

Saku Purhonen

# ENERGIAKAIVOJEN MITOITUKSEEN LIITTYVÄT TEKIJÄT

Opinnäytetyö  
Talotekniikka


Huhtikuu 2016




MAMK

University of Applied Sciences

# KUVAILULEHTI

 <b>MAMK</b> University of Applied Sciences		<b>Opinnäytetyön päivämäärä</b>	
<b>Tekijä(t)</b> Saku Purhonen		<b>Koulutusohjelma ja suuntautuminen</b> Talotekniikan koulutusohjelma	
<b>Nimeke</b> Energiakaivojen mitoittamiseen liittyvät tekijät			
<b>Tiivistelmä</b> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, miten energiaa on saatavissa energiakaivosta ja millaisia vaikutuksia näillä tekijöillä on. Näihin tekijöihin perehdyttiin tutustumalla aiheesta aiemmin julkaistuun tutkimustietoon. Lisäksi työssä perehdyttiin Suomen Talotekniikka Energian vuonna 2014 toteuttamaan kuusi kerrostaloa sisältävään As. Oy Pellosharjun lämmitysjärjestelmäsaneeraukseen, jossa kiinteistöjen vanhat öljylämmitysjärjestelmät vaihdettiin maalämpöjärjestelmiin.</p> <p>Tärkeimmät seikat, joilla on vaikutusta energiakaivosta saatavaan energiamäärään, ovat kaivon sijainti, aktiivisyys, kallioperän koostumus, pohjaveden virtaukset, keruuputkiston tyyppi ja sijoitustapa kaivossa sekä lämmönsiirtoneste ja sen virtaama. Osa näistä tekijöistä on sellaisia, joihin ei ole mahdollista vaikuttaa. Tämän johdosta tulisi panostaa tekijöihin, joilla pystytään optimoimaan pumppauskustannukset sekä energiansaanti kaivosta.</p> <p>Esimerkkikohteena työssä käytetystä As. Oy Pellosharjun lämpöpumpuilta on kerätty seurantatietoja vuoden ajalta. Kohteen kokonaislämmitysenergiankulutus on ollut 1004,5 MWh ja lämpöpumppujen yhteenlaskettu sähköenergiankulutus 242,9 MWh. Lämpöpumppujen yhteenlaskettu COP- arvo on täten 4,1, jota voidaan pitää erittäin hyvänä arvona. Hyvään COP- arvoon on päästy onnistuneen lämpöpumpumitoituksen, rakennusten matalalämpöradiaattoriverkostojen, hyvin lämpöä johtavan kallioperän, sekä onnistuneen energiakaivomitoituksen yhteisvaikutuksesta.</p>			
<b>Asiasanat (avainsanat)</b> Maalämpö, energiakaivo, geoterminen energia, optimointi			
<b>Sivumäärä</b> 43 + 6	<b>Kieli</b> Suomi	<b>URN</b>	
<b>Huomautus (huomautukset liitteistä)</b>			
<b>Ohjaavan opettajan nimi</b> Martti Veuro		<b>Opinnäytetyön toimeksiantaja</b> Suomen Talotekniikka Energia Mikkeli Oy	

## DESCRIPTION

		<b>Date of the bachelor's thesis</b>
<b>Author(s)</b>  Saku Purhonen		<b>Degree programme and option</b>  Building services
<b>Name of the bachelor's thesis</b>  Parameters of energy well designing		
<b>Abstract</b>  <p>The purpose of this bachelor's thesis was to examine which things affect energy capacity of energy well. The study began by examining earlier thesis and As. Oy Pellosharju. As. Oy Pellosharju consists of six apartment houses. The old heating system was oil heating. Suomen Talotekniikka Energia Mikkeli realised heating system renovation from oil heating to geothermal heating system in 2014.</p> <p>The main things which affects energy volume of energy well are location of the energy well, borehole active depth, composition of bedrock, flow of bore water, borehole heat exchanger and heat transfer fluid. Some of these things can be affected and some depends on the location.</p> <p>In the example As. Oy Pellosharju ground- source heat pumps operation have been monitored about one year. Heating energy consumption was 1004, 5 MWh which includes 242, 9 MWh electricity energy. Due to that, ground source heat pump COP is 4,1 which is very good value especially considering age of these apartment houses. Good COP value tells that the dimensioning of this geothermal heating system is successful. Other reasons for good COP value are good thermal conductivity of the bedrock and low temperature radiator network.</p>		
<b>Subject headings, (keywords)</b>  Geothermal energy, borehole, energy efficiency, optimization, energy well		
<b>Pages</b>  43 + 6	<b>Language</b>  Finnish	<b>URN</b>
<b>Remarks, notes on appendices</b>		
<b>Tutor</b>  Martti Veuro		<b>Bachelor's thesis assigned by</b>  Suomen Talotekniikka Energia Mikkeli Oy

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	1
2	MAALÄMPÖ .....	2
2.1	Lämpöpumpun toimintaperiaate .....	2
2.2	Lämpökertoimet.....	4
2.3	Lämmönjakotavat .....	4
3	GEOENERGIA .....	5
3.1	Maahan sijoitettu lämmönkeruupiiri.....	7
3.2	Vesistökeruupiiri.....	8
3.3	Energiakaivo .....	9
3.3.1	Energiakaivon rakenne .....	10
3.4	Maalämpöjärjestelmän rakentamiseen tarvittavat luvat .....	12
4	GEOENERGIAKENTÄN MITTAUSTAVAT .....	13
4.1	TRT-mittaus.....	13
4.2	DTS-mittaus.....	14
4.3	EED-mallinnus .....	14
5	LÄMMÖNSIIRTYMINEN ENENERGIAKAIVOSSA .....	15
5.1	Energiakaivon lämmönjohtavuus ja lämmönvastus .....	16
5.2	Lämmönsiirtymismallit.....	17
6	YMPÄRISTÖN VAIKUTUKSET ENENERGIAKAIVOON .....	18
6.1	Energiakaivon sijainti .....	18
6.2	Pohjavesi.....	18
6.3	Maaperä .....	19
6.3.1	Kallioperä .....	19
6.4	Energiakaivon täyteaine.....	20
7	LÄMMÖNKERUUPUTKISTO JA LÄMMÖNSIIRTONESTE .....	21
7.1	Lämmönkeruuputkisto .....	21
7.1.1	U-keruuputki .....	22
7.1.2	Koaksiaalikeruuputki .....	23
7.2	Lämmönsiirtoneste .....	25
7.2.1	Lämmönsiirtonesteen virtausnopeus .....	26
8	ENERGIAKAIVON MITOITUS .....	27

9	ESIMERKKIKOHDE: AS. OY PELLOSHARJU .....	29
9.1	Maalämpöjärjestelmä.....	29
9.2	Mittaukset .....	30
9.3	Tulokset .....	34
9.3.1	Kiinteistöjen energiankulutus .....	34
9.3.2	Energiakenttien toiminnan seuranta.....	35
9.3.3	Esimerkki kylmimmästä päivästä .....	35
9.4	Tulosten tarkastelu.....	36
9.4.1	Energiankulutus .....	36
9.4.2	Energiakentät .....	37
9.5	POHDINTA.....	38
	LÄHTEET.....	41

## LIITTEET

1 TRT- mittausraportti Kallioharjuntie 1-6

2 Poraussuunnitelma As. Oy Pellosharju

## 1 JOHDANTO

Maalämpö on kasvattanut asemaansa merkittävästi rakennusten lämmitysmuotona viime vuosikymmenien aikana. Sähkön sekä öljyn hinnan nousu saavat yhä useammat miettimään vanhan lämmitysjärjestelmän vaihtamista maalämpöön. Lisäksi kiristyneet energiamääräykset puoltavat maalämmön valintaa. Nykyisin maalämpöjärjestelmiä rakennetaan myös rakennuksiin, jotka sijaitsevat kaukolämpöverkkoalueella. Tähän on erityisesti syinä maalämmön omavaraisuus, energiakaivojen mahdollinen käyttö jäähdytyksessä sekä lämpöpumppujärjestelmien kehitymisestä johtuvat pienenevät takaisinmaksuajat.

Yksi merkittävä kustannuserä maalämmön alkuinvestoinnissa on lämmönkeruujärjestelmä. Keruupiiri voidaan asentaa maaperään, vesistöön tai porakaivoon. Näistä huomattavasti yleisintä on porata yksi tai useampi porakaivo, jonne keruuputket asennetaan.

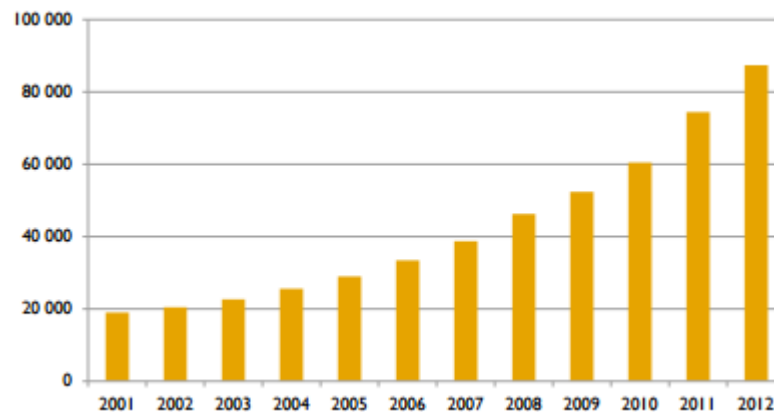
Porakaivon mitoitus ei ole yksinkertaista, koska muuttuvia tekijöitä on monia. Porakaivosta saatava energiamäärä riippuu muun muassa kaivon syvyydestä, kallioperän koostumuksesta, pohjaveden virtauksesta, keruuputkistosta sekä lämmönkeruunesteen virtauksesta keruuputkistossa. Usein, etenkin pienissä kohteissa, porakaivo mitoitetaan pelkästään rakennuksen energiantarpeen mukaan ilman, että on perehdytty maaperän vaikutuksiin energiansaannissa.

Opinnäytetyön tilaajana on Suomen Talotekniikka Energia Mikkeli Oy. STT Energia Mikkeli on rakennusten energiatekniikkaan keskittynyt yritys, joka tarjoaa energiatekniikkaan liittyviä palveluita asuin-, liike- ja julkisenrakentamisen saralla erityisesti Etelä-Savon alueella.

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, mitkä asiat vaikuttavat energian saantiin energiakaivoista sekä millaisia vaikutuksia näillä tekijöillä on. Aluksi aiheeseen perehdyttiin teorian kautta etsimällä tietoa eri lähteistä. Lopussa on perehdytty Suomen Talotekniikka Energian toteuttamaan kuusi kerrostaloa käsittävään maalämpösaneerauskohteeseen.

## 2 MAALÄMPÖ

Suomessa maalämpöä on käytetty erityisesti pientalojen lämmitysmuotona 1970-luvun puolivälistä alkaen. Tuolloin niiden suosio kasvoi voimakkaasti energiakriisitakia. Kymmenen vuoden kuluttua tästä maalämpöpumppujen myynti kuitenkin loppui lähes täysin. 1990-luvun loppupuolella maalämpöpumppujen myynti alkoi jälleen lisääntyä merkittävästi kasvun ollessa noin 20- 30 % /vuodessa. Kuvasta 1 voidaan nähdä että vuoden 2012 lopussa oli Suomeen asennettu lähes 90 000 maalämpöpumppua. /1, s.11./



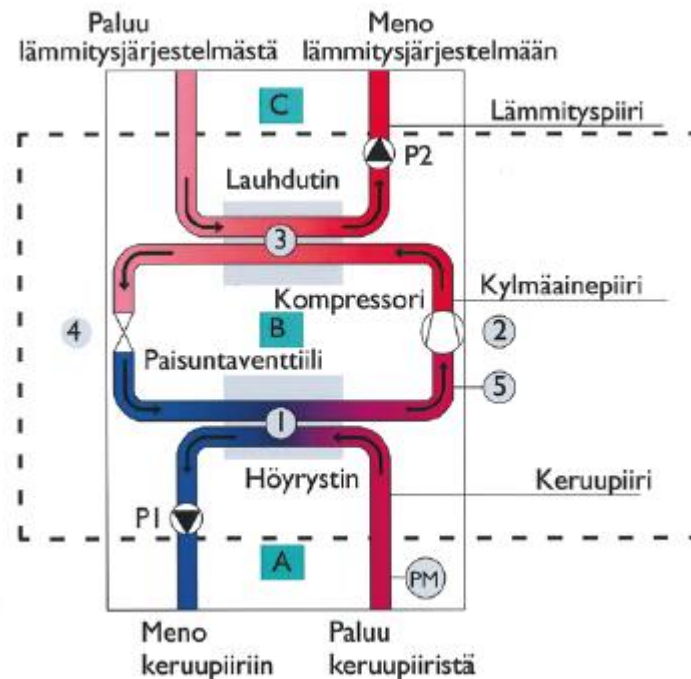
**KUVA 1. Suomeen asennettujen maalämpöpumppujen kokonaismäärän kehitys vuosina 2001- 2012 /1.s.11/**

Maalämmöllä tuotetusta energiasta noin 2/3 on uusiutuvaa energiaa. Tämän johdosta sen käyttö on edullista, mutta maalämpöjärjestelmän investointikustannukset ovat suhteellisen korkeat. Sähkön sekä öljyn hinnan nousu sekä kiristyneet energiamääräykset ovat kuitenkin vaikuttaneet monien ihmisten päätökseen valita/vaihtaa lämmitysmuoto maalämpöön. Valintaa puoltaa lisäksi matalilla lämpötiloilla toimivien lattialämmitysten yleistyminen rakennusten lämmönluovutus muotona sekä lämpöpumppujen kehitys ja niiden tarjoamat mahdollisuudet. /2, s.2./

### 2.1 Lämpöpumpun toimintaperiaate

Lämpöpumpun tehtävänä on siirtää lämpöä alemmasta lämpötilasta korkeampaan. Maalämpöpumpulla hyödynnetään maaperässä olevaa lämpöä, joka jalostetaan rakennuksen lämmitysjärjestelmälle sekä nostamaan lämpimän käyttöveden lämpötila riittävän korkeaksi. /2, s.3./

Lämpöpumppulaitteiston tärkeimmät komponentit ovat höyrystin, kompressor, lauhdutin sekä paisuntaventtiili. Kuvassa 2 on esitetty lämpöpumpun toimintaperiaate.



