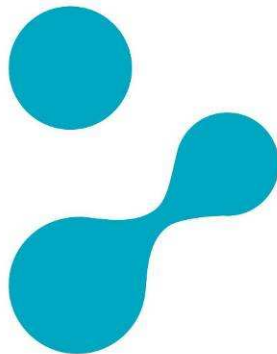


SATAKUNNAN AMMATTIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ

Juha Pitkäranta

MAALÄMMÖN KEHITTÄMINEN KAIVAMATTOMALLA TEKNI-  
KALLA



Tekniikan Porin yksikkö  
ENERGIA- JA LAIVAKONETEKNIIKAN  
KOULUTUSOHJELMA  
Energiatekniikan suuntautumisvaihtoehto  
2009

## MAALÄMMÖN KEHITTÄMINEN KAIVAMATTOMALLA TEKNIIKALLA

Pitkäranta, Juha  
Satakunnan Ammattikorkeakoulu  
Energia- ja laivakonetekniikan koulutusohjelma  
Maaliskuu 2009  
Heinola, Reino  
Opinnäytetyön sivumäärä: 41  
UDK: 620.91  
Asiasanat: maalämpö, lämpö, energia, lämmön johtuminen

---

Työni tavoitteena on selvittää maaperästä saatavissa oleva lämpöenergia ja teho käytettäessä vaakaporausta eli kaivamatonta tekniikkaa maalämpöputkien asennuksessa.

Maalämpöä yleisesti ja sen eri asennustapoja on käsitelty. Kaksi yleisintä tapaa on vaakaputkiston asentaminen pintamaahan, tai pystysuoraan asennettu lämmönkeruuputkisto kallioon tehtyyn pora- eli lämpökaivoon. Tutkimus keskittyy vaakaporauksella asennettuun lämmönkeruuputkistoon. Myös maalämpöpumpun toimintaperiaatetta ja lämpökerrointa selvitetään lyhyesti.

Työssä on tutkittu lämmönoton saannin vaikutusta maaperän lämpötilaan eri maalämmön asennus tekniikoilla. Vaakaputkistossa ja porakaivossa on käytetty hyväksi käytännössä saatuja kokemuksia, mutta vaakaporauksessa on ratkaistu lämmönsaanti ja sen vaikutukset maaperään lämmönjohtumiskaavalla. Maaperän lämmönjohtokyky sekä häiriintymättömän maaperän lämpötila ovat tärkeitä tekijöitä. Tästä syystä on tutkittu myös maaperän lämmönjohtokykyä ja häiriintymättömän maaperän lämpötilaa erilaisissa maaperän olosuhteissa.

Työssä on käyty läpi laskuesimerkkien avulla miten sallittu lämpöteho ja energia lasketaan. Saaduista tuloksista selviää mikä on sallittu lämpöteho ja energia erilaisilla maaperän lämmönjohtokyvyillä ja maaperän lämpötiloilla.

Työn tuloksena selviää kaivamattomalla tekniikalla maasta saatava lämpöteho ja energia erilaisissa maaperän olosuhteissa. Selvitettyjä tuloksia hyväksikäyttäen pystytään mitoittamaan asennettavat lämmönkeruuputkistot sopivan pituisiksi.

# THE DEVELOPMENT OF GROUNDHEAT WITH HDD TECHNOLOGY

Pitkäranta, Juha

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Power Plant and Marine Engineering

March 2009

Heinola, Reino

Number of pages: 41

UDC: 620.91

Keywords: ground heat, heat, energy, thermal conductivity

---

The goal of my thesis is to clarify the amount of heat energy and power available when using HDD (Horizontal Drilling Device) technology in ground heat pipe installation.

Ground heat in general and its various installation methods are discussed. Two of the most common methods are a horizontal pipe installed on the topsoil, or a vertically installed heat collection pipe in a drill well, also known as heat well. The research focuses on heat collection pipes installed with HDD technology. The operating principle of a geothermal pump and the concept of thermal coefficient are also briefly explained.

In the thesis, the heat uptake on the soil temperature by different ground heat installation technologies is studied. In horizontal piping and the drill well, the practical experiences about these technologies have been used, but in HDD technology the heat intake and its effects on soil have been solved with a thermal conductivity formula. Soil thermal conductivity and undisturbed soil temperature are important factors. For this reason, the soil thermal conductivity ability and undisturbed soil heat have been studied under different soil conditions.

The thesis includes calculations of how the permissible heat power and energy have been solved. The results obtained show permissible heat power and energy with different kinds of soil thermal conductivity and soil temperatures.

As a result of the thesis, permissible heat power and energy in different soil conditions are clarified by using HDD technology. By utilizing the results obtained the length of the heat collector pipes can be measured to be suitable.

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TYÖN TAVOITE.....	7
3	VAAKAPORAUS .....	8
3.1	Vaakaporaustekniikka .....	8
4	MAALÄMPÖ.....	10
4.1	Vaakaputkisto pinnassa .....	10
4.2	Porakaivo .....	12
4.3	Vaakaporaus .....	14
5	LÄMPÖPUMPPU .....	16
5.1	Lämpökerroin .....	16
5.2	Maalämpöpumpun toimintaperiaate.....	17
6	MAAPERÄ LÄMPÖPUMPUN LÄMMÖNLÄHTENÄ .....	19
6.1	Lämmönoton saanti ja vaikutus maaperässä vaakaputkistolla.....	19
6.2	Lämmönoton saanti ja vaikutus maaperässä porakaivossa .....	19
7	LÄMMÖNOTON VAIKUTUS MAAPERÄÄN KAIVAMATTOMALLA TEKNIIKALLA.....	21
7.1	Lämmönjohtokyky .....	21
7.2	Maaperän lämpötila .....	22
8	LÄMPÖLASKUT .....	25
8.1	Laskuesimerkki.....	25
9	TULOKSET .....	29
10	JOHTOPÄÄTÖKSET JA LOPPUYHTEENVETO .....	37
	LÄHDELUETTELO.....	40
LIITE 1	TAULUKOT REIKÄPITUUDELLA 130 M	
LIITE 2	TAULUKOT REIKÄPITUUDELLA 155M	
LIITE 3	TAULUKOT REIKÄPITUUDELLA 180 M.	
LIITE 4	TAULUKOT REIKÄPITUUDELLA 200 M.	
LIITE 5	TAULUKOT REIKÄPITUUDELLA 235 M.	

# 1 JOHDANTO

Maalämpöä on perinteisesti totuttu hyödyntämään joko maanpintaan kaivetulla vaakaputkistolla tai vaihtoehtoisesti kallioon poratulla porakaivolla eli lämpökaivolla. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää maalämmön hyödyntämistä ja asennustekniikan kehittämistä kaivamattomalla tekniikalla eli vaakaporauksella.

Aluksi käsittelen maalämpöä yleisellä tasolla ja sen jälkeen eri asennustekniikoita. Lisäksi käsittelen työssäni lämpöpumpun toimintaperiaatetta sekä kerron maaperästä lämpöpumpun lämmönlähteenä.

Lämpöpumpulla maaperästä saatavissa oleva lämpöteho- ja energiamäärä vaihtelevat maaperän lämmönjohtavuudesta, kosteuspitoisuudesta ja lämpötilasta johtuen. Tietenkin itse maalaji ja sen ominaisuudet vaikuttavat myös maasta saatavaan lämpöenergiaan ja tehoon. Saatavaan tehoon ja energiaan vaikuttaa suuresti myös käytetty tekniikka, eli onko kyseessä pintaputkisto, porakaivo vai vaakaporauksella tehty lämmönkeruuputkisto.

Viimeiseksi olen tutkinut kuinka paljon maaperästä pystytään ottamaan lämpötehoa ja energiaa ja mikä on sen vaikutus maaperän lämpötilaan erilaisissa maaperän lämmönjohtavuuden ja lämpötilan alueilla.

## 2 TYÖN TAVOITE

Työn tavoite on selvittää soveltuuko vaakaporaustekniikka maalämmön asentamiseen ja kuinka paljon maasta pystytään ottamaan lämpötehoa ja energiaa vaakaporauksella.

Koska vaakaporaus mahdollistaa putkien asentamisen kaivamattomalla tekniikalla, se häiritsee mahdollisimman vähän maan pintaa kuten rakennettuja piha-alueita. Samalla vaakaporaukseen liittyvä ohjaus mahdollistaa putken asentamisen parhaaseen mahdolliseen syvyyteen.

Työn tuloksena selviää kaivamattomalla tekniikalla maasta saatava lämpöteho ja energia erilaisissa olosuhteissa. Tämän perusteella pystytään mitoittamaan tarvittava lämmönkeruuputkiston pituus, kunhan tiedetään tarvittavan energiatarpeen määrä.

Pääasialliset tutkimuskysymykset olivat seuraavat:

Miten maalämpöä hyödynnetään?

Miten asennustekniikkaa kehitetään?

Kuinka paljon maaperästä pystytään ottamaan lämpöenergiaa?

Kuinka paljon maaperästä pystytään ottamaan lämpötehoa?

Mikä on lämmönoton vaikutus maaperän lämpötilaan?

### 3 VAAKAPORAUS

Vaakaporauspalvelu VPP Oy on kaivamattoman tekniikan alan yritys Suomessa. Yrityksellä on yli kahdenkymmenen vuoden kokemus vaakaporauksesta. Yrityksen palvelualue kattaa koko Suomen ja se on tehnyt laajakaista poraustöitä myös Ruotsissa ja Norjassa. Vaakaporauspalvelun toimipisteet sijaitsevat Pyhäsalmella ja Harjavallassa. Yrityksen tarjoamiin palveluihin kuuluvat vaakaporaus, pakkosujutus, päätösujutus ja maalämpöputkien asennus.

#### 3.1 Vaakaporaustekniikka

Vaakaporaustekniikassa pystytään porauksen lasku/nousu kulmaa ja suuntaa säätämään. Porattavan reiän kulmaa ja suuntaa muutetaan tarpeen mukaan porapäässä olevan lähettimen ja maanpinnalla olevan vastaanottimen avulla. Ohjattavalla porauskalustolla pystytään tekemään esim. jokien ja järvien alituksia poraamalla. Menetelmä mahdollistaa kaikenlaisen putkenasennuksen, kuten kunnallistekniikan putkistot (vesi- ja viemäri), kaasu- ja kaapelisuojuputket.

Ohjattava vaakaporausmenetelmä sopii varsinkin sellaisille alueille joita ei haluta tai voida kaivaa. Vaakaporauspalvelu VPP Oy on tehnyt perinteisiä vaakaporauksia ja muoviputkien asennuksia tähän mennessä yhteensä yli 100 km. Nyt tätä samaa ohjattavaa vaakaporauskalustoa (Kuva 3.1) käytetään myös maalämpöputkien asentamiseen. Poikkeuksena perinteiseen vaakaporauskalustoon tarvitaan maalämpöputkien asentamiseen rakenteeltaan uudentyypiset poratangot./2/



Kuva 3.1. Ohjattava vaakaporauskalusto. (Kuva: Juha Pitkäranta).

Kappaleessa neljä esittelen eri tekniikat joilla maalämpöä hyödynnetään. Aluksi käsittelem vaakaan asennettavaa putkistoa, jonka jälkeen tulee vuoroon porakaivon pystysuoraan asennettava lämmönkeruuputkisto. Lopuksi käyn läpi maalämpöputkien asennusta kaivamattomalla tekniikalla eli vaakaporausella.



## 4 MAALÄMPÖ

Maalämpö on aurinkoenergiaa. Se on auringon säteilyn johdosta maaperään varastoitunutta lämpöä. Aurinkolämpöä varastoituu kesäaikana maa- ja kallioperään sekä vesistöihin auringonpaisteen, lämpimän ilman ja vesisateiden ansiosta. Talvella lämmityskauden aikana tätä maaperään varastoitunutta lämpöä voidaan hyödyntää lämpöpumpun avulla. Lämpöpumpulla pystytään alhaisemmasta lämpötilasta eli maaperästä siirtämään lämpöä korkeampaan lämpötilaan eli lämmitettäviin tiloihin.

Lämmönkeruuputkiston maahan asentamiseen on perinteisesti käytetty kahta eri tekniikkaa, jotka ovat vaakaputkiston asentaminen pintamaahan, tai pystysuoraan asennettu lämmönkeruuputkisto kallioon tehtyyn pora- eli lämpökaivoon. Nyt on siis olemassa myös kolmas tapa missä lämmönkeruuputkisto asennetaan maahan vaakaporauksella. Seuraavaksi kerron näistä edellä mainituista tekniikoista.

