



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**TOMMI LAHTI**

**LÄMPÖKAIVOKENTTÄ LÄMMÖNLÄHTEENÄ**

Diplomityö

Tarkastaja: professori Hannu Ahlstedt  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Luonnon-  
tieteiden tiedekuntaneuvoston kokouk-  
sessa 8. marraskuuta 2013

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

**LAHTI, TOMMI:** Lämpökaivokenttä lämmönlähteenä

Diplomityö, 76 sivua, 15 liitesivua

Marraskuu 2013

Pääaine: Voimalaitos- ja polttotekniikka

Tarkastaja: Professori Hannu Ahlstedt

Avainsanat: Lämpöpumppu, maalämpö, geoterminen energia, lämpökaivo, lämpökaivokenttä

Maalämpöpumppu siirtää lämpöä maa- tai kallioperästä ja nostaa lämmönsiirtoaineen lämpötilaa käyttökohteen vaatimusten mukaan. Rakennus ja käyttövesi lämpiävät lämpöpumpun tuottamalla lämpöenergialla. Lämpö voidaan kerätä pystysuoralla lämpökaivolla kallioperästä ja vaakasuoralla lämmönkeruupiirillä maaperästä. Vaakasuora lämmönkeruupiiri asetetaan muutaman metrin syvyyteen ja pystysuora lämpökaivo porataan yleensä maksimissaan noin 200 metriin, mutta poraaminen 300 metriin on mahdollista. Lämmönkeruupiirin voi myös asettaa järven pohjalle tai sedimenttiin. Maan pintakerroksista kerätty lämpö on peräisin Auringosta ja syvemältä kerätty lämpö on geotermistä energiaa. Aurinko lämmittää Maan pintakerroksia ja geoterminen energia syntyy syvällä Maan sisällä.

Diplomityössä esitetään lämmönsiirtoa lämpökaivossa ja sen ympäristössä eri mallien avulla. Mallit olettavat, että lämpö siirtyy maa- tai kallioperästä lämmönsiirtoputkeen vain johtumalla. Lämmönsiirtoa voidaan arvioida lämpökaivon lämpövastuksella. Lämpökaivon lämpövastus voidaan ratkaista analyyttisesti, numeerisesti, kokeellisesti tai lämpöpiirimenetelmällä. Lämmönsiirtoon lämpökaivossa vaikuttavat eri asiat. Vierekkäiset kaivot vaikuttavat toistensa toimintaan. Pohjaveden virtaus ja luonnollinen konvektio pohjavedellä täytetyssä lämpökaivossa voivat tehostaa lämmönsiirtoa kallioperästä. Pohjavesi voi kuljettaa lämpöä kaivoon, mikä voi tehostaa kaivon toimintaa huomattavasti. Kallioperän rakenne ja koostumus vaikuttavat lämmönsiirtoon lämpökaivon ympäristössä. Työssä esitellään erilaisia lämmönkeruuputkia, esimerkiksi tavallinen U-putki ja koaksiaaliputki.

Earth energy designer -ohjelmalla (EED) mitoitetaan lämpökaivoja kohteen lämmöntarpeen ja sijainnin mukaan. EED:llä tutkitaan myös Nokian Pitkäniemessä sijaitsevan pystysuoran lämpökaivokentän toimintaa ja mitoitetaan optimaalinen lämpökaivokenttä.

Maa- ja kaukolämpö kilpailevat samoista asiakkaista. Kaukolämpömarkkinoiden kilpailun sallimista on tutkittu eri malleilla. Mallit ovat säädetty kolmannen osapuolen markkinoille tulo (RTPA), neuvoteltu kolmannen osapuolen markkinoille tulo (NTPA) ja yksi ostaja -malli (SBM). Wårellin & Sundqvistin (2009) mukaan kaukolämpöverkon

avaaminen kilpailulle pitäisi aloittaa suuressa paikallisessa verkossa, kuten Ruotsissa on toimittu Tukholman kaukolämpöverkon osalta. Kilpailua esiintyy paikallisilla kaukolämpömarkkinoilla Tukholmassa ja Kööpenhaminassa. Suomessa paikallisilla kaukolämpöyhtiöillä on luonnollinen monopoli, joten Suomessa ei ole kilpailua kaukolämpömarkkinoilla.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

**LAHTI, TOMMI:** Borehole heat exchanger field as a heat source

Master of Science Thesis, 76 pages, 15 Appendix pages

November 2013

Major: Power Plants and Combustion Technology

Examiner: Professor Hannu Ahlstedt

Keywords: Ground source heat pump, geothermal heat, borehole heat exchanger, borehole heat exchanger field

The ground source heat pump's function is to transfer heat from the ground and raise the temperature of the heat carrier fluid according to the subject in question. Space heating and domestic household water are the main applications of heat. Heat is collected from the ground with a vertical borehole heat exchanger and with a horizontal heat exchanger. The horizontal heat exchanger is set few meters underground. The vertical borehole heat exchanger can be placed from 200 to 300 meters underground. It is possible to place the horizontal heat exchanger pipe to the bottom of a lake or in the sediment layer. The heat collected from the surface layers of the Earth originates from the Sun and the heat collected from the deeper layers is called geothermal heat.

This Master's thesis explores heat transfer within a borehole and in its surroundings with different models. The hypothesis of the models is that heat transfers from the ground to the heat exchanger pipe by conduction. Heat transfer can be modeled with borehole's heat resistance. The resistance of a borehole can be solved analytically, numerically, experimentally or with a thermal circuit method. The heat transfer process in a borehole is affected with different factors. Contiguously placed boreholes have an effect on each other's function. The flow of the groundwater and natural convection in a borehole filled with groundwater may have an effect on heat transfer from the bedrock. The groundwater transfers heat to the borehole which may accelerate its function significantly. The structure and consistency affect on heat transfer in the surroundings of the borehole heat exchanger. Different types of heat exchange pipes, such as U pipe and coaxial pipe, are presented in this Master's thesis.

Earth energy designer (EED) software is designed to size boreholes according to the need of heat and location. In Pitkaniemi in Nokia region, EED is used to explore the function of borehole heat exchanger field and to size the optimal a new borehole heat exchanger field.

Geothermal heating and district heating are competing in the same market. Different models have been developed in order to permit the competition among district heating market. These models include regulated third party access (RTPA), negotiated third party access (NTPA) and single buyer model (SBM). According to Wårell & Sundqvist

(2009) market opening in local district heating ought to be started of larger district heating networks. For instance there is competition on a certain level among local district heating market in Stockholm and Copenhagen. Currently there is no competition among the local district heating companies in Finland.

## ALKUSANAT

Tein kirjallisuusselvityksen lämmön siirtymisestä maa- ja kallioperässä ja maalämmön nykytilasta Suomessa. Diplomityö toteutettiin TTY:n tukisäätiön vuorineuvos Paavo V. Suomisen rahaston apurahalla.

Tutustuminen maalämpöön oli mielenkiintoista ja antoisaa. Lämmönsiirtoon vaikuttavien tekijöiden selvittäminen maa- ja kallioperässä sekä lämpökaivossa selvensivät käsitystäni maalämmön haasteista ja mahdollisuuksista.

Kiitos professori Hannu Ahlstedtille diplomityön mahdollistamisesta, kiitos Verte Oy:n toimitusjohtaja Sakari Ermalalle ja kiitos Elisa Poutiaiselle diplomityön oikoluvusta.

Tampereella 4.12.2013

Tommi Lahti

## SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
1.1	Tausta ja tavoitteet .....	1
1.2	Työn kulku ja rajaus .....	2
2	Lämpöpumppu .....	3
2.1	Maalämpöpumppu .....	4
3	Maalämpö ja geoterminen energia .....	7
3.1	Maalämpö .....	7
3.1.1	Vaakasuora lämmönkeruupiiri eli maapiiri .....	10
3.1.2	Pystysuora lämpökaivo .....	10
3.1.3	Suomen maa- ja kallioperä .....	12
3.1.4	Lämmönsiirtoputki .....	13
3.1.5	Lämpökaivon täyteaine .....	17
3.1.6	Luonnollinen konvektio ja pohjaveden virtaus lämpökaivossa .....	18
3.1.7	Lämmönkeruupiiri ja lämmönsiirtoaine .....	19
3.1.8	Ympäristöriskit .....	20
3.2	Järvilämpö .....	20
3.2.1	Järven energiatasapaino .....	21
3.3	Sedimenttilämpö .....	22
3.3.1	Vaasan Suvilahden sedimentin lämpötilamittaukset .....	23
3.4	Lämpökaivokenttä, latenttilämpö ja toipuminen .....	23
3.5	Pitkäniemen lämpöpumppulaitos .....	26
3.5.1	Lämpökaivot kallioperässä .....	28
3.5.2	Sedimenttilämpökeräimet .....	28
3.5.3	Laitteiston toiminnan tarkastelu .....	28
3.5.4	Lämpötilamittaukset .....	29
4	Lämmönsiirto lämpökaivossa .....	32
4.1	Lämmönsiirtoa hallitsevat yhtälöt lämpökaivossa .....	32
4.2	Lämmönsiirto yhden porakaivon ympäristössä .....	33
4.2.1	Ääretön viivalähdemalli (Infinite line source model, ILS) .....	34
4.2.2	Äärellinen viivalähdemalli (Finite line source model, FLS) .....	34
4.2.3	Ääretön sylinterilähdemalli (Infinite cylindrical source model, ICS) .....	35
4.3	Lämpökaivon lämpövastus lämpöpiirianalogialla .....	36
4.3.1	Delta ja Y-kytkentä .....	37
4.4	Lämpökaivon lämpövastus kokeellisesti (TRT) .....	40
4.5	Lämpökaivon lämpövastus analyttisesti ja numeerisesti U-putkilämpökaivossa .....	40
4.5.1	Sisäinen resistanssi .....	41
4.6	Lämmönsiirto maa- ja kallioperässä .....	42
4.7	Lämmönkeruupiirin lämmönsiirtoaine .....	42
4.8	Yhdestä U-putkesta saatava teho .....	43

4.9	Lämpötila lämpökaivon ympäristössä .....	44
5	EED – Earth Energy Designer .....	46
5.1	Optimaalinen lämpökaivokenttä .....	47
5.1.1	Maa- ja kallioperä .....	48
5.1.2	Lämpökaivo .....	48
5.1.3	Kaivon mitoitustulokset .....	50
5.2	Lämpökaivokenttä 2 x 5 .....	54
5.2.1	Optimaalinen lämpökaivokenttä 2 x 5 .....	58
5.2.2	Lämpökaivokenttä Helsingissä ja Sodankylässä .....	61
5.2.3	Lämpökaivokenttä aurinkoenergialla .....	62
6	Kaukolämpö .....	65
6.1	Kaukolämpö Suomessa, Ruotsissa ja Tanskassa .....	65
6.2	Kaukolämpöverkko .....	67
6.3	Kaukolämmön asema .....	68
6.4	Kaukolämpömarkkinoiden avaaminen kilpailulle .....	70
6.4.1	Säädetty kolmanen osapuolen markkinoilletulo (RTPA) .....	71
6.4.2	Neuvoteltu kolmannen osapuolen markkinoilletulo (NTPA) .....	71
6.4.3	Yhden ostajan -malli (SBM) .....	72
6.4.4	Mallien vertailu .....	72
6.4.5	Kööpenhaminan kaukolämpöverkosto .....	73
7	Johtopäätökset .....	75
	Lähteet .....	77
	Liite 1: U-putkikaivokenttä (2x5) 5 W/m .....	83
	Liite 2: Koaksiaaliputkikaivokenttä (2x5) 5 W/m .....	88
	Liite 3: U-putkikaivokenttä (2x5) 5 W/m, 200 MWh lämmönsyötöllä .....	93



## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

CHP	Sähkön ja lämmön yhteistuotanto (Combined heat and power)
COP	Lämpökerroin (Coefficient of performance)
EED	Tietokoneohjelma lämpökaivon mitoittamiseen ja lämpökaivon toiminnan arvioimiseen (Earth energy designer)
FLS	Äärellinen viivalähdemalli (Finite line source)
ICS	Ääretön sylinterilähdemalli (Infinite cylindrical source)
ILS	Ääretön viivalähdemalli (Infinite line source)
NTPA	Neuvoteltu kolmannen osapuolen markkinoilletulo (Negotiated third party access)
RTPA	Säädetty kolmannen osapuolen markkinoilletulo (Regulated third party access)
SBM	Yksi ostaja -malli (Single buyer model)
SPF	Vuoden keskimääräinen lämpökerroin (Seasonal performance factor)
TPA	Lämmöntuotannon ja lämmön jälleenmyynnin erottaminen toisistaan avaamalla kaukolämpöverkko kilpailijoille (Third party access)
TRT	Termisen vasteen testi (Thermal response test)
A	Pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]
$A_{\text{eq}}$	U-putken poikkipinnan ekvivalenttipinta-ala [ $\text{m}^2$ ]
$A_{\text{p, sis1}}$	U-putken sisäänmenohaaran sisäpuolen poikkipinta-ala [ $\text{m}^2$ ]
$A_{\text{p, sis2}}$	U-putken ulostulohaaran sisäpuolen poikkipinta-ala [ $\text{m}^2$ ]
$c_p$	Ominaislämpökapasiteetti [ $\text{J/kg K}$ ]
$c_{\text{p, lsa}}$	Lämmönsiirtoaineen ominaislämpökapasiteetti [ $\text{J/kg K}$ ]
$c_{\text{p, t}}$	Lämpökaivon täyteaineen (vesi) ominaislämpökapasiteetti [ $\text{J/kg K}$ ]
D	Lämmönsiirtoputken halkaisija [m]
f	Kitkakerroin
Fo	Fourierin luku
H	Lämpökaivon syvyys [m]
h	Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [ $\text{W/m}^2 \text{K}$ ]
k	Lämmönjohtavuus [ $\text{W/m K}$ ]
$k_{\text{lsa}}$	Lämmönsiirtoaineen lämmönjohtavuus [ $\text{W/m K}$ ]
$k_{\text{mp}}$	Maa- tai kallioperän lämmönjohtavuus [ $\text{W/m K}$ ]
$k_p$	Lämmönsiirtoputken lämmönjohtavuus [ $\text{W/m K}$ ]
$k_t$	Lämpökaivon täyteaineen (pohjavesi) lämmönjohtavuus [ $\text{W/m K}$ ]
L	Lämmönsiirtoputken pituus [m]

$Nu$	Nusseltin luku
$P_{\text{pumppu}}$	Pumpun teho [W]
$\Delta p$	Painehäviö [Pa]
$Pr$	Prandtlin luku
$Q$	Lämpöteho [W]
$q_0$	Pistemäisen lämpölähteen teho [W]
$q'$	Lämpövirta pituutta kohden [W/m]
$q''$	Lämpövirta pinta-alaa kohden [W/m <sup>2</sup> ]
$R$	Dimensioton etäisyys $r/r_{lk}$
$r$	Radiaalikoordinaatti [m]
$r_{eq}$	U-putken sisäpuolen säteen ekvivalenttipinta-ala [m <sup>2</sup> ]
$r_{lk}$	Lämpökaivon säde [m]
$r_{mp}$	Säde lämpökaivon keskipisteestä maa- tai kallioperään, jossa on vakiolämpötila [m]
$r_{p, sis}$	Lämmönsiirtoputken sisäpuolen säde [m]
$r_{p, sis, 1}$	Lämmönsiirtoputken sisäänmenohaaran sisäpuolen säde [m]
$r_{p, sis, 2}$	Lämmönsiirtoputken ulostulohaaran sisäpuolen säde [m]
$r_{p, u}$	Lämmönsiirtoputken ulkopinnan säde [m]
$Re$	Reynoldsin luku
$R_{kok}$	Lämpökaivon kokonaislämpövastus maa- tai kallioperän ja lämmönsiirtoaineen välillä [m K/W]
$R_{lk}$	Lämpökaivon lämpövastus [m K/W]
$R_{lk, sis}$	U-putken haarojen välinen lämpövastus [m K/m]
$R_{lk, sis, korj}$	Korjattu U-putken haarojen välinen lämpövastus [m K/m]
$R_{lsa}$	Lämmönsiirtoaineen konvektiivinen lämpövastus [m K/W]
$R_{mp}$	Maa- tai kallioperän lämpövastus [m K/W]
$R_p$	Lämmönsiirtoputken lämpövastus [m K/W]
$s$	U-putken haarojen välinen etäisyys [m]
$t$	Aika [s]
$T_{lk, seinä}$	Lämpökaivon seinän lämpötila [°C]
$T_{lsa, sis}$	Lämmönsiirtoaineen lämpötila U-putken sisäänmenohaaras- sa [°C]
$T_{lsa, u}$	Lämmönsiirtoaineen lämpötila U-putken ulostulohaarassa [°C]
$T_{lsa, ka}$	Lämmönsiirtoaineen keskimääräinen lämpötila [°C]
$T_{max}$	Lämmönsiirtoaineen keskimääräinen maksimilämpötila [°C]
$T_{min}$	Lämmönsiirtoaineen keskimääräinen minimilämpötila [°C]
$T_{max, 200}$	Lämmönsiirtoaineen maksimilämpötila, kun kenttään syötetään lämpöä 200 MWh vuodessa [°C]

$T_{\min,200}$	Lämmönsiirtoaineen minimilämpötila, kun kenttään syötetään lämpöä 200 MWh vuodessa [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{\max,400}$	Lämmönsiirtoaineen maksimilämpötila, kun kenttään syötetään lämpöä 400 MWh vuodessa [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{\min,400}$	Lämmönsiirtoaineen minimilämpötila, kun kenttään syötetään lämpöä 400 MWh vuodessa [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_t$	Lämpökaivon täyteaineen (pohjavesi) lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{y0}$	Ympäristön häiritsemätön alkulämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\Delta T$	Lämpötilojen erotus [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\Delta T_{ka}$	Lämpötilojen aritmeettinen keskiarvo [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\Delta T_{ln}$	Lämpötilojen logaritminen keskiarvo [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\Delta T_p$	Lämpötilojen p-lineaarinen keskiarvo [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$u_{lsa}$	Lämmönsiirtoaineen virtausnopeus [m/s]
$U_{sis-t}$	Kokonaislämmönsiirtokerroin U-putken sisäänmenohaaran ja lämpökaivon täyteaineen (pohjavesi) välillä [ $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ ]
$U_{u-t}$	Kokonaislämmönsiirtokerroin U-putken ulostulohaaran ja lämpökaivon täyteaineen (pohjavesi) välillä [ $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ ]
$V$	Nopeus [m/s]
$\dot{V}$	Tilavuusvirta [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$W$	Sähköteho [W]
$y$	y-koordinaatti
$x$	x-koordinaatti
$z$	z-koordinaatti
$\alpha$	Terminen diffusiviteetti [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\rho$	Tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_{lsa}$	Lämmönsiirtoaineen tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_t$	Lämpökaivon täyteaineen (pohjavesi) tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

# 1 JOHDANTO

Uusia energiamuotoja tarvitaan maailman kasvavan väestömäärän ja energiankulutuksen vuoksi. Suurin osa maailman energiatarpeesta tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, jotka loppuvat tulevaisuudessa. Kiinnostus uusiin energiamuotoihin on lisääntynyt, koska fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja energiantuotannon päästöjä halutaan vähentää. Merkittävimmät fossiiliset polttoaineet ovat öljy, kivihiili ja maakaasu. Päästöistä erityisesti kasvihuonekaasupäästöjä tulisi vähentää kasvihuoneilmiön hillitsemiseksi. Merkittävin kasvihuonekaasu on hiilidioksidi. (Glassley 2010)

Maalämpö ja geoterminen energia ovat lähes päästöttömiä energiamuotoja. Maalämmön synnyttämät päästöt riippuvat sähköntuotantotavasta. Maalämpöpumppu ja lämmönkeruupiirin lämmönsiirtoainetta kierrättävä pumppu tarvitsevat sähköä. Jos niiden käyttämä sähkö on tuotettu esimerkiksi vesivoimalla, niin maalämpö on lähes päästötön energiamuoto. Maalämpö on helppokäyttöinen energiamuoto. Maalämpöpumppu tarvitsee vähän huolto- ja tarkastustoimia. Maalämpö on kasvattanut lämmitysjärjestelmistä suosiotaan eniten ja se valittiin lähes puoliin uusista pientaloista Suomessa vuonna 2011. (Glassley 2010; Motiva Oy 2013a)

Maan sisällä on valtavasti lämpöenergiaa, joka voidaan hyödyntää esimerkiksi rakennusten lämmittämisessä (tilat ja käyttövesi) ja sähköntuotannossa. Sähköntuotanto tarvitsee kuitenkin melko korkean lämpötilan. Esimerkiksi tuliperäisillä alueilla, kuten Islanti ja Italia, sähköntuotanto geotermisellä energialla on mahdollista. Tässä diplomityössä käsitellään maalämpöpumppuja, jotka ottavat lämpöä matalasta lämpötilasta, toisin kuin sähköntuotannossa. Maalämpö on sitä kannattavampi lämmitysmuoto, mitä vähemmän lämpöpumpun tarvitsee nostaa lämmönsiirtoaineen lämpötilaa. Maalämmön hyödyntäminen lattialämmityksessä on edullista, koska lämmönsiirtoaineen lämpötilaa ei tarvitse nostaa niin paljon kuin esimerkiksi käyttöveden lämmityksessä. Maalämpöpumppua voidaan myös käyttää tilan jäähdytykseen. (Glassley 2010)

## 1.1 Tausta ja tavoitteet

Diplomityön alkuperäinen tavoite oli tarkastella ja mallintaa Nokian Pitkäniemen lämpöpumppulaitoksen toimintaa. Suunniteltu mallintaminen ei kuitenkaan onnistunut, koska tarvittava data ei ollut käytettävissä. Pitkäniemen lämpöpumppulaitoksen toiminnasta on kuitenkin pieni analyysi ja Pitkäniemen kaltaisen pystysuoran lämpökaivoken-tän toimintaa tutkitaan EED-ohjelmalla. Tavoite on tehdä selkeä kirjallisuusselvitys maalämmöstä.

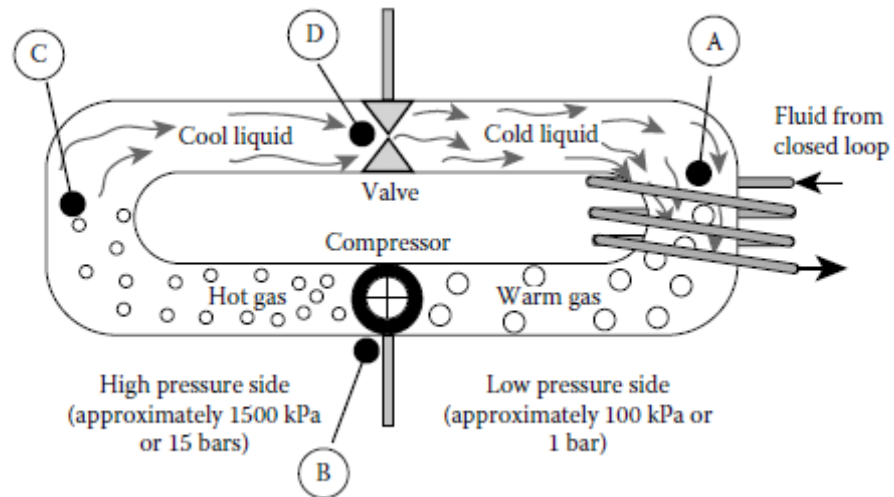
## 1.2 Työn kulku ja rajaus

Työssä selvitetään maalämmön nykytilaa. Aluksi esitellään yleisesti maalämpöpumpun toiminta ja tutkitaan lämmönsiirtoa pystysuorassa lämpökaivossa ja sen ympäristössä. Lämmönsiirto lämpökaivon ympäristössä esitetään kolmen eri mallin avulla (ILS, FLS ja ICS). Lisäksi tutkitaan usean kaivon, lämpökaivokentän, toimintaa. Esimerkkinä työssä käytetään pystysuoraa lämpökaivokenttää Nokian Pitkäniemessä. Tässä työssä ei juuri käsitellä taloudellisia näkökohtia, esimerkiksi sähkön, öljyn ja maalämmön tarkkaa lämmityskustannusten vertailua ei ole. Työssä keskitytään enemmän lämmönsiirtoon lämpökaivossa ja lämpökaivon ympäristössä sekä useamman lämpökaivon toimintaan EED-ohjelmalla. Lopuksi tutkitaan maa- ja kaukolämmön suhdetta toisiinsa sekä kilpailua ja sen puutetta kaukolämpöverkossa.

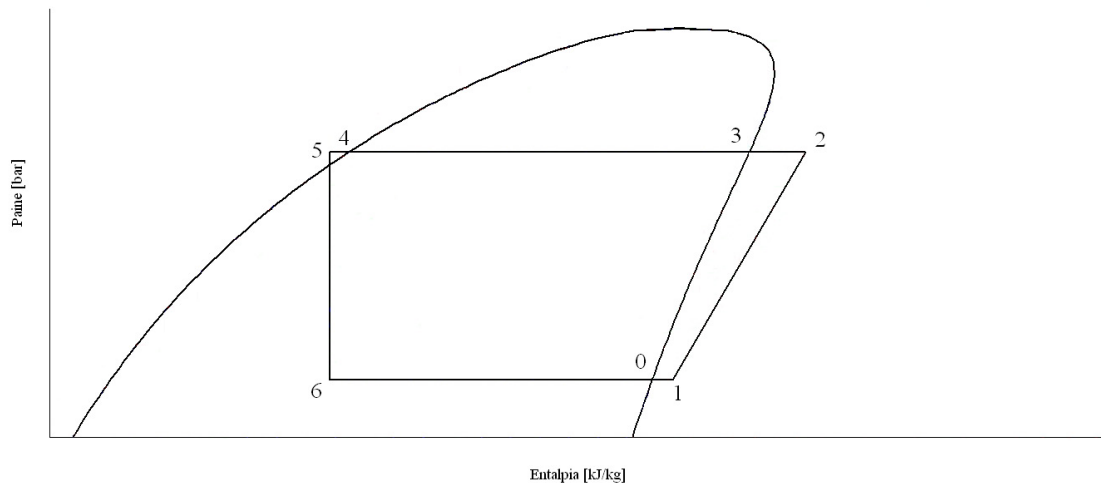
## 2 LÄMPÖPUMPPU

Lämpöpumppu on laite, joka siirtää paikasta toiseen lämpöä. Se siirtää lämpöenergiaa kylmemmästä aineesta lämpimämpään. Lämpöpumppu tarvitsee toimiakseen ulkopuolista energiaa, sähköä. Sitä voidaan käyttää kohteen lämmittämiseen tai jäähdyttämiseen, riippuen viedäänkö lämpöä kohteeseen tai viedäänkö lämpöä kohteesta pois. Jäähdytyskäytössä lämpöpumppua kutsutaan kylmäkoneeksi. Lämpöpumppu voi esimerkiksi lämmittää rakennuksen talvella ja jäähdyttää kesällä. Se kuljettaa jo olemassa olevaa lämpöä, se ei siis luo uutta lämpöä. Lämpöpumppu toimii Carnot-prosessin tavoin. Lämpöpumppuja on erilaisia ja se voi olla esimerkiksi maa- tai ilmalämpöpumppu, riippuen otetaanko lämpöenergia maasta tai ilmasta. Lämpöpumpulla siirretään lämpöä rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen maa-, kallioperästä, vesistöistä tai ilmasta. (Glassley 2010; Sulpu 2013a)

Lämpöpumpun toiminta perustuu kylmäaineen höyryprosessiin (kuvat 2.1-2.3), jonka tärkeimmät vaiheet ovat höyrystyminen, lauhtuminen, puristus ja kuristus. Prosessissa hyödynnetään kylmäaineen höyrystymislämpöä ja matalaa höyrystymislämpötilaa, esimerkiksi  $-28\text{ °C}$ . Kylmäaineen höyrystymiseen vaadittava lämpöenergia siirretään pois jäähtyvistä kohteista ja kuljetaan lämpiävään kohteeseen. Nesteen ja höyryn seoksena höyrystimeen virtaava kylmäaine lämpiää jäähdytettävän kohteen lämmöllä ja muuttuu kylläiseksi höyryksi. Kylläinen höyry tai mahdollisesti tulistunut höyry puristetaan kompressorissa. Lämpötila nousee puristuksessa ja höyry tulistuu. Ideaalisessa puristuksessa entropia säilyy vakiona. Sen jälkeen tulistus poistetaan ja höyry alkaa lauhtua kylmäiseksi nesteeksi lauhtuttimessa. Lauhtuttimen jälkeen kylläinen neste mahdollisesti alijäähtyy. Seuraavaksi neste kuristuu paisuntaventtiilissä ja jäähtyy, osa nesteestä höyrystyy. Lopuksi seos saapuu höyrystimeen ja prosessi alkaa uudelleen. Lauhtuttimessa syntynyt lauhtumislämpö voidaan käyttää esimerkiksi rakennuksen ja käyttöveden lämmittämiseen. Lämpöpumppu voi syöttää lämpöä myös kaukolämpöverkkoon, kuten Nokian Pitkäniemen lämpöpumppulaitoksessa. (Aittomäki et al. 2008)



**Kuva 2.1.** Lämpöpumpun höyryprosessi yksinkertaistettuna. Höyrystin (A). Kompressori (B). Lauhdutin (C). Kuristin (D). (Glassley 2010)



**Kuva 2.2.** Erään kylmäaineen teoreettinen höyryprosessi entalpia-paine tasossa. 0-1 tulistuminen, 1-2 puristus kompressorissa, 2-3 tulistuksen poisto, 3-4 lauhtuminen, 4-5 alijäähtyminen, 5-6 kuristus, 6-0 höyrystyminen.

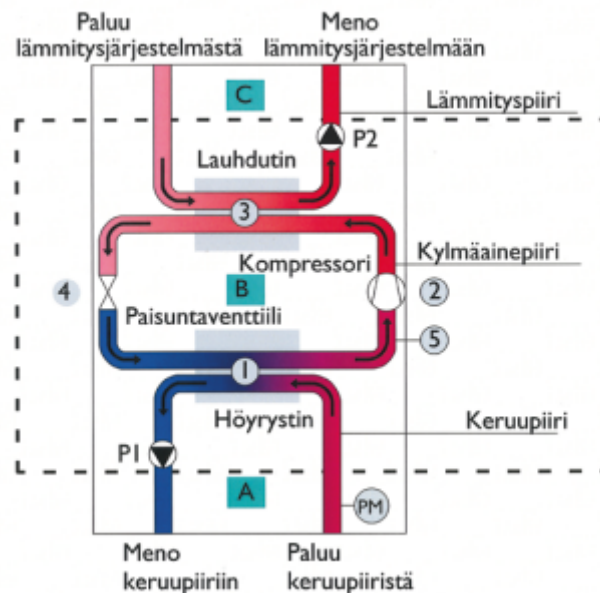
## 2.1 Maalämpöpumppu

Kylmäaine höyrystyy höyrystimessä maa-, kallioperästä tai vesistöistä saatavalla lämpöenergialla. Auringon säteilyenergia sitoutuu Maan pintakerrokseen ja ilmaan. Pystysuoran lämpökaivon syvemmissä osassa esiintyvä lämpö on geotermistä energiaa, joka on peräisin Maan ytimeistä ja lämpimistä pohjavesivirtauksista. Höyrystin, kompressori, lauhdutin, kuristin ja putkisto muodostavat suljetun kiertopiirin, kylmäainepiirin. Kylmäainepiirin kompressori tarvitsee sähköä toimiakseen. Maalämpöpumpun tuottamasta lämpöenergiasta noin kaksi kolmasosaa on peräisin maa- tai kallioperästä ja loppu kolmasosa on tuotettu sähköllä. Maalämpöpumppujärjestelmä ja sen asentaminen uuteen 150 m<sup>2</sup>:n taloon maksaa noin 12 000-16 000 euroa. Lämmitysmuodon vaihtami-

nen maalämpöön vanhassa talossa maksaa saman verran tai hieman enemmän kuin asentaminen uuteen taloon. (Acuña 2010; Motiva Oy 2013a)

Kylmäainepiirin lisäksi on toinen suljettu kiertopiiri, lämmönkeruupiiri. Lämmönkeruupiirissä jäätyvätön neste, lämmönsiirtoaine, kuljettaa lämpöenergiaa höyrystimeen. Lämpö siirtyy kylmäainepiirissä kiertävään kylmäaineeseen lämmönvaihtimen välityksellä höyrystimessä. Keruupiiri sijaitsee maa- tai kallioperässä. Se voi sijaita myös järven pohjalla tai sedimentissä. Keruupiiri tarvitsee pumpun, joka kierrättää vesipohjaista ainetta höyrystimen lämmönvaihtimen ja maanalaisen osan välillä. Lämpöpumpun lämpökerrointa määritettäessä on otettava huomioon myös keruupiirin pumpun tarvitsema teho. Vesipohjainen kiertoliuos, lämmönsiirtoaine, sisältää esimerkiksi vettä (70 %) ja etanolia (30 %). Etanoli laskee liuoksen jäätyislämpötilaa, jotta aineen esteetön kierto on mahdollista eikä synny jäätyksen aiheuttamia esteitä tai vaurioita. (Acuña 2010; Motiva Oy 2013a)

Lämmönkeruupiiri voi olla esimerkiksi U- tai koaksiaaliputki, joka koostuu meno- ja paluukanavista. Putkella tulisi olla hyvä ja tietynlainen lämmönjohtavuus tehokkaan lämmönsiirron takaamiseksi. Eri lämmönsiirtoputkityyppejä käsitellään myöhemmin kappaleessa 3.1.4. Myös maa- ja kallioperän lämpökapasiteetti sekä lämmönjohtavuus parantavat lämmönsiirtoa maa- ja kallioperästä keruupiirissä kiertävään lämmönsiirtoaineeseen. (Acuña 2010)



**Kuva 2.3.** Maalämpöpumpun toiminta. Keskellä on höyry- tai kylmäainepiiri, jossa kiertää kylmäaine (B). Maanalainen lämmönkeruupiiri, joka luovuttaa lämmön höyrystimessä kylmäainepiirille (A). Lämmitysjärjestelmä vastaanottaa lämmön lauhduttimessa ja lämpö vieään kohteen (rakennus tai käyttövesi) lämmittämiseen (C). (Juvonen & Lapinlampi 2013)

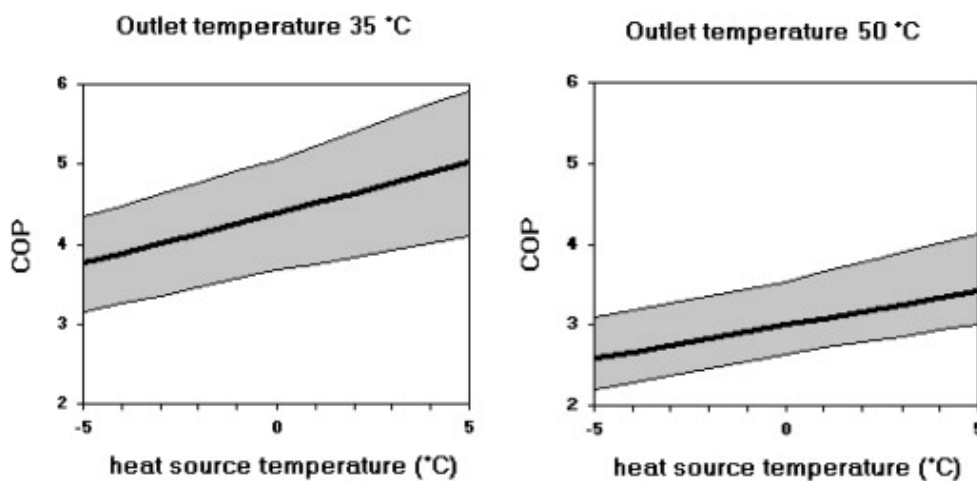


Kylmäainekiertoa ylläpitää kompressori lämpöpumpussa. Kompressori tarvitsee toimiakseen sähköenergiaa. Lämpökerroin COP (Coefficient of performance) ilmaisee lämpöpumpun tehokkuuden. Se kuvaa kuinka paljon lämpöpumppu tuottaa lämpöenergiaa kuluttamansa sähköenergian suhteen. COP on lämpöpumpusta saatavan lämpötehon  $Q$  sekä kompressorin ja lämmönkeruupiirin pumpun tarvitseman sähkötehon  $W$  suhde. (Aittomäki et al. 2008)

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (2.1)$$

On tärkeää, että lämpökerroin on vähintään yksi ja mielellään enemmän, jotta lämpöpumpun hankintakustannukset katetaan järkevällä aikavälillä. Tyypillinen vuosilämpökerroin SPF (Seasonal performance factor) maalämpöpumpulla on 2,5-3,5 Suomessa. SPF on keskimääräinen lämpökerroin vuodessa. (Juvonen 2013; Motiva Oy 2013a)

COP riippuu maapiirin lämmönsiirtoaineen lämpötilasta. Lämmönsiirtoaineen lämpötila taas riippuu maa- ja kallioperän geologisista ominaisuuksista, lämmönkeruupiirin lämmönsiirtoputken pituudesta, tyypistä, materiaalista sekä pystykaivon täyteaineesta. Vaakasuora lämmönkeruupiiri on erittäin riippuvainen ilmaston ominaisuuksista, koska se lämpiää suurimmaksi osaksi Auringon säteilyenergialla. Lämpöpumpun COP-arvoon vaikuttavat myös lämmitys- ja jäähdytyskuorma, rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä sekä kohteen tarvitsema lämpötila. Pystykaivojärjestelmä on suorituskykyisempi ja energiatehokkaampi kuin vaakasuora lämmönkeruupiiri, koska maa- ja kallioperän lämpötila vakiintuu noin kymmenen metrin syvyydessä ja kasvaa hieman syvemällä. Kuvassa 2.4 havaitaan kuinka COP riippuu lämmönlähteen ja lämmitettävän kohteen lämpötilasta. COP pienenee lämmitettävän kohteen lämpötilan noustessa. COP on parempi, jos lämpöpumppua käytetään tilan lämmitykseen käyttöveden lämmityksen sijaan. (Sanner et al. 2003)