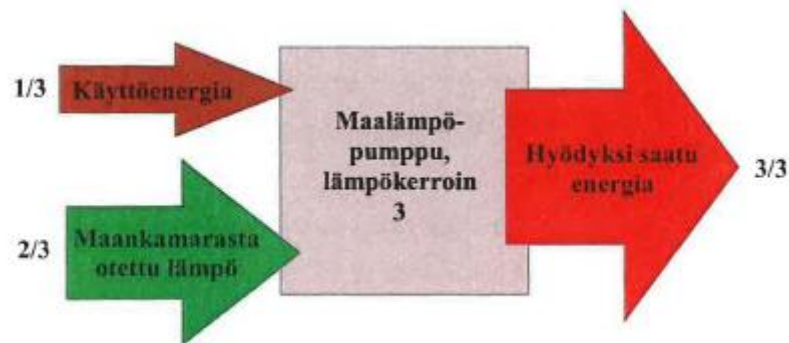
**KUVA 2. Lämpöpumpun toimintaperiaate /1, s.12/**

1. Keruupiiristä (A) saatu lämpöenergia siirtyy kylmäainepiiriin höyrystimen kautta. Kylmäaine muuttuu muotoaan nesteestä kaasuksi.
2. Lämpöpumpun kompressor puristaa kylmäainekaasua kasaan, jolloin se muuttuu korkeapaineiseksi ja korkealämpöiseksi kaasuksi. Kompressorin käyttämä sähköenergia muuttuu myös lämmöksi ja nostaa omalta osaltaan kylmäaineen lämpötilaa.
3. Lämpöenergia siirtyy kylmäainepiiristä (B) rakennuksen lämmitysjärjestelmään (C) lämpöpumpun lauhduttimen välityksellä. Kylmäaine muuttuu takaisin nestemäiseksi.
4. Paisuntaventtiilille mennessään kylmäaineen paine ja lämpötila laskevat. Kylmäaine virtaa höyrystimeen ja prosessi jatkuu kohdan 1 mukaisesti.
5. Matalapainekeytkin toimii järjestelmässä vuodonilmaisimena. Mikäli lämmönkeruunesteen määrä tai kierto eivät ole riittäviä, sammutetaan kompressor ja keruupiiripumppu matalapainekeytkimen kautta. /1, s.12./



## 2.2 Lämpökertoimet

Lämpökerroin COP (Coefficient Of Performance) kertoo, kuinka paljon enemmän lämpöpumppu tuottaa lämpöenergiaa kuin kuluttaa sähköenergiaa. Yleensä lämpöpumpun lämpökerrointa on pidetty hyvänä, kun  $COP=3$ . Tämä tarkoittaa sitä, että  $1/3$  lämpöpumpulle tulevasta energiasta on sähköä ja  $2/3$  maasta saatua energiaa (Kuva 3). Maalämpöpumpun lämpökerroin on aina parempi, mitä pienempi lämpötilaero on ensiöpuolen lämmönlähteen ja toisiopuolen lämmönluvuttimen välillä. /2, s.2./



**KUVA 3. Lämpökertoimen muodostuminen maalämpöpumpulla /3, s.17/**

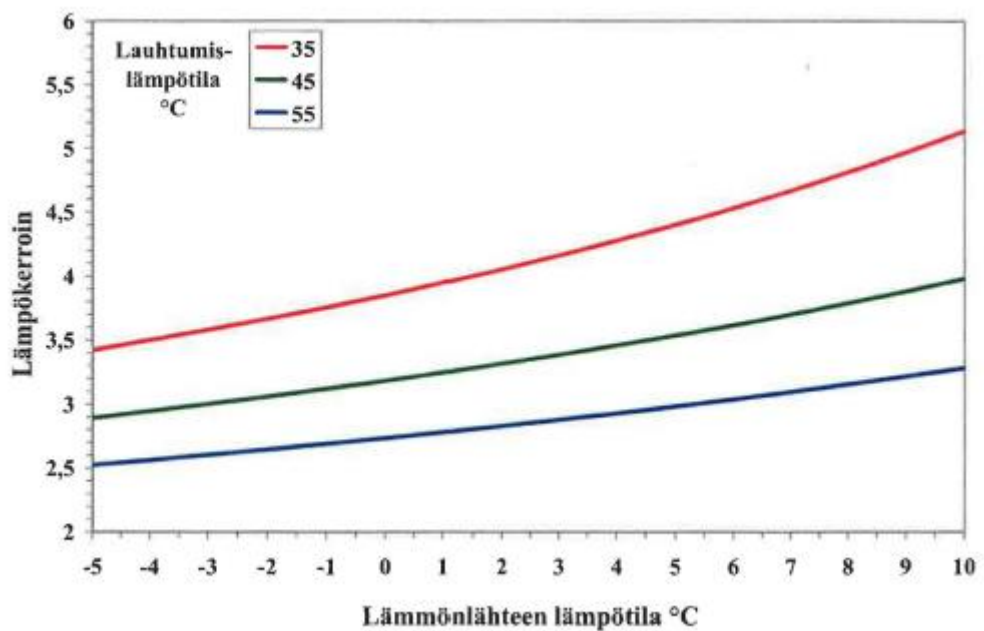
Osa lämpöpumppuvalmistajista ilmoittaa lämpöpumpulle SCOP (Seasonal Coefficient of Performance) -arvon. Tämä arvo kertoo lämpökertoimen koko lämmityskaudelle, eli vuosihyötysuhteen. SCOP-arvoja on helpompi vertailla eri laitteiden välillä, koska ne lasketaan ilmastovyöhykkeiden mukaan. Eurooppa on jaettu kolmeen eri ilmastovyöhykkeeseen: Etelä-Eurooppaan, Keski-Eurooppaan sekä Pohjois-Eurooppaan. Suomessa myytävien laitteiden SCOP-laskennassa käytetäänkin Pohjois-Euroopan arvoa, joka perustuu Helsingin ilmasto-olosuhteisiin. SCOP-arvo on tulevaisuudessa syrjäyttämässä COP-arvon kaikissa lämpöpumpuissa, mikä helpottaa etenkin kuluttajia eri laitteiden vertailussa. /4./

## 2.3 Lämmönjakotavat

Koska maalämpöpumpun lämpökerroin on sitä parempi, mitä pienempi lämpötilaero on lämmöneruunsteen ja lämmönluvuttimen välillä, soveltuu lattialämmitys hyvin maalämmön yhteyteen. Lattialämmityksessä yleisesti käytetty menoveden lämpötila on  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kun taas ilmalämmityksellä  $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja radiaattorilämmityksellä  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Kuvassa 4 on esitetty lämpöpumpun lauhtumislämpötilan ja lämmönlähteen lämpötilan vaikutus lämpökertoimeen. /3, s.18./

Kuvasta 4 voidaan todeta lämpökertoimen olevan lattialämmitystä käytettäessä noin 4,1, kun lämmönlähteen lämpötila on  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Radiaattorilämmitystä käytettäessä, lämpökerroin samalla lämmönlähteen lämpötilalla on noin 2,9. Lattialämmityksellä lämpökerroin olisi tässä tapauksessa noin 41 % korkeampi kuin radiaattorilämmitystä käytettäessä.

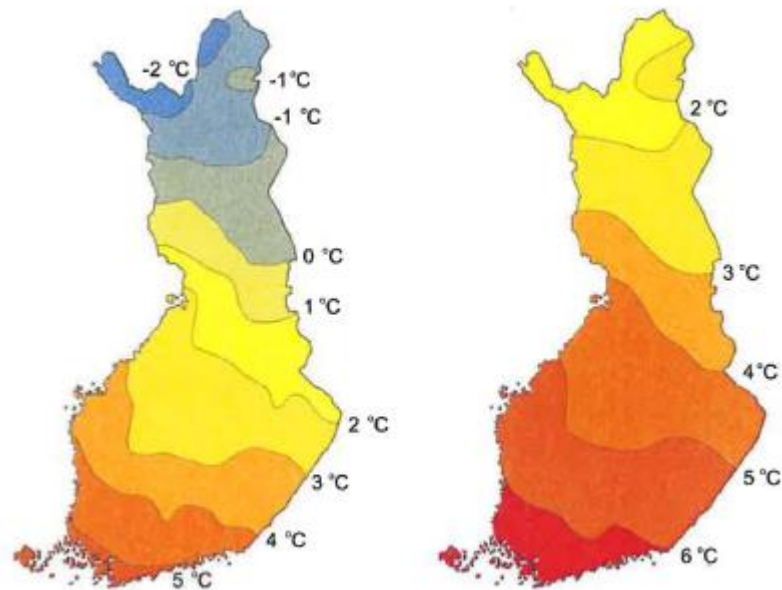


**KUVA 4. Lauhtumis-, ja lämmönlähteenlämpötilojen vaikutus lämpökertoimeen**  
/3, s.18/

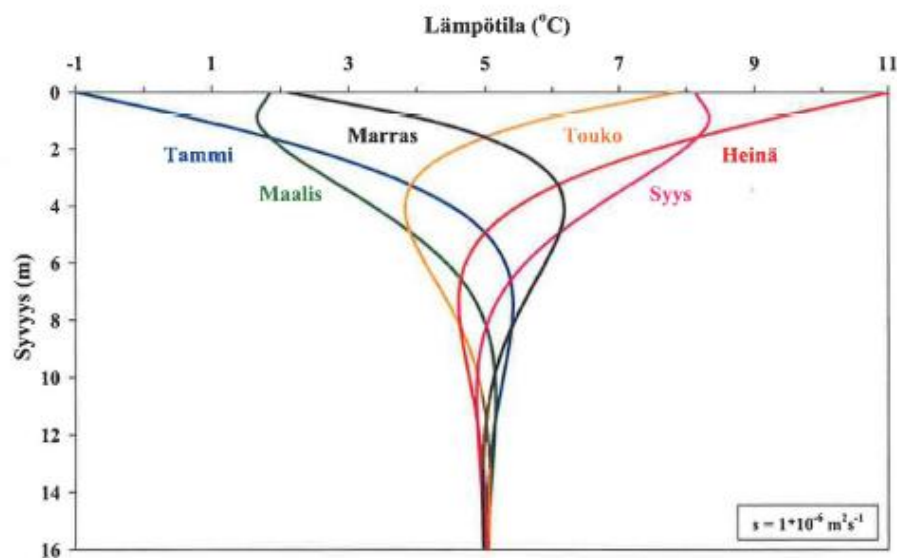
### 3 GEOENERGIA

Maanpinnan lämpötilaan vaikuttavat useat eri tekijät, kuten ulkoilman lämpötila, lumipeite, maaperän faasimuutokset sulan ja roudan välillä, kasvillisuus sekä veden liikehdintä maan sisällä. Suomessa maanpinnan vuotuisen keskilämpötilan on mitattu olevan muutaman asteen korkeampi kuin ilman keskilämpötilan. Kuvassa 5 on esitetty vertailukaudelta 1971 - 2000 ilman vuotuinen keskilämpötila, jonka perusteella on laskettu maanpinnan vuotuiset keskilämpötilat. /3, s.9./

Auringon säteily lämmittää erityisesti pintamaata ja sen vaikutukset siirtyvät alaspäin samalla vaimentuen. Syvemmällä maan sisäosissa oleva lämpö on pääosin peräisin radioaktiivisten aineiden hajoamisesta. Vuosittaisten pintalämpötilojen vaihtelun on laskettu ulottuvan noin 10 - 15 metrin syvyyteen maanpinnasta. Kuvasta 6 nähdään, että noin 15 metrin syvyyteen mentäessä maanpintalämpötilojen vaihtelu tasaantuu ja on noin  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . /3, s.6./



**KUVA 5. Vasemmalla ilman vuotuinen keskilämpötila. Oikealla maanpinnan vuotuinen keskilämpötila /3, s.11/**



**KUVA 6. Maanpinnan lämpötilan riippuvuus vuodenajasta /3, s.7/**

### 3.1 Maahan sijoitettu lämmönkeruupiiri

Maahan sijoitetussa lämmönkeruupiirissä (kuva 8) maalämpöpumpun keruuputkisto on asennettu irtomaahan vaakatasoon noin 0,7-1,2 metrin syvyyteen maanpinnasta. Putkilenkkien väli on noin 1,5 metriä, jolloin maakeruuputkisto vaatii noin 1,5 m<sup>2</sup> pinta-alan yhtä putkimetriä kohden. Koska maakeruupiirissä keruuputkisto on lähellä maanpintaa, on sieltä saatava energia pääosin auringonsäteilyn vaikutuksesta pinta-maahan sitoutunutta energiaa. /3, s.13; 5, s.6./

Maakeruupiirissä tärkeimpänä mitoistekijänä voidaan pitää maaperän lämmönjohtavuutta ja sen kosteuspitoisuutta. Mikäli keruupiiri ylimitoitetaan, kuluu sähköenergiaa enemmän kasvavien pumppauskustannusten johdosta, kun taas alimitoitettu keruuputkisto johtaa lämmönlähteen (maan) viilentymiseen ja sen kautta myös alhaisempaan höyrystyslämpötilaan. /6, s.4./

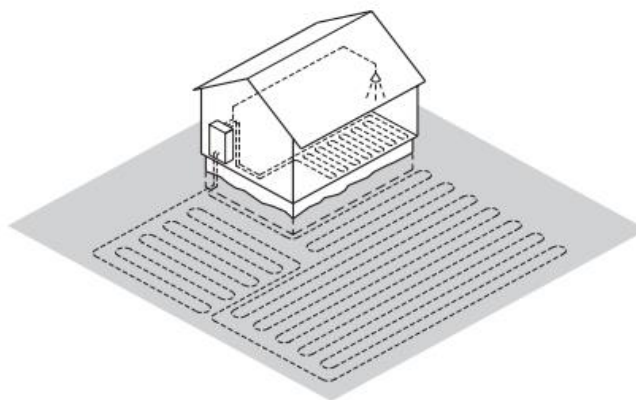
Karkeana arvona maakeruupiiriä mitoittaessa voidaan pitää 1 - 2 putkimetriä yhtä rakennuksen lämmitettävää rakennuskuutiota kohti. Maakeruuputkisto on hyvä vaihtoehto silloin, kun rakennuksen läheisyydessä on riittävästi helppokaivuista kosteaa maata. Paras maalaji maakeruuputkiston asennukselle on kostea savimaa. Kuvassa 7 on esitetty ohjeellisia arvoja vuotuisille lämpöenergiamäärille. /6, s.4./

Sijainti	Savi		Hiekka	
	Energia (kWh/m)	Maksimiteho (W/m)	Energia (kWh/m)	Maksimiteho (W/m)
Etelä-Suomi <sup>1)</sup>	50–60	20	30–40	14
Keski-Suomi	40–45	18	15–20	10
Pohjois-Suomi <sup>2)</sup>	30–35	14	0–10	5

<sup>1)</sup> Linjan Kokkola–Savonlinna eteläpuoli

<sup>2)</sup> Lappia lukuun ottamatta

**KUVA 7. Ohjeellisia arvoja maasta vuotuisesti saatavista lämpöenergioista ja tehoista /3, s.21/**



**KUVA 8. Periaatekuva maahan sijoitetusta keruupiiristä /6, s.3/**

### **3.2 Vesistökeruupiiri**

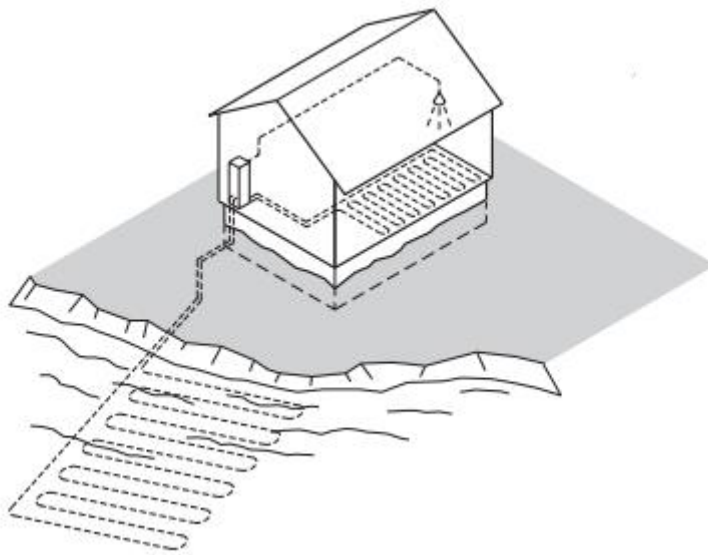
Keruuputkisto on mahdollista asentaa myös vesistöön (kuva 10), mikäli rakennuksen läheisyydestä sellainen löytyy. Pientalon kannalta maksimietäisyys vesistöön on noin 50 – 80 m siirtoputkiston kustannusten sekä kasvavien pumppauskustannuksien takia. Vesistön on oltava riittävän syvä, jotta routa ja jää eivät nosta tai riko putkia. Riittävä asennussyvyys vesistökeruupiirille on noin 2 - 3 metriä heti rannasta lähtien. Keruuputkien vaikutuksesta vesistön alusvesi lämpenee kesällä ja viilenee talvella. Tämän johdosta vesistökeruupiiri, kuten myös maakeruupiiri eivät sovellu optimaalisesti mahdolliseen viilennyskäyttöön. /6, s.4;8./

Vesistökeruupiiriä suunniteltaessa on huomioitava myös hankkeelle vaadittava vesialueen omistajan lupa. Lisäksi vesistökeruupiiristä tulee tehdä vesirakennusilmoitus Ely-keskukselle. Ely-keskus antaa lausunnon, vaatiiko toimenpide aluehallintaviraston luvan. /7, s.1./

Vesistöstä saatava vuotuinen energiamäärä on 70 - 80 kWh/putkimetri. Putkien sijoitus vesistöön tapahtuu samalla periaatteella kuin maakeruupiirissä. Poikkeuksena maakeruupiiriin vesistökeruupiirissä keruuputket ankkuroidaan vesistön pohjaan tähän tarkoitukseen suunnitelluilla painoilla (kuva 9) 1 - 2 metrin välein. Putkiston sijoituksesta piirretään kartta, sekä rannalle asennetaan varoituskyltit ankkurointia varten. /6, s.4./



**KUVA 9. Vesistökeruuputkistoon asennettavat ankkurointipainot /9/**



**KUVA 10. Periaatekuva vesistökeruupiiristä /6, s.3/**

### 3.3 Energiakaivo

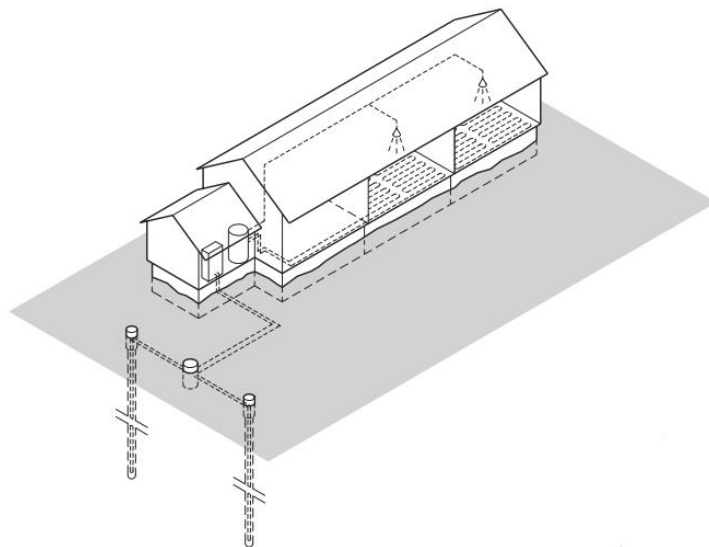
Porareikään asennettua keruuputkistoa ja siihen kuuluvia kaivorakenteita kutsutaan lämpö- tai energiakaivoksi (kuva 11). Energiakaivo on lämpökaivoa laajempi termi, jota voidaan käyttää myös silloin, kun kaivoon ladataan energiaa vapaajäähdytystä käytettäessä.