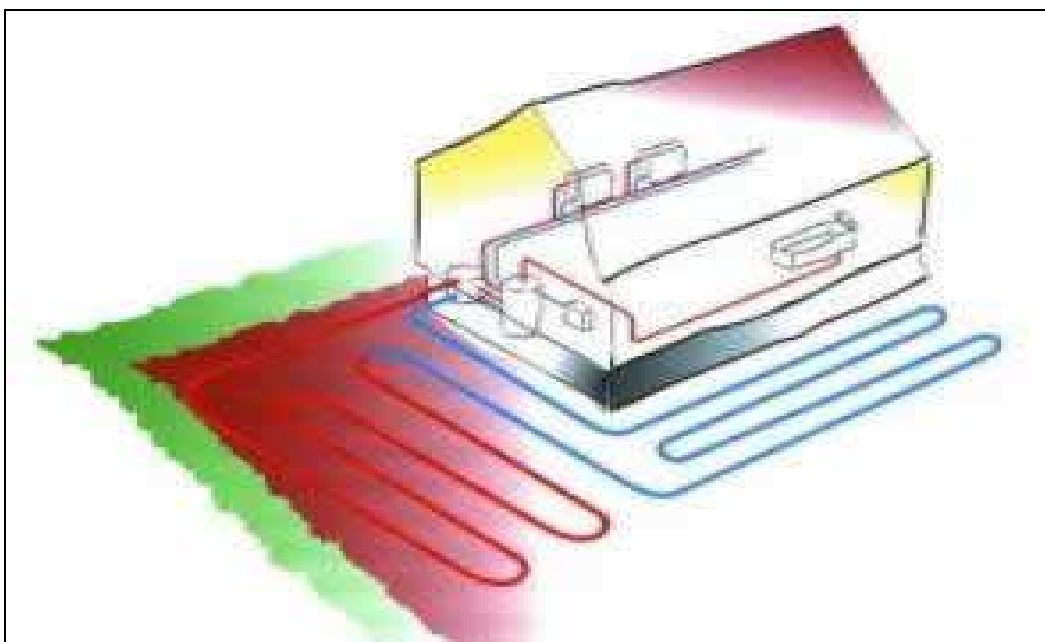
### 4.1 Vaakaputkisto pinnassa

Vaakaputkiston asentaminen pintaan on näistä taloudellisessa mielessä edullisin, sillä siinä tarvitsee vain kaivaa maata auki ja asentaa lämmönkeruuputket maahan ja peittää ne. Toisaalta tämä tekniikkaa mullistaa pihaympäristöä melko rajusti, jos pihamaalle asennetaan useita satoja metrejä keruuputkea.

Putkisto kaivetaan noin 0,7-1,2 m syvyyteen maahan niin, että putkilenkkien väli on noin 1,5 m. Putkena käytetään yleensä normaalia muovista vesijohtoputkea. Täyttö suoritetaan pääosin kaivumaalla, 20 cm putken ympäriltä on oltava kuitenkin kiveä maata. Putket eristetään päistään sujuttamalla ne seinämävahvuudeltaan 10 - 20 mm olevaan solumuoviseen eristeputkeen. Rakennuksen sisältä lähtevät putket asennetaan taipuisan salaojaputken sisään, (halkaisija 100 mm) siten että suojaus ulottuu noin kaksi metriä rakennuksen sokkelin ulkopuolelle. Eristämätöntä putkea ei saa tontilla asentaa lähemmäksi kuin 2 m rakennuksen ulkoseinästä./1/

Mahdolliset vesi- ja viemärijohtojen, samoin kuin talvella lumesta puhtaana pidettävien kulkuväylien kohdat eristetään paikallisesti routalinssien välttämiseksi. Putkiston asennus tulee toteuttaa siten, että putkisto voidaan varmuudella ilmata, eikä mahdollisia ilmataskuja pääse muodostumaan myöhemminkään./1/

Vaakasuoraan asennettu pintaputkisto (Kuva 4.1) tarvitsee eniten lämmönkeruuputkea, koska pintamaasta pystyy ottamaan vähemmän energiaa vuodessa kuin porakaivosta ja syvemmältä maasta, missä maaperän lämpötila pysyy vuoden ympäri tasaisempana. Syvemmällä maassa voidaan käyttää hyväksi myös pohjaveden kosteutta, eli mitä kosteampaa maaperä on sitä enemmän lämpöenergiaa saa. Merkittävimmät lämmönkeruuputkiston mitoittamiseen vaikuttavat tekijät ovat maaperän lämmönjohtavuus ja kosteuspitoisuus. Karkeana putkimäärän ohje arvona voidaan SULPU ry:n mukaan/1/ käyttää arvoa 1-2 putkimetriä lämmitettävää rakennuskuutiota kohti jolloin tonttimaata tarvitaan noin 1,5 m<sup>2</sup> yhtä putkimetriä kohti.



Kuva 4.1. Maaperään vaakasuoraan asennettu lämmönkeruuputkisto. (Kuva: Suomen lämpöpumppuyhdistys ry).

Käytössä olevan maa-alueen koko ja sijainti siis asettaa omat mahdollisuutensa tai rajoituksensa maaputkistolle. Ylimoitettu putkipituus kuluttaa käytössä enemmän

sähköenergiaa suurentuneina pumppauskuluina ja lisäksi investointikustannus on luonnollisesti hieman suurempi.

Alimitoitettu putkipituus puolestaan johtaa lämmönlähteen hiipumiseen ja sen myötä alhaisempaan höyrystymislämpötilaan ja kompressorin alapaineeseen jolloin seurauksena on alhaisempi lämpökerroin ja mahdolliset kompressorin pysähtymisjaksot./1/

Taulukossa 4.1 on ohjeellisia arvoja vuodessa saatavasta lämpöenergian määrästä pintaan asennetun vaakaputkiston avulla. Taulukon 4.1 tiedot ovat SULPU ry:n eli suomen lämpöpumppuyhdistykseltä.

Taulukko 4.1. Pintaan asennetulla vaakaputkistolla saatava lämpöenergia kWh/m.

Sijainti	Savi	Hiekka
Etelä-Suomi <sup>1</sup>	50-60 kWh/m	30-40 kWh/m
Keski-Suomi	40-45 kWh/m	15-20 kWh/m
Pohjois-Suomi <sup>2</sup>	30-35 kWh/m	00-10 kWh/m

Huom.<sup>1</sup>= Linjan Kokkola - Savonlinna eteläpuoli <sup>2</sup>= Lappia lukuun ottamatta

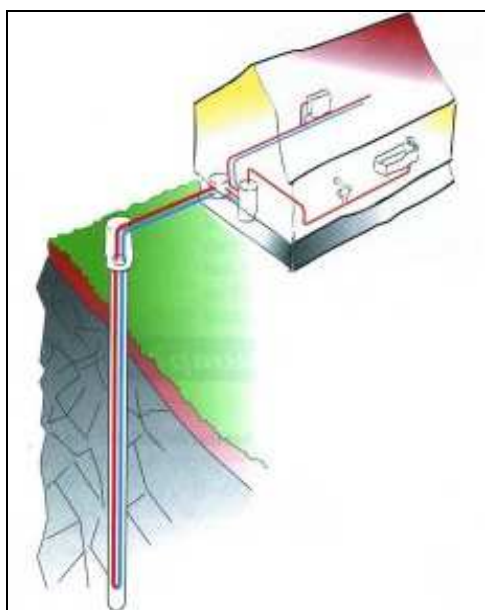
## 4.2 Porakaivo

Lämpökaivo joka tarkoittaa porakaivoon upotettua lämmönkeruuputkea on hyvä vaihtoehto silloin kun kallioperä on lähellä maanpintaa ja jos käytettävää maapinta-alaa on käytössä rajoitetusti. Kallioperän olisi hyvä olla lähellä maanpintaa, sillä porakaivon poraus kallioon on huomattavasti edullisempaa kuin maahan. Maaosuudella tarvitaan teräksinen suojaputki aina maanpinnasta kallioon saakka. Lisäksi kallion lämmönjohtavuus on huomattavasti suurempi kuin maaperän, joten se on lämmönottamisestikin kannattavampaa mitä vähemmän maakerrosta on ennen kalliota. Lämmönsaannin kannalta on tärkeää että porakaivo tuottaa vettä. Sillä kuivasta pora-

kaivosta saa vähemmän energiaa kuin märästä. Porakaivon teholliseksi syvyydeksi lasketaan vain kaivon vedellä täyttynyt osuus

Porakaivon poraamisen jälkeen siihen upotetaan muoviputkilenkki. Alkukustannukset porakaivon teossa ovat suuremmat kuin vaakaputkistolla johtuen porauskustannuksista. Toisaalta pinta-alaa ei tarvita niin paljoa kuin vaakaputkistossa ja koska porataan suoraan alaspäin, myös maanpinta pääsee vähemmillä vaurioilla kun vältetään mittavilta kaivaustöiltä. Energiansaanti porakaivosta on suuruusluokaltaan kaksinkertainen verrattuna vaakaputkistoon pinnassa.

Porakaivon (Kuva 4.2) syvyys mitoitetaan talon energiantarpeen mukaan. Yleisesti porakaivojen syvyydet ovat sadasta kahteensataan metriin. Kaivoja ei kannata porata yli 200 m, koska silloin pumppauskustannukset nousevat suuriksi. Energiantarpeen ollessa niin suuri, ettei 200 m kaivo riitä, porataan useampia kaivoja ja ne kytketään rinnakkaisiksi putkisilmukoiksi erillisessä ulkoisessa kytkentäkaivossa. Lämmönkeruuputken molemmat putket eli meno- ja paluuputki on eristettävä rakennuksen sisältä porakaivon huoltokaivoon saakka ja mielellään vielä routarajan alapuolelle saakka kaivossa./1/



Kuva 4.2. Porakaivoon asennettu lämmönkeruuputki. (Kuva: Suomen lämpöpump-puyhdistys ry).

### 4.3 Vaakaporaus

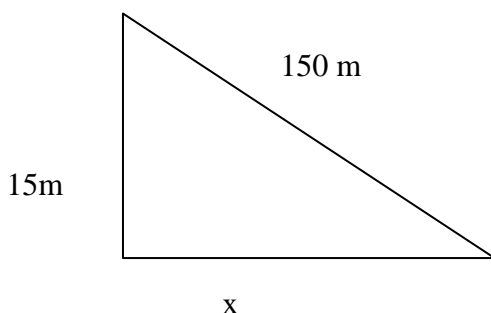
Maalämpöputkien asentaminen kaivamattomalla tekniikalla eli vaakaporausella etenee seuraavasti. Aluksi työnnetään poratangot maahan, jonka jälkeen avataan paineiskulla poratankojen päässä oleva kärki. Sen jälkeen voidaan työntää maalämpöputket poratankojen sisälle. Putket on asennettava niin, että ne laskevat koko ajan kaltevasti alaspäin, näin vältetään ilmanpoisto-ongelmilta asennettavissa lämmönkeruuputkissa. Tämän jälkeen poratangot vedetään pois maaperästä ja maalämpöputki (Kuva 4.3) jää porausreikään. Huoltokaivolta putkien veto ja eristys tehdään kuten porakaivollakin.



Kuva 4.3. Maalämpöputken syöttö. (Vaakaporauspalvelu Oy).

Tämä tekniikka soveltuu parhaiten pehmeille maalajeille. Se tarvitsee myös jonkin verran maapinta-alaa, muttei kuitenkaan lähellekään sellaista pinta-alaa kuin vaakaputkisto pintaan asennettuna. Tällä tekniikalla vältetään myös maanpinnan mullistamiselta, sillä vaakaporausessa ei tarvita kaivinkonetta.

Seuraavaksi esimerkki kuinka pitkälle lämmönkeruuputki maanpinnan alla menee, jos reikä on 150 m ja reikä on päätepisteessään 15 m syvyydessä. Tässä esimerkissä on oletettu, että putken porauskulma olisi koko ajan sama. Porauskulma vaihtelee kuitenkin jonkin verran sillä aloituskulma on usein hieman jyrkempi. Porauskulma voi ensin laskea jyrkemmässä kulmassa ja sitten loiventua, pääasia on kuitenkin, että putket laskevat koko ajan kaltevasti alaspäin. Tällä esimerkillä saa arvion kuinka pitkä kaistale maata pitää olla, että putken saa asennettua.



Ratkaistaan siis seuraavasta pituus  $x$ .

$$X = \sqrt{(150 + 15) * (150 - 15)} = 149,3 \text{ m}$$

Reikä menee sen verran vähän alaspäin, että reikä on siis vaakasuoraankin mitattuna lähes 150 m päässä. Se paljonko lämmönkeruuputkea tarvitaan, riippuu tietenkin täysin kyseessä olevan talon energiantarpeesta.

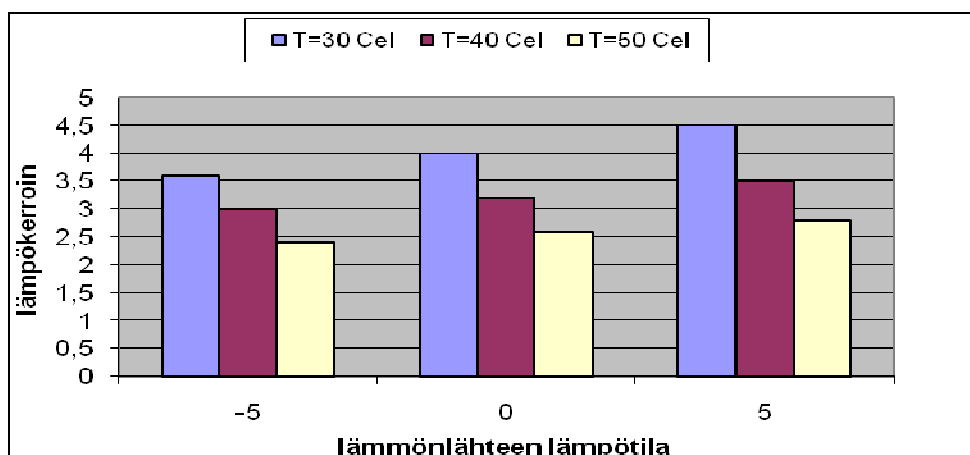
Asennettaessa vaakaputkistoa pintamaahan tai keruuputkia pystysuoraan poraikaivon, tiedetään niistä monien vuosien kokemuksen perusteella kuinka paljon niistä keskimäärin pystytään ottamaan lämpöenergiaa. Vaakaporaustekniikalla ei samalaista kokemusta ole, siksi olenkin laskenut kuinka paljon kaivamattomalla tekniikalla keskimäärin pystytään ottamaan lämpötehoja ja energiaa maasta, lisäksi kerron mitkä asiat näihin lämpöominaisuuksiin maaperässä vaikuttavat. Näitä asioita käsittelem viidennessä ja kuudennessa luvussa.