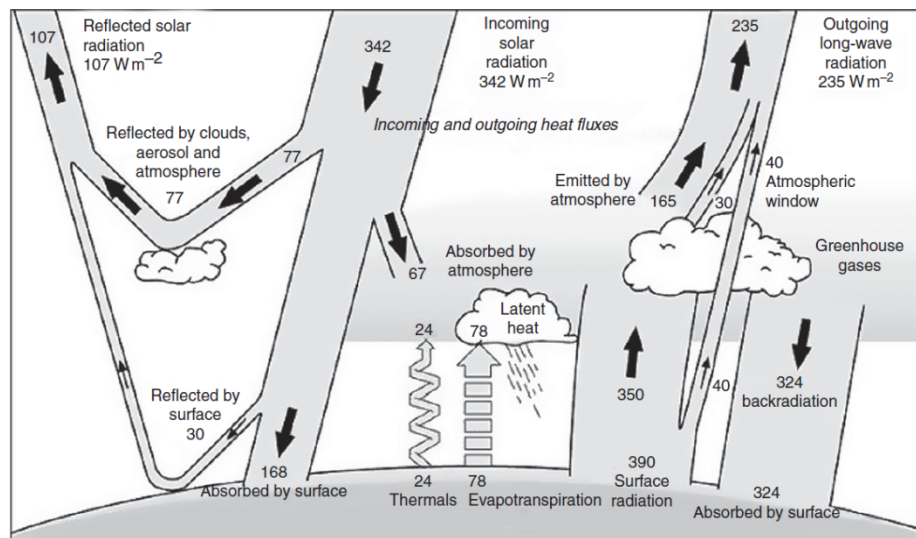


**Kuva 2.4.** Erään lämpöpumpun (laboratorio-olosuhteissa) COP-arvo suhteessa lämmönlähteen lämpötilaan ja ulostulolämpötilaan. (Sanner et al. 2003)

## 3 MAALÄMPÖ JA GEOTERMINEN ENERGIA

### 3.1 Maalämpö

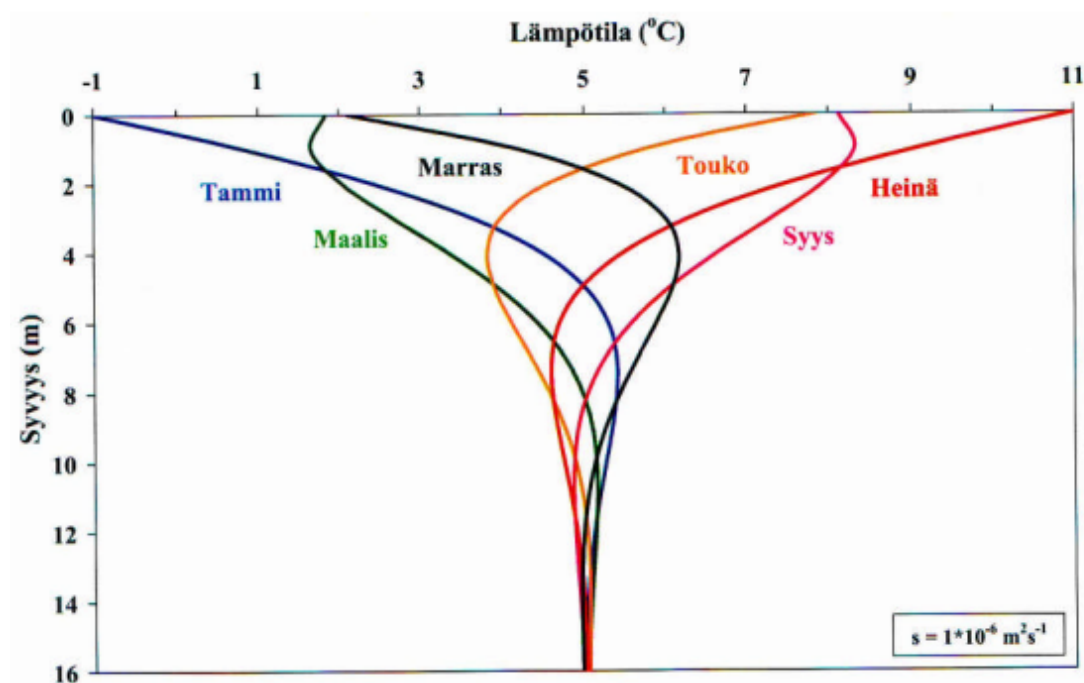
Maalämpö koostuu geotermisestä energiasta ja Auringon säteilyenergiasta. Syvällä Maan sisällä syntyvää lämpöenergiaa kutsutaan geotermiseksi energiaksi. Se on peräisin Maan ytimeistä, jonka lämpötila on noin 5000 °C (Omer 2008). Geotermisen energia syntyy maapallon sisällä ja on riippumaton Auringon säteilyenergiasta. Geotermisen energia on ehtymätön energialähde. Se johtuu Maan sisällä ylempiin kerroksiin, lopuksi ilmakehään ja avaruuteen. Auringon säteilyenergia lämmittää Maapallon pintakerrosta. Se varastoituu maa-, kallioperään ja vesistöihin. Tämä sitoutunut energia on aurinkoenergiaa. Maahan saapuvasta Auringon säteilyenergiasta lähtee pois yhtä paljon kuin Maahan saapuu. Muuten Maapallon pinnan ja ilman lämpötila nousisivat koko ajan ja lopulta Maa ei olisi asuinkelpoinen (kuva 3.1). Noin 10-15 metrin syvyydessä Maan lämpötila on vakio riippumatta pinnan lämpötilasta, vuodenaikasta ja säästä (kuva 3.2). (Glassley 2010; Rybach 2012)



**Kuva 3.1.** Auringosta saapuva säteilyenergia ja avaruuteen takaisin lähtevä lämpöenergia. (Rybach 2012)

Maapallon sisällä on lämpöenergiaa, joka on peräisin auringosta ja radioaktiivisista hajoamisista maan sisällä sekä maapallon muodostumisen, uuden maankuoren ja maanjäristyksen yhteydessä syntyneestä lämpöenergiasta. Aurinko lämmittää tehokkaasti maa- ja kallioperää muutaman metrin syvyydellä Maan pinnalla, kun taas radioaktiiviset isotoopit hajoavat syvällä maapallon sisällä. Geotermisen energia johtuu syvältä maan

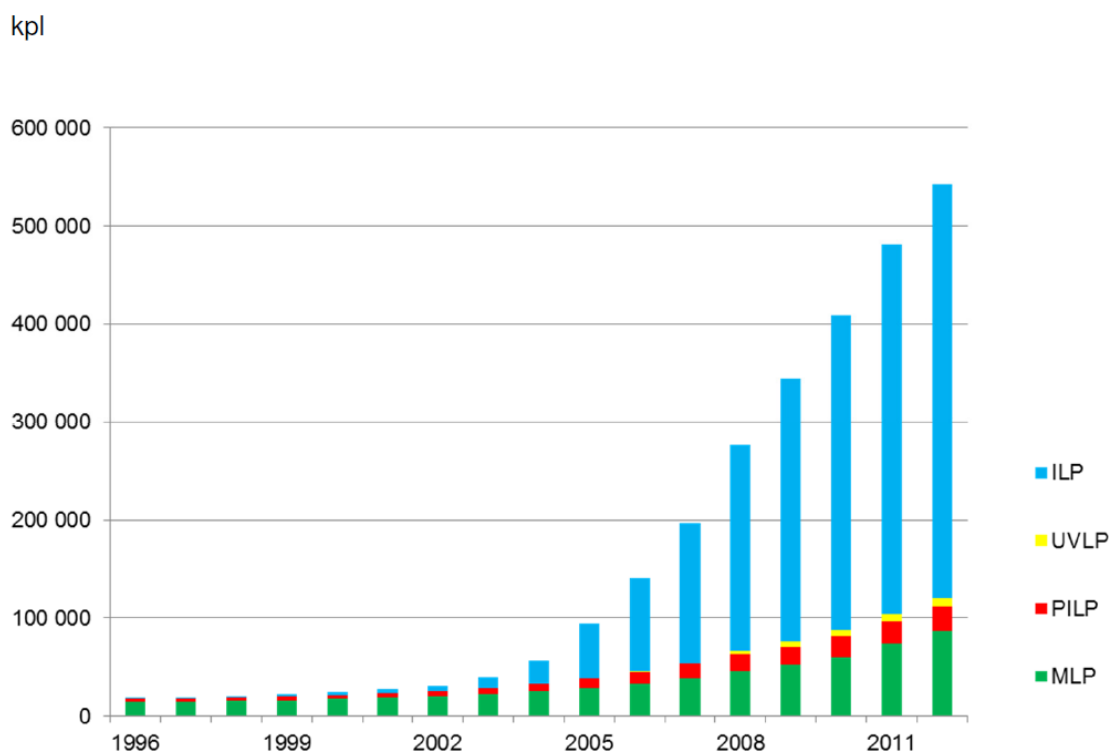
sisältä ylempiin kerroksiin ja siten se on hyödynnettävissä energiantuotannossa. Geoterminen energia ei sisällä Auringon säteilyenergiaa. Geoterminen energia on riippumaton Auringosta. Maalämpö varastoituu maa-, kallioperään ja vesistöihin. Aurinko lämmittää maapallon pintakerrosta ja täten esimerkiksi vuodenaika vaikuttaa Maan pintalämpötilaan. Maanpinnan vuotuinen keskilämpötila on keskimäärin kaksi astetta ilman vuotuista keskilämpötilaa korkeampi Suomessa. Se vaihtelee maantieteellisen sijainnin mukaan, myös paikallinen vaihtelu on mahdollista. Rakennetulla ja asutetulla alueella lämpötila voi olla useita asteita korkeampi kuin luonnontilassa olevassa ympäristössä. Maan keskilämpötila kasvaa 0,5-1,0 °C sataa metriä kohden kallioperässä geotermisen energian vuoksi. Etelä-Suomessa kallioperän lämpötila on noin 6,0-8,0 °C 200 metrin syvyydellä ja 6,5-9,0 °C 300 metrin syvyydellä. Maan lämpötila vakiintuu 14-15 metrin syvyydessä 5-6 °C:een Suomessa (kuva 3.2). (Juvonen 2009; Glassley 2010; Juvonen & Lapinlampi 2013)



**Kuva 3.2.** Kallioperän lämpötilan vakiintuminen Suomessa. (Leppäharju 2008)

Maalämpö kasvattaa suosiotaan Suomessa ja myös maailmanlaajuisesti. Maalämpöpumppujen määrä kasvaa eniten Yhdysvalloissa ja Euroopassa. Maalämpöpumppuja on eniten Euroopassa Ruotsissa. Lämpöpumppujärjestelmissä on eroja maiden välillä, esimerkiksi pystysuoran lämpökaivon seinän ja lämmönkeruuputken välinen tila täytetään pohjavedellä Pohjoismaissa. Muualla täyteaineena käytetään yleensä pohjaveden sijaan sementtiä tai sementtipitoista seosta. Maalämpöpumppuja on käytetty Suomessa 1970-luvulta lähtien. Energiakriisin vuoksi maalämpöpumppujen määrä kasvoi 1970-luvulla. 1980-luvun alussa energian hinta laski ja sen seurauksena maalämpöpumppujen kysyntä romahti Suomessa. 2000-luvun vaihteessa maalämpöpumppujen määrä alkoi kasvaa kohonneen energian hinnan vuoksi. Korkea energian hinta kannustaa maalämpöön siir-

tymistä yhä pienemmissä rakennuksissa. Vuonna 2012 Suomessa oli yli 80 000 lämpöpumppua (Kuva 3.3). Ilmalämpöpumppujen määrä on lisääntynyt erittäin paljon 2000-luvun alusta nykypäivään Suomessa (kuva 3.3). (Juvonen 2009)



**Kuva 3.3.** Lämpöpumppujen lukumäärä Suomessa vuosina 1996-2012. ILP, ilmalämpöpumppu. UVLP, ulkoilmavesilämpöpumppu. PILP, poistoilmalämpöpumppu. MLP, maalämpöpumppu. (Sulpu 2013b)

Geotermistä energiaa hyödyntäviä voimalaitoksia on erilaisia. Myös sähköntuotanto tai lämmön ja sähkön yhteistuotanto on mahdollista. Sähköntuotanto edellyttää kuitenkin korkeampaa lämpötilaa kuin matalaenergiaratkaisujen lämmöntuotanto. Sähköntuotanto tarvitsee nykyisin vähintään noin 100 °C lämpötilan lämmönlähteessä. Sähköntuotanto geotermisellä energialla on lähinnä mahdollista vain tuliperäisellä alueella tai erittäin syvällä porakaivolla. (Lund 2004)

Geotermisen sähköntuotanto alkoi Italiassa vuonna 1904. Vuonna 2004 Geotermistä sähköä tuotettiin maailmanlaajuisesti 8771 gigawattia. 1900-luvun alussa maan alta saatavan höyryn lämpötilan täytyi olla vähintään 150 °C, mutta nykyisin 100 °C on riittävä höyryn lämpötila sähköntuotantoon. Pienimmät geotermiset voimalaitokset ovat tehoaan 100-300 kilowattia, maailman suurin geotermisen voimalaitosklusteri sijaitsee Kaliforniassa, Yhdysvalloissa. Se koostuu 22 voimalaitoksesta, joiden keskimääräinen yhteisteho on 955 megawattia. (Glassley 2010; Lund 2004)

### 3.1.1 Vaakasuora lämmönkeruupiiri eli maapiiri

Maaperästä voidaan kerätä lähinnä Auringosta lähtöisin olevaa lämpöenergiaa vaakasuoralla lämmönkeruupiirillä (kuva 3.4). Maaperästä lämpöä keräävää keruupiiriä kutsutaan maapiiriksi. Maapiiri on sijoitettu lähellä maanpintaa, 1-2 metrin syvyyteen. Se muodostuu yhdestä tai useammasta putkesta. Putket voidaan kytkeä eri tavoin, esimerkiksi sarjaan tai rinnan. Putken materiaalina käytetään esimerkiksi polyeteeniä. Vaakatasoon asennettu lämmönkeruupiiri, maapiiri, saa lämpöenergian siis lähinnä Auringosta. Maapiirin putkiston pituus vaihtelee tehon ja tarpeen mukaan. Putkiston pituus on vähimmillään 500 metriä pientalo-kohteissa Suomessa. Sään ja vuodenaikojen vaihtelu vaikuttaa merkittävästi alle kymmenen metrin syvyyteen vaakatasoon sijoitetun maapiirin tehoon kerätä lämpöenergiaa. Myös maaperän laatu ja olosuhteet (esimerkiksi maaperän lämmönjohtavuus ja kosteus) vaikuttavat maapiirin lämmönkeräyskykyyn. Maapiiri kerää tehokkaammin lämpöä kosteammasta maaperästä kuin kuivasta ja kivisestä. Vaakasuora lämmönkeruupiiri on halvempi asentaa kuin pystysuora lämpökaivo. Lämpökaivon kaivamiskustannukset ovat huomattavasti suuremmat, koska kaivo porataan syvään kallioperään, esimerkiksi 200 metrin syvyyteen. Noin 30 % Suomen maa- lämpökohteista hyödyntää maaperän pintakerrokseen varastoitunutta Auringon säteilyenergiaa. Lappi (2013) on tarkastellut vaakakeruuputkiston käyttömahdollisuuksia. (Banks 2009; Glassley 2010; Juvonen & Lapinlampi 2013; Motiva Oy 2013a)

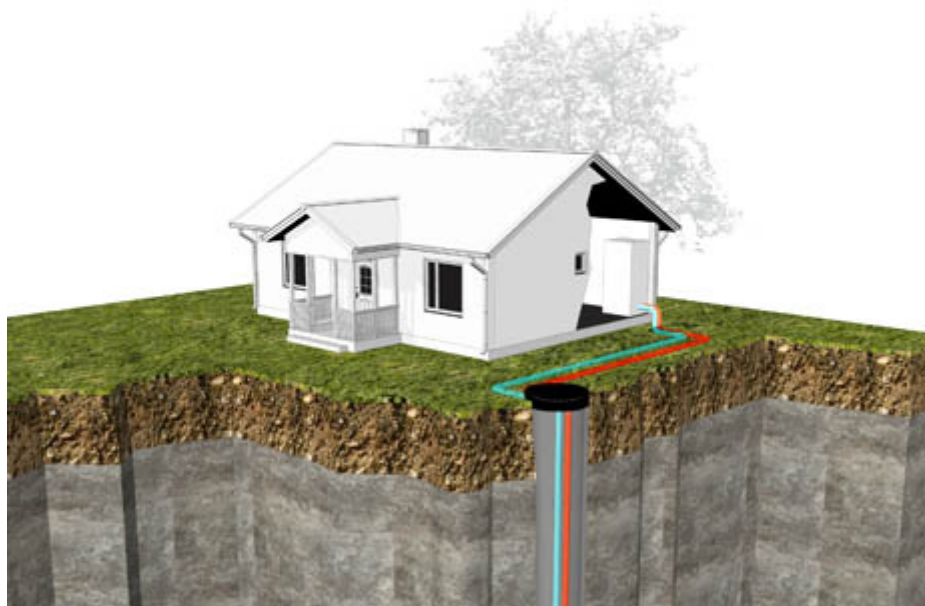


*Kuva 3.4. Maaperään vaakatasoon asennettu lämmönkeruupiiri. (Geoenergia 2013)*

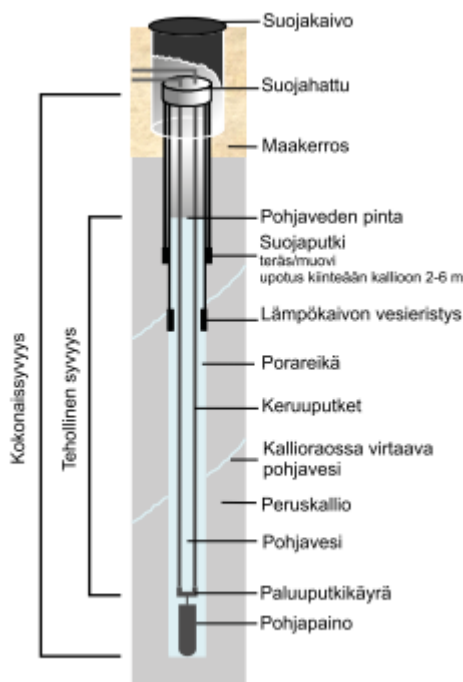
### 3.1.2 Pystysuora lämpökaivo

Kallioperään porattu pystysuora porakaivo, lämpökaivo, hyödyntää lähinnä kallioperään sitoutunutta lämpöenergiaa. Lämpökaivo yltää syvälle maanpinnan alapuolelle kallioperään (kuva 3.5 ja 3.6). Lämpökaivon syvyys on yleensä 50-200 metriä, mutta nykyisin poraaminen 300 metriin on mahdollista. Lämmönkeruupiiri on sijoitettu pystysuoraan

porakaivoon ja lämmönkeruupiirin putki voi olla esimerkiksi U-muodossa (kuva 3.6). Auringon tehokas säteilyenergian vaikutus menetetään lämpökaivossa, mutta etuna on tasainen lämpötila ympäri vuoden vuodenaikasta ja säästä riippumatta. Kallioperä johtaa paremmin lämpöä kuin maaperä. Lämpökaivosta saadaan maapiiriin verrattuna kaksinkertainen energiamäärä putkimetriä kohden. Lämpökaivo voidaan sijoittaa pienelle alueelle, koska kaivon halkaisija on suhteellisen pieni eikä se siten vaadi paljon pinta-alaa maanpinnalla. Lämpökaivon halkaisija on 105-165 millimetriä Suomessa. Lämpökaivo on kalliimpi kuin vaakatasoon maaperään sijoitettu keruupiiri, koska poraaminen syvälle kallioperään on työläämpää kuin vaakasuoran maapiirin asentaminen 1-2 metrin syvyyteen. Mitä syvemmillä kallioperä sijaitsee, sitä kalliimmaksi porauskustannukset tulevat. Lämpökaivossa voi olla suljettu tai avoin keruupiiri. Suomessa käytetään suljettua lämmönkeruupiiriä, yleensä U-putkea (kuva 3.6). Lämpökaivon tärkeimmät osat (lämmönkeräyspuolella) ovat itse porakaivo, lämmönsiirtoputki, lämmönsiirtoaine ja täyteaine. Pohjoismaissa täyteaineena on yleensä pohjavesi. Yli 60 % maalämpökohteista käyttää lämpökaivoa Suomessa. (Juvonen 2009; Acuña 2010; Glassley 2010; Juvonen & Lapinlampi 2013; Motiva Oy 2013a)



**Kuva 3.5.** Kallioperään porattu lämpökaivo. (Geoenergia 2013)



**Kuva 3.6.** Lämpökaivon rakenne. Lämpökaivossa on tavallinen U-putki. (Juvonen & Lapinlampi 2013).

### 3.1.3 Suomen maa- ja kallioperä

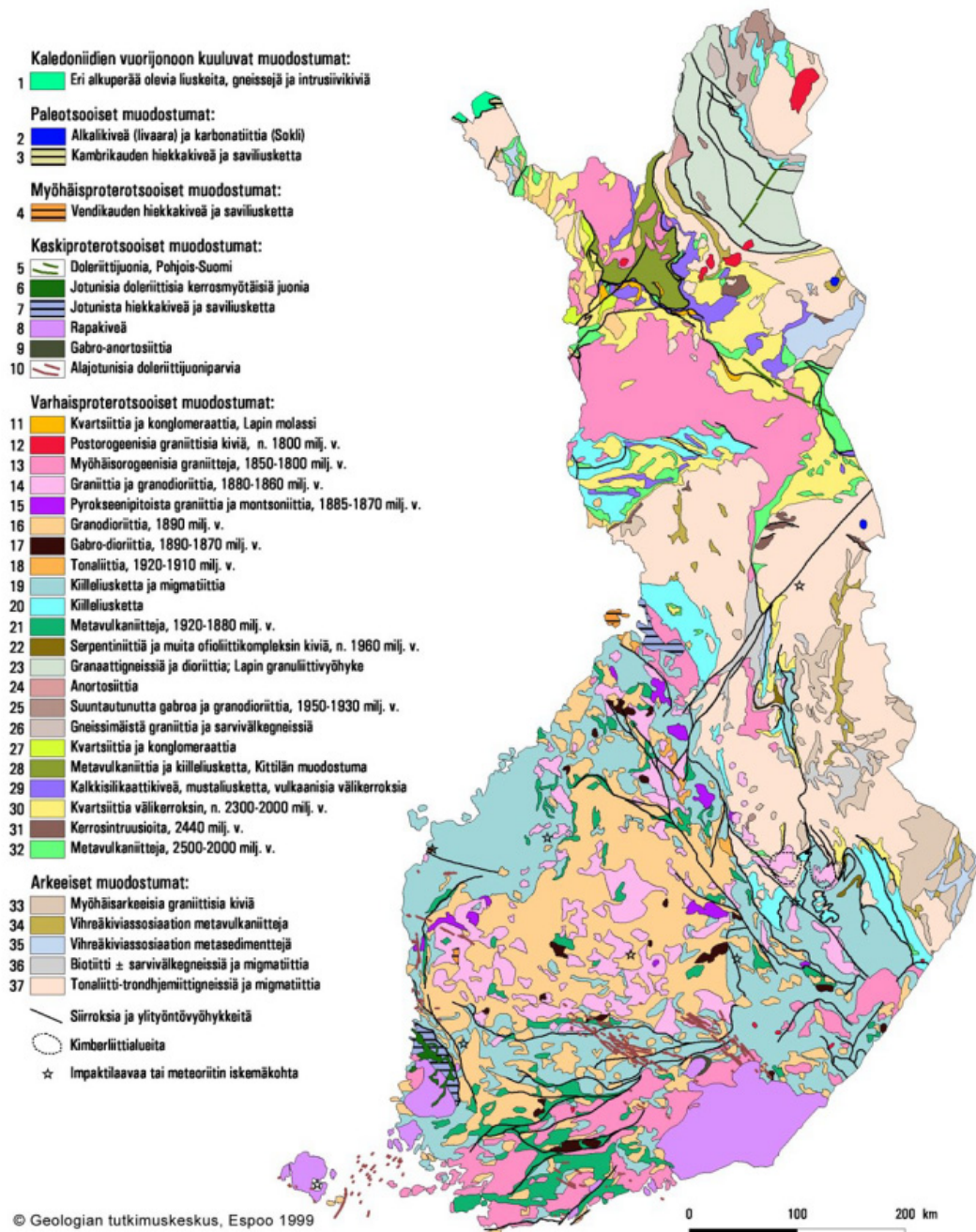
Suomen kallioperä on hyvin vanhaa. Se on säilynyt nykyisellään noin 1,4-3 miljardin vuoden ajan. Suomen kallioperä on vakainta ja vanhinta Euroopassa. Graniittiset kivilajit ovat Suomen kallioperän yleisin kivilajiryhmä, 52,5 % Suomen kallioperän pinta-alasta. Graniitti on Suomen yleisin kivilaji. (Turunen 2013)

Suomen yleisin maalaji on moreeni. Se on sekoitus kaikkia maalajikkeita lohcareista savekseen. Maaperän keskipaksuus on 8,5 metriä Suomessa. Sen paksuus vaihtelee 0-100 metriin. Kallioperä on näkyvissä, jos maaperää ei ole. (GTK 2013a; Hakala 2013)

**Taulukko 3.1.** Suomen kallioperän koostumus (pinta-ala). (Turunen 2013)

Suomen kallioperän kivilajikoostumus	%
Runsapiihapoiset syväkivet (graniitti, granodioriitti, kvartsidioriitti)	52,50 %
Seoskivet (migmatiitteja)	21,80 %
Liuskeet (fyliitti, kiilleliuskeet, kiillegneissit)	9,10 %
Vähäpiihapoiset magmakivet (gabrot, diabaasit, amfibolit)	8,20 %
Kvartsiitit ja hiekkakivet	4,30 %
Granuliitit	4,00 %
Kalkkikivet	0,10 %





Kuva 3.7. Suomen kallioperä. (GTK 1999)

### 3.1.4 Lämmönsiirtoputki

Suljettu lämmönkeruupiiri koostuu lämmönsiirtoputkesta, putkessa virtaavasta lämmönsiirtoaineesta, pumpusta ja lämmönsiirtimestä. Lämmönsiirtoaine kiertää lämmönsiirtoputkessa ja lämpiää kierron aikana muutaman celsiusasteen. Putkia on erilaisia. Se on yleensä valmistettu joustavasta muovista, esimerkiksi polyeteenistä (polyetyleni). Polyeteenin lämmönjohtavuus on noin 0,42 W/mK, joka on suuri lämmönjohtavuus muoville. Harvinaisempia putkimateriaaleja ovat ruostumaton teräs, kupari, polyvinyylikloridi (PVC) ja muut muovit. (Acuña 2010; Acuña 2013)



Lämmönsiirtoputki luokitellaan poikkileikkauksen geometrian ja lämmönsiirtoaineen virtauksen mukaan. Putkirakenteita on paljon erilaisia. Putket kuitenkin luokitellaan yleensä kahteen pääluokkaan rakenteen mukaan, U-putki ja koaksiaaliputki. Tehokas lämpökaivo edellyttää pienen lämpövastuksen lämpökaivossa, vähäisen haitallisen lämmönsiirron (thermal shunt) putkihaarojen (sisäänmeno- ja ulostulohaara) välillä ja lämmönsiirtoaineen tarpeeksi pitkän viipymäajan lämpökaivossa. Näitä ominaisuuksia voidaan säätää lämmönsiirtoaineen virtausnopeudella. (Acuña 2010; Acuña 2013)

### ***U-putki***

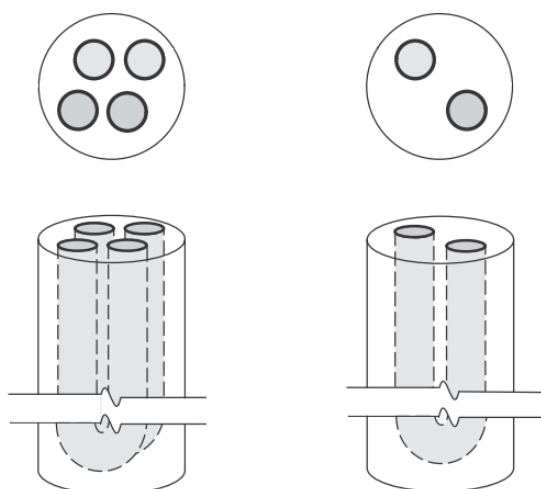
U-putki on käytetyin ja tutkituin putkimalli lämpökaivoissa. Kaivoon asetetaan putki U-muotoisesti (Kuva 3.6 ja 3.8). U-putkia voidaan asettaa samaan kaivoon enemmänkin, esimerkiksi kaksi U-putkea (Kaksois-U-putki, kuva 3.8 vasen). Tyypillinen U-putki on halkaisijaltaan (ulkoinen) 40 millimetriä ja putken seinän paksuus 2,4 millimetriä (PE40x2,4 mm). On myös olemassa esimerkiksi kolmihaarainen U-putki, kaksi sisäänmenohaaraa ja yksi paluuhaara. Putken pinta on normaalisti sileä, mutta putken sisäpinnassa voi olla uria lämmönsiirron tehostamiseksi. (Acuña 2010; Acuña 2013; Al-Khoury 2012)

U-putken lämmönkeräyskyky on heikko korkean lämpövastuksen vuoksi, eli lämmönsiirtoaineen ja kallioperän lämpötilaero on suhteellisen suuri. Tämä johtuu putkimateriaalin heikosta lämmönjohtavuudesta, sisäänmeno- ja ulostuloputkihaarojen välisestä lämmönsiirtymisestä (thermal shunt), putkihaarojen sijainnista suhteessa porakaivon seinään ja porakaivon täytemateriaalin (Pohjoismaissa yleensä pohjavesi) suhteellisen heikosta lämmönjohtavuudesta. (Acuña 2010)

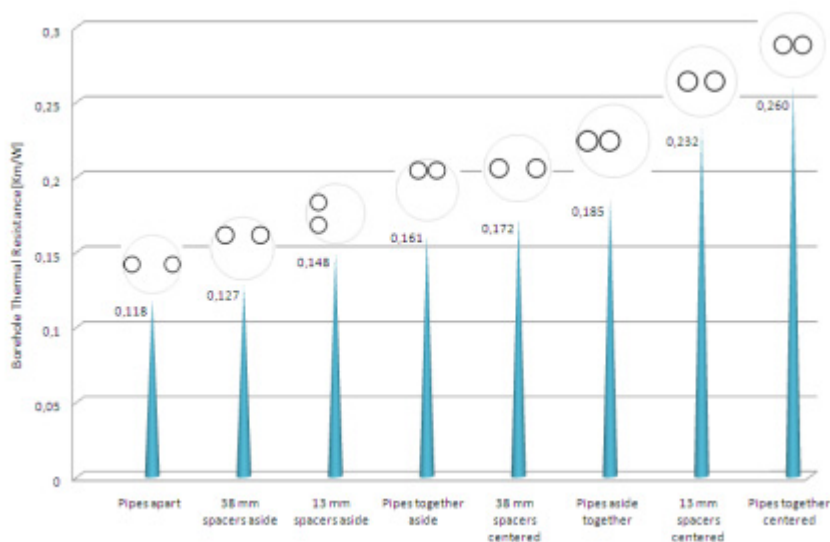
Lämmönsiirtoaineen virtauksen U-putkessa tulisi olla turbulenti. Turbulentti virtaus aiheuttaa pienemmän lämpövastuksen kuin laminaari virtaus U-putkessa. Siten lämmönsiirto on tehokkaampi putken sisäpinnalta lämmönsiirtoaineeseen. (Acuña 2010)

Putkihaarojen väliin voidaan asettaa erotin. Erotin pitää putkihaarat erillään toisistaan, joten haarojen välinen haitallinen lämmönsiirto (thermal shunt) vähenee. Syvemmissä lämpökaivoissa sisäänmeno ja ulostuloputkihaarojen välinen lämmönsiirto voimistuu pidemmän putken vuoksi. Samalla erotin vie putkihaarat lähemmäksi porakaivon seinää, joten lämpökaivon lämpövastus pienenee (kuva 3.9). Myös porakaivon halkaisija vaikuttaa lämmönsiirtoon. Pienempi halkaisijaisessa porakaivossa on parempi lämmönsiirto, koska porakaivossa on vähemmän lämmönsiirtoa häiritsevää pohjavettä ja putket ovat lähempänä porakaivon seinää. (Acuña 2010)

Tavallista U-putkea (single U-pipe) käytetään enemmän Pohjois-Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. Kaksois-U-putkea (Double U-pipe) (kuva 3.8 vasen) käytetään enemmän Keski-Euroopassa. (Hellström 1998)



**Kuva 3.8.** Vasemmalla on kaksois-U-putki ja oikealla on tavallinen U-putki lämpökaivossa. (Al-Khoury 2012)



**Kuva 3.9.** Lämpökaivon lämpövastus suhteessa lämmönsiirtoputken (U-putken) haarojen sijaintiin lämpökaivossa. (Acuña 2010)

### **Koaksiaaliputki**

Koaksiaaliputki koostuu meno- ja paluukanavasta (kuva 3.10). Putken sisällä on pienempi putki (kuva 3.10a). Nämä kaksi putkea on kytketty sarjaan. Putken reunan puoleinen kanava voi olla yhtenäinen tai koostua useammasta kanavasta (kuva 3.10). Koaksiaaliputkessa on pieni painehäviö, koska virtaus putkessa on laminaari. U-putkessa virtauksen tulisi olla turbulenti tehokkaamman lämmönsiirron vuoksi. Laminaari virtaus tarvitsee vähemmän pumppaustehoa kuin turbulenti virtaus. (Acuña 2010)

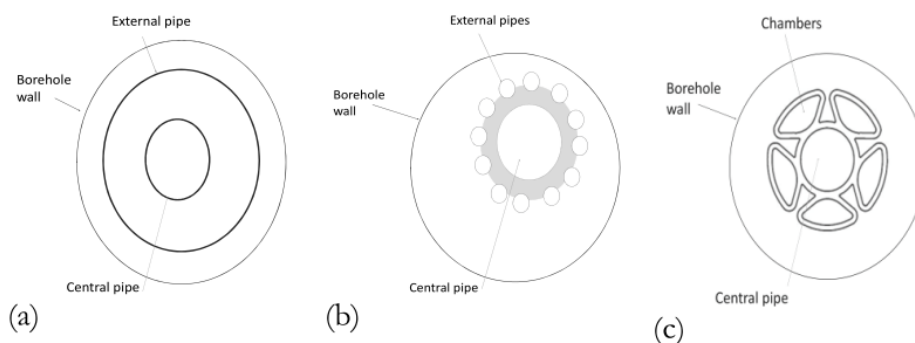
Koaksiaaliputkella saattaa olla parempi lämmönkeräyskyky kuin U-putkella, koska putken ulompi virtauskanava on lähempänä porakaivon seinää ja siten lämpökaivon läm-

pövästus on pienempi. Toistaiseksi koaksiaaliputken lämpövästus on lähes yhtä suuri kuin U-putkella. Laboratoriokokeissa koaksiaaliputkella on kuitenkin havaittu pienempiä lämpövästusarvoja kuin U-putkella, joten koaksiaaliputkella saattaa olla tehokkaampi lämmönkeräyskyky kuin U-putkella tulevaisuudessa. Koaksiaaliputken ongelmana on virtauskanavien välinen haitallinen lämmönsiirto (thermal shunt), kuten myös U-putken sisäänmeno- ja ulostulohaaravälillä. Kuvassa 3.11 on lämpökaivon lämpövästus U-putkelle ja vanhanmalliselle REFLA-koaksiaaliputkelle. (Acuña 2010)

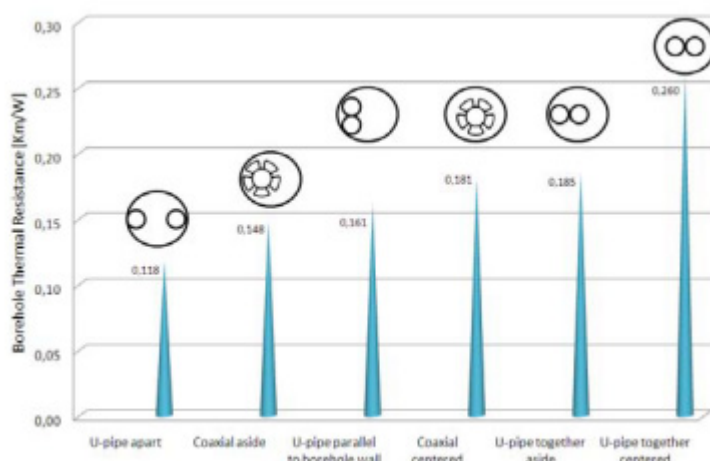
Wood et al. (2012) tutkivat U- ja koaksiaaliputken lämmönsiirtoa. U-putken ulkohalkaisija on 20 millimetriä. Koaksiaaliputken ulkoputken halkaisija on 40 millimetriä ja sisäputken halkaisija on 20 millimetriä (kuva 3.10a). Tutkimuksessa havaittiin U- ja koaksiaaliputkien lämmönkeräystehon olevan lähes yhtä suuri, joten nykyisen tavallisen koaksiaaliputken ja tavallisen U-putken lämpövästus ei eroa toisistaan merkittävästi.

Pitkäniemen lämpöpumppulaitoksessa Nokialla käytetään Mateve Oy:n valmistamaa REFLA-koaksiaaliputkea (Kuva 3.10c) viidessä lämpökaivossa ja järven sedimenttiin on asetettu kahdeksan REFLA-putkea. REFLA-putki on halkaisijaltaan 65 mm tai 82 mm. REFLA-putki soveltuu lämpöenergian keräämiseen maa-, kallioperästä ja vesialueen pohjasedimentistä. Mateven mukaan REFLA-putkella on 60 % pienempi painehäviö ja 40 % parempi lämmönkeräys verrattuna perinteiseen U-putkeen. (Mateve Oy 2013)

Anderson (2008) on simuloinut vanhanmallisen REFLA-putken (kuva 3.24 vasen) lämmönsiirtoa. Simuloinnissa tutkittiin lämmönsiirtoa 300 metrin REFLA-putkessa ja yhtä pitkässä U-putkessa kahdella eri tilavuusvirralla halkaisijaltaan 160 mm:n kaivos- sa. Tilavuusvirran ollessa 30 l/min saatiin REFLA-putkelle lämpöteho 4,6 kW ja U-putkelle 3,8 kW. Kun tilavuusvirta oli 50 l/min, niin molempien putkien lämpöteho oli 4,2 kW. Siis tilavuusvirran kasvaessa U-putkella saatava lämpöteho kasvoi ja REFLA-putkella saatava lämpöteho pieneni. Simuloinnissa havaittiin myös, että kaivon pienentäminen 115 millimetriin suurensi lämmönsiirtonesteen lämpötilaa 10 %. Tutkielmassa todettiin REFLA-putken parantavan lämpöpumpun lämpökerrointa (COP). Lopulliset lämmityskustannukset olisivat kuitenkin vain hieman pienemmät verrattuna tavalliseen U-putkeen.



