Mahdollisimman alhainen lämmitysjärjestelmän lämpötilataso vaikuttaa SFP-lukuun myönteisesti. Edellä mainitusta syystä lattialämmitys soveltuu MLP:n lämmönjakojärjestelmäksi hyvin.

Täystehomitoitetun maalämpöpumpun SPF-luku voidaan laskea kaavojen 10,11 ja 12 avulla. Kaavalla 10 lasketaan tilojen lämmityksen SPF-luku. Lämpöpumpun tuottama tilojen vuotuinen lämmitysenergian tarve saadaan laskettua Srakmk:n osan D5(luonnos 14.3.2012) kaavalla 6.13. Kaavalla 13 lasketaan käyttöveden lämmityksen SPF-luku. Kaavalla 14 lasketaan koko lämpöpumpun SPF-luku eli tilojen lämmityksen ja käyttöveden lämmityksen yhteinen SPF-luku. /26./

$$SPF_{tilat} = \frac{Q_{LP,lämmitys,tilat}}{W_{LP,tilat} + W_{apu,tilat}} \quad (10)$$

$SPF_{tilat}$  lämpöpumpun SPF-luku tilojen lämmityksessä

$Q_{LP, lämmitys, tilat}$  lämpöpumpun tuottama tilojen vuotuinen lämmitysenergia, kWh

$W_{LP, tilat}$  lämpöpumpun vuotuinen sähkönkulutus tilojen lämmityksessä, kWh

$W_{apu, tilat}$  lämpöpumpun apulaitteiden vuotuinen sähkönkulutus (tilojen lämmitys), joka ei sisälly lämpöpumpun lämpökertoimen mitattuihin arvoihin, kWh.



$$SPF_{LKV} = \frac{Q_{LP,lämmitys,LKV}}{W_{LP,LKV} + W_{apu,LKV}} \quad (11)$$

$SPF_{LKV}$  lämpöpumpun SPF-luku käyttöveden lämmityksessä

$Q_{LP,lämmitys,LKV}$  lämpöpumpun tuottama käyttöveden vuotuinen lämmitysenergia, kWh

$W_{LP,LKV}$  lämpöpumpun vuotuinen sähkönkulutus käyttöveden lämmityksessä, kWh

$W_{apu,LKV}$  lämpöpumpun apulaitteiden vuotuinen sähkönkulutus (käyttöveden lämmitys), joka ei sisälly lämpöpumpun lämpökertoimen mitattuihin arvoihin, kWh.

$$SPF_{tilat+LKV} = \frac{Q_{LP,lämmitys}}{W_{LP} + W_{apu}} \quad (12)$$

$SPF_{tilat+LKV}$  lämpöpumpun SPF-luku

$Q_{LP,lämmitys}$  rakennuksen tilojen ja käyttöveden vuotuinen lämmitysenergian kulutus, joka voidaan tuottaa lämpöpumpulla, kWh

$W_{LP}$  lämpöpumpun vuotuinen sähkönkulutus tilojen ja käyttöveden lämmityksessä, kWh

$W_{apu}$  lämpöpumpun apulaitteiden vuotuinen sähkönkulutus (tilat ja LKV), joka ei sisälly lämpöpumpun lämpökertoimen mitattuihin arvoihin, kWh.

Lämpöpumpun vuotuinen ostoenergia lasketaan kaavalla 13.

$$W_{LP,lämmitys} = \frac{Q_{LP,lämmitys,tilat}}{SPF_{tilat}} + \frac{Q_{LP,lämmitys,LKV}}{SPF_{LKV}} \quad (13)$$

$W_{LP,lämmitys}$  lämmityskäytössä olevan lämpöpumpun sähköenergiankulutus, kWh

$SPF_{tilat}$  lämpöpumpun SPF-luku tilojen lämmityksessä

$SPF_{LKV}$  lämpöpumpun SPF-luku käyttöveden lämmityksessä.

Jos maalämpöpumpussa ei ole integroitua lämmönkeruupiirin pumppua, niin pumppaukseen kuluva sähköenergia, otetaan erikseen huomioon SPF-luvun laskennassa /22/.

## 6 MAALÄMPÖ

Geoenergia on maa- ja kallioperään sekä vesistöihin varastoitunutta, uusiutuvaa energiaa. Suomessa tämä energia on peräisin pääosin auringosta ja osin maan ytimestä. Geoenergiaa voidaan hyödyntää rakennusten lämmityksessä ja viilennyksessä lämpöpumpun avulla. /27./

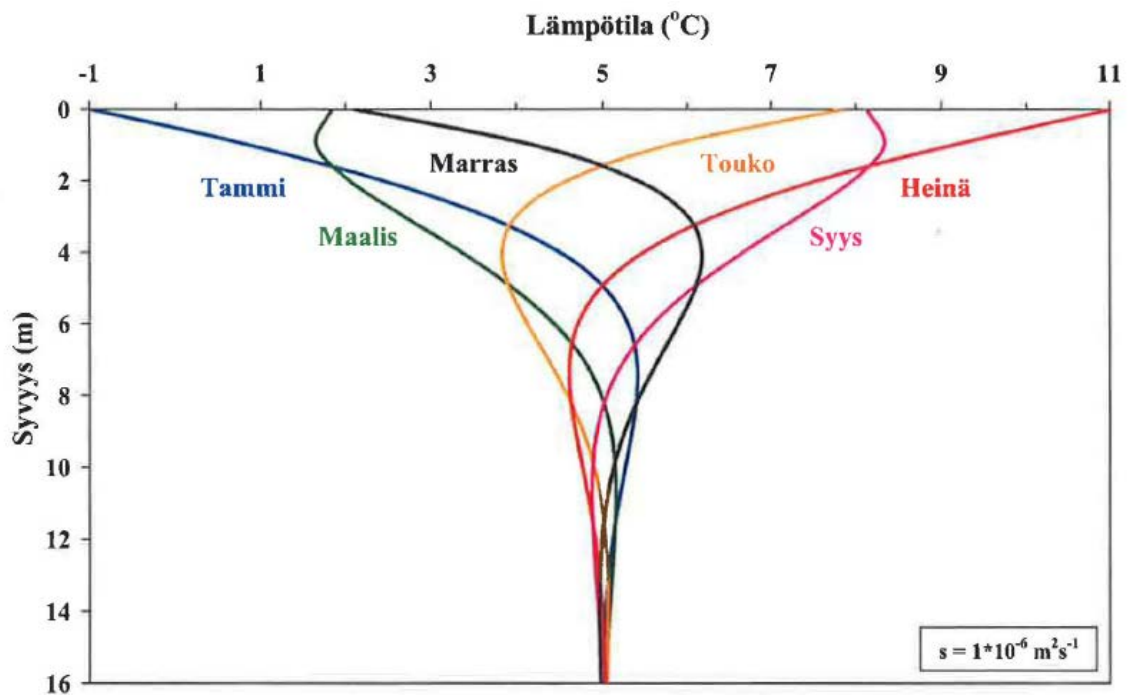
Maapallo luovuttaa sisäsyntyistä lämpöenergiaa pintansa kautta  $1,4 \cdot 10^{21}$  J vuodessa. Sisäiset lämmönlähteet ovat maapallon kasaantumisessa vapautunut potentiaalienergia, ytimen erottumisesta vapautunut energia sekä radioaktiivisten aineiden hajoaminen ytimessä, vaipassa ja kuoressa. Maapallon sisäosista lämpö siirtyy ylöspäin kohti viileämpää maanpintaa. /28. /

Toisaalta auringosta maapallon pinnalle tulee lämpöenergiaa  $5,4 \cdot 10^{24}$  J vuodessa /29/. Vuosittain maanpinnan keskilämpötila vaihtelee ilman lämpötilan mukaan. Lämpötilaero riippuu leveysasteesta. Suomessa maanpinnan keskilämpötila on mitattu pari astetta korkeammaksi kuin ilman vuotuinen keskilämpötila. Ilman keskilämpötila-arvot vaihtelevat Etelä-Suomen 6 - 7 °C:sta Pohjois-Lapin 1 - 2 °C:een. Lämpötilat vaihtelevat myös paikallisesti. Rakennetuilla alueilla maanpinnan lämpötila voi olla useita asteita korkeampi kuin esimerkiksi luonnontilaisessa metsässä. Myös maanpinnan kaltevuus vaikuttaa pintalämpötilaan. Pohjoisrinteelle auringon säteily tulee pienemmässä kulmassa ja lämpötila saattaa jäädä jopa 4,5 °C pienemmäksi kuin etelärinteellä. Suomessa maanpinnan korkeusvaihtelut ovat niin pieniä, etteivät ne juurikaan vaikuta maanpinnan lämpötilaan. /28./

Maasta saatava energia ja maksimi teho riippuvat maantieteellistä sijainnista ja maaperän laadusta. Lämmönkeruuputkistot asennetaan maahan noin 1 -1,5 m syvyyteen. Jos linjan Savonlinna - Kokkola eteläpuolella sijaitsevan lämmönkeruupiirin maaperä on savea, tällöin maasta saatava maksimienergia on 50 - 60 kWh/m ja maksimi teho 20 W/m. Hiekkamaassa vastaavasti maksimi energia on 30 - 40 kWh/m ja maksimi teho 14 W/m /30, s.79./

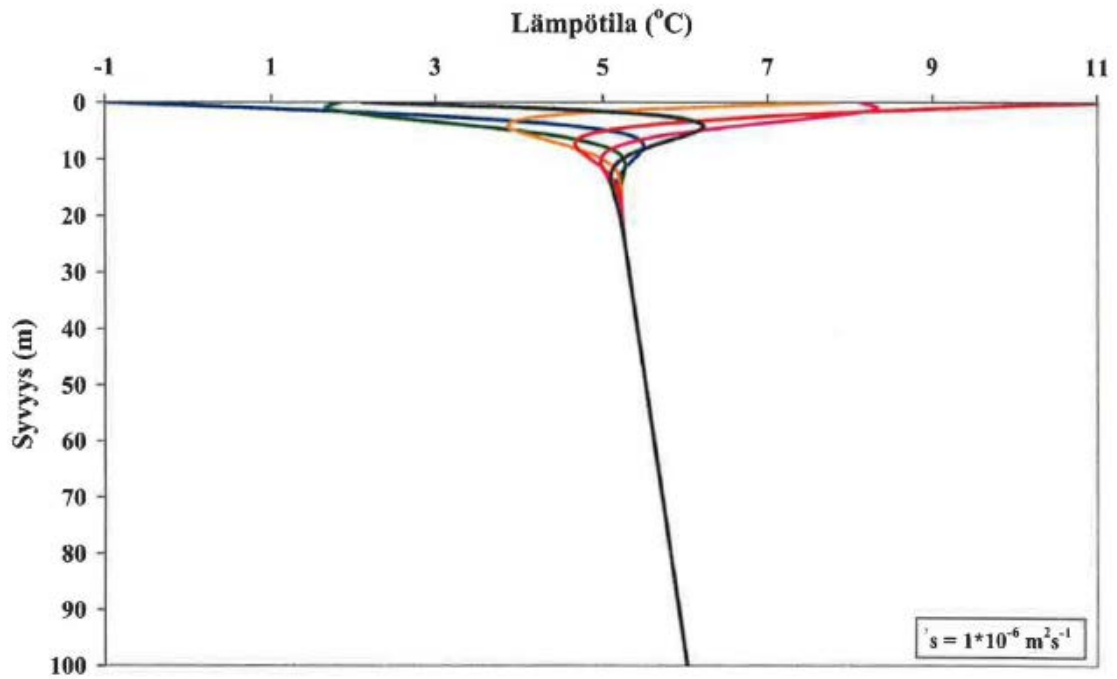
Auringon säteilyn säätelemä maanpinnan lämpötila muuttuu ajan suhteessa. Vuosittainen pintalämpötilan vaihtelu voidaan havaita maankamarassa korkeintaan 10 -15 metrin syvyydelle asti. Tätä syvemmällä maan sisällä vuosittainen pintalämpötilan

vaihtelu on suodattunut pois ja lämpötila on pintalämpötilan vaihtelun keskiarvo eli maanpinnan keskilämpötila. Kuvassa 14 on esitetty teoreettiset lämpötila-syvyyskäyrät joka toiselle kuukaudelle. Maanpinnan keskilämpötila on kuvassa 5 °C, vaihtelun amplitudi 6 °C ja termisen diffusiviteetti  $10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ . Termisestä diffusiviteetistä käytetään myös nimeä lämpötilan johtavuus. Maankamaran oletetaan olevan homogeeninen. /28./



**KUVA 14. Maanpintakerroksen lämpötilajakauma riippuen vuodenajasta,  $s$  on termisen diffusiviteetti/28/**

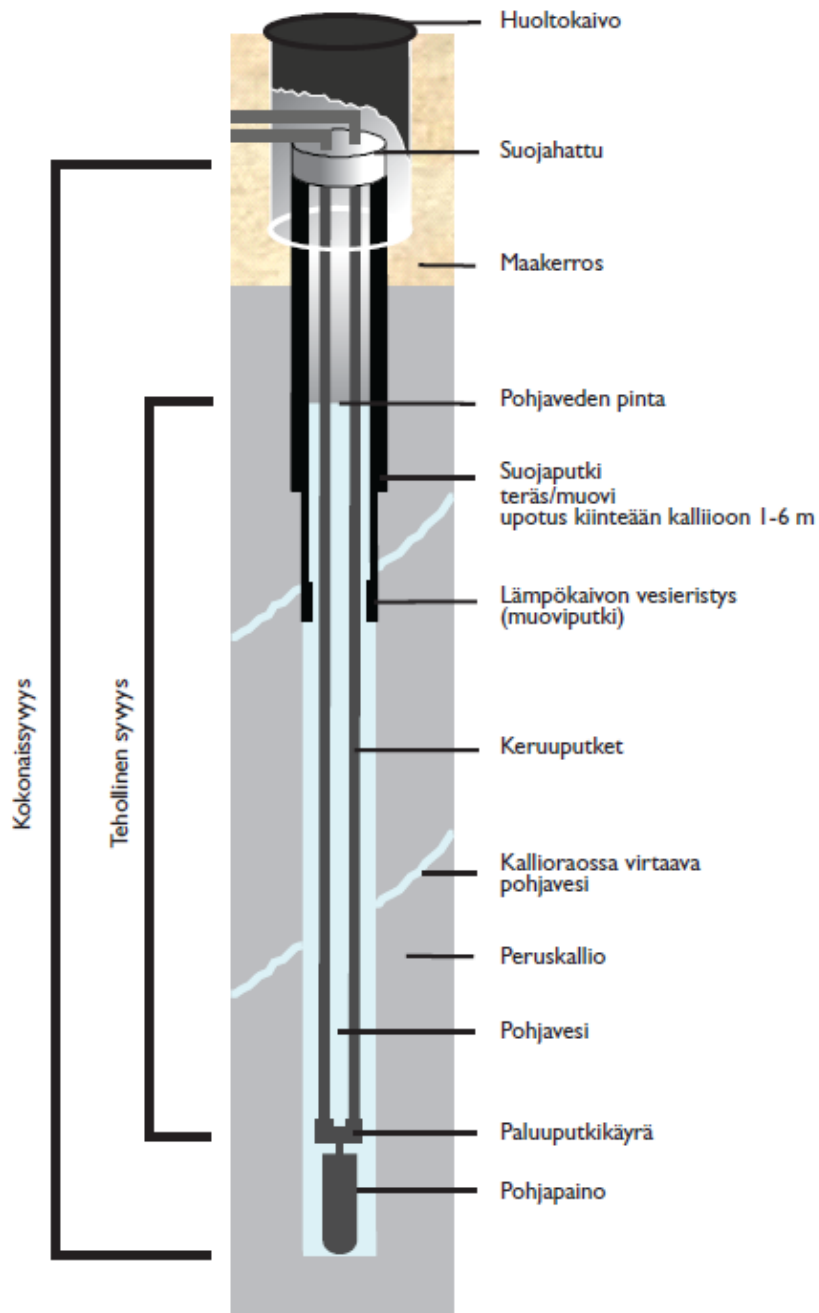
Geoterminen gradientti nostaa lämpötilaa 8 - 15 K/km, joten 100 metrin syvyydessä lämpötila on noin 1 asteen ja 200 metrin syvyydessä noin 2 astetta korkeampi kuin pintamaakerroksen lämpötila. Kuvassa 15 on esitetty kuvaa 14 vastaavat lämpötila-syvyys-käyrät, mutta myös geoterminen gradientti (10 K/km) on otettu nyt huomioon. /28./



**KUVA 15. Maaperän lämpötilan riippuvuus syvyydestä. Geotermisen gradientin suuruus on tässä 10 K/km /28/**

## 7 LÄMPÖKAIVO

Suomen Kaivonporausurakoitsijat r.y. ovat määritelleet normilämpökaivon. Normikaivon porareian minimihalkaisija on 130mm. Kaivosyvyyden määrittelee lämpöpumpputoimittaja. Porakaivon syvyys on oltava 10 m syvempi kuin määritelty aktiivisyvyys. Aktiivisyvyydellä tarkoitetaan kaivossa olevan vesipatsaan korkeutta. Lämpökaivon yläpuolinen osuus pitää olla tiivis, eikä sinne saa päästä ulkopuolisia sadevesiä /31/. Kuvassa 16 on esitetty lämpökaivon rakenne, ja kuvassa 17 on esitetty esimerkki tiivistä kaivon yläosasta.