Energiakaivon syvyys riippuu rakennuksen lämpöenergiantarpeesta sekä maa- ja kallioperästä. Yleensä yhden energiakaivon syvyys on alle 300 metriä. Mikäli rakennuksen lämpöenergiantarvetta ei saada katettua yhdellä kaivolla, on mahdollista porata

useampi energiakaivo. Kun kaivojen lukumäärä kasvaa, kutsutaan niiden muodostamaa aluetta energiakentäksi. /1, s.11;10./

Energiakaivon aktiivisyydellä tarkoitetaan sitä osuutta kaivosta, mikä on pohjaveden peitossa ympäri vuoden. Yleensä kaivo täyttyy porausvaiheen aikana pohjavedestä, mutta mikäli näin ei tapahdu, on kaivo mahdollista täyttää pinnalta käsin. Kaivolle voidaan porauksen jälkeen tehdä myös painehalkaisu, joka avaa kallioon rakoja vedenvirtauksen parantamiseksi. Pohjaveden virtauksella kallion raoissa on suuri vaikutus energiansaantiin, sillä se lisää lämmön liikkumista kaivon ympäristössä. /3, s.24./

Kallio johtaa lämpöä paremmin kuin irtomaa, joten siitä pystytään ottamaan suurempia energiamääriä. Nyrkkisääntönä kaivosta saatavalle energiamäärälle voitaneen pitää 100 kWh/m ja maksimitehona noin 40-50W/m. /3, s.24./



**KUVA 11. Periaatekuva energiakaivoista /6, s.3/**

### 3.3.1 Energiakaivon rakenne

Porareikä porataan useimmiten pystysuoraan alaspäin. Mikäli tontti on ahdas ja tarvitaan useampi energiakaivo, voidaan porareivät porata myös vinoporauksella tiettyyn kulmaan, joka on tavallisesti 5-30 °. /1, s.34./

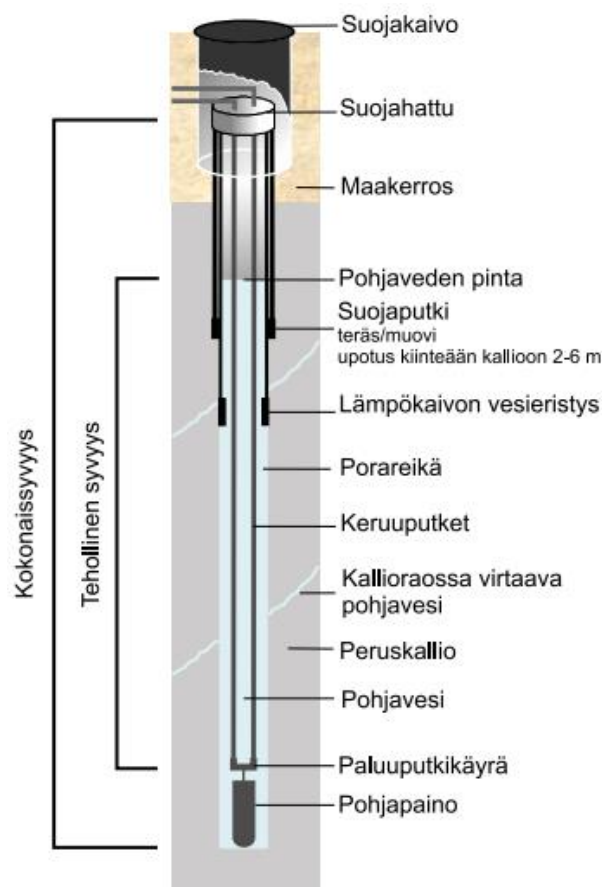
Pienissä kohteissa, kuten omakotitaloissa kaivojen halkaisijat ovat 115- 140 mm. Suuremmissa kohteissa halkaisijat vaihtelevat 140- 165 mm välillä. /23, s.40./



Varsinaisen porareian ympärille porataan aina suojaputki irtomaasuudelle, joka voi olla terästä tai muovia. Sen tehtävänä on estää maa-ainesten valuminen kaivoon, ehkäistä rikkonaisen kallion sortumista kaivoon sekä estää pintaveden pääsy kaivoon. Suojaputki tulee porata pohjavesialueella 6 metriä kiinteään kallioon ja muualla 2 - 6 metriä riippuen kallion rikkonaisuudesta. Lopuksi suojaputken ja kiinteän kallion väli tiivistetään yleensä betonoimalla. /1, s.35./

Valmiiseen suojaputkitettuun porareikään asennetaan koeponnistettut lämmönkeruuputket. Keruuputkien päässä on pohjapaino, jonka tehtävänä on helpottaa putkien asennusta ja varmistaa, että putkiston paluuputkikäyrä pysyy porareian pohjalla. /1, s.37./

Porareiltä rakennuksen sisälle tulevia keruuputkia kutsutaan siirtoputkiksi. Siirtoputket kaivetaan maahan noin 0,4 - 1 metrin syvyyteen. Useimmiten siirtoputkisto on lämpöeristetty. Kuvassa 12 on esitetty tyypillisen energia/ lämpökaivon rakenne.



**KUVA 12. Energiakaivon rakenne /1, s.35/**



### 3.4 Maalämpöjärjestelmän rakentamiseen tarvittavat luvat

Ensimmäisenä vaiheena maalämpöjärjestelmää harkittaessa tulee selvittää, onko tontilla riittävästi tilaa energiakaivolle, maakeruupiirille tai vesistökeruupiirille. Usein etenkin taajama- alueilla tontin koko tai sijainti sulkee pois maakeruupiiri- sekä vesistökeruupiirivaihtoehdot. Energiakaivoa ja sen paikkaa suunniteltaessa on huomioitava sijaitseeko rakennus pohjavesialueella. Lisäksi on otettava huomioon minimietäisyydet muihin kaivoihin (talousvesi- jätevesi- ja muut energiakaivot), tontin rajoihin sekä viemäri- ja vesijohtoihin. Taulukossa 1 on esitetty suositellut minimietäisyydet energiakaivosta eri kohteisiin. /7./

**TAULUKKO 1. Suositellut minimietäisyydet energiakaivon ja muiden kohteiden välillä /1, s.25/**

Kohde	Suosittelut minimietäisyys
Energiakaivo	15 m*
Lämpöputket ja kaukolämpöjohdot	3 m**
Kallioporakaivo	40 m
Rengaskaivo	20 m
Rakennus	3 m
Kiinteistön raja	7,5 m*
Kiinteistökohtaisen jätevedenpuhdistamon purkupaikka	Kaikki jätevedet 30 m, Harmaat vedet 20 m <sup>[14]</sup>
Viemärit ja vesijohdot	3 m (omat putket)-5 m (muiden putket)**
Tunnelit ja luolat	25 m, etäisyys selvitetään tapauskohtaisesti

\* porareian ollessa pystysuora

\*\* etäisyys riippuu maaperän laadusta, kaivussyvyydestä ja kaivantoon sijoitettavista putkista

Maalämpöön siirryttäessä Mikkelin kaupungin rakennusvalvonta vaatii toimenpidelupailmoituksen tai hakemuksen riippuen rakennuspaikasta. Liitteiksi tarvitaan rakennuspaikan hallintaoikeusselvitys, naapurien kuulemislomakkeet (kun energiakaivon etäisyys naapurin rajasta on alle 7,5 metriä tai maapiirin etäisyys alle 2 metriä) sekä asemapiirustukset rakennuksesta, jossa selviää energiakaivon/maa- tai vesistökeruupiirin sijainti, syvyys, porauskulma, keruuputkiston tilavuus ja käytettävä lämmönsiirtoneste. /7./ Lupamenettely vaihtelee paikkakuntakohtaisesti.

## 4 GEOENERGIAKENTÄN MITTAUSTAVAT

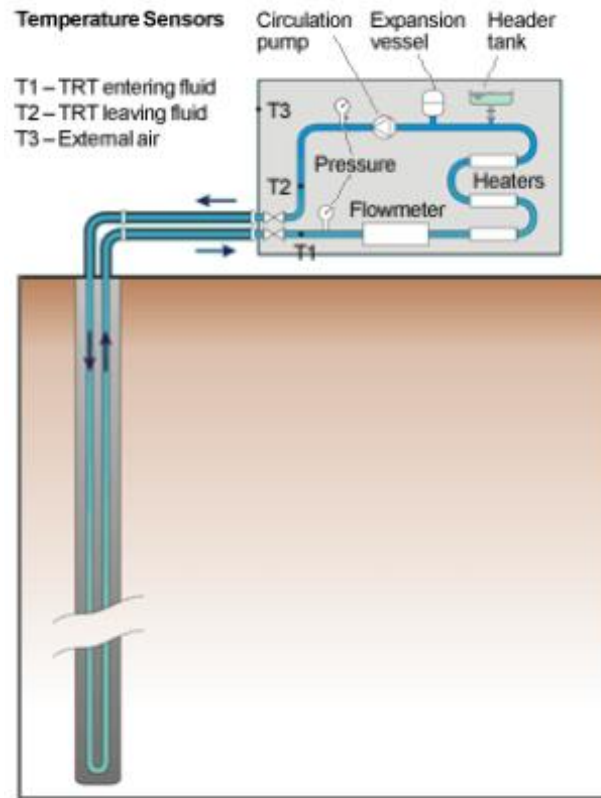
### 4.1 TRT-mittaus

Kallioperän lämmönjohtavuutta voidaan mitata kaivosta TRT-mittauksella (Thermal Response Test) eli termisellä vastetestillä. Tulosten perusteella pystytään suunnittelemaan ja mitoittamaan tarkasti energiakaivoja lämmitys- ja/ tai viilennyskäyttöön. /11./

Kuvassa 13 on esitetty TRT-mittauksessa käytettävä laitteisto ja sen toiminta. Testissä mitataan, kuinka paljon kallio pystyy vastaanottamaan lämpöä, kun kaivoon ajetaan lämpöä tätä tarkoitusta varten suunnitellulla laitteistolla. Tulosten perusteella pystytään tulkitsemaan kallioperän tehollista lämmönjohtavuutta, johon vaikuttavat kallioperän lämmönjohtavuus, veden virtaukset sekä kaivon lämpövastus. Kallioperän kivilajien välillä on suuria eroja lämmönjohtavuuksissa. Esimerkiksi graniitin keskimääräinen lämmönjohtavuus on noin 3,4 W/(mK), kun taas kiilleliuskeen lämmönjohtavuus on noin 2,0 W/(mK). Tämän seurauksena lämmönjohtavuus voi vaikuttaa merkittävästi tarvittavien energiakaivojen määrään sekä syvyyteen. /11./

Suurissa geoenergiakohteissa TRT-mittauksen tekeminen on osa huolellista suunnittelua ja välttämätöntä, jotta energiakenttä saadaan optimaaliseksi ja pystytään välttämään yli-/alimitoitus /11/.

Liitteessä 1 on esimerkki Rototec Oy:n tekemästä TRT-mittausraportista.



**KUVA 13. Periaatekuva TRT-mittauksesta ja siinä käytettävästä laitteistosta /12/**

## 4.2 DTS-mittaus

DTS-mittaus (Distributed Temperature Sensing) perustuu optiseen lämpötilamittaukseen valokuitukaapelista DTS-laitteella. Tämä mittaustapa on tarkoitettu lähinnä energiakaivojen/energiakenttien toiminnan seurantaan sekä niiden tutkimiseen. Menetelmän avulla pystytään määrittämään kaivon lämpötilat yhden metrin välein koko kaivon syvyydeltä. /13./

Kaivon lämpötilaa mitataan kaivossa sijaitsevasta valokuitukaapelista, johon lähetetään laserpulsseja DTS-laitteella. Kun laite on kalibroitu oikein, saadaan lämpötilat 0,1 °C tarkkuudella mittauksen keston ollessa muutamasta minuutista puoleen tuntiin. /13./

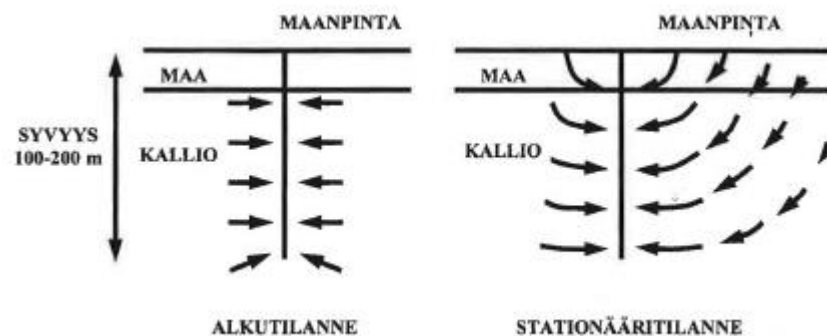
## 4.3 EED-mallinnus

EED-mallinnus (Earth Energy Designer) on ohjelma energiakaivokenttien suunnitteluun ja mallinnusta varten. Ohjelman avulla pystytään varmistamaan riittävä geoenergi-

an saatavuus kallioperästä sekä mitoittamaan kenttä optimaaliseksi. EED-mallinnus voidaan tehdä kohteeseen TRT-mittaustulosten sekä rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergian sekä -tehon tarpeiden perusteella. /14, s.4./

## 5 LÄMMÖNSIIRTYMINEN ENENERGIAKAIVOSSA

Kun energiakaivosta otetaan lämpöä, viilenevät kaivo sekä sitä ympäröivä kallio lämpövirtauksen seurauksena. Aluksi kallion ja lämpökaivon välinen lämpövirtaus on radiaalista. Mitä pidempään lämpöä kaivosta otetaan, sitä suurempi osa lämpövirrasta on peräisin maanpinnalta. 25 käyttövuoden jälkeen noin 32 % lämpökaivoon virtaa vasta lämmöstä on peräisin maanpinnalta ja loput 68 % kaivoa ympäröivästä maasta ja kalliosta. Kuvassa 14 on esitetty lämpökaivossa tapahtuva lämpöenergian latautumisen muutos alku- ja stationääritilanteen välillä. /3, s.26./



**KUVA 14. Muutos lämpökaivon latautumisessa alku- ja stationääritilanteen välillä /3, s.26/**

Kaivon sisäinen lämpötila laskee ajan kuluessa, kun sieltä otetaan lämpöä. Kun lämmönotto kaivosta aloitetaan, laskee kaivon lämpötila ensimmäisen päivän aikana kolmasosan stationääritilanteeseen verrattuna ja kaksi kolmasosaa kahden ensimmäisen kuukauden aikana. Kun lämmönoton aloittamisesta on kulunut viisi vuotta, kaivon lämpötila on lähes vakiintunut. 25 - 100 vuoden kuluttua lämmönoton aloituksesta tapahtuu noin 5 % lasku kaivon lämpötilassa. /3, s.26./

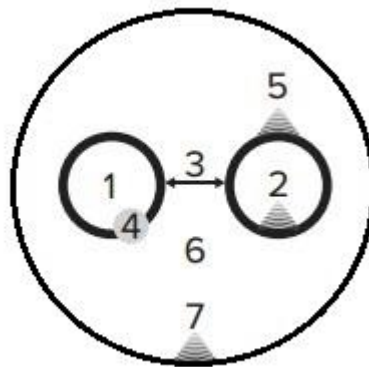
Mikäli kallio on lähellä pintamaata, päästään kuvan 14 mukaiseen stationääritilanteeseen noin 25 vuoden jälkeen /3, s.26./

### 5.1 Energiakaivon lämmönjohtavuus ja lämmönvastus

Jotta lämpö siirtyisi kaivosta ja sen ympäristöstä keruuputkissa virtaavaan lämmönsiirtonesteeseen, täytyy sen mennä läpi lämmönkeruuputkiston sekä kaivon seinämisistä. Lämmönsiirtoneste ja lämpökaivon välillä olevaa lämpövastusta kutsutaan kaivon lämpövastukseksi. Energiakaivon seinämän ja kallion välillä olevaa lämpövastusta kutsutaan maankamaran lämpövastukseksi. /3, s.27./

Lämpökaivon lämpövastuksen suuruus riippuu lämmönkeruuputkistosta (seinämäpaksuus ja vierekkäisten u-haarojen etäisyydet toisistaan), lämpötilaerosta sekä keruuputkiston ja kaivon välisestä aineesta eli yleensä vedestä /3, s.27/.