## 5 LÄMPÖPUMPPU

Maahan upotetussa lämmönkeruuputkistossa kiertävä neste, joka yleensä on veden ja alkoholin sekoitus kerää itseensä lämpöä maaperästä. Maaperässä on kuitenkin suhteellisen alhainen lämpötila, joka ei pelkästään riitä talon lämmitykseen. Tätä varten tarvitaan lämpöpumppu jonka avulla päästään lämmityksen kannalta sopivampiin lämpötiloihin

### 5.1 Lämpökerroin

Lämpökertoimen eli COP:n ollessa 3, saadaan maalämpöpumpulla noin 2/3 osaa energiasta maaperästä. Tämä tarkoittaa että yhtä ostettua kWh:a kohti saadaan maasta ilmaista energiaa 2 kWh:a. Tätä voidaan pitää keskiwertona vuotuisena lämpökertoimenä nykyisillä lämpöpumpuilla. Lämpökerroin riippuu suuresti lämpötiloista lämmönoton eli maapiirin puolella sekä lämmönjakelun eli käytettävän lämpöjärjestelmän puolella. Parempi lämpökerroin saadaan mitä korkeampi lämpötila on lämmönotossa ja mitä matalampi lämmönjakelussa. Lattialämmitys on siten yksi parhaimmista lämmönjakotavoista lämpöpumpun kannalta, sillä siinä lämmönjaossa putkistoon menevän veden ei tarvitse olla kuin vähän yli 30 °C.

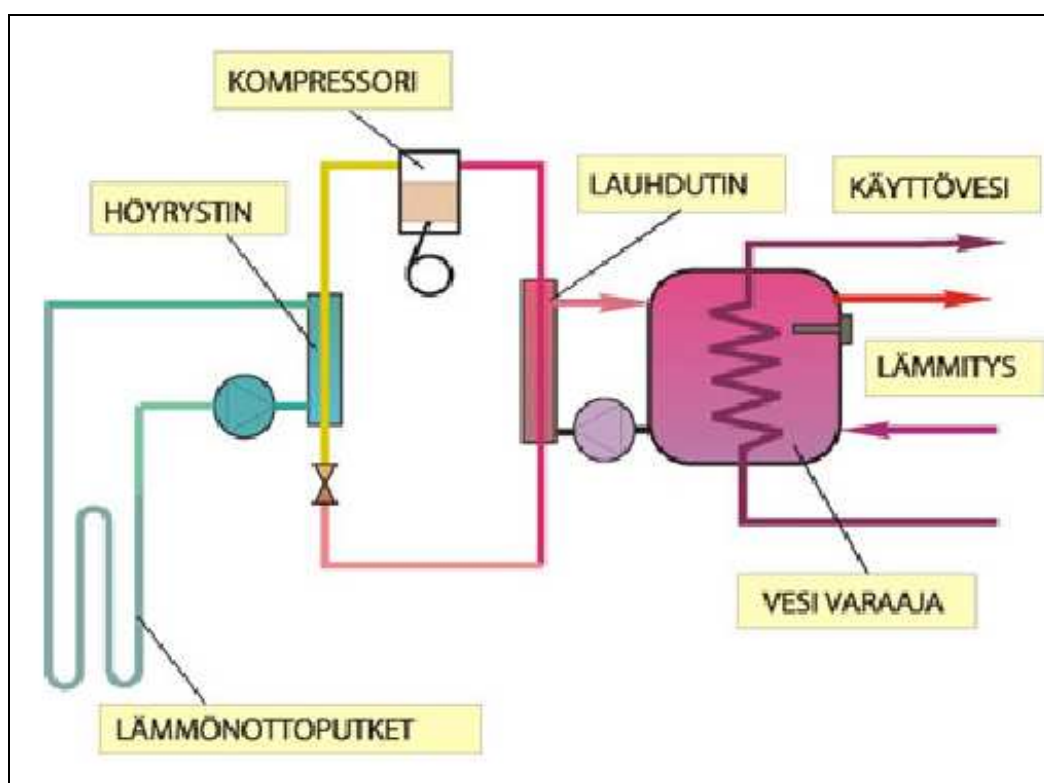


Kuvio 5.1. Lämmönlähteen lämpötilatason vaikutus lämpökertoimeen. (Kuvio: maalämpöpumppuopas).

Kuvio 5.1 on periaatekuva lämpötilojen vaikutuksesta lämpökertoimeen. T tarkoittaa lämmönkäytön, esim. lämmitysverkoston veden lämpötilaa./3/

## 5.2 Maalämpöpumpun toimintaperiaate

Lämpöpumppu on kone (kuva 5.1), joka ottaa lämpöä jostakin alhaisen lämpötilan lämpövarastosta (esim. maaperä) ja sitten nostaa tämän otetun lämpöenergian lämpötilatasoa niin korkeaksi, että se kelpaa lämmityskäyttöön.



Kuva 5.1. Maalämpöpumpun toimintaperiaate. (Kuva maalämpöpumppuopas).

Maahan upotetuissa lämmönottoputkissa kiertävä neste lämpenee kierroksellaan noin 2-3 °C. Nesteen lämpötila lämmönottoputkissa on siis suhteellisen alhainen sen mennessä höyrystimeen. Neste on noin 0-8 °C plussan puolella lämmityskauden aikana maaperän lämpötilasta riippuen. Vaakaputkistossa pintamaassa laskee höyrystymislämpötila usein alle nollankin ja joskus myös porakaivoissa höyrystymislämpötila menee niin alhaiseksi.



Höyrystimessä lämmönottoputkissa kiertävä neste luovuttaa lämpöä lämpöpumppukoneistossa kiertävään työaineeseen eli kylmäaineeseen, joka kiertää prosessissa suljettuna kiertona. Lämmönottoputkissa kiertävän nesteen luovuttaman lämmön ansiosta kylmäaine höyrystyy kompressorin imupuolen paineessa. Seuraavaksi höyry puristetaan kompressorilla korkeampaan paineeseen, jolloin se myös lämpenee. Korkeapaineinen lämmennyt höyry jäädytetään lauhduttimessa, jolloin se nesteytyy. Kylmäaineen lauhtuessa vapautuva lämpö lämmittää lauhduttimen läpi virtaavan veden, mikä sitten menee lämmentyneenä lämmitysjärjestelmään. Kylmäaine jatkaa matkaansa höyrystimeen paisuntaventtiilin kautta. Paisuntaventtiilissä kylmäaineen paine lasketaan ennen sen menoa höyrystimeen./4/

Höyrystimessä kylmäaine taas höyrystyy lämmönottoputkissa kiertävän nesteen ansiosta. Maaperään upotetuissa lämmönottoputkissa kiertävä neste on kierroksellaan lämmennyt muutaman asteen. Höyrystimessä se luovuttaa maaperästä ottamansa lämpöenergian kylmäaineeseen ja sitten alkaa taas edellisessä kappaleessa kerrotun kaltainen prosessi.

Lämpöpumpun käytön kannalta olennaisimmat ominaisuudet ovat höyrystymis- ja lauhtumislämpötilat. Pyrkimyksenä on mahdollisimman matala lauhtumislämpötila sekä mahdollisimman korkea höyrystymislämpötila. Näin myös pumpun lämpökerroin pysyy parempana. Rajoituksensa lämpötiloille antaa lauhtumisessa käyttöveden eli lämmitysjärjestelmän lämpötila sekä höyrystymisessä lämmönlähteen eli maaperän lämpötila.

## 6 MAAPERÄ LÄMPÖPUMPUN LÄMMÖNLÄHTEENÄ

Käytettäessä maaperää lämpöpumpun lämmönlähteenä otetaan maasta lämpöä, mikä tarkoittaa sitä, että lämpötila lämmönlähteen kohdalla laskee alhaisemmaksi kuin häiriöttömässä maaperässä.

### 6.1 Lämmönoton saanti ja vaikutus maaperässä vaakaputkistolla

Keskimääräinen vuosittainen energiansaanti käytettäessä vaakaputkistoa pintamaassa selviää taulukosta 4.1. Pintamaahan asennetun vaakaputkiston lämmönkeruuprosessi eroaa porakaivoon asennetusta ja vaakaporauksella asennetusta putkistosta. Pintamaahan asennetun vaakaputkiston lämmönkeruu perustuu maaperän lämpötilan alentamisen lisäksi maaperässä tapahtuvaan faasimuutokseen eli maaperän jäätyislämmön hyväksikäyttämiseen. Tämä tarkoittaa, että vaakaputkistolle sallitaan osittainen maaperän jäätyminen, sillä vesisateiden ja auringon vaikutus pintamaahan on niin suuri että maaperä sulaa nopeasti kevään ja kesän tullen.

Vaakaputkisto asennetaan vain vähän routarajan alapuolelle. Maaperän lämpötila laskee näillä syvyyksillä häiriöttömässäkin maassa melko lähelle nollaa ja kun maaperästä vielä otetaan lämpöenergiaa, laskee maaperän lämpötila nollan alapuolelle./5/

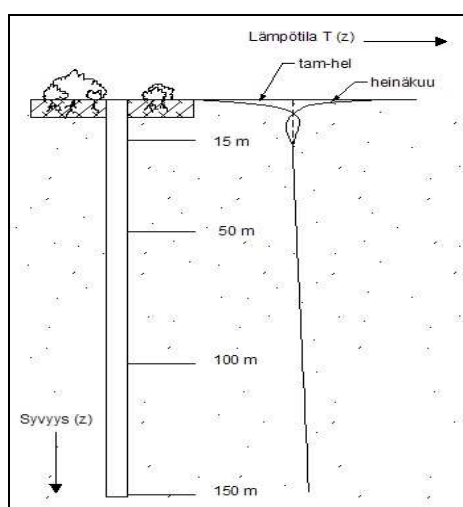
### 6.2 Lämmönoton saanti ja vaikutus maaperässä porakaivossa

Porakaivoon asennettu lämmönkeruuputkisto eli lämpökaivo mitoitetaan niin, että jäätymistä ei pääse tapahtumaan. Saatavaan lämpöenergiamäärään vaikuttaa vedenantoisuus eli se kuinka paljon vesi siirtää lämpöenergiaa peruskalliosta. Lämpökaivossa keruuputkien ympärillä oleva vesi siis ottaa ensin lämpöenergian kallioperästä ja luovuttaa sen sitten putkistossa kiertävään nesteeseen.

Tärkeää hyvän lämmönsaannin kannalta on veden liikkuvuus porakaivossa. Tietenkäin seisovakin vesi on parempi kuin ei vettä lainkaan. Tämän lisäksi lämpöenergian-saantiin vaikuttaa myös kallioperän lämmönjohtokyky, joka suomessa yleisimpinä esiintyvillä kalliolajeilla on kuitenkin suunnilleen sama eli noin  $3 \text{ W/mK}$ . Energian-saanti lämpökaivosta on ainakin kaksinkertainen verrattuna pintamaahan asennettuun vaakaputkistoon./1 ja 5/

Ruotsissa on tapahtunut joitakin porakaivojen jäätyksiä, jotka ovat aiheuttaneet lämmönkeruuputkien hajoamisen. Ruotsalaisen Anna-Karin Ahlströmin /6/ mukaan eri syitä jäätymiseen ovat olleet talon energiatarpeen alimitoittaminen, kalliön läm-mönjohtokyvyn arvioiminen liian suureksi, kallioperä on ollut oletettua syvempänä tai sitten pohjavesi on ollut oletettua syvempänä. Ahlströmin mukaan lämpökaivon lämpötila laskee  $1\text{-}2 \text{ }^\circ\text{C}$  ensimmäisen viiden vuoden aikana kun siitä aletaan ottaa lämpöenergiaa.

Tämän jälkeen lämpötila stabilisoituu. Sadan metrin syvyydessä koskemattoman kal-lioperän lämpötila on noin  $7\text{-}8 \text{ }^\circ\text{C}$  plussan puolella. Tämä tarkoittaisi, että viiden vuoden lämpökaivon käytön jälkeen lämpötila stabilisoituisi sadassa metrissä noin  $5\text{-}7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kuvassa 4.1 on periaatekuva porakaivon lämpötilan muutoksesta syvyyden funktiona.



Kuva 6.1. Lämpötilan muutos syvyyden funktiona porakaivossa. (Kuva: J. Pitkäranta).

## 7 LÄMMÖNOTON VAIKUTUS MAAPERÄÄN KAIVAMAT- TOMALLA TEKNIIKALLA

Vaakaporausta eli kaivamatonta tekniikkaa ei ole vielä niin paljon käytetty maalämmön asennustekniikkana, että voitaisiin kokemuseräisesti sanoa kuinka paljon kyseistä tekniikkaa käyttäen voidaan ottaa lämpöenergiaa maasta ja mitkä sen vaikutukset ovat maaperän lämpötilajakaumaan.

Seuraavaksi käsittelemme niitä asioita, jotka vaikuttavat lämpöenergian määrään, mikä voidaan saada maaperästä. Tärkeimmät niistä ovat maalajin laatu ja kosteuspiitoisuus, mitkä vaikuttavat maaperän lämmönjohtokykyyn. Maaperän lämpötila vaikuttaa lämpöenergian saatavuuteen, sillä mitä korkeampi häiriintymättömän maan lämpötila on, sitä enemmän sieltä pystytään energiaa ottamaan.

### 7.1 Lämmönjohtokyky

Maaperän lämmönjohtokyky merkitsee sitä kuinka hyvin lämmönkeruuputkisto saa otettua lämpöenergiaa ympäröivästä maaperästä. Mitä korkeampi on maaperän lämmönjohtokyky, sitä paremmin saadaan maaperästä lämpöenergiaa.