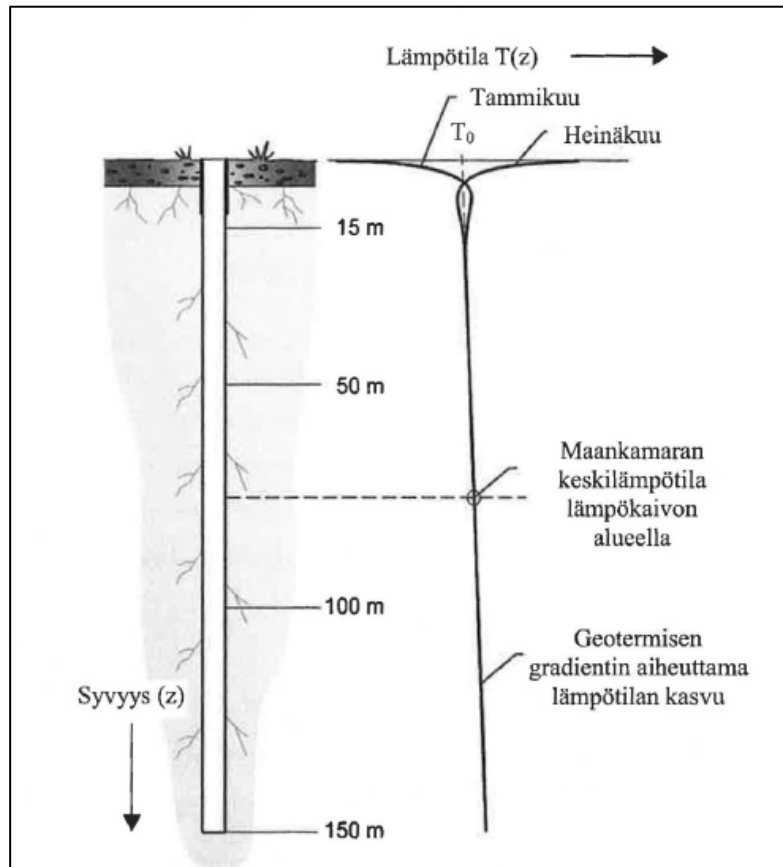
**KUVA 16. Lämpökaivon rakenne /6/**



**KUVA 17. Esimerkki lämpökaivon tiiviistä yläosasta /32/**

Lämpökaivon mitoituksessa ympäristön lämpötilana voidaan pitää lämpötilaa kaivon puolivälissä tai maanpinnan vuotuista keskilämpötilaa (kuva 18). Lämpökaivossa

lämpötila laskee eniten ensimmäisen viiden vuoden aikana. Tämän jälkeen kaivon lämpötila pysyy lähes vakiona. Stationääritilanteessa lämpökaivoon virtaava lämpö on peräisin maanpinnalta. Lämpökaivon mallinnuksen mukaan kalliolämpöjärjestelmän toiminnan kannalta on tärkeää mitoitaa lämpökaivo ja lämmönoton keskiteho kallioperän ominaisuuksien mukaan oikein. Erityisesti maanpinnan keskilämpötilan vaikutus on suuri kaivosta saatavaan energiamäärään. /28./



**KUVA 18. Tyypillisen 150 m syvän lämpökaivon lämpötilan muutos. Muokattu Hellströmin (2006) kuvasta /28/**

Lämpökaivon ominaisuudet vaikuttavat siihen, kuinka hyvin lämpö kulkee lämpökaivon seinämästä lämmönkeruunesteeseen ja sitä kautta lämpöpumpulle. Eräs merkittävimmistä tekijöistä on lämmönkeruuputkiston meno- ja paluuputkien etäisyys toisistaan. Putkia voidaan painaa lähemmäksi kaivon seinää ja kauemmaksi toisistaan tätä varten suunnitelluilla kappaleilla. /28./

Lämmönotto lämpökaivosta aiheuttaa lämpötilan laskua kaivon ympäristössä. Hyvä lämmönjohtavuus parantaa lämmön siirtymistä ympäröivästä kalliosta kaivon seinämään ja pienentää lämpötilan laskua kaivon lähellä. EED-mallinnuksella on todettu,

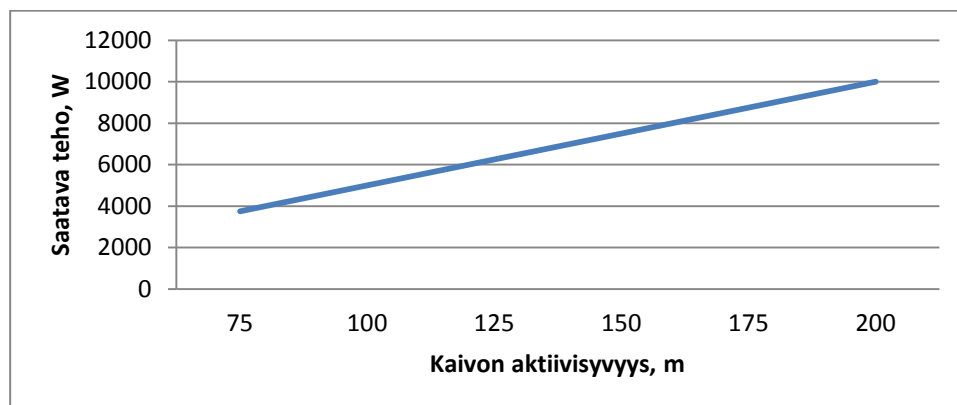
että tavallinen 150 metriä syvä lämpökaivo, josta otetaan lämpöä vuositasolla keskimäärin 10 W/m, aiheuttaa lämpötilan laskua ympäröivässä kalliassa jopa yli 75 metrin päässä kaivosta. Lämpötilan laskun voimakkuus pienenee kuitenkin voimakkaasti ensimmäisen parinkymmenen metrin jälkeen. Jos toisistaan 15 m etäisyydelle asennetuista lämpökaivoista otetaan saman verran lämpöenergiaa, lämpötila kaivoissa laskee 0,5 - 1,0 °C toisen kaivon vaikutuksesta. Lämpökaivon lämpötilan laskiessa yhden asteen huononee lämpöpumpun lämpökerroin noin 3 %. /28./

## 7.1 Lämpökaivon mitoitus

Maalämpöpumppujen mitoituksessa käytetään joko osa- tai täystehomitoitusta. Lämpökaivon mitoituksessa on kuitenkin huomioitava aina täysteho, jotta kaivosta saatava energia riittää. Suomen kallioperän kivilajien lämmönjohtavuuksissa voi olla huomattavia eroja, esim. graniitin keskimääräinen lämmönjohtavuus on n. 3,4 W/(mK) ja kiilleliuskeen 2,0 W/(mK). Kiviaineen lämmönjohtavuus vaikuttaa merkittävästi tarvittavien energiakaivojen määrään ja syvyyteen./6./

Kiviaineen lämmönjohtavuus vaikuttaa lämpötilagradienttiin kaivon ympärillä, koska lämpötilaero kasvaa, kun lämmönjohtavuus huononee merkittävästi tarvittavien energiakaivojen määrään ja syvyyteen.

Lämpökaivosta otetaan yleensä lämpöenergiaa 50 – 150 kWh kaivometriä kohden. Hyvänä suunnitteluarvona pidetään 100 kWh/m lämpökaivon aktiivisyvyydestä laskettuna. Kaivo pitää myös mitoittaa niin, että ääriolosuhteissa kaivosta ei oteta yli 50 W/m. Kuvassa 19 on esitetty lämpökaivosta saatava teho kaivon aktiivisyvyyden mukaan. Laskelmassa on käytetty tehon arvona 50 W/m.



**KUVA 19. Lämpökaivosta saatava teho kaivon aktiivisyvyyden mukaan**

Kuvassa 20 on esitetty eri syvyyksistä lämpökaivoista lämpöpumpulla käyttöön saatavat kokonaisenergiämäärät lämpöpumpun eri SPF-arvoilla. Kuvan diagrammi on tehty kaavojen 14 ja 15 mukaan. Laskelmassa on käytetty lämpökaivosta saatavana vuotuisena energiamääränä 100 kWh/m. Esitetyt energiamäärät ovat vain arvioita ja todellisuudessa saatavaan energiamäärään vaikuttavat monet tekijät, kuten sijainti ja kivilaji. Lämpökaivon syvyysarvot ovat aktiivisyvyyksiä, eli Poratekin normilämpökaivon ohjeiden mukaan näihin lämpökaivon syvyyksiin tulee lisätä vähintään 10 metriä.

$$Q_{kaivo} = H_{kaivo} \times 100 \text{ kWh/m} \quad (14)$$

$Q_{kaivo}$  kaivosta saatava lämpöenergia, kWh/a

$H_{kaivo}$  kaivon aktiivisyvyys, m

$$Q_{tuotto} = Q_{kaivo}/(SPF - 1) + Q_{kaivo} \quad (15)$$

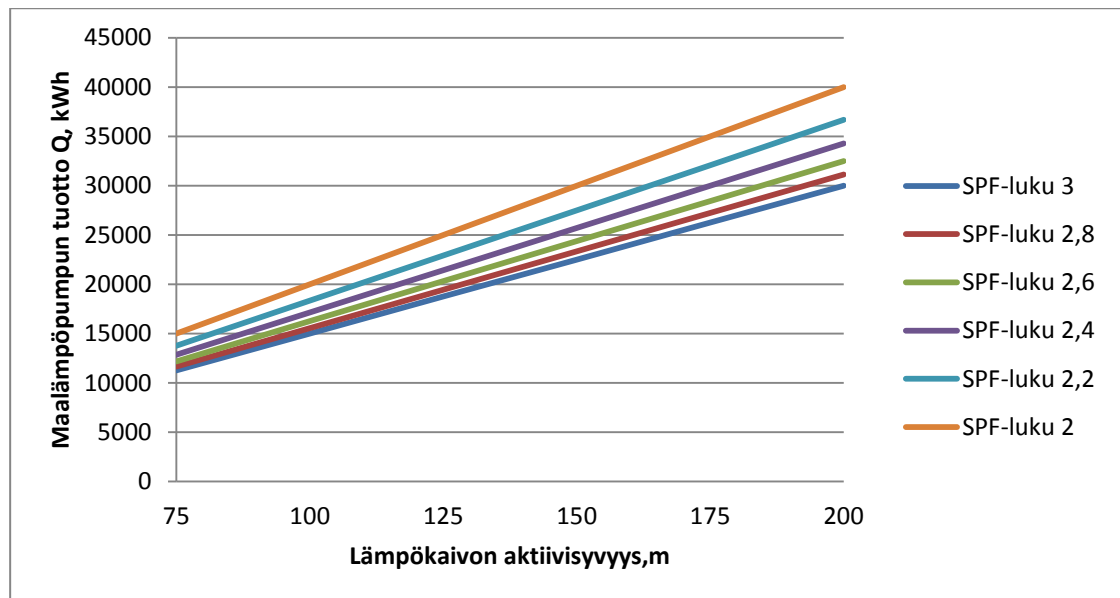
$Q_{tuotto}$  lämpöpumpun tuottama kokonaislämpöenergia, kWh/a

$SPF$  lämpöpumpun kausisuorituskykykerroin.

Esim.  $Q_{kaivo} = 100\text{m} \times 100\text{kWh/m} = 10000 \text{ kWh}$

$$Q_{tuotto} = \frac{10000\text{kWh}}{3-1} + 10000\text{kWh} = 15000 \text{ kWh}$$





**KUVA 20. Maalämpöpumpulla tuotettavissa oleva vuotuinen lämpöenergia riippuen SPF-luvusta ja lämpökaivon aktiivisyvyydestä, kun lämpöenergiaa otetaan kaivosta 100 kWh/m.**

Kaivon aktiivisyvyys on 100 m ja haluttu SPF-luku on 2,0, tällöin MLP:sta saatu kokonaisenergiämäärä on 20000 kWh:a. Tämä jakautuu siten, että kaivosta otetaan 10000 kWh ja sähköä tarvitaan 10000 kWh. Samasta kaivosta SPF-luvulla 3,0 kokonaistuotto on 15000 kWh jolloin energiämäärät jakautuvat siten, että lämpökaivosta otetaan 10000 kWh, mutta sähköä tarvitaan vain 5000 kWh. On hyvä huomioida, että haluttaessa saman syvyydestä kaivosta enemmän energiaa, vaikuttaa se MLP:n sähkön kulutukseen ja huonontaa SPF-lukua. Kuvasta 20 voidaan arvioida myös tarvittava lämpökaivon aktiivisyvyys, kun tunnetaan vuotuinen lämpöenergian tarve ja SPF-luku. Syvyyttä arvioitaessa on huomioitava, että kaivon aktiivisyvyys on riittävä sekä maksimi hetkelliseen tehoon että vuotuisen energiämäärään.

## 7.2 Viilennyksen vaikutus maaperään

Käytettäessä lämpökaivoa viilennykseen, poistetaan lämpöä sisäilmasta joka siirretään lämmönkeruunesteen välityksellä maaperään. Lämmönkeruuneste toimii päinvastoin kuin lämmityksessä. Neste lämpenee sitoessaan lämpöä jäädytyspatterissa ja luovuttaa lämpönsä kierron aikana ympäröivään kalliioon.

Viilennyksen vaikutuksesta lämpöpumpun lämpökerroin saattaa parantua hieman erityisesti alkusyksystä. Maahan vietävän lämpömäärän pitäisi kuitenkin olla suuri, jotta

sen voisi ajatella parantavan lämpöpumpun toimintaa talvella tai vähentävän tarvittavaa kaivon syvyyttä. Kuten taulukosta 1 havaitaan, viilennyksellä voidaan vähentää kaivon syvyyttä noin 1,3 m 1000 kWh kohti. Suurissa toimistorakennuksissa viilennystarve voi olla sitä luokkaa, että sillä on kaivon syvyyden kannalta merkitystä. /28./

**TAULUKKO 1. Viilennyksen vaikutus lämpökaivon syvyys /28/**

Viilennystarve kWh	Lämpökaivon syvyys m
0	143,3
500	142,7
1000	142
1500	141,4
2000	140,7

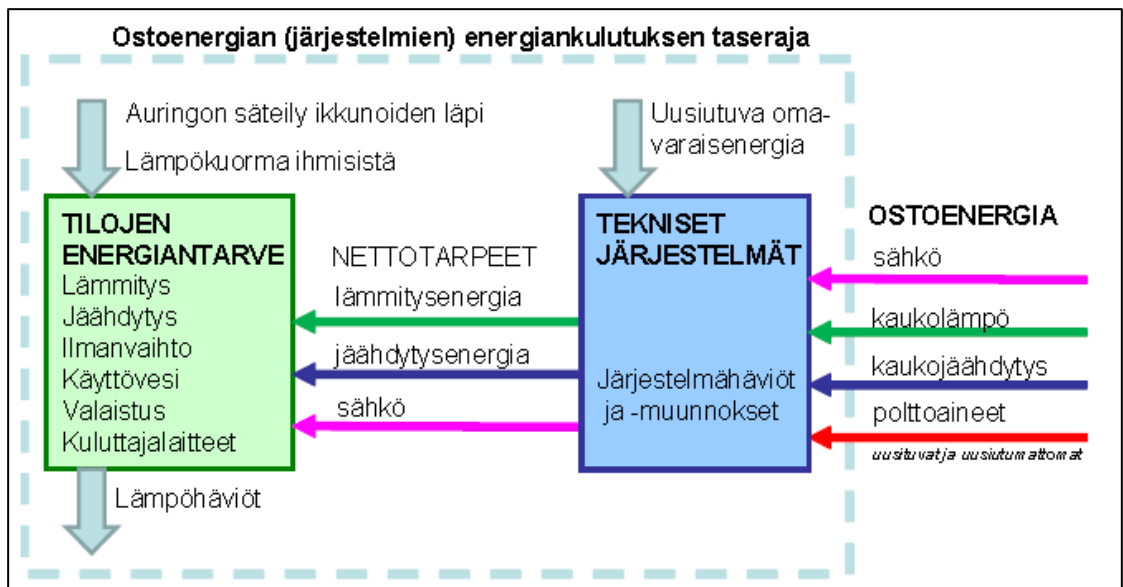
Lämpökaivon ympäristön lämpötilaa voidaan nostaa myös aurinkoenergian avulla. Pystyputkeen sarjaan kytketyllä aurinkoenergian kerääjällä ei kuitenkaan pystytä vaikuttamaan kaivon minimilämpötilaan, koska yksittäiseen putkeen viety lämpöenergia leviää ympäristöön melko nopeasti. Mikäli keskilämpötilaan halutaan vaikuttaa merkittävästi, on kallioon vietävä lämpöä 2-3 kertaa sieltä otettu määrä /30/. Ongelmalliseksi järjestelmän tekee se, että aurinkoenergiakeräimessä lämmönkeruunesteen lämpötila saattaa nousta yli sadan asteen. Maalämpökaivojen putkimateriaali on PEM, jonka korkein sallittu käyttölämpötila on +50 °C /33/. Järjestelmään on asennettava välivarasto, jossa nesteen lämpötila viilenee tasolle, josta se voidaan johtaa maalämpökaivoon. Lämpökaivon lataamista aurinkoenergiakeräimen avulla voidaan harkita erityisesti, jos lämpökaivo on alimitoitettu tai alueella sijaitsee useampia lämpökaivoja liian lähekkäin.