**Kuva 3.10.** Kolme erilaista lämpökaivon poikkileikkausta. (a) Tavallinen koaksiaaliputki. (b) Keskusputken ympärillä pienempiä itsenäisiä putkia. (c) Uudenmallinen REFLA -koaksiaaliputki, jossa ulkoiset kanavat osa keskusputkea. (Acuña 2013)



**Kuva 3.11.** Lämpökaivon lämpövastus U-putkella ja vanhanmallisella REFLA-putkella. (Acuña 2010)

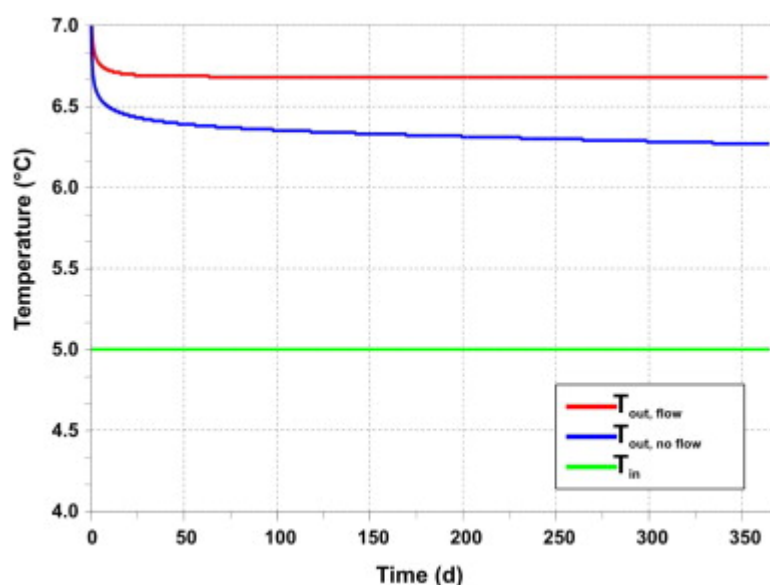
### 3.1.5 Lämpökaivon täyteaine

Pohjois-Euroopassa lämpökaivon täyteaineena (grout) on pohjavesi. Lämpökaivo yleensä täyttyy itsestään pohjavedellä. Erilaisia menetelmiä käytetään porakaivon täyttämiseksi pohjavedellä, jos kaivo ei täyty itsestään kaivon porauksen jälkeen. Pohjois-Amerikassa ja Keski-Euroopassa porakaivon täyteaineena käytetään erilaisia kiinteitä aineita, kuten bentoniittia, betonia ja kvartsihiekkää. Näillä kiinteillä aineilla on parempi lämmönjohtavuus kuin vedellä. On myös olemassa kiinteitä seosaineita, jotka on tehty parantamaan lämmönjohtumista lämpökaivossa. Pohjavesi voi muuttua kiinteäksi jäätyessä. Lämpö siirtyy vain johtamalla kiinteässä väliaineessa porakaivon seinältä lämmönsiirtoputkelle, mutta pohjavesitäytteisessä lämpökaivossa esiintyy myös luonnollinen konvektio. (Hellström 1998)

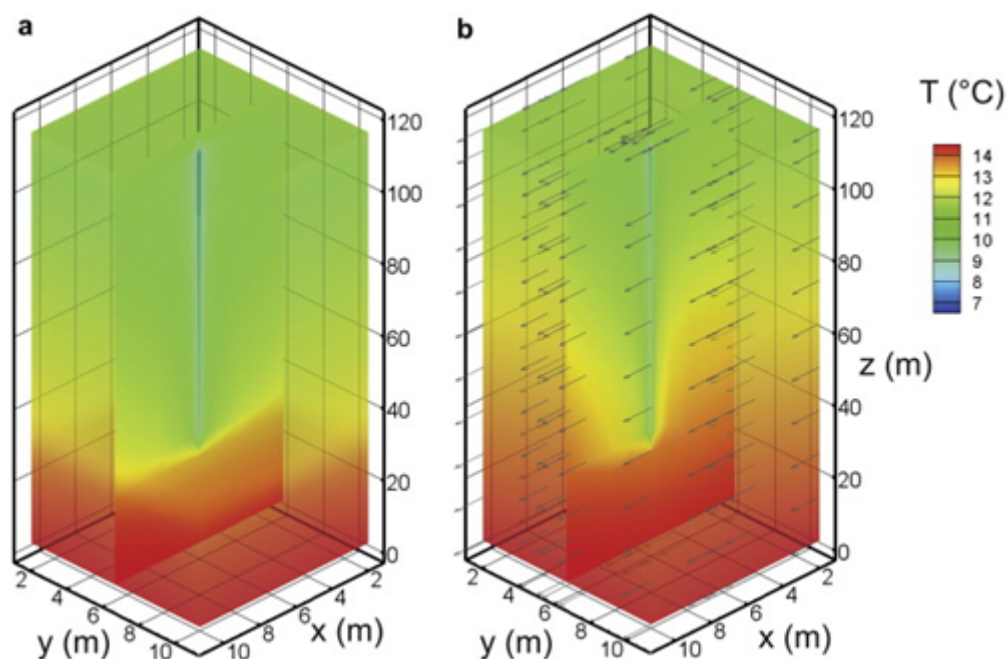
### 3.1.6 Luonnollinen konvektio ja pohjaveden virtaus lämpökaivossa

Luonnollinen konvektio ja pohjaveden virtaus voivat tehostaa lämmönsiirtoa pohjavedellä täytetyssä porakaivossa. Lämpötilaero aiheuttaa luonnollisen konvektion lämmönsiirtoputken ulkoseinän ja kaivon seinän välille vesitäytteisessä porakaivossa. Laboratoriotestissä tutkittiin (Hellström 1998) luonnollisen konvektion vaikutusta lämmönsiirtoon pystysuorassa U-putkilämpökaivossa. Testissä havaittiin syntyvän heikko luonnollinen konvektio, kun lämmönsiirtoaineella oli matala lämpötila ja lämmönsiirto [W/m] oli vähäistä. Luonnollinen konvektio oli voimakkaampi korkealla lämmönsiirtoaineen lämpötilalla (15-45 °C) ja suurella lämmönsiirrolla (50-100 W/m). Konvektiivinen lämmönsiirto oli suurilla arvoilla korkeintaan 3-5 kertaa suurempi kuin paikallaan olevan veden lämmönjohtuminen. Lämpökaivon lämpövastus voi olla suhteellisen pieni korkean lämpötilan sovelluksissa suuremman luonnollisen konvektion vuoksi. (Hellström 1998)

Lämpökaivossa oleva vesi voi liikkua pohjavesivirtauksen vuoksi. Kaivoon voi virrata uutta vettä ja kaivossa jo oleva vesi voi virrata kaivosta pois. Pohjavesi virtaa kalliooperässä olevien halkeamien kautta. Se voi tuoda mukanaan kaivoon lämmintä tai viileää vettä sekä kuljettaa lämmintä tai viileää vettä pois kaivosta. Siten pohjaveden virtaus vaikuttaa lämmönsiirtoon porakaivossa. Pohjaveden virtauksen vaikutusta kaivon toimintaa on vaikea ennakoida, koska ei tiedetä, miten pohjavesi virtaa kalliooperän halkeamissa. Simuloiduissa testeissä havaittiin, kuinka pohjaveden virtaus vaikuttaa lämmönsiirtoaineen paluulämpötilaan (kuva 3.12) ja kalliooperän lämpötilaan lämpökaivon ympäristössä (kuva 3.13). (Acuna 2010; Al-Khoury 2012)



**Kuva 3.12.** Lämmönkeruupiirin paluulämpötilan muutos pohjaveden virtauksella ja ilman virtausta. (Mottaghy et al. 2012)



**Kuva 3.13.** Lämpötila lämpökaivon ympäristössä. Vasemmalla lämmönsiirto johtumalla, oikealla lämmönsiirto virtaavan pohjaveden välityksellä. (Mottaghy et al. 2012)

### 3.1.7 Lämmönkeruupiiri ja lämmönsiirtoaine

Suljetun lämmönkeruupiirin putkistossa kiertää lämmönsiirtoaine. Lämmönsiirtoaine lämpiää muutaman celsiusasteen kierron aikana lämmönkeruupirissä. Se kerää lämpöä maaperästä, kallioperästä tai järvestä (järvilämpö). Se siirtää lämpöä lämpöpumpun höyrystimeen. Höyrystimessä lämpö siirtyy kylmäainepiiriin kylmäaineelle, joka höyrystyy ja sitoo lämmön höyrystymislämpönä. (Aittomäki et al. 2008; Juvonen & Lapinlampi 2013; Motiva Oy 2013a)

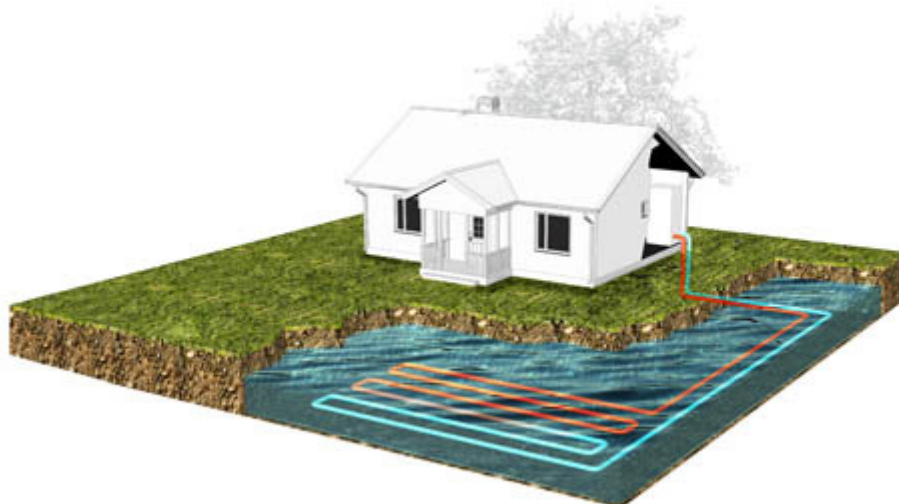
Lämmönsiirtoaine on vesipohjainen. Siihen lisättävän aineen tarkoitus on estää lämmönsiirtoaineen jäätyminen. Lämmönsiirtoaineena on esimerkiksi etanolin (30 %) ja veden (70 %) seos. Se on yleisin lämmönsiirtoaineena käytetty seos maalämpökeruupiireissä Suomessa. Etanoli on luokiteltu vaarattomaksi ympäristölle. Lämmönsiirtoaineen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat pieni viskositeetti, matala jäätyislämpötila, hyvä lämmönjohtavuus ja korkea ominaislämpökapasiteetti. Lisäksi muita tärkeitä ominaisuuksia ovat, että aine on palamaton, myrkytön, biologisesti hajoava, kemiallisesti stabiili, pitkäikäinen, ei korrodoiva ja yhteensopiva muiden materiaalien kanssa. Lämmönsiirtoaine ei saisi sisältää pohjavedelle haitallisia aineita. Lämmönsiirtoaineessa käytetään myös lisäaineita esimerkiksi korroosion tai sienikasvuston estämiseksi. Lisäaineiden osuus on 0,5-5 prosenttia liuoksen massasta. (Juvonen 2009; Juvonen & Lapinlampi 2013)

### 3.1.8 Ympäristöriskit

Maalämmön ympäristöriskit liittyvät lähinnä pohjaveden pilaantumiseen. Pohjavesi voi pilaantua suoraan tai välillisesti. Pinnalta valuvat vedet sekoittuvat suoraan pohjaveteen lämpökaivossa, esimerkiksi sadeveden kulkeutuminen lämpökaivoon rikkinäisen tiivisteiden vuoksi. Myös lämmönsiirtoaineet voivat vuotaa pohjaveteen tai maaperään. Välillisesti pohjavesi voi pilaantua esimerkiksi saastuneen maaperän välityksellä. Kallion pohjavesikerrokset voivat sekoittua keskenään. Poikkeustilanteessa suolainen pohjavesi saattaa sekoittua makeaan veteen. Normaalisti ne eivät sekoitu, koska niiden tiheys ero säilyttää ne eri kerroksissa. (Juvonen 2009)

### 3.2 Järvilämpö

Auringon säteilyenergia varastoituu järven veteen. Tämä lämpöenergia voidaan siirtää järvestä rakennuksen ja käyttöveden lämmitykseen, myös jäädytyskäyttö on mahdollista. Lämpöenergia kerätään järvestä keruupiirillä, joka voi olla suljettu (kuva 3.14) tai avoin. Järvilämpö eroaa maalämmöstä vain siten, että lämpö kerätään järvestä maa- tai kallioperän sijaan. (Banks 2009)



*Kuva 3.14. Järvilämpö, järven pohjaan asennettu suljettu lämmönkeruupiiri. (Geoenergia 2013)*

Lämpöenergia kerätään järvestä samalla tavalla kuin maaperästä. Keruuputkea ympäröi kuitenkin vesi maan sijaan. Järven pohjaan voidaan asentaa erilaisia suljettuja keruupiirejä. Keruupiirinä voi olla yksi tai useampi putki järven pohjassa. Putket voidaan kytkeä sarjaan tai rinnan. Ne voidaan myös laittaa kerälle. Putki pitää kiinnittää pohjaan, jotta putki ei nouse pintaan esimerkiksi sen pinnalle syntyneen jään vuoksi. Suljetussa keruupiirissä kiertää lämmönsiirtoaine, jonka jäätymislämpötilaa on laskettu, jotta aine ei jäädy. Suljettu keruupiiri voidaan sijoittaa kylmempään järveen kuin avoin keruupiiri, jotta vältettäisiin veden jäätyminen. Keruupiirin putkimateriaali voi olla esimerkiksi polyeteeniä. Suljetun kiertopiirin putki myös estää lämmönsiirtoaineen likaantumisen,

toisin kuin avoimessa keruupiirissä. Suomessa käytetään suljettuja lämmönkeruupiirejä (Banks 2009; Juvonen & Lapinlampi 2013)

Avoimessa keruupiirissä vesi otetaan ilman järven pohjaan sijoitettua putkistoa. Järven lämmin vesi pumpataan lämmönvaihtimeen ja lämpö luovutetaan höyrystimessä höyrypiirin kylmäaineelle (lämmityskäyttö). Vesi palaa takaisin järveen kylmänä (lämmityskäyttö). Jäähdytyskäytössä lämpöä viedään järveen, eli järvestä otettu vesi lämpiää. Vesi voidaan pumpata järven pohjalta tai pinnalta, riippuen järven koosta. Veden sisäänmenoputkeen laitetaan suodatin roskien ja kiinteän aineen pääsyn estämiseksi järjestelmään. Sisäänmeno- ja ulostuloputki sijoitetaan erilleen, jotta kylmä ja kuuma virtaus ei sekoitu keskenään. Järven jäätyminen on ongelmallista avoimelle keruupiirille, joten se ei sovellu kylmään ilmastoon. (Banks 2009)

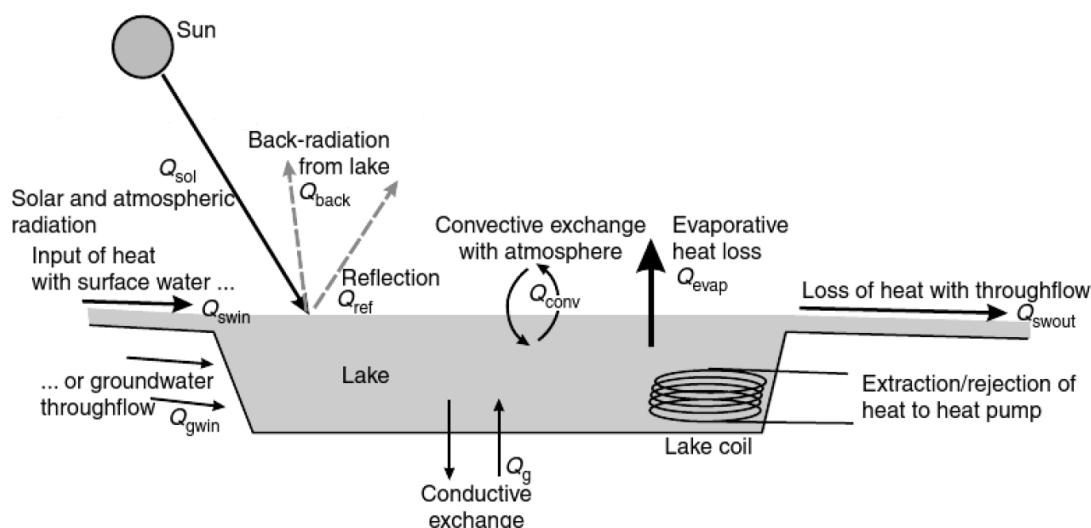
### **3.2.1 Järven energiatasapaino**

Matala järvi (syvyys alle 4 m) lämpiää tasaisesti pinnasta pohjaan. Auringon säteily läpäisee veden pohjaan asti ja luonnollinen konvektio sekoittaa järven veden nostamalla lämmintä vettä pintaan. Joten matalan järven pohja- ja pintalämpötilalla ovat lähes samat. (Banks 2009)

Syvässä järvessä voi muodostua eri lämpötilakerroksia. Vesi on tiheintä lämpötilassa 4 °C ja vajoaa syvän järven pohjalle. Pohjalla oleva vesi ei vaihdu usein pintaveden kanssa, koska Aurinko ei yllä lämmittämään sitä. Pinnan ja pohjan vesi voivat sekoittua keväällä ja syksyllä. Keväällä kylmä pintavesi (alle 4 °C) lämpiää ja sen lämpötila saavuttaa pohjan veden lämpötilan (4 °C). Syksyllä lämmin pintavesi (yli 4 °C) kylmenee ja sen lämpötila saavuttaa pohjan veden lämpötilan (4 °C). Pinnan ja pohjan veden lämpötilojen ollessa samat, voivat eri kerrosten vedet sekoittua konvektiolla. Syvän järven pohjalämpötila on vuodenajasta riippumatta noin 4 °C, joka on sopiva lämpötila lämpöpumpun lämmönkeruupiirille. (Banks 2009)

Auringon säteilyenergia varastoituu järveen (kuva 3.15). Järvi sitoo lämpöenergiaa myös siihen laskevista joista, ojista ja pohjavedestä, sekä johtumalla maaperästä ja konvektiolla ilmasta. Osa Auringon säteilystä heijastuu takaisin ilmakehään ja avaruuteen. Järvi menettää lämpöenergiaa siitä lähtevien jokien, ojien ja pohjavesivirtausten mukana, sekä osa lämpöenergiasta sitoutuu johtumalla maaperään ja konvektiolla ilmakehään. Myös veden haihtuminen järven pinnalla kuluttaa järveen sitoutunutta lämpöenergiaa. Järven lämpötasapainon tulisi olla tasapainossa. Lämmön ottaminen järvestä (lämmityskäyttö) tai lämmön tuominen (jäähdytyskäyttö) järveen voi muuttaa järviveden fysikaalisia ominaisuuksia ja järven ekosysteemiä. Myös pohjan veden vähäinen happipitoisuus ja suuri rikkipitoisuus voivat olla vahingollisia pintaveden ekosysteemille. (Banks 2009)

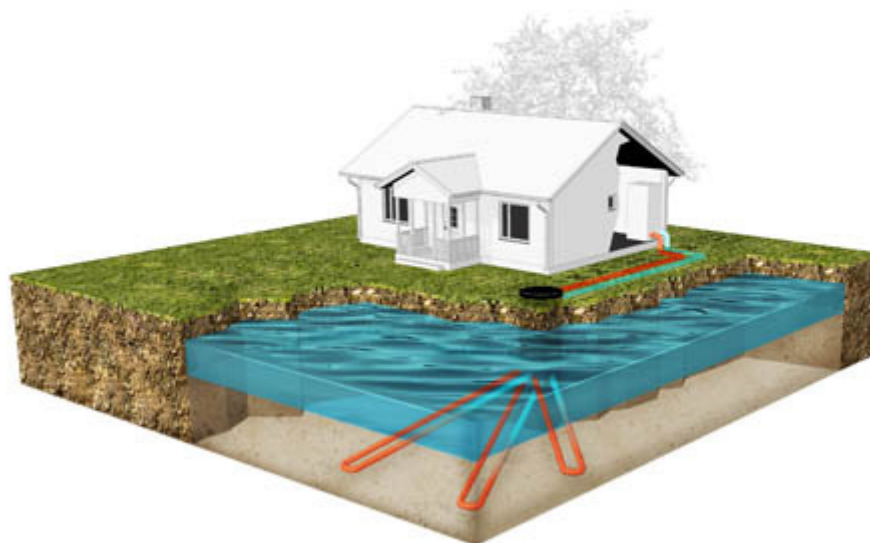




**Kuva 3.15.** Järven energiatasapaino. (Banks 2009)

### 3.3 Sedimenttilämpö

Sedimentti on vesistön (järvi, joki, meri) alla sijaitseva maa-ainekerros, mutakerros tai pohja. Sedimentin termodynaamiset ominaisuudet eivät ole yhtä hyvät kuin kalliolla, esimerkiksi kallion lämmönjohtavuus on parempi kuin sedimentin. Sedimenttilämpö on aurinkoenergiaa, olettaen, että vesistö on suhteellisen matala (kuva 3.16). Auringon säteilyenergian vaikutus vesistön lämpiämiseen ja lämmön varastoitumiseen on suuri, joten vuodenaajan vaihtelulla ja säällä on vaikutus sedimentin lämpötilaan. Sedimentissä on suurempi lämpötila kuin järven pohjassa ja sedimentin lämpötila nousee voimakkaasti keväällä jäiden lähdettyä. Jääkerroksen oletetaan toimivan eristävänä kerroksena pinnalla ja siten hidastavan sedimentin jäähtymistä talvella. Jään eristävästä vaikutuksesta ei ole tutkimustuloksia. (Geoenergia 2013b)

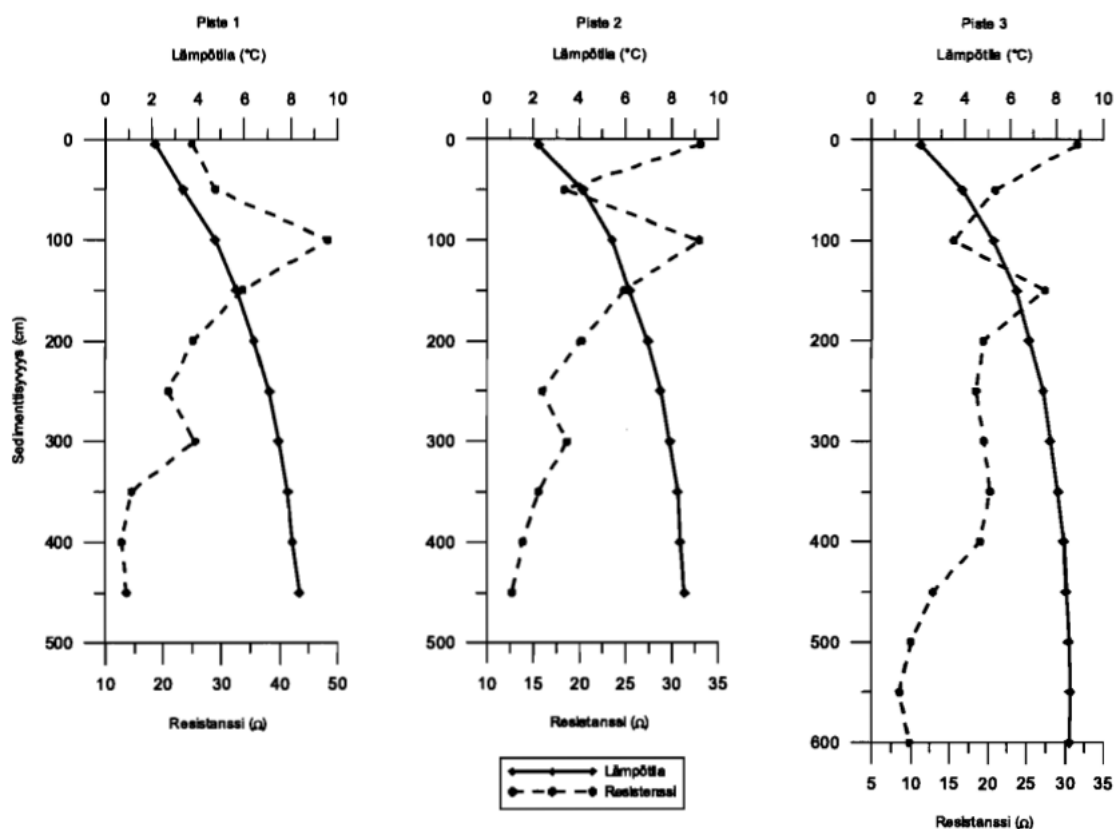


**Kuva 3.16.** Sedimenttilämpö, lämmönkeräimet järven pohjan alla, sedimentissä. (Geoenergia 2013)

### 3.3.1 Vaasan Suvilahden sedimentin lämpötilamittaukset

Suomen ensimmäinen sedimenttilämpöhanke käynnistyi Vaasassa 2008. Vaasan Suvilahden rakennettiin sedimenttilämpöä hyödyntävä matalaenergiaverkosto. Verkostoon liitettiin 43 pientaloa ja sen keruuputkiston pituus on 7800 metriä. (Geoenergia 2013b)

Sedimenttilämpötiloja mitattiin kolmesta erillisestä pisteestä Vaasan Suvilahdessa 11.4.2006. Jään paksuus alueella oli noin 60-70 senttimetriä ja veden syvyys oli mittauspisteissä 80-100 senttimetriä. Suvilahden pohjan lämpötilan ollessa noin 2 °C saavutetaan 3-4 metrin sedimenttisyvyydessä 8 °C lämpötila. Sedimentin lämpötila vakiintuu reiluun 8 celsiusasteeseen noin neljän metrin sedimenttisyvyyden jälkeen (kuva 3.17). (Valpola 2006)

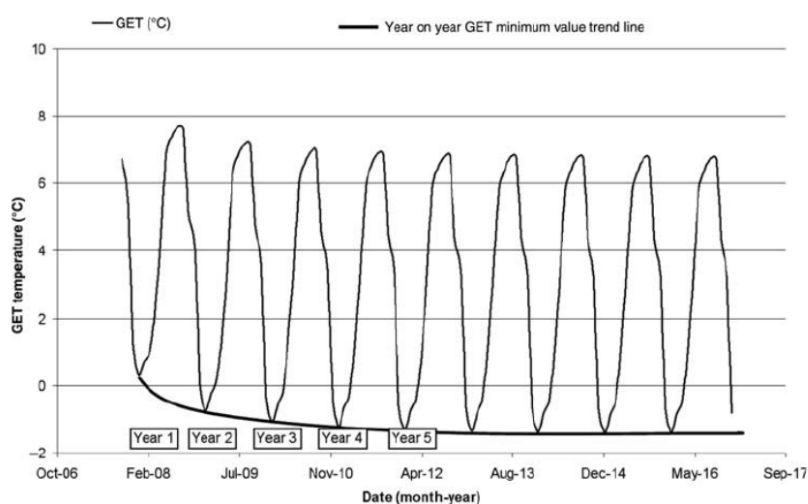


*Kuva 3.17. Sedimentin lämpötilamittaukset Vaasan suvilahden edustalla. (Valpola 2006)*

### 3.4 Lämpökaivokenttä, latenttilämpö ja toipuminen

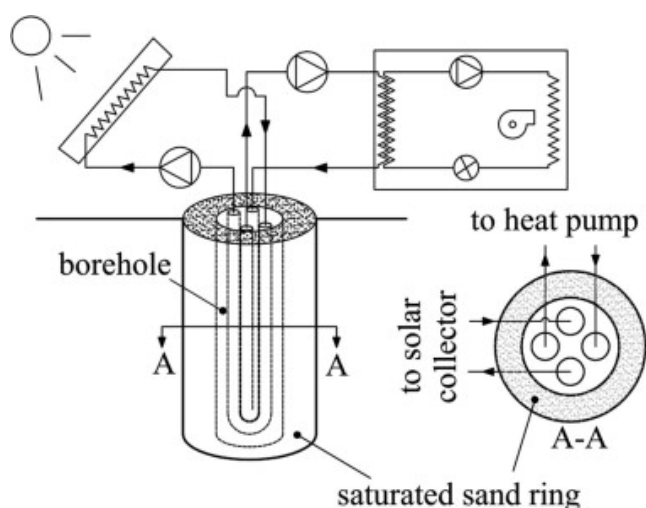
Useampi lämpökaivo muodostaa lämpökaivokentän. Lämpökaivokenttiä on erimuotoisia (esim. kuva 3.20). Kaivokentän toiminnan arviointi on vaikeampaa kuin yksittäisen kaivon, koska vierekkäin olevat kaivot vaikuttavat toistensa lämmönsiirtoon. Ympäristöoppaassa (Juvonen & Lapinlampi 2013) kaivojen väliseksi etäisyydeksi suositellaan 15 metriä. Lämpökaivot ovat yleensä jonkin verran vinoja kaivon alaosassa syvyytensä vuoksi. (Acuña 2010)

Lämpökaivokentän oikea mitoittaminen on tärkeää pitkällä aikavälillä. Väärä kaivojen välinen etäisyys tai liian suuri lämmönotto kallioperästä, voivat estää lämpöpumpun toiminnan. Kaivokentästä ei saisi ottaa energiaa enempää, kuin kenttä tuottaa pitkällä aikavälillä. Kaivokentän pitäisi siis saavuttaa tasapainotila eli lämmönsiirtoaineen vuotuinen keskilämpötila vakiintuisi. Kuvassa 3.18 on simuloitu erään lämpökaivon lämmönsiirtoaineen keskilämpötilaa. Keskilämpötila alkaa tasaantua noin viidennen käyttövuoden jälkeen. Kuvassa 3.18 sahalaitainen käyrä on lämmönsiirtonesteen päivittäinen keskilämpötila. Keskilämpötilan minimi vakiintuu noin  $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja maksimi vakiintuu noin  $6,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lämpökaivo saavuttaa tasapainotilan todellisuudessa muutamassa vuosikymmenessä. (Acuña 2010; Wood et al. 2010)

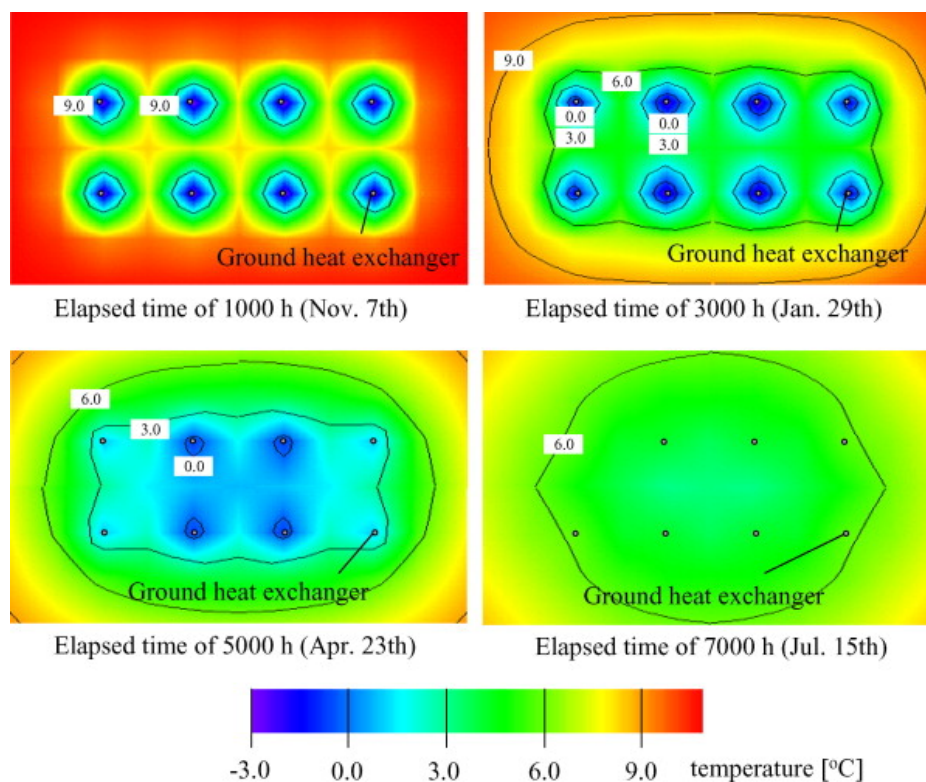


**Kuva 3.18.** Lämmönkeruupiirin lämmönsiirtoaineen keskilämpötila vuosittain. (Wood et al. 2010)

Lämpökaivokenttään voi syöttää lämpöä esimerkiksi jäähdyttämällä rakennusta tai siirtämällä Auringon lämpöenergiaa kaivoon aurinkokeräimellä (kuva 3.19). Kentän voi myös antaa toipua pysäyttämällä lämpöpumppu, näin kaivokenttä lämpiää eli kaivokenttä palautuu. Kuvassa 3.20 on esitetty tuloksia kahdeksan lämpökaivon toiminnan simuloinnista, kun maasta otetaan lämpöä. Kaivojen välinen etäisyys on kaksi metriä. Kuvasta 3.20 havaitaan, kuinka kaivokentän lämpötila muuttuu. Lämmönotto kaivokentästä aloitetaan syksyllä. Lämmönotto on suurimmillaan 3000 tunnin jälkeen tammikuun lopussa. Kentän matalin lämpötila saavutetaan 5000 tunnin jälkeen keväällä. Kentän lämpötila on noussut ja tasaantunut 7000 tunnin jälkeen kesällä. Kenttä on aloittanut palautumisen kesällä, koska lämmönotto maasta on lopetettu kesäkuussa. (Katsura et al. 2008)

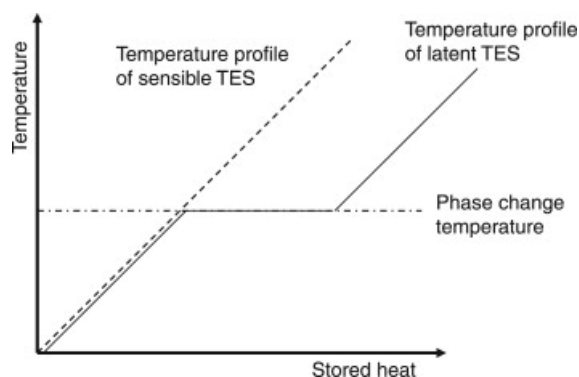


**Kuva 3.19.** Lämpökaivon lämmittäminen aurinkokeräimellä. (Eslami-Nejad 2012)



**Kuva 3.20.** Kahdeksan lämpökaivon lämpötilaprofiili tietyn ajan kuluttua. (Katsura et al. 2008)

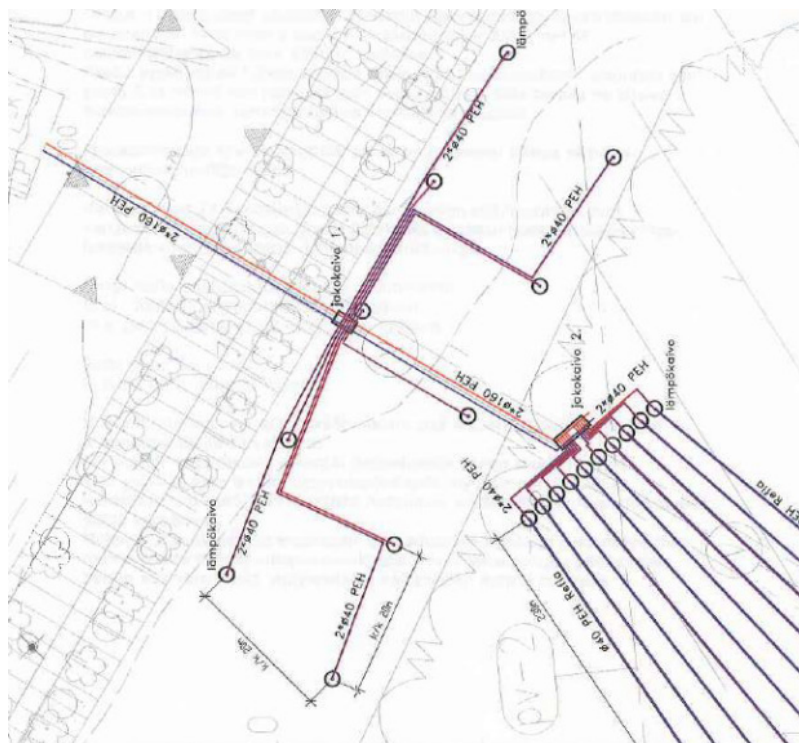
Vesi voi jäätyä maa- ja kallioperässä, jos lämpöä otetaan tarpeeksi. Vesi luovuttaa jäätymisessä syntyvän latenttilämmön. Jäätynyt lämpökenttä ei ole suotavaa, koska lämmönsiirtoaineen lämpötila laskee ja vesitäytteinen pystykaivokin jäätyy. Jää voi myös vahingoittaa lämmönsiirtoputkea lämpökaivossa. Jäätynyt kaivokenttä tarvitsee sulamiseen latenttilämmön (kuva 3.21), joten kestää kauemmin ennen kuin lämpötila alkaa nousta. (Acuña 2010)