Tyypillinen lämpökaivon kokonaislämpövastus on noin 0,10 Km/W, kun lämpökaivossa oleva vesi on nestemäisessä muodossa. Mikäli vesi on jäähtynyt, on lämpövastus noin 0,06 Km/W. Tyypillinen lämpötilaero kaivon seinämän ja lämmönsiirtonesteiden välillä on noin 2 – 4 °C. Kuvassa 15 on esitetty kaivon sisäisten lämpövastusten koostuminen. /3, s.27./



**KUVA 15. Porakaivon sisäiset lämpövastukset /21, s.2 muokattu/**

1. Nesteen konvektiivinen vastus
2. Neste ja putken välinen lämmönsiirtovastus
3. Oikosulku ylös- ja alaspäin
4. Putken konduktiivinen vastus
5. Putken ja kaivon täyttöaineen kosketusvastus
6. Täyttöaineen konduktiivinen vastus
7. Täyttöaineen ja kallion kosketusvastus

Tutkimus- ja mittaustulosten mukaan maankamaran lämmönjohtavuudella on suurempi vaikutus kaivon/ kaivojen kokonaismetrien määrittämisen kannalta kuin kaivon lämpövastuksella. Maankamaran lämmönjohtavuus ilmoitetaan Lambda-arvona ( $\text{W/Km}$ , jossa  $W$ = watti,  $K$ = kelvin ja  $m$ = metri). Lambda-arvo kuvaa maan kykyä johtaa lämpöä, ja se vaihtelee Suomessa 2,4 - 4,1  $\text{W/Km}$  välillä. Mitä suurempi Lambda-arvo kaivolla on, sitä nopeammin lämpö siirtyy. /13, s.4-5./

Liitteen 1 sivulla 2 on esitetty Rototec Oy:n tekemän TRT-mittauksen perusteella saadut testikaivon tulokset.

Liitteen 1 tulosten mukaan kallioperän keskilämpötila ( $T_{\text{sur}}$ ) kyseisessä kohteessa on +8,3 °C, minkä on todettu olevan normaali lämpötila tällä alueella. Maankamaran Lambda- arvoksi on saatu 4,3  $\text{W/Km}$ , mikä on selkeästi kyseisellä alueella tyypillisten kalliolajien keskiarvon yläpuolella. Porakaivon lämmönvastukseksi on saatu 0,10  $\text{Km/W}$ , jota voidaan pitää tavanomaisena arvona.

## 5.2 Lämmönsiirtymismallit

Koska energiakaivojen mitoittaminen on todella tärkeää maalämpölaitteiston hyvän suorituskyvyn ja mahdollisimman kustannustehokkaan toiminnan varmistamiseksi, on energiakaivojen mitoittamiseen kehitetty erilaisia lämmönsiirtymismalleja jo 1940-luvulta lähtien /15,s.1/.

Laskentamallien kehitys voidaan jakaa kolmeen eri aikajaksoon. Ensimmäisiä 1940-1960-luvuilla kehitettyjä laskentatapoja kutsutaan teoreettisiksi malleiksi. Toisessa vaiheessa 1970 - 1980-lukujen laskentamalleja kutsutaan analyyttisiksi laskentamalleiksi. Tietokoneiden yleistymisen johdosta 1980-luvun lopulla kehitettiin osittain nykyäänkin käytössä olevat numeeriset laskentamallit. /15, s.1./

EED-mallinnus (kohta 4.3) perustuu Eskilsonin laskentamalliin, joka on yhdistelmä analyyttisiä sekä numeerisia ratkaisumenetelmiä /17, s.24/.

## 6 YMPÄRISTÖN VAIKUTUKSET ENERGIAKAIVOON

### 6.1 Energiakaivon sijainti

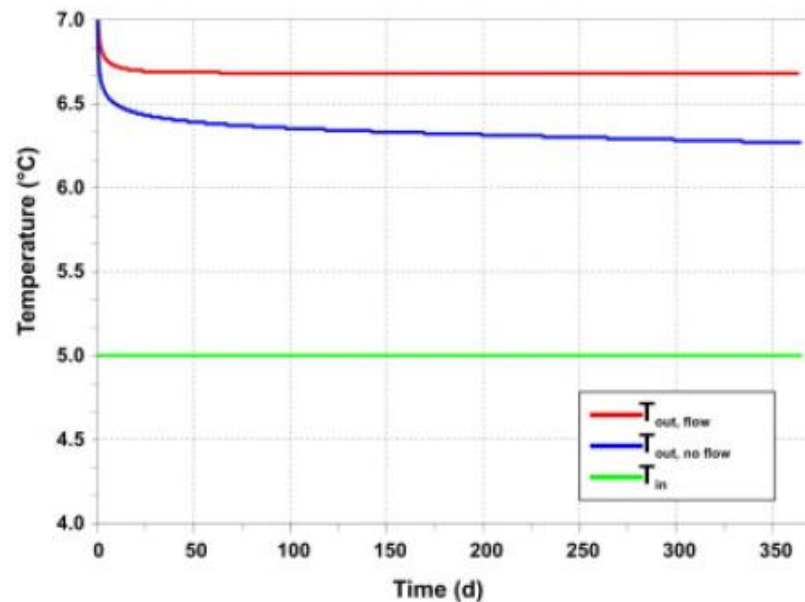
Energiakaivon sijainnilla on omat vaikutuksensa kaivosta saatavaan energiamäärään. Kuvasta 5 nähdään että Etelä- Suomessa maanpinnan keskilämpötila on noin +6 °C, kun vastaavasti Pohjois- Suomessa se on noin +2 °C. Metsäisillä alueilla maanpinnan lämpötila voi olla jopa 1 - 5 °C alhaisempi kuin aukeilla alueilla. Lisäksi asutetun alueen lämpötilat voivat olla noin 2 °C korkeampia verrattuna maanpinnan keskilämpötiloihin. /3, s.11- 12./

### 6.2 Pohjavesi

Energiakaivosta saadaan energiaa vain siltä osuudelta, missä keruuputkisto on veden tai täyteaineen ympäröimänä (aktiivisyvyys). Tämän johdosta pohjaveden löytyminen läheltä maanpintaa on hyvä asia energiansaannin kannalta. Mikäli kaivo ei täyty vedellä itsestään, voidaan se täyttämään porauksen jälkeen. Kaivolle on myös mahdollista tehdä painehalkaisu, jonka johdosta kallioon tulee halkeamia ja rakoja. Huonona puolena painehalkaisussa on kuitenkin se, että se lisää kaivon sortumisriskiä. /20, s.5./

Lämpökaivossa oleva vesi voi liikkua pohjavesivirtausten johdosta. Se voi tuoda mukanaan lämmintä tai viileää vettä tai kuljettaa lämmintä/ viileää vettä pois kaivosta. Tämän johdosta pohjaveden virtaukset vaikuttavat porakaivon lämmönsiirtoon. Pohjaveden virtauksien vaikutusta porakaivoon on vaikea ennakoida. /16, s.18./

Kuvassa 16 on esitetty simuloidun testin tulos, jossa vertailtiin pohjaveden virtauksen vaikutusta lämmönkeruunesteen lämpötilaan. Kuvassa punainen viiva kuvaa paluuliukoksen lämpötilaa, kun pohjaveden virtaus on huomioitu. Sininen viiva kuvaa paluuliukoksen lämpötilaa ilman pohjaveden virtausta. Kuvasta nähdään, että pohjaveden virtaus nostaa keruupiirin paluuliukoksen lämpötilaa.



**KUVA 16.** Pohjaveden virtauksen vaikutus lämmönkeruupiirin paluunesteen lämpötilaan /16, s.18/.

### 6.3 Maaperä

Suomen pinta- alasta paljasta kalliota on noin 3 %. Maapeitteen paksuus on alle 1 metrin 11 %:n osuudella kokonaispinta-alasta. Suurin osa kallioperästä on siis yli 1 metrin paksuisen maapeitteen alla. /19./

Yleisin maalaji Suomessa on moreeni, joka on sekoitus kaikkia maalajikkeita. Maaperän keskipaksuus Suomessa on 8,5 metriä ja se vaihtelee 0 - 100 metrin välillä. Pora-kaivon poraaminen irtomaahan on kalliimpaa kuin kallioporaus, minkä lisäksi irtomaan lämmönjohtavuus on heikkoa. Näiden seikkojen johdosta on siis sitä parempi, mitä lähempää pintamaata kallioperä löytyy. /16, s.12./

#### 6.3.1 Kallioperä

Suomen kallioperässä graniittiset kivilajit ovat yleisin kivilajiryhmä. Suomen kallioperän kokonaispinta-alasta 52,5 % on graniittisia kivilajeja. Eri kivilajien osuudet kallioperän pinta-alasta on esitetty taulukossa 2. /19./



**TAULUKKO 2. Eri kivilajiryhmien jakautuminen prosentteina pinta-alasta /19/**

Suomen kallioperän kivilajikoostumus	%
Runsaspiihapoiset 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 %

Taulukosta 3 nähdään, että kvartsipitoisella kalliolla on selkeästi paras lämmönjohtokyky verrattuna muihin kivilajeihin. Taulukosta 2 nähdään, että puhtaasti kvartsipitoisia kallioita on Suomen pinta-alasta kuitenkin melko pieni osuus.

**TAULUKKO 3. Kallio- ja maaperässä olevien aineiden lämmönjohtavuuksia /18, s.14, muokattu/**

Kallio- tai maalaji	Lämmönjohtavuus (W/mK)
Savi (kuiva)	0,4-0,9
Savi (märkä)	0,9-2,2
Hiekka (kuiva)	0,4
Hiekka (märkä)	1,4
Gneissi	1,9- 4,0
Graniitti	2,1- 4,1
Kvartsi	3,6- 6,6
Vesi	0,6
Jää	2,2

Kallioperän rikkonaisuudella on suuri vaikutus energiakaivosta saatavaan energiamäärään. Mikäli kallio on rikkonaista ja sen raoissa liikkuu paljon vettä, voidaan saada enemmän energiaa, kuin "ehjästä" kalliosta veden lämmönjohtavuuden ansiosta. Rikkonaiseen kallioon poraamisessa on kuitenkin riskinä porakaivon sortuminen, joka aiheuttaa lisäkustannuksia. /17, s.23./

**6.4 Energiakaivon täyteaine**

Pohjoismaissa energiakaivojen täyteaineena keruuputkiston ja kaivon seinämän välillä käytetään useimmiten pohjavettä. Keski-Euroopassa sekä Pohjois-Amerikassa täyteai-

neena käytetään kiinteitä aineita, kuten esimerkiksi bentoniitti, betoni ja kvartsihiekkä. Lisäksi on olemassa seosaineita lämmönsiirtymisen edistämiseksi. /25, s.24- 25./

Vedellä on suhteellisen huono lämmönjohtokyky, mutta sen etu kiinteisiin aineisiin verrattuna on lämmön siirto myös luonnollisella konvektiolla. Kiinteitä täyteaineita käytettäessä lämpöenergia siirtyy ainoastaan johtumalla. Tutkimusten mukaan luonnollinen konvektio on kuitenkin heikkoa matalilla lämmönsiirtoaineen lämpötiloilla ja lämmönsiirron ollessa pientä. 15- 45 °C lämpötiloilla ja 50- 100 W/m lämmönsiirrolla luonnollisen konvektion johdosta on saatu energiakaivoon 3- 5 kertaa suurempi lämmönsiirtyminen kuin seisovalla täytevedellä. /16, s.18./

## **7 LÄMMÖNKERUUPUTKISTO JA LÄMMÖNSIIRTONESTE**

### **7.1 Lämmönkeruuputkisto**

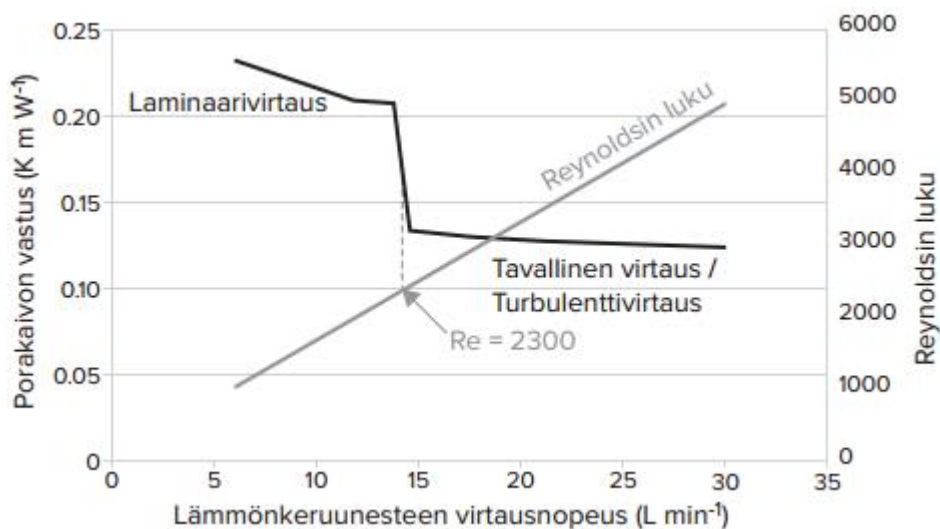
Yleisimmin lämmönkeruuputkistoina käytetään polyeteenistä valmistettuja muoviputkia. Polyeteenin lämmönjohtavuus on noin 0,42 W/ mK, jota voidaan pitää hyvänä arvona. Muita harvemmin käytettyjä putkistomateriaaleja ovat ruostumaton teräs, kupari, polyvinyylikloridi (PVC) sekä muut muoviseokset. /16, s.13./

Koska kallion lämmönjohtavuus riippuu kallioperän koostumuksesta eikä siihen voida vaikuttaa, pyritään porakaivon sisäinen lämmönvastus pitämään mahdollisimman pienenä. Tätä tarkoitusta varten Muovitech on kehittänyt Turbocollector-lämmönkeruuputken. Kuvasta 17 nähdään Turbocollector-putken ero verrattuna normaaliin keruuputkeen. Turbocollectorin sisäpinnalla olevat ”siivekkeet” tekevät lämmönsiirtonesteen virtauksesta turbulenttista, jolloin voidaan käyttää pienempää lämmönsiirtonesteen virtausnopeutta verrattuna normaaliin keruuputkeen virtauksen ollessa kuitenkin turbulenttista. Tällöin voidaan saavuttaa mahdollisimman pieni porakaivon lämmönvastus (kappale 5.1). Kuvasta 18 nähdään laminaarisen ja turbulenttisen lämmönsiirtonesteen virtauksen vaikutus porakaivon lämmönvastukseen.