### 7.3 Lämmönkeruuneste

Maalämpöpiirissä käytettävä lämmönkeruuneste tulee olla jäätymätöntä ainetta. Nykyisin yleisenä aineena käytetään veden ja etyleenialkoholin tai etyleeniglykolin seosta. Etanoli/etyleeniglykoli muodostaa n. 30 % kokonaisnestetilavuudesta ja estää keruuliuosta jäätymästä. Liitteessä 1 on esitetty etyleenialkoholin ja vesiseoksen aineominaisuuksista ominaislämpökapasiteetti, tiheys, kinemaattinen ja dynaaminen viskositeetti sekä lämmönjohtavuus. /34./

## 8 RAKENNUSTEN ENERGIATEHOKKUUSVAATIMUKSET

Rakennuksen kokonaisenergiankulutus (*E-luku*) on laskettava uudisrakennuksille sekä 1.6.2013 lähtien myös olemassa oleviin myytäviin tai vuokrattaviin rakennuksiin, jotka on rakennettu 1980 jälkeen. Rakennuksen E-luvulla tarkoitetaan laskennallista energiamuotokertoimella painotettua kokonaisenergiankulutusta. E-luku on siis energiamuotojen kertoimilla painotettu rakennuksen vuotuinen ostoenergiakulutus rakennustyyppin standardikäytöllä lämmitettyä nettoalaa kohden. Ostoenergia on rakennukseen ostettu sähkö-, kaukolämpö-, jäähdytysenergia ja polttoaine. Ostoenergia koostuu lämmitys-, ilmanvaihto-, jäähdytysjärjestelmien sekä kuluttajalaitteiden ja valaistuksen energiankulutuksesta energiamuodoittain eriteltynä, missä on otettu huomioon vähennykset uusiutuvasta omavaraisenergiasta /35; 36/. Kuvassa 21 on esitetty Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3:n rajaama ostoenergian taseraja.



**KUVA 21. Ostoenergiankulutuksen taseraja /36/**

Energiamuotojen kertoimilla tarkoitetaan energialähteen tai energiatuotantomuodon kertoimia, joilla eri energiamuodot kerrotaan energialuvun laskemiseksi. Energiamuotokerroin perustuu primäärienergiakertoimeen, mutta se sisältää myös energiapoliittista ohjausta. Taulukossa 2 on Srakmk:n osassa D3 2012 ilmoitetut energiamuotokerroimet, joita on käytettävä E-luvun laskennassa.

**TAULUKKO 2. Srakmk osan D3 2012 E-luvun laskennassa käytettävät energiamuotokertoimet**

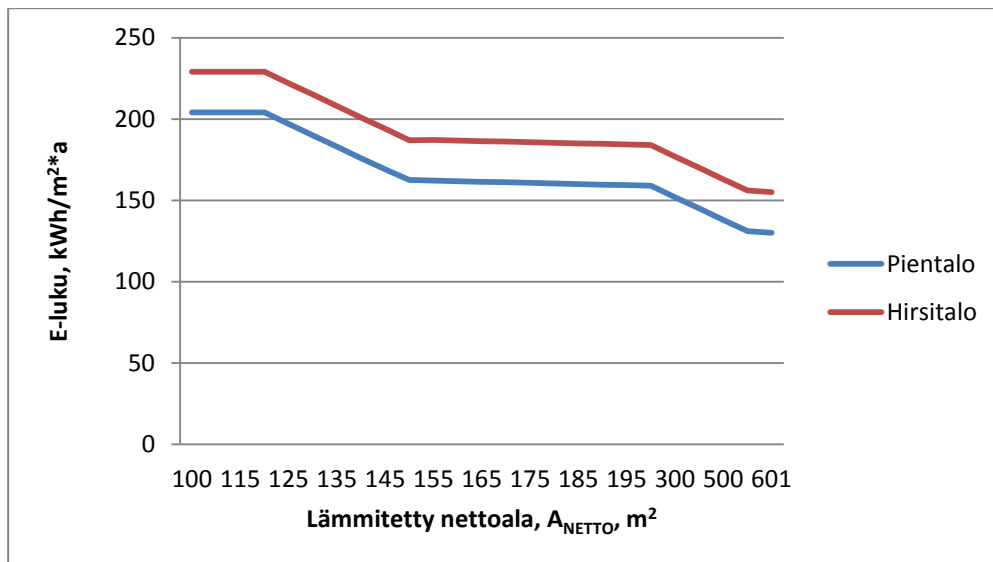
	<b>Energiamuotokertoimet</b>
Sähkö	1,7
Kaukolämpö	0,7
Kaukojäähdytys	0,4
Fossiiliset polttoaineet	1
Uusiutuvat polttoaineet	0,5

Uudisrakennuksen energiatehokkuusvaatimukset on esitetty Srakmk:n osassa D3. Uudisrakentamisessa E-luku ei saa ylittää taulukon 3 arvoja.

**TAULUKKO 3. E-luvun enimmäisarvot rakennustyypeittäin**

<b>Käyttötarkoitus</b>	<b>E-lukuvaatimus, kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>
Luokka 1 Pientalo Rivitalo	Pinta-alan mukaan 150
Luokka 2 Asuinkerrostalo	130
Luokka 3 Toimistorakennus	170
Luokka 4 Liikerakennus	240
Luokka 5 Majoitusliikerakennus	240
Luokka 6 Opetusrakennus ja päiväkoti	170
Luokka 7 Liikuntahalli (pois lukien uima- ja jäähalli)	170
Luokka 8 Sairaala	450
Luokka 9 Muut rakennukset ja määräaikaiset rakennukset	E-luku on laskettava, mutta sille ei ole asetettu vaatimusta.

Luokkaan 1 kuuluvien pientalojen ja hirsitalojen E-luvun maksimi-arvot ovat pinta-alasidonnaisia. Pieni rakennus voi kuluttaa enemmän energiaa pinta-alaa kohden kuin isompi. Alle 600 m<sup>2</sup> hirsitaloissa ostoenergian kulutus voi olla suurempi kuin muilla materiaaleilla rakennetuissa pientaloissa. Kuvassa 22 on esitetty Srakmk:n osan D3 kohdan 2.1.4 kaavoilla laskettujen pientalon ja pienhirsitalon enimmäisarvot lämmitettyä nettopinta-alaa kohden.



**KUVA 22. Pientalon ja pienhirsitalon E-luvun enimmäisarvot lämmitetyn nettoalan mukaan**

## 9 MAALÄMPÖPUMPUN VAIKUTUS E-LUKUUN

Standardissa SFS-EN 15316-4-2 on esitetty vaatimukset ja tehokkuuslaskelmat lämpöpumppujärjestelmälle. Se tukee EU:n rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (EPBD) 2002/91/EY olennaisia vaatimuksia. Suomessa on annettu kansalliset ohjeet lämpöpumppujen energialaskentaan Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D5, Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, ohjeet 2012 (luonnos 14.3.2012) sekä ”Lämpöpumppujen energialaskenta” -oppaassa. Lämpöpumppujen energiakulutuksen laskemiseksi voidaan käyttää joko ns. yksinkertaista menetelmää tai yksityiskohtaista menetelmää. Yksinkertaista laskentamenetelmää voidaan käyttää lämpöpumppujen energialaskennassa. Lämpöpumppujen tehomitoitusta sillä ei voida tehdä, joten tehomitoitukset pitää selvittää muulla tavalla. Jos halutaan tarkempaa lämpöpumppujen mitoitusta, on käytettävä yksityiskohtaista mitoitusta /6./.

Yksinkertaisella laskentamenetelmällä voidaan laskea lämmityskäytössä olevan lämpöpumpun sähköenergian kulutus, lämpöpumpun tuottama tilojen ja käyttöveden lämmitysenergia sekä niiden lämmitykseen tarvittava lisälämmitysenergia. Lämpöpumpun sähköenergian kulutus koostuu lämmitysenergian tuoton energiankulutuksesta sekä lämpöpumpun apulaitteiden sähkönkulutuksesta. Maalämpöpumpun apulaittei-

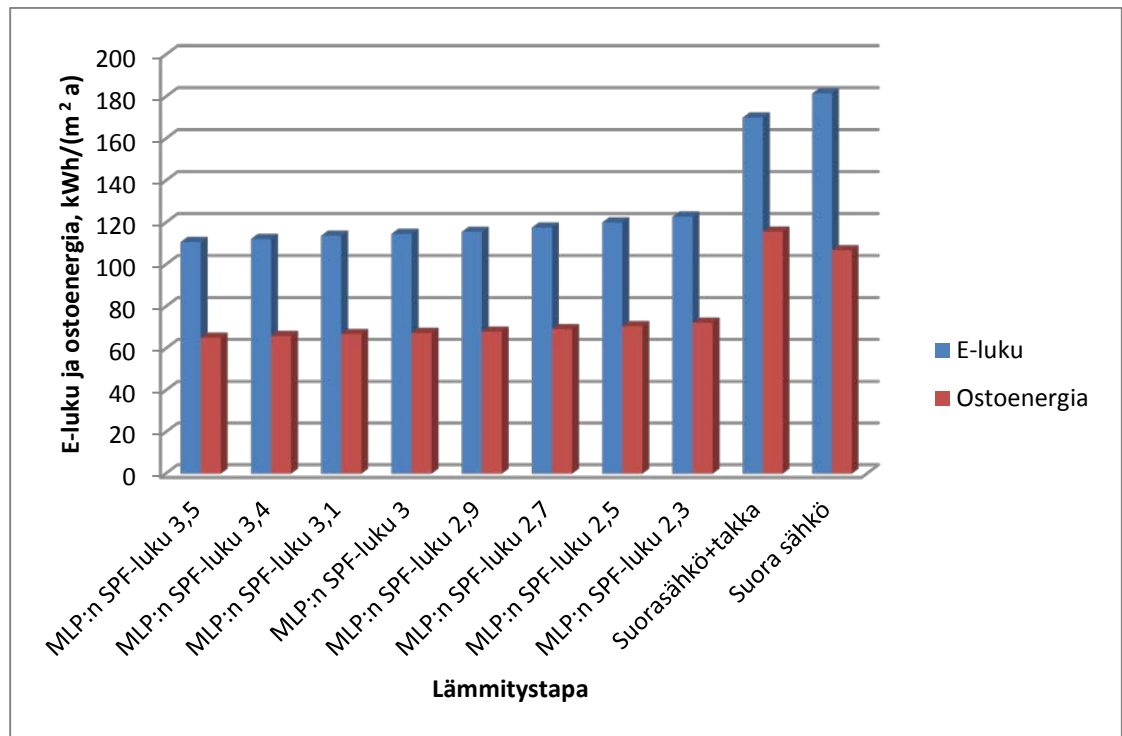
siin luetaan kuuluviksi mm maaliuospumppu. Lämpöpumpun sähköenergiankulutus lasketaan lämpöpumpun tuottaman tilojen tai käyttöveden lämmitysenergian sekä lämpöpumpun vuoden keskimääräisen lämpökertoimen SPF-luvun avulla. Tällä laskentamenetelmällä on oletettu, että maalämpöpumppu lämmittää vuorotellen käyttövettä ja tiloja siten, että käyttövettä lämmitetään ensisijaisesti. /6./

Yksityiskohtaisella laskentamenetelmällä voidaan laskea, kun lämpöpumpun ominaisuudet tunnetaan tarkemmin ja niistä on tehty standardin mukaiset testaukset. Laskenta voidaan tehdä lämpöpumpuille, jotka lämmittävät tiloja ja käyttövettä samaan aikaan tai vuoroittaiskäytöllä. Tulokset voidaan laskea tietylle ajanjaksolle tai koko vuodelle lämpöpumpusta ja lämmöntarpeesta sekä laskennan tarpeesta riippuen. Laskennassa otetaan huomioon lämpöpumpun ominaisuudet, lämmönlähde sekä lämmönjakojärjestelmä./6./

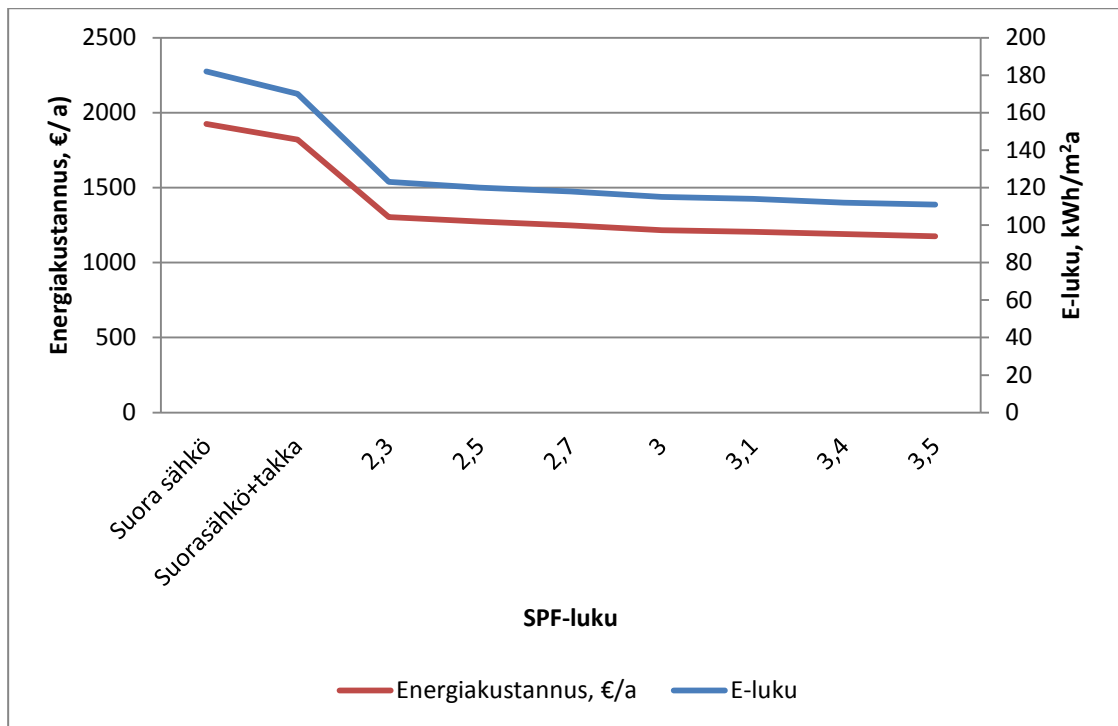
Seuraavassa on laskettu esimerkkikohteen E-luku ja ostoenergiat. Esimerkkikohteenä on pientalo (maanvastainen laatta), jonka lämmitetty nettoala on  $150 \text{ m}^2$ . Rakennuksen ostoenergian nettotarve on laskettu IDA ICE-ohjelmalla ja edelleen Exceltaulukkolaskennalla rakennuksen E-luku. Ikkunoita on 13 % rakennuksen maanpäällisestä kerrosalasta. Laskelmat on tehty erikseen suoralle sähkölämmitykselle sekä suoralle sähkölämmitykselle, joka on varustettu takalla. Toinen laskelma on tehty samalle pientalolle, joka lämmitetään maalämpöpumpulla. Lämpöpumppuratkaisussa laskelmat on tehty eri SPF-luvuilla. Oletuksena on, että lämpöpumppu lämmittää vuorotellen tilojen lämmitystä ja käyttövettä. Lämmönjakotapana laskemissa on lattialämmitys (sähköinen tai vesikiertoinen). Rakenneosien lämmönläpäisykertoimina on käytetty SRakMk D3:n vertailurakennuksen arvoja. Vaipan ilmanvuotolukuna on käytetty arvoa  $2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ . Ikkunan g-arvona on käytetty 0,5548. Ikkunoiden aurinkosuojaimia ei ole käytetty. Lämmönjakohuone on rakennuksessa. Lämpimän käyttöveden kiertojohdot ei ole. Lämpimän käyttöveden jakoputkistona on PEX -putki eristetyssä suojaputkessa. Eristyksen paksuus on 20 mm, joka vastaa eristyksen paksuuden lukuarvoa 1,5D. Sähkölämmitteisessä talossa on 400 l lämminvesivaraaja. Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho (SFP-luku) on  $2,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$  ja ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilasuhde on 60 % tulo- ja poistoilmavirtojen ollessa yhtä suuret. Käyttöveden kulutus ja sisäiset lämpökuormat vastaavat standardikäyttöä. Maalämpöpumpun ostoenergian ja E-luvun laskelmissa lämpimän käyttöveden lämmityksessä on käytetty SPF -lukua 2,3. Laskelmassa on käytetty energiamarkkinaviraston (1.1.2013) sähkön

painotettua keskihintaa veroineen (11,97 snt/kWh). Keskihinta sisältää energiahinnan, sähköverot ja siirtomaksut./37./

Kuvassa 23 on vertailtu suoran sähkölämmityksen E-lukua ja maalämpöpumpun E-lukua toisiinsa. Esimerkkitalon maalämpöpumpun SPF -luvun vaikutus E-lukuun ja vuotuisiin energiakustannuksiin on esitetty kuvassa 24. Lopuksi taulukossa 4 on vertailtu vuotuisia energiakustannuksia eri laskentatapauksissa.