**Kuva 3.21.** Latenttilämpö. (Cabeza 2012)

### 3.5 Pitkäniemen lämpöpumppulaitos

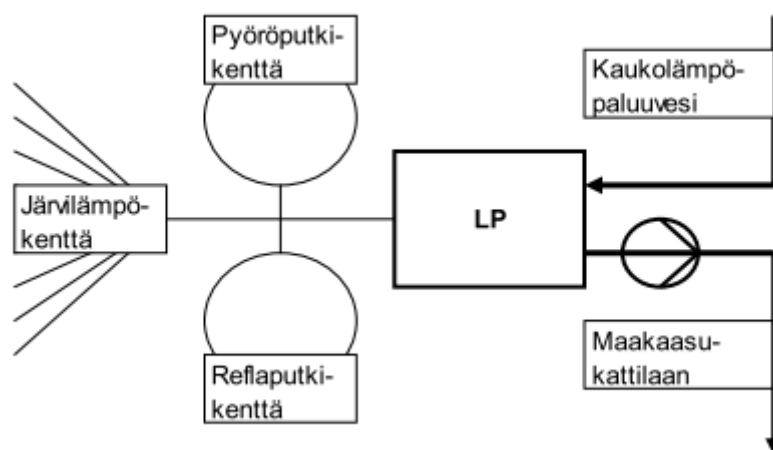
Lämpöpumppulaitoksen rakentaminen aloitettiin Nokian Pitkäniemessä kesällä 2010 ja ensimmäinen koekäyttö suoritettiin syyskuussa 2010. Tutkimuskäyttö päättyi vuoden 2011 lopussa, mutta mittausdatan kerääminen on jatkunut tämän jälkeen. Lämpöpumppulaitos on rakennettu maakaasuvoimalaitoksen viereen. Lämpöpumppulaitoksen tuottama lämpö johdetaan kaukolämmön paluuveteen, joka lämpiää maakaasuvoimalaitoksessa. Lämpöpumppulaitos kerää lämpöenergiaa kymmenestä pystysuorasta lämpökaivosta ja kahdeksasta lähes vaakasuorasta sedimenttilämpökeräimestä (kuva 3.22). Lämpökaivot ja sedimenttikeräimet on kytketty rinnan ja ne on liitetty kahteen jakokaivoon. (Verte Oy 2012)



**Kuva 3.22.** Lämpökaivojen (10 kpl) ja sedimenttilämpökeräinten (8 kpl, viuhkamuoto) sijainti Pitkäniemessä. (Verte Oy/Planoma 2011)

Maakaasuvoimalaitoksessa on kaksi turbiinia yhteisteholtaan noin 6 MW. Lämpöpumpun lämpöenergian maksimiteho on noin 250 kW. Keväällä 2013 lämpöpumppu tuotti lämpöä 134 kW:n teholla. Lämpöpumppu pystyy nostamaan lämmönsiirtoaineen lämpötilan maksimissaan 72 °C:een. Lämpökaivot yltävät syvään kallioperään. Sedimenttilämpökeräimet hyödyntävät järveen ja järven pohjaan sitoutunutta auringoenergiaa. (Verte Oy 2012)

Runkolinja koostuu kahdesta kerääjäkaivosta ja kahdesta meno- ja paluuputkesta (hal-kaisijaltaan 160 mm). Lämmönkeruupiirin runkolinjan meno- ja paluuputki kulkevat ensimmäisen kerääjäkaivon läpi toiseen kerääjäkaivoon. Ensimmäinen kerääjäkaivo liittää pystysuoran lämpökaivokentän runkolinjaan. Toinen kerääjäkaivo liittää sedimenttilämpökentän runkolinjaan. Lämpökaivot ja sedimenttilämpökeräimet on kytketty rinnan kerääjäkaivoihin. Ensimmäinen kerääjäkaivo on 50 metrin etäisyydellä lämpöpumpukeskuksesta ja toinen kerääjäkaivo on 30 metrin etäisyydellä ensimmäisestä kerääjäkaivosta (kuvat 3.22 ja 3.23). (Verte Oy 2012)



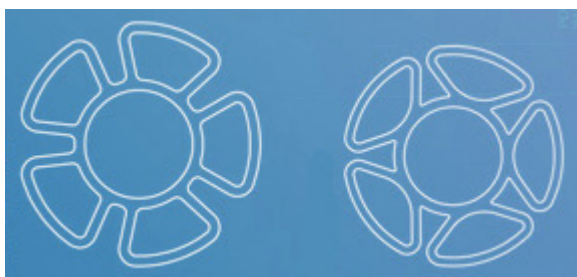
**Kuva 3.23.** Pitkäniemen lämpöpumppulaitos. (Verte Oy/PlaNoma 2011)

Ongelmaksi on osoittautunut kaukolämmön paluulinjan korkea lämpötila (yli 70 °C). Kaukolämmön paluulinjan korkea lämpötila estää lämmönsiirron lämpöpumpusta, koska lämpöpumppu voi nostaa liuoksen lämpötilan maksimissaan 72 °C. Tämän seurauksena lämpö ei siirry kaukolämmön paluulinjaan ja lämpöpumppulaitos pysähtyy. Lämpöpumpun kannalta on parempi mahdollisimman matala kaukolämmön paluulämpötila, koska näin lämpö siirtyy tehokkaammin paluulinjaan. Ongelma yritettiin ratkaista kaukolämpöverkon rakenteellisilla muutoksilla ja lämpötilojen ja virtausmäärien muutoksilla. (Verte Oy 2012)

### 3.5.1 Lämpökaivot kallioperässä

Kymmenen lämpökaivoa on porattu pystysuorasti 230 metrin syvyyteen. Veden täyttämä osuus, aktiivisuus on 225 metriä. Pystykaivokenttä koostuu kymmenestä pystykaivosta. Viidessä pystykaivossa on lämmönsiirtoputkena tavallinen U-putki ja viidessä on koaksiaaliputki. Koaksiaaliputket ovat Mateve Oy:n REFLA-koaksiaaliputkia. Pitkäniemen REFLA-putket ovat uudentyypisiä (kuva 3.24 oikea ja 3.10c), esimerkiksi Vaasan Suvilahdessa on vanhantyyppisiä REFLA-putkia (kuva 3.24 vasen). Pystykaivot on liitetty kerääjäkaivoon yksi. (Verte Oy 2012)

U-putken halkaisija on 40 mm, seinämäpaksuus on 2,3 mm, lämmönjohtavuus on 0,42 W/mK ja materiaali on polyeteeni. Pitkäniemessä käytettävän REFLA-putki on halkaisijaltaan 82 mm (kuva 3.24 oikea). REFLA-putkella on suurempi lämmönsiirto-pinta-ala kuin U-putkella. (Verte Oy 2012)



*Kuva 3.24. REFLA-putken vanha (vasen) ja uusi (oikea) poikkileikkaus. (Mateve 2013)*

### 3.5.2 Sedimenttilämpökeräimet

Vaakasuorat sedimenttilämpökeräimet (8 kpl) on sijoitettu viuhkan muotoon järven pohjan alle Markluhdanlahden sedimenttiin. Yhden sedimenttikeräimen pituus on 300 metriä. Ne sijaitsevat viuhkan muodossa noin neljä metriä järven pohjan alapuolella (kuva 3.22). Kaikki sedimenttikeräimet ovat REFLA-koaksiaaliputkeräimiä (kuva 3.24 oikea). Vaakatasoon asennetut REFLA-putket keräävät järveen ja pohjasedimenttiin sitoutunutta auringon säteilyenergiaa. Sedimenttikeräimet on liitetty kerääjäkaivoon kaksi. REFLA-putki on suorassa kosketuksessa sedimenttiin, siis putken ja sedimentin välissä ei ole lämmönsiirtoa häiritsevää vettä, kuten kallioperään poratussa lämpökaivos- sa. REFLA-putket ovat suojassa järven pohjan alla sedimentissä. (Verte Oy 2012)

### 3.5.3 Laitteiston toiminnan tarkastelu

Pumppuaseman tiedonkeruulaite tallentaa hetkellisen ja kumulatiivisen lämpötehon- tuoton ja sähkönkulutuksen, lämmönkeruupiirin meno- ja paluulämpötilat, kaukoläm- pöverkon meno- ja paluulämpötilat, lämmönsiirtoaineen virtausnopeuden kaukolämpö- verkkoon, kaukolämpöverkkoon luovutetun lämpöenergian tehon ja lämpökertoimen (COP). Mittaustiedot tallennetaan 5-15 minuutin välein. Lisäksi kaivo- ja sedimentti-



kentän lämpötilojen seurantaan on suunniteltu antureiden sijoittamista keskelle kenttiä, sedimenttiin keskimmäisten REFLA-putkien (4. ja 5.) väliin sekä kaivokenttään 100 metrin syvyyteen keskelle kenttää. (Verte Oy 2012)

Kahteen pystykaivoon (U- ja REFLA-putki) ja neljään sedimenttiputkeen on asennettu valokuitukaapeli lämpötilan mittaamista varten. Valokuitukaapeli on kiinnitetty putken ulkopuolelle (kuva 3.25). Mittauskaapelit sijaitsevat sedimenttikeräimissä numero 1, 2, 3 ja 8. Numerot ovat järjestyksessä reunasta reunaan, siis 1 ja 8 ovat reunimmaiseta putket. Valokuitukaapelimittausta ei voida tehdä jatkuvasti, vaan se voidaan suorittaa hetkellisesti mittauslaitteistolla. REFLA-putki numero 8 on hajonnut, joten se on poistettu käytöstä ja sen mittauskaapeli mittaa vain stationääritilassa olevan ympäristön lämpötilaa. Tosin muut REFLA-putket vaikuttavat lämmönsiirrollaan myös REFLA-putken nro. 8 ympäristön lämpötilaan. (Verte Oy 2012)

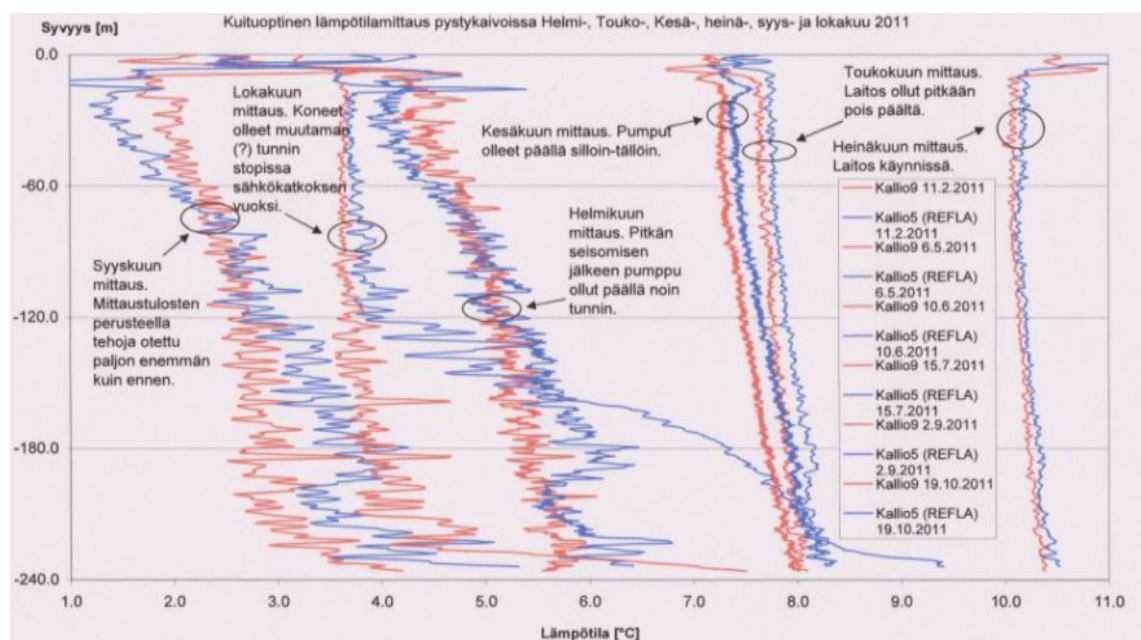


*Kuva 3.25. Valokuitukaapeli (sininen) asennetaan lämpökaivoon. (Verte Oy 2012)*

### **3.5.4 Lämpötilamittaukset**

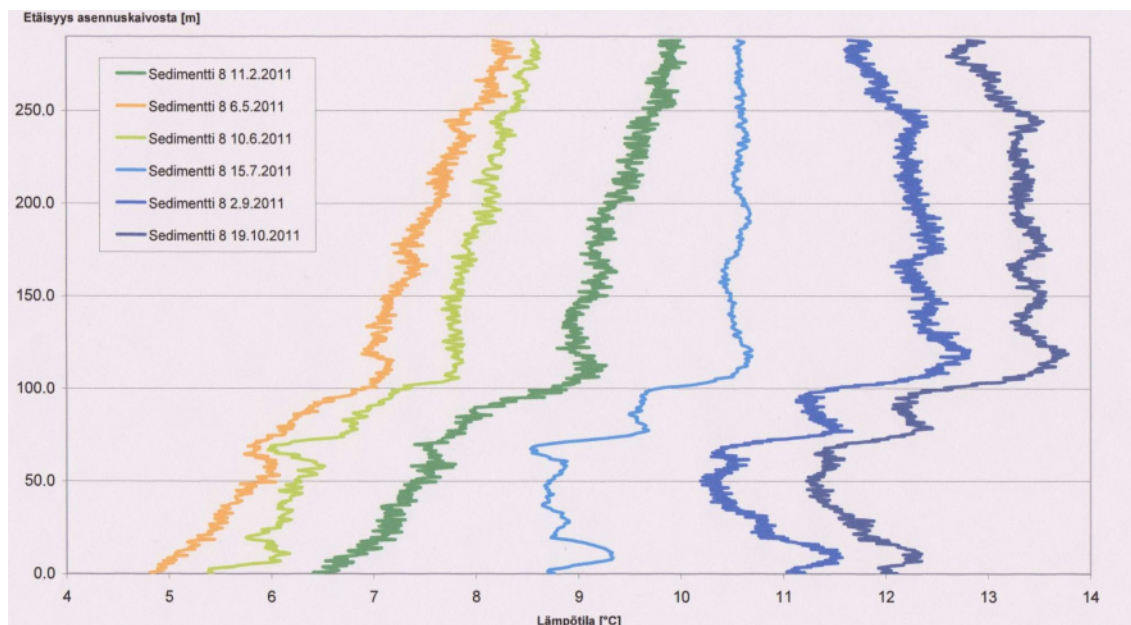
Mitattavien lämpökaivojen (yksi U- ja REFLA-putki) pohjalämpötila on noin 4,0-10,5 °C vuonna 2011 (kuva 3.26). Pohjan lämpötilavaihtelu johtuu todennäköisesti lämpöpumppulaitoksen ensimmäisen käyttövuoden ongelmista ja käyttökatkoksista. Lämpötila tasaantuisi pidemmän käyttöajan jälkeen. Kuvasta havaitaan, että lämpötila U- ja REFLA putken läheisyydessä ei eroa merkittävästi, REFLA-putken ulkopuolella on hieman korkeampi lämpötila. Kevään ja kesän jälkeen kaivokentästä on otettu tehokkaasti lämpöenergiaa, koska kaivojen lämpötila on noin 4-6 °C alempi syksyllä ja talvelle. (Verte Oy 2012)





**Kuva 3.26.** U- ja REFLA-putken kuituoptyiset lämpötilamittaukset touko-, kesä-, helmi-, heinä-, syys- ja lokakuussa vuonna 2011. (Verte Oy 2012)

Sedimentin lämpötilaa voidaan havainnollistaa sedimenttiputki nro 8:lla. Tämä on poistettu käytöstä, joten lämmönsiirtoaine ei kulje putkessa. Putkella ja ympäristöllä on siis sama lämpötila. Kuvassa 3.27 on kuuden eri kuukauden sedimenttilämpötilat sedimenttiputken nro 8 matkalta. Sedimentti alkaa lämmitä keväällä ja tämä jatkuu syksyyn asti. Kesän auringon säteilyenergia on kerääntynyt sedimenttiin lämmöksi ja sedimentin lämpötila on korkeimmillaan lokakuussa, minkä jälkeen lämpötila alkaa laskea. Sedimentti saavuttaa mitatuista kuukausista alimman lämpötilansa keväällä, toukokuussa. Sen jälkeen lämpötila alkaa nousta lisääntyneen aurinkoenergian vuoksi. Lisäksi kuvasta 3.27 havaitaan lämpötilan voimakas muutos sadan metrin kohdalla. Lämpötilan muutos saattaa johtua siitä, että viereisen sedimenttiputken nro. 7 lämmönsiirto ei enää vaikuta voimakkaasti sedimenttiputken nro. 8 ympäristössä, koska sedimenttiputkien välinen etäisyys kasvaa putken piteuden kasvaessa viuhkamaisen muodon vuoksi. (Verte Oy 2012)



**Kuva 3.27.** Käytöstä poistetun sedimenttiputken nro. 8 kuituoptiset lämpötilamittaukset touko-, kesä-, helmi- heinä-, syys- ja lokakuussa vuonna 2011. (Verte Oy 2012)

Lämpöpumppulaitoksen lämpötilamittaukset suoritettiin ensimmäisenä kokonaisena toimintavuotena 2011. Ongelmien ja lyhyen toiminta-ajan vuoksi lämpötiloissa voi esiintyä suurta vaihtelua. Luotettavien lämpötilatietojen ja muiden mittaustietojen saamiseksi lämpöpumppulaitosta tarvitsee tutkia useamman vuoden. (Verte Oy 2012)

Tämän diplomityön alkuperäisenä tavoitteena oli tutkia kaikki mahdollinen mittausdata, esimerkiksi lämmönsiirtoaineiden meno- ja paluulämpötilat sekä tilavuusvirrat. Saata- vaa lämpötehoa maapiiristä, tehoa kaukolämpöverkon paluuveteen ja lämpökerrointa (COP) oli tarkoitus arvioida. Niitä ei kuitenkaan voinut arvioida, koska tarvittava mittausdata ei ollut saatavilla.

## 4 LÄMMÖNSIIRTO LÄMPÖKAIVOSSA

Lämpöenergia siirtyy johtumalla ja konvektiolla lämmönsiirtoaineeseen maa- ja kallioperästä. Lämpöenergia siirtyy johtumalla ensin maa- tai kallioperästä porakaivon täyteaineeseen. Täyteaineesta lämpöenergia siirtyy johtumalla lämmönsiirtoputkeen. Lämpöenergia johtuu putken läpi ja siirtyy konvektiolla putken sisäpinnalta putkessa virtaavaan lämmönsiirtoaineeseen. Täyteaineen ollessa pohjavettä, kuten yleensä Pohjoismaissa, luonnollisella konvektiolla voi olla suuri vaikutus lämmönsiirtoon kallioperästä lämmönsiirtoputkelle. Pohjaveden puolella, kallioperän ja lämmönsiirtoputken välissä, vaikuttaa luonnollinen konvektio. Täyteaineen ollessa kiinteää materiaalia luonnollista konvektiota ei esiinny ja lämpö siirtyy vain johtumalla. (Acuña 2010)

Lämmönsiirtoon vaikuttavat eri tekijät lämpökaivossa ja sitä ympäröivässä maa- ja kallioperässä. Näitä tekijöitä ovat alkuperäiset ja rajoittavat olosuhteet; materiaalien termiset, fysikaaliset ja geometriset ominaisuudet; lämpövastus lämpökaivon ja maa- tai kallioperän välillä sekä lämpövastus lämpökaivon eri osien välillä. Alkuperäiset ja rajoittavat olosuhteet käsittävät pitkäaikaisen koskemattoman maa- tai kallioperän lämpötilan, ilman lämpötilan lyhytaikaisen vaihtelun ja lämpöpumpusta lämmönkeruupiirin putkeen saapuvan lämmönsiirtoaineen hetkellisen lämpötilan. Lämmönsiirtoon vaikuttavat termiset ja fysikaaliset ominaisuudet ovat lämmönjohtavuus, lämpökapasiteetti, lämmönsiirtoaineen virtausnopeus ja lämpökaivon geometriset muodot. (Al-Khoury 2012)

Lämpökaivon lämpövastuksen määrittäminen on tärkeää erityisesti lämpökaivon suunnittelussa. Lämpökaivon lämpövastuksen määrittämiseen on olemassa useita eri menetelmiä. Menetelmät voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan: kokeellinen, analyttinen tai numeerinen, ja lämpöpiiri. (Al-Khoury 2012)

### 4.1 Lämmönsiirtoa hallitsevat yhtälöt lämpökaivossa

Seuraavat yhtälöt hallitsevat lämmönsiirtoa lämmönsiirtoputken ja täyteaineen välillä U-putki- (4.1)-(4.3) ja tavallisessa koaksiaaliputkilämpökaivossa (4.4)-(4.6), jossa lämmönsiirtoaineen sisäänmenokanava on putken keskellä. (Al-Khoury 2012)

U- putken sisäänmenohaaralle:

$$\rho_{lsa} c_{p,lsa} \frac{\partial T_{lsa,sis}}{\partial t} - k_{lsa} \frac{\partial^2 T_{lsa,sis}}{\partial z^2} + \rho_{lsa} c_{p,lsa} u_{lsa} \frac{\partial T_{lsa,sis}}{\partial z} = U_{sis-t} (T_{lsa,sis} - T_t) \quad (4.1)$$

U-putken ulostulohaaralle:

$$\rho_{lsa} c_{p,lsa} \frac{\partial T_{lsa,u}}{\partial t} - k_{lsa} \frac{\partial^2 T_{lsa,u}}{\partial z^2} - \rho_{lsa} c_{p,lsa} u_{lsa} \frac{\partial T_{lsa,u}}{\partial z} = U_{u-t} (T_{lsa,u} - T_t) \quad (4.2)$$

Täyteaineelle, U-putkilämpökaivossa:

$$\rho_t c_{p,t} \frac{\partial T_t}{\partial t} - k_t \frac{\partial^2 T_t}{\partial z^2} = U_{sis-t} (T_t - T_{lsa, sis}) + U_{u-t} (T_t - T_{lsa,u}) \quad (4.3)$$

Koaksiaaliputken sisäänmenokanavalle:

$$\rho_{lsa} c_{p,lsa} \frac{\partial T_{lsa, sis}}{\partial t} - k_{lsa} \frac{\partial^2 T_{lsa, sis}}{\partial z^2} + \rho_{lsa} c_{p,lsa} u_{lsa} \frac{\partial T_{lsa, sis}}{\partial z} = U_{sis-u} (T_{lsa, sis} - T_{lsa,u}) \quad (4.4)$$

Koaksiaaliputken ulostulokanavalle:

$$\rho_{lsa} c_{lsa} \frac{\partial T_{lsa,u}}{\partial t} - k_{lsa} \frac{\partial^2 T_{lsa,u}}{\partial z^2} - \rho_{lsa} c_{p,lsa} u_{lsa} \frac{\partial T_{lsa,u}}{\partial z} = U_{sis-u} (T_{lsa,u} - T_{lsa, sis}) + U_{u-t} (T_{lsa,u} - T_t) \quad (4.5)$$

Täyteaineelle, koaksiaaliputkivaivossa:

$$\rho_t c_{p,t} \frac{\partial T_t}{\partial t} - k_t \frac{\partial^2 T_t}{\partial z^2} = U_{u-t} (T_t - T_{lsa,u}) \quad (4.6)$$

Yhtälöissä (4.1)-(4.6) tiheys on  $\rho$ , ominaislämpökapasiteetti  $c_p$ , lämpötila  $T$ , aika  $t$ , lämmönjohtavuus  $k$ , nopeus  $u$ , syvyys  $z$  ja kokonaislämmönsiirtokerroin  $U$ . Alaindeksit ovat lämmönsiirtoaine  $lsa$ , sisäänmeno  $sis$ , ulostulo  $u$  ja täyteaine  $t$ .

## 4.2 Lämmönsiirto yhden porakaivon ympäristössä

Lämmönsiirtoa voidaan mallintaa lämpökaivoissa analyttisesti, numeerisesti ja semi-analyttisesti. Tässä kappaleessa esitellään kolme erilaista analyttistä mallia lämmönsiirrolle yhden lämpökaivon ympäristössä. Lämmönsiirtoa lämpökaivon sisällä ei tutkita tässä kappaleessa. Analyttisten mallien etuina ovat yksinkertaisuus ja ne tuottavat ratkaisuja nopeasti. Haittana on, että analyttiset mallit ottavat huomioon vain lämmönjohtumisen, mutta eivät konvektion vaikutusta. Numeeriset menetelmät ovat tarpeellisia esimerkiksi pohjavesivirtauksen yhteydessä. Kaikissa malleissa oletetaan lämpövirta  $q'$  vakioksi ja lämpö siirtyy vain lämpökaivonkaivon säteen suuntaisesti (horisontaalisesti), lämpö ei siis johdu pituussuunnassa (vertikaalisesti). Lämpötila  $T_{y0}$  on vakio tarpeeksi etäällä lämpökaivosta.  $T_{y0}$  on maanpinnan häiritsemätön alkulämpötila. (Philippe et al. 2009)

Mallit ovat ääretön viivalähdemalli (Infinite line source model, ILS), äärellinen viivalähdemalli (Finite line source model, FLS), ääretön sylinterilähdemalli (Infinite cylindrical source model, ICS). Philippe et al. (2009) suosittelee ILS mallia, jos porakaivon käyttöaika on 34 tunnista 1,6 vuoteen. Alle 34 tunnin käyttöajalle suositellaan ICS mallia ja yli 1,6 vuoden käyttöajalle FLS mallia.

#### 4.2.1 Ääretön viivalähdemalli (Infinite line source model, ILS)

Lämpövirta  $q'$  vaikuttaa porakaivon keskellä, ei porakaivon seinämällä. Porakaivoa mallinnetaan äärettömän pitkällä viivalla. Lämmönsiirtoa hallitsee seuraava osittaisdifferentiaaliyhtälö reunaehtoineen (sylinterikoordinaatistossa):

$$\alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.7)$$

$$T(r \rightarrow \infty, t) = T_{y0} \quad (4.8)$$

$$T(r, t = 0) = T_{y0} \quad (4.9)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \cdot 2\pi r \Big|_{r \rightarrow 0} = q' \quad (4.10)$$

Ratkaisuksi saadaan (Carslaw ja Jaeger 1947)

$$T_{y0} - T \left( \frac{r}{2\sqrt{\alpha t}} \right) = \frac{q'}{2\pi k} \int_{r/2\sqrt{\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \quad (4.11)$$

jossa maanpinnan häiritsemätön lämpötila on  $T_{y0}$ , säteen suuntainen koordinaatti  $r$ , termien diffusiviteetti  $\alpha$ , aika  $t$  ja kallioperän (maaperän) lämmönjohtavuus  $k$ . Yhtälö voidaan ratkaista numeerisesti. Yhtälöä ei voi käyttää pitkällä aikavälillä, koska porakaivon pitkittäissuuntainen lämmönjohtuminen alkaa vaikuttaa. (Philippe et al. 2009)

#### 4.2.2 Äärellinen viivalähdemalli (Finite line source model, FLS)

FLS-mallissa viiva on rajattu, toisin kuin ILS mallissa. Ratkaisuksi on saatu (Carslaw ja Jaeger 1947)

$$T_{y0} - T(r, t) = \frac{q_0}{4\pi k} \operatorname{erfc} \left( \frac{r}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (4.12)$$

jossa  $q_0$  on pistemäisen lämpölähteen teho. Pisteet laitetaan peräkkäin sarjaan ja saadaan (Eskilson 1987)

$$T_{y0} - T(r, z, t) = \frac{q'}{4\pi k} \int_0^H \frac{\operatorname{erfc}(\sqrt{r^2+(z-h)^2}/2\sqrt{\alpha t})}{\sqrt{r^2+(z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc}(\sqrt{r^2+(r+h)^2}/2\sqrt{\alpha t})}{\sqrt{r^2+(z+h)^2}} dh \quad (4.13)$$

Yhtälö voidaan ratkaista numeerisesti. Ajan  $t$  lähestyessä ääretöntä saadaan (Philippe et al. 2009)

$$T_{y0} - T(r, z) = \frac{q'}{4\pi k} \int_0^H \left[ \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \right] dh \quad (4.14)$$

Integroinnin jälkeen saadaan (Philippe et al. 2009)

$$T_{y0} - T(r, z) = \frac{q'}{4\pi k} \ln \left( \frac{\sqrt{r^2 + (z-H)^2} - (z-H)}{\sqrt{r^2 + (z+H)^2} + (z+H)} \cdot \frac{\sqrt{r^2 + z^2 + z}}{\sqrt{r^2 + z^2 - z}} \right) \quad (4.15)$$

Yhtälöllä saadaan ratkaistua vakiintunut (steady-state) lämpötila kallioperässä yhden porakaivon läheisyydessä. Joten kaava soveltuu pitkäaikaisen (yli 1,6 vuotta) lämmönsiirron arvioimiseen. Jos porakaivoja on useampi lähekkäin, niin kaavaa ei voi käyttää, koska kaivot vaikuttavat vierekkäisten kaivojen toimintaan.  $T_{y0}$  on usein korvattu vuoden keskimääräisellä ilman lämpötilalla. (Philippe et al. 2009)

#### 4.2.3 Ääretön sylinterilähdemalli (Infinite cylindrical source model, ICS)

ICS-malli muistuttaa ILS-mallia, mutta ICS-mallissa on ääretön sylinteri äärettömän viivan sijaan. Sylinterin reunalla on vakiolämpövirta  $q'$ . Lämmönsiirtoa hallitsee seuraava osittaisdifferentiaaliyhtälö reunaehtoineen (sylinterikoordinaatistossa):

$$\alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad r > r_{lk} \quad (4.16)$$

$$T(r \rightarrow \infty, t) = T_{y0} \quad (4.17)$$

$$T(r, t = 0) = T_{y0} \quad (4.18)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \cdot 2\pi r \Big|_{r=r_{lk}} = q' \quad (4.19)$$

ICS-mallille on saatu ratkaisuksi (Ingersoll et al. 1954)

$$T_{y0} - T(Fo, R) = \frac{q'}{k\pi^2} \int_0^\infty \frac{e^{-\beta^2 Fo - 1}}{J_1^2(\beta) - Y_1^2(\beta)} \cdot [J_0(R\beta)Y_1(\beta) - J_1(\beta)Y_0(R\beta)] \frac{d\beta}{\beta^2} \quad (4.20)$$

jossa  $J_0$ ,  $J_1$ ,  $Y_0$  ja  $Y_1$  ovat Besselin funktioita. Edellä mainittu yhtälö on vaikeasti ratkaistavissa. Seuraavassa ratkaisu (Baudoin 1988)

$$T_{y0} - T(r, t) = \frac{q'}{2\pi k r_b} \sum_{j=1}^{10} \left[ \frac{V_j K_0(\omega_j r)}{j \omega_j K_1(\omega_j r_b)} \right] \quad (4.21)$$

$$\omega_j(t) = \sqrt{\frac{j \ln(2)}{\alpha t}} \quad (4.22)$$

$$V_j = \sum_{k=\text{Int}\left(\frac{j+1}{2}\right)}^{\min(j,5)} \frac{(-1)^{j-5} k^5 (2k)!}{(5-k)!(k-1)!k!(j-k)!(2k-j)!} \quad (4.23)$$

jossa  $K_0$  ja  $K_1$  ovat muunnettuja Besselin funktioita. ICS mallia suositellaan käytettäväksi lyhyellä aikavälillä (alle 34 tuntia). (Philippe et al. 2009)

### 4.3 Lämpökaivon lämpövastus lämpöpiirianalogialla

U-putkilämpökaivon (kuva 4.1) lämpövastus voidaan kuvata yksinkertaisesti sähkö- tai lämpöpiirianalogiaa hyödyntämällä. Lämpökaivon kokonaislämpövastus koostuu lämpökaivon eri osien lämpövastuksista, yhtälö (4.24). Nämä osat ovat konvektiivinen lämmönsiirtovastus  $R_{lsa}$  sisäputken pinnasta lämmönsiirtoaineeseen, lämmönsiirtoputken lämpövastus  $R_p$ , lämpökaivon lämpövastus  $R_{lk}$  ja maa- tai kallioperän lämpövastus  $R_{mp}$ . (Acuña 2010)

$$R_{kok} = R_{lsa} + R_p + R_{lk} + R_{mp} \quad (4.24)$$

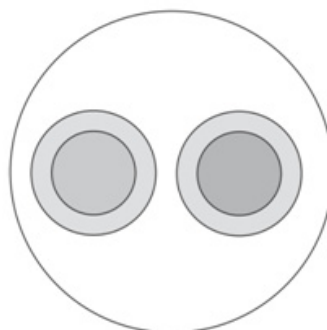
Lämpökaivon ja putken lämpövastusta voidaan havainnollistaa kaavalla (4.25). (Lamarche et al. 2010)

$$R_{lsa} + R_p + R_{lk} = \frac{T_{lsa,ka} - T_{lk,seinä}}{q'_{lsa-seinä}} \quad (4.25)$$

jossa lämmönsiirtoaineen keskilämpötila on  $T_{lsa,ka}$ , lämpökaivon seinän lämpötila  $T_{lk,seinä}$  ja lämpövirta  $q'_{lsa-seinä}$  pituusyksikköä kohden lämmönsiirtoaineen ja lämpökaivon seinän välillä. Lämmönsiirtoaineen keskilämpötila voidaan määrittää kaavalla (4.26). (Lamarche et al. 2010)

$$T_{lsa,ka} = \frac{T_{lsa,sisäänmeno} + T_{lsa,ulostulo}}{2} \quad (4.26)$$

jossa  $T_{lsa,sisäänmeno}$  ja  $T_{lsa,ulostulo}$  ovat lämmönsiirtoaineen lämpötilat U-putken sisäänmeno- ja ulostulohaarassa.



**Kuva 4.1.** Lämpökaivon poikkileikkaus, jossa on U-putki. (Al-Khoury 2012)

Lämpökaivon eri osien lämpövastus voidaan yksinkertaisesti laskea kaavoilla (4.27)-(4.29). (Acuña 2010; Al-Khoury 2012)

$$R_{lsa,yksi\ putkihaara} = \frac{1}{2\pi r_{p,sis} h} \quad (4.27)$$

jossa konvektiivinen lämmönsiirtovastus yhdelle putkihaaralle on  $R_{lsa,yksi\ putkihaara}$ , lämmönsiirtoputken sisäpuolen säde  $r_{p,sis}$  ja konvektiivinen lämmönsiirtokerroin  $h$ .

$$R_{p,yksi\ putkihaara} = \frac{\ln(r_{p,u}/r_{p,sis})}{2\pi k_p} \quad (4.28)$$

jossa putken lämpövastus yhdelle putkihaaralle on  $R_{p,yksi\ putkihaara}$ , lämmönsiirtoputken ulkopuolen säde  $r_{p,u}$  ja lämmönsiirtoputken lämmönjohtavuus  $k_p$ .

$$R_{mp} = \frac{\ln(r_{mp}/r_{lk})}{2\pi k_{mp}} \quad (4.29)$$

jossa jokin etäisyys porakaivon keskipisteestä maa- tai kallioperässä on  $r_{mp}$ , lämpökaivon säde  $r_{lk}$  ja maa- tai kallioperän lämmönjohtavuus  $k_{mp}$ .

U-putkessa on kuitenkin kaksi haaraa, sisäänmeno- ja ulostulohaarat. Molempien haarojen huomioimiseksi on olemassa DELTA- ja Y-kytkentä.

### 4.3.1 Delta ja Y-kytkentä

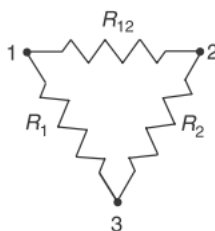
DELTA-kytkennälle (kuva 4.2) yhteisvastukseksi saadaan

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_1 + R_2} \quad (4.30)$$

Josta ratkaistaan  $R$

$$R = \frac{R_{12}(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_{12}} = R_{lsa} + R_p + R_{lk} \quad (4.31)$$

jossa sisäänmenohaaran ja kallioperän (maaperän) välinen lämpövastus on  $R_1$ , ulostulohaaran ja kallioperän (maaperän) välinen lämpövastus  $R_2$  sekä sisäänmeno- ja ulostulohaaran välinen lämpövastus  $R_{12}$ . (Al-Khoury 2012)



**Kuva 4.2.** DELTA-kytkentä. (Al-Khoury 2012)



DELTA-kytkennässä oletetaan, että sisäänmenoputki ja maaperä, ulostuloputki ja maaperä sekä sisäänmeno- ja ulostuloputki ovat kaikki suorassa termisessä vuorovaikutuksessa toisiinsa. Toisin sanoen ne eivät ole termisessä vuorovaikutuksessa täyteaineen kanssa. (Al-Khoury 2012)

Y-kytkennälle (kuva 4.3) yhteisvastukseksi saadaan:

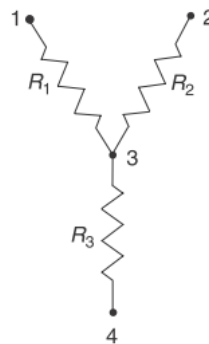
$$R = R_3 + R_{12} \quad (4.32)$$

$$R = R_3 + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = R_{lsa} + R_p + R_{lk} \quad (4.33)$$

$$R_{lk} = R_3 \quad (4.34)$$

$$R_{lsa} + R_p = R_{12} \quad (4.35)$$

jossa sisäänmenohaaran ja täyteaineen välinen lämpövastus on  $R_1$ , ulostuloputken ja täyteaineen välinen lämpövastus  $R_2$  sekä täyteaineen ja maaperän välinen lämpövastus  $R_3$ .



**Kuva 4.3.** Y-kytkentä. (Al-Khoury 2012)

Y-kytkennässä sisäänmenoputki ja täyteaine, ulostuloputki ja täyteaine sekä täyteaine ja maaperä ovat termisessä vuorovaikutuksessa. Putket eivät ole suorassa termisessä vuorovaikutuksessa keskenään tai maaperän kanssa, kuten DELTA-kytkennässä. (Al-Khoury 2012)

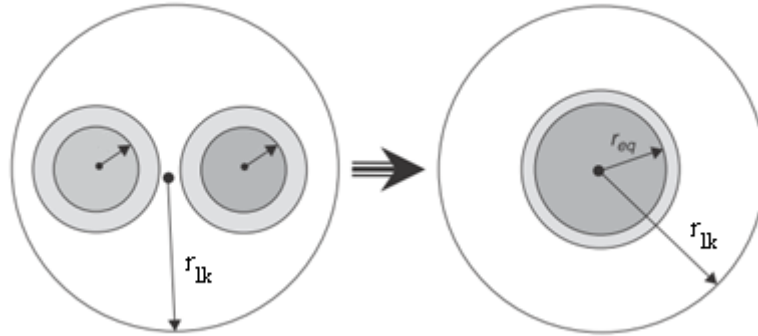
Muutetaan kaksi U-putken haara yhdeksi haaraksi (kuva 4.4)

$$A_{eq} = A_{p, sis1} + A_{p, sis2} \quad (4.36)$$

jossa  $A_{eq}$  on sisäänmenohaaran sisäpuolen poikkipinta-alan  $A_{p, sis1}$  ja ulostulohaaran sisäpuolen poikkipinta-alan  $A_{p, sis2}$  summa. Saadaan

$$r_{eq} = \sqrt{r_{sis,1}^2 + r_{sis,2}^2} \quad (4.37)$$

jossa ekvivalenttisäde on  $r_{eq}$ , sisäänmenoputken sisäpuolen säde  $r_i$  ja ulostuloputken sisäpuolen säde  $r_o$ .