**KUVA 17. Muovitech Turbocollector ja normaali keruuputki /21, s.3/.**

Pientaloissa käytettävien keruuputkien koko on yleisimmin 40 x 2,4 mm. Suurkohteissa voidaan käyttää myös suurempia putkikokoja /23, s.40/.



**KUVA 18. Lämmönsiirtonesteen virtausnopeuden vaikutus porakaivon lämmönvastukseen /21, s.2/**

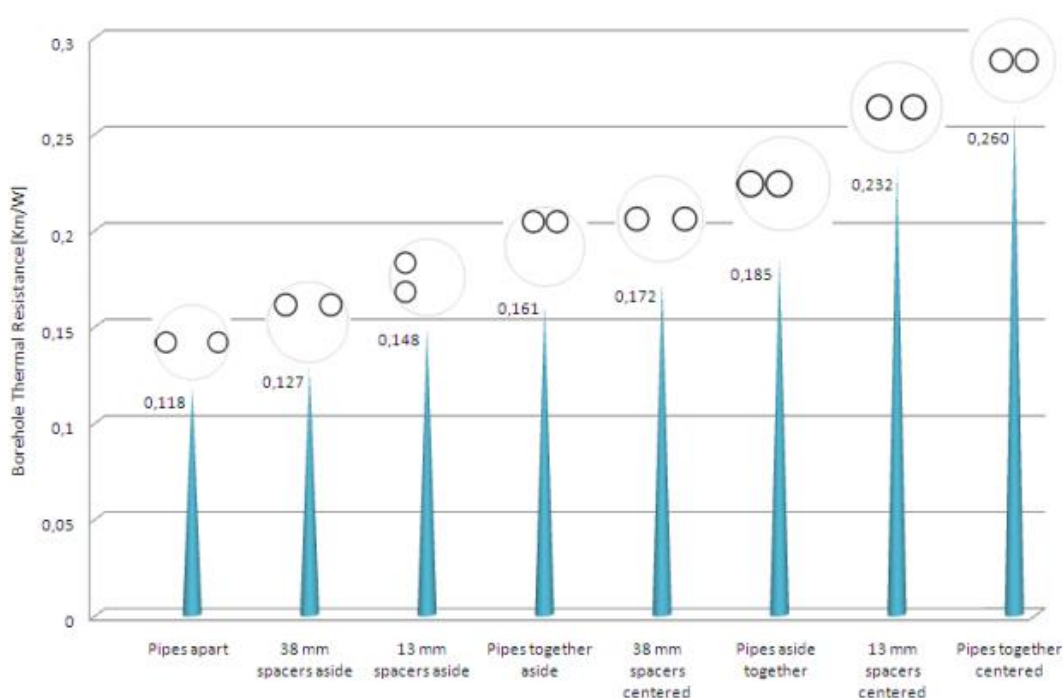
### 7.1.1 U-keruuputki

U-keruuputki on yleisin energiakaivoissa käytetty putkimalli (kuva 12). U-putkella on korkea lämpövastus, jonka johdosta lämmönkeräyskyky on heikko. Tähän on syinä putkimateriaalin heikko lämmönjohtavuus, meno- ja paluuputkien välinen lämmönsiirtyminen, putkien etäisyys kaivon seinämästä sekä kaivon täyteaineen lämmönjohtokyky. /16, s.14./

Lämmönsiirtoputkiston meno- ja paluuputkien väliin asennetaan useimmiten tukikapaleita, joiden tehtävänä on pitää putket erillään toisistaan, lähellä kaivon seinämiä.

Meno- ja paluuputkien välillä olevan raon vaikutuksesta saadaan putkien välinen lämmönsiirtyminen mahdollisimman pieneksi. Tukikappaleiden johdosta myös kaivon sisäinen lämpövastus pienenee, koska heikosti lämpöä johtavaa vettä on vähemmän kaivon seinämän ja keruuputken välissä. /25, s.25./

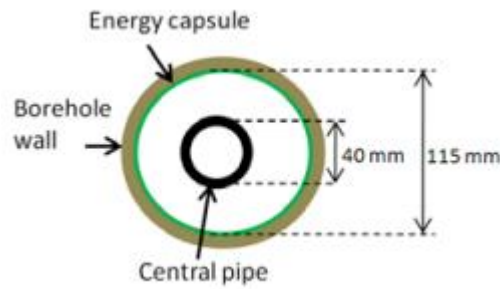
Kuvasta 19 nähdään y-akselilla olevan kaivon sisäisen lämpövastuksen muutos riippuen U-keruuputkien sijainnista kaivossa. Kaivon sisäinen lämpövastus on selkeästi pienempi, kun putket ovat toisistaan erillään, vastakkaisilla puolilla kaivoa.



**KUVA 19. Kaivon sisäisen lämpövastuksen muutos keruuputkien u-putken sijainnista riippuen /26, s.66/**

### 7.1.2 Koaksaalikeruuputki

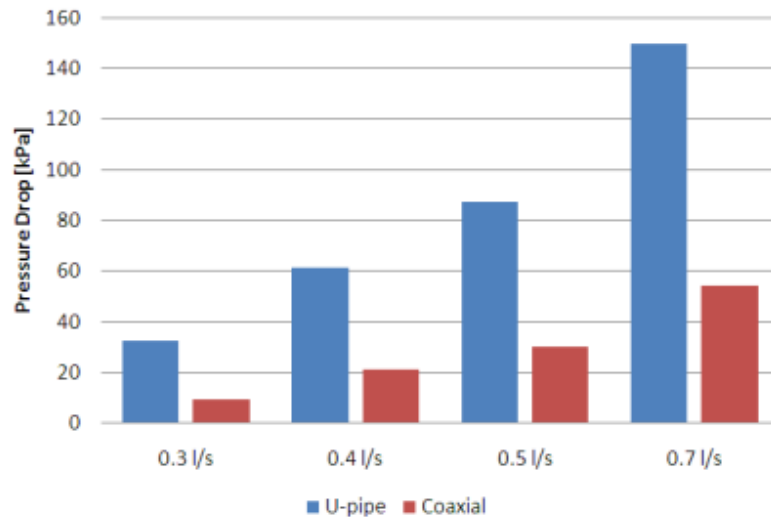
Koaksaalikeruuputki on U-putkeen verrattuna vielä nykyisin harvinainen, mutta sillä on joitakin U-putkea parempia ominaisuuksia, jotka voivat johtaa sen yleistymiseen tulevaisuudessa. Koaksaaliputki (kuva 20) koostuu meno- ja paluuputkista, joista paluuputki (Energy capsule) on kiinni kaivon seinämässä ja menoputki (Central pipe) paluuputken sisällä.



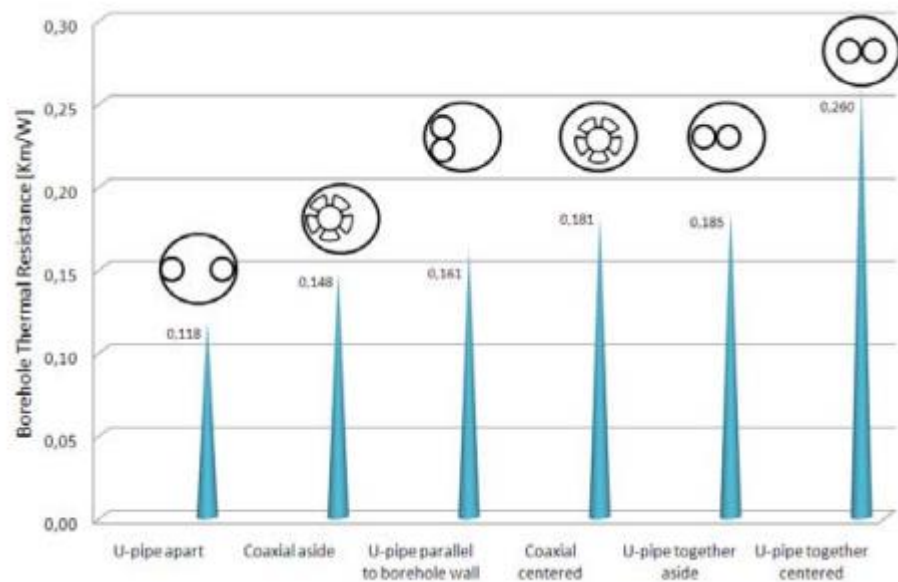
**KUVA 20. Koaksaalikeruuputken rakenne /26, s.76/**

Koaksaaliputkella voidaan käyttää laminaarista virtausta, kun U-putkea käytettäessä virtauksen tulisi olla turbulenttista. Laminaarista virtausta käytettäessä pumppauskustannukset ovat pienemmät verrattuna turbulenttiseen virtaukseen johtuen turbulenttisen virtauksen tarvitsemasta suuremmasta pumppaustehosta. Lisäksi koaksaaliputkea käytettäessä putkiston painehäviö on pienempi kuin U-putkella (kuva 21), jolla on myös omalta osaltaan vaikutusta pienempiin pumppauskustannuksiin. Kuvan 21 mittaukset on tehty kokonaissyvyydeltään 260 metriseen kaivoon, jonka aktiivisyvyys on ollut 254,5 metriä. Lämmönsiirtonesteinä on käytetty 20 % vesi-etanoliseosta. /16, s.15- 16./

Laboratoriokokeissa koaksaaliputkelle on mitattu pienempiä lämpövastusarvoja kuin U-putkelle. Ongelmana koaksaaliputkella on U-putken tavoin meno- ja paluuputkien välinen lämmönsiirtyminen. Kuvassa 22 on vertailtu lämpökaivon sisäisiä lämpövastuksen muutoksia eri U-putken sijoittelulla ja erilaisilla koaksaaliputkillä. /16, s.17./



**KUVA 21.** U-putken ja koaksiaaliputken aiheuttamat painehäviöt eri virtaamilla /26, s.89/



**KUVA 22.** Kaivon sisäiset lämpövastukset eri U-putkisijoittelulla ja erilaisilla koaksiaaliputkilla /26, s.89/

## 7.2 Lämmönsiirtoneste

Koska keruuputkistossa kiertävän lämmönsiirtonesteen tulee kestää pakkasta, ei lämmönsiirtonesteenä voida käyttää vettä. Yleisin maalämmössä käytetty lämmönsiirtoneste on noin 25 - 30 % vesi-etanoliseos. Vanhemmissa maalämpöjärjestelmissä lämmönsiirtonesteenä on voitu käyttää myös eri glykoliseoksia. Glykolia ei nykyisin käytetä maalämpöjärjestelmissä sen myrkyllisyyden takia. /1, s.46./

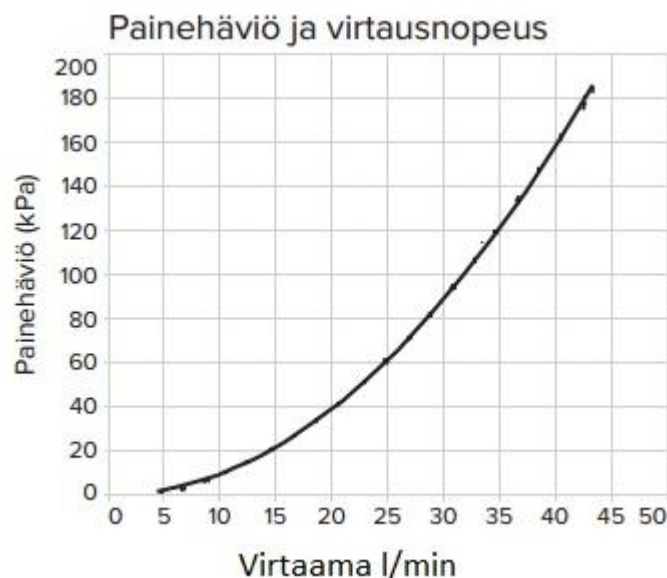
Yksi yleisimmistä Suomessa käytetyistä lämmönsiirtonesteistä on Altian valmistama Naturet. Naturet on valmistettu vahvasti denaturoidusta etanolista. Se on myrkytöntä ja biologisesti hajoavaa. Käyttövalmiin Naturet-lämmönsiirtonesteen jäätymispiste on  $-17\text{ °C}$ , kun etanolipitoisuus on noin 28 %. Nesteen tiheys  $+20\text{ °C}$  lämpötilassa on  $0,96\text{ kg/l}$ , lämmönjohtavuus  $0,44\text{ W/mK}$ , ominaislämpökapasiteetti  $0,425\text{ kJ/kgK}$  ja viskositeetti  $0,0076\text{ kg/ms}$ . /22; 17, s.75/.

Hyvän lämmönsiirtonesteen ominaisuuksia maalämpöjärjestelmissä ovat mm. alhainen jäätymispiste, pieni viskositeetti, hyvä lämmönjohtavuus, korkea ominaislämpökapasiteetti, yhteensopivuus eri materiaalien kanssa, sekä myrkyttömyys /1, s.46/.

### 7.2.1 Lämmönsiirtonesteen virtausnopeus

Lämmönsiirtonesteellä tulee olla tarpeeksi pitkä viipymä energiakaivossa, jotta lämpö kerkeää siirtyä kaivosta nesteeseen /16, s.14/.

Lämmönsiirtonesteen virtauksen tulee kuitenkin olla turbulenttista (kuva 17), jotta porakaivon lämmönvastus voidaan pitää mahdollisimman pienenä. Kuvasta 18 voidaan todeta virtausnopeuden kasvun aiheuttavan myös suuren keruuputken painehäviöiden kasvun. Kuvan 23 mittaukset on tehty 200 metriä syvällä porakaivolla, 40 mm SDR11-U-putkella ja  $10\text{ °C}$  vedellä. /21, s.2./



**KUVA 23. Virtaaman vaikutus keruuputkiston painehäviöön /21, s.2, muokattu/**

Painehäviöiden kasvusta johtuen maalämpöjärjestelmän lämmönkeruupiiripumpun energiankulutus on suurempi. Tämä taas vaikuttaa heikentävästi maalämpöpumpun COP-arvoon. Optimaalisella keruupiirin virtausnopeudella pystytään maksimoimaan maalämpöjärjestelmän COP-arvo. /21, s.2./

## 8 ENERGIKAIVON MITOITUS

Energiakaivon mitoitus voi olla joko tehoperusteinen, energiaperusteinen tai molempia. Lähtötietoina tulisi ainakin olla maaperään kohdistuva lämmitys- ja/ tai jäähdytyskuorma, maa/ kallioperän ominaisuudet (kivi-/ maalajit, lämmönjohtavuudet, pohjavesi) sekä porareian/ porareikien sijoitutusta varten oleva alue. /23, s.36./

Mikäli kaivoa käytetään ainoastaan lämmityskäyttöön, käytetään mitoitusperusteena tarvittavaa energiamäärää. Nyrkkisääntönä kaivosta saatavalle energiamäärällä voidaan pitää 100 kWh/ porareikämetri vuodessa. Vaihteluväli voi kuitenkin olla +/- 40 %, riippuen kallioperästä. /23, s.40./

Nyrkkisääntönä kaivon lämmönoton tehomitoituksessa käytetään maksimissaan 30 W/ metri. Suuremmat hetkelliset tehot ovat mahdollisia edellyttäen liuoslämpötilojen valvomista sekä tehokasta kollektoriputkistoa. /23, s.40./

Kaivon lämpöteho stationääritilassa voidaan laskea karkeasti kaavalla 1 /18, s.13/:

$$Q = \frac{2\pi\lambda H(T_o - T_b)}{\ln\left(\frac{H}{d}\right)} \quad (1)$$

jossa:

Q= lämpöteho stationääritilassa (W)

$\lambda$ = kallioperän lämmönjohtavuus (W/mK)

H= kaivon syvyys

$T_o$ = kallioperän lämpötila puolessa välissä kaivoa (°C)

$T_b$ = kaivon seinämän alin sallittu lämpötila (°C)

d= kaivon halkaisija (m)

Energiakaivo/ energiakenttä tulisi suunnitella siten että se toimii hyvin vähintään 25 vuotta, mutta mielellään 50 vuotta tai yli. Yksi riskitekijöistä, joka voi estää kaivon/



kaivojen pitkäikäisyyden, on kaivojen alimitoituksesta johtuva kaivon jäätyminen. Jäätyminen on seuraus pitkäaikaisesta ylikuormituksesta, jolloin kaivo ja sitä ympäröivä maaperä ei ole kerennyt riittävästi palautumaan lämmönoton aiheuttamasta rasi-  
tuksesta. /24./

Kaivon jäätymisellä tarkoitetaan lämpökaivossa olevan veden jäätymistä. Jään ominaistilavuus on 10 % vettä suurempi, jolloin jää puristaa keruuputkia kasaan. Kasaan puristuneessa keruuputkessa virtaus voi estyä kokonaan ja keruuputki joudutaan uusimaan. Aina keruuputkiston uusiminen ei ole mahdollista, koska vanhaa keruuputkistoa ei saada pois kaivosta. Tällöin ainoaksi vaihtoehdoksi jää uuden kaivon poraaminen. /24./

Jos kaivo on lievästi alimitoitettu, etenee jäätyminen jäätyneen osuuden kasvaessa kaivossa vuosittain. Kaivon lopullinen jäätyminen voi tapahtua vasta 5 - 10 vuoden kuluttua käytön aloittamisesta. Tehokasta lämpöpumppua voidaan käyttää matalillakin liuoslämpötiloilla tehon ja lämpökertoimen kustannuksella. Mikäli talviajan keskimääräiset liuoslämpötilat ovat kuitenkin alle  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tulisi kaivon kuormitusta rajoittaa jää-  
tymisen ehkäisemiseksi. Alaraja lämmönsiirtonesteen lämpötilalle on  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , jonka alle se ei saisi pudota koskaan. /24; 25, s.47./

Mikäli maalämpöjärjestelmään on yhdistetty jäähdytys, edistää se energiakaivon palautumista. Kesällä jäähdytyksen johdosta kaivoon siirretty lämpö nostaa maaperän keskilämpötilaa. /25, s.48./

Mikäli energiakaivo/ kenttä on mitoitettu oikein, maan keskilämpötila tasaantuu käytön aikana sopivalle tasolle (kappale 5).