**KUVA 23. Maalämpöpumpun SPF -luvun vaikutus pientalon E-lukuun, jonka lämmitetty nettoala on 150 m<sup>2</sup>**



**KUVA 24. Maalämpöpumpun SPF -luvun vaikutus pientalon E-lukuun ja energiakustannuksiin. Lämmitetty nettoala on 150 m<sup>2</sup>. Sähkön hintana on käytetty 11,97 snt/kWh**

**TAULUKKO 4. Esimerkki pientalon lämmitetty nettoala 150 m<sup>2</sup> energiakustannukset, kun sähköenergian hinta on 11,97 sentt/kWh vuoden 2012 energiaindustriaviraston 1.1.2013 päivätyn tilaston keskihinnan mukaan**

	Maalämpöpumppu								
	Suora sähkö	Suorasähkö+takka	Tilat 2,3	Tilat 2,5	Tilat 2,7	Tilat 3	Tilat 3,1	Tilat 3,4	Tilat 3,5
Ostoenergia, kWh/(m <sup>2</sup> a)	107	116	72,3	70,6	69,2	67,4	66,9	66,0	65,2
Energiakustannus, €, kWh/(m <sup>2</sup> a)	12,8	12,1	8,7	8,5	8,3	8,1	8,0	7,9	7,8
Energiakustannus, €, kWh/a	1925	1821	1303	1273	1247	1215	1206	1189	1174

Sähkölämmityksellä varustetun pientalon vuotuinen ostoenergia on 107 kWh/m<sup>2</sup> ja E-luku on 182 kWh/m<sup>2</sup>. E-luku ei täytä vaatimusta, joka tämän kokoisessa rakennuksessa on 163 kWh/m<sup>2</sup> /36/. Kun samaan taloon lisätään takka, tällöin ostoenergian tarve on 116 kWh/m<sup>2</sup>. Ostoenergian tarve kasvaa 8,4 %. Vastaavasti E-luku on 168 kWh/m<sup>2</sup> eli se pienenee 5,5 % verrattuna suoraan sähkölämmitykseen.



Sähköenergialla lämmitettynä esimerkkitalossa vuotuinen sähkölasku on 1925 €. Kun rakennukseen lisätään varaava takka, tällöin sähkön kustannukseksi saadaan 1686 €. Tämän lisäksi puunpoltosta tulee oma hintansa. Oletetaan, että takka toimii 60 % hyötysuhteella. 2000 kWh lämpöenergian saamiseksi tarvitaan noin 3 irtokuutiometriä leppäpuuta /38/. Polttopuun hinta on noin 45 €/irto-m<sup>3</sup>, jolloin energian hinnaksi tulee 135 €/39/. Yhteensä nämä tekevät 1821 €. Takka säästää vuotuisessa sähkölaskussa noin 5,4 % verrattuna ilman takkaa olevaan sähkölämmitykseen.

Oletetaan, että maalämpöpumpun vuotuinen lämpökerroin on 2,7. Tällöin lämmitettävältä nettoalaltaan 150 m<sup>2</sup>:sen rakennuksen E-luku on 118 kWh/(m<sup>2</sup>a). SPF -luvulla 2,7 toimivan MLP:n ostoenergia ja E-luku ovat noin 35 % pienempiä verrattuna suoraan sähkölämmitteiseen taloon.

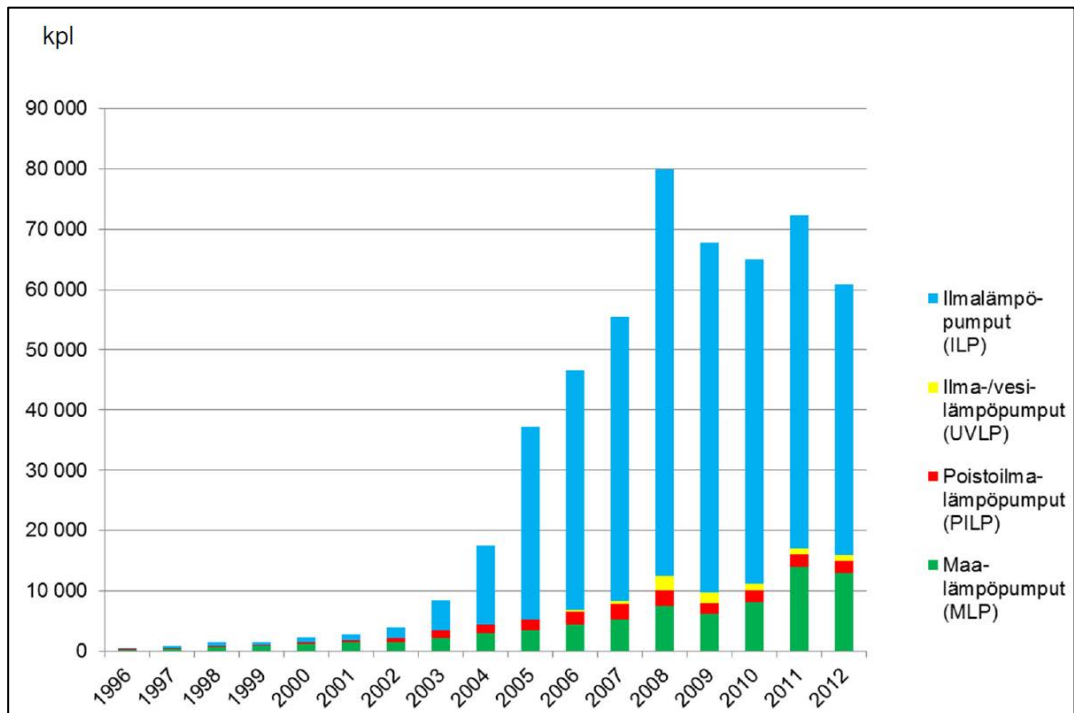
Saman rakennuksen SPF -lukua parannetaan siten, että se on 3,0, tällöin E-luku pienenee ollen 115 kWh/(m<sup>2</sup>a). Kun MLP:n SPF -lukua parannetaan 2,7:stä 3,0:een, E-luku ja ostoenergia pienenevät 2,5 %. Toisaalta SPF -luvun muutos 2,7:stä 3,5:ään pienentää E-lukua ja ostoenergiaa noin 6 %.

Maalämpöpumpun energiatehokkuus vaikuttaa suoraan vuotuisen energiamaksuun. Eri lämmitystavoilla lämmitettävän rakennuksen vuotuiset energiakustannukset on esitetty taulukossa 4. Tarkastelussa on otettu huomioon ainoastaan energian hinta. Siinä ei huomioida laitekustannuksia eikä mahdollisia laina- ja korkokustannuksia.

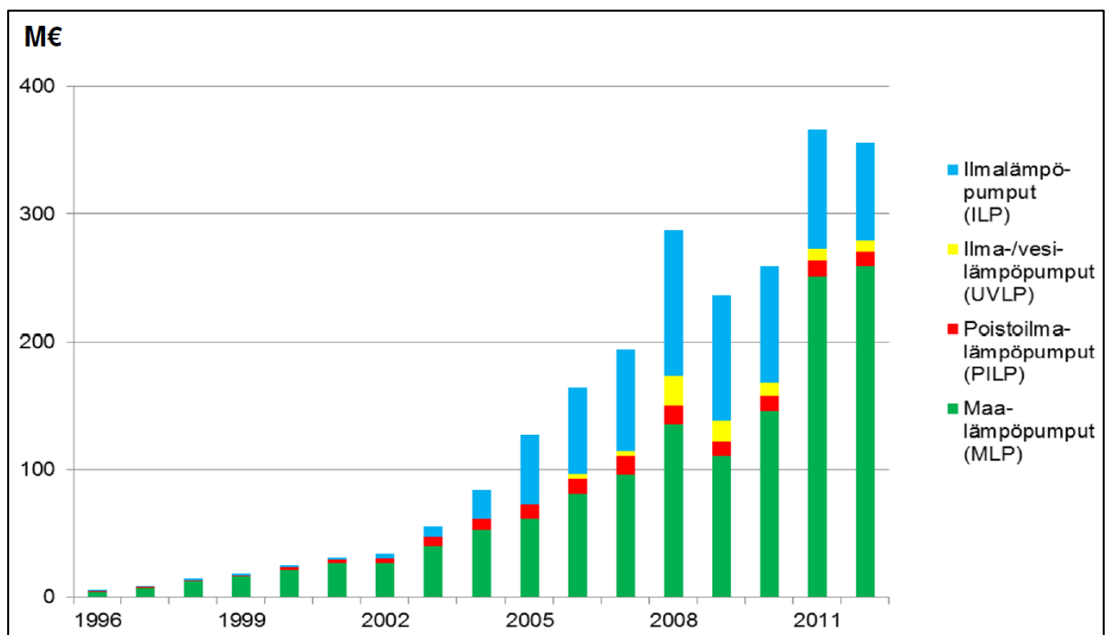
## **10 MAALÄMPÖPUMPPUJEN MYYNTITILASTO SUOMESSA**

Maalämpöpumppujen määrä on kasvanut koko 2000-luvun ajan. Vuonna 2012 maalämpöpumppuja myytiin 13 000 kpl, joka oli kuitenkin 7 % vähemmän kuin 2011. Osittain vähenemisen voi selittää valtion tekemän kotitalousvähennyksen ja energiaavustusten pienentämisellä. Kotitalousvähennys pieneni 60 %:sta 45 %:iin ja energiaavustus pientalojen osalta tuli sosiaalisin perusteiden myönnettäväksi /40; 41/. Vuonna 2012 isommissa kohteissa (rivi- ja kerrostalot) maalämpöpumppujen asennusmäärät kasvoivat lähes 30 %, joka euromääräisesti merkitsi kasvua maalämpöpumppualalle. Maalämpötyyppien tilastot vuosilta 1996 – 2012 on esitetty kuvissa 25 ja 26 /3/. Vuonna 2012 vaihtoventtiilikytkennällä olevia maalämpöpumppuja myytiin noin 70 –

80 % ja tulistuksenpoistosiirtimellä varustettuja lämpöpumppuja noin 20 - 30 % pientalojen maalämpöpumpuista /4/.



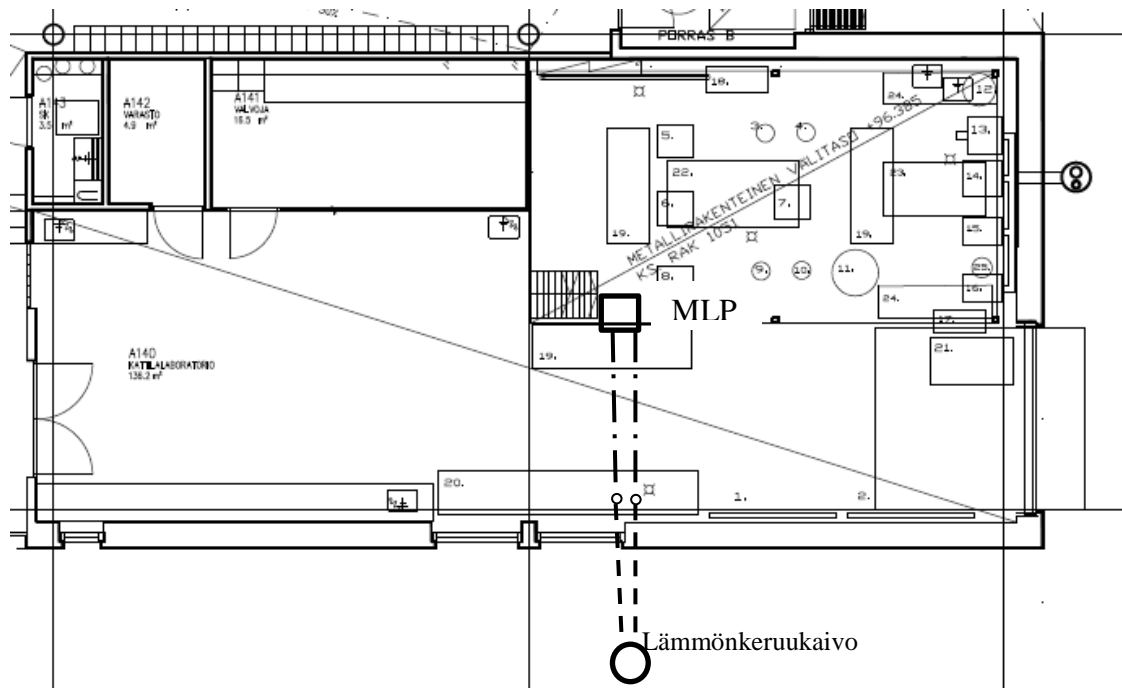
**KUVA 25. Lämpöpumppujen myyntimäärät vuosittain 1996 – 2012 /3/**



**KUVA 26. Lämpöpumppujen euromääräinen kokonaisynti vuosina 1996 – 2012 /3/**

## 11 LVI-LABORATORION OPPIMISYMPÄRISTÖN LÄMPÖPUMPPU

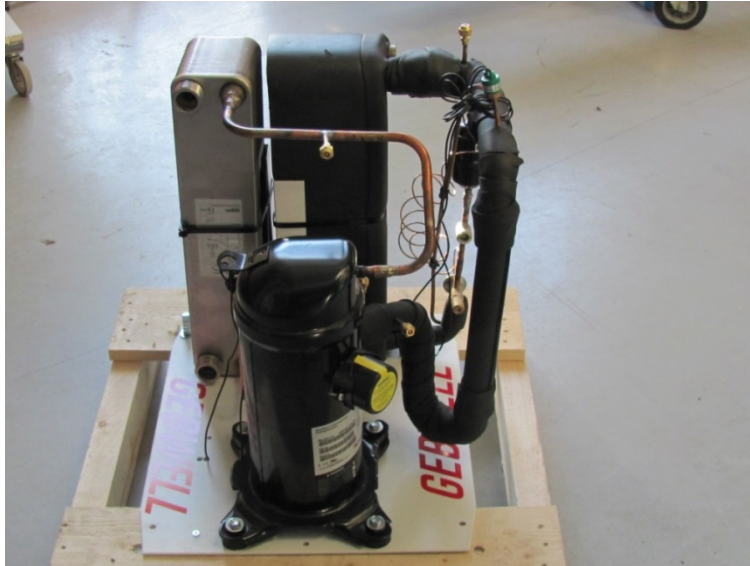
Mikkelin ammattikorkeakoulun (Mamk) LVI-laboratorioon rakennetaan maalämpöpumpputjärjestelmä, jonka lämmönlähteeksi rakennetaan aktiivisyvydeltään 200 m syvä porakaivo. Lämpökaivon suunnittelussa mitoitustehona käytetään 50W kaivometriä kohti ja lämpöenergian tuottona 100 kWh/m. Joten lämpökaivosta on mahdollista saada 10 kW:n teho ja 20000 kWh/a energiamäärä. Oppimisympäristön maalämpöpumpuksi asennetaan lämpöpumppu, josta saadaan n. 8 kW:n lämmitysteho. Maalämpöpumppu asennetaan energiatekniikan laboratorioon kuvan 27 osoittamaan paikkaan.