Maaperän lämmönjohtokyky riippuu maan koostumuksesta, tiheydestä ja kosteuspiitoisuudesta. Hienojakoisen maalajin kuten saven lämmönjohtavuus on suurempi kuin karkeajakoisemman hiekan. Kaikkien maalajien lämmönjohtokyky paranee huomattavasti, jos maaperä on kostea. Mitä kosteampaa maaperä on, sen parempi se on lämmönjohtavuuden kannalta. Taulukossa 7.1 on koottuna erilaisia lämmönjohtavuuksia./7/

Taulukko 7.1. Eri maalajien lämmönjohtokyky./7ja8/

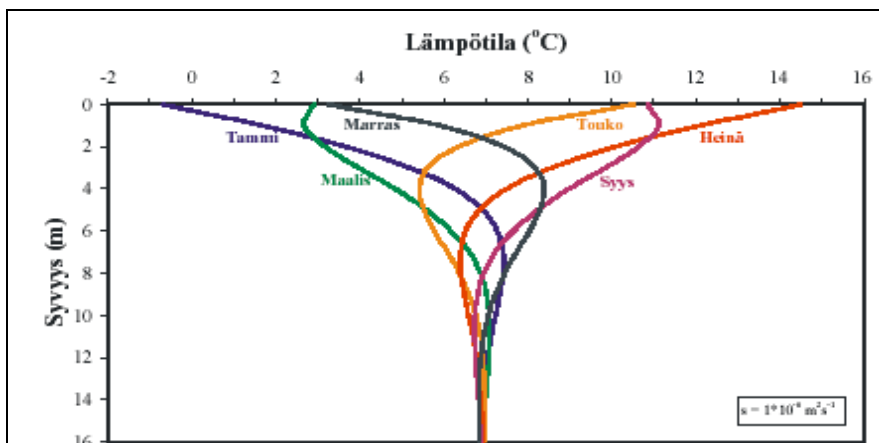
Maalaji	Lämmönjohtokyky W/mk
Kuiva hiekka	0,76
Kuiva savi	1,1
Märkä hiekka	2,5
Märkä siltti tai savi	1,7
Vesi	0,6
Ilma	0,026

Taulukosta 7.1 käy ilmi että hiekan lämmönjohtavuuteen vesi vaikuttaa huomattavasti enemmän kuin saven. Savi on kuivempänä parempi lämmönjohtavuudeltaan kuin hiekka, mutta märkänä asia onkin toisinpäin. Tämä selittyy sillä että hiekka karkeajakoisempaa ja huokoisempaa maa-ainesta kuin savi, joten hiekka pystyy imeämään itseensä enemmän vettä kuin savi. Maa-aineksen ilmahuokosten täytyessä vedellä paranee sen lämmönjohtokyky. Tämä johtuu siitä että veden lämmönjohtavuus on yli 20-kertainen verrattuna ilman lämmönjohtavuuteen. /7/

## 7.2 Maaperän lämpötila

Maaperän lämpötila vaikuttaa myös siihen kuinka paljon lämpötehoa ja lämpöenergiaa maasta saadaan. Luonnollisesti on parempi lämmönoton kannalta mitä korkeammassa lämpötilassa lämmönlähde eli maaperä on.

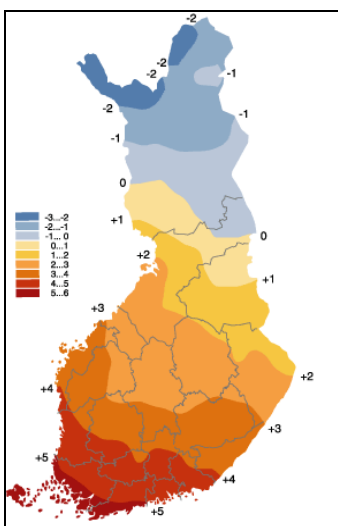
Vuodenajan vaikutukset maaperän lämpötilaan ovat sitä suuremmat mitä lähempänä maanpintaa ollaan (Kuvio 7.1). Syvemmälle mentäessä alkaa lämpötila olla tasaisempi ympäri vuoden. Kahdeksan metrin syvyydessä vuosittainen lämpötilan vaihtelu on vain noin asteen verran kun se kahden metrin syvyydessä on jopa kahdeksan astetta./9/



Kuvio 7.1. Vuodenajan vaikutukset maaperän lämpötilaan (Kuvio: Nina Leppäharju).

Miten saadaan määriteltyä maaperän keskimääräinen lämpötila ja miten tämä maaperän lämpötila vaihtelee alueellisesti Suomessa. Ensin pitää selvittää paikkakunnan ilman keskilämpötila mistä pystytään sitten laskemaan maaperän lämpötila.

Alla olevassa kartassa on ilman keskilämpötiloja vertailukaudelta 1971-2000. Todennäköisesti keskilämpötiloihin saisi lisätä muutaman asteen nykyisillä lämpiminä talvina. Esim. Oulussa kolmen viimeisen vuoden keskilämpötila on ollut 3,9, 3,4 ja 3,5 °C. Tiedot perustuvat ilmatieteenlaitoksen tilastoihin./10/



Kuva 7.1. Suomen ilman keskilämpötila kartta. (Kuva: ilmatieteenlaitos).

Kun tiedetään ilman vuotuinen keskilämpötila, pystytään laskemaan maaperän keskimääräinen lämpötila seuraavalla tavalla./9/

$$T(\text{maa}) = 0,71 * T(\text{ilma}) + 2,93$$

Eli jos ilman keskilämpötila on +5°C, niin saadaan maaperän lämpötila seuraavalla tavalla:  $T(\text{maa}) = 0,71 * 5 \text{ °C} + 2,93 = 6,48 \text{ °C}$

Näin ollen aivan eteläisessä Suomessa maaperän lämpötila on noin 6,5 °C

Taulukossa 7.2 on laskettuna maaperän lämpötilat jotka vastaavat ilman keskilämpötiloja välillä +6 °C...+2 °C. Kartasta (Kuva 7.1) näkee mihin alueelle nämä lämpötilat sijoittuvat.

Taulukko 7.2. Ilman ja maaperän lämpötilavertailu.

Ilman keskilämpötila	Maaperän keskilämpötila
+6°C	+7,2°C
+5°C	+6,5°C
+4°C	+5,8°C
+3°C	+5°C
+2°C	+4,4°C

Maaperän lämpötilaan vaikuttaa moni asia esim. aluskasvillisuus ja lumipeite. Taulukon arvoilla saa kuitenkin jonkinmoisen käsityksen maaperän lämpötilasta. Etelästä lähdeettäessä lämpötila laskee + 6-7°C välistä, aina Oulun tienoon +4 °C. Suomessa on mitattu merenpohjan sedimenttikerroksista jopa kahdeksan asteen lämpötiloja. Vaasan asuntomessualueella on käytetty maalämmön lähteenä juuri merenpohjaa.

## 8 LÄMPÖLASKUT

Seuraavaksi esittelen esimerkkilaskun avulla miten sallittu lämpöteho ja energia lasketaan. Laskuissa on otettu määrääväksi tekijäksi putkiston ympäristön sulana pysyminen, eli maaperä putkiston ympärillä ei saa päästä jäätymään. Aluksi oli tarkoitus asentaa termoelementit putkien mukana maahan ja saatujen arvojen avulla oli tarkoitus laskea saatavaa lämpötehoja energiaa, mutta termoelementtejä ei saatu maahan teknisten vaikeuksien vuoksi. Tämän vuoksi pitää maasta saatava lämpöteho ja energia ratkaista seuraavan laskuesimerkin mukaisesti.

### 8.1 Laskuesimerkki

Aluksi esittelen esimerkkilaskun avulla käytetyn laskutavan, jolla ratkaistaan keskimääräinen maasta saatava lämpöteho. Putket ovat kaivamattomalla tekniikalla niin syvällä maaperässä, että maaperän jäätymistä niiden ympärillä ei sallita tapahtuvan. Kun häiriöttömän maan lämpötila tiedetään, ratkaisemalla maasta otettavan lämpötehon vaikutus lämpötilaeroon häiriöttömän maaperän ja lämmönkeruuputken pinnan välillä. Saadaan selville paljonko lämpötehoa voidaan ottaa maasta ilman, että maaperä putken ympärillä jäätyy.

Kaava, jolla lämpötilaero häiriöttömän maaperän lämpötilan ja putken pinnan lämpötilan välillä lasketaan, perustuu lämmönjohtumiskaavaan putken läpi. Oletetaan siis, että lämmönjohtuminen tapahtuu koordinaatistoltaan sylinterimäisessä koordinaatistossa. Kaava on perusmuodossaan seuraavanlainen:  $\phi = (\lambda * 2\pi * \Delta T) / (\ln D_u / D_s) / 8$

Tästä saadaan ratkaistua  $\Delta T$  eli häiriintymättömän maan ja putken ulkopinnassa olevan maan lämpötilaero seuraavalla tavalla.



$$\Delta T = (\ln D_u / D_s * \phi) / (\lambda * 2\pi)$$

Kaavan symbolien selitykset ovat:

$\phi$  = maasta saatava lämpöteho W/m

$\lambda$  = lämmönjohtokyky W/mK

$\Delta T$  = häiriintymättömän maan ja putken ulkopinnassa olevan maan lämpötilaero °C

$D_u$  = vaikutusalueen ulkohalkaisija

$D_s$  = vaikutusalueen sisähalkaisija

Seuraavaksi esimerkkilasku. Ensin lasketaan keruuputkistosta eli maasta saatava teho, joka saadaan seuraavalla kaavalla.  $\phi = mv * c * \Delta T / 8$

Symboliselitykset

$mv$  = lämmönkeruuputkistossa kulkeva massavirtaus kg/s

$c$  = lämmönkeruuputkiston nesteen ominaislämpökapasiteetti kJ/kgK

$\Delta T$  = lämmönkeruuputkiston menon ja paluun lämpötilaero

Nibe Oy:n ja IVT NN Oy:n mukaan lämpöpumppujen lämmönkeruuputkiston virtausnopeus vaihtelee pumpusta riippuen suurin piirtein välillä 0,25 l/s – 0,8 l/s.

Keruunesteenä käytetään 30 % etanoli-vesi liuosta. Sen ominaislämpökapasiteetti pystytään laskemaan kun tiedetään veden ja etanolin ominaislämpökapasiteetit. Ve-

den ominaislämpökapasiteetti on 4,2 kJ/kgK ja etanolin ominaislämpökapasiteetti on 2,44 kJ/kgK. Seuraavalla tavalla ratkaistaan 30% etanoli-vesi liuoksen ominaislämpökapasiteetti.

$$c_{\text{liuos}} = 0,3 * 2,44 + (1 - 0,3) * 4,2 = 3,672 \text{ kJ/kgK.}$$

Eli jos lämmönkeruuputkistossa kulkeva massavirtaus  $mv = 0,4 \text{ kg/s}$  ja 30% etanoli-vesi liuoksen ominaislämpökapasiteetti  $c = 3,672 \text{ kJ/kgK}$  ja lämmönkeruuputkiston menon ja paluun lämpötilaero  $\Delta T = 2 \text{ K}$ . Saadaan maaperästä otettu teho seuraavasti.

$$\phi = 0,4 \text{ kg/s} * 3,672 \text{ kJ/kgK} * 2 \text{ K} = 2937 \text{ W}$$

Tämä on siis koko reiästä saatu teho ja jos reikä on esim. 150 m pitkä, saadaan reikämetriltä saatava teho seuraavasti.

$$2937 \text{ W} / 150\text{m} = 19,58 \text{ W/m}$$

Seuraavaksi voidaankin ratkaista lämpötilaero häiriintymättömän maan ja putken pinnassa olevan maan välillä. Ensin selitän mistä muut arvot tulevat ratkaisukaavaan.

$D_s$  eli vaikutusalueen sisähalkaisija on lämmönkeruuputken halkaisija. Lämmönkeruuputki on 40 mm muoviputkea ja niitä on kaksi rinnakkain. Halkaisijaltaan 0,0566 m putki vastaa pinta-alaltaan kahta 40 mm putkea.  $D_u$ :ksi eli vaikutusalueen ulkohalkaisijaksi otetaan 1m.

Oletetaan siis että lämmönotto maasta toimii staattisena systeeminä. Tässä oletetaan että maasta otettaisiin tietyllä keskiteholla koko ajan lämpöä niin että puolen metrin päässä putkesta olevassa pisteessä säilyisi koko ajan häiriintymättömän maan lämpötila. Todellisuudessa ei näin ole vaan lämmönottosysteemi on dynaaminen. Joskus otetaan enemmän tehoja kuin mitä vuotuinen keskiteho on ja joskus vähemmän. Näin myös häiriintymättömän maan lämpötilapisteen etäisyys vaihtelee putkeen nähden. Lämmönjohtavuus riippuu siis maaperästä ja sen kosteudesta. Nyt voidaankin ratkaista lämpötilaero häiriintymättömän maan ja putken ympärillä olevan maan välillä.

$$\Delta T = (\ln D_u / D_s * \phi) / (\lambda * 2\pi)$$

$$\Delta T = \ln(1 / 0,0566) \text{ m} * 19,58 \text{ W/m} / (1,6 \text{ W/mK} * 2\pi) = 5,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Yllä olevassa kaavassa olevilla arvoilla häiriintymättömän maan ja putken pinnassa olevan maan lämpötilaero on 5,6 °C, kun jatkuva tehonotto olisi 19,58 W/m ja lämmönjohtokyky 1,6 W/mK.