Yhden lämpötila-asteen muutos lämpöpumpulle menevän lämmönsiirtonesteen lämpötilassa vaikuttaa maalämpöjärjestelmän COP-arvoon 2 - 3 %. Tämän johdosta kaivolta tulevan lämmönsiirtonesteen lämpötilan tulisi olla mahdollisimman korkea. /26, s.3./

## 9 ESIMERKKIKOHDE: AS. OY PELLOSHARJU

As. Oy Pellosharju on Mikkelin Ristiinassa sijaitseva kuusi kerrostaloa käsittävä asunto-osakeyhtiö. Kiinteistöt on rakennettu vuosien 1964 - 1968 välillä. Rakennusten lämmitysmuotona oli öljylämmitys ja lämmönluovutustapana matalalämpöradiaattorit.

Suomen Talotekniikka Energia toteutti vuonna 2014 kohteeseen maalämpöjärjestelmän suunnittelun ja toteutuksen.



**KUVA 24. As. Oy Pellosharju kerrostalo**

### 9.1 Maalämpöjärjestelmä

Kohteeseen tehtiin maalämpöjärjestelmän mitoitus ja suunnittelu aiempien kulutustietojen perusteella. Rakennusten lämmitykseen oli kulunut öljyä noin 102 000 litraa vuodessa joka vastaa energiasisällöltään noin 1022,04 MWh. Vanhojen öljylämmitysjärjestelmien hyötysuhteena laskennassa oli käytetty 76 %.

Alkuperäisten laskelmien ja mitoitusien perusteella kunkin talon lämmitystehontarve pystyttäisiin kattamaan noin 52 kW maalämpöpumpulla jota palvelee 5 kpl 240m syviä energiakaivoja.

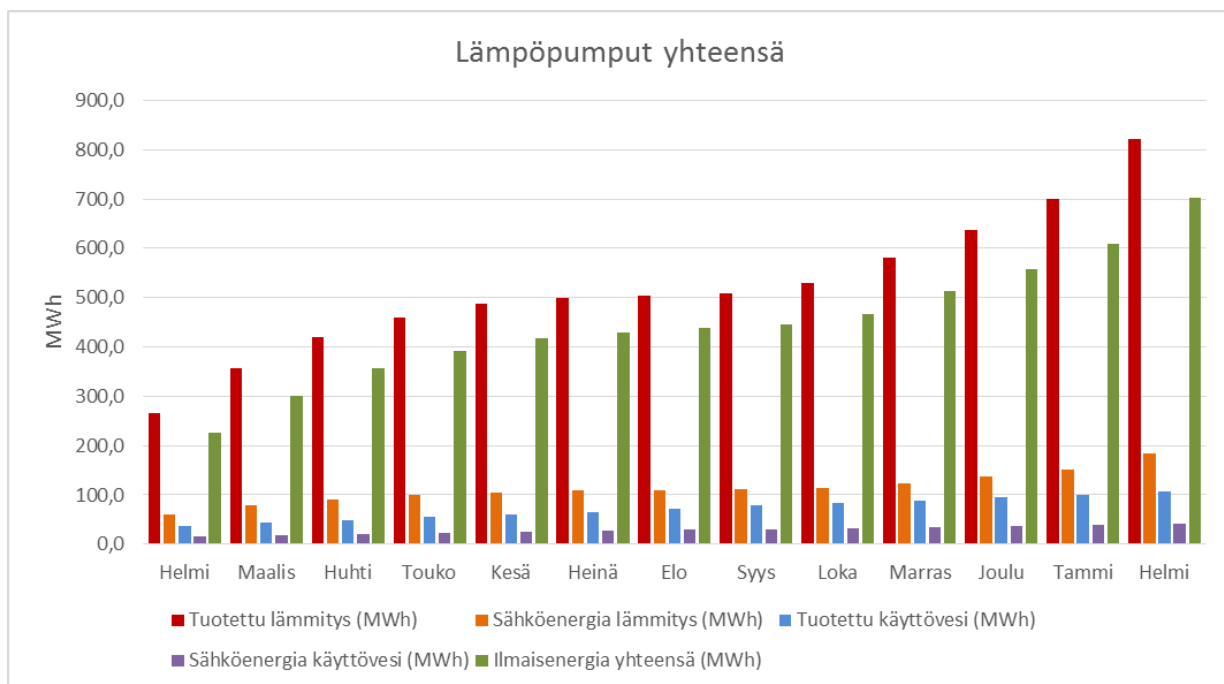
Jokaiseen taloon asennettiin yksi Stiebel Eltron WPF 52 -maalämpöpumppu. Kohteen energiakaivokenttä suunniteltiin ja mitoitettiin yhteistyössä Rototec Oy:n kanssa. Ennen energiakaivokentän simulointia ja suunnittelua Rototec suoritti kohteeseen TRT-mittauksen (Liite 1). Suoritetun TRT- mittauksen perusteella havaittiin että kohteen kallioperän lämmönjohtoluku on 4,3 W/Km mikä on selkeästi keskimääräistä parempi (kappale 6.3.1). TRT- mittauksen ja energiakaivokentän simuloinnin perusteella päätettiin poraamaan jokaiselle lämpöpumpulle 4 kpl kokonaissyvyydeltään noin 240 metrisiä kaivoja. Kokonaisuudessaan esimerkkikohde sisältää täten yhteensä 24 energiakaivoa.

Energiakaivojen poraussuunnitelma on liitteenä 2. Energiakaivot on porattu vinoporauksella, jotta ne on voitu sijoittaa lähemmäksi toisiaan ja saatu tämän johdosta mahdumaan käytettävissä olevalle alueelle.

## **9.2 Mittaukset**

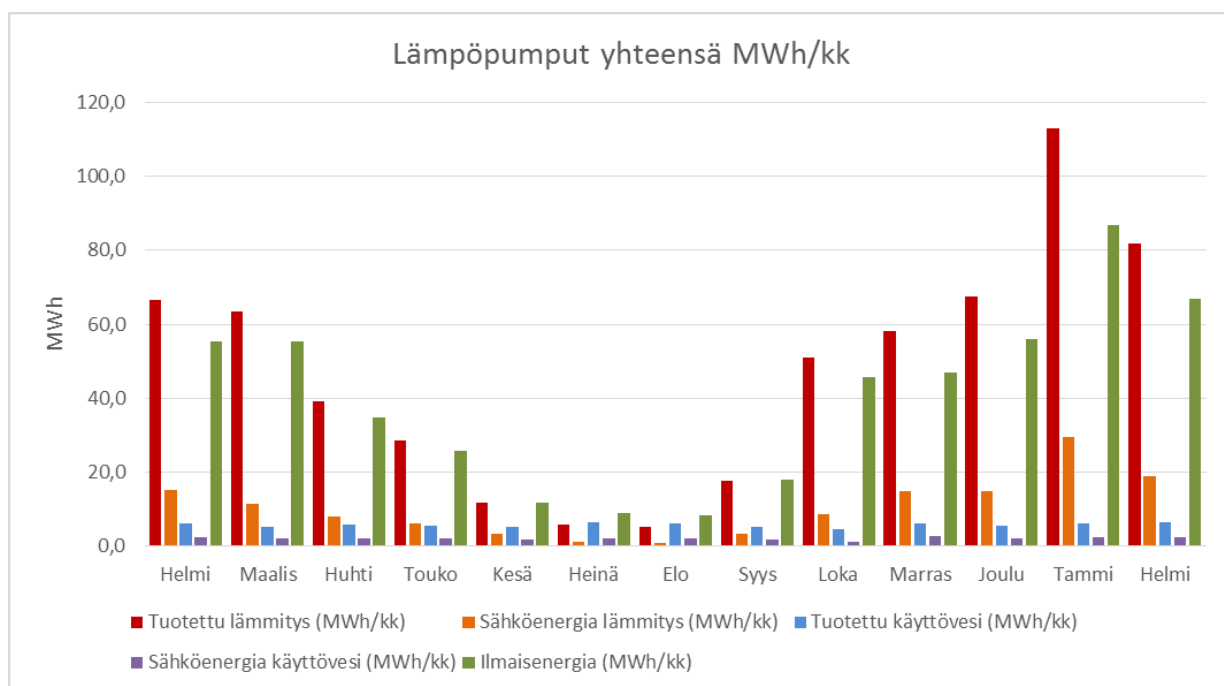
Kohteessa on ollut käytössä Stiebel Eltronin etävalvontajärjestelmä vuoden 2015 toukokuusta alkaen. Ennen toukokuuta lämpöpumppujen lämpöenergian tuottoja ja sähköenergian kulutuksia on seurattu suoraan lämpöpumpuista.

Kohteen kaikkien lämpöpumppujen yhteenlaskettu kumulatiivinen energianseuranta vuoden aikajaksolta on esitetty kuvassa 25.



**KUVA 25. As. Oy Pellosharjun lämpöpumppujen kumulatiivinen energianseuranta aikavälillä helmikuu 2015 - helmikuu 2016**

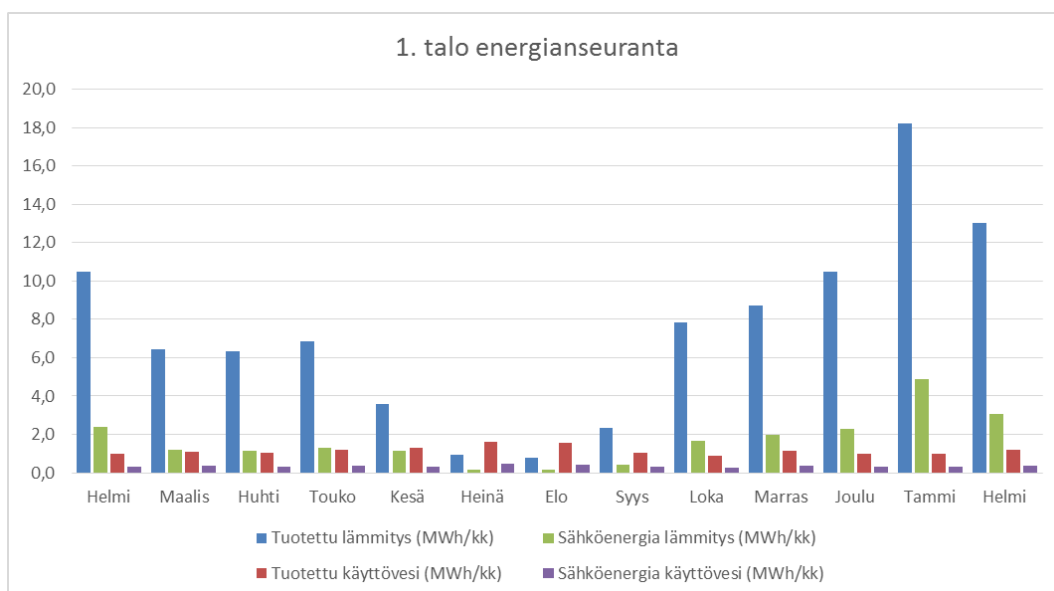
Kuvasta 26 nähdään kaikkien lämpöpumppujen yhteenlaskettu kuukausittainen energianseuranta.



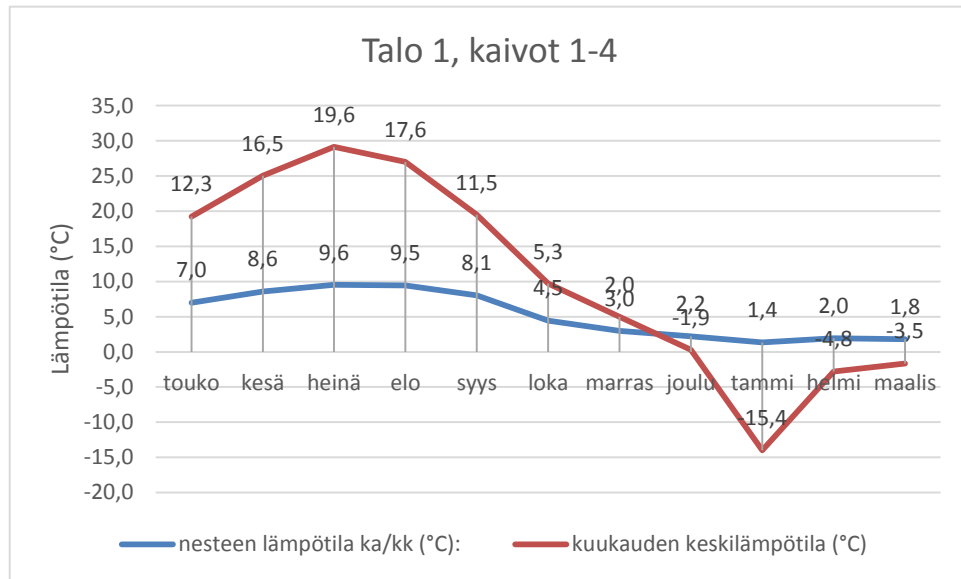
**KUVA 26. As. Oy Pellosharjun kuukausittainen energianseuranta aikavälillä helmikuu 2015 - helmikuu 2016**

Jokaisen talon lämpöpumpulle on kerätty lisäksi omat kuukausittaiset energianseurantatiedot. Lisäksi etävalvontajärjestelmän kautta saadaan reaaliaikainen tieto lämpöpumpulta kaivoon menevän lämmönsiirtonesteen lämpötilasta. Kaivoon menevän lämmönsiirtonesteen kuukausittaisista lämpötilojen vaihteluista on laskettu kuukausittaiset keskiarvot, etävalvontajärjestelmän käyttöajalta (toukokuu 2015 - helmikuu 2016). Lisäksi taulukoihin on koottu ulkoilman kuukausittaiset keskilämpötilat lämpöpumpun seurantatiedoista mitattuna ja laskettuna. Ulkoilman- ja lämmönsiirtonesteen lämpötiloja vertaamalla voidaan päätellä ulkoilman lämpötilan vaikutusta lämmönsiirtonesteen lämpötilaan sekä kaivojen palautumiseen lämmityskaudesta.

Talojen numero 1 ja 3 (Liite 2) energiaseuranta- ja lämmönsiirtonesteen seurantatiedot on esitetty esimerkkinä kuvissa 27, 28 ja 29, 30.