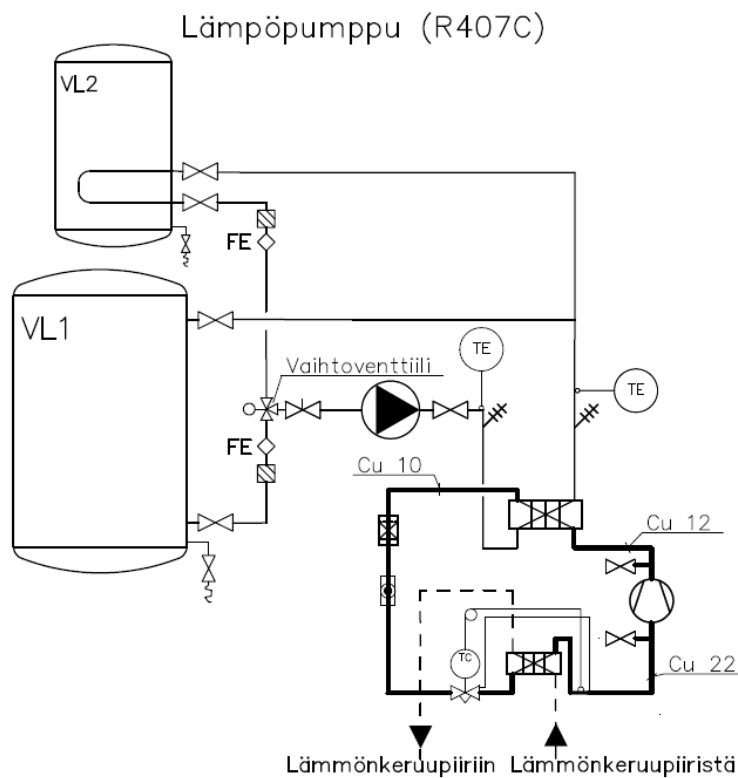
**KUVA 27. Maalämpöpumpun paikka ja tulevan lämmönkeruuputkiston reitti**

Suomessa suurin osa pientalojen maalämpöpumpuista toimii vaihtoventtiiliperiaatteella /4/. Tämä oli myös yhtenä syynä, miksi oppimisympäristöön valittiin vaihtoventtiilillä varustettu lämpöpumppu eikä tulistuksen poistosiirtimellä varustettua lämpöpumpua. Vaihtoventtiilillä voidaan ohjata lämmönsiirtimestä otettava lämpö haluttuun varaajaan. Kuvassa 28 on esitetty lämpöpumpputoimittajalta hankittu kylmäainepiiri ja sen pääkomponentit: kompressori, höyrystin, lauhdutin ja paisuntaventtiili. Järjestelmä halutaan pitää mahdollisimman avoimena, jotta oppilailta on mahdollisuus mittausten lisäksi myös tutustua pumpun komponentteihin. Kylmäainepiiriin lisäksi järjestelmään rakennetaan lämmönkeru- ja lauhdutuspiirit. Oppimisympäristössä tutkitaan lämmönkeru-, kylmäaine- ja lämmönluovutuspiirin toimintoja. Tiedonke-

ruujärjestelmällä voidaan seurata lämpötiloja tarvittavista pisteistä sekä paineita kompressorin matala- ja korkeapaine puolelta. Kuvassa 29 on esitetty laboratorioon tulevan maalämpöpumpun lauhdutus- ja kylmäainepiirin kytkennät sekä osa lämmönkeruupiirin kytkennästä.



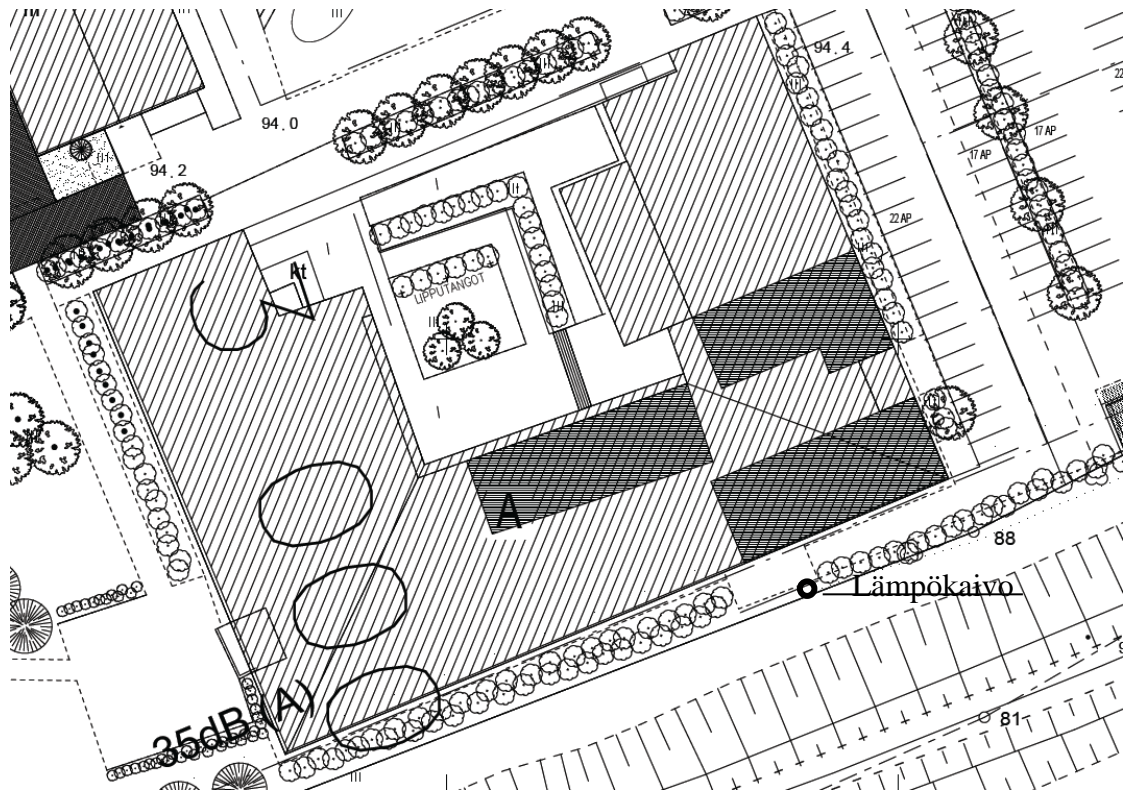
**KUVA 28. Lämpöpumpun kylmäainepiiri**



**KUVA 29. Lämpöpumpun kylmäaine- ja lauhdutuspiirien kytkennät**

### 11.1 Lämmönkeruupiirin mittausjärjestelyt

Lämmönkeruupiiristä mitataan liuoksen meno- ja paluulämpötilat sekä tilavuusvirta. Lämmönkeruunesteenä järjestelmässä käytetään 30 % etyylialkoholi - vesi -seosta ( $C_2H_5OH+H_2O$ ). Liitteessä 1 on esitetty seoksen aineominaisuudet. Lämpökaivo asennetaan A-rakennuksen etelä puolelle mahdollisimman lähelle energialaboratoriota perusmuurin ulkopuolelle noin 5 metriä ulkoseinästä. Lämpökaivon sijainti on esitetty kuvassa 30.



**KUVA 30. Tulevan lämpökaivon sijainti**

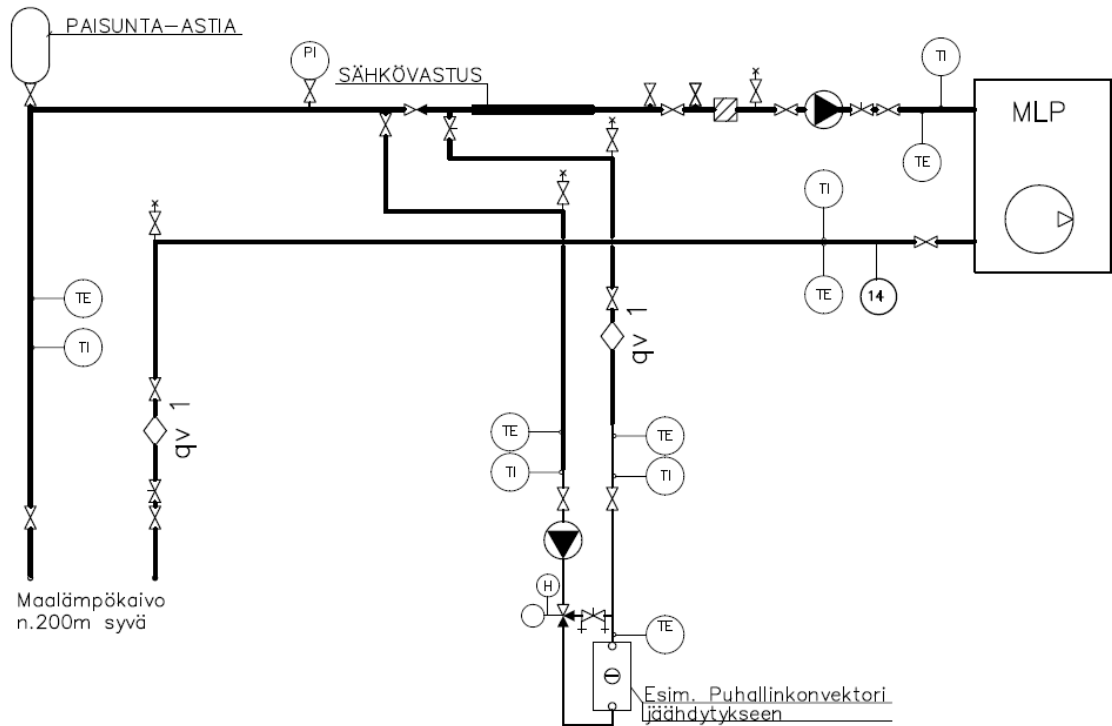
Kuvassa 31 on esitetty lämmönkeruupiirin kytkentäkaavio, jonka mukaan oppimisympäristön lämmönkeruupiiri toteutetaan. Lämmönkeruupiirin kytkentäkaavio on laadittu siten, että piiristä voidaan selvittää lämpöteho ja -energia. Lämmönkeruupiiriin asennetaan meno- ja paluuputkiin sulkuventtiilit (DN 32) rakennuksen sisäpuoliselle johto-osuudelle. Lisäksi menoputkeen asennetaan kertasäätöventtiili (DN32), josta voidaan mitata lämmönkeruupiirin tilavuusvirta. Lämmönkeruupiirin meno- ja paluuputkeen asennetaan myös 300 mm pituiset jäätymättömät nestetäyttöiset lämpömittarit sekä meno- että paluuputkeen. Paikalla luettavat lämpömittarit on merkitty kaavioon TI -merkinnällä. Mittaritaulujen näyttöasteikko täytyy olla  $-10...+40$  °C. Mittarit on oltava myös tarkistettuja. Lisäksi asennetaan yksi painemittari (PI), jonka

osoitintaulu on oltava halkaisijaltaan 63 mm ja osoitintaulu 0...1,0 bar. Lämpöenergian mittaamista varten asennetaan virtausmittari (qv 1) lämpökaivon paluuputkeen ja lämpötila-anturit (TE) meno- että paluuputkeen. Lisäksi paluuputkeen asennetaan virtausvahti kuvassa 30 numerolla 14 osoitettuun paikkaan. Virtausvahti mittaa lämpötilan muutosta. Jos lämpötilamuutosta ei tapahdu, se estää kompressorin käynnin.

Oletetaan, että maasta otettava hetkellinen teho on 5 kW. Lämmönkeruuliuoksen tiheys on  $964,5 \text{ kg/m}^3$  ja ominaislämpökapasiteetti on  $4,1845 \text{ kJ/kgK}$ . Liuospumpun tilavuusvirraksi saadaan **0,443 l/s**. Lämmönkeruupiiriin asennetaan noin 400 m DN 40 x 2,4 muoviputkea (EN standardi 1221 SDR17). Lämpökaivo asennetaan LVI-laboratorion ulkopuolelle n. 5 m päähän perusmuurista. Sisäpuolinen osuus asennetaan joko kupari- tai monikerrosmuoviputkilla. Oletetaan, että sisäpuolinen osuus tehdään DN 35 kupariputkella. Tällöin pumpun nostokorkeudeksi saadaan **78 kPa**.

Lämpökaivolta palaavaan lämmönkeruuputkeen (lämpimään nesteeseen) asennetaan sähkövastus, jolla voidaan lämmittää lämmönkeruupiirin nestettä. Järjestelyllä voidaan testata, millainen vaikutus lämmönkeruunesteen lämpötilan muutoksella on maalämpöpumpun toimintaan. Nostamalla lämpökaivosta tulevan nesteen lämpötilaa esim.  $6 \text{ }^\circ\text{C}$  virtaamalla 0,443 l/s tarvitaan noin 11 kW:n lämpövastus.

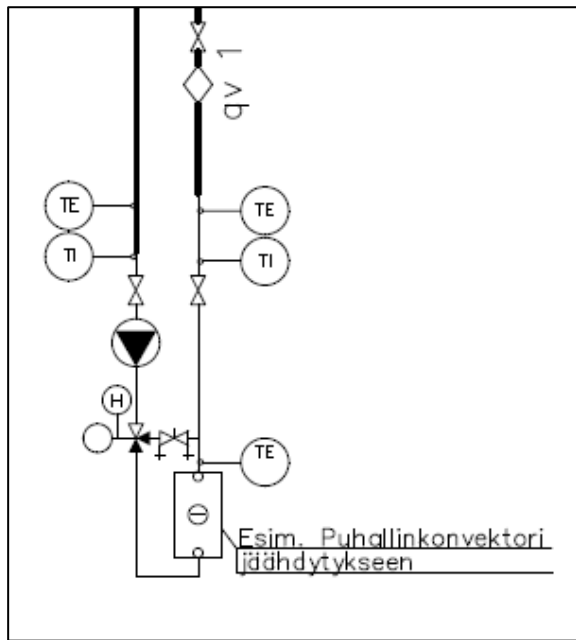
Lämpökaivon paluuputkesta otetaan haaroitus jäähdytyspiirille. Kytkeä tehdään kuvan 30 osoittamalla tavalla siten, että jäähdytyspiirin meno- ja paluuputket kytketään lämpökaivon paluuputkeen. Näiden väliin asennetaan yksisuuntaventtiili kierron varmistamiseksi. Jäähdytyspiirin paluuputkeen asennetaan kertasäätöventtiili virtaaman selvittämiseksi.



**KUVA 31. Maalämpöpumpun lämmönkeruupiirin kytkentäkaavio, johon on lisätty myös jäähdytys**

## 11.2 Jäähdytyspiirin mittausjärjestelyt

Kuvassa 32 on esitetty jäähdytyspiirin kytkentä. Kytkennässä on esitetty tarvittavat mittarit ja mittalaitteet, jotka tarvitaan jäähdytyspiiristä saatavan tehon mittaamiseen. Kuvan säätöventtiileillä voidaan säätää kiertopiirin virtaamat. Mittarit ja venttiilit eivät poikkea vaatimuksiltaan lämmönkeruupiirin varusteista. Jäähdytyspiiri voidaan toteuttaa esim. puhallinkonvektorilla. Puhallinkonvektori asennetaan joko DN 22 -kupariputkilla tai DN 25 -monikerrosmuoviputkella.



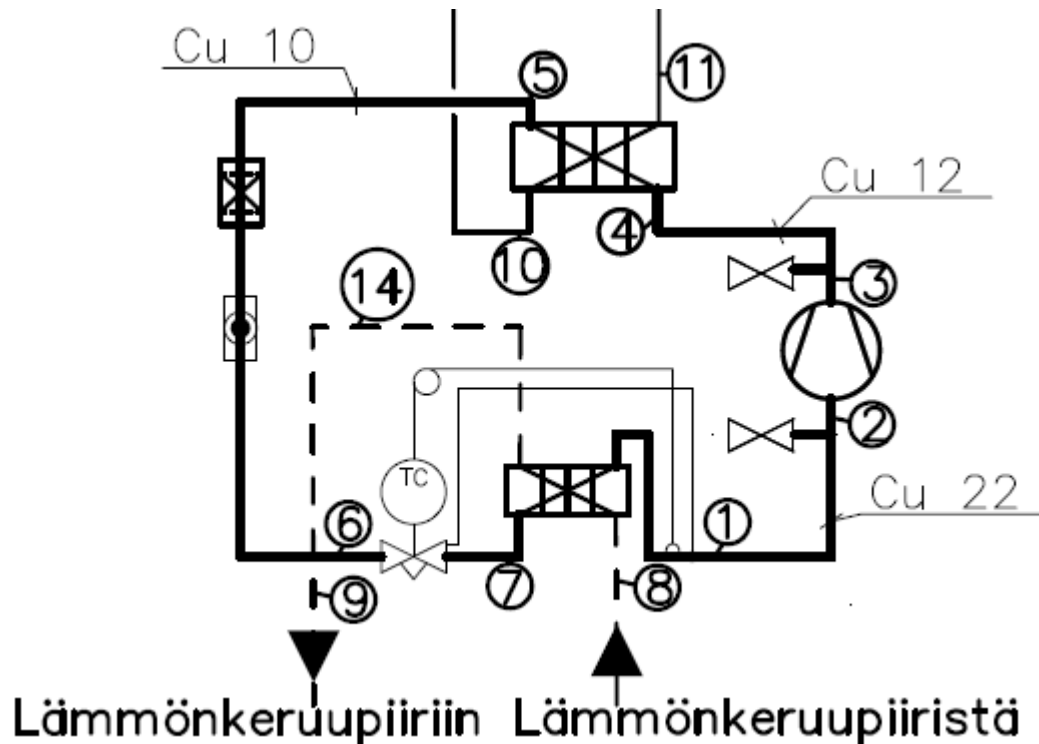
**KUVA 32. Jäähdytyspiirin kytkentä**

### 11.3 Lämpöpumpun kylmäainepiirin mittausjärjestelyt

Kylmäainepiirin kompressoriyksikkö on hankittu itäsuomalaiselta lämpöpumppuvalmistajalta. Se sisältää Danfossin HHP 021T4LP6 scroll -kompressorin sekä höyrystimenä että lauhduttimena toimivat levylämmönsiirtimet. Paisuntaventtiili on ulkopuolisella paineohjauksella varustettu termostaattinen paisuntaventtiili.