**Kuva 4.4.** U-putken haarojen muuntaminen yhdeksi haaraksi. (Al-Khoury 2012, muokattu)

Lämpökaivon lämpövastukseksi saadaan

$$R_3 = \frac{\ln(r_{lk}/r_{eq})}{2\pi L k_t} = R_{lk} \quad (4.38)$$

jossa porakaivon säde on  $r_{lk}$ , ekvivalenttisäde  $r_{eq}$ , U-putken haaran pituus  $L$  ja täyteaineen lämmönjohtavuus  $k_t$ . Tässä ei oteta huomioon putken paksuutta. (Al-Khoury 2012)

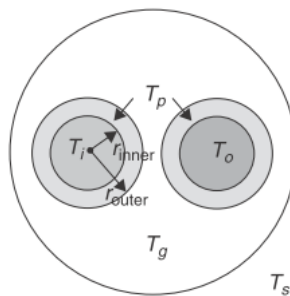
$$R_1 = \frac{1}{2\pi r_{p, sis} L \bar{h}} + \frac{\ln(r_{p, u}/r_{p, sis})}{2\pi L k_p} = R_{lsa, haara1} + R_{p, haara1} \quad (4.39)$$

jossa U-putken haaran sisäsäde on  $r_{p, sis}$ , ulkosäde  $r_{p, u}$ , U-putken haaran pituus  $L$ , keskimääräinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin  $\bar{h}$  ja putken lämmönjohtavuus  $k_p$  (kuva 4.5). Sisäänmeno- ja ulostulohaarat ovat identtiset, joten

$$R_1 = R_2 \quad (4.40)$$

Lämpövastus ( $R_{lsa} + R_p + R_{lk}$ ) on kaavojen (4.33) ja (4.38)-(4.40) mukaan

$$R_{lsa} + R_p + R_{lk} = \frac{\ln(r_{lk}/r_{eq})}{2\pi L k_t} + \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{2\pi r_{p, sis} L \bar{h}} + \frac{\ln(r_{p, u}/r_{p, sis})}{2\pi L k_p}} + \frac{1}{\frac{1}{2\pi r_{p, sis} L \bar{h}} + \frac{\ln(r_{p, u}/r_{p, sis})}{2\pi L k_p}}} \quad (4.41)$$



**Kuva 4.5.** U-putken poikkileikkaus. (Al-Khoury 2012)

#### 4.4 Lämpökaivon lämpövastus kokeellisesti (TRT)

Lämpökaivon lämpövastus voidaan selvittää parhaiten kokeellisesti. Tunnetuin kokeellinen menetelmä on termisen vasteen testi (TRT, thermal response test). TRT suoritetaan todellisessa ympäristössä. TRT-testissä lämpökaivon lämmönsiirtoaineeseen syötetään vakio lämpömäärä. Lämmönsiirtoaineen sisäänmeno- ja ulostulolämpötiloja, virtausnopeutta ja syötettyä lämpömäärää tarkkaillaan testin ajan. Sisä- ja ulostulolämpötilat tallennetaan tietyin väliajoin 72 tunnin ajan. Nämä tiedot tallennetaan ja niiden avulla selvitetään maa- ja kallioperän lämmönjohtavuus sekä lämpökaivon lämpövastus. TRT tehdään yhdellä lämpökaivolla esimerkiksi ennen useamman lämpökaivon (lämpökaivokentän) poraamista samalle alueelle. Siten voidaan arvioida lämpökaivojen mitoitusta tarvittavan lämpömäärän saamiseksi, esimerkiksi kaivon syvyyttä. (Acuña 2010; Al-Khoury 2012)

Kokeellisen testin suorittaminen paikan päällä on kallista, koska se tarvitsee raskaan erikoismittauskaluston mittausdatan tallentamiseen ja tulkintaan. Kokeellisia testejä voidaan suorittaa myös laboratoriossa. Laboratoriotesteissä selvitetään porakaivon täyteaineen lämmönjohtavuus ja lämpökaivon lämpövastus. (Al-Khoury 2012)

#### 4.5 Lämpökaivon lämpövastus analyttisesti ja numeerisesti U-putkilämpökaivossa

Yleensä lämpökaivon lämpövastuksen selvittämiseksi käytetään analyttisiä tai numeerisia menetelmiä. Lämpökaivon lämpövastuksen selvittämiseksi on olemassa useita analyttisiä menetelmiä. (Lamarche et al. 2010; Al-Khoury 2012)

Kokeelliseen testiin perustuva lämpökaivon lämpövastus (Paul 1996)

$$R_{lk} = \frac{1}{\beta_0 (r_{porareikä} / r_{putki,ulko})^{\beta_1} k_t} \quad (4.42)$$

jossa  $\beta_0$  ja  $\beta_1$  ovat muotokertoimia, jotka riippuvat putkihaarojen sijainnista lämpökaivossa.

Multipolimenetelmään perustuva lämpökaivon lämpövastus (Bannet et al. 1987)

$$R_{lk} = \frac{1}{4\pi k_t} \left[ \ln \left( \frac{\gamma_1 \gamma_2^{1+4\sigma}}{2(\gamma_2^4-1)^\sigma} \right) - \left( \frac{\gamma_3^2 (1-(4\sigma/(\gamma_2^4-1)))}{1+\gamma_3^2 (1+(16\sigma/(\gamma_2^2-1/\gamma_2^2)^2))} \right) \right] \quad (4.43)$$

jossa

$$\sigma = \frac{k_t - k_{mp}}{k_t + k_{mp}} \quad \gamma_1 = \frac{r_{lk}}{r_{p,u}} \quad \gamma_2 = \frac{r_{lk}}{s} \quad \gamma_3 = \frac{r_{p,u}}{2s} = \frac{\gamma_2}{2\gamma_1} \quad (4.44)$$

Viivalähdemalliin perustuva lämpökaivon lämpövastus (Hellström 1991)

$$R_{lk} = \frac{1}{4\pi k_t} \left[ \ln \gamma_1 - \ln \gamma_2 + \sigma \ln \left( \frac{\gamma_2^4}{\gamma_2^4 - 1} \right) \right] \quad (4.45)$$

Numeerisiin simuloiteihin perustuva lämpökaivon lämpövastus (Sharqawy et al. 2009)

$$R_{lk} = \frac{1}{2\pi k_t} \left[ \frac{-1,49}{\gamma_2} + 0,656 \ln \gamma_1 + 0,436 \right] \quad (4.46)$$

Kaavan (4.43) korjaustermiin sisältyy myös lämmönsiirtoputken lämpövastus ( $R_p$  ja  $R_{lsa}$ ). Joten esimerkiksi kaavoja (4.24) ja (4.43) ei voi yhdistää keskenään suoraan. (Lamarche et al. 2010)

#### 4.5.1 Sisäinen resistanssi

Lämpö siirtyy U-putken sisäänmeno- ja ulostulohaaran välillä. Haarojen välillä on sisäinen lämpövastus. Viivalähdemalliin perustuva lämpökaivon sisäinen lämpövastus (Hellström 1991)

$$R_{lk, sis} = \frac{1}{\pi k_t} \ln \left( \frac{2\gamma_1 (\gamma_2^2 + 1)^\sigma}{\gamma_2 (\gamma_2^2 - 1)^\sigma} \right) \quad (4.47)$$

Multipolimenetelmään perustuva korjaus kaavalle (4.47)

$$R_{lk, sis, korj} = R_{lk, sis} - \frac{1}{\pi k_t} \left[ \frac{\gamma_3^2 (1 + (4\sigma \gamma_2^2 / (\gamma_2^4 - 1)))^2}{1 - \gamma_3^2 + (8\sigma \gamma_2^2 \gamma_3^2 (\gamma_2^4 + 1) / (\gamma_2^4 - 1)^2)} \right] \quad (4.48)$$

$R_{lk, sis, korj}$  sisältää myös putken lämpövastuksen ( $R_p$  ja  $R_{lsa}$ ) (Hellström 1991; Lamarche et al. 2010)

## 4.6 Lämmönsiirto maa- ja kallioperässä

Lämmön johtumista maa- ja kallioperässä hallitsee yhtälö (sylinterikoordinaatistossa)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{(\rho c_p)_{mp}}{k_{mp}} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.49)$$

Yhtälö (4.49) ei ota huomioon pohjaveden liikkumista. Lämpö johtuu horisontaalisesti kohti lämpökaivon keskustaa ensimmäisinä vuosina ja sen jälkeen lämpö johtuu täysin kolmiulotteisesti (myös vertikaalisesti). (Åcuna 2010)

Jatkuvuustilassa kallion ja lämpökaivon seinän väliselle lämpövirralle voidaan kirjoittaa

$$q'' = -k_{mp} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (4.50)$$

missä lämpövirta on  $q''$ , kallio- tai maaperän lämmönjohtavuus  $k_{mp}$  ja lämpövirran suunta  $n$ . Lämpövirralle  $q$  saadaan lämpökaivon reunalla (hieman kallion sisäpuolella) (Åcuna 2010)

$$q' = 2\pi r_{lk} k_{mp} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r \approx r_{lk}} \quad (4.51)$$

## 4.7 Lämmönkeruupiirin lämmönsiirtoaine

Reynoldsin luku saadaan putken halkaisijan avulla (Mills 1999)

$$Re_D = \frac{u_{lsa} D}{\nu} = \frac{\rho u_{lsa} D}{\mu} \quad (4.52)$$

jossa lämmönsiirtoaineen nopeus on  $u_{lsa}$ , putken halkaisija  $D$ , nesteen kinemaattinen viskositeetti  $\nu$ , nesteen tiheys  $\rho$  ja nesteen dynaaminen viskositeetti  $\mu$ .

Kitkakerroin täysin kehittyneelle laminaarille putkivirtaukselle (Mills 1999):

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (Re_D < 2300) \quad (4.53)$$

Kitkakerroin ja Nusseltin luku täysin kehittyneelle turbulentialle putkivirtaukselle (Mills 1999):

$$f = \frac{1}{(0,79 \ln Re_D - 1,64)^2} \quad (10^4 < Re_D < 5 \cdot 10^6) \quad (4.54)$$

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad 3000 < Re_D < 10^6 \quad (4.55)$$

Kaavalla (4.56) voidaan arvioida keskimääräinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin  $\bar{h}$  (Mills 1999).

$$\bar{h} = (k/D)\bar{Nu}_D \quad (4.56)$$

Kitkan aiheuttama painehäviö putkessa (Mills 1999):

$$\Delta p = f \frac{\rho u_{isa}^2 (L/D)}{2} \quad (4.57)$$

jossa kitkakerroin on  $f$  ja putken pituus  $L$ .

Lämmönkeruupiirin pumpun teholle saadaan

$$P_{pumppu} = \frac{\dot{V}\Delta p}{\eta_{pumppu}} \quad (4.58)$$

jossa nesteen tilavuusvirta on  $\dot{V}$ , painehäviö putkessa  $\Delta p$  ja pumpun hyötysuhde  $\eta_{pumppu}$ . (Acuña 2010)

## 4.8 Yhdestä U-putkesta saatava teho

Lämpökaivosta saatavaa teho voidaan laskea seuraavilla kaavoilla, kun U-putkeen kohdistuva lämpövirta oletetaan vakioksi ( $q''$  on vakio) tai U-putken pinta oletetaan lämpötilaltaan vakioksi ( $T_{pinta}$  on vakio). (Çengel 2006)

$$Q = q''A = \dot{V}\rho c_p \Delta T = \dot{m}c_p \Delta T = \dot{m}c_p(T_u - T_{sis}) \quad (4.59)$$

jossa putken pinta-ala on  $A$ , lämmönsiirtoaineen tilavuusvirta  $\dot{V}$ , lämmönsiirtoaineen massavirta  $\dot{m}$ , lämmönsiirtoaineen tiheys  $\rho$ , lämmönsiirtoaineen ominaislämpökapasiteetti  $c_p$  ja lämmönsiirtoaineen sisäänmeno- (lämpökaivoon) ja ulostulolämpötilan (lämpökaivosta) erotus  $\Delta T$ . Putkeen kohdistuva lämpövirta  $q''$  oletetaan vakioksi (Çengel 2006).

Kun  $T_{pinta}$  on vakio, niin

$$Q = hA\Delta T_{ka} \quad (4.60)$$

jossa

$$\Delta T_{ka} = \Delta T_{arit} = \frac{\Delta T_{sis} + \Delta T_{ulos}}{2} = \frac{(T_{pinta} - T_{sis}) + (T_{pinta} - T_{ulos})}{2} = T_{pinta} - \frac{T_{sis} + T_{ulos}}{2} \quad (4.61)$$

jos käytetään aritmeettista keskiarvoa putken pinnan ja lämmönsiirtoaineen lämpötilojen erotukselle sisään- ja ulosvirtauskohdissa. Aritmeettista keskiarvoa ei kuitenkaan suositella käytettäväksi tässä, vaan logaritmistä keskiarvoa (Çengel 2006):

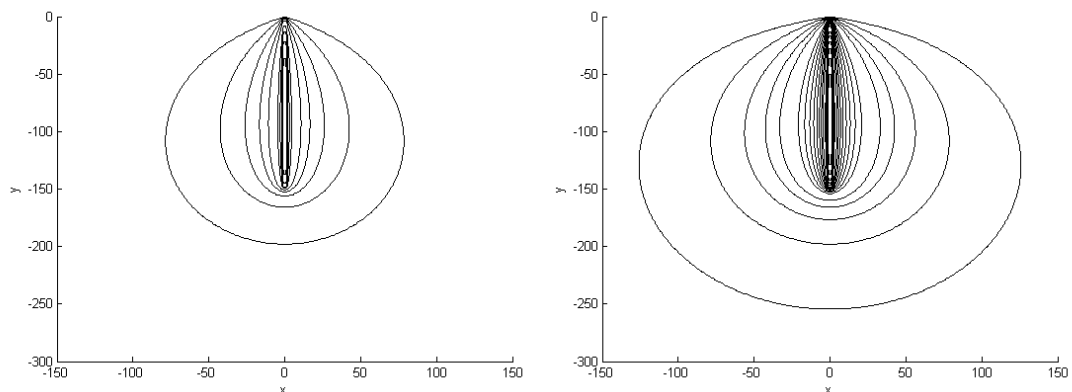
$$\Delta T_{ka} = \Delta T_{ln} = \frac{T_{sis} - T_{ulos}}{\ln[(T_{pinta} - T_{ulos}) / (T_{pinta} - T_{sis})]} = \frac{\Delta T_{ulos} - \Delta T_{sis}}{\ln(\Delta T_{ulos} / \Delta T_{sis})} \quad (4.62)$$

Marcotten ja Pasquiern (2008) mukaan p-lineaarinen keskiarvo ( $p \rightarrow -1$ ) (kaava 4.63) tuottaa parempia tuloksia kuin aritmeettinen  $\Delta T_{arit}$  ( $p=1$ ) tai logaritminen  $\Delta T_{ln}$  ( $p \rightarrow 0$ ) keskiarvolämpötila.

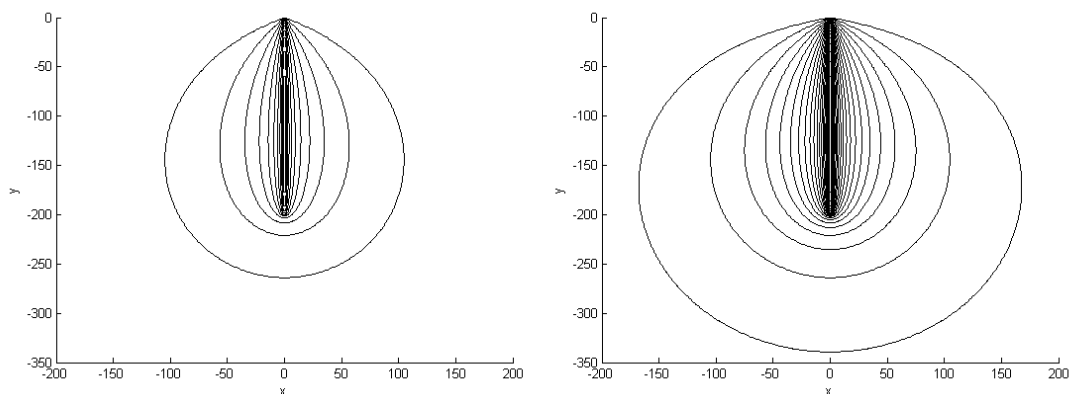
$$|\Delta T_p| = \frac{p(|\Delta T_{sis}|^{p+1} - |\Delta T_{ulos}|^{p+1})}{(1+p)(|\Delta T_{sis}|^p - |\Delta T_{ulos}|^p)} \quad (4.63)$$

## 4.9 Lämpötila lämpökaivon ympäristössä

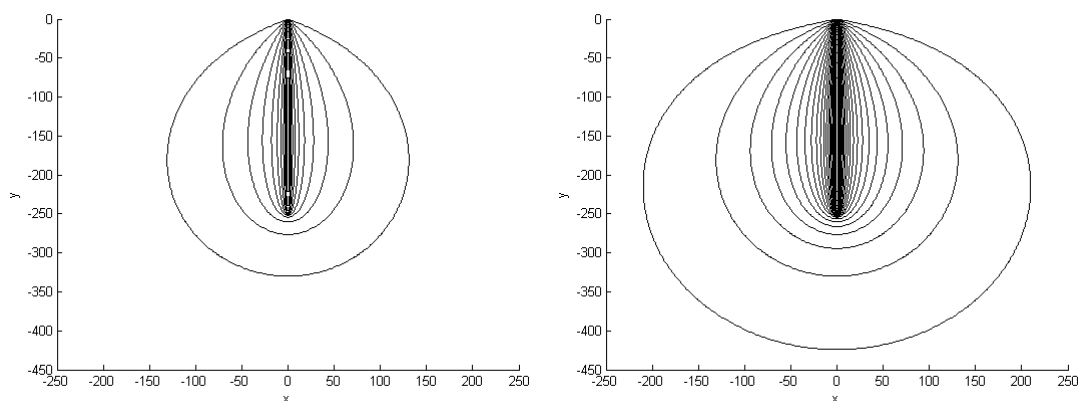
Tässä kappaleessa havainnollistetaan maa- ja kallioperän lämpötilan muutosta lämpökaivon ympäristössä. Kaavan (4.15) avulla on piirretty kuusi eri tilannetta (kuvat 4.6-4.8), joissa kolme eri syvyistä (150 m, 200 m ja 250 m) lämpökaivoa altistetaan kahdelle eri lämpövirralle (10 W/m ja 20 W/m). Jos ympäristön lämpötila (häiritsemätön alkulämpötila) on esimerkiksi 4 °C, niin ensimmäisellä isotermillä lämpötila on 3,8 °C, seuraavalla 3,6 °C jne. Oletetaan ympäristön olevan graniittia (3,4 W/(mK)).



**Kuva 4.6.** 150 metriä syvän lämpökaivon ympäristön lämpötilan lasku (0,2 °C isotermiä kohden) stationääritilanteessa. Vasemmalla 10 W/m tehonotto ja oikealla 20 W/m tehonotto.



**Kuva 4.7.** 200 metriä syvän lämpökaivon ympäristön lämpötilan lasku ( $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  isotermiä kohden) stationääritilanteessa. Vasemmalla  $10\text{ W/m}$  tehonotto ja oikealla  $20\text{ W/m}$  tehonotto.



**Kuva 4.8.** 250 metriä syvän lämpökaivon ympäristön lämpötilan lasku ( $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  isotermiä kohden) stationääritilanteessa. Vasemmalla  $10\text{ W/m}$  tehonotto ja oikealla  $20\text{ W/m}$  tehonotto.

Tehonoton ollessa  $10\text{ W/m}$  lämpötila laskee yhden celsiusasteen noin 70 metrin matkalla (150 metrin lämpökaivo), noin 90 metrin matkalla (200 metrin lämpökaivo) ja noin 115 metrin matkalla (250 metrin lämpökaivo) vaakatasossa kaivon alaosassa. Noin 10-18 metrin etäisyydellä (riippuen kaivon syvyydestä) kaivon keskikohdasta lämpötila on  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n pienempi kuin häiritsemätön ympäristön lämpötila.

Tehonoton ollessa  $20\text{ W/m}$  lämpötila laskee yhden celsiusasteen noin 100 metrin matkalla (150 metrin lämpökaivo), noin 130 metrin matkalla (200 metrin lämpökaivo) ja noin 170 metrin matkalla (250 metrin lämpökaivo) vaakatasossa pisimmillään. Noin 33-55 metrin etäisyydellä (riippuen kaivon syvyydestä) kaivon keskikohdasta lämpötila on  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n pienempi kuin häiritsemätön ympäristön lämpötila.



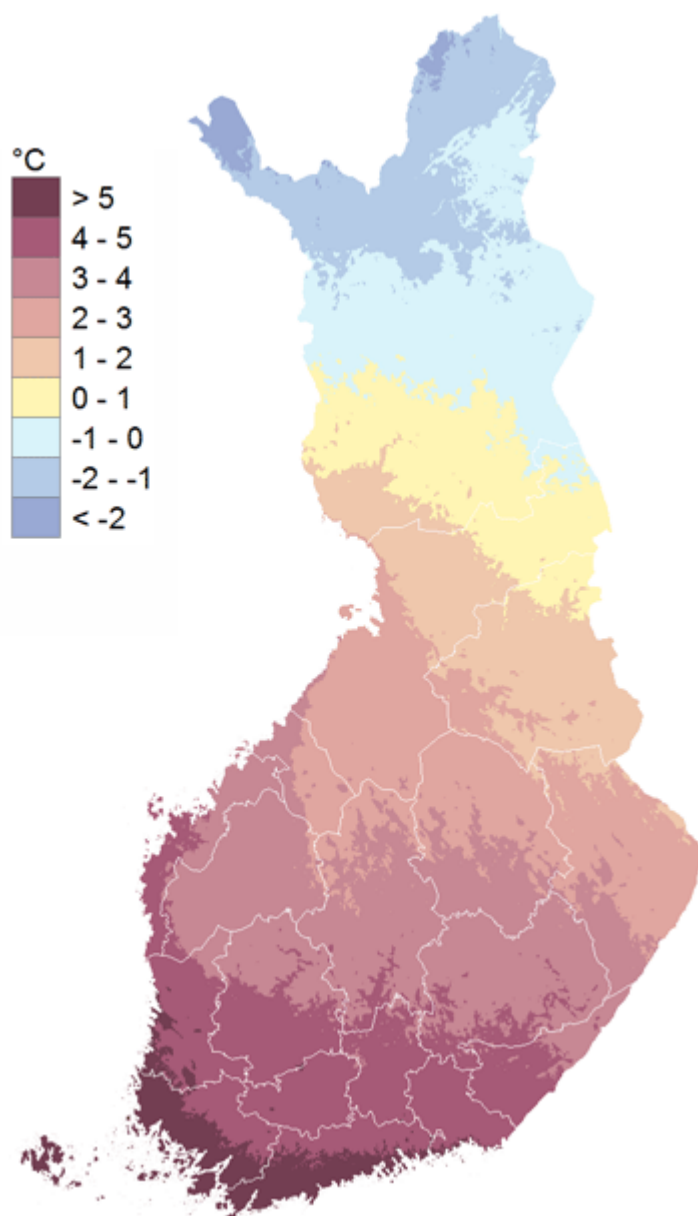
## 5 EED – EARTH ENERGY DESIGNER

Earth Energy Designer (EED) on tietokoneohjelma pystysuorien lämpökaivojen mitoitukseen ja suunnitteluun. EED arvioi tarvittavan lämpökentän kokoa ja muotoa. Sen algoritmit on johdettu numeerisella simuloinnilla huomioiden lämmön johtuminen lämpökaivokentässä ja lämpökaivon geometriset ominaisuudet. Lämmönsiirtoaineen lämpötila lasketaan lämpö- ja jäädytystarpeen mukaan. Lämpökaivon lämpövastus laskeaan lämpökaivon geometrian, täytämateriaalin (Pohjoismaissa pohjavesi), putkimateriaalin ja -geometrian avulla. EED sisältää U-putken (tavallinen, tupla tai tripla) ja tavallisen koaksiaaliputken mallinnusta varten. Ohjelmassa on valmiina maanpinnan vuotuisen keskilämpötila ja geoterminen lämpövuoto eri kaupungeille Euroopassa. Nämä kaupungit ovat Suomessa Jyväskylä, Helsinki, Lappeenranta, Oulu, Sodankylä ja Turku. EED:n maanpinnan keskilämpötilat eroavat (taulukko 5.1) hieman Suomen ympäristökeskuksen lämpökaivo-oppaan (Juvonen 2013) maanpinnan keskilämpötiloista. (Leppäharju 2008; EED 3.16 2010)

**Taulukko 5.1.** Maanpinnan keskilämpötila EED:ssa ja Geologian tutkimuskeskuksen mukaan. (Leppäharju 2008; EED 3.16 2010; Juvonen & Lapinlampi 2013)

	EED	Ympäristöopas 2013
	[°C]	[°C]
Helsinki	5,6	6 - 7
Turku	4,8	6 - 7
Lappeenranta	3,6	5 - 6
Jyväskylä	2,6	n. 5
Oulu	2	4 - 5
Sodankylä	-1	2 - 3

Suomessa maanpinnan keskilämpötila on suhteellisen alhainen ja se vaihtelee leveyspiirin mukaan. Maanpinnan keskilämpötila on noin kaksi astetta korkeampi kuin ilman keskilämpötila vastaavalla alueella (kuva 5.1). GTK:n mukaan maanpinnan keskilämpötila on plussan puolella, Pohjois-Suomessa noin 2-3 °C ja Etelä-Suomessa 6-8 °C. Maanpinnan keskilämpötila on tärkeä mitoitettava tekijä suunniteltaessa lämpökaivokentää. (GTK 2013b)



*Kuva 5.1. Ilman vuotuinen keskilämpötila Suomessa vuosina 1981-2010. (Ilmatieteenlaitos 2013)*

## 5.1 Optimaalinen lämpökaivokenttä

EED:llä mitoitetaan optimaalinen yksittäinen lämpökaivo tai lämpökaivokenttä Helsingissä, Jyväskylässä, Oulussa ja Sodankylässä. Lämmitettävän kohteen vuotuinen lämpöenergian tarve on 20 MWh, 40 MWh, 60 MWh tai 80 MWh. Oletetaan käyttöveden lämmityksen osuuden olevan neljännes koko lämpöenergian tarpeesta, loput (3/4) lämpöenergiasta käytetään tilojen lämmitykseen. Lämpökertoimena (SPF) käytetään kahta (2) ja kolmea (3). Kaivoista otetaan lämpöä yhtäjaksoisesti, eikä kallioperän anneta palautua. EED:n optimointityökalussa kaivojen välinen etäisyys on rajattu 15-20 metriin, kaivon maksimisyvyys 220 metriin ja lämpökaivokentän maksimiala 40 x 40 metriin. Tarkastelujakso on 30 vuotta.

### 5.1.1 Maa- ja kallioperä

Kallioperä oletetaan graniitiksi. EED ehdottaa graniitille lämmönjohtavuudeksi ja tilavuusominaislämmöksi taulukon 5.1 arvoja. Maanpinnan lämpötila ja geoterminen lämpövirta saadaan myös EED:n sisältämistä kaupunkikohtaisista arvoista (taulukko 5.1 ja 5.2).

**Taulukko 5.2.** Kallioperän ja maanpinnan ominaisuudet. (EED 3.16 2010)

Lämmönjohtavuus (graniitti)	3,4	W/(mK)
Tilavuusominaislämpö (graniitti)	2,4	MJ/(m <sup>3</sup> K)
Geoterminen lämpövirta (Helsinki)	0,05	W/m <sup>2</sup>
Geoterminen lämpövirta (Jyväskylä)	0,04	W/m <sup>2</sup>
Geoterminen lämpövirta (Oulu)	0,04	W/m <sup>2</sup>
Geoterminen lämpövirta (Sodankylä)	0,03	W/m <sup>2</sup>

Geoterminen lämpövirta pääsääntöisesti suurenee mentäessä kohti Välimerta Euroopassa. Poikkeuksena on esimerkiksi Islanti, jossa geoterminen lämpövirta on suuri verrattuna muuhun Eurooppaan samalla leveyspiirillä. Geoterminen lämpövirta on Suomessa 0,030-0,050 W/m<sup>2</sup>, Ruotsissa 0,040-0,060 W/m<sup>2</sup>, Saksassa 0,060-0,120 ja Italiassa 0,040-0,200 W/m<sup>2</sup>. Suurimmillaan geoterminen lämpövirta on tuliperäisillä alueilla, esimerkiksi Islannissa ja Italiassa. (EED 3.16 2010)

### 5.1.2 Lämpökaivo

Lämpökaivon ominaisuudet on esitetty taulukossa 5.3. EED optimoi porakaivon syvyyden.

**Taulukko 5.3.** Lämpökaivon ominaisuudet. (EED 3.16 2010)

Halkaisija	139,7	mm
Kosketusvastus (putki/täyteaine)	0	(mK)/W
Täyteaineen lämmönjohtavuus (vesi)	0,6	W/(mK)

Lämpökaivossa lämmönsiirtoputkena on tavallinen polyeteeni U-putki (PE DN40 PN6) (Taulukko 5.4).

**Taulukko 5.4.** Lämmönsiirtoputken (U-putki) ominaisuudet. (EED 3.16 2010)

Halkaisija	40	mm
Seinän paksuus	2,3	mm
Lämmönjohtavuus	0,42	W/(mK)
Haarojen välinen etäisyys	59,9	mm

Lämmönkeruupiirin lämmönsiirtoaineena käytetään veden ja etanolin seosta. Seoksen etanolipitoisuus on 25 prosenttia. EED:n ohjekirjassa suositellaan, että lämmönsiirtoaineen keskilämpötila ei laskisi alle nollan useaksi viikoksi. Tämän vuoksi vertaillaan lämmönsiirtoaineen minimikeskilämpötilaa  $-5\text{ °C}$  ja  $0\text{ °C}$ . Lämmönsiirtoaineen ominaisuudet on annettu taulukossa 5.5.

**Taulukko 5.5.** Lämmönsiirtoaineen ominaisuudet. (EED 3.16 2010)

Etanoli (25 %)		
Lämmönjohtavuus	0,44	W/(mK)
Ominaislämpökapasiteetti	4250	J/kgK
Tiheys	960	kg/m <sup>3</sup>
Viskositeetti	0,0076	kg/(ms)
Jäätymispiste	-15	°C
Tilavuusvirta (yhdessä kaivossa)	1	l/s

Kallioperästä otettava lämpö on jaettu kuukausittain (EED:n oletus) taulukon 5.6 mukaan. EED:ssä on mahdollisuus jakaa lämmitysenergia tilojen ja käyttöveden lämmitykseen. Kesällä lämpö kuluu vain käyttöveden lämmitykseen. Jos esimerkiksi kallioperästä otetaan lämpöä 20 MWh vuodessa (ei sisällä lämpöpumpun tarvitsemää sähköenergiaa) ja tästä lämmöstä neljäsosa (5 MWh) käytetään käyttöveden lämmitykseen, niin tammikuussa kallioperästä otetaan lämpöä:

$$0,155 \cdot 15 \text{ MWh} + \frac{1}{12} \cdot 5 \text{ MWh} = 2,74 \text{ MWh}$$

**Taulukko 5.6.** EED:n lämmitysenergian käytön jakautuminen vuodessa. (EED 3.16 2010)

kuukausi	Tilojen lämmitys [%]	Käyttöveden lämmitys [%]
Tammikuu	15,5	8,33 (=1/12*100)
Helmikuu	14,8	8,33
Maaliskuu	12,5	8,33
Huhtikuu	9,9	8,33
Toukokuu	6,4	8,33
Kesäkuu	0	8,33
Heinäkuu	0	8,33
Elokuu	0	8,33
Syyskuu	6,1	8,33
Lokakuu	8,7	8,33
Marraskuu	11,7	8,33
Joulukuu	14,4	8,33

### 5.1.3 Kaivon mitoitustulokset

EED antaa seuraavanlaiset mitoitustulokset (taulukot 5.7-5.10) lämpökaivolle:

**Taulukko 5.7.** Helsingissä lämmitettävän kohteen lämmöntarve (MWh), kaivojen lukumäärä, kaivojen syvyys (m), kaivojen välinen etäisyys (m), kaivokentän muoto, lämmönsiirtoaineen minikeskilämpötila (°C) ja lämpökerroin (SPF).

Lämmöntarve [MWh]	Lkm.	Syvyys [m]	Etäisyys [m]	Kenttä	T <sub>min</sub> [°C]	SPF
20	1	99			-5	3
20	2	51	20	linjassa	-5	3
20	2	51	15	linjassa	-5	3
20	1	166			0	3
20	2	93	20	linjassa	0	3
20	1	74			-5	2
20	1	129			0	2
20	2	70	20	linjassa	0	2
40	1	190			-5	3
40	2	103	20	linjassa	-5	3
40	2	173	20	linjassa	0	3
40	2	176	15	linjassa	0	3
40	1	145			-5	2
40	2	77	20	linjassa	-5	2
40	2	135	20	linjassa	0	2
40	2	137	15	linjassa	0	2
60	2	152	20	linjassa	-5	3
60	2	154	15	linjassa	-5	3
60	3	178	20	linjassa	0	3
60	3	180	20	L	0	3
60	1	211			-5	2
60	2	116	20	linjassa	-5	2
60	2	192	20	linjassa	0	2
60	2	195	15	linjassa	0	2
80	2	199	20	linjassa	-5	3
80	2	202	15	linjassa	-5	3
80	4	183	20	L	0	3
80	4	186	20	neliö	0	3
80	2	152	20	linjassa	-5	2
80	2	154	20	linjassa	-5	2
80	3	178	20	linjassa	0	2
80	3	180	20	L	0	2

**Taulukko 5.8.** Jyväskylässä lämmitettävän kohteen lämmöntarve (MWh), kaivojen lukumäärä, kaivojen syvyys (m), kaivojen välinen etäisyys (m), kaivokentän muoto, lämmönsiirtoaineen minikeskilämpötila (°C) ja lämpökerroin (SPF).

Lämmöntarve [MWh]	Lkm.	Syvyys [m]	Etäisyys [m]	Kenttä	T <sub>min</sub> [°C]	SPF
20	1	134			-5	3
20	2	71	20	linjassa	-5	3
20	2	166	20	linjassa	0	3
20	2	168	15	linjassa	0	3
20	1	102			-5	2
20	2	53	20	linjassa	-5	2
20	1	220			0	2
20	2	132	20	linjassa	0	2
40	2	141	20	linjassa	-5	3
40	2	143	15	linjassa	-5	3
40	3	214	20	linjassa	0	3
40	3	216	20	L	0	3
40	1	195			-5	2
40	2	107	20	linjassa	-5	2
40	2	108	15	linjassa	-5	2
40	3	170	20	linjassa	0	2
40	3	172	20	L	0	2
60	2	205	20	linjassa	-5	3
60	2	207	15	linjassa	-5	3
60	5	204	20	L	0	3
60	5	206	20	U	0	3
60	2	157	20	linjassa	-5	2
60	2	159	15	linjassa	-5	2
60	4	192	20	L	0	2
60	4	195	20	neliö	0	2
80	3	189	20	linjassa	-5	3
80	3	191	20	L	-5	3
80	7	203	20	U	0	3
80	7	213	15	U	0	3
80	2	205	20	linjassa	-5	2
80	2	207	15	linjassa	-5	2
80	5	204	20	L	0	2
80	5	206	20	U	0	2

**Taulukko 5.9.** Oulussa lämmitettävän kohteen lämmöntarve (MWh), kaivojen lukumäärä, kaivojen syvyys (m), kaivojen välinen etäisyys (m), kaivokentän muoto, lämmönsiirtoaineen minikeskilämpötila (°C) ja lämpökerroin (SPF).

Lämmöntarve [MWh]	Lkm.	Syvyys [m]	Etäisyys [m]	Kenttä	T <sub>min</sub> [°C]	SPF
20	1	144			-5	3
20	2	77	20	linjassa	-5	3
20	2	192	20	linjassa	0	3
20	2	194	15	linjassa	0	3
20	1	110			-5	2
20	2	57	20	linjassa	-5	2
20	2	154	20	linjassa	0	2
20	2	155	15	linjassa	0	2
40	2	151	20	linjassa	-5	3
40	2	152	15	linjassa	-5	3
40	4	200	20	L	0	3
40	4	204	20	neliö	0	3
40	1	208			-5	2
40	2	115	20	linjassa	-5	2
40	3	196	20	linjassa	0	2
40	3	197	20	L	0	2
60	2	218	20	linjassa	-5	3
60	3	154	20	linjassa	-5	3
60	6	211	20	suorak.	0	3
60	7	186	20	U	0	3
60	2	168	20	linjassa	-5	2
60	2	170	15	linjassa	-5	2
60	4	219	20	linjassa	0	2
60	5	187	20	L	0	2
80	3	201	20	linjassa	-5	3
80	3	203	20	L	-5	3
80	8	214	20	neliö	0	3
80	8	217	20	2L	0	3
80	2	218	20	linjassa	-5	2
80	3	154	20	linjassa	-5	2
80	6	211	20	suorak.	0	2
80	7	186	20	U	0	2

**Taulukko 5.10.** Sodankylässä lämmitettävän kohteen lämmöntarve (MWh), kaivojen lukumäärä, kaivojen syvyys (m), kaivojen välinen etäisyys (m), kaivokentän muoto, lämmönsiirtoaineen minikeskilämpötila (°C) ja lämpökerroin (SPF).