Tästä voidaan vielä selvittää vuotuinen lämmityskauden energiansaanti lämmitystarveluvun avulla. Olen ottanut lämmitystarveluvuksi Tampere-Pirkkala alueen lämmitystarveluvun 4502 °Cvrk. Jos mitoittava lämpötilaero on 47 °C, ja jos lämmitys tapahtuu pelkästään lämpöpumpun avulla. Lämpöpumpun vuotuinen käyntiaika rakennuksen lämmöntarpeeseen saadaan seuraavalla laskutavalla./11 ja 12/

$$4502 \text{ }^\circ\text{Cvrk} * 24 \text{ h} / 47 \text{ }^\circ\text{C} = 2299 \text{ h}$$

Tämä voidaan pyöristää 3000 tuntiin. Tämän lisäksi pitää ottaa huomioon käyttöveden lämmitys. Jos käyttövesi kuluttaa esimerkiksi 20 % energiasta, niin lämpöpumpun vuotuiseksi käyntiajaksi saadaan seuraavalla tavalla.

$$0,8 * 2300 \text{ h} + 0,2 * 8760 \text{ h} = 3592 \text{ h}$$

Lämpöpumpun vuotuinen lämmityskauden käyntiaika on siis noin 3600 tuntia. Sinä aikana saadaan energiaa irti maaperästä  $2,937 \text{ kw} * 3600 \text{ h} = 10573 \text{ kWh}$ , joka tarkoittaisi, että reikämetriä kohden saataisiin energiaa maasta  $10573 \text{ kWh} / 150 \text{ m} = 70,4 \text{ kWh/m}$ .

## 9 TULOKSET

Häiriintymättömän maan lämpötila ja maaperän lämmönjohtavuus ovat siis asiat jotka vaikuttavat maasta saatavaan lämpötehoon ja energiaan. Rajoittavana tekijänä lämmönnotolle on että maaperä lämmönkeruuputkiston ympärillä ei saa päästä jäätymään.

Taulukoissa 9.1 - 9.4 on laskettuna kuinka paljon lämpötehoa ja energiaa keskimäärin saadaan erilaisissa lämmönjohtavuuksissa ja maaperän lämpötiloissa. Seuraavassa selitykset mitä taulukon sarakkeissa on.

Ensimmäisessä sarakkeessa on lämmönkeruuputkiston virtausnopeus. Toisena on lämmönkeruuputkiston nesteen lämpötilamuutos maakerroksella, kolmantena on maasta saatu teho. Neljännessä sarakkeessa on häiriintymättömän maan lämpötila. Viidennessä on reiän pituus. Kuudennessa on maasta saatu teho reikämetriä kohti. Seitsemännessä on häiriintymättömän maan ja putken ulkopuolen välinen lämpötilaero. Kahdeksannessa on putken ulkopuolinen lämpötila jos maata rasiitettaisiin koko lämmityskauden tietyllä tehonotolla. Yhdeksännessä on vuotuinen energiansaanti lämmityskaudella maaperästä. Kymmenennessä on energiansaanti reikämetriä kohti ja viimeisessä sarakkeessa on maaperän lämmönjohtokyky.

Taulukoissa 9.1 - 9.4 ja kuvioissa 9.1 - 9.8 nähdään maan lämmönjohtavuuden vaikutus maasta saatavaan lämpötehoon ja energiaan. Lämmönjohtavuuden muutos näkyy viimeisessä sarakkeessa. Häiriintymättömän maan lämpötilan näkee neljännestä sarakkeesta. Taulukossa 9.1 häiriintymättömän maaperän lämpötila on  $+4^{\circ}\text{C}$ .

Taulukko 9.1. Häiriintymättömän maaperän lämpötila +4 °C

virtaus	liuos dt	teho	maaperä	L reikä	teho/m	dt 1m	maan lämpö- tila	vuotuinen energia	energia/m	lämmönjoh- tokyky
l/s	°C	kW	°C	m	W/m	°C	°C	kWh	kWh/m	W/mK
0,4	0,85	1,248	4	150	8,32	3,80	0,196	4495	30,0	1
0,4	1,05	1,542	4	150	10,28	3,92	0,084	5552	37,0	1,2
0,4	1,25	1,836	4	150	12,24	4,00	0,004	6610	44,1	1,4
0,4	1,4	2,056	4	150	13,71	3,92	0,084	7403	49,4	1,6
0,4	1,6	2,350	4	150	15,67	3,98	0,022	8460	56,4	1,8
0,4	1,75	2,570	4	150	17,14	3,92	0,084	9253	61,7	2
0,4	1,95	2,864	4	150	19,09	3,97	0,033	10311	68,7	2,2
0,4	2,1	3,084	4	150	20,56	3,92	0,084	11104	74,0	2,4

Taulukossa 9.2 käy ilmi maan lämmönjohtavuuden vaikutus maaperästä saatavaan lämpötehoon ja energiaan häiriintymättömän maaperän lämpötilan ollessa +5 °C.

Taulukko 9.2. Häiriintymättömän maaperän lämpötila +5 °C

virtaus	liuos dt	teho	maaperä	L reikä	teho/m	dt 1m	maan läm- pötila	vuotuinen energia	energia/m	lämmönjoh- tokyky
l/s	°C	kW	°C	m	W/m	°C	°C	kWh	kWh/m	W/mK
0,4	1,1	1,616	5	150	10,77	4,92	0,077	5816	38,8	1
0,4	1,3	1,909	5	150	12,73	4,85	0,152	6874	45,8	1,2
0,4	1,5	2,203	5	150	14,69	4,79	0,205	7932	52,9	1,4
0,4	1,7	2,497	5	150	16,65	4,75	0,245	8989	59,9	1,6
0,4	2	2,938	5	150	19,58	4,97	0,027	10575	70,5	1,8
0,4	2,2	3,231	5	150	21,54	4,92	0,077	11633	77,6	2
0,4	2,4	3,525	5	150	23,50	4,88	0,118	12690	84,6	2,2
0,4	2,6	3,819	5	150	25,46	4,85	0,152	13748	91,7	2,4

Taulukossa 9.3 selviää maaperän lämmönjohtavuuden vaikutus maaperästä saatavaan lämpötehoon ja energiaan häiriintymättömän maaperän lämpötilan ollessa +6 °C.

Taulukko 9.3. Häiriintymättömän maaperän lämpötila +6 °C

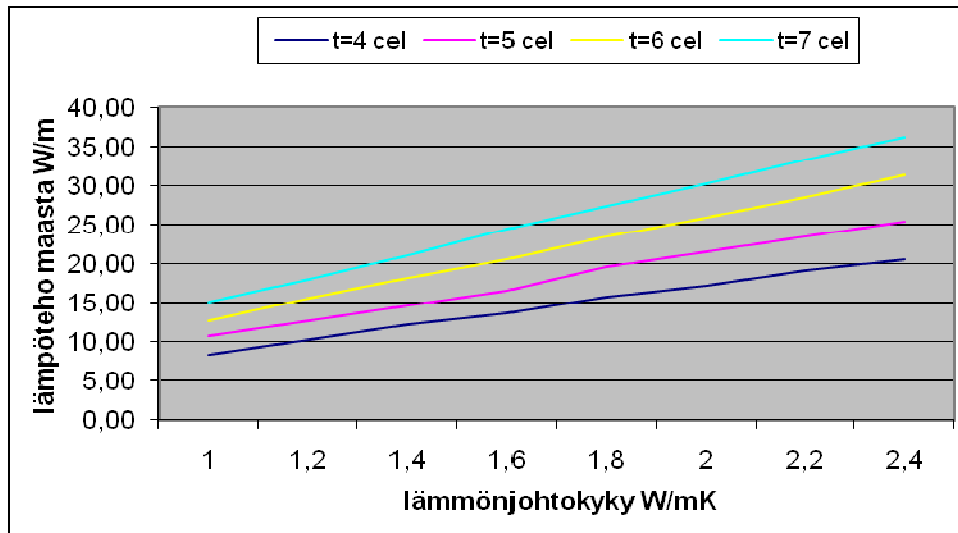
virtaus	liuos dt	teho	maaperä	L reikä	teho/m	dt 1m	maan läm- pötila	vuotuinen energia	energia/m	lämmön- johtokyky
l/s	°C	kW	°C	m	W/m	°C	°C	kWh	kWh/m	W/mK
0,4	1,3	1,909	6	150	12,73	5,82	0,182	6874	45,8	1
0,4	1,6	2,350	6	150	15,67	5,97	0,033	8460	56,4	1,2
0,4	1,85	2,717	6	150	18,12	5,91	0,086	9782	65,2	1,4
0,4	2,1	3,084	6	150	20,56	5,87	0,126	11104	74,0	1,6
0,4	2,4	3,525	6	150	23,50	5,97	0,033	12690	84,6	1,8
0,4	2,65	3,892	6	150	25,95	5,93	0,070	14012	93,4	2
0,4	2,9	4,260	6	150	28,40	5,90	0,101	15334	102,2	2,2
0,4	3,2	4,700	6	150	31,33	5,97	0,033	16921	112,8	2,4

Taulukossa 9.4 selviää maaperän lämmönjohtavuuden vaikutus maaperästä saatavaan lämpötehoon ja energiaan häiriintymättömän maaperän lämpötilan ollessa +7 °C celsiusuasta.

Taulukko 9.4. Häiriintymättömän maaperän lämpötila +7 °C

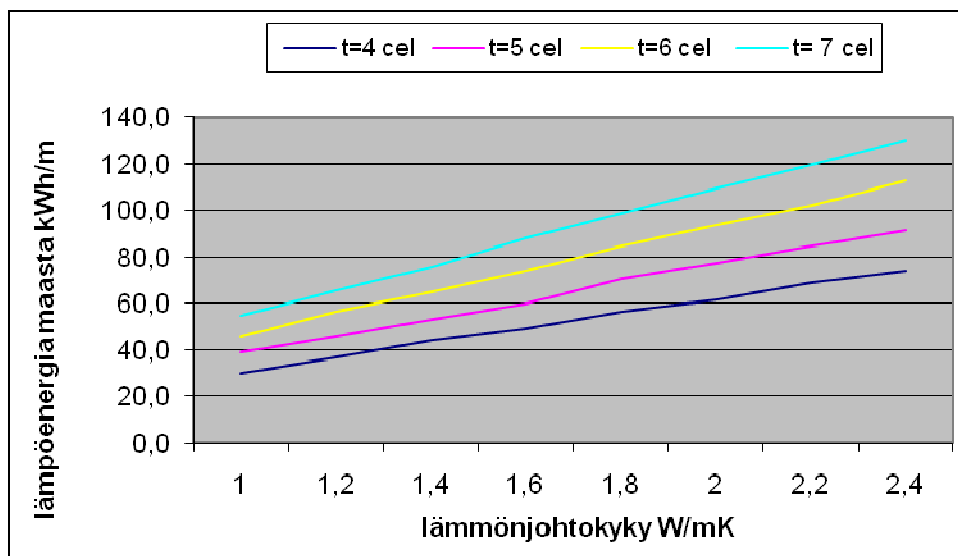
virtaus	liuos dt	teho	maaperä	L reikä	teho/m	dt 1m	maan lämpö- tila	vuotuinen energia	energia/m	lämmönjoh- tokyky
l/s	°C	kW	°C	m	W/m	°C	°C	kWh	kWh/m	W/mK
0,4	1,55	2,277	7	150	15,18	6,94	0,063	8196	54,6	1
0,4	1,85	2,717	7	150	18,12	6,90	0,101	9782	65,2	1,2
0,4	2,15	3,158	7	150	21,05	6,87	0,127	11369	75,8	1,4
0,4	2,5	3,672	7	150	24,48	6,99	0,007	13219	88,1	1,6
0,4	2,8	4,113	7	150	27,42	6,96	0,038	14806	98,7	1,8
0,4	3,1	4,553	7	150	30,36	6,94	0,063	16392	109,3	2
0,4	3,4	4,994	7	150	33,29	6,92	0,084	17978	119,9	2,2
0,4	3,7	5,435	7	150	36,23	6,90	0,101	19564	130,4	2,4

Kuvioissa 9.1-9.3 nähdään maaperän lämmönjohtokyvyn vaikutus maasta saatavaan lämpötehoon ja energiaan erilaisissa häiriintymättömän maan lämpötiloissa. Kuvios-  
ta 9.1 selviää maasta saatava lämpöteho taulukoiden 9.1-9.4 mukaan.



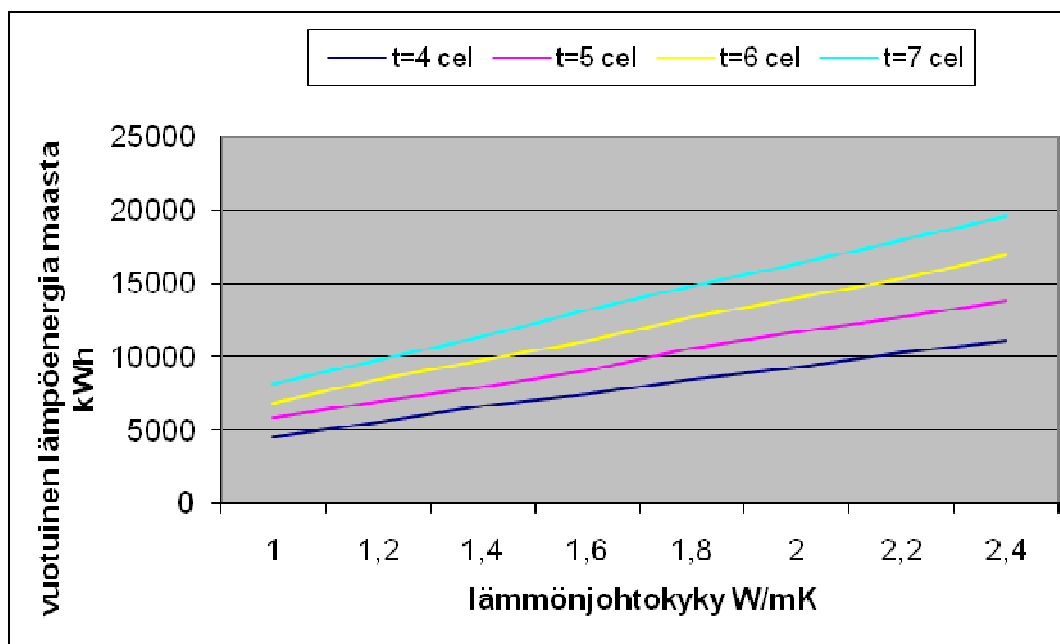
Kuvio 9.1. Saatavissa oleva lämpöteho maasta W/m ilman, että tapahtuisi maaperän jäätymistä lämmönkeruureiän ollessa 150 m pitkä.