Kylmäainepiiriin asennetaan toiminnan seuranta varten lämpötila-antureita ja paineantureita sekä lämpö- että painemittareita. Kuvassa 33 on esitetty kylmäainepiirin mittauspisteiden paikat. Kylmäainepuolen mittauspisteet on numeroitu 1... 7. Paine- ja painemittarit ja paineanturit asennetaan kompressorin imu- ja painepuolelle (pisteet 2 ja 3). Näillä voidaan mitata riittävällä tarkkuudella kylmäaineen höyrystymis- ja lauhtumis-paineet. Lämpömittarit ja lämpötila-anturit asennetaan höyrystimen, kompressorin, lauhduttimen sekä paisuntaventtiilin jälkeen kuvan 31 osoittamiin paikkoihin (pisteet 1...7).





**KUVA 33. Oppimisympäristöön rakennettavan maalämpöpumpun kylmäainepiirin kytkentä ja mittauspisteet**

Järjestelmään asennetaan mekaanisten paine- ja lämpömittareiden rinnalle mittaus- ja tiedonkeruujärjestelmä paineen ja lämpötilojen seurantaan ja dokumentointia varten. Samalla järjestelmällä on mahdollista mitata myös maalämpöpumpun kuuluvien sähköä käyttävien laitteiden, kuten pumppujen ja säätömoottorien energiankulutukset sekä erikseen kompressorin ottoteho ja sen kuluttama sähköenergiämäärä.

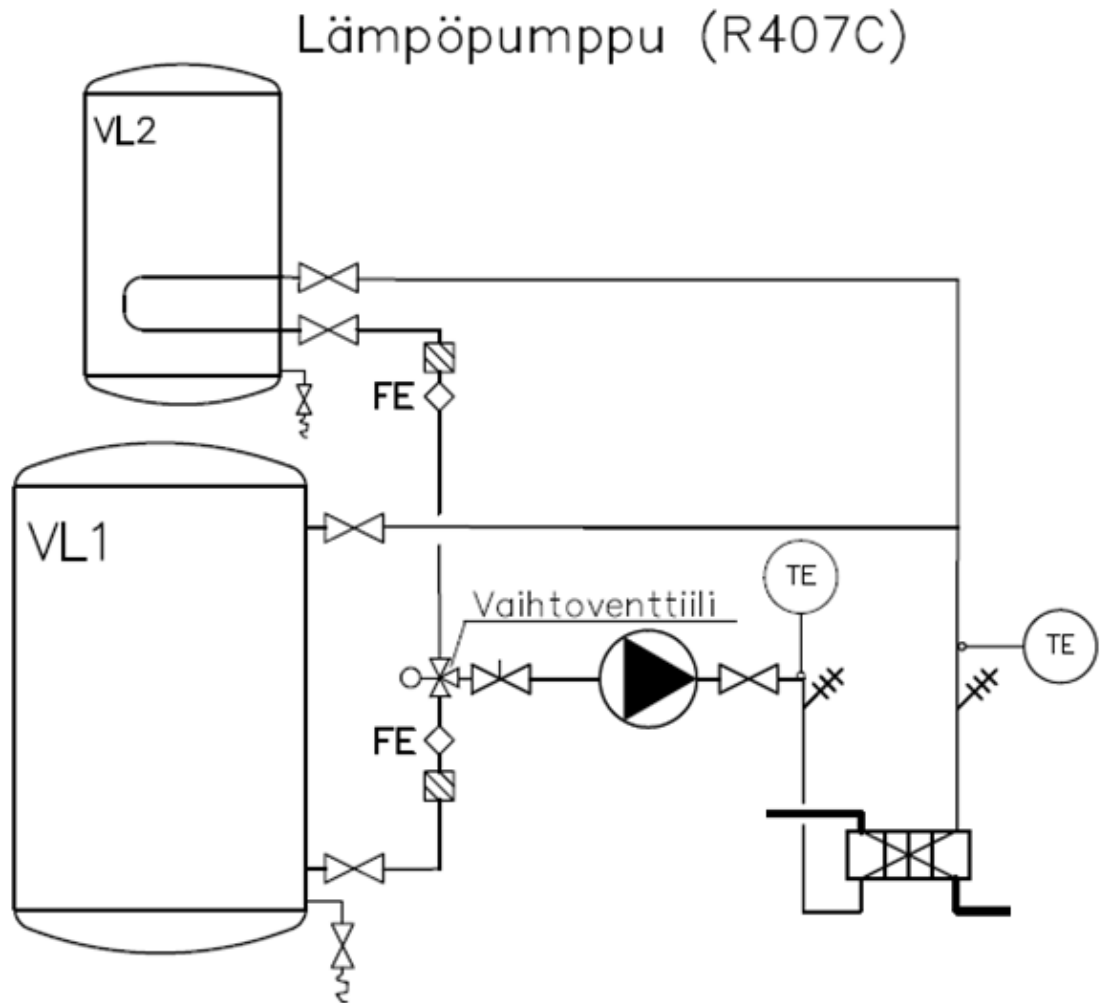
#### **11.4 Lauhdutuspiirin mittausjärjestelyt**

Pientalojen maalämpöpumpuissa kompressorin jälkeen tulistunut höyry johdetaan lauhduttimelle. Tulistuneen höyryn energia siirretään lauhduttimesta joko käyttöveden lämmitykseen tai tilojen lämmityksen nestekiertoon, jolloin höyry lauhtuu. Lauhduttimessa lauhtunut höyry saattaa tiivistyä nesteeksi eli alijäähtyä.

Oppimisympäristön maalämpöpumpun lauhduttimessa nestekiertoonsiirtynyt energia johdetaan olemassa olevaan 1500 litran energiavaraajaan (VL1) tai vaihtoehtoisesti pienempään erilliseen 500 litran käyttövesivaraajaan (VL2). Käyttövesivaraaja on säiliövaraaja, jota lämmitetään varaajan sisällä olevalla kupariputkilämmönsiirtimellä eli ns. kierukalla. Kierukassa kiertää lämmitysvesi.

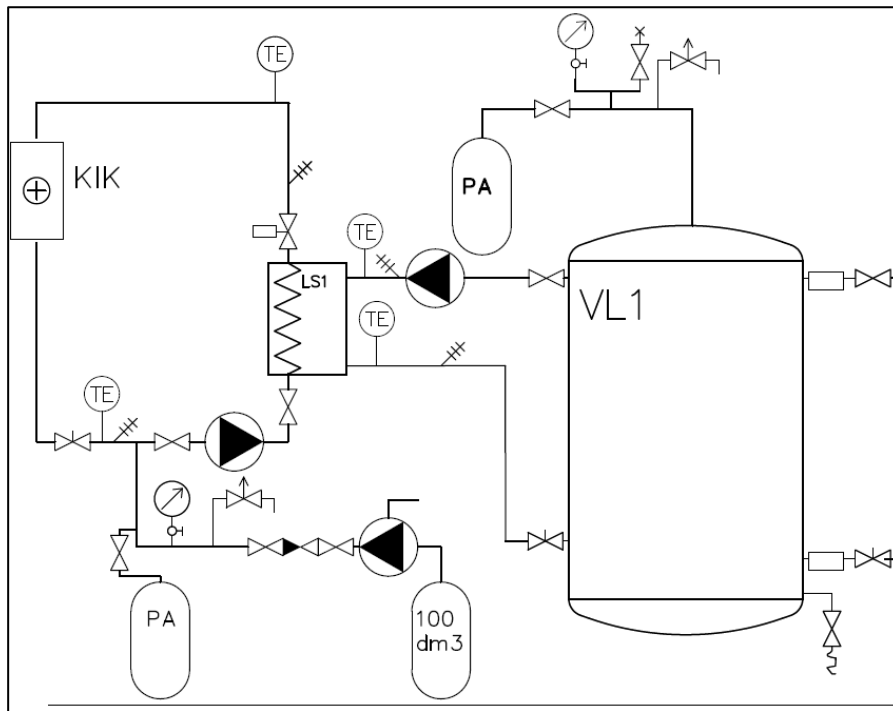
Lauhdutuspiiriin asennetaan toiminnan seurantaan varten lämpötila-antureita ja lämpömittareita. Kuvassa 34 on esitetty maalämpöpumpun kytkentäkaavio lisättynä lauhdutuspiirin putkilla ja varusteilla. Lämpömittarit asennetaan meno- ja paluuputkiin lämpömittarisymbolilla osoitettuihin paikkoihin ja lämpötila-anturit asennetaan TE-merkinnällä osoitettuihin paikkoihin. Nestevirran mittaamiseen tarvittavat mittausyhteillä varustetut kertosäätöventtiilit asennetaan kaavion osoittamiin paikkoihin. Näiden lisäksi lauhdutuspiiriin asennetaan energiamittarit (FE), joilla voidaan seurata lauhdutuspiirin energian kulutusta. Energiamittarit asennetaan molempien varaajien (VL1 ja VL2) paluuputkiin.

3-tievaihtoverventtiili asennetaan varaajien paluuputkien risteykseen. Venttiili toimii jakavana venttiilinä. Vaihtoverventtiilillä voidaan ohjata lauhduttimessa kiertävä lämminvesi joko ison (VL1) tai pienen (VL2) varaajan kiertoon. Varaajissa voidaan varastoida eri lämpöisiä vesiä ja näin testata lauhduttimeen palaavan veden lämpötilan vaikutusta lämpöpumpun lämpökertoimeen. Pienemmän varaajan lämpötilaa voidaan laskea nopeasti, jolloin samassa laboratoriomittauksessa voidaan tutkia kahden tai useamman lauhtumislämpötilan vaikutusta lämpöpumpun toimintaan.



**KUVA 34. Oppimisympäristöön rakennettavan vaihtoventtiilillä varustetun maalämpöpumpun lauhdutuspuolen kytkentä**

Varaajan (VL1) yllämpö puretaan kiertoilmapuhaltimella ulos. Tämä vaatii nesteeltä pakkasen kestävyyttä. Jäätymättömän nesteen ja lämmitysveden väliin asennetaan lämmönsiirrin, jolloin ne eivät pääse sekoittumaan. Energiavaraajasta ulos johdettava lämpöenergia voidaan todeta mittauksin. Kuvan 35 kytkentäkaaviossa on esitetty energian mittaamiseen tarvittavien kertsäätöventtiilien ja lämpömittareiden paikat.

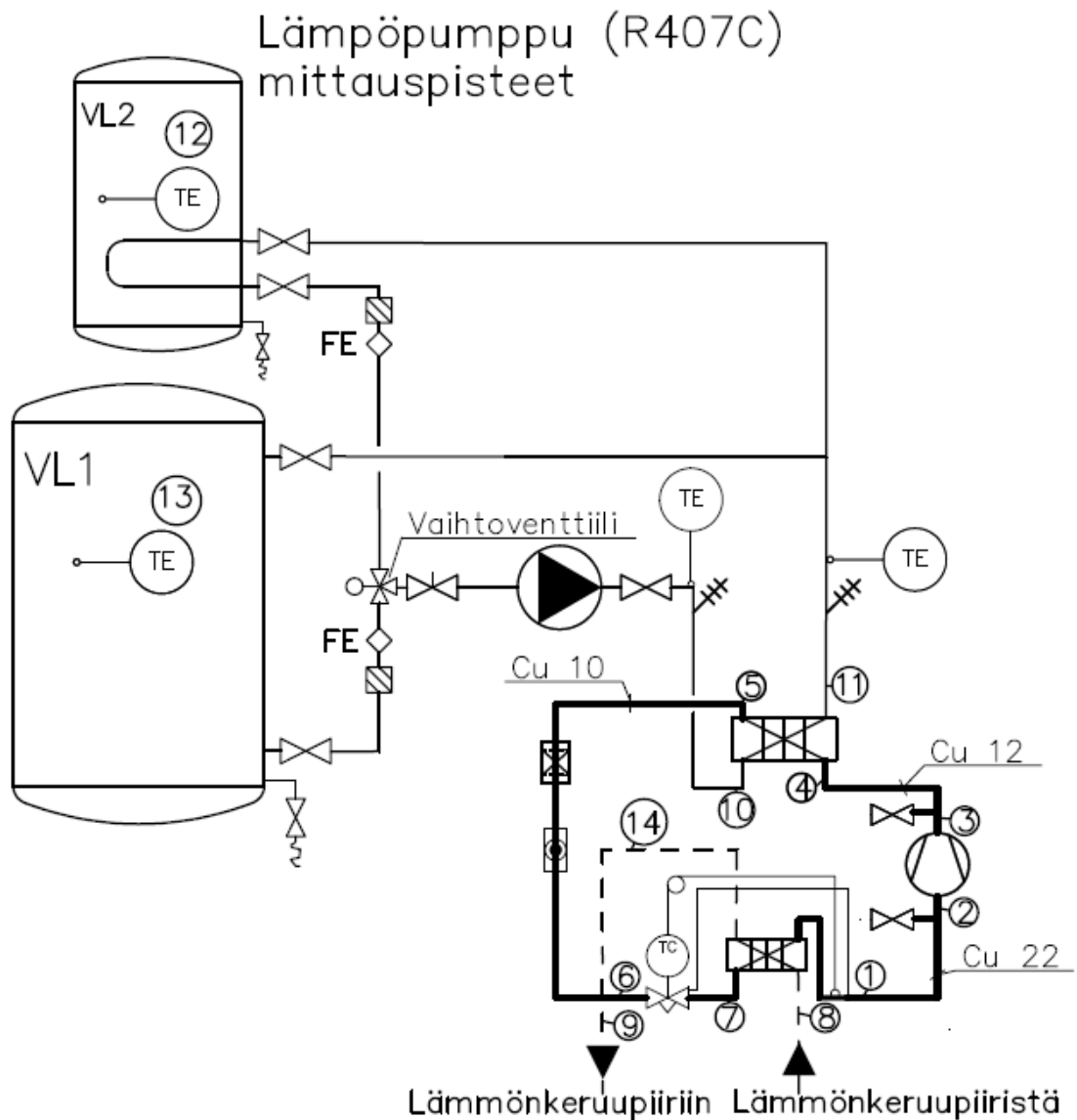


**KUVA 35. Energiavaraaja VL1:n yllämpö siirretään ulos kuvan kytkennän mukaisesti**

Jotta kiertoilmakojeen teho riittää myös ääriolosuhteissa (kesäaikana), valitaan kojeksi 30 kW laite. Tämä kuorma voidaan saavuttaa, koska samaan verkostoon on kytketty myös n 20 kW:n pellettilämpökattila toista tutkimusta varten.

### 11.5 Tiedonkeruujärjestelmä

Maalämpöpumpun oppimisympäristöön asennetaan tiedonkeruujärjestelmä, jolla kerätään reaaliaikaista tietoa kiertopiirin eri osien virtaamista, lämpötiloista, paineista ja sähköenergiasta. Sovelluksella voidaan analysoida kiertopiirien toimintaa. Järjestelmä laskee maalämpöpumpun lämpökertoimen. Lämmönkeruu- ja lauhdutuspuolelta laskeaan hetkellinen teho. Lisäksi sovellus laskee testauksen aikaisen energiakulutuksen. Kuvassa 36 on esitetty mittausantureiden paikat. Pisteistä 2 ja 3 mitataan lämpötilat ja paineet. Pisteistä 1 sekä 4...13 mitataan lämpötilat. Numero 14 on virtausvahti.



**KUVA 36. Tiedonkeruujärjestelmän lämpötilojen ja paineiden mittauspisteet**

Maalämpöpumpun toiminta-arvojen laskemiseksi tarvitaan sähkötehon ja -energian mittaamiseen soveltuvat laitteet. Hetkellistä tehoa  $P$  ja sähköenergiaa  $E$  on mitattava erikseen sekä kompressorin että maalämpöpumpun oheislaitteista. Oheislaitteisiin luetaan myös lisälämmityksen tarvitsema sähkövastus. Seurannan yksinkertaistamiseksi energiamittariksi valitaan mittari, josta voidaan lukea useampi sähköenergian kulutus samanaikaisesti. Mittarista ohjataan mitattu data tiedonkeruujärjestelmään. Kuvassa 37 on tyypillinen elektroninen sähkömittari.