Lämmöntarve [MWh]	Lkm.	Syvyys [m]	Etäisyys [m]	Kenttä	T <sub>min</sub> [°C]	SPF
20	2	130	20	linjassa	-5	3
20	2	131	15	linjassa	-5	3
20	Ei ratk.				0	3
20	Ei ratk.				0	3
20	1	178			-5	2
20	2	99	20	linjassa	-5	2
20	Ei ratk.				0	2
20	Ei ratk.				0	2
40	3	172	20	linjassa	-5	3
40	3	173	20	L	-5	3
40	Ei ratk.				0	3
40	Ei ratk.				0	3
40	2	186	20	linjassa	-5	2
40	2	189	15	linjassa	-5	2
40	Ei ratk.				0	2
40	Ei ratk.				0	2
60	4	196	20	L	-5	3
60	4	200	20	neliö	-5	3
60	Ei ratk.				0	3
60	Ei ratk.				0	3
60	3	191	20	linjassa	-5	2
60	3	193	20	L	-5	2
60	Ei ratk.				0	2
60	Ei ratk.				0	2
80	5	210	20	L	-5	3
80	5	212	20	U	-5	3
80	Ei ratk.				0	3
80	Ei ratk.				0	3
80	4	196	20	L	-5	2
80	4	200	20	neliö	-5	2
80	Ei ratk.				0	2
80	Ei ratk.				0	2

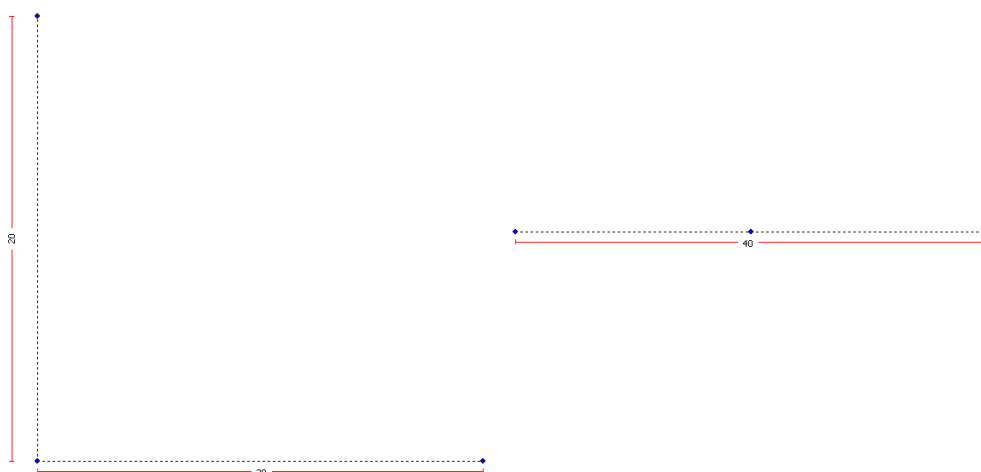
Lämpökaivojen mitoitusehdotuksissa havaittiin kolme asiaa. Kaksi kaivoa vastaa karkeasti yhteissyvyydeltään yhden kaivon syvyyttä Helsingin (20 MWh, 40 MWh, 60 MWh), Jyväskylän (20 MWh ja 40 MWh), Oulun (20 MWh ja 40 MWh) ja Sodankylän (20 MWh) tapauksissa. Esimerkiksi Helsingin 20 MWh (SPF=3) tapauksessa yksi 99 metriä syvä lämpökaivo vastaa kahta 51 metriä syvää lämpökaivoa ja Jyväskylän 40 MWh (SPF=2) tapauksessa yksi 195 metriä syvä lämpökaivo vastaa kahta 107 metriä syvää lämpökaivoa. Kuitenkaan tässä ei oteta kantaa miten lämmönkeruupi-



rin lämmönsiirtoainepumpun sähkönkulutus eroaa kahden lämpökaivon tapauksessa verrattuna yhteen syvempään kaivoon. Kaksi matalaa kaivoa tarvitsee ainakin hieman enemmän putkistoa (kaivojen välinen etäisyys 20 m).

Lisäksi kahden kaivon välinen etäisyys (15 m tai 20 m) ei vaikuta merkittävästi kaivojen mitoitusyvytyteen. Esimerkiksi Oulun 60 MWh tapauksessa kahden kaivon välinen etäisyys on 20 metriä ja kaivojen syvyys on 168 metriä, ja 15 metrin etäisyydellä toisistaan sijaitsevat kaivot ovat syvyydeltään 170 metriä. Ympäristöoppaassa vuonna 2009 lämpökaivojen väliseksi etäisyydeksi ehdotettiin 20 metriä (Juvonen 2009). Vuonna 2013 julkaistussa ympäristöoppaassa kaivojen välinen suositusetäisyys on 15 metriä (Juvonen ja Lapinlampi 2013).

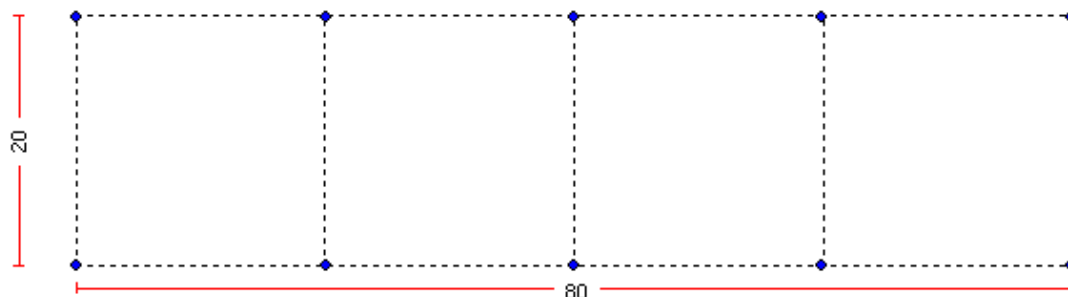
Kolmas havainto on, että lämpökaivokentän muoto ei juuri vaikuta kaivojen mitoitusyvytyteen. Esimerkiksi Jyväskylän 80 MWh tapauksessa kaivojen välinen etäisyys on 20 metriä, kaivot ovat lähes yhtä syviä (189 m ja 191 m) linja- ja L-muodossa (kuva 5.2). Tämä pätee kaikissa muissakin muodoissa, suorakulmio-, neliö-, 2L-, ja U-muoto.



**Kuva 5.2.** L- ja linjamuotoinen lämpökaivokenttä. Kentät eivät ole oikeassa mittasuhteessa toisiinsa. (EED 3.16 2010)

## 5.2 Lämpökaivokenttä 2 x 5

Tarkastellaan kymmenen lämpökaivon muodostamaa kaivokenttää (kuva 5.3). Kaivojen välinen etäisyys on 20 metriä ja kaivojen aktiivisyvyys on 200 metriä. Kymmenen kaivon yhteissyvyys on siis 2000 metriä. Kaivokenttä sijaitsee Nokian Pitkäniemessä. Kentän laskelmat tehdään 3,0 °C maanpinnan lämpötilalla, muuten lähtötiedot ovat samat kuin Jyväskylän tapauksessa. Tarkastelujakso on 30 vuotta.

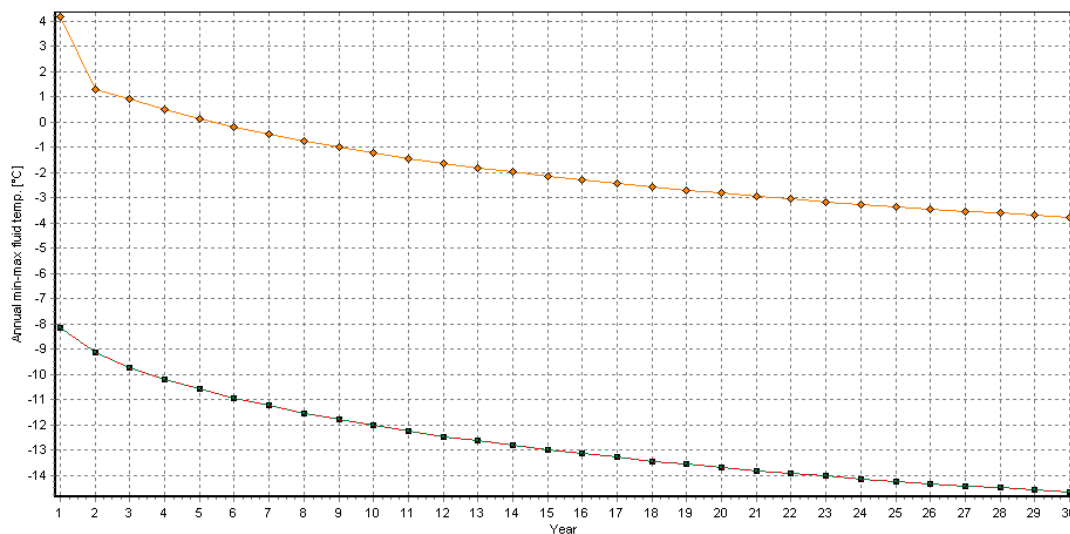


**Kuva 5.3.** Lämpökaivokenttä (2 x 5), jossa kaivojen välinen etäisyys 20 metriä. (EED 3.16 2010)

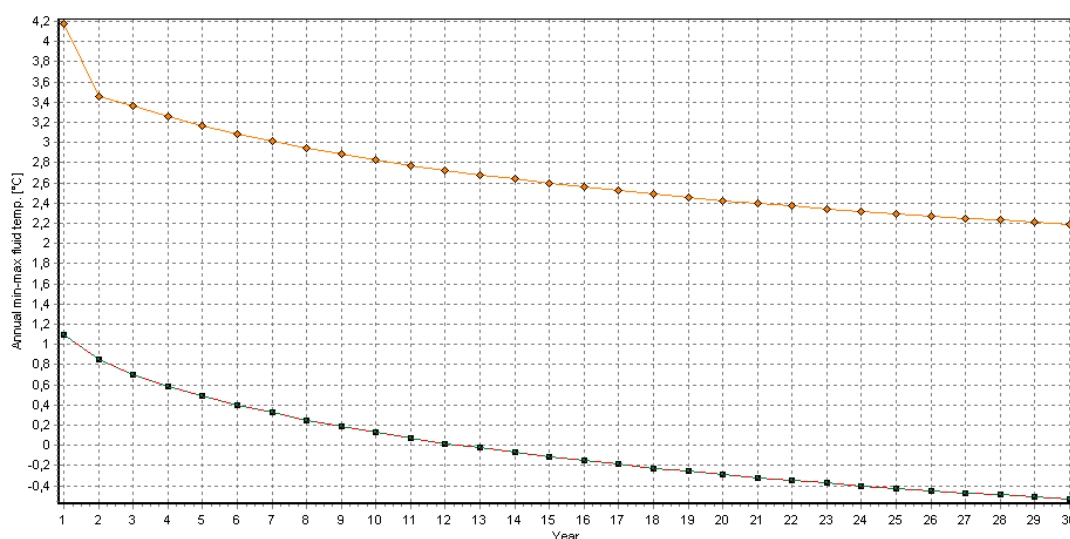
Tulokset on esitetty taulukoissa 5.11 U-putkelle ja 5.13 koaksiaaliputkelle. Taulukoissa 5.11 ja 5.13  $P_{\text{maa}}$  on maasta otettava lämpöteho kaivometriä kohden,  $P_{\text{maa, kok, 2000 m}}$  on kymmenellä lämpökaivolla maasta saatava kokonaisteho,  $E_{\text{maa}}$  on vuodessa saatava lämpöenergia,  $T_{\text{max}}$  on kaivokentän lämmönsiirtoaineen keskimääräinen maksimilämpötila 30. vuotena elokuun lopussa ja  $T_{\text{min}}$  on lämmönsiirtoaineen keskimääräinen minimilämpötila 30. vuotena tammikuun lopussa. Lämmönsiirtoaine saavuttaa minimikeskilämpötilan tammikuun lopussa ja maksimikeskilämpötilan elokuun lopussa. Taulukoissa 5.11 ja 5.13 EED on laskenut lämmönsiirtoaineen keskilämpötilat  $T_{\text{max}}$  ja  $T_{\text{min}}$ . Kaivokenttä on toiminnassa yhtämittäisesti ilman toipumista taulukon 5.6 mukaan, neljäsosa lämmöstä menee käyttöveden lämmitykseen. EED ei ota huomioon pohjaveden faasisuutosta kallioperässä.

**Taulukko 5.11.** U-putkikaivokentän (2 x 5) maasta otettava lämpö vuodessa Pitkäniemessä. Taulukossa on vain maasta otettava lämpö (ei sisällä lämpöpumpun sähköenergiaa).

$P_{\text{maa}}$	$P_{\text{maa, kok, 2000 m}}$	$E_{\text{maa}} (8760 \text{ h})$	$T_{\text{max}}$	$T_{\text{min}}$
[W/m]	[kW]	[MWh]	[°C]	[°C]
35	70	613,2	-9,74	-28,79
30	60	525,6	-7,75	-24,08
25	50	438,0	-5,76	-19,37
20	40	350,4	-3,77	-14,66
15	30	262,8	-1,79	-9,95
10	20	175,2	0,20	-5,24
5	10	87,6	2,19	-0,53



**Kuva 5.4.** Lämmönsiirtoaineen minimi- (alempi käyrä) ja maksimikeskilämpötila (ylempi käyrä). Aikajakso 30 vuotta, 20 W/m, U-putki.



**Kuva 5.5.** Lämmönsiirtoaineen minimi- (alempi käyrä) ja maksimikeskilämpötila (ylempi käyrä). Aikajakso 30 vuotta, 5 W/m, U-putki.

Kuvan 5.3 U-putkikaivokentän lämmönsiirtoaineen maksimikeskilämpötila nousisi hieman yli 0 °C 30. vuotena teholla 10 W/m (taulukko 5.11), mutta lämmönsiirtoaineen minimikeskilämpötila olisi jo reilusti alle 0 °C (-5,24 °C). 30. vuotena  $T_{\min}$  olisi hieman alle 0 °C (-0,53 °C) teholla 5 W/m. EED:n ohjekirja suosittelee, että lämmönsiirtoaineen keskilämpötila ei olisi alle 0 °C usean viikon ajan. EED:n suosituksen mukaan ainoastaan 5 W/m tapauksen lämpökaivokenttä voisi toimia lähes 30 vuotta. Lämmönsiirtoaineen keskilämpötila ei tasaannu 30 vuodessa (kuvat 5.4 ja 5.5). Liite 1 sisältää EED:n laskelmat U-putkikaivokentälle (5 W/m).

Lämpökaivokentän toimintaa rajoittaa lämmönsiirtoaineen jäätyislämpötila  $-15,0\text{ °C}$ . Lämmönsiirtoaineen minimikeskilämpötila alittaa jäätyislämpötilan alle 30 vuodessa, jos tehonotto maasta on  $25\text{ W/m}$  (taulukko 5.11). 30 vuoden jälkeen lämmönsiirtoaineen minimikeskilämpötila on lähes  $-15\text{ °C}$ , jos tehonotto maasta on  $20\text{ W/m}$ . Kyseisen  $2\times 5$ -kaivokentän yhtämittäinen toiminta on epätodennäköistä, joten kaivokentän toipuminen tai lämmöntuonti kaivokenttään on välttämätöntä.

Lisäksi lasketaan  $T_{\max}$  ja  $T_{\min}$  lämpötilat koaksiaaliputkikaivokentälle. Kenttä on samanlainen kuin U-putkikaivokentän tapauksessa (kuva 5.3) paitsi lämmönsiirtoputkena käytetään koaksiaaliputkea. Koaksiaaliputken ominaisuudet on annettu taulukossa 5.12. Koaksiaaliputkikentän tapauksessa EED varoittaa pienestä Reynoldsin luvusta, mikä merkitsee lämmönsiirtoaineen laminaaria virtausta. Liite 2 sisältää EED:n laskelmat koaksiaaliputkikaivokentälle ( $5\text{ W/m}$ ).

**Taulukko 5.12.** Koaksiaaliputken ominaisuudet.

Ulkoputken halkaisija	90	mm
Ulkoputken seinän paksuus	8,2	mm
Sisäputken halkaisija	40	mm
Sisäputken seinän paksuus	2,3	mm
Lämmönjohtavuus	0,42	W/(mK)

**Taulukko 5.13.** Koaksiaaliputkikaivokentän  $2 \times 5$  maasta otettava lämpö vuodessa Pitkäniemessä. Taulukossa on vain maasta otettava lämpö (ei sisällä lämpöpumpun sähköenergiaa).

$P_{\text{maa}}$	$P_{\text{maa, kok, 2000 m}}$	$E_{\text{maa}} (8760\text{ h})$	$T_{\max}$	$T_{\min}$
[W/m]	[kW]	[MWh]	[°C]	[°C]
35	70	613,2	-10,26	-32,24
30	60	525,6	-8,20	-27,04
25	50	438,0	-6,14	-21,84
20	40	350,4	-4,07	-16,63
15	30	262,8	-2,01	-11,43
10	20	175,2	0,05	-6,23
5	10	87,6	2,11	-1,03

Lasketuista lämpötiloista (taulukot 5.11 ja 5.13) voi havaita, että U- ja koaksiaaliputkikentän lämmönsiirtonesteen keskilämpötiloissa ei ole suurta eroa pienellä teholla, mutta ero kasvaa tehon kasvaessa. Koaksiaaliputkilämpökaivokenttä kerää kallioperästä jonkin verran tehokkaammin lämpöä kuin vastaava U-putkikenttä. Jos koaksiaaliputken lämmönkeräyskyvystä halutaan suurempi hyöty kuin U-putken, niin kallioperässä täytyy olla tarpeeksi lämpöenergiaa.

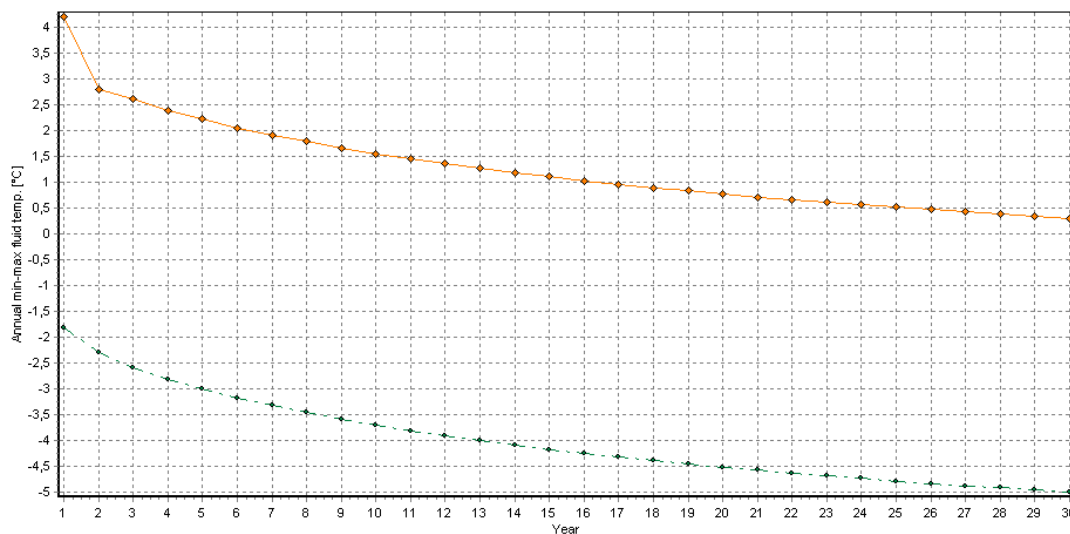
### 5.2.1 Optimaalinen lämpökaivokenttä 2 x 5

Pitkäniemen lämpökaivokentälle etsitään optimimitoitus rajoittaen ala 20x80 metriin, kaivojen välinen etäisyys 10-30 metriin ja kaivon syvyys 50-220 metriin. Lämmönsiirtoputkena on U-putki (taulukot 5.3 ja 5.4). Mitoitus kaivokentällä teholla 5-20 W/m on annettu taulukossa 5.14.

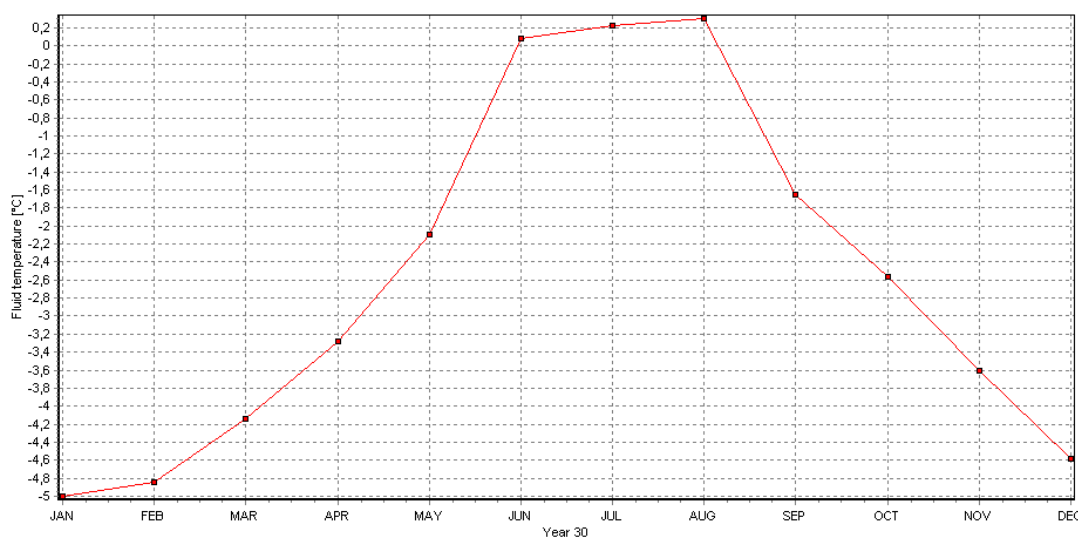
**Taulukko 5.14.** Optimaalinen kaivokenttä Pitkäniemessä. Maasta otettava teho (W/m), kaivojen lukumäärä, kaivojen syvyys (m), kaivojen välinen etäisyys (m), kaivokentän muoto, lämmönsiirtoaineen minimikeskilämpötila (°C) ja lämpökerroin (SPF).

Teho [W/m]	Lkm.	Syvyys [m]	Etäisyys [m]	Kenttä	T <sub>min</sub> [°C]
5	4	217	27	linjassa	-5
5	4	218	25	linjassa	-5
5	5	184	20	linjassa	-5
5	5	186	20	L	-5
5	5	188	20	U	-5
5	11	220	10	L	0
5	11	220	10	U	0
5	12	204	16	suorak.	0
5	12	207	15	suorak.	0
5	12	208	10	U	0
10	10	205	20	suorak.	-5
10	10	216	11	U	-5
10	10	220	10	L	-5
10	12	187	16	suorak.	-5
10	11	204	10	L	-5
10	Ei ratk.				0
15	19	207	10	U	-5
15	20	201	10	suorak.	-5
15	20	211	10	2L	-5
15	21	217	10	suorak.	-5
15	24	195	10	suorak.	-5
15	Ei ratk.				0
20	Ei ratk.				-5
20	Ei ratk.				0

Pitkäniemen kaltaisesta pystykaivokentästä saadaan lämpöä maksimissaan noin 10 wattia kaivometriä kohden (taulukko 5.14), jos kenttä on yhtämittäisessä käytössä ilman palautumista tai kenttään ei syötetä lämpöä (kuvat 5.6 ja 5.7). Tosin tällöin lämmönsiirtoaineen kuukausittainen minimikeskilämpötila on koko ajan alle nolla astetta ja 30 vuoden kuluttua -5 °C. EED:n ohjekirja suosittelee, että lämmönsiirtoaineen keskilämpötila ei saisi olla alle 0 °C usean viikon ajan. Teholla 5 W/m lämpökaivokenttä toimisi EED:n mukaan hyvin, jos kenttä koostuisi yhdestätoista 220 metrin syvyydestä kaivosta (kaivojen välinen etäisyys 10 metriä).



**Kuva 5.6.** Lämmönsiirtoaineen minimi- ja maksimilämpötila vuosittain optimaaliselle kentälle. (10 W/m, U-putki, 10 kaivoa, 205 m, etäisyys 20 m,  $T_{min}$  on  $-5\text{ °C}$  30 vuoden jälkeen)



**Kuva 5.7.** Lämmönsiirtoaineen keskilämpötila 30. vuotena (10 W/m, U-putki, 10 kaivoa, 205 m, etäisyys 20 m,  $T_{min}$  on  $-5\text{ °C}$  30 vuoden jälkeen)

Lisäksi kaivokenttää tutkitaan tapauksissa 20 W/m, 25 W/m, 30 W/m ja 35 W/m. Nostetaan alan rajausta 100x100 metriin, jotta EED löytää optimaalisen kaivokentän. Muita lähtötietoja ei muuteta. Tulokset on esitetty taulukossa 5.15.

**Taulukko 5.15.** Optimaalinen kaivokenttä Pitkäniemessä. Maasta otettava teho (W/m), kaivojen lukumäärä, kaivojen syvyys (m), kaivojen välinen etäisyys (m), kaivokentän muoto, lämmönsiirtoaineen minimikeskilämpötila (°C) ja lämpökerroin (SPF).

Teho [W/m]	Lkm.	Syvyys [m]	Etäisyys [m]	Kenttä	T <sub>min</sub> [°C]
15	13	212	25	U	-5
15	14	204	25	suorak.	-5
15	16	178	25	suorak.	-5
15	36	219	11	suorak.	0
15	42	216	17	suorak.	0
15	49	191	17	suorak.	0
20	20	199	20	suorak.	-5
20	19	214	17	U	-5
20	24	174	17	suorak.	-5
20	81	211	12	suorak.	0
20	90	206	11	suorak.	0
20	100	193	11	suorak.	0
25	24	220	17	suorak.	-5
25	25	214	25	suorak.	-5
25	26	218	14	suorak.	-5
25	121	220	10	suorak.	0
30	34	215	11	suorak.	-5
30	36	204	20	suorak.	-5
30	36	205	11	suorak.	-5
30	Ei ratk.				0
35	49	204	17	suorak.	-5
35	56	207	14	suorak.	-5
35	64	185	14	suorak.	-5
35	Ei ratk.				0

15-35 W/m teholla (100x100 m rajaus) kentän kaivojen lukumäärä vaihtelee melko paljon (13-121 kpl). Jos lämmönsiirtoaineen minimikeskilämpötilan sallitaan olevan -5 °C, niin 13 kaivoa (syvyys 212 m) riittää tuottamaan 15 W/m. Kaivojen lukumäärä kasvaa huomattavasti, jos lämmönsiirtoaineen minimikeskilämpötila rajoitetaan 0 °C:een. Tämäkin osoittaa, että Pitkäniemen kaltainen pystykaivokenttä ei voi ottaa maasta lämpöä yli 15 W/m yhtämittäisesti 30 vuoden ajan (hetkellisesti ehkä mahdollista). Tässä ei oteta huomioon miten lämmönkeruupiirin lämmönsiirtoainepumpun sähkönkulutus eroaa kentän muodon muuttuessa.

## 5.2.2 Lämpökaivokenttä Helsingissä ja Sodankylässä

Lämpökaivokentän (U-putki, kaivoja 2 x 5, syvyys 200 m, etäisyys 20 m) sijainnin vaikutusta tutkitaan sen toimintaan. Taulukoissa 5.16 ja 5.17 verrataan lämmönsiirtonsteen lämpötiloja  $T_{\max}$  ja  $T_{\min}$ , jos sijaintipaikka on Helsinki tai Sodankylä.

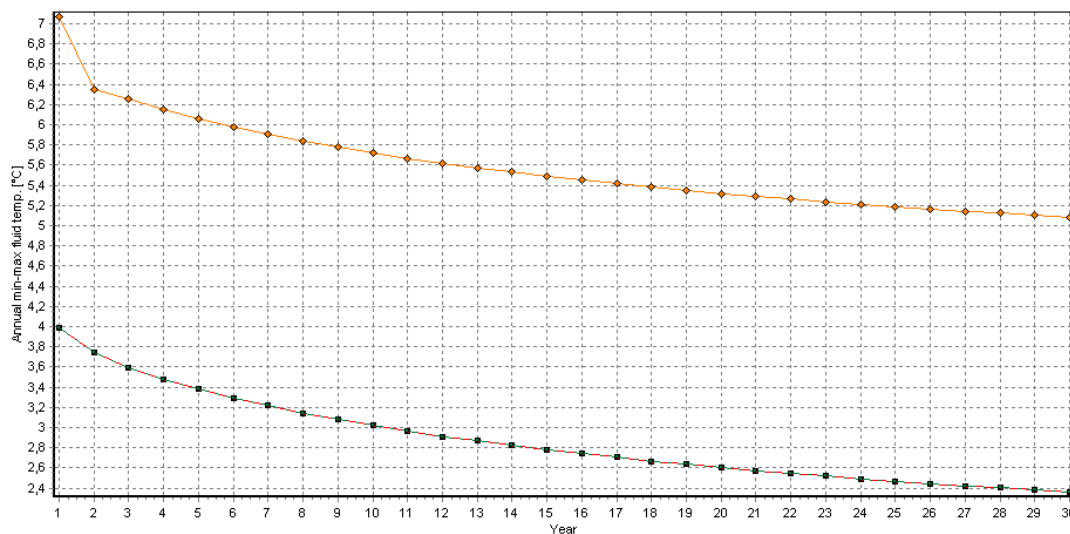
**Taulukko 5.16.** U-putkikaivokentän (2 x 5) maasta otettava lämpö vuodessa Helsingissä. Taulukossa on vain maasta otettava lämpö (ei sisällä lämpöpumpun sähköenergiaa).

$P_{\text{maa}}$	$P_{\text{maa, kok, 2000 m}}$	$E_{\text{maa}} (8760 \text{ h})$	$T_{\max}$	$T_{\min}$	SPF
[W/m]	[kW]	[MWh]	[°C]	[°C]	
35	70	613,2	-6,84	-25,9	3
30	60	525,6	-4,86	-21,19	3
25	50	438,0	-2,87	-16,48	3
20	40	350,4	-0,88	-11,77	3
15	30	262,8	1,11	-7,06	3
10	20	175,2	3,09	-2,35	3
5	10	87,6	5,08	2,36	3

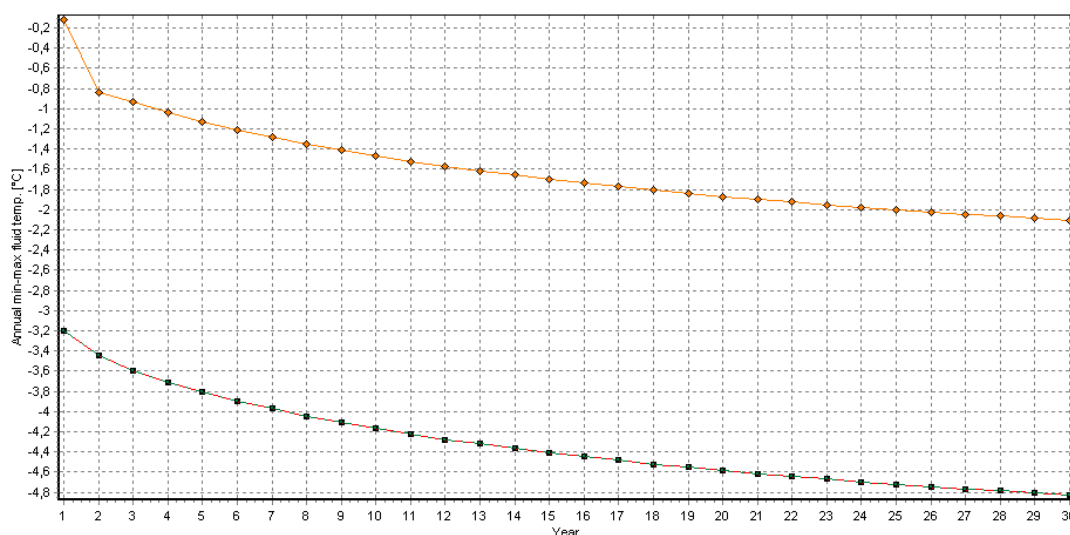
**Taulukko 5.17.** U-putkikaivokentän (2 x 5) maasta otettava lämpö vuodessa Sodankylässä. Taulukossa on vain maasta otettava lämpö (ei sisällä lämpöpumpun sähköenergiaa).

$P_{\text{maa}}$	$P_{\text{maa, kok, 2000 m}}$	$E_{\text{maa}} (8760 \text{ h})$	$T_{\max}$	$T_{\min}$	SPF
[W/m]	[kW]	[MWh]	[°C]	[°C]	
35	70	613,2	-14,03	-33,09	3
30	60	525,6	12,05	-28,38	3
25	50	438,0	-10,06	-23,67	3
20	40	350,4	-8,07	-18,95	3
15	30	262,8	-6,08	-14,25	3
10	20	175,2	-4,09	-9,54	3
5	10	87,6	-2,11	-4,83	3





**Kuva 5.8.** Helsinki, 5 W/m, U-putkikaivokenttä (2 x 5). Lämmönsiirtoaineen minimi- (alempi käyrä) ja maksimikeskilämpötila (ylempi käyrä). Aikajakso 30 vuotta.



**Kuva 5.9.** Sodankylä, 5 W/m, U-putkikaivokenttä (2 x 5). Lämmönsiirtoaineen minimi- (alempi käyrä) ja maksimikeskilämpötila (ylempi käyrä). Aikajakso 30 vuotta.

Taulukoista 5.16, 5.17 ja 5.18 havaitaan, että kaivokentän toiminta paranee Etelä-Suomea kohden. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötila on noin 6-8 °C korkeampi Helsingissä kuin Sodankylässä (kuvat 5.8 ja 5.9).

### 5.2.3 Lämpökaivokenttä aurinkoenergialla

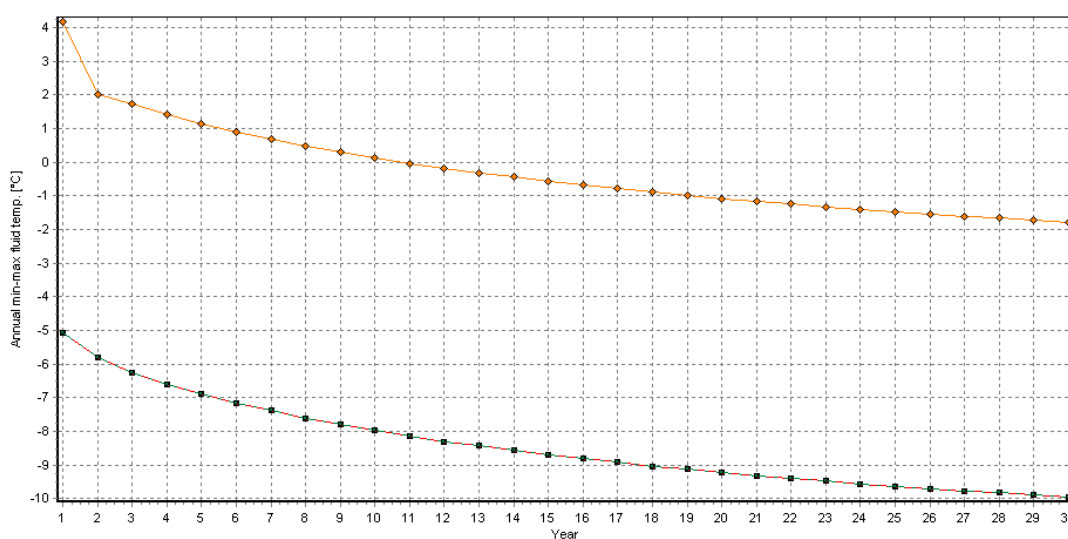
Lämmönsiirtonesteen keskimääräistä lämpötilaa voi nostaa esimerkiksi lämpökaivokentän toipumisella tai siirtämällä lämpöä kenttään. Toipumisessa lämpöpumppu pysäyte-

tään, kentästä ei oteta lämpöä. Lämpöä voidaan siirtää kaivokenttään esimerkiksi rakennuksesta (jäähdytys) tai aurinkokeräimellä.

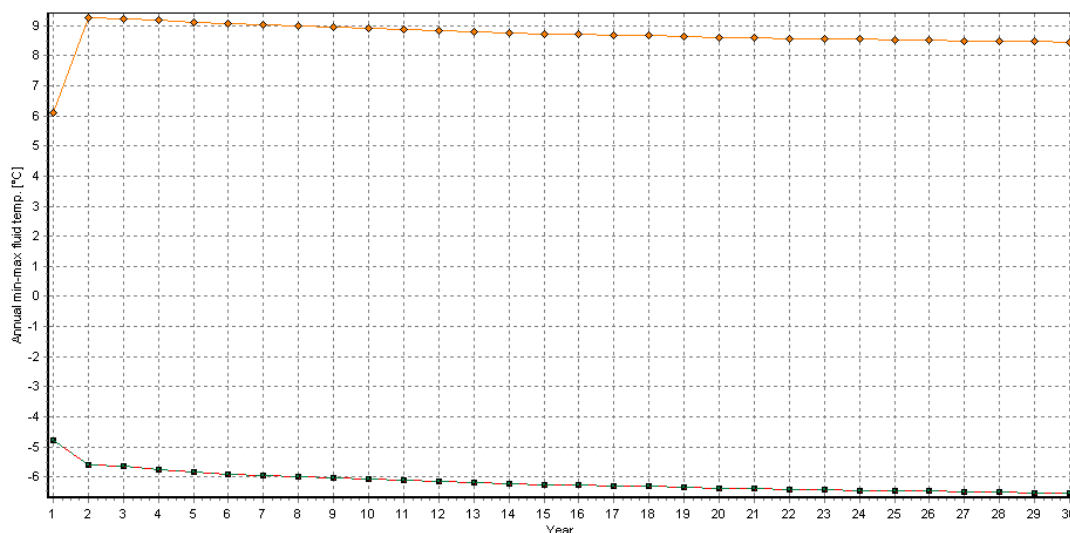
Aurinkokeräin tuottaa energiaa yleensä 250-400 kWh/m<sup>2</sup> vuodessa (Motiva Oy 2013b). Yksi vaihtoehto olisi aurinkoenergian vieminen lämpökaivoon aurinkokeräimellä kuvan 3.19 kytkennällä. Lämpöä syötetään kaivokenttään maaliskuun alusta lokakuun loppuun. Kustannukset voivat nousta merkittävästi usealla aurinkokeräimellä. Aurinkokeräinten vaikutusta tutkitaan, kun kuvan 5.3 lämpökaivokenttään (U-putki, kaivoja 2 x 5, syvyys 200 m, kaivojen etäisyys 20 m) viedään 200 MWh tai 400 MWh lämpöä vuodessa. Lämpöä syötetään kenttään maaliskuun alusta lokakuun loppuun. EED laskee miten  $T_{\max}$  ja  $T_{\min}$  muuttuvat, jos kenttään syötetään suoran jäähdytyksen tavoin aurinkoenergiaa. Tulokset on esitetty taulukossa 5.18 ja liite 3 sisältää EED:n laskelmat U-putkikaivokentälle (5 W/m, 200 MWh:n lämmönsyöttö kenttään).