Kuviosta 9.2 selviää maasta saatava lämpöenergia taulukoiden 9.1-9.4 mukaan.



Kuvio 9.2. Saatavissa oleva lämpöenergia maasta kWh/m ilman, että tapahtuisi maaperän jäätymistä lämmönkeruureiän ollessa 150 m pitkä.

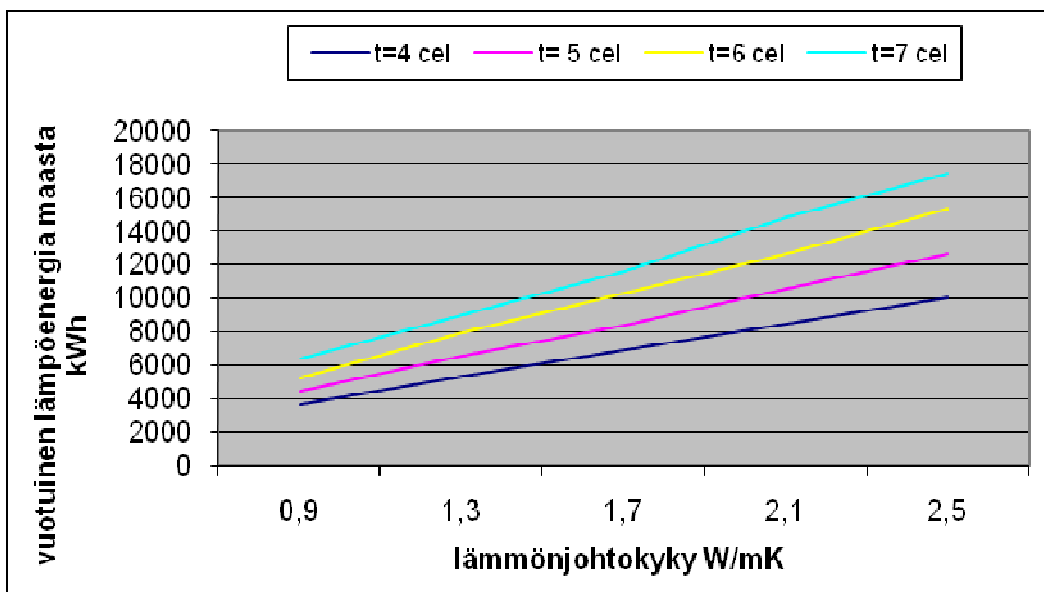
Kuviosta 9.3 näkee että jos maaperä on lämmönjohtavuudeltaan  $1,7 \text{ W/mK}$ , joka vastaa pohjaveden kyllästämää savimaata ja maaperän lämpötila on  $+5^\circ\text{C}$ , saadaan maaperästä silloin 150-m reiällä lämpöenergiaa noin 10000 kWh vuodessa. Lämpöpumpun lämpökertoimen ollessa 3 saadaan lämpöpumpun tuottamaksi kokonaisenergiaksi noin 15000 kWh. Kuviossa 9.3 vuotuinen lämpöenergia taulukoiden 9.1 - 9.4 mukaan.



Kuvio 9.3. Saatavissa oleva vuotuinen lämpöenergia maasta kWh ilman, että tapahtuisi maaperän jäätymistä lämmönkeruureiän ollessa 150 m pitkä.

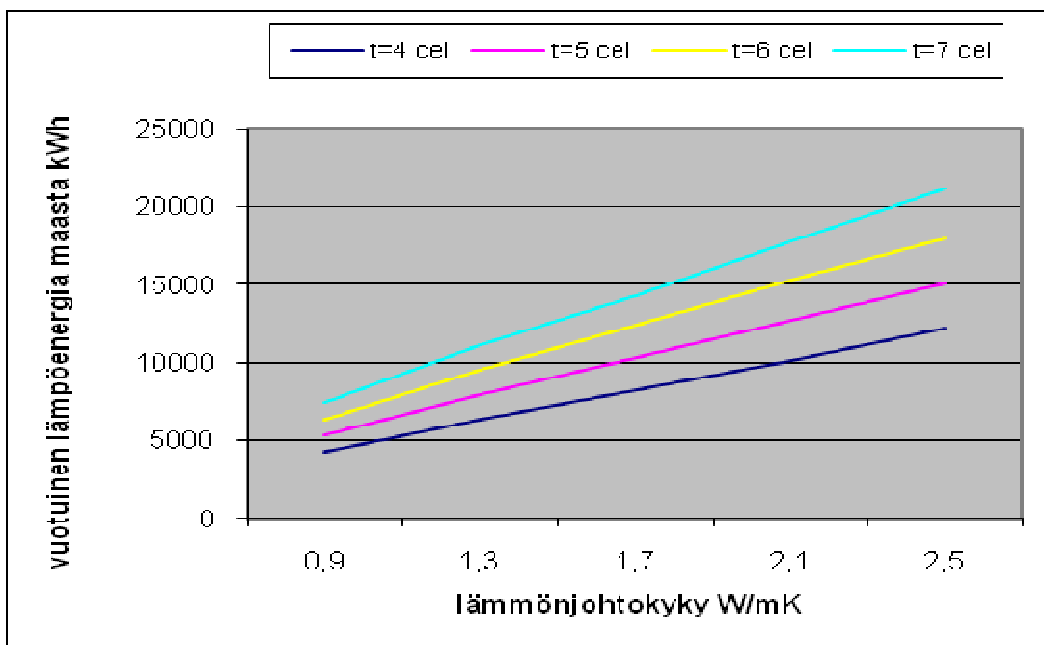
Lämpöteho ja energia reikämetriä kohden on riippumaton reiän pituudesta. Vuotuiseen maasta saatavaan energiamäärään reiän pituus luonnollisesti vaikuttaa. Kuvioissa 9.4 - 9.8 havainnollistetaan kuinka paljon lämpöenergiaa on saatavissa maaperästä erilaisilla reiän pituuksilla eri maaperän olosuhteissa. Ensimmäisessä kuviossa poratun reiän pituus on 130 m. Kuvioon liittyy taulukko (Liite 1).





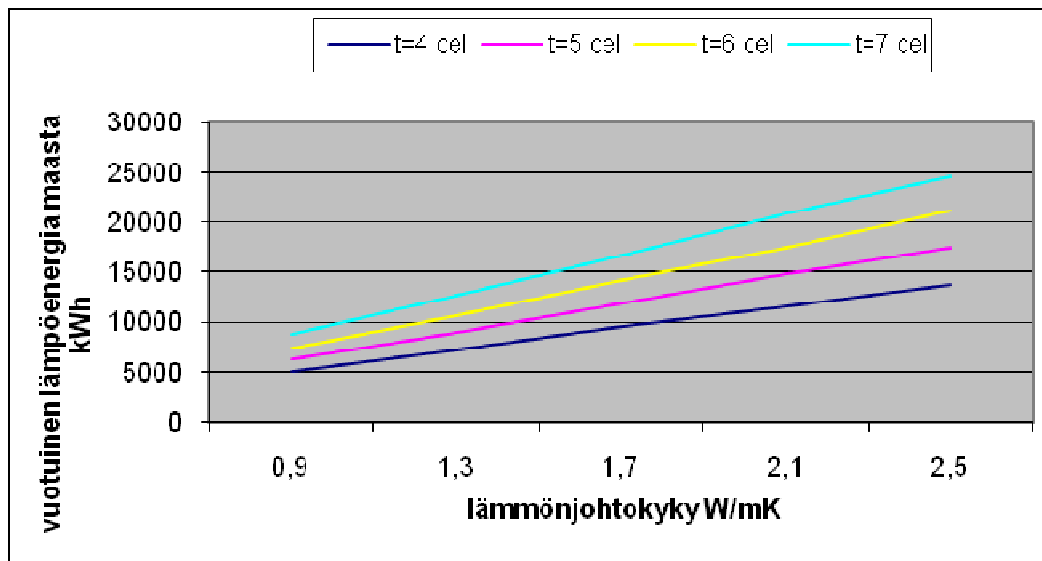
Kuvio 9.4. Saatavissa oleva vuotuinen lämpöenergia maasta kWh ilman, että tapahtuisi maaperän jäätymistä lämmönkeruureiän ollessa 130 m pitkä..

Kuviossa 9.5 poratun reiän pituus on 155 m, kuvaan liittyy taulukko (Liite 2).



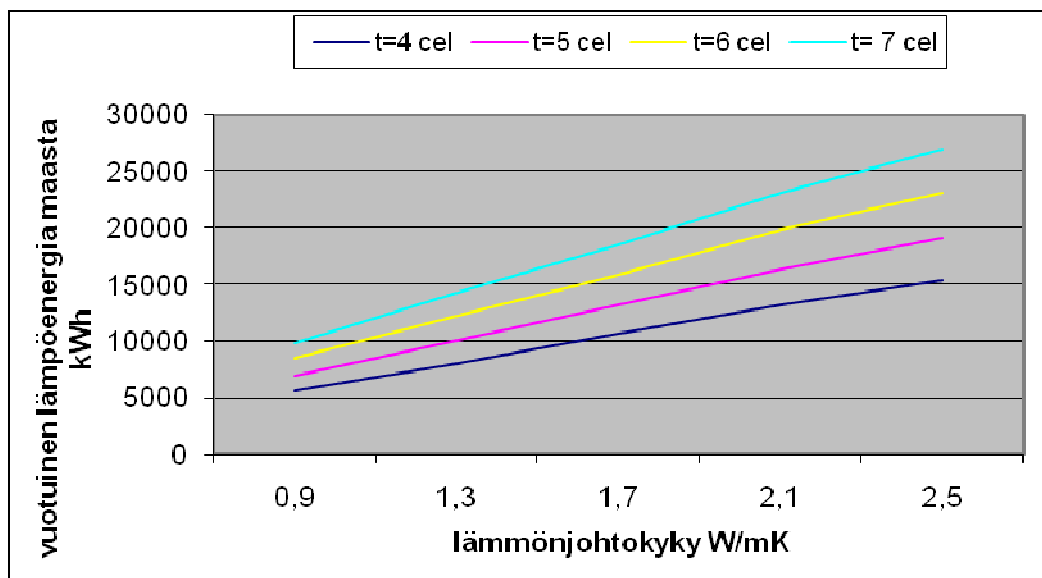
Kuvio 9.5. Saatavissa oleva vuotuinen lämpöenergia maasta kWh ilman, että maaperän jäätymistä tapahtuisi lämmönkeruureiän ollessa 155 m pitkä.

Kuviossa 9.6 maalämpöreian pituus on 180 m, kuvioon liittyy taulukko (Liite 3).



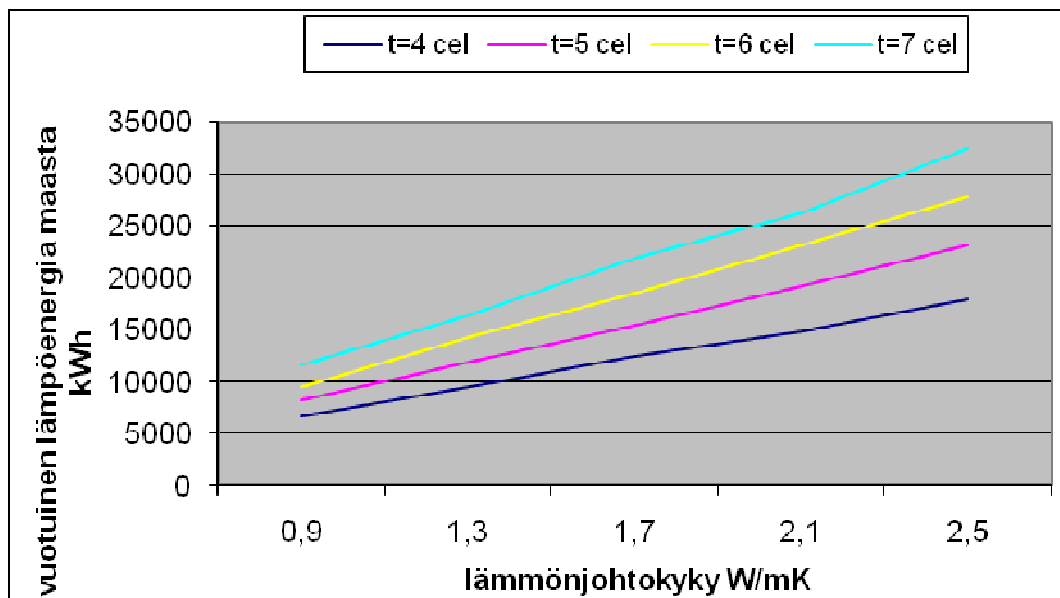
Kuvio 9.6. Saatavissa oleva vuotuinen lämpöenergia maasta kWh ilman, että tapahtuisi maaperän jäätymistä lämmönkeruureiän ollessa 180 m pitkä.

Kuvion 9.7 maalämpöreian pituus on 200 m, kuvioon liittyy taulukko (Liite 4).



Kuvio 9.7. Saatavissa oleva vuotuinen lämpöenergia maasta kWh ilman että tapahtuisi maaperän jäätymistä lämmönkeruureiän ollessa 200 m pitkä.

Kuvion 9.8 maalämpöreian pituus on 235 m, kuvioon liittyy taulukko (Liite 5).



Kuvio 9.8. Saatavissa oleva vuotuinen lämpöenergia maasta kWh ilman, että tapahtuisi maaperän jäätymistä lämmönkeruureian ollessa 235 m pitkä.