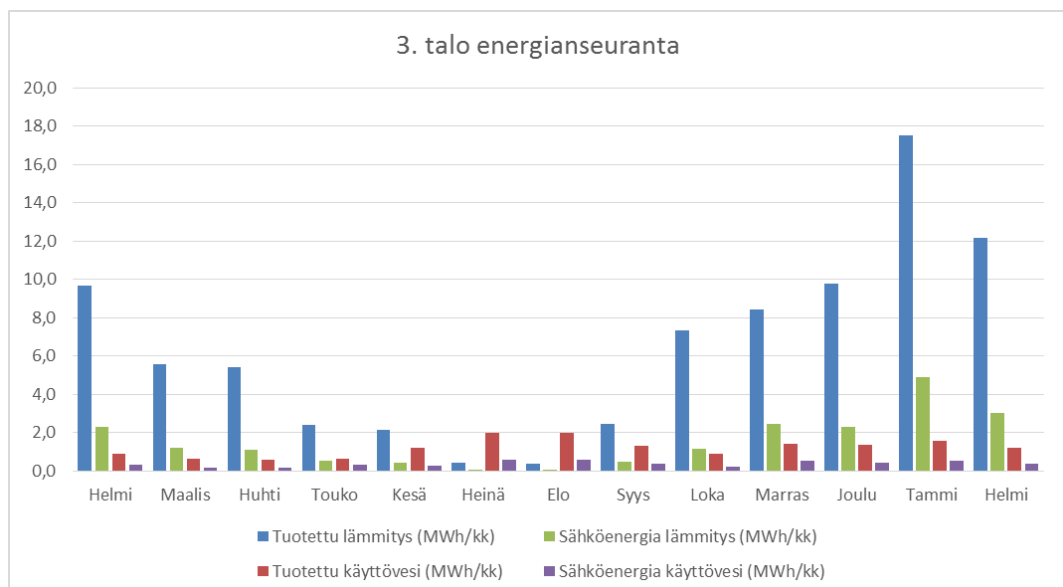


**KUVA 27. Talo 1 maalämpöpumpun kuukausittainen energianseuranta**

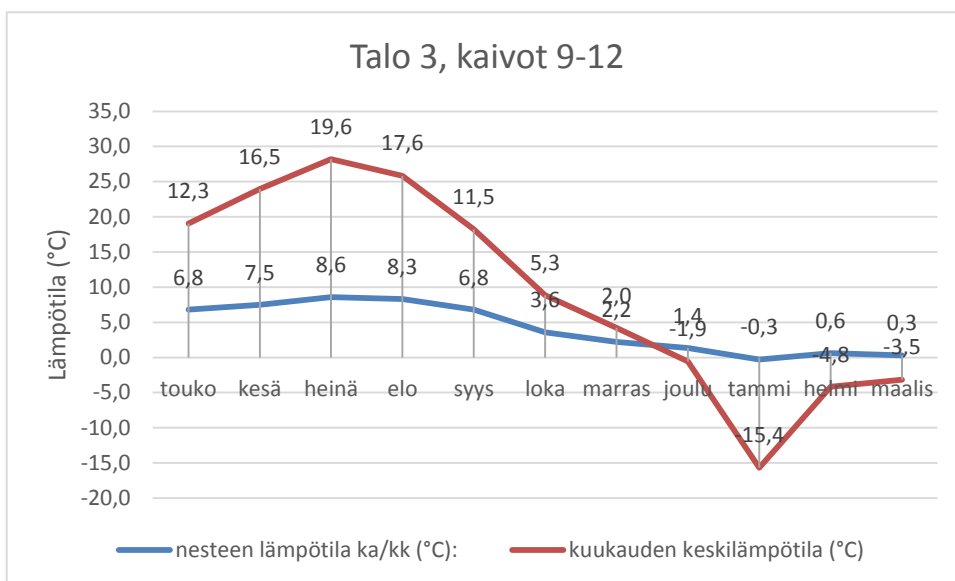


**KUVA 28. Talo 1 energiakaivoon menevän lämmönsiirtonesteen- ja ulkolämpötilan kuukausittaiset keskiarvot**

Talon numero 1 (Kuva 27) lämpöpumpun lämmitysenergian yhteenlaskettu tuotto vuoden seurantajaksolta on 98,3 MWh lämpöpumpun sähköenergian kulutuksen ollessa 23,4 MWh. Lämpöpumpun COP vuoden ajalta on  $\frac{98,3 \text{ MWh}}{23,4 \text{ MWh}} = 4,2$ .



**KUVA 29. Talo 3 maalämpöpumpun kuukausittainen energianseuranta**



**KUVA 30. Talo 3 energiakaivoon menevän lämmönsiirtonesteen- ja ulkolämpötilan kuukausittaiset keskiarvot**

Talon numero 3 (Kuva 29) lämpöpumpun lämmitysenergian yhteenlaskettu tuotto vuoden seurantajaksoilta on 88,0 MWh lämpöpumpun sähköenergian kulutuksen ollessa 22,1 MWh. Lämpöpumpun COP vuoden ajalta on  $\frac{88,0 \text{ MWh}}{22,1 \text{ MWh}} = 4,0$ .

### 9.3 Tulokset

#### 9.3.1 Kiinteistöjen energiankulutus

Kokonaisuudessaan vuoden seurantajakson aikana (Kuva 25), As. Oy Pellosharjun yhteenlaskettu lämpöpumpuilla tuotettu lämmitysenergia on 892,8 MWh, lämpöpumppujen lämmitykseen käyttämän sähköenergian ollessa 199,8 MWh. Tästä saadaan laskettua lämmityksen COP:  $\frac{892,8 \text{ MWh}}{199,8 \text{ MWh}} = 4,5$ .

Lämpimän käyttöveden tuottamiseen lämpöpumput ovat tuottaneet yhteensä 111,7 MWh energiaa, sähkökulutuksen ollessa 34,7 MWh. Käyttöveden COP on täten:  $\frac{111,7 \text{ MWh}}{34,7 \text{ MWh}} = 3,2$ .

Kun lämmitykseen- ja käyttöveteen tuotettu energia lasketaan yhteen, saadaan vuoden kokonaisenergiantuotoksi lämpöpumpuille  $892,8 \text{ MWh} + 111,7 \text{ MWh} = 1004,5 \text{ MWh}$ . Yhteenlaskettu sähkönkulutus on  $199,8 \text{ MWh} + 43,1 \text{ MWh} = 242,9 \text{ MWh}$ . Näistä saadaan laskettua kokonais- COP:  $\frac{1004,5 \text{ MWh}}{242,9 \text{ MWh}} = 4,1$ .

Kaivoista otettu energia vuoden aikana on  $1004,5 \text{ MWh} - 242,9 \text{ MWh} = 761,6 \text{ MWh}$ .

### 9.3.2 Energiakenttien toiminnan seuranta

Vertaamalla kunkin kiinteistön kuukausittaista energiankulutusta lämpöpumpulta kaivoon menevän lämmönsiirtonesteen kuukausittaiseen keskilämpötilaan nähdään, että ulkolämpötilan alentuessa ja lämmitysenergian kulutuksen kasvaessa laskee lämmönsiirtonesteen lämpötila. Lämmönsiirtonesteen lämpötilan lasku lämmityskauden aikana ja erityisesti kylminä aikajaksoina on normaalia, mutta se heikentää hieman lämpöpumpun COP-arvoa. Suurempana vaarana on yksittäisessä kaivossa tai koko kentässä oleva vika, jonka johdosta energiakaivokenttä ei lähde palautumaan lämmityskauden jälkeen, koska se on rasittunut liikaa lämmityskaudella. Vika voi johtua esimerkiksi kaivon/ kaivojen aktiivisyvyyden alimitoituksesta, vääristä porauskulmista (kaivojen etäisyys toisistaan) tai epätasapainossa olevasta lämmönsiirtonesteen virtauksesta kentässä olevien kaivojen välillä.

Kuvista 28 ja 30 nähdään talojen 1 ja 3 lämmönsiirtonesteen- ja ulkoilman lämpötilan vaikutukset toisiinsa. Marraskuun puolivälissä ulkoilman keskilämpötila on alittanut kaivoihin menevän lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan molemmissa esimerkkitaloissa.

### 9.3.3 Esimerkki kylmimmästä päivästä

Seurantajakson kylmin päivä oli 22.1.2016, ulkolämpötilan keskiarvon ollessa  $-28,9^\circ\text{C}$ . Kyseisen päivän keskilämpötila on täten hyvin lähellä alueen mitoitusulkolämpötilaa  $-29^\circ\text{C}$ .



Talo 1 kulutti lämmitysenergiaa sinä päivänä 813,8 kWh josta sähköenergiaa oli 239,5 kWh. Näiden arvojen perusteella laskettu  $COP = \frac{813,8 \text{ kWh}}{239,5 \text{ kWh}} = 3,4$ . Kaivoista saatiin energiaa päivän aikana  $813,8 \text{ kWh} - 239,5 \text{ kWh} = 584,1 \text{ kWh}$ .

Talo 3 kulutti lämmitysenergiaa esimerkkipäivänä 772,6 kWh, josta sähköenergiaa oli 237,8 kWh. Esimerkkipäivän COP oli  $\frac{772,6 \text{ kWh}}{237,8 \text{ kWh}} = 3,2$ . Talo 3:n kaivoista energiaa saatiin esimerkkipäivänä  $772,6 \text{ kWh} - 237,8 \text{ kWh} = 534,8 \text{ kWh}$ .

## 9.4 Tulosten tarkastelu

### 9.4.1 Energiankulutus

Lämpöpumppujen yhteenlaskettu COP- arvo lämmityksen osalta vuoden seurantajakson aikana on 4,5. Tätä arvoa voidaan pitää todella hyvänä, etenkin kun otetaan huomioon kiinteistöjen ikä. Mikäli kohteen lämmönluovutustapana olisi ollut "perinteinen" radi-aattoriverkosto, olisi lämmityksen COP ollut huomattavasti heikompi, johtuen korkeammasta lämmitysverkoston menoveden lämpötilasta (kappale 2.3).

Lämpöpumppujen tuottama käyttöveden yhteenlaskettu COP 3,2 vuoden seurantajakson aikana. Myös tätä voidaan pitää hyvänä arvona. Lämpimän käyttöveden COP- arvo on alhaisempi verrattuna lämmityksen COP:iin johtuen siitä, että lämpötila pidetään 30 - 55 °C välissä koko ajan. Kun lämpöpumpulla tuotetaan 55 °C käyttövettä varaajaan, toimii lämpöpumppu heikohkolla COP-arvolla johtuen korkeasta lauhtumislämpötilasta (55 °C), jonka lämpimän käyttöveden valmistus vaatii.

Koko järjestelmän COP- arvo on 4,1, mikä tarkoittaa, että 4,1 kWh lämpöenergiämäärän tuottamisesta on 1 kWh sähköenergiaa ja 3,1 kWh kaivoista saatua energiaa.

Energiakaivoista otettu energia vuoden aikana on 761,6 MWh. Kevyen polttoöljyn verollinen hinta on kuluttajahintaseurannan mukaan 15.3.2016 73,0 snt/litra ja lämpöarvo 10,02 kWh/litra /27; 28, s.2/. Mikäli kaivoista saadun energian osuus olisi tehty öljylämmityksellä, olisi öljyä kulunut  $\frac{761,6 \text{ MWh}}{0,01002 \frac{\text{MWh}}{\text{litra}}} = 76\,008$  litraa. Rahana tämä tekee nykyisen öljynhinnan mukaan laskettuna  $76\,008 \text{ litraa} * 0,73 \text{ €/litra} = 55\,486 \text{ €}$ . Kirjoitushetkellä lämmityksessä käytettävä kevyt polttoöljy on halpaa, mutta esimerkiksi

lokakuussa 2012 öljyn hinta on ollut 1,177 €/l /29/. Tällä öljynhinnalla saavutettu säästö lämmitysöljynhinnassa olisi ollut 89 461€.

Esimerkkinä käytettyjen talojen 1 ja 3 vuotuiset maalämpöpumppujen lämmitysenergiantuotot eroavat hieman toisistaan. Talon numero 1 (Kuva 27) lämpöpumpun tuotto on ollut 98,3 MWh, kun talon numero 3 (Kuva 29) lämpöpumpun energiantuotto on ollut 88,0 MWh. Eroa näillä kahdella esimerkkinä käytetyllä talolla vuoden seurantajaksolla on 10,3 MWh.

Talon numero 1 lämpöpumppu on kuluttanut sähköä 23,4 MWh, kun talon numero 3 lämpöpumppu on kuluttanut 22,1 MWh. Ero lämpöpumppujen sähkönkulutuksessa on 1,3 MWh.

Talon numero 1 lämpöpumpun COP seurantajaksolla on 4,2, talon numero 3 COP: n ollessa 4,0.

Lämpöpumppujen sähköenergiankulutuksessa ei ole kuin 1,3 MWh ero, mutta lämmitysenergian tuotossa eroa on 10,3 MWh. Tuloksista päätellen talon numero 1 lämpöpumppu on tuottanut 10,3 MWh lämpöenergiaa poikkeuksellisen hyvällä COP- arvolla. Kuvista 28 ja 30 nähdään esimerkkitalojen lämmönsiirtonesteiden kuukausittaiset keskilämpötilat, sekä keskimääräiset kuukausittaiset ulkolämpötilat. Kuvista nähdään että talon numero 1 lämpöpumpulta energiakenttään menevän lämmönsiirtonesteen lämpötila on jokaisena kuukautena seurantajakson ajalta ollut selvästi korkeampi kuin talon 3 lämpöpumpulla.

#### **9.4.2 Energiakentät**

Koska lämpöpumppujen etävalvonta on ollut käytössä vasta vuoden 2015 toukokuusta alkaen, ei lämmönsiirtonesteiden lämpötiloja seuraamalla pystytä vielä päättelemään energiakenttien palautumista lämmityskauden jälkeen. Tammikuu 2016 oli poikkeuksellisen kylmä, minkä ansiosta kenttien rasitus oli kova.

Talon nro.3 (kuva 32) lämmönsiirtonesteen keskilämpötila on tammikuussa ollut -0,3 °C pakkasella, muiden talojen ollessa 0 °C yläpuolella myös tammikuussa. Kuvasta 32 nähdään, että lämmönsiirtonesteen lämpötila on helmikuussa kohonnut +0,6 °C:seen,

mutta maaliskuussa laskenut  $+0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ :seen, vaikka ulkoilman keskilämpötila on noussut  $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  samana aikana ja täten myös lämmitysenergian tarve laskenut.

Kuvista 28 ja 30 voidaan todeta, että lämmönsiirtonesteen lämpötilat ovat lähteneet nousemaan kylmän tammikuun jälkeen kummankin esimerkkitalon energiakentässä. Jatkossa lämmönsiirtonesteiden keskilämpötilojen seuranta jatkamalla saadaan parempi kuva energiakenttien toiminnasta ja palautumisesta lämmityskauden jälkeen. Näin nähdään myös kenttien mitoituksen ja simuloinnin toimivuus käytännössä, josta on hyötyä tulevilla projekteilla.

## 9.5 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat energiakaivosta saatavaan energiamäärään ja millaisia vaikutuksia näillä tekijöillä on. Näihin tekijöihin perehdyttiin tutustumalla aiheeseen liittyvään tutkimustietoon ja julkaisuihin.

Energiakaivosta/ kaivosta saatavaan energiamäärään vaikuttavat kaivon/kaivojen sijainti, aktiivisyys, kallioperän koostumus, pohjaveden virtaukset, keruuputkiston tyyppi ja sijoitustapa kaivossa sekä lämmönsiirtoneste ja sen virtaama.

Kaivon sijaintiin ei voida suurelta osin vaikuttaa. Mikäli kuitenkin tiedetään, että rakennuskohteessa on jossakin kohtaa kallio lähempänä maanpintaa kuin muualla, olisi kannattavaa porata kaivo mahdollisuuksien mukaan tällaiseen paikkaan. Tällöin voidaan säästää rahaa kalliista suojaputkimuksista sekä saada kaivon aktiivisyys lähemmäksi kaivon kokonaissyvyyttä.