**Taulukko 5.18.** Syötetyn lämmön vaikutus lämmönsiirtoaineen keskilämpötilaan.

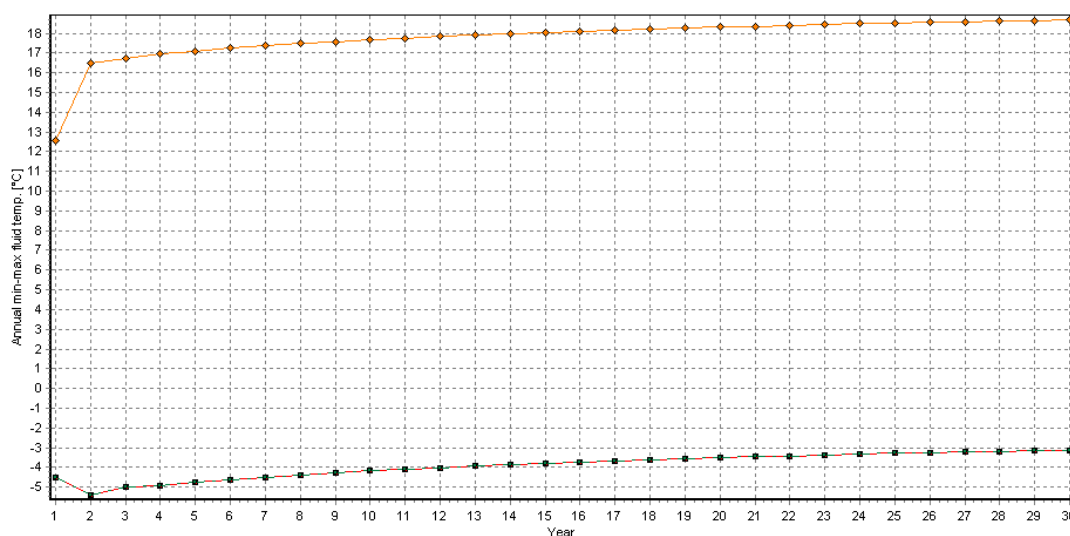
$P_{\text{maa}}$	$P_{\text{maa, kok, 2000 m}}$	$E_{\text{maa}} (8760 \text{ h})$	$T_{\max}$	$T_{\min}$	$T_{\max,200}$	$T_{\min,200}$	$T_{\max,400}$	$T_{\min,400}$
[W/m]	[kW]	[MWh]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
35	70	613,2	-9,74	-28,79	0,50	-25,37	10,74	-21,96
30	60	525,6	-7,75	-24,08	2,49	-20,66	12,72	-17,25
25	50	438,0	-5,76	-19,37	4,47	-15,95	14,71	-12,54
20	40	350,4	-3,77	-14,66	6,46	-11,24	16,70	-7,82
15	30	262,8	-1,79	-9,95	8,45	-6,53	18,69	-3,12
10	20	175,2	0,20	-5,24	10,44	-1,82	20,67	1,59
5	10	87,6	2,19	-0,53	12,43	2,88	22,66	6,22



**Kuva 5.10.** Lämmönsiirtoaineen minimi- (alempi käyrä) ja maksimikeskilämpötila (ylempi käyrä). Tehonotto 15 W/m kaivokentästä Pitkäniemessä ilman syötettävää lämpöä. U-putkikaivokenttä (2 x 5). Aikajakso 30 vuotta.



**Kuva 5.11.** Lämmönsiirtoaineen minimi- (alempi käyrä) ja maksimikeskilämpötila (ylempi käyrä). Tehonotto 15 W/m kaivokentästä Pitkäniemessä 200 MWh vuotuisella lämmönsyötöllä. U-putkikaivokenttä (2 x 5). Aikajakso 30 vuotta.



**Kuva 5.12.** Lämmönsiirtoaineen minimi- (alempi käyrä) ja maksimikeskilämpötila (ylempi käyrä). Tehonotto 15 W/m kaivokentästä Pitkäniemessä 400 MWh vuotuisella lämmönsyötöllä. U-putkikaivokenttä (2 x 5). Aikajakso 30 vuotta.

Kuvassa 5.10 15 W/m teholla lämmönsiirtoaineen keskilämpötila laskee melko jyrkästi. Kuvassa 5.11 lämmönotto kaivokentästä on hieman suurempi kuin lämmönsyöttö kenttään, joten  $T_{\max}$  ja  $T_{\min}$  laskevat melko hitaasti 30 vuodessa. Kuvassa 5.12 kaivokenttään syötetään lämpöä enemmän kuin siitä otetaan, joten  $T_{\max}$  ja  $T_{\min}$  nousevat hieman 30 vuoden aikana.

## 6 KAUKOLÄMPÖ

### 6.1 Kaukolämpö Suomessa, Ruotsissa ja Tanskassa

Kaukolämpö on Suomen yleisin lämmitysmuoto (taulukko 6.1). Kaukolämpö on ollut käytössä Suomessa 1950-luvulta asti. Se on kannattavampaa tiheästi rakennetuilla alueille ja suurissa rakennuksissa. Kaukolämpöä on saatavilla lähes jokaisessa kaupungissa ja taajamassa. Suurimmissa kaupungeissa kaukolämmön markkinaosuus on yli 90 prosenttia. Lähes kaikki asuinkerrostalot, suurin osa julkisista ja liikerakennuksista lämpiävät kaukolämmöllä. Seitsemän prosenttia omakotitaloista lämpiää kaukolämmöllä Suomessa. Noin puolet suomalaisista asuu kaukolämmitetyissä taloissa ja kaukolämpö kattaa lähes puolet lämpömarkkinoista. (Energiateollisuus ry 2013a)

**Taulukko 6.1.** Lämmityksen markkinaosuudet asuin- ja palvelurakennuksissa Suomessa vuonna 2010. (Energiateollisuus ry 2013a)

Lämmitysmuoto	2010 [%]
Kaukolämpö	45,8
Sähkö	20,4
Puu	13,3
Kevyt polttoöljy	9,8
Lämpöpumppu	8,0
Raskas polttoöljy	1,4
Muut	1,3
Yhteensä	100

Kaukolämmön hyvä energiatehokkuus perustuu sähkön ja lämmön yhteistuotantoon, sekä teollisuuden ja erilaisten prosessien jätelämpöön. Kaukolämpö hyödyntää sähkön- tuotannossa syntyvän lämmön (Combined Heat and Power, CHP). Kaukolämpöä tuotettiin 34 terawattituntia vuonna 2011. Suurin osa kaukolämmöstä tuotetaan Suomessa sähkön ja lämmön yhteistuotantona. Yhteistuotannon osuus kaukolämmöstä oli 72,5 prosenttia vuonna 2011. Suomen sähköstä kolmannes tuotetaan yhteistuotannolla. Pääosin kaukolämmön polttoaineina (taulukko 6.2) ovat maakaasu, kivihiili, turve ja puu. (Energiateollisuus ry 2012 ja 2013a)

**Taulukko 6.2.** Kaukolämmön polttoaineiden osuus Suomessa vuosina 2011 ja 2010. (Energiateollisuus ry 2012)

Polttoaine	2011 [%]	2010 [%]
Maakaasu	31,4	35,1
Kivihiili	23,3	21,6
Turve	17,6	17,8
Metsäpolttoaine	11,8	9,3
Teollisuuden puutähde	7,1	5,9
Raskas polttoöljy	2,9	4,8
Teollisuuden sekundäärilämpö	1,8	1,2
Sekapolttoaineet	1,7	1,6
Muut	1,1	1,3
Muut biopolttoaineet	1,0	1,1
Kevyt polttoöljy	0,3	0,3
Yhteensä	100	100

Ruotsissa kaukolämpöä tuotetaan myös lämpöpumpuilla. Vuonna 2011 lämpöpumpuilla tuotetun kaukolämmön osuus oli 7-8 % kaikesta tuotetusta lämpöenergiasta. Vuonna 2001 lämpöpumppujen osuus oli 12 % (Sahlin et al. 2004). Myös lämpöpumppujen kuluttama sähköenergia on tilastoitu ja siten on mahdollista laskea lämpökerroin (SPF), joka on hieman yli kolme (taulukko 6.3). Ruotsissa maakaasun (4 %), kivihiilen (3 %) ja turpeen (3 %) osuus kaukolämmöntuotannossa on melko pieni verrattuna Suomeen. Ruotsin kaukolämpöverkot saavat lämpöenergian suurimmaksi osaksi biopolttoaineista 41 %:n osuudella. (Svenks Fjärrfärme 2013)

**Taulukko 6.3.** Lämpöpumppujen tuottama lämpöenergia kaukolämpöverkkoon Ruotsissa, lämpöpumppujen kuluttama sähköenergia ja lämpökerroin (SPF). (Svenks Fjärrfärme 2013)

Vuosi	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004
<b>lämpöenergia [GWh]</b>	3921,3	4574,5	4659,7	4768,2	5164,4	5064,2	5492,9	5875,9
<b>sähköenergia [GWh]</b>	1264,6	1427,8	1436,6	1564,6	1643,1	1553,9	1780,6	1895,6
<b>SPF</b>	3,10	3,20	3,24	3,05	3,14	3,26	3,08	3,10

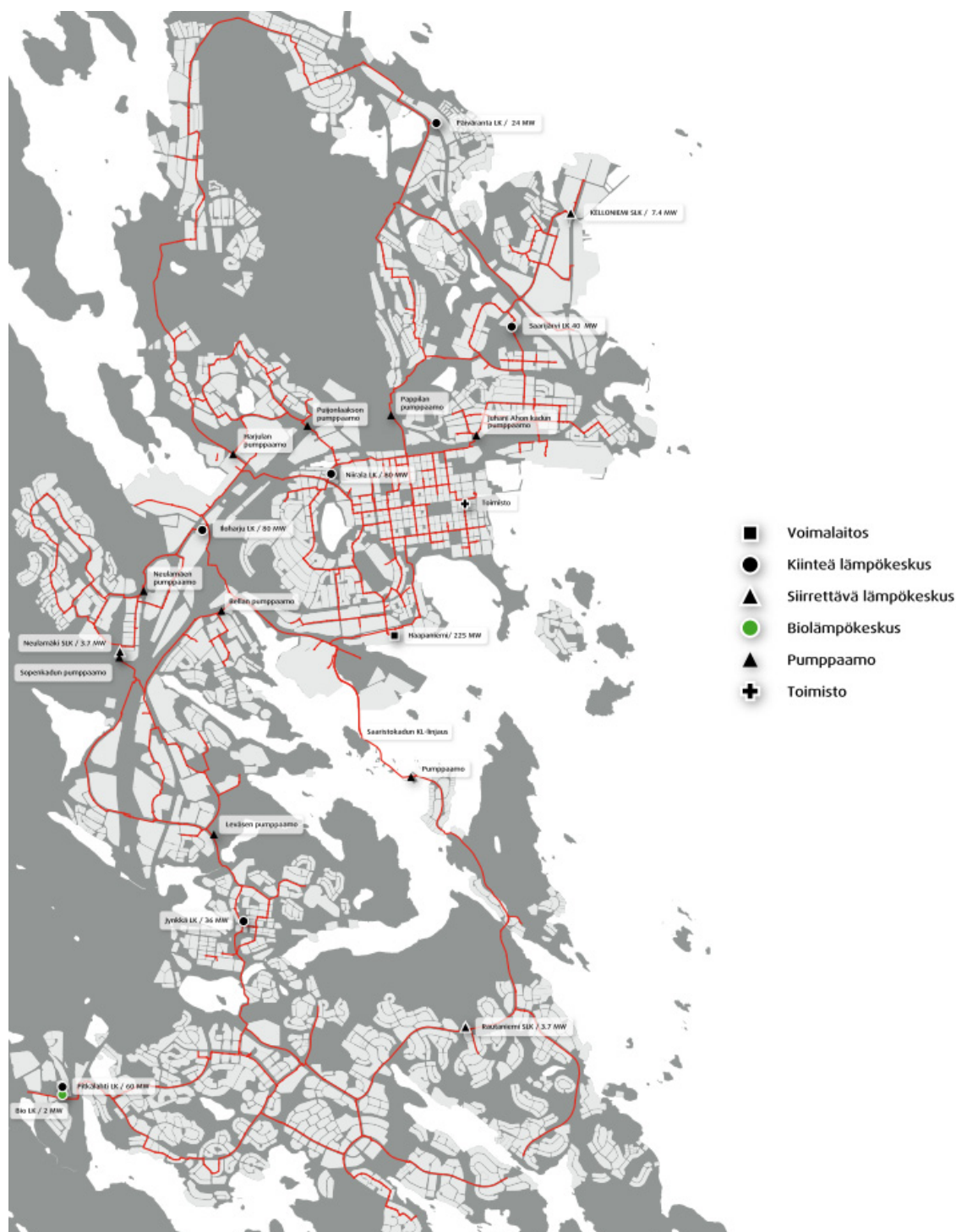
Münster et al. (2012) tutkivat kaukolämmön tulevaisuutta Tanskassa. Tutkimuksessa ehdotettiin, että suurten lämpöpumppujen avulla voitaisiin siirtää lämpöenergiaa kaukolämpöverkkoon ja lämpöpumput toimisivat ylijäämä sähköllä, jota saadaan tuulivoimaloista tuulivoimatoimien ollessa suotuisat. Suuret kivihiiltä polttoaineenaan käyttävät CHP-laitokset muutetaan biopolttoaineita käyttäviksi tai poistetaan käytöstä. CHP-laitosten käytöstä poistamisen vuoksi tulisi löytää uusiutuvia energiamuotoja lämpöenergiantuotantoon. Myös teollisuusprosessien hukkalämpöä voidaan hyödyntää kauko-

lämmöntuotannossa. Rakennuksen lämpöeristeiden ja saneerauksen lisääminen pienentävät kaukolämmön kysyntää. Rakennusten lämpötehokkuuden lisäämistä saattaa hillitä maakaasulämmitteisten rakennusten siirtyminen kaukolämpöön tai esimerkiksi lämpöpumppuun. (Münster et al. 2012)

## 6.2 Kaukolämpöverkko

Paikallinen tai alueellinen kaukolämpöverkko rakennetaan paikkoihin, joissa on tarvittava asukastiheys. Kaukolämpöä tuotetaan lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksissa tai pelkästään lämpöä tuottavissa lämpökeskuksissa. Lämpö siirtyy asiakkaille kaukolämpöverkossa kiertävän kuuman veden välityksellä. Kaukolämpöverkon putkisto koostuu kuumasta meno- ja kylmästä paluuputkesta. Kaukolämpöverkon kuuma vesi luovuttaa lämpöä asiakkaalle lämmönsiirtimen välityksellä asiakkaan tiloissa lämmönjakokeskuksessa. Sen jälkeen jäähtynyt vesi palaa takaisin lämmöntuotantolaitokseen. Lämmönjakokeskusta ei tarvitse juuri huoltaa ja siellä on lämpöenergian mittauslaite, jolla suoritetaan energian laskutus. Lämpö siirtyy asiakkaan rakennuksen lämmitys- ja käyttöveden verkkoihin. Kaukolämpövesi ei kierrä rakennusten lämmitys- ja käyttövesiverkoissa. Kaukolämpö on lähes aina täysin toimintavarmaa, koska kaukolämpöverkot ovat useimmiten silmukoituja (kuva 6.1). Silmukoitu verkko takaa asiakkaiden lämmönsaannin useammalta kuin yhdeltä syöttösuunnalta. Lämmöntoimituksen keskeytykset ovat harvinaisia. (Pöyry 2011; Energiateollisuus ry 2013b, 2013c)

Asiakkaille tulevan kaukolämpöveden lämpötila on 65-115 °C ja tuotantolaitoksiin saapuvan paluueden lämpötila on 40-60 °C. Kaukolämpöveden lämpötila vaihtelee sään mukaan ja se on alimmillaan kesällä, koska lämpöä tarvitaan lähinnä käyttöveden lämmittämiseen. Rakennusten lämmityksen osuus on merkittävä talvella. Huonelämpötilan suositus on 20-22 °C ja lämpimän käyttöveden lämpötilan on oltava vähintään 55 °C. (Energiateollisuus ry 2013b, 2013d)



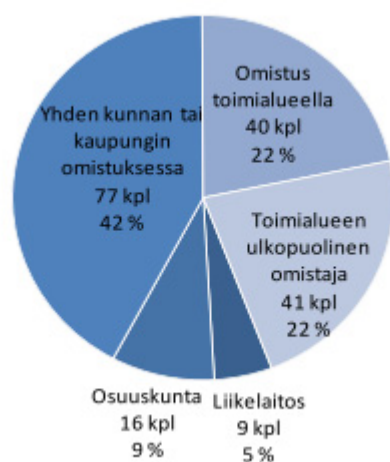
**Kuva 6.1.** Kuopion kaukolämpöverkko. Kaukolämpöverkoston runkoputkisto on merkitty punaisella. (Kuopion Energia Oy 2013)

### 6.3 Kaukolämmön asema

Kaukolämmön suurimmaksi kilpailijaksi on noussut maalämpö. Maalämmön etuina ovat ympäristöystävällisyys ja se on lähes päästötön energiamuoto. Maalämpö on lähes täysin uusiutuvaa energiaa, ainoastaan lämpöpumpun tarvitsema sähkö ei välttämättä

ole uusiutuvaa energiaa riippuen sähkön tuotantotavasta. Suurin osa kaukolämmöstä Suomessa tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla ja turpeella, joten sitä ei voi pitää uusiutuvana tai kovin ympäristöystävällisenä lämpöenergian tuotantotapana. Tulevaisuudessa kaukolämpö voi saada lisää asiakkaita öljy- ja kaasulämmitteisistä kohteista, kun taas se voi menettää asiakkaita maalämmölle. (Pöyry 2011)

Suomessa kaukolämmön tuotannosta ja jakelusta vastaa alueellisesti ja paikallisesti sama energiayhtiö. Suomen kaukolämpöliiketoiminta on vahvasti kunnallisessa tai asiakasta lähellä olevan tahon omistuksessa (kuva 6.2). Kaukolämpöyhtiöt ovat osa jotain energiakonsernia. (Pöyry 2011; Viljanen et al. 2011)



**Kuva 6.2.** Kaukolämpöyhtiöiden omistajuus Suomessa, 183 yhtiötä. (Viljanen et al. 2011)

Kaukolämpöyhtiöt myyvät loppuasiakkaille yhtiön ulkopuoliselta tuottajalta ja/tai omalla tuotantona hankittua lämpöä. Kaukolämpöyhtiöiden ostaman lämmön (8 000 GWh) osuus oli 23 % nettohankinnasta (38 000 GWh) vuonna 2009. Kaukolämpöä ostetaan yleensä alueellisesta tai paikallisesta tuotantolaitoksesta. Kaukolämpöyhtiöllä voi olla omistusosuus tuotantolaitoksesta. Lämpöä ostetaan kuitenkin usein toisen osapuolen omistamasta tuotantolaitoksesta. (Viljanen et al 2011)

Ruotsissa ei ole yksimielisyyttä onko kaukolämpömarkkinoilla luonnollinen monopoli vai onko kaukolämpö vain yksi energiamuoto lämpömarkkinoilla, kuten lämpöpumppu. Energiayhtiöt ja Ruotsin kaukolämpöyhdistys (Swedish district heating association) ovat sitä mieltä, että ne kilpailevat yleisesti lämpömarkkinoilla muita lämmitysmuotoja vastaan. Kaukolämpöä käyttävät asiakkaat pitävät kaukolämpömarkkinoita luonnollisena monopolina. Kaukolämpöjakeluverkko (putkisto) muistuttaa luonnollista monopolia, koska investointikustannukset tekevät käytännössä mahdottomaksi toisen kilpailevan jakeluverkon rakentamisen. Kaukolämpöjärjestelmä on luonnollinen monopoli, jos paikallisilla markkinoilla on vain yksi kaukolämmön tarjoaja. Energiayhtiön on helppo



saada rahaa nostamalla kaukolämmön hintaa. Asiakkaan on vaikea vaihtaa lämmitysmuotoa hinnan tai tilanpuutteen vuoksi. (Magnusson et al. 2011)

## 6.4 Kaukolämpömarkkinoiden avaaminen kilpailulle

Kaukolämpömarkkinoiden avaamista kilpailulle on tutkittu Ruotsissa ja Suomessa. Kaukolämmöllä on merkittävä osuus myös Ruotsin lämpömarkkinoilla. Yli 50 % rakennuksista lämpiää kaukolämmöllä Ruotsissa. Kaukolämpöä käytetään eniten Pohjois-Euroopassa. Suomen ja Ruotsin lisäksi kaukolämpöä käytetään esimerkiksi Tanskassa, Liettuassa ja Itävallassa. Norjassa kaukolämmön osuus lämmitysmuodoissa on pieni, mutta kuitenkin se on kasvussa (Euroheat & Power 2013; Statistisk sentralbyrå 2013). (Söderholm et al. 2011)

Suomalaista ja ruotsalaista kaukolämpöverkoston voidaan pitää luonnollisena monopolina. Luonnollisia monopoleja esiintyy aloilla, joilla täytyy rakentaa suuri fyysinen verkosto, kuten kaukolämpöverkko. Luonnollisen monopolin tehokkuutta puolustetaan korkeilla alkuinvestointikustannuksilla (kaukolämpöverkon rakennuskustannukset). Luonnollinen monopoli voidaan murtaa ja lisätä kilpailua kolmannella osapuolella, eli avaamalla markkinat kilpailulle. Kolmannen osapuolen salliminen (Third party access, TPA) kaukolämpömarkkinoilla merkitsee lämmöntuotannon ja lämmön jälleenmyynnin erottamista toisistaan avaamalla kaukolämpöverkko kilpailijoille. (Wårell & Sundqvist 2009; Söderholm et al. 2011)

Pohjoismaiden (Ruotsi, Tanska, Suomi ja Norja) sähkömarkkinat vapautettiin kilpailulle vuosina 1991-2000. Nykyisiä pohjoismaisia sähkömarkkinoita voidaan pitää melko menestyksekkäänä ja onnistuneena. Pohjoismaisia sähkömarkkinoita on auttanut menestymään suuri vesienenergian osuus, liiketoiminnan läpinäkyvyys, suuret kansalliset energia-yhtiöt ovat menettäneet osuuttaan sähkömarkkinoilla, voimakas poliittinen tuki ja väärinkäytösten vähyys. Ruotsin kaukolämpömarkkinat eroavat merkittävästi pohjoismaisista sähkömarkkinoista energiantuotannon, jakelun ja verkoston koon takia. Kaukolämpömarkkinoilla lämmöntuotanto ja jakelu ovat tiukemmin sidoksissa toisiinsa kuin sähkömarkkinoilla. Kaukolämpöverkostot ovat paikallisia, kun taas pohjoismainen sähköverkko on yhtenäinen. Kilpailu ei toimisi samoin kaukolämpömarkkinoilla kuin sähkömarkkinoilla suurten erojen vuoksi. (Wårell & Sundqvist 2009)

Maakaasumarkkinoiden avaaminen Euroopassa ei ole onnistunut yhtä hyvin kuin pohjoismaisten sähkömarkkinoiden avaaminen. Tukkuhinnat ovat nousseet, vaikeus päästä maakaasumarkkinoille ja toimittajien valinta ovat tuottaneet vaikeuksia. Tuotannon ja jakelun erottaminen ei ole täysin onnistunut. Vanhat suuret yhtiöt hallitsevat edelleen markkinoita, liiketoiminta ei ole kovin läpinäkyvää ja vain pieni osa kaupasta käydään julkisesti. Maakaasumarkkinat muistuttavat enemmän kaukolämpömarkkinoita kuin sähkömarkkinoita. Kuitenkin suuria eroja löytyy maakaasu- ja kaukolämpömarkkinoi-

den välillä, esimerkiksi kaukolämpöverkosto on paikallinen ja maakaasuverkosto Euroopan laajuinen. (Wårell & Sundqvist 2009)

Monopolin murtamiseksi on olemassa erilaisia malleja: säädetty kolmannen osapuolen markkinoilletulo (Regulated third party access, RTPA), neuvoteltu kolmannen osapuolen markkinoilletulo (Negotiated third party access, NTPA) ja yhden ostajan -malli (Single-buyer model, SBM). Kaikissa malleissa kolmas osapuoli (Third party) voi liittyä kaukolämpöverkkoon ja toimittaa lämpöä asiakkaille. (Wårell & Sundqvist 2009; Söderholm et al. 2011)

#### **6.4.1 Säädetty kolmannen osapuolen markkinoilletulo (RTPA)**

Kolmannella osapuolella on rajoittamaton oikeus liittyä kaukolämpöverkkoon. Verkon omistajan on pakko sallia yrityksen liittyminen kaukolämpöverkkoon, jos yritykselle asetetut vaatimukset täyttyvät. Lämmöntuottaja maksaa kiinteän maksun verkostoon liittymisestä. Tehokkaan kilpailun edellytys on erottaa verkosto- ja tuottajatoiminnot toisistaan. Hinnoittelu olisi samanlainen kuin sähkömarkkinoilla, asiakas maksaa verkostomaksun ja maksun käytetystä lämmöstä. Kilpailun edut tulisivat esille parhaiten tässä mallissa, mutta lopputulosta on vaikea arvioida. Kaukolämmön hinta nousisi joissakin yrityksissä ja joissakin yrityksissä laskisi. (Wårell & Sundqvist 2009; Söderholm et al. 2011)

Tämä malli on toiminut hyvin pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla. Kuitenkin sähkö- ja kaukolämpömarkkinoiden suurien erojen vuoksi RTPA-malli ei todennäköisesti toimisi yhtä hyvin kaukolämpömarkkinoilla. Tämän mallin soveltaminen kaukolämpömarkkinoilla aiheuttaisi samanlaisia ongelmia kuin Euroopan maakaasumarkkinoilla. (Wårell & Sundqvist 2009; Söderholm et al. 2011)

#### **6.4.2 Neuvoteltu kolmannen osapuolen markkinoilletulo (NTPA)**

NTPA-malli eroaa RTPA-mallista siten, että verkoston omistaja ja uusi verkostoon mahdollisesti liittyvä yritys neuvottelevat liittymisehdoista. Tämä malli soveltuu todennäköisesti paremmin kaukolämpömarkkinoille kuin RTPA-malli, koska NTPA-mallissa voidaan paremmin ottaa huomioon kaukolämpöverkkojen erilaisuus. Tämä on NTPA-mallin etu, koska kaikki kaukolämpöverkot ovat erilaisia. Näin jokaiselle kaukolämpöverkolle saataisiin sopiva markkinaratkaisu. (Wårell & Sundqvist 2009; Söderholm et al. 2011)

Hallintokustannukset saattaisivat nostaa kaukolämmön hintaa. Esimerkiksi viranomaiset olisivat neuvotteluissa mukana ja heillä olisi pääsy verkoston tietoihin. Myös kaukolämpöverkkojen suuri lukumäärä merkitsisi enemmän neuvotteluja ja sääntelyä. Kilpailun tuottamien etujen toteutuminen on epävarmaa, koska nykyinen hallitseva kaukolämpöyhtiö olisi todennäköisesti myös johtava yhtiö tulevaisuudessa. Kilpailun toteutumi-

nen edellyttää verkosto- ja tuotantotoimintojen erottamista. Näiden toimintojen erottaminen saattaa lisätä ongelmia, koska nämä ovat teknisesti ja taloudellisesti riippuvaisempia toisistaan kaukolämpömarkkinoilla kuin esimerkiksi sähkömarkkinoilla. Siten lisääntynyt kilpailu voi kasvattaa välittömiä kustannuksia. (Wårell & Sundqvist 2009; Söderholm et al. 2011)

### **6.4.3 Yhden ostajan -malli (SBM)**

Tässä mallissa kaikilla kaukolämpöverkon asiakkailta on oikeus neuvotella sopimuksista kaikkien mahdollisten tarjoajien kanssa, mutta tarjolla olisi vain yksi lämpöä myyvä yhtiö. Tämä yhtiö ostaa sovitun määrän lämpöä asiakkaan valitsemalta tarjoajalta ja myy lämmön neuvoteltuun hintaan lisättynä siirto- ja järjestelmämaksut. Teoriassa tämä malli johtaa yhtä tehokkaaseen kilpailuun kuin RTPA- ja NTPA-mallit. SB-malli muistuttaa enemmän NTPA-mallia, koska siirto- ja järjestelmämaksut neuvotellaan erikseen eri kaukolämpöverkoissa. SB-malli eroaa NTPA-mallista siten, että uusi tarjoaja ei myy lämpöä loppuasiakkaalle. Siis tässä mallissa on tuottajamarkkinat, ei vähittäismyyntimarkkinoita. (Wårell & Sundqvist 2009; Söderholm et al. 2011)

SB-malli huomioi kaukolämpöverkoston paikallisuuden kuten NTPA-malli. Toinen etu on tuottajamarkkinat. Tuottaja ei myy lämpöä suoraan asiakkaalle, vaan Single-buyer-yhtiölle. Näin tuottajalle ei tule ylimääräisiä kuluja tai velvoitteita. Haittana on, että Single-buyer-yhtiö voi nostaa hintaa oman edun vuoksi, jos tuotantoa ja jakelua ei ole täysin erotettu toisistaan. Asiakkaalla on oikeus saada lämpöä haluamaltaan tuottajalta ja Single-buyer-yhtiöllä on velvoite toimittaa tämä lämpö. Tämän vuoksi kaukolämpöverkostoa tulisi todennäköisesti muuttaa ja kaukolämmön hinta saattaisi nousta. SB-mallissa markkinat eivät ole yhtä avoimet kuin edellisissä malleissa, koska tässä vain yksi yhtiö (Single-buyer) myy lämpöä asiakkaille. Tämä ei välttämättä olisi ongelma, koska uudet tuottajat todennäköisesti eivät olisi energiayhtiöitä, esimerkiksi teollisuuden hukkalämpö. Tässä mallissa teollisuuden hukkalämmöstä saattaisi tulla suositumpaa kaukolämpönä pienten marginaalikustannusten vuoksi. Kaikkien asiakkaiden halutessa halvempaa hukkalämpöä syntyisi ongelmia. (Wårell & Sundqvist 2009; Söderholm et al. 2011)

### **6.4.4 Mallien vertailu**

RTPA:lla saattaa olla pieni edistävä vaikutus kilpailuun ja suuri vaikutus kaukolämpöverkon kustannustehokkaaseen ylläpitoon, koska kaukolämpöverkot ovat paikallisia. Kilpailun avaamisen jälkeen kuitenkin todennäköisesti yksi yritys hallitsisi paikallisia lämpömarkkinoita. Lisäksi lämmöntuotanto ja -jakelu ovat toisistaan hyvin riippuvaisia, enemmän kuin esimerkiksi pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla. Muutokset lämmöntuotannossa vaikuttaisivat paljon koko kaukolämpöverkon muutoksiin ja optimointiin. NTPA ja SB-malli voisivat tarjota tehokkaamman markkinamallin, mutta myös ne sisäl-

täisivät ongelmia koko kaukolämpöjärjestelmän optimoinnissa. (Wårell & Sundqvist 2009; Söderholm et al. 2011)

Kaukolämpömarkkinoiden läpinäkyvyyttä tulisi lisätä tarkkailemalla tuottajahintoja. Läpinäkyvyys lisäisi painetta kaukolämmön hintaan. Tuotanto- ja investointikulujen lisääntynyt läpinäkyvyys todennäköisesti merkitsisi kaukolämmön hinnan muodostumista lähelle rajakustannuksia, mikä varmistaisi kustannustehokkaammat kaukolämpömarkkinat. (Wårell & Sundqvist 2009; Söderholm et al. 2011)

Aluksi kaukolämpömarkkinat kannattaa avata siellä missä avoimen kilpailun edut tulevat todennäköisesti parhaiten esiin. Kaukolämpömarkkinat kannattaisi avata kilpailulle ensin isoimmista verkostoista, kuten Tukholmassa, Ruotsissa. Tukholman kaukolämpöverkosto on suuri ja verkostossa paljon lämmöntuotantolaitoksia, joten vapaa kilpailu voisi toimia hyvin siellä. Tukholman kaukolämmön hinnoista on ollut paljon erimielisyyksiä. Vapaa kilpailu suurissa verkostoissa auttaisi arvioimaan kilpailun toimimista pienemmissä verkostoissa. Kaukolämmön ominaisuuksien vuoksi NTPA soveltuisi paremmin kaukolämpömarkkinoille kuin RTPA. Markkinoilla tulisi olla erilaiset säännöt erilaisissa verkostoissa, eikä samat säännöt koko maassa, koska verkostojen erojen vuoksi ei saavutettaisi optimiratkaisua. Minimivaatimusten asettaminen verkostoon liittymisen ehdoksi olisi suotavaa. (Wårell & Sundqvist 2009; Söderholm et al. 2011)

Kilpailun avaamisen vaikutuksia on tärkeä tutkia eri kaukolämpöverkostoissa tulevaisuudessa. Esimerkiksi kaikki Ruotsin kaukolämpöverkostot ovat erilaisia ja siten niissä ilmenisi erilaista kilpailua. Kilpailu tulisi olemaan erilaista eri kaukolämpöverkoissa ja säännöt vaihtelisivat verkostoittain. (Wårell & Sundqvist 2009)

#### **6.4.5 Kööpenhaminan kaukolämpöverkosto**

Kööpenhaminassa, Tanskassa on monta paikallista lämmönjakeluyhtiötä ja useita itsenäisiä lämmöntuottajia. Tietyt yhtiöt ovat vastuussa lämmönvälityksestä, lämmönostosta yhteistuotanto- ja jätteenpolttolaitoksista sekä lämmönmyynnistä lämmönjakeluyhtiöille. Kunta omistaa lämmönvälitysyhtiöt, kun taas lämmönjakeluyhtiöt ovat kunnan tai osuuskunnan omistamia. Kööpenhaminassa on yksi kaukolämpöverkko, jota hallitsee kaksi lämmönvälitysyhtiötä. Lämmönvälitysyhtiöt ostavat lämmön tukkumyyntipörssistä. Lämmöntarve viikon jokaiselle tunnille arvioidaan sääennusteen mukaan. Lämmöntuottajien tarjoukset perustuvat heidän tarjolla olevaan lämmöntuotantokapasiteettiinsa ja lämmöntuotannon rajakustannuksiin. Lämmöntuottajille maksettava lämmön hinta lasketaan tarjonnan ja kysynnän perusteella jokaiselle tunnille, mutta hinta on keskiarvotettu 24:lle tunnille. (Grohnheit 2003)

Käytännössä kaksi lämmöntuottajaa omistaa yhteistuotantolaitokset (CHP). Jätteenpoltoista saatava lämpö ei osallistu lämpömarkkinoille, koska sitä tuotetaan kattamaan pe-

ruskuormaa pienillä rajakustannuksilla. Kauppaa käydään torstaisin tulevalle viikolle. Lämpökauppa on toiminut näin usean vuoden ajan. Välitysyhtiöt myyvät lämmön jakeluyhtiöille alueillaan. Kuten muidenkin energiayhtiöiden tariffit Tanskassa, tämä myyntitariffi muodostuu myös kiinteästä ja muuttuvasta osasta. (Grohnheit 2003)

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Lämpökaivon ja sen ympäristön lämmönsiirtoon vaikuttavat monet eri tekijät. Kalliope-  
rän ominaisuudet, kaivon geometriset ominaisuudet, lämmönsiirtoputken ja -aineen  
ominaisuudet, täyteaineen ominaisuudet, usean lämpökaivon vaikutukset toisiinsa,  
luonnollinen konvektio ja pohjaveden virtaus vaikuttavat lämmönsiirtoon pystysuorassa  
lämpökaivossa. Pohjavesivirtauksen ja luonnollisen konvektion vaikutusta on vaikea  
arvioida vedellä täytetyssä lämpökaivossa. Niillä saattaa olla lämmönsiirtoa tehostava  
vaikutus. Lämpökaivot saattavat olla syvällä hyvinkin vinoja, mikä voi vaikuttaa esi-  
merkiksi lämmönsiirtoputken sijaintiin kaivossa ja sijaintiin viereiseen kaivoon verrat-  
tuna. Lämmönsiirtoputken sijainti vaikuttaa myös lämmönsiirtoon kaivossa, putken si-  
säänmeno- ja ulostulokanavien tulisi olla mahdollisimman erillään toisistaan ja mahdol-  
lisimman lähellä kaivon seinää. Näin saavutetaan pieni lämpökaivon lämpövastus ja  
lämmönsiirto on tehokasta. Lämmönsiirtoputken tyypillä (tavallinen U- ja koaksiaali-  
putki) ei näyttäisi olevan suurta merkitystä lämmönsiirtoon lämpökaivossa. Vesistön  
sedimentissä voi esiintyä melko korkeita lämpötiloja verrattuna esimerkiksi maaperään  
samalla syvyydellä. Sedimenttilämpö on aurinkoenergiaa.

Lämmönsiirtoa lämpökaivon ympäristössä voidaan mallintaa esimerkiksi äärettömällä  
viivalähdemallilla, äärellisellä viivalähdemallilla tai äärettömällä sylinterilähdemallilla.  
Lämpökaivon lämpövastus voidaan määrittää kokeellisesti, numeerisesti ja analyttises-  
ti. Kokeellinen menetelmä (TRT) on paras, mutta kallein keino selvittää lämpökaivon  
lämpövastus.

EED-ohjelmalla etsittiin optimaalista lämpökaivon ja lämpökaivokentän mitoitusta.  
Lämpökaivojen mitoitusehdotuksissa havaittiin kolme asiaa. Kaksi kaivoa vastaa karke-  
asti yhteissyvyydeltään yhden kaivon syvyyttä. Toinen havainto on, että kahden kaivon  
välinen etäisyys (15 m tai 20 m) ei vaikuta merkittävästi kaivojen mitoitussyvyyteen.  
Edellistä näyttäisi tukevan uusi suositus uudessa Ympäristö oppaassa (Juvonen ja La-  
pinlampi 2013), jossa uusi suositeltava lämpökaivojen välinen minimietäisyys on 15  
metriä. Vanhassa Ympäristö oppaassa (Juvonen 2009) lämpökaivojen välinen suositel-  
tava minimietäisyys oli 20 metriä. Kolmas havainto on, että lämpökaivokentän muoto ei  
vaikuta merkittävästi kaivojen mitoitussyvyyteen, jos kaivojen väliset etäisyydet eivät  
muutu. EED:llä mallinnettiin Nokian Pitkäniemen kaltaista pystysuoraa lämpökaivo-  
kenttää. Täsmälleen samanlaisen kentän mallintaminen ei onnistunut, koska EED:ssä ei  
ole uudentyyppisen REFLA-putken mallia ja kaivokentän lämmönsiirtoputkien täytyy  
olla malliltaan samanlaisia. Pitkäniemen lämpökaivokentässä (2 x 5) on lämmönsiirto-

putkina U- ja REFLA-putkia. EED:n simulointitulosten mukaan 2 x 5 kaivokentästä saa melko pienen tehon kaivometriä (noin 5 W/m) kohden, jos kenttä on yhtämittaisessa käytössä. Kaivokentän palautuminen tai lämmön syöttö siihen on suotavaa yhtämittaisessa käytössä. Kaivokenttä toimisi hieman paremmin, jos kaivokenttää syötettäisiin esimerkiksi lämpöä aurinkokeräimillä. Useat aurinkokeräimet voivat nostaa kohteen kustannuksia huomattavasti.