Lämmönkeruuputkiston mitoitus tehdään kohteen energiankulutuksen perusteella. Kun tiedetään lämmitykseen menevä energiankulutus ja lämmin käyttövesi lämpiää lämpöpumpulla, on sen energiankulutus myös otettava huomioon. Tiedetään kuinka paljon tarvitaan energiaa otettavaksi maaperästä. Maasta otettavaan energiamäärään vaikuttaa lämpöpumpun lämpökerroin. Mitä parempi lämpökerroin on, sitä enemmän maasta otetaan lämpöenergiaa. Lämpökertoimen ollessa kaksi tulee puolet lämpöenergiasta maaperästä, mutta jos lämpökerroin on kolme, tulee maaperästä silloin 2/3 osaa lämpöenergiasta.

Energiantarpeen ollessa vaikka 20000 kWh ja lämpöpumpun kerroin on 3. Tiedetään siis, että maaperästä tarvittaisiin lämpöenergiaa reilut 13000 kWh. Tämän lisäksi tiedettäisiin maaperän lämmönjohtokyvyn olevan 1,5 W/mK ja maaperän häiriintymättömän lämpötilan +5 °C. Voidaan katsoa (kuvio9.7), että 200 m reikä olisi jonkin verran alimitoitettu ja (kuvio9.8), että 235 m taas vähän ylimitoitettu. Karkeasti arvioiden (kuvio 9.8) voitaisiin sanoa että 230 m reikä olisi hyvin lähellä tarvittavaa metrimäärää.

## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET JA LOPPUYHTEENVETO

Tämän työn tulokset ja laskut perustuvat lämmönjohtumiskaavaan putken läpi, mikä tarkoittaa sitä, että lämpökenttä maaperässä oletetaan lieriömäiseksi. Tällä laskukavalla saaduista tuloksista voidaan vetää seuraavanlaisia johtopäätöksiä.

Yleisesti ottaen vaakaporaustekniikalla asennettu maalämpöputki saa maaperästä enemmän lämpöenergiaa ja tehoa, kuin pintamaahan asennettu vaakaputkisto per metri. Jos taas verrataan porakaivoa ja vaakaporaustekniikkaa, niin yleisesti ottaen porakaivosta saadaan enemmän lämpöenergiaa ja tehoa.

Maaperästä saatavaan lämpöenergiaan ja tehoon vaikuttaa suuresti maaperän lämmönjohtavuus ja häiriintymättömän maaperän lämpötila. Kun lämmönjohtavuus ja lämpötila ovat alhaisia, niin kaivamattomalla tekniikalla ei saada juurikaan sen paremmin lämpöenergiaa ja tehoja kuin pintamaahan asennetulla vaakaputkistolla. Kun taas lämmönjohtavuus ja lämpötila ovat korkeita, kaivamattomalla tekniikalla pystytään saamaan yhtä korkeita lämpöenergia- ja tehomääriä kuin porakaivoillakin.

Maaperän lämmönjohtavuuden ja häiriintymättömän maaperän lämpötilan tutkimiseen kannattaisi panostaa enemmän. Tällöin pystyttäisiin hyödyntämään maalämmön käytössä sellaisia maaperiä, jotka ovat ominaisuuksiltaan optimaalisia maalämmön käyttöön. Esimerkiksi erilaiset vesistöjen alapuolella olevat sedimenttikerrokset sopisivat todennäköisesti hyvin maalämmön lähteeksi, mutta niitä ei juuri ole tutkittu.

Toinen tärkeä asia on maaperän kosteus joka siis nostaa, kuten työstäni käy ilmi huomattavasti maaperän lämmönjohtokykyä, hiekkaisessa maaperässä vielä enemmän kuin savisessa maassa. Koska kosteasta maaperästä saadaan parhaiten lämpöenergiaa ja tehoa, olisi tärkeää tietää millä syvyydellä pohjavesi on, jotta pystytään vaakaporauksella asentamaan maalämpöputket juuri siihen syvyyteen missä maaperä on kosteinta.

Eräs tärkeä johtopäätös jonka voi vetää kosteuden vaikutuksesta maaperän lämmönjohtokykyyn, liittyy hiekkaisesta maaperästä saatavaan lämpöenergiaan ja tehoon. Yleinen käsitys on, että hiekkaisesta maaperästä saadaan vähemmän energiaa kuin savisesta maasta. Edellinen seikka pitääkin paikkansa jos maaperä on kuivaa mutta jos maaperä on kosteaa, niin asia kääntyy toisinpäin. Kosteaa maaperää on yleisesti ottaen aina hyvä lämmönlähde maalämpöputkille ja kostea hiekka on parempi lämmönlähde kuin kostea savi.

Eräs huomionarvoinen asia tutkittavaksi on se miten nopeasti lämpö palautuu lämmönkeruuputken ympärillä. Pystytäänkö maalämpöputkistolla saamaan enemmän lämpöenergiaa ja tehoa jos se on asennettu muutaman metrin syvyyteen joenpohjan alle, kuin sellaisella putkistolla joka on samassa syvyydessä mutta sen yläpuolella ei ole vesistöä. Se mikä vesistön vesimassan vaikutus on maaperän lämpötilaan ja lämmön johtavuuteen onkin mielenkiintoinen seikka tutkittavaksi.

Edellä mainituista seikoista käy ilmi, että vaakaporaustekniikalla saadaan enemmän lämpöenergiaa ja tehoa kuin vaakaputkistolla. Lisäksi vältetään pintamaan mullistamiselta, koska ei tarvita raskasta kaivukalustoa. Lisäksi on tärkeää kiinnittää huomiota maaperän eri ominaisuuksiin, koska niillä on hyvin suuri vaikutus maaperästä saatavaan lämpötehoon ja energiaan.

Maaperästä saatavissa oleva lämpöenergia ja teho on tärkeää tietää, että pystytään mitoittamaan maahan asennettava lämmönkeruuputkisto sopivan mittaiseksi. Lämmönkeruuputkiston ollessa liian lyhyt ei lämmönlähteestä eli maaperästä saada tarpeeksi lämpöenergiaa. Ylimitoitettu eli liian pitkä lämmönkeruuputkisto aiheuttaa ylimääräisiä asennus- ja käyttökustannuksia. Usein sopivan syvyiseen porakaivoon lisätään kuitenkin kymmenen metriä varmuuden vuoksi. Siksi voisi olla kannattavaa toimia samoin myös tämän työn mitoituslaskelmien kanssa. Eli jos laskelmien kautta saataisiin lämmönkeruuputkiston reiän pituudeksi 200 metriä, kannattaisi silloin tehdä 210 metrin reikä.

Lasketut lämpötehot ja energiat perustuvat täysin teoreettiseen laskentaan. Ensiksi oli tarkoitus asettaa maalämpöputkien mukana termoelementit maahan, joiden avulla oltaisi saatu lämpöarvoja maan sisältä ja näin pystytty laskemaan saatujen arvojen avulla lämpötehoja ja energioita. Teknisten ongelmien vuoksi ei näitä termoelementtejä saatu maahan ja siksi saadut tulokset perustuvat täysin teoreettiseen kaavaan.

Tulevaisuudessa olisi hyvä asentaa termoelementtejä erilaisiin syvyyksiin maalämpöputkien asennusvaiheessa, jolloin pystyttäisiin selvittämään tarkemmin millä syvyydellä lämmönkeruuputkisto parhaiten kerää lämpöenergiaa ja tehoa maaperästä. Toivottavasti käytännön kokemukset tulevaisuudessa tukevat näitä saatuja tuloksia.

Lopuksi pitää huomioida, että mitoituslaskelmat perustuvat täysin teoriaan, jolle ei vielä ole saatu käytännön tukea. Tämän vuoksi voidaankin sanoa, että tulevaisuus ja käytännön kokemukset vaakaporauksella eli kaivamattomalla tekniikalla asennetuista maalämpöratkaisuista tulevat toivon mukaan tukemaan näitä nyt saatuja tuloksia.

## LÄHDELUETTELO

1. Suomen Lämpöpumppuyhdistys ry. Maalämpöpumppu.  
[http://www.sulpu.fi/index.php?option=com\\_content&task=view&id=20&Itemid=77](http://www.sulpu.fi/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=77)  
(Viitattu 3.12.2008)
2. Vaakaporauspalvelu VPP Oy. [www.vppoy.com](http://www.vppoy.com) (Viitattu 3.12.2008)
3. Maalämpöpumppuopas. [http://212.50.144.76/sulpu/PDFfiles/LP\\_opas.pdf](http://212.50.144.76/sulpu/PDFfiles/LP_opas.pdf) (Viitattu 3.12.2008)
4. Aittomäki A. ja Wiksten R. (1978) Maaseudun asuinrakennusten lämmitys lämpöpumpulla.
5. VTT, LVI-tekniikan laboratorio, Tiedonanto 38. Lapin ammattiopisto tekniikan ala. LAO-T maalämpöpumppu. <http://www.raol.roiakk.fi/kt/lvi/lampu/03/index.htm>  
(Viitattu 3.12.2008)
6. Ahlström A. Bergvärmeanläggninga där frysning i borrhall orsakar hopklämda kollektorslangar (verkkodokumentti). Luleå: 2005 (Viitattu 3.12.2008). Examensarbete. Luleå tekniska universitet. 55 s. Saatavissa: <http://epubl.ltu.se/1402-1617/2005/070/LTU-EX-05070-SE.pdf>
7. U.S. department of energys state energy program geo4va.  
<http://www.geo4va.vt.edu/A1/A1.htm> (Viitattu 3.12.2008)
8. Valtanen E: (2007) Fysiikan taulukkokirja. Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy.
9. Kallio J., Blomqvist R., Engström J., Tiensuu K., Valpola S., ja Breiling O. Geologian tutkimuskeskus GTK. Maa- ja kalliolämmön mahdollisuuksista. [http://www.greenetfinland.fi/attachment/ee246cbb04c1da363116122aebb56633/6102aea89d3e8802516f40cc9127fdef/KALLIO\\_Kalliolampo\\_kokkola\\_tulevaisuuden\\_mahdollisuus.pdf](http://www.greenetfinland.fi/attachment/ee246cbb04c1da363116122aebb56633/6102aea89d3e8802516f40cc9127fdef/KALLIO_Kalliolampo_kokkola_tulevaisuuden_mahdollisuus.pdf) (Viitattu 3.12.2008)
10. Ilmatieteen laitos. Ilmastotilastot, vertailukausi 1971-2000.  
[http://www.fmi.fi/saa/tilastot\\_100.html#1](http://www.fmi.fi/saa/tilastot_100.html#1)
11. Suomen rakennusmääräyskokoelma D5

12. Rakennustietosäätiö RTS: (2007)) Rakennusten lämmitysjärjestelmät Tampere:  
Tammer-Paino Oy



LIITE 1

MAAPERÄN LÄMMÖNJOHTAVUUDEN VAIKUTUS TEHOON

TAULUKOT REIKÄPITUUDELLA 130 M

virta- liuos dt teho			maa- L reikä	teho/m	dt 1m	maan vuotui- enner- gä/m	ener- gä/m	läm- mönjoh- tokyky		
us			perä			lämpötila	nen energia			
l/s	°C	kW	°C	m	W/m	°C	°C	kWh	kWh	W/mK
0,4	0,69	1,013	4	130	7,80	3,959	0,041	3648	28,1	0,9
0,4	1	1,469	4	130	11,30	3,972	0,028	5288	40,7	1,3
0,4	1,3	1,909	4	130	14,69	3,949	0,051	6874	52,9	1,7
0,4	1,6	2,350	4	130	18,08	3,934	0,066	8460	65,1	2,1
0,4	1,9	2,791	4	130	21,47	3,924	0,076	10047	77,3	2,5

virta- liuos dt teho			maa- L reikä	teho/m	dt 1m	maan vuotui- enner- gä/m	ener- gä/m	läm- mönjoh- tokyky		
us			perä			lämpötila	nen energia			
l/s	°C	kW	°C	m	W/m	°C	°C	kWh	kWh	W/mK
0,4	0,85	1,248	5	130	9,60	4,877	0,123	4495	34,6	0,9
0,4	1,25	1,836	5	130	14,12	4,965	0,035	6610	50,8	1,3
0,4	1,6	2,350	5	130	18,08	4,860	0,140	8460	65,1	1,7
0,4	2	2,938	5	130	22,60	4,918	0,082	10575	81,3	2,1
0,4	2,4	3,525	5	130	27,12	4,957	0,043	12690	97,6	2,5

virta- liuos dt teho			maa- L reikä	teho/m	dt 1m	maan vuotui- enner- gä/m	ener- gä/m	läm- mönjoh- tokyky		
us			perä			lämpötila	nen energia			
l/s	°C	kW	°C	m	W/m	°C	°C	kWh	kWh	W/mK
0,4	1	1,469	6	130	11,30	5,738	0,262	5288	40,7	0,9
0,4	1,5	2,203	6	130	16,95	5,958	0,042	7932	61,0	1,3
0,4	1,95	2,864	6	130	22,03	5,923	0,077	10311	79,3	1,7
0,4	2,4	3,525	6	130	27,12	5,901	0,099	12690	97,6	2,1
0,4	2,9	4,260	6	130	32,77	5,990	0,010	15334	118,0	2,5

virta- liuos dt teho			maa- L reikä	teho/m	dt 1m	maan vuotui- enner- gä/m	ener- gä/m	läm- mönjoh- tokyky		
us			perä			lämpötila	nen energia			
l/s	°C	kW	°C	m	W/m	°C	°C	kWh	kWh	W/mK
0,4	1,2	1,763	7	130	13,56	6,885	0,115	6345	48,8	0,9
0,4	1,7	2,497	7	130	19,21	6,753	0,247	8989	69,1	1,3
0,4	2,2	3,231	7	130	24,86	6,683	0,317	11633	89,5	1,7
0,4	2,8	4,113	7	130	31,64	6,885	0,115	14806	113,9	2,1
0,4	3,3	4,847	7	130	37,28	6,816	0,184	17449	134,2	2,5