**KUVA 37. Tyypillisiä sähkömittareita /40/**

## 12 MAALÄMPÖPUMPPULABORATORION TEHTÄVÄT

Maalämpöpumpun laboratoriotehtävä on yksi ”LVI-mittaukset”-opintojakson laboratoriotehtävistä. Mamk:n opintosuunnitelmassa sen osaamistavoitteet on valmistumisvaiheen osaamiskokonaisuudessa. Tällöin opiskelijalta edellytetään, että hän vähintäänkin osaa käyttää asiantuntevasti ammattikäsitteitä eri tilanteissa sekä soveltaa oman alan malleja, menetelmiä, ohjelmistoja ja tekniikoita sekä perustella niiden käyttöä. Hänen täytyy myös osata edistää ryhmän tavoitteellista toimintaa /43/. Tästä johtuen maalämpöpumpun laboratoriotehtävät laaditaan konstruktivisen oppimiskäsityksen mukaisesti. Opettaja ei opeta vaan luo innostavan oppimisympäristön, jossa oppilas oppii. Toiminnan suorittavat oppilaat itse, opettajalla on vain auttajan osa /44./

Oppimisympäristön laboratoriotöissä tavoitteena on oppia tuntemaan maalämpöpumpun toimintaa. Opiskelijalle muodostuu käsitys maalämpöpumpun osatekijöiden toiminnasta. Hän osaa selvittää lämmönkeruu- ja lämmönluovutuspiirien lämpötehot ja –energiat. Hän tuntee kylmäainepiirin toiminnan ja osaa piirtää sen kiertoprosessin log p,h-piirroksen. Hän osaa laskea lämpökertoimen.

## 12.1 Laboratoriotehtävä

### OPPIMISTAVOITE:

*Tavoitteena on tutustua maalämpöpumppuun lämmön tuottajana. Opi miten lämpöpumppu toimii. Mitkä pääkomponentit ovat tärkeimmät pumpun toiminnan kannalta? Sinulle selviää myös, mitä pitää mitata ja mistä pisteistä, jotta voit analysoida lämpöpumpun toimintaa.*

### ENNAKKOTEHTÄVÄ

Ennakkotehtävänä tutustu Jäähdytystekniikka -opintojaksolla saamaasi lämpöpumpun toiminnan teoreettiseen aineistoon. Ennen kaikkea selvitä mitkä asiat vaikuttavat COP:n arvoon. Selvitä lämpöpumpun kytkentäkaavion avulla tarvittavat mittauspisteet. Laadi mittauspöytäkirja.

### TEHTÄVÄ 1

Ohjaa vaihtoventtiilistä lauhdutuspiirin vesi kiertämään VL1:n kautta. VL1:n lämpötila pysyy mittauksen aikana lähes vakiona. Ennen laitteen käynnistämistä lue sähkömittareista kompressorin ja koko laitteiston sähköenergialukemat. Tämän jälkeen voit käynnistää pumpun. Anna kylmäainevirran ja lämpötilojen tasaantua noin 5 minuuttia.

- a) Selvitä **lämmönkeruupiirin** hetkellinen teho. Hetkellisen tehon laskemista varten selvitä tarvittavat mittauspisteet. Selvitä nesteen koostumuksen mukainen tiheys ja ominaislämpökapasiteetti.
- b) Selvitä **kylmäainepiiristä** höyrystymis- ja lauhtumislämpötilat. Mitä tietoja tarvitse näiden selvittämiseksi? Tapahtuuko prosessissa alijäähtymistä ja tulistumista?
- c) Selvitä **lauhtumispiirin** hetkellinen teho. Hetkellisen tehon laskemista varten selvitä tarvittavat mittauspisteet.

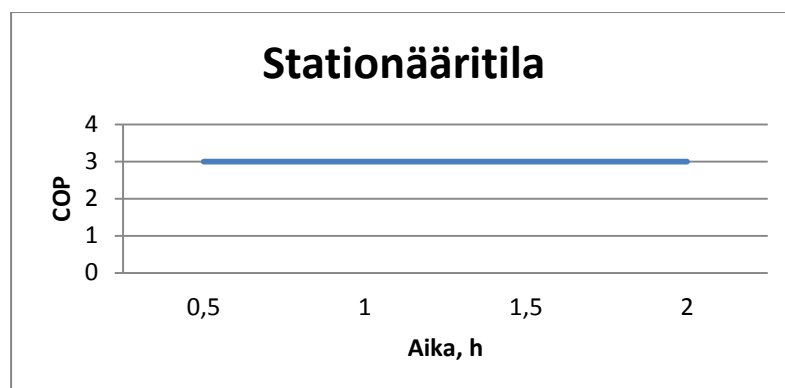
- d) Selvitä kompressorin ottama sähköteho  $\Phi_{\text{komp}}$  ja maalämpöpumppulaitoksen ottama sähköteho  $\Phi_{\text{MLP}}$  sekä maalämpöpumppulaitoksen mittauksen aikana kuluttama sähköenergia  $Q_{\text{sähkö}}$ .

## TEHTÄVÄ 2

Ohjaa vaihtoventtiilistä lauhtuspiirin vesi kiertämään VL2:n kautta. VL2:n lämpötila nousee mittauksen aikana. Ennen laitteen käynnistämistä lue sähkömittareista kompressorin ja koko laitteiston sähköenergielukema. Tämän jälkeen voit käynnistää pumpun. Anna kylmäainevirran ja lämpötilojen tasaantua noin 5 minuuttia.

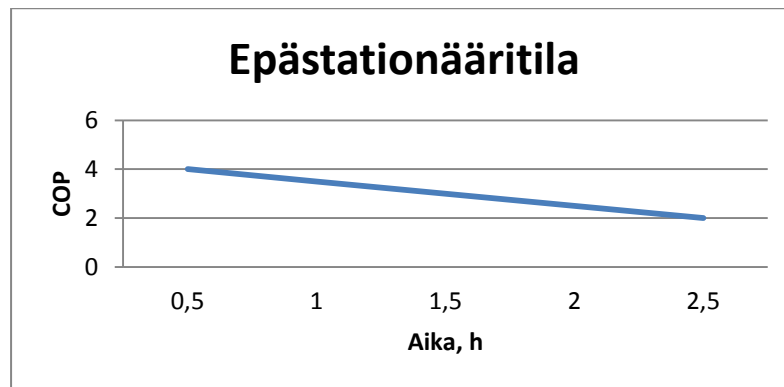
## RAPORTOINTI

Laske lämmönkeruu- ja lauhtumispiirien tehot. Piirrä kylmäainekierron tilapiirros log p,h -piirroksen saamiesi paine- ja lämpötila-arvojen mukaan. Voit piirtää joko käsin tai käyttää CoolPack-ohjelmaa. Laske lämpöpumpun lämpökerroin COP heti mittauksen alussa, mittauksen puolivälissä ja mittauksen lopussa. **Tehtävässä 1** sinun pitäisi saada kuvan 37 mukainen käyrä ja **tehtävässä 2** kuvan 38 mukainen käyrä. Lopuksi analysoi saamiesi tulosten perusteella lämpöpumpun toimintaa ja vertaa sitä teoriaan. Tee johtopäätökset. Esitä tulokset Mamk:n ”lyhyet tehtävät”-raportointiohjeen mukaan lisättynä kansilehdellä.



**KUVA 37. Maalämpöpumpun lämpökertoimen riippuvuus ajan suhteen, kun varaajan lämpötila pysyy vakiona.**





**KUVA 38.** Maalämpöpumpun lämpökertoimen riippuvuus ajan suhteen, kun varaajan lämpötila nousee.

### 13 POHDINTA

Tämän työn päätavoitteena oli kehittää oppimisympäristö maalämpöpumpun toiminnan analysointia ja seuranta varten. Työ aloitettiin tekemällä olemassa olevalla järjestelmällä mittauksia ja analysoimalla niitä. Näistä saatiin hyvä kuva oppimisympäristön toimivuudesta ja mahdollisista parannustarpeista. Analysoinnin perusteella olemassa oleva laitteisto oli tullut elinkaarensa loppuun, eikä se enää vastannut nykyajan tarpeita. Kylmäainepiiri uusittiin kokonaisuudessaan. Lämmönkeruu- ja lauhdutuspiirien virtausmittarit otettiin uusiokäyttöön. Lämpötilamittarit uusittiin. Olemassa olevat varaajat olivat hyvässä kunnossa, joten niitä päätettiin hyödyntää. Varaajissa voidaan varastoida eri lämpötiloissa olevia vesiä. Tätä ominaisuutta päätettiin hyödyntää asentamalla niiden väliin vaihtoventtiili, jolla voidaan ohjata vesivirta varaajasta toiseen. Koska laboratorioon asennetaan vain yksi MLP, niin oli myös luontevaa valita eniten Suomessa asennettu malli /4/.

Tämän jälkeen laadittiin kytkentäkaaviot, joissa esitettiin tarvittavat laitteet ja mittauspisteet. Laboratoriomittauksissa opiskelijalle muodostuu kuva, miten maalämpöpumppu toimii. MLP:n toiminta on jaettu kolmeen osakokonaisuuteen: lämmönkeruupiiriin, kylmäainepiiriin ja lämmön luovutuspiiriin. Näistä kaikista osakokonaisuuksista tehdään laboratoriotehtäviä. Ensimmäisessä osatehtävässä opiskelija huomaa mittatuloksiin perustuen, kuinka lämmönkeruupiirin nesteestä lämpö siirtyy höyrystymisessä höyrystäen kylmäaineen. Toisessa osassa opiskelija oivaltaa, kuinka kompressorin puristaessa kylmäainehöyryä korkeampaan paineeseen se samalla lämpiää ja tulistuu. Kolmannessa vaiheessa muodostuu käsitys, kuinka kylmäaineen tulistunut höyry

luovuttaa lämpöenergiaa lämmitysveteen ja samalla lauhtuu. Opiskelija vertaa saamiinsa osakokonaisuuksien tuloksia toisiinsa ja selvittää, vastaavatko tulokset teoriaa. Hän huomaa, kuinka käytännössä häviötöntä prosessia ei ole, joten hänen on kyettävä analysoimaan, mistä häviöt ja tulosten epätäsmällisyys muodostuvat.

Laboratoriotöiden oppimisenäkökulmana on ongelmalähtöisyys sekä osallistuva, kokemuksellinen ja tutkiva oppiminen. Kun oppiminen on käytännöllistä ja mielekästä, niin opiskelijat ovat vastaanottavaisia, motivoituneita ja oikealla tavalla oppimiseen asennoituneita. Laboratoriotöissä opitaan analysoimaan syy-seuraussuhteita. Myös epäonnistumisten kautta on mahdollista oppia. Laboratorioympäristössä tehtävät harjoitteet sisältävät etukäteistutustumista aiheeseen, joten tiedon etsiminen eri lähteistä on osa työtä. Samoin myös mittausjärjestelyt edellyttävät etukäteistutustumista kirjallisuuteen. Saatujen tulosten analysointi vaatii keskustelu / vuorovaikutus- ja kirjoittamistaitoja sekä tietotekniikan sovellusten käytännön hallintaa.

Opinnäytetyön tulokset olivat osittain odotuksen mukaiset. Maalämpöpumpun suunnitelmat saatiin tehtyä ja tarvittavat mittauspisteet merkittiin suunnitelmiin. VL1:n ylälämmön siirtämiseen tarvittavat komponentit saatiin asennettua. Oppimisympäristöön liittyvät laboratoriotehtäväännöt laadittiin. Energia- ja ympäristötekniikanlaitoksen budjetissa tämän oppimisympäristön kehittämiseen ei ollut varattu suoraan resursseja, joten se jouduttiin tekemään osana muuta toimintaa. Osa mittaus- ja säätölaitteista saatiin kuitenkin lahjoituksena laitevalmistajilta. Puutteellisen rahoituksen vuoksi mm. lämpökaivoa ei saatu rakennettua. Lämmönkeruuputkisto on olemassa oleva putkisto, joka on asennettu koulurakennus A:n itäpuolisen autopaikoitusalueen viereen noin 1 - 1,5 metrin syvyyteen maahan. Putkilenkki on noin 400 m pitkä, ja se tehty DN 40 NP 10 PEL-muoviputkesta. Tätä putkistoa hyödynnetään niin kauan, kunnes lämpökaivo ja uudet putket saadaan toimintaan. Ongelmana oli myös sovittaa vanhan laitteiston purkaminen ja uuden asentaminen oikeaan ajankohtaan, jotta ne eivät häiritsisi laboratoriossa tapahtuvaa muuta toimintaa. Se vaikutti tämän opinnäytetyön valmistumisaikaan.

Lämpöpumpun lämmönkeruu- ja lauhdutuspiirin kytkennät olemassa oleviin putkiin asennettiin oppilastyönä. Automaatio-osuus toteutetaan erillisenä opinnäytetyönä. Joten laitteiston teknisen osuuden rakentaminen toi projektiosaamista yhdelle oppilaalle ja toiselle oppimistehtäviä opinnäytetyönä. Automaatio- ja mittausjärjestelmät

eivät kuitenkaan valmistuneet tämän opinnäytetyön aikataulussa, joten tarkistusmittauksia ei voitu suorittaa. Ne tehdään ensitilassa töiden valmistuttua.

Tällä hetkellä Mamk:n opintosuunnitelmassa LVI-mittaukset on omana opintojaksonaan. Vaihtoehtona tälle olisi laboratoriotyön integrointi energiatekniikkaa käsittelevään opintojaksoon, jolloin teoriaosuuden jälkeen opiskelija voi suoraan soveltaa oppimaansa teoriaa käytäntöön mittaustuloksia analysoimalla. Nyt toteutetulla oppimisympäristöllä LVI-tekniikan opiskelijalle mahdollistetaan saada riittävän hyvät tiedotaidot maalämpöpumpun toiminnasta. Sitä voisi kehittää suuntaan, jossa voisi testata lähes SFS-EN 14511 -standardin vaatimukset täyttävillä testiolosuhteilla. Standardin mukaiset testausolosuhteet ja niiden virherajavaatimukset tuovat koulun oppimisympäristöön sovellettuna merkittäviä lisäinvestointeja. Suuntaa-antavaa testausta voidaan tehdä, jos järjestelmään asennetaan tasaussäiliö lämmönkeruupiiriin ennen maalämpöpumppua. Järjestelyllä saadaan tasattua lämmönkeruupiiristä tulevan nesteen lämpötila vakiolämpöiseksi. Toinen merkittävä parannus olisi VL2:n korvaaminen pienemmällä noin 100 l varaajalla. Tällöin lauhduttimelle palaavan veden lämpötilaa voidaan muuttaa nopeasti.

Uuden MLP:n kylmäainekierrossa ei ole virtausmittaria. Asentamalla kylmäainepiiriin lauhduttimen jälkeiseen nesteputkeen massavirtamittari voidaan kylmäainepiirin toiminnan seuraamista parantaa. Tällöin saadaan laskettua myös kylmäainepiirin teho.

Kun lämpökaivo saadaan rakennettua, parkkialueella olevaa lämmönkeruuputkistoa voidaan hyödyntää purkamalla varaajien yllilämmöt kyseessä olevan putkiston kautta maaperään. KytKentäkaavio tehtiin siten, että tähän laboratoriotyöhön voidaan kytkeä myös maaviilennys. Käytännössä tätä ei kuitenkaan toteutettu. Tulevaisuudessa sen voisi rakentaa. Siitä saa helposti uuden laboratoriotyön. Työssä voi todentaa, kuinka maaviilennystä voidaan hyödyntää.