Kilpailun avaamista kaukolämpömarkkinoilla on tutkittu Ruotsissa ja Suomessa. Kilpailun avaamiselle on olemassa kolme mallia. Mallit ovat säädetty kolmannen osapuolen markkinoilletulo (Regulated third party access, RTPA), neuvoteltu kolmannen osapuolen markkinoilletulo (Negotiated third party access, NTPA) ja yhden ostajan -malli (Single-buyer model, SBM). Kaikissa malleissa kolmas osapuoli (Third party) voi liittyä kaukolämpöverkkoon ja toimittaa lämpöä asiakkaille. Kaukolämpömarkkinat kannattaisi avata kilpailulle ensin isoimmista verkostoista, kuten Tukholman kaukolämpöverkosto. Tukholman kaukolämpöverkosto on suuri ja verkostossa paljon lämmöntuotantolaitoksia, joten vapaa kilpailu voisi toimia hyvin siellä. Kaukolämmön ominaisuuksien vuoksi NTPA-malli soveltuisi paremmin kaukolämpömarkkinoille kuin RTPA-malli. Markkinoilla tulisi olla erilaiset säännöt erilaisissa kaukolämpöverkostoissa, eikä samat säännöt koko maassa. Verkostojen erojen vuoksi ei saavutettaisi optimiratkaisua, jos kaikkialla olisi samat säännöt. Kilpailu tulisi olemaan erilaista eri kaukolämpöverkoissa ja säännöt vaihtelisivat verkostoittain. Kööpenhaminan kaukolämpömarkkinoilla on ollut kilpailua jo useamman vuoden ajan.

## LÄHTEET

Acuña, J. 2010. Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchangers. Licentiate Thesis. Tukholma. Kungliga Tekniska högskolan, Energy and Environmental Technology.

Acuña, J. 2013. Distributed thermal response tests – New insights on U-pipe and Coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes. Doctoral Thesis. Tukholma. Kungliga Tekniska högskolan, Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration.

Aittomäki, A., Aalto, E., Alijoki, T., Hakala, P., Hirvelä, A., Kaappola, E., Mentula, J., Seinelä, A. 2008. Kylmäteknikka. 3. painos. Helsinki. Suomen Kylmähdistys r.y. 406 s.

Al-Khoury, R. 2012. Computational Modeling of Shallow Geothermal Systems. Taylor & Francis Group. Lontoo, UK. 233 s.

Andersson, J. 2008. Geothermal Energy Study. Master of Science thesis. Åbo Akademi University, Faculty of Technology, Turku.

Banks, D. 2009. Introduction to Thermogeology Ground Source Heating and Cooling. Wiley-Blackwell. Hoboken, NJ, USA. 351 s.

Bannet, J., Claesson, J., Hellström, G. 1987. Multipole Method to Compute the Conductive Heat Transfer to and between Pipes in a Composite Cylinder. Notes on Heat Transfer 3-1987. Department of Building Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Ruotsi.

Baudoin, A. 1988. Stockage intersaisonnier de chaleur dans le sol par batterie d'échangeurs baionnette verticaux: modèle de prédimensionnement. Ph.D. Thesis, Université de Reims, Ranska. 183 s.

Cabeza, L. F. 2012. Thermal Energy Storage. Comprehensive Renewable Energy. Vol. 3. s. 211-253.

Carslaw, H. S., Jaeger, J. C. 1947. Conduction of Heat in Solids. Oxford University Press, Oxford, UK, 510 s.

Çengel, Y. A. 2006. Heat and Mass Transfer, A Practical Approach, 3rd Edition. McGraw-Hill. New York.

EED-ohjekirja, 2008. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: <http://www.buildingphysics.com/manuals/EED3.pdf>.



EED 3.16 – Earth Energy Designer versio 3.16. 2010.

Energiateollisuus ry. 2013a. Kaukolämmitys. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013].  
<http://energia.fi/koti-ja-lammitys/kaukolammitys>.

Energiateollisuus ry. 2013b. Kaukolämmön toimintaperiaate. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. <http://energia.fi/koti-ja-lammitys/kaukolammitys/toimintaperiaate>.

Energiateollisuus ry. 2013c. Kaukolämpö. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013].  
<http://www.kaukolampo.fi/toimintaperiaate.html>.

Energiateollisuus ry. 2013d. Energiatehokkuus. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013].  
<http://www.kaukolampo.fi/energiatehokkuus.html>.

Energiateollisuus ry. 2012. Kaukolämpötilasto 2011. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013].  
Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/dokumentit/tilastot-ja-julkaisut/kaukolampotilasto\\_2011\\_web.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/dokumentit/tilastot-ja-julkaisut/kaukolampotilasto_2011_web.pdf).

Eskilson, P. 1987. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Ph.D Thesis. University of Lund, Lund, Ruotsi. 264 s.

Eslami-Nejad, P., Bernier, M. 2012. Freezing of geothermal borehole surroundings: A numerical and experimental assessment with applications. Applied Energy. Vol. 98. s. 333-345.

Euroheat & Power. 2013. District Heating & Cooling. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013].  
Saatavissa: <http://www.euroheat.org/Norway-88.aspx>.

Geoenergia. Lämmön keruutapoja. Teknologiakeskus Oy Merinova Ab [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: [http://www.geoenergia.fi/lammon\\_keruutapoja\\_fi.html](http://www.geoenergia.fi/lammon_keruutapoja_fi.html).

Geoenergia. 2013b. Sedimenttilämpö. Teknologiakeskus Oy Merinova Ab. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: [http://www.geoenergia.fi/sedimentti\\_fi.html](http://www.geoenergia.fi/sedimentti_fi.html).

Glassley, W. E. 2010. Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment. 1. painos. CRC Press. 320 s.

Grohnheit, P. E., Motensen, B. O. G. 2003. Competition in the market for space heating. District heating as the infrastructure for competition among fuels and technologies. Energy Policy. Vol. 31. s. 817-826.

GTK. 1999. Suomen kallioperä 1:5 000 000. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: [www.gtk.fi/export/sites/fi/tietopalvelut/kartat/GTK\\_kallioperakartta\\_5000000.pdf](http://www.gtk.fi/export/sites/fi/tietopalvelut/kartat/GTK_kallioperakartta_5000000.pdf).

GTK. 2013a. Suomen maaperän synty. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: <http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/maapera.htm>.

GTK. 2013b. Geoenergia. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: [http://www.gtk.fi/\\_system/print.html?from=/geologia/luonnonvarat/geoenergia/index.html](http://www.gtk.fi/_system/print.html?from=/geologia/luonnonvarat/geoenergia/index.html).

Hakala, A. 2013. Moreeni. Suomen Kansallinen Geologian komitea. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: <http://www.geologia.fi/index.php/2011-12-21-12-30-30/2011-12-21-12-39-11/2011-12-21-12-39-51/moreeni#>.

Hellström, G. 1991. Ground Heat Storage: Thermal Analyses of Duct Storage Systems. Doctoral Dissertation. Lund Institute of Technology. 262 s.

Hellström, G. 1998. Thermal Performance of Borehole Heat Exchangers. The Second Stockton International Geothermal Conference.

Ilmatieteenlaitos. 2013. Vuoden keskilämpötila ja vuosisade 1981-2010. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot>.

Ingersoll, L. R., Zobel, O. J., Ingersoll, A. C. 1954. Heat Conduction with Engineering Geological and other Applications. McGraw-Hill, New York, NY, USA. 325 s.

Katsura T., Nagano, K., Takeda, S. 2008. Method of calculation of the ground temperature for multiple ground heat exchangers. Applied Thermal Engineering. Vol. 28. s. 1995-2004.

Kuopion Energia Oy. 2013. Kaukolämpöverkko. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: [http://www.kuopionenergia.fi/filebank/358-KE\\_kaukolampoverkko.pdf](http://www.kuopionenergia.fi/filebank/358-KE_kaukolampoverkko.pdf).

Juvonen, J. 2009. Lämpökaivo. Ympäristöopas 2009. Suomen ympäristökeskus. 44 s.

Juvonen, J., Lapinlampi, T. 2013. Energiakaivo. Ympäristöopas 2013. Ympäristöministeriö. 64 s.

Lamarche, L., Kaji, S., Beauchamp, B. 2010. A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. Geothermics. Vol 39. s. 187-200.

Lappi, J. 2013. Maalämpöpumpun lämmönkeräysjärjestelmän kehittäminen pientalo-kohteessa ja maalämpöjärjestelmien teknistaloudellinen vertailu. Opinnäytetyö. Lahden ammattikorkeakoulu.

Leppäharju, N. 2008. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Pro Gradu -tutkielma, Oulun yliopisto, Fysikaalisten tieteiden laitos.

Lund, J. W. 2004. 100 Years of Geothermal Power Production. Geo-Heat Center. GHC Bulletin.

Magnusson D., Palm J. 2011. Between natural monopoly and third party access-Swedish district heating market in transition. In: Karlsen, B., Pettyfer, M. (Eds.), Monopolies: Theory, Effectiveness and Regulation. Nova Publisher, New York, s. 1-33.

Marcotte, D., Pasquier, P. 2008. On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test. Renewable Energy. Vol. 33, s. 2407-2415.

Mateve Oy. 2013. Refla Energiaverkosto. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: <http://www.mateve.fi/index.php?sivu=ratkaisu>.

Mills, A. F. 1999. Basic Heat & Mass Transfer, 2nd Edition. Prentice Hall Inc. Upper Saddle River, NJ. 1000 s.

Motiva Oy. 2013a. Maalämpöpumppu. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: Maalämpöpumppu. [http://www.motiva.fi/rakentaminen/lammitysjarjestelman\\_valinta/eri\\_lammitysmuodot/maalampopumppu](http://www.motiva.fi/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/eri_lammitysmuodot/maalampopumppu).

Motiva Oy. 2013b. Aurinkokeräimet. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/aurinkoenergia/aurinkolampo/aurinkokeraimet](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkolampo/aurinkokeraimet).

Mottaghy, D., Dijkshoorn, L. 2012. Implementing an effective finite difference formulation for borehole heat exchangers into a heat and mass transport code. Renewable Energy. Vol. 45, s. 59-71.

Münster, M., Morthorst, P. E., Larsen, H. V., Bregnbæk, L., Werling, J., Lindboe, H. H., Ravn, H. 2012. The role of district heating in the future Danish Energy system. Energy. Vol. 48. s. 47-55.

Omer, A. M. 2008. Ground-source heat pumps systems and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 12. s. 344-371.

Paul, N.D., 1996. The Effect of Grout Thermal Conductivity on Vertical Geothermal Heat Exchanger Design and Performance. M.Sc. Thesis. South Dakota University, Vermillion, SD, USA.

Philippe, M., Bernier, M., Marchio, D. 2009. Validity ranges of three analytical solutions to heat transfer in the vicinity of single boreholes. *Geothermics*. Vol. 38. s. 407-413.

Pöyry Management Consulting Oy. 2011. Kaukolämmön asema Suomen energiajärjestelmässä tulevaisuudessa.

Rybach, L. 2012. Shallow Systems: Geothermal Heat Pumps. *Comprehensive Renewable Energy*. Vol. 7. s. 189-207.

Sahlin, J., Knutsson, D., Ekvall, T. 2004. Effects of planned expansion of waste incineration in the Swedish district heating systems. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 41. s. 279-292.

Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinou, D., Rybach, L. 2003. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics*. Vol. 32. s. 579-588.

Sharqawy, M. H., Mokheimer, E. M., Badr, H. M. 2009. Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchangers. *Geothermics*. Vol. 38. s. 271-277.

Statistisk sentralbyrå. 2013. District heating 2012. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: <http://www.ssb.no/en/fjernvarme>.

Sulpu, Suomen lämpöpumppuyhdistys ry. 2013a. Lämpöpumput. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: <http://www.sulpu.fi/lampopumput>.

Sulpu, Suomen lämpöpumppuyhdistys ry. 2013b. Lämpöpumppujen kokonaismäärän kehitys 1996-2012. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: <http://www.sulpu.fi/documents/184029/208772/L%C3%A4mp%C3%B6pumppujen%20kokonaism%C3%A4%C3%A4r%C3%A4n%20kehitys%201996-2012.pdf>.

Svensk Fjärrvärme. 2013. Tillförd energi till värmeproduktion 2011. 1996-2012. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: <http://www.svenskfjarrvarme.se/Statistik--Pris/Fjarrvarme/Energitillforsel/>.

Söderholm, P., Wårell, L. 2011. Market opening and third party access in district heating networks. *Energy Policy*. Vol. 39. s. 742-752.

Turunen, M. 2013. Suomen kallioperä. Suomen Kansallinen Geologian komitea. [WWW]. [Viitattu 26.9.2013]. Saatavissa: <http://www.geologia.fi/index.php/2011-12-21-12-30-30/2011-12-21-12-39-11/2011-12-21-12-39-38/suomen-kallioperae>.

Valpola, S. 2006. Sedimentin lämpötilamittaukset Vaasan Suvilahden edustalla. Geologian Tutkimuskeskus.

Verte Oy. 2012. Maa- ja järvilämmön käyttö aluerakennuskohteessa. Verte Oy.

Verte Oy/Planoma. 2011. Nokian Pitkäniemen järvi-maalämpöjärjestelmän elinkaaren kustannusten laskenta ja vertailu perinteiseen BAT-teknologiaan. PlaNoma.

Viljanen, S., Tahvainen, K., Honkapuro, S., Partanen, J., Energia ja omistajuus. 2011. [WWW]. [Viitattu 5.11.2013]. Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/69776/isbn%209789522651020.pdf?sequence=3>.

Wood, C. J., Liu, H., Riffat, S.B. 2010. Comparison of a modeled and field tested piled ground heat exchanger system for a residential building and the simulated effect of assisted ground heat recharge. Institute of Sustainable Energy Technology, Department of the Built Environment, Faculty of Engineering, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK.

Wood, C. J., Liu, H., Riffat, S.B. 2012. Comparative performance of ‘U-tube’ and ‘coaxial’ loop designs for use with a ground source heat pump. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 37. s. 190-195.

Wårell, L., Sundqvist, T. 2009. Market opening in local district heating networks. In: Proceedings of the 10th IAEE European Conference, Vienna, 7-10 September.

# LIITE 1: U-PUTKIKAIVOKENTTÄ (2X5) 5 W/M

EED Version 3.16 – www.buildingphysics.com

## MEMORY NOTES FOR PROJECT

□

## QUICK FACTS

Cost	-
Number of boreholes	10
Borehole depth	200,00 m
Total borehole length	2000,00 m

## DESIGN DATA

=====

## GROUND

Ground thermal conductivity	3,400 W/(m·K)
Ground heat capacity	2,400 MJ/(m <sup>3</sup> ·K)
Ground surface temperature	3,00 °C
Geothermal heat flux	0,0400 W/m <sup>2</sup>

## BOREHOLE

Configuration:	236 ("10 : 2 x 5 rectangle")
Borehole depth	200,00 m
Borehole spacing	20,00 m
Borehole installation	Single-U
Borehole diameter	139,70 mm
U-pipe diameter	40,000 mm
U-pipe thickness	2,300 mm
U-pipe thermal conductivity	0,420 W/(m·K)
U-pipe shank spacing	59,900 mm
Filling thermal conductivity	0,600 W/(m·K)
Contact resistance pipe/filling	0,0000 (m·K)/W

## THERMAL RESISTANCES

Borehole thermal resistances are calculated,	
Number of multipoles	10

Internal heat transfer between upward and downward channel(s) is considered,

#### HEAT CARRIER FLUID

Thermal conductivity	0,4400 W/(m·K)
Specific heat capacity	4250,000 J/(Kg·K)
Density	960,000 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosity	0,007600 Kg/(m·s)
Freezing point	-15,0 °C
Flow rate per borehole	1,000 l/s

#### BASE LOAD

Annual DHW load	32,85 MWh
Annual heating load (DHW excluded)	98,55 MWh
Annual cooling load	0,00 MWh

Seasonal performance factor (DHW)	3,00
Seasonal performance factor (heating)	3,00
Seasonal performance factor (cooling)	3,00

#### Monthly energy profile [MWh]

Month	Factor	Heat load	Factor	Cool load	Ground load
JAN	0,155	18,01	0,000	0,00	12,009
FEB	0,148	17,32	0,000	0,00	11,549
MAR	0,125	15,06	0,000	0,00	10,038
APR	0,099	12,49	0,000	0,00	8,329
MAY	0,064	9,04	0,000	0,00	6,030
JUN	0,000	2,74	0,000	0,00	1,825
JUL	0,000	2,74	0,000	0,00	1,825
AUG	0,000	2,74	0,000	0,00	1,825
SEP	0,061	8,75	0,000	0,00	5,833
OCT	0,087	11,31	0,000	0,00	7,541
NOV	0,117	14,27	0,000	0,00	9,512
DEC	0,144	16,93	0,000	0,00	11,286
-----					
Total	1,000	131,40	0,000	0,00	87,600

#### PEAK LOAD

##### Monthly peak powers [kW]

Month	Peak heat	Duration	Peak cool	Duration [h]
-------	-----------	----------	-----------	--------------

JAN	0,00	0,0	0,00	0,0
FEB	0,00	0,0	0,00	0,0
MAR	0,00	0,0	0,00	0,0
APR	0,00	0,0	0,00	0,0
MAY	0,00	0,0	0,00	0,0
JUN	0,00	0,0	0,00	0,0
JUL	0,00	0,0	0,00	0,0
AUG	0,00	0,0	0,00	0,0
SEP	0,00	0,0	0,00	0,0
OCT	0,00	0,0	0,00	0,0
NOV	0,00	0,0	0,00	0,0
DEC	0,00	0,0	0,00	0,0

Number of simulation years            30  
 First month of operation            SEP

#### CALCULATED VALUES

---

Total borehole length            2000,00 m

#### THERMAL RESISTANCES

Borehole therm, res, internal       0,5420 (m·K)/W

Reynolds number                    4543

Thermal resistance fluid/pipe       0,0089 (m·K)/W

Thermal resistance pipe material    0,0463 (m·K)/W

Contact resistance pipe/filling      0,0000 (m·K)/W

Borehole therm, res, fluid/ground   0,1993 (m·K)/W

Effective borehole thermal res,      0,2008 (m·K)/W

#### SPECIFIC HEAT EXTRACTION RATE [W/m]

Month	Base load	Peak heat	Peak cool
JAN	8,23	0,00	-0,00
FEB	7,91	0,00	-0,00
MAR	6,88	0,00	-0,00



APR	5,71	0,00	-0,00
MAY	4,13	0,00	-0,00
JUN	1,25	0,00	-0,00
JUL	1,25	0,00	-0,00
AUG	1,25	0,00	-0,00
SEP	3,99	0,00	-0,00
OCT	5,16	0,00	-0,00
NOV	6,52	0,00	-0,00
DEC	7,73	0,00	-0,00

BASE LOAD: MEAN FLUID TEMPERATURES (at end of month) [°C]

Year	1	2	5	10	30
JAN	4,18	0,85	0,49	0,12	-0,53
FEB	4,18	0,91	0,57	0,20	-0,45
MAR	4,18	1,27	0,93	0,57	-0,08
APR	4,18	1,69	1,36	1,01	0,36
MAY	4,18	2,28	1,97	1,62	0,97
JUN	4,18	3,38	3,08	2,73	2,09
JUL	4,18	3,43	3,14	2,79	2,15
AUG	4,18	3,46	3,17	2,83	2,19
SEP	2,68	2,45	2,16	1,81	1,18
OCT	2,17	1,98	1,68	1,34	0,71
NOV	1,61	1,43	1,14	0,80	0,17
DEC	1,09	0,93	0,63	0,30	-0,32

BASE LOAD: YEAR 30

Minimum mean fluid temperature -0,53 °C at end of JAN

Maximum mean fluid temperature 2,19 °C at end of AUG

PEAK HEAT LOAD: MEAN FLUID TEMPERATURES (at end of month) [°C]

Year	1	2	5	10	30
JAN	4,18	0,85	0,49	0,12	-0,53
FEB	4,18	0,91	0,57	0,20	-0,45
MAR	4,18	1,27	0,93	0,57	-0,08
APR	4,18	1,69	1,36	1,01	0,36
MAY	4,18	2,28	1,97	1,62	0,97
JUN	4,18	3,38	3,08	2,73	2,09
JUL	4,18	3,43	3,14	2,79	2,15
AUG	4,18	3,46	3,17	2,83	2,19

SEP	2,68	2,45	2,16	1,81	1,18
OCT	2,17	1,98	1,68	1,34	0,71
NOV	1,61	1,43	1,14	0,80	0,17
DEC	1,09	0,93	0,63	0,30	-0,32

PEAK HEAT LOAD: YEAR 30

Minimum mean fluid temperature	-0,53 °C at end of JAN
Maximum mean fluid temperature	2,19 °C at end of AUG

PEAK COOL LOAD: MEAN FLUID TEMPERATURES (at end of month) [°C]

Year	1	2	5	10	30
JAN	4,18	0,85	0,49	0,12	-0,53
FEB	4,18	0,91	0,57	0,20	-0,45
MAR	4,18	1,27	0,93	0,57	-0,08
APR	4,18	1,69	1,36	1,01	0,36
MAY	4,18	2,28	1,97	1,62	0,97
JUN	4,18	3,38	3,08	2,73	2,09
JUL	4,18	3,43	3,14	2,79	2,15
AUG	4,18	3,46	3,17	2,83	2,19
SEP	2,68	2,45	2,16	1,81	1,18
OCT	2,17	1,98	1,68	1,34	0,71
NOV	1,61	1,43	1,14	0,80	0,17
DEC	1,09	0,93	0,63	0,30	-0,32

PEAK COOL LOAD: YEAR 30

Minimum mean fluid temperature	-0,53 °C at end of JAN
Maximum mean fluid temperature	2,19 °C at end of AUG

## LIITE 2: KOAKSIAALIPUTKIKAIVOKENTTÄ (2X5) 5 W/M

EED Version 3.16 – [www.buildingphysics.com](http://www.buildingphysics.com)

MEMORY NOTES FOR PROJECT

[]

\*\*\* CAUTION! SOLUTION HAS WARNINGS! \*\*\*

### QUICK FACTS

Cost	-
Number of boreholes	10
Borehole depth	200,00 m
Total borehole length	2000,00 m

### DESIGN DATA

=====

#### GROUND

Ground thermal conductivity	3,400 W/(m·K)
Ground heat capacity	2,400 MJ/(m <sup>3</sup> ·K)
Ground surface temperature	3,00 °C
Geothermal heat flux	0,0400 W/m <sup>2</sup>

#### BOREHOLE

Configuration:	236 ("10 : 2 x 5 rectangle")
Borehole depth	200,00 m
Borehole spacing	20,00 m
Borehole installation	Coaxial
Borehole diameter	139,70 mm
Inner pipe diameter	40,000 mm
Inner pipe wall thickness	2,300 mm
Inner pipe thermal conductivity	0,420 W/(m·K)
Outer pipe diameter	90,000 mm
Outer pipe thickness	8,2000 mm
Outer pipe thermal conductivity	0,420 W/(m·K)
Contact resistance pipe/filling	0,0000 (m·K)/W

## THERMAL RESISTANCES

Borehole thermal resistances are calculated,  
Internal heat transfer between upward and downward channel(s) is considered,

## HEAT CARRIER FLUID

Thermal conductivity	0,4400 W/(m·K)
Specific heat capacity	4250,000 J/(Kg·K)
Density	960,000 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosity	0,007600 Kg/(m·s)
Freezing point	-15,0 °C
Flow rate per borehole	1,000 l/s

## BASE LOAD

Annual DHW load	32,85 MWh
Annual heating load (DHW excluded)	98,55 MWh
Annual cooling load	0,00 MWh

Seasonal performance factor (DHW)	3,00
Seasonal performance factor (heating)	3,00
Seasonal performance factor (cooling)	3,00

## Monthly energy profile [MWh]

Month	Factor	Heat load	Factor	Cool load	Ground load
JAN	0,155	18,01	0,000	0,00	12,009
FEB	0,148	17,32	0,000	0,00	11,549
MAR	0,125	15,06	0,000	0,00	10,038
APR	0,099	12,49	0,000	0,00	8,329
MAY	0,064	9,04	0,000	0,00	6,030
JUN	0,000	2,74	0,000	0,00	1,825
JUL	0,000	2,74	0,000	0,00	1,825
AUG	0,000	2,74	0,000	0,00	1,825
SEP	0,061	8,75	0,000	0,00	5,833
OCT	0,087	11,31	0,000	0,00	7,541
NOV	0,117	14,27	0,000	0,00	9,512
DEC	0,144	16,93	0,000	0,00	11,286
-----					
Total	1,000	131,40	0,000	0,00	87,600

## PEAK LOAD

Monthly peak powers [kW]

Month	Peak heat	Duration	Peak cool	Duration [h]
JAN	0,00	0,0	0,00	0,0
FEB	0,00	0,0	0,00	0,0
MAR	0,00	0,0	0,00	0,0
APR	0,00	0,0	0,00	0,0
MAY	0,00	0,0	0,00	0,0
JUN	0,00	0,0	0,00	0,0
JUL	0,00	0,0	0,00	0,0
AUG	0,00	0,0	0,00	0,0
SEP	0,00	0,0	0,00	0,0
OCT	0,00	0,0	0,00	0,0
NOV	0,00	0,0	0,00	0,0
DEC	0,00	0,0	0,00	0,0

Number of simulation years 30

First month of operation SEP

C A L C U L A T E D   V A L U E S

---

Total borehole length 2000,00 m

## THERMAL RESISTANCES

Reynolds number - Inner pipe 4543  
 Borehole therm, res, fluid/ground 0,2595 (m·K)/W  
 Inner fluid/pipe 0,0089 (m·K)/W  
 Pipe material 0,0463 (m·K)/W  
 Inner pipe/outer fluid 0,6073 (m·K)/W

-----

Borehole therm, res, internal 0,6625 (m·K)/W

Reynolds number - Annulus 1416  
 Th, res, outer fluid/outer pipe 0,0667 (m·K)/W  
 Th, res, outer pipe material 0,0762 (m·K)/W  
 Contact resistance pipe/filling 0,0000 (m·K)/W

-----

Borehole therm, res, fluid/ground      0,2595 (m·K)/W

Effective borehole thermal res,      0,2608 (m·K)/W

#### SPECIFIC HEAT EXTRACTION RATE [W/m]

Month	Base load	Peak heat	Peak cool
JAN	8,23	0,00	-0,00
FEB	7,91	0,00	-0,00
MAR	6,88	0,00	-0,00
APR	5,71	0,00	-0,00
MAY	4,13	0,00	-0,00
JUN	1,25	0,00	-0,00
JUL	1,25	0,00	-0,00
AUG	1,25	0,00	-0,00
SEP	3,99	0,00	-0,00
OCT	5,16	0,00	-0,00
NOV	6,52	0,00	-0,00
DEC	7,73	0,00	-0,00

#### BASE LOAD: MEAN FLUID TEMPERATURES (at end of month) [°C]

Year	1	2	5	10	30
JAN	4,18	0,35	-0,00	-0,37	-1,03
FEB	4,18	0,44	0,09	-0,27	-0,92
MAR	4,18	0,85	0,52	0,16	-0,49
APR	4,18	1,35	1,02	0,67	0,02
MAY	4,18	2,03	1,72	1,37	0,73
JUN	4,18	3,31	3,00	2,66	2,01
JUL	4,18	3,36	3,06	2,72	2,08
AUG	4,18	3,39	3,09	2,75	2,11
SEP	2,44	2,21	1,92	1,58	0,94
OCT	1,86	1,67	1,37	1,03	0,40
NOV	1,22	1,04	0,75	0,41	-0,22
DEC	0,63	0,47	0,17	-0,16	-0,79

#### BASE LOAD: YEAR 30

Minimum mean fluid temperature      -1,03 °C at end of JAN

Maximum mean fluid temperature      2,11 °C at end of AUG

#### PEAK HEAT LOAD: MEAN FLUID TEMPERATURES (at end of month) [°C]

Year	1	2	5	10	30
JAN	4,18	0,35	-0,00	-0,37	-1,03
FEB	4,18	0,44	0,09	-0,27	-0,92
MAR	4,18	0,85	0,52	0,16	-0,49
APR	4,18	1,35	1,02	0,67	0,02
MAY	4,18	2,03	1,72	1,37	0,73
JUN	4,18	3,31	3,00	2,66	2,01
JUL	4,18	3,36	3,06	2,72	2,08
AUG	4,18	3,39	3,09	2,75	2,11
SEP	2,44	2,21	1,92	1,58	0,94
OCT	1,86	1,67	1,37	1,03	0,40
NOV	1,22	1,04	0,75	0,41	-0,22
DEC	0,63	0,47	0,17	-0,16	-0,79

PEAK HEAT LOAD: YEAR 30

Minimum mean fluid temperature -1,03 °C at end of JAN

Maximum mean fluid temperature 2,11 °C at end of AUG

PEAK COOL LOAD: MEAN FLUID TEMPERATURES (at end of month) [°C]

Year	1	2	5	10	30
JAN	4,18	0,35	-0,00	-0,37	-1,03
FEB	4,18	0,44	0,09	-0,27	-0,92
MAR	4,18	0,85	0,52	0,16	-0,49
APR	4,18	1,35	1,02	0,67	0,02
MAY	4,18	2,03	1,72	1,37	0,73
JUN	4,18	3,31	3,00	2,66	2,01
JUL	4,18	3,36	3,06	2,72	2,08
AUG	4,18	3,39	3,09	2,75	2,11
SEP	2,44	2,21	1,92	1,58	0,94
OCT	1,86	1,67	1,37	1,03	0,40
NOV	1,22	1,04	0,75	0,41	-0,22
DEC	0,63	0,47	0,17	-0,16	-0,79

PEAK COOL LOAD: YEAR 30

Minimum mean fluid temperature -1,03 °C at end of JAN

Maximum mean fluid temperature 2,11 °C at end of AUG

## LIITE 3: U-PUTKIKAIVOKENTTÄ (2X5) 5 W/M, 200 MWH LÄMMÖNSYÖTÖLLÄ

EED Version 3.16 – [www.buildingphysics.com](http://www.buildingphysics.com)

### MEMORY NOTES FOR PROJECT

[]

### QUICK FACTS

Cost	-
Number of boreholes	10
Borehole depth	200,00 m
Total borehole length	2000,00 m

### DESIGN DATA

=====

### GROUND

Ground thermal conductivity	3,400 W/(m·K)
Ground heat capacity	2,400 MJ/(m <sup>3</sup> ·K)
Ground surface temperature	3,00 °C
Geothermal heat flux	0,0400 W/m <sup>2</sup>

### BOREHOLE

Configuration:	236 ("10 : 2 x 5 rectangle")
Borehole depth	200,00 m
Borehole spacing	20,00 m
Borehole installation	Single-U
Borehole diameter	139,70 mm
U-pipe diameter	40,000 mm
U-pipe thickness	2,300 mm
U-pipe thermal conductivity	0,420 W/(m·K)
U-pipe shank spacing	59,900 mm
Filling thermal conductivity	0,600 W/(m·K)
Contact resistance pipe/filling	0,0000 (m·K)/W

### THERMAL RESISTANCES



Borehole thermal resistances are calculated,

Number of multipoles 10

Internal heat transfer between upward and downward channel(s) is considered,

#### HEAT CARRIER FLUID

Thermal conductivity	0,4400 W/(m·K)
Specific heat capacity	4250,000 J/(Kg·K)
Density	960,000 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosity	0,007600 Kg/(m·s)
Freezing point	-15,0 °C
Flow rate per borehole	1,000 l/s

#### BASE LOAD

Annual DHW load	32,85 MWh
Annual heating load (DHW excluded)	98,55 MWh
Annual cooling load	200,00 MWh

Seasonal performance factor (DHW)	3,00
Seasonal performance factor (heating)	3,00
Seasonal performance factor (cooling)	99999,00

#### Monthly energy profile [MWh]

Month	Factor	Heat load	Factor	Cool load	Ground load
JAN	0,155	18,01	0,000	0,00	12,009
FEB	0,148	17,32	0,000	0,00	11,549
MAR	0,125	15,06	0,125	25,00	-14,963
APR	0,099	12,49	0,125	25,00	-16,671
MAY	0,064	9,04	0,125	25,00	-18,970
JUN	0,000	2,74	0,125	25,00	-23,175
JUL	0,000	2,74	0,125	25,00	-23,175
AUG	0,000	2,74	0,125	25,00	-23,175
SEP	0,061	8,75	0,125	25,00	-19,168
OCT	0,087	11,31	0,125	25,00	-17,459
NOV	0,117	14,27	0,000	0,00	9,512
DEC	0,144	16,93	0,000	0,00	11,286
-----					
Total	1,000	131,40	1,000	200,00	-112,402

#### PEAK LOAD

## Monthly peak powers [kW]

Month	Peak heat	Duration	Peak cool	Duration [h]
JAN	0,00	0,0	0,00	0,0
FEB	0,00	0,0	0,00	0,0
MAR	0,00	0,0	0,00	0,0
APR	0,00	0,0	0,00	0,0
MAY	0,00	0,0	0,00	0,0
JUN	0,00	0,0	0,00	0,0
JUL	0,00	0,0	0,00	0,0
AUG	0,00	0,0	0,00	0,0
SEP	0,00	0,0	0,00	0,0
OCT	0,00	0,0	0,00	0,0
NOV	0,00	0,0	0,00	0,0
DEC	0,00	0,0	0,00	0,0

Number of simulation years            30

First month of operation            SEP

### CALCULATED VALUES

---

Total borehole length            2000,00 m

#### THERMAL RESISTANCES

Borehole therm, res, internal            0,5420 (m·K)/W

Reynolds number            4543

Thermal resistance fluid/pipe            0,0089 (m·K)/W

Thermal resistance pipe material            0,0463 (m·K)/W

Contact resistance pipe/filling            0,0000 (m·K)/W

Borehole therm, res, fluid/ground            0,1993 (m·K)/W

Effective borehole thermal res,            0,2008 (m·K)/W

#### SPECIFIC HEAT EXTRACTION RATE [W/m]

Month	Base load	Peak heat	Peak cool
JAN	8,23	0,00	-0,00

FEB	7,91	0,00	-0,00
MAR	-10,25	0,00	-0,00
APR	-11,42	0,00	-0,00
MAY	-12,99	0,00	-0,00
JUN	-15,87	0,00	-0,00
JUL	-15,87	0,00	-0,00
AUG	-15,87	0,00	-0,00
SEP	-13,13	0,00	-0,00
OCT	-11,96	0,00	-0,00
NOV	6,52	0,00	-0,00
DEC	7,73	0,00	-0,00

BASE LOAD: MEAN FLUID TEMPERATURES (at end of month) [°C]

Year	1	2	5	10	30
JAN	4,18	1,05	1,56	2,02	2,88
FEB	4,18	1,08	1,56	2,03	2,89
MAR	4,18	7,84	8,31	8,77	9,63
APR	4,18	8,52	8,98	9,45	10,30
MAY	4,18	9,27	9,72	10,19	11,03
JUN	4,18	10,47	10,92	11,39	12,23
JUL	4,18	10,60	11,05	11,52	12,35
AUG	4,18	10,69	11,14	11,60	12,43
SEP	9,11	9,74	10,17	10,62	11,45
OCT	8,88	9,33	9,73	10,17	10,99
NOV	2,05	2,40	2,78	3,22	4,04
DEC	1,37	1,67	2,03	2,46	3,28

BASE LOAD: YEAR 30

Minimum mean fluid temperature	2,88 °C at end of JAN
Maximum mean fluid temperature	12,43 °C at end of AUG

PEAK HEAT LOAD: MEAN FLUID TEMPERATURES (at end of month) [°C]

Year	1	2	5	10	30
JAN	4,18	1,05	1,56	2,02	2,88
FEB	4,18	1,08	1,56	2,03	2,89
MAR	4,18	7,84	8,31	8,77	9,63
APR	4,18	8,52	8,98	9,45	10,30
MAY	4,18	9,27	9,72	10,19	11,03
JUN	4,18	10,47	10,92	11,39	12,23

JUL	4,18	10,60	11,05	11,52	12,35
AUG	4,18	10,69	11,14	11,60	12,43
SEP	9,11	9,74	10,17	10,62	11,45
OCT	8,88	9,33	9,73	10,17	10,99
NOV	2,05	2,40	2,78	3,22	4,04
DEC	1,37	1,67	2,03	2,46	3,28

PEAK HEAT LOAD: YEAR 30

Minimum mean fluid temperature	2,88 °C at end of JAN
Maximum mean fluid temperature	12,43 °C at end of AUG

PEAK COOL LOAD: MEAN FLUID TEMPERATURES (at end of month) [°C]

Year	1	2	5	10	30
JAN	4,18	1,05	1,56	2,02	2,88
FEB	4,18	1,08	1,56	2,03	2,89
MAR	4,18	7,84	8,31	8,77	9,63
APR	4,18	8,52	8,98	9,45	10,30
MAY	4,18	9,27	9,72	10,19	11,03
JUN	4,18	10,47	10,92	11,39	12,23
JUL	4,18	10,60	11,05	11,52	12,35
AUG	4,18	10,69	11,14	11,60	12,43
SEP	9,11	9,74	10,17	10,62	11,45
OCT	8,88	9,33	9,73	10,17	10,99
NOV	2,05	2,40	2,78	3,22	4,04
DEC	1,37	1,67	2,03	2,46	3,28

PEAK COOL LOAD: YEAR 30

Minimum mean fluid temperature	2,88 °C at end of JAN
Maximum mean fluid temperature	12,43 °C at end of AUG