LIITE 2

TAULUKOT REIKÄPITUUDELLA 155M

virtaus		liuos	dt	teho	maa- perä	L reikä	teho/m	dt 1m	maan lämpöti- la	vuotui- nen energia	ener- gia/m	lämmön mön- johto- kyky
l/s	°C	°C	°C	kW	°C	m	W/m	°C	°C	kWh	kWh	W/mK
0,4	0,8	1,175	4	155	7,58	3,850	0,150	4230	27,3	0,9		
0,4	1,2	1,763	4	155	11,37	3,998	0,002	6345	40,9	1,3		
0,4	1,55	2,277	4	155	14,69	3,949	0,051	8196	52,9	1,7		
0,4	1,9	2,791	4	155	18,00	3,918	0,082	10047	64,8	2,1		
0,4	2,3	3,378	4	155	21,80	3,984	0,016	12162	78,5	2,5		

virtaus		liuos	dt	teho	maa- perä	L reikä	teho/m	dt 1m	maan lämpöti- la	vuotui- nen energia	ener- gia/m	lämmön mön- johto- kyky
l/s	°C	°C	°C	kW	°C	m	W/m	°C	°C	kWh	kWh	W/mK
0,4	1	1,469	5	155	9,48	4,812	0,188	5288	34,1	0,9		
0,4	1,5	2,203	5	155	14,21	4,997	0,003	7932	51,2	1,3		
0,4	1,95	2,864	5	155	18,48	4,968	0,032	10311	66,5	1,7		
0,4	2,4	3,525	5	155	22,74	4,950	0,050	12690	81,9	2,1		
0,4	2,85	4,186	5	155	27,01	4,937	0,063	15070	97,2	2,5		

virtaus		liuos	dt	teho	maa- perä	L reikä	teho/m	dt 1m	maan lämpöti- la	vuotui- nen energia	ener- gia/m	lämmön mön- johto- kyky
l/s	°C	°C	°C	kW	°C	m	W/m	°C	°C	kWh	kWh	W/mK
0,4	1,2	1,763	6	155	11,37	5,775	0,225	6345	40,9	0,9		
0,4	1,8	2,644	6	155	17,06	5,997	0,003	9518	61,4	1,3		
0,4	2,35	3,452	6	155	22,27	5,987	0,013	12426	80,2	1,7		
0,4	2,9	4,260	6	155	27,48	5,981	0,019	15334	98,9	2,1		
0,4	3,4	4,994	6	155	32,22	5,890	0,110	17978	116,0	2,5		

virtaus		liuos	dt	teho	maa- perä	L reikä	teho/m	dt 1m	maan lämpöti- la	vuotui- nen energia	ener- gia/m	lämmön mön- johto- kyky
l/s	°C	°C	°C	kW	°C	m	W/m	°C	°C	kWh	kWh	W/mK
0,4	1,4	2,056	7	155	13,27	6,737	0,263	7403	47,8	0,9		
0,4	2,1	3,084	7	155	19,90	6,996	0,004	11104	71,6	1,3		
0,4	2,7	3,966	7	155	25,59	6,879	0,121	14277	92,1	1,7		
0,4	3,35	4,920	7	155	31,75	6,909	0,091	17714	114,3	2,1		
0,5	3,2	5,875	7	155	37,90	6,929	0,071	21151	136,5	2,5		

LIITE 3

TAULUKOT REIKÄPITUUDELLA 180 M.

<b>virta- us</b>	<b>liuos dt</b>	<b>teho</b>	<b>maa L perä reikä</b>		<b>teho/m</b>	<b>dt 1m</b>	<b>maan lämpö- tila</b>	<b>vuotui- nen energia</b>	<b>ener- gia/m</b>	<b>lämmönjohto- kyky</b>
l/s	cel	kW	cel	m	W/m	cel	cel	kWh	kWh	W/mK
0,4	0,95	1,395	4	180	7,75	3,937	0,063	5023	27,9	0,9
0,4	1,35	1,983	4	180	11,02	3,873	0,127	7138	39,7	1,3
0,4	1,8	2,644	4	180	14,69	3,949	0,051	9518	52,9	1,7
0,4	2,2	3,231	4	180	17,95	3,907	0,093	11633	64,6	2,1
0,4	2,6	3,819	4	180	21,22	3,879	0,121	13748	76,4	2,5

<b>virta- us</b>	<b>liuos dt</b>	<b>teho</b>	<b>maa L perä reikä</b>		<b>teho/m</b>	<b>dt 1m</b>	<b>maan lämpö- tila</b>	<b>vuotui- nen energia</b>	<b>ener- gia/m</b>	<b>lämmönjohto- kyky</b>
l/s	cel	kW	cel	m	W/m	cel	cel	kWh	kWh	W/mK
0,4	1,2	1,763	5	180	9,79	4,973	0,027	6345	35,3	0,9
0,4	1,7	2,497	5	180	13,87	4,877	0,123	8989	49,9	1,3
0,4	2,25	3,305	5	180	18,36	4,936	0,064	11897	66,1	1,7
0,4	2,8	4,113	5	180	22,85	4,973	0,027	14806	82,3	2,1
0,4	3,3	4,847	5	180	26,93	4,923	0,077	17449	96,9	2,5

<b>virta- us</b>	<b>liuos dt</b>	<b>teho</b>	<b>maa L perä reikä</b>		<b>teho/m</b>	<b>dt 1m</b>	<b>maan lämpö- tila</b>	<b>vuotui- nen energia</b>	<b>ener- gia/m</b>	<b>lämmönjohto- kyky</b>
l/s	cel	kW	cel	m	W/m	cel	cel	kWh	kWh	W/mK
0,4	1,4	2,056	6	180	11,42	5,801	0,199	7403	41,1	0,9
0,4	2	2,938	6	180	16,32	5,738	0,262	10575	58,8	1,3
0,4	2,7	3,966	6	180	22,03	5,923	0,077	14277	79,3	1,7
0,4	3,3	4,847	6	180	26,93	5,860	0,140	17449	96,9	2,1
0,5	3,2	5,875	6	180	32,64	5,967	0,033	21151	117,5	2,5

<b>virta- us</b>	<b>liuos dt</b>	<b>teho</b>	<b>maa L perä reikä</b>		<b>teho/m</b>	<b>dt 1m</b>	<b>maan lämpö- tila</b>	<b>vuotui- nen energia</b>	<b>ener- gia/m</b>	<b>lämmönjohto- kyky</b>
l/s	cel	kW	cel	m	W/m	cel	cel	kWh	kWh	W/mK
0,4	1,65	2,424	7	180	13,46	6,837	0,163	8725	48,5	0,9
0,4	2,4	3,525	7	180	19,58	6,885	0,115	12690	70,5	1,3
0,4	3,15	4,627	7	180	25,70	6,910	0,090	16656	92,5	1,7
0,5	3,15	5,783	7	180	32,13	6,993	0,007	20820	115,7	2,1
0,6	3,1	6,830	7	180	37,94	6,937	0,063	24588	136,6	2,5

## TAULUKOT REIKÄPITUUDELLA 200 M.

virta- us	liuos dt teho		maa- perä	L reikä teho/m dt 1m			maan lämpöti- la	vuotui- nen energia	ener- gia/m	lämmön- johtoky- ky	
	l/s	cel		kW	cel	m					W/m
	0,4	1,05	1,542	4	200	7,71	3,916	0,084	5552	27,8	0,9
	0,4	1,5	2,203	4	200	11,02	3,873	0,127	7932	39,7	1,3
	0,4	2	2,938	4	200	14,69	3,949	0,051	10575	52,9	1,7
	0,4	2,5	3,672	4	200	18,36	3,996	0,004	13219	66,1	2,1
	0,4	2,9	4,260	4	200	21,30	3,893	0,107	15334	76,7	2,5

virta- us	liuos dt teho		maa- perä	L reikä teho/m dt 1m			maan lämpöti- la	vuotui- nen energia	ener- gia/m	lämmön- johtoky- ky	
	l/s	cel		kW	cel	m					W/m
	0,4	1,3	1,909	5	200	9,55	4,848	0,152	6874	34,4	0,9
	0,4	1,9	2,791	5	200	13,95	4,906	0,094	10047	50,2	1,3
	0,4	2,5	3,672	5	200	18,36	4,936	0,064	13219	66,1	1,7
	0,4	3,1	4,553	5	200	22,77	4,955	0,045	16392	82,0	2,1
	0,5	2,9	5,324	5	200	26,62	4,867	0,133	19168	95,8	2,5

virta- us	liuos dt teho		maa- perä	L reikä teho/m dt 1m			maan lämpöti- la	vuotui- nen energia	ener- gia/m	lämmön- johtoky- ky	
	l/s	cel		kW	cel	m					W/m
	0,4	1,6	2,350	6	200	11,75	5,967	0,033	8460	42,3	0,9
	0,4	2,3	3,378	6	200	16,89	5,938	0,062	12162	60,8	1,3
	0,4	3	4,406	6	200	22,03	5,923	0,077	15863	79,3	1,7
	0,5	3	5,508	6	200	27,54	5,994	0,006	19829	99,1	2,1
	0,5	3,5	6,426	6	200	32,13	5,874	0,126	23134	115,7	2,5

virta- us	liuos dt teho		maa- perä	L reikä teho/m dt 1m			maan lämpöti- la	vuotui- nen energia	ener- gia/m	lämmön- johtoky- ky	
	l/s	cel		kW	cel	m					W/m
	0,4	1,85	2,717	7	200	13,59	6,899	0,101	9782	48,9	0,9
	0,4	2,7	3,966	7	200	19,83	6,971	0,029	14277	71,4	1,3
	0,4	3,5	5,141	7	200	25,70	6,910	0,090	18507	92,5	1,7
	0,5	3,5	6,426	7	200	32,13	6,993	0,007	23134	115,7	2,1
	0,6	3,4	7,491	7	200	37,45	6,847	0,153	26967	134,8	2,5

## TAULUKOT REIKÄPITUUDELLA 235 M.

<b>virtaus</b>	<b>liuos</b>	<b>teho</b>	<b>maape-</b>	<b>L</b>	<b>teho/m</b>	<b>dt 1m</b>	<b>maan</b>	<b>vuotui-</b>	<b>ener-</b>	<b>lämmön-</b>
l/s	cel	kW	rä	reikä	W/m	cel	lämpöti-	nen	gia/m	johtoky-
			cel	m			la	energia	kWh	ky
							cel	kWh	kWh	W/mK
0,4	1,25	1,836	4	235	7,81	3,967	0,033	6610	28,1	0,9
0,4	1,8	2,644	4	235	11,25	3,955	0,045	9518	40,5	1,3
0,4	2,35	3,452	4	235	14,69	3,949	0,051	12426	52,9	1,7
0,4	2,8	4,113	4	235	17,50	3,809	0,191	14806	63,0	2,1
0,4	3,4	4,994	4	235	21,25	3,885	0,115	17978	76,5	2,5

<b>virtaus</b>	<b>liuos</b>	<b>teho</b>	<b>maape-</b>	<b>L</b>	<b>teho/m</b>	<b>dt 1m</b>	<b>maan</b>	<b>vuotui-</b>	<b>ener-</b>	<b>lämmön-</b>
l/s	cel	kW	rä	reikä	W/m	cel	lämpöti-	nen	gia/m	johtoky-
			cel	m			la	energia	kWh	ky
							cel	kWh	kWh	W/mK
0,4	1,55	2,277	5	235	9,69	4,920	0,080	8196	34,9	0,9
0,4	2,25	3,305	5	235	14,06	4,944	0,056	11897	50,6	1,3
0,4	2,9	4,260	5	235	18,13	4,873	0,127	15334	65,3	1,7
0,5	2,9	5,324	5	235	22,66	4,931	0,069	19168	81,6	2,1
0,5	3,5	6,426	5	235	27,34	4,999	0,001	23134	98,4	2,5

<b>virtaus</b>	<b>liuos</b>	<b>teho</b>	<b>maape-</b>	<b>L</b>	<b>teho/m</b>	<b>dt 1m</b>	<b>maan</b>	<b>vuotui-</b>	<b>ener-</b>	<b>lämmön-</b>
l/s	cel	kW	rä	reikä	W/m	cel	lämpöti-	nen	gia/m	johtoky-
			cel	m			la	energia	kWh	ky
							cel	kWh	kWh	W/mK
0,4	1,8	2,644	6	235	11,25	5,713	0,287	9518	40,5	0,9
0,4	2,7	3,966	6	235	16,88	5,933	0,067	14277	60,8	1,3
0,4	3,5	5,141	6	235	21,88	5,881	0,119	18507	78,8	1,7
0,5	3,5	6,426	6	235	27,34	5,951	0,049	23134	98,4	2,1
0,6	3,5	7,711	6	235	32,81	5,999	0,001	27760	118,1	2,5

<b>virtaus</b>	<b>liuos</b>	<b>teho</b>	<b>maape-</b>	<b>L</b>	<b>teho/m</b>	<b>dt 1m</b>	<b>maan</b>	<b>vuotui-</b>	<b>ener-</b>	<b>lämmön-</b>
l/s	cel	kW	rä	reikä	W/m	cel	lämpöti-	nen	gia/m	johtoky-
			cel	m			la	energia	kWh	ky
							cel	kWh	kWh	W/mK
0,4	2,2	3,231	7	235	13,75	6,983	0,017	11633	49,5	0,9
0,4	3,1	4,553	7	235	19,38	6,812	0,188	16392	69,8	1,3
0,5	3,3	6,059	7	235	25,78	6,931	0,069	21812	92,8	1,7
0,6	3,3	7,271	7	235	30,94	6,733	0,267	26174	111,4	2,1
0,7	3,5	8,996	7	235	38,28	6,999	0,001	32387	137,8	2,5