**LÄHTEET**

1. EU-direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä 2009/28/EY. Verkkodokumentti. <http://eur-lex.europa.eu/>. Ei päivitystietoa. Luettu 17.10.2012
2. Ympäristöministeriö. EU:n ilmasto- ja energiapaketti. Verkkodokumentti. <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=397598&lan=FI>. Ei päivitystietoa. Luettu 13.11.2012
3. SULPU ry. Lämpöpumppujen myyntitilastoja. Verkkodokumentti. <http://www.sulpu.fi/documents/184029/209175/Lehdist%C3%B6tiedote%2C%20SULPU%2C%201.2013.pdf>. Ei päivitystietoa. Luettu 12.1.2013
4. Hirvonen, Jussi. Puhelinhaastattelu 21.3.2013. SULPU, Toiminnanjohtaja. 2013
5. Hakala, Pertti. & Kaappola, Esko. Kylmälaitoksen suunnittelu. Opetushallitus. 2007
6. Juvonen, Janne. Ympäristöopas 2009. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Lämpökaivo. Suomen ympäristökeskus. Helsinki.
7. Aittomäki, Antero. Lämpöpumppulämmitys opas. Tampere. 2001
8. Oilon Oy, Geopro SH maalämpöpumppu. Verkkodokumentti. <http://www.oilon.com/oilon-home/tuotteet/maalampo/geopro-sh>. Ei päivitystietoa. Luettu 2.11.2012
9. Aittomäki, A. Espoo. SULPU ry, tut.fi. 2001
10. Aittomäki, A. (toim.). Kylmäteknikka. Jyväskylä. Suomen kylmäyhdistys ry. ISBN 978-951 -96449-6-7. 2008
11. Danfoss. Expansion valves. Verkkodokumentti. <http://www.danfoss.com/Finland/Products/Categories/Literature/RA/Thermostatic-Expansion-Valves/f7df9628-016d-4e10-9945-c4c97bb9d760.html>. Ei päivitystietoa. Luettu 12.11.2012
12. Affordair Oy. Kierukat. Verkkodokumentti. <http://www.affordair.com.au/whatisaircon/whatisaircon.htm#compressors>. Ei päivitystietoa. Luettu 12.11.2012
13. Mitsubishi kompressorit. Verkkodokumentti. [http://www.mhi.co.jp/en/products/detail/reefer\\_unit.html](http://www.mhi.co.jp/en/products/detail/reefer_unit.html). Ei päivitystietoa. Luettu 23.3.2013

14. Lahdenperä, Heikki. Elektroninen paisuntaventtiili on tärkeä osa jäähdytyskiertoa. Lehtiartikkeli. Suunta 1/2009, 6-7.
15. Chiller Oy. Verkkodokumentti. <http://www.chiller.fi>. Ei päivitystietoa. Luettu 23.11.2012
16. Sporlan Mechatronic. Electric valves for refrigerant control. Verkkodokumentti. Bulletin 100-9. April 2007
17. Alfa Laval. Lämmönsiirtimet. Pdf-dokumentti. [http://local.alfalaval.com/fi-fi/tietoa\\_alfa\\_lavalista/ajankohtaista/Documents/Juotetut%20siirtimet\\_ECF00030FI.PDF](http://local.alfalaval.com/fi-fi/tietoa_alfa_lavalista/ajankohtaista/Documents/Juotetut%20siirtimet_ECF00030FI.PDF). Ei päivitystietoa. Luettu 16.4.2013
18. Genomco Oy. Levylämmönsiirtimet. Verkkodokumentti. <http://www.genomco.com/aloe/plate.htm>. Ei päivitystietoa. Luettu 20.4.2013
19. Eskola, Lari, Jokisalo, Juha ja Siren Kai. Lämpöpumppujen energialaskenta-  
opas. Päivitetty 3.10.2012. Luettu 10.12.2012
20. Kianta, J. Kylmäainetilanne 2008. Suomen Kylmäyhdistys ry. Verkkodokumentti. [www.skill.fi/yhdistys](http://www.skill.fi/yhdistys). Ei päivitystietoa. Luettu 12.12.2012
21. Aittomäki, A & Haapaniemi, K. Seoskylmäaineiden käyttöominaisuudet. TTKK, Energia- ja prosessitekniikka. Raportti 136. Tampere.1998
22. SFS-EN 14511-1. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling. Part 1: Terms and definitions. Vahvistettu 12.12.2011
23. SFS-EN 14511-2. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling. Part 2: Test conditions. Vahvistettu 12.12.2011
24. SFS-EN 14511-3. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling. Part 3: Test methods. Vahvistettu 12.12.2011
25. Granryd, Eric ym. Refrigerating engineering. Royal Institute of Technology. KTH Stockholm. 2009
26. Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D5. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, Ohjeet 2012. Luonnos 14.3.2012
27. Kallio, Jorma. Maa- ja kalliolämmön mahdollisuuksista. Geologian tutkimuskeskus, PP-esitys. Pdf-dokumentti. [http://www.gtk.fi/export/sites/fi/tutkimus/tutkimusohjelmat/energia/geoener/Kallio\\_01122010.pdf](http://www.gtk.fi/export/sites/fi/tutkimus/tutkimusohjelmat/energia/geoener/Kallio_01122010.pdf). Ei päivitystietoa. Luettu 16.4.2013

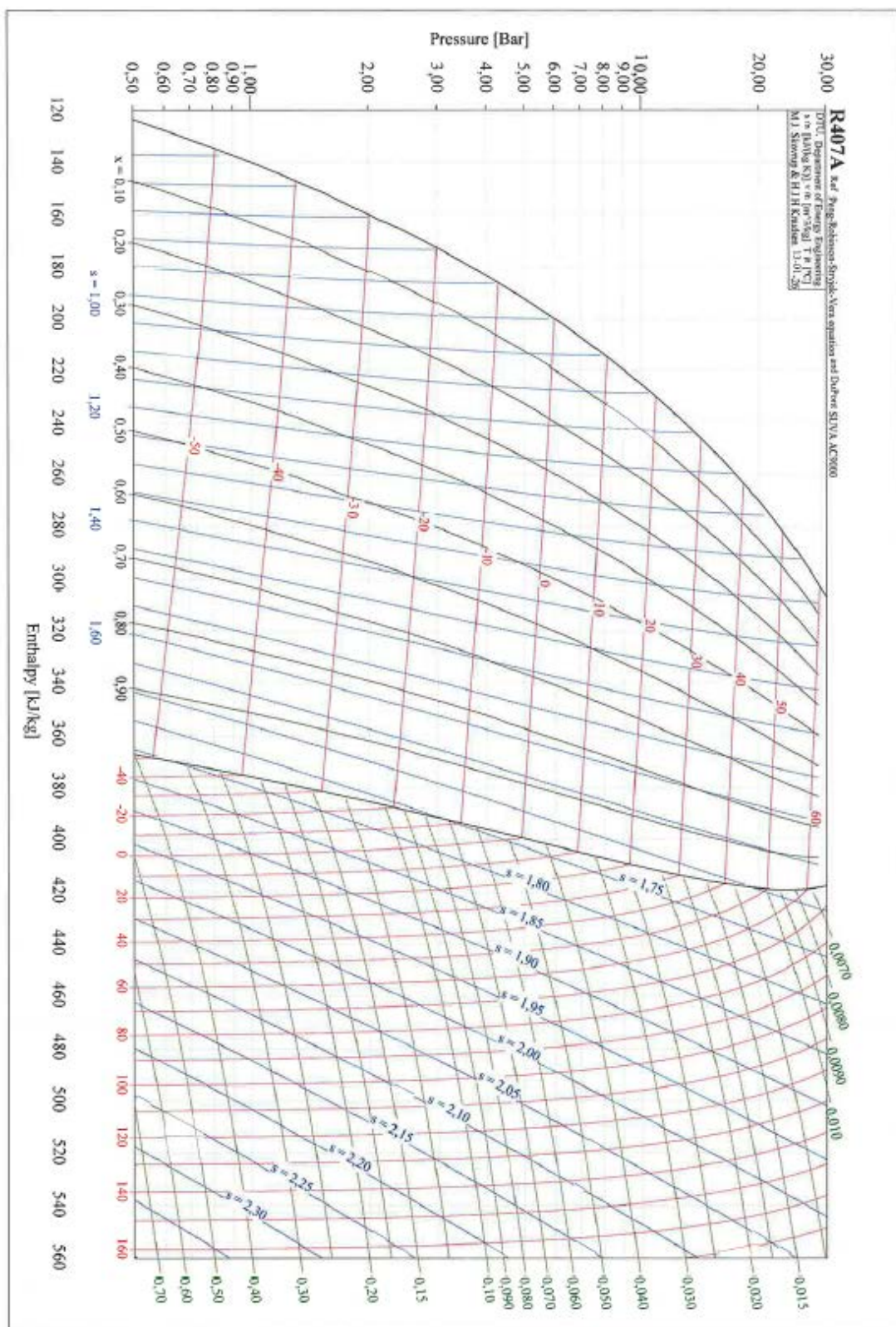
28. Leppäharju, Nina. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Pro gradu -tutkielma. Oulun yliopisto. 2008
29. Lowrie, W. Fundamentals of geophysics. Cambridge University Press. Cambridge. 2007.
30. Aittomäki, Antero. Maaperä ja vesistöt lämmönlähteinä. Raportti 37 s. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere. 1983
31. Poratek ry. Normilämpökaivon kriteerit. Verkkodokumentti <http://www.poratek.fi/fi/lampokaivot/normilampokaivon+kriteerit>. Ei päivitystietoa. Luettu 12.1.2013
32. NIBE Energy Systems Oy. Verkkodokumentti. <http://www.nibe.fi/Tuotteet/Maalampopumput/Lampokaivo-kalliossa/> Ei päivitystietoa. Luettu 12.1.2013
33. SFS-EN 12201-1. Muoviputkijärjestelmät veden johtamiseen ja paineviemärintiin. Polyeteeni (PE). Osa 1: Yleistä. Vahvistettu 26.3.2012. Luettu 12.12.2012
34. Välilliset kylmälaitokset. Suunnittelu ja rakentaminen opas. Tampereen teknillinen korkeakoulu Energia- ja prosessiteknikka. 2001
35. Kurnitski, Jarek. Energiämääräykset. Opas uudisrakennusten energiämääräysten soveltamiseen. Helsinki: Suomen rakennusmedia Oy. 2012
36. Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D3. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Annettu Helsingissä 30 päivänä maaliskuuta 2011
37. Energiamarkkinavirasto. Verkkodokumentti <http://www.energiamarkkinavirasto.fi/alasivu.asp?gid=67&pgid=67&languageid=246>. Ei päivitystietoa. Luettu 2.2.2013
38. Metsäkeskus. Energialaskuri. Verkkodokumentti. <http://www.halkoliiteri.com/?id=170>. Ei päivitystietoa. Luettu 16.1.2013
39. Puuenergialaskuri. Verkkodokumentti. <http://www.mottinetti.fi/puullalammittaminen/puuenergialaskuri>. Ei päivitystietoa. Luettu 16.1.2013
40. Verohallinto. Kotitalousvähennys. Verkkodokumentti. <http://www.vero.fi/fi-FI/Henkiloasiakkaat/Kotitalousvahennys>. Ei päivitystietoa. Luettu 16.1.2013
41. Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus. Energia-avustukset. Verkkodokumentti. <http://www.ara.fi>. Ei päivitystietoa. Luettu 16.11.2012

42. Sähköala. Energiamittarit. Verkkodokumentti.  
[http://www.sahkoala.fi/ajankohtaista/uutisarkisto/2009/2-2009/fi\\_FI/270209\\_tuntimittaus](http://www.sahkoala.fi/ajankohtaista/uutisarkisto/2009/2-2009/fi_FI/270209_tuntimittaus) Ei päivitystietoa. Luettu 16.1.2013
  
43. Mikkelin ammattikorkeakoulu, Energia- ja ympäristötekniikanlaitos. Opetussuunnitelma. Verkkodokumentti.  
[https://soleops.mamk.fi/opsnet/disp/fi/ops\\_KoulOhjSel/tab/tab/sea?lukuvuosi=4586245&ryhmytyyp=1&koulohj\\_id=4586380&stack=push](https://soleops.mamk.fi/opsnet/disp/fi/ops_KoulOhjSel/tab/tab/sea?lukuvuosi=4586245&ryhmytyyp=1&koulohj_id=4586380&stack=push). Ei päivitystietoa. Luettu 2.2.2013.
  
44. Aebli, H. Opetuksen perusmuodot. Juva: WSOY. 1991









## R407C kylläisen höyrin taulukko

LIITE 3

Table of saturated values for: R407C, R32/125/134a (23/25/52), R407C

T °C	p Bar	$v_l$ dm <sup>3</sup> /kg	$v_g$ m <sup>3</sup> /kg	$h_l$ kJ/kg	$h_g$ kJ/kg	R kJ/kg	$s_l$ kJ/(kg K)	$s_g$ kJ/(kg K)
-10,00	3,140	0,7869	0,07511	176,23	407,69	231,47	0,9231	1,8027
-9,00	3,261	0,7892	0,07244	177,62	408,29	230,68	0,9283	1,8016
-8,00	3,386	0,7916	0,06988	179,01	408,89	229,88	0,9335	1,8005
-7,00	3,514	0,7939	0,06743	180,41	409,48	229,07	0,9387	1,7994
-6,00	3,646	0,7963	0,06508	181,81	410,07	228,26	0,9439	1,7983
-5,00	3,782	0,7986	0,06283	183,22	410,66	227,43	0,9491	1,7973
-4,00	3,921	0,8011	0,06066	184,50	411,24	226,74	0,9538	1,7962
-3,00	4,065	0,8035	0,05859	185,95	411,82	225,87	0,9591	1,7952
-2,00	4,213	0,8059	0,05660	187,38	412,40	225,02	0,9643	1,7942
-1,00	4,364	0,8084	0,05469	188,81	412,97	224,16	0,9696	1,7932
0,00	4,520	0,8109	0,05286	190,25	413,54	223,29	0,9748	1,7922
1,00	4,680	0,8134	0,05110	191,70	414,11	222,41	0,9800	1,7913
2,00	4,845	0,8159	0,04940	193,15	414,67	221,52	0,9852	1,7903
3,00	5,014	0,8185	0,04778	194,59	415,23	220,64	0,9904	1,7893
4,00	5,187	0,8211	0,04621	196,06	415,78	219,73	0,9956	1,7884
5,00	5,365	0,8237	0,04471	197,53	416,33	218,80	1,0008	1,7875
6,00	5,548	0,8263	0,04326	199,01	416,88	217,87	1,0061	1,7866
7,00	5,735	0,8290	0,04187	200,49	417,42	216,93	1,0113	1,7856
8,00	5,927	0,8316	0,04053	201,99	417,96	215,98	1,0166	1,7847
9,00	6,124	0,8343	0,03924	203,48	418,50	215,01	1,0218	1,7838
10,00	6,327	0,8371	0,03799	204,99	419,03	214,03	1,0271	1,7830
11,00	6,534	0,8398	0,03679	206,50	419,55	213,05	1,0323	1,7821
12,00	6,746	0,8426	0,03564	208,02	420,07	212,05	1,0376	1,7812
13,00	6,964	0,8455	0,03453	209,55	420,58	211,03	1,0428	1,7803
14,00	7,187	0,8483	0,03345	211,09	421,09	210,01	1,0481	1,7795
15,00	7,415	0,8512	0,03242	212,63	421,60	208,97	1,0534	1,7786
16,00	7,649	0,8541	0,03142	214,18	422,10	207,92	1,0587	1,7777
17,00	7,889	0,8570	0,03046	215,74	422,59	206,85	1,0640	1,7769
18,00	8,134	0,8600	0,02953	217,31	423,08	205,77	1,0693	1,7760
19,00	8,385	0,8630	0,02863	218,88	423,56	204,68	1,0746	1,7752
20,00	8,642	0,8661	0,02776	220,46	424,04	203,57	1,0799	1,7743
21,00	8,905	0,8691	0,02692	222,06	424,51	202,45	1,0852	1,7735
22,00	9,174	0,8722	0,02612	223,66	424,97	201,31	1,0906	1,7726
23,00	9,449	0,8754	0,02533	225,27	425,43	200,16	1,0959	1,7718
24,00	9,731	0,8786	0,02458	226,89	425,88	198,99	1,1013	1,7709
25,00	10,018	0,8818	0,02385	228,51	426,32	197,81	1,1066	1,7701
26,00	10,313	0,8851	0,02314	230,15	426,76	196,61	1,1120	1,7692
27,00	10,614	0,8884	0,02245	231,80	427,19	195,39	1,1174	1,7684
28,00	10,921	0,8917	0,02179	233,46	427,61	194,15	1,1228	1,7675
29,00	11,236	0,8951	0,02115	235,13	428,02	192,90	1,1282	1,7667
30,00	11,557	0,8986	0,02053	236,80	428,43	191,62	1,1337	1,7658
31,00	11,885	0,9021	0,01993	238,49	428,82	190,33	1,1391	1,7649
32,00	12,220	0,9056	0,01935	240,19	429,21	189,02	1,1446	1,7640
33,00	12,563	0,9092	0,01879	241,90	429,59	187,69	1,1501	1,7631
34,00	12,913	0,9128	0,01824	243,63	429,96	186,34	1,1556	1,7622
35,00	13,270	0,9165	0,01771	245,36	430,33	184,96	1,1611	1,7613
36,00	13,635	0,9202	0,01720	247,11	430,68	183,57	1,1666	1,7604
37,00	14,007	0,9240	0,01670	248,87	431,02	182,15	1,1722	1,7595
38,00	14,387	0,9279	0,01622	250,64	431,35	180,71	1,1777	1,7585
39,00	14,775	0,9318	0,01575	252,43	431,67	179,25	1,1833	1,7576
40,00	15,171	0,9358	0,01530	254,23	431,98	177,76	1,1889	1,7566
41,00	15,576	0,9399	0,01486	256,04	432,28	176,24	1,1946	1,7556
42,00	15,988	0,9440	0,01443	257,87	432,57	174,70	1,2002	1,7546
43,00	16,409	0,9482	0,01401	259,71	432,85	173,14	1,2059	1,7536
44,00	16,838	0,9524	0,01361	261,57	433,11	171,54	1,2117	1,7525
45,00	17,275	0,9568	0,01322	263,44	433,36	169,92	1,2174	1,7515

Copyright © 1999 Dep. of Energy Engineering, DTU  
M.J. Skovrup & H.J.H Knudsen