Myöskään kallioperän koostumukseen tai pohjaveden virtauksiin ei ole mahdollisuutta vaikuttaa. Näitä kahta tekijää ei usein ennen porausta tarkasti tiedetä, jos porauspaikalle ei ole tehty TRT-mittaus. Onkin suositeltavaa etenkin isommissa kohteissa suorittaa porauspaikalle TRT-mittaus, jotta energiakenttä pystytään mitoittamaan tarkasti. Vaikka TRT-mittaus tuokin lisäkustannuksia, on sillä mahdollista säästää porauskustannuksissa, jos pintamaan osuus on pieni ja kallioperä osoittautuu hyvin lämpöä johtavaksi, kuten tässä työssä käytetyssä esimerkkikohteessa. Pohjaveden virtauksilla on myös oma vaikutuksensa saatavaan energiamäärään. Virtaava pohjavesi voi

teoriassa kuljettaa lämpöä kaivon ympäristöstä kaivoon, mutta on myös mahdollista, että se kuljettaa lämpöä pois kaivon ympäriltä, erityisesti jos kaivoa ladataan passiivijäähdytyksen avulla. Pohjavedestä on joka tapauksessa hyötyä, koska se täyttää kaivon vedellä ja toimii näin paremmin lämpöä johtavana väliaineena kaivon seinämän ja keruuputkiston välillä kuin ilma.

Suurimmat asiat, joihin energiakaivon porauksessa aktiivisyvyyden lisäksi voidaan vaikuttaa, ovat keruuputkisto ja lämmönsiirtonesteen virtaama. Lämmönsiirtonesteen virtauksen tulisi olla keruuputkistossa turbulenttista porakaivon lämmönvastuksen pienentämiseksi, mutta kuitenkin nopeudeltaan sen verran hidasta, että energia kerkeää siirtyä lämmönsiirtonesteeseen kierron aikana. Tähän ongelmaan keruuputkivalmistajat ovat kehittäneet ratkaisuja, jotka ovat parempia kuin "perinteinen" maalämpöputki. Keruuputket tulisi sijoittaa kaivon sisällä toisistaan mahdollisimman erillään, lähellä kaivon seinämiä. Tällöin minimoidaan meno- ja paluuputken välinen haitallinen lämmönsiirtyminen. Tätä varten keruuputkien asennuksen yhteydessä tulisi putkien väliin asentaa erotinkappaleet, jotka pitävät putket erillä toisistaan. Koska ympäristömääräykset asettavat tiukat rajat maalämmössä käytettävälle lämmönsiirtonesteelle, ei tähän ole juurikaan mahdollista vaikuttaa.

Esimerkkikohteeseen toteutettu öljylämmityksen vaihto maalämpöön on osoittautunut vuoden seurantajakson perusteella todella hyväksi ratkaisuksi taloudellisesti sekä helppohoitaisuutensa kannalta. Suurena etuna projektissa oli rakennuksen matalalämpöradiaattoriverkosto, jonka menoveden mitoituslämpötila on  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Perinteisemmissä tämän ikäluokan radiaattoriverkostoissa on voitu käyttää jopa  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$  menoveden mitoituslämpötilaa joten vaikutus lämpöpumppujen COP- arvoon on suuri. Suurimmat vaikutukset hyvin onnistuneeseen projektiin ovat hyvin tarkoitukseen soveltuva kallioperä sekä maalämpöjärjestelmän onnistunut mitoitus kokonaisuudessaan.

Maalämpöpumpun COP- arvoa on totuttu pitämään hyvänä kun se on 3. Koska esimerkkikohteessa lämpöpumppujen seurantatiedoista kerättyjen arvojen perusteella laskettu COP 4,1 ylittää arvon 3 reilusti voitaisiin ajatella että kohde olisi voitu toteuttaa aktiivisyvyydeltään lyhemmillä energiakaivoilla.

Esimerkiksi talo 1: sen neljän energiakaivon yhteenlaskettu aktiivisyvyys on 909 metriä. Talo 1 kulutti vuoden seurantajakson aikana lämmitysenergiaa yhteensä 98,3

MWh josta sähköenergiaa oli 23,4 MWh. Kaivoista otettu energiamäärä on täten 74,9 MWh. Tästä voidaan laskea energiakaivoista otettu energiamäärä per metri:

$$\frac{74\,900\text{ kWh}}{909\text{ m}} = 82,4 \frac{\text{kWh}}{\text{m}}.$$

Mikäli esimerkkitalon 1 lämpöpumpun COP- arvona olisi tyydytty 3,5:een, olisi talon energiakaivoista tarvittu energiaa  $23,4\text{ MWh} \cdot 2,5 = 58,5\text{ MWh}$ . Kun kaivoista tarvittava energiamäärä 58,5 MWh jaetaan kaivojen tuotolla 82,4 kWh/m saadaan tulokseksi 710 metriä aktiivisyydestä energiakaivoa. Vuoden seurantajakson perusteella talo 1:n energiakenttä olisi täten voinut olla yhteensä 199 metriä lyhempi (909 m-710 m), jos COP- arvona olisi tyydytty 3,5:een.

On kuitenkin muistettava että vaikka kaivometrien pienentämisellä saataisiinkin hankintahetkellä säästöä, voi tästä koitua suuria ongelmia pitkien pakkasjaksojen jälkeen, pahimmassa tapauksessa energiakentän jäätyksen muodossa. Lisäksi energiakentän toimiessa potentiaalinsa äärirajoilla alenee lämmönsiirtonesteen lämpötila jonka johdosta myös lämpöpumpun COP- arvo heikkenee ja takaisinmaksuaika pitenee.

Maalämpöjärjestelmän suunnittelu- ja toteutusvaiheessa tarvittava energiakaivojen aktiivisyys on pyrittävä optimoimaan mahdollisimman oikeaksi. Alimitoitusta on pyrittävä ehdottomasti välttämään, mutta toisaalta liiallinen ylimitoitukseen ei ole suositeltavaa.

## LÄHTEET

1. Juvonen, Janne & Lapinlampi, Toivo 2013. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöministeriö. Ympäristöopas. PDF-dokumentti.  
[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO\\_2013.pdf](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf)  
Päivitetty 8/2013. Luettu 19.1.2016.
2. Lämpöä omasta maasta. 2012. Motiva. PDF-dokumentti.  
[http://www.motiva.fi/files/7965/Lampoa\\_omasta\\_maasta\\_Maalampopumput.pdf](http://www.motiva.fi/files/7965/Lampoa_omasta_maasta_Maalampopumput.pdf)  
Päivitetty 7/2012. Luettu 7.1.2016.
3. Leppäharju, Nina 2008. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Oulun yliopisto. Fysikaalisten tieteiden laitos. Pro gradu -tutkielma.  
Päivitetty 4/2008. Luettu 19.1.2016.
4. COP vs. SCOP- hyötysuhteiden erot. Nilan. Yrityksen WWW- sivut.  
<http://www.nilan.fi/cop-vs-scop-hyotysuhteiden-erot/>  
Ei päivitystietoa. Luettu 6.1.2016.
5. Matikka, Ville 2009. Maalämpöprojektin loppuraportti. Savonia ammattikorkeakoulu. PDF-dokumentti. Päivitetty 3.4.2009. Luettu 5.1.2016.
6. Rakennustietosäätiö 2002. Lämpöpumput LVI- ohjekortti. PDF-dokumentti. Päivitetty 3/2002. Luettu 12.1.2016.
7. Maalämmön/ energiakaivon lupaohje. Mikkelin kaupunki, Tekninen toimi, Rakennusvalvonta. WWW- dokumentti.  
[http://www.mikkeli.fi/sites/mikkeli.fi/files/atoms/files/maalammon\\_lupaohje\\_rakla2014.pdf](http://www.mikkeli.fi/sites/mikkeli.fi/files/atoms/files/maalammon_lupaohje_rakla2014.pdf)  
Päivitetty 11.3.2014. Luettu 14.1.2016.
8. Perinnekiinteistö hyödyntää uusiutuvan energian mahdollisuudet monipuolisesti. 2014. Rakentaja.fi. WWW- dokumentti.  
[http://www.rakentaja.fi/artikkelit/11897/maalampoa\\_vesistosta\\_stiebel\\_eltron.htm](http://www.rakentaja.fi/artikkelit/11897/maalampoa_vesistosta_stiebel_eltron.htm)  
Päivitetty 11.8.2014. Luettu 6.1.2016.
9. Lujabetonin nippusidepainot. PDF- dokumentti.  
[http://www.lujabetoni.fi/instancedata/prime\\_product\\_julkaisu/luja/embeds/lujabetoni\\_wwwstructure/16771\\_Lb\\_nippusidepainot.pdf\\_970401209.pdf](http://www.lujabetoni.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/luja/embeds/lujabetoni_wwwstructure/16771_Lb_nippusidepainot.pdf_970401209.pdf)  
Ei päivitystietoa. Luettu 12.1.2016.
10. Maalämpökaivo. Rototec oy. Yrityksen WWW- sivut.  
<http://rototec.fi/energiakaivo-sv/>  
Ei päivitystietoa. Luettu 12.1.2016.
11. Terminen vastetestti eli TRT- mittaus. Geologian tutkimuskeskus. Yrityksen WWW- sivut.  
<http://www.gtk.fi/tutkimus/tutkimusohjelmat/energia/trtmittaus.html>  
Ei päivitystietoa. Luettu 13.1.2016.

12. Thelin, Björn 2014. TRT- mittausraportti. Rototec Consulting Ab. Päivitetty 8.7.2014. Luettu 13.1.2016.
13. Energiakaivojen lämpötilaseuranta DTS- mittauksella. Geologian tutkimuskeskus. Yrityksen WWW- sivut.  
<http://www.gtk.fi/tutkimus/tutkimusohjelmat/energia/dtsmittaus.html>  
 Ei päivitystietoa. Luettu 18.1.2016.
14. Optimoituja geoenergiakenttiä lämmitykseen ja jäähdytykseen. Rototec oy.
15. Ruan, Wei & Horton William 2010. Literature review on the calculation of vertical ground heat exchangers for geothermal heat pump systems. Purdue University. School of Mechanical Engineering. PDF- dokumentti.  
<http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1044&context=ihpbc>  
 Päivitetty 7/2010. Luettu 15.1.2016.
16. Lahti, Tommi 2013. Lämpökaivokenttä lämmönlähteenä. Tampereen teknillinen yliopisto. Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. Päivitetty 11/2013. Luettu 19.1.2016.
17. Nylund, Johanna 2010. Kalliolämpö osana uusiutuviin energioihin perustuvaa arktista lämmitysjärjestelmää. Aalto- yliopiston teknillinen korkeakoulu. Energiatekniikan laitos. Diplomityö. <http://matkahanke.aalto.fi/fi/julkaisut/diplomityo-2.pdf>  
 Päivitetty 31.5.2010. Luettu 19.1.2016.
18. Nordell, Bo 2004. Bergvärme och bergkyla. Luleå tekniska universitet. PDF- dokumentti. <http://www.siki.se.canit.se/downloads/borrhäl.pdf>  
 Päivitetty 18.3.2004. . Luettu 17.1.2016.
19. Turunen, Mikko. Suomen kallioperä. WWW- dokumentti.  
<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-kallioperäe>  
 Ei päivitystietoa. Luettu 18.1.2016.
20. Huusko, Asmo, Lahtinen, Hannu, Martinkauppi, Anu, Putkinen, Niko, Putkinen, Satu & Wik Henrik 2015. Keski- Suomen geoenergiapotentiaali. Geologian tutkimuskeskus. PDF- dokumentti.  
[http://www.keskisuomi.fi/filebank/24387-Keski-Suomen\\_geoenergiapotentiaali\\_4162018\\_loppuraportti.pdf](http://www.keskisuomi.fi/filebank/24387-Keski-Suomen_geoenergiapotentiaali_4162018_loppuraportti.pdf)  
 Päivitetty 17.6.2015. Luettu 18.1.2016.
21. Matalalla virtauksella korkea COP. Muovitech oy. PDF-dokumentti.  
[http://www.muovitech.com/pdf/mt\\_a4\\_folder\\_turbo\\_FI.pdf](http://www.muovitech.com/pdf/mt_a4_folder_turbo_FI.pdf)  
 Ei päivitystietoa. Luettu 19.1.2015.
22. Suomalainen maalämpööneste luonnollisesti 2015. Altia oyj. PDF-dokumentti.  
<http://www.naturet.fi/connect/d22380b1-95a4-4c79-aacc-a2e5fa42b34c/Naturet+esite+nettiin+2015.pdf?MOD=AJPERES&NATURET%20ESITE%20150119>  
 Päivitetty 2015. Luettu 19.1.2016.

23. Kauppila, Kari 2013. Suuret lämpöpumput ja maalämpöjärjestelmät. PDF-dokumentti. Päivitetty 27.2.2013. Luettu 22.1.2016.
24. Kauppila, Kari 2015. Energiakenttien mitoitus ja elinkaari. Suomen kylmäyhdistys ry koulutuspäivät. PDF-dokumentti. Päivitetty 7.5.2015. Luettu 22.1.2016.
25. Oksanen, Henri 2015. Asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän optimointi uudis- ja korjausrakentamiskohteissa. Aalto- yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu. Energia- ja LVI- tekniikan koulutusohjelma. Diplomityö.  
[https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/15096/master\\_Oksanen\\_Henri\\_2015.pdf?sequence=1](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/15096/master_Oksanen_Henri_2015.pdf?sequence=1). Päivitetty 12.1.2015. Luettu 4.2.2016.
26. Acuña, José 2010. Improvements of U-pipe borehole heat exchangers. KTH School of Industrial Engineering and Management. Division of Applied Thermodynamic and Refrigeration. Licentiate thesis.  
<http://effsys2.se/Publicerade%20dokument/P08/Licenciate%20Thesis%20-%20Jose%20Acuna%20final2.pdf> Päivitetty 29.4.2010. Luettu 29.1.2015.
27. Öljytuotteiden kuluttajahintaseuranta. Öljy- ja biopolttoaineala ry. WWW- sivut..  
<http://www.oil.fi/fi/tilastot-1-hinnat-ja-verot/11-oljytuotteiden-kuluttajahintaseuranta>  
Päivitetty 15.3.2016. Luettu 24.3.2016
28. Polttoaineiden lämpöarvot, hyötysuhteet ja hiilidioksidin ominaispäästökertoimet sekä energian hinnat. Motiva Oy. PDF-dokumentti.  
[http://www.motiva.fi/files/3193/Polttoaineiden\\_lampoarvot\\_hyotysuhteet\\_ja\\_hiilidioksidin\\_ominaispaastokertoimet\\_seka\\_energianhinnat\\_19042010.pdf](http://www.motiva.fi/files/3193/Polttoaineiden_lampoarvot_hyotysuhteet_ja_hiilidioksidin_ominaispaastokertoimet_seka_energianhinnat_19042010.pdf). Päivitetty 19.4.2010. Luettu 24.3.2016.
29. Kuluttajahintaseuranta vuodesta 2000 alkaen. Öljy- ja biopolttoaineala ry. PDF-dokumentti.  
[https://docs.google.com/spreadsheets/d/11\\_jUasrAh8GkDrImU1mTsPyN8H\\_ojNV06JbPWuSb3jo/pub?single=true&gid=13&output=html](https://docs.google.com/spreadsheets/d/11_jUasrAh8GkDrImU1mTsPyN8H_ojNV06JbPWuSb3jo/pub?single=true&gid=13&output=html). Päivitetty 28.3.2016. Luettu 28.3.2016.





**TRT-mittaus, Kallioharjuntie 1-6, Pellosiemi**

---

Björn Thelin, Rototec Consulting Ab

8.7.2014

## TRT- mittausraportti Kallioharjuntie 1-6

Osoitteessa Kallioharjuntie 1-6, Pellosiemi tehdyn TRT-mittauksen tulokset

Mittaus suoritettiin 240 metrin syvyydestä energiakaivosta, jonka tehollinen syvyys pohjaveden pinnan tasosta mitattuna on 233 metriä. (Pohjaveden pinnankorkeus 7m)

Mittaus antoi seuraavat tulokset:

Keskilämpötila  $T_{sur}$ : +8,3 °C

Lämmönjohtoluku  $\lambda$  (lambda): 4,3 W/Km

Porakaivon lämmönvastus  $R_b$ : 0,10 (0,13) Km/W

Lämpötila on peruskallion keskilämpötila celsiusasteina.

Lämmönjohtoluku (konduktiivisuus)  $\lambda$  ilmaisee kallioperän keskimääräisen lämmönjohtavuuden porakaivosta mitattuna yksikössä W/mK.

Porakaivon lämmönvastus on mitattu yksikössä Km/W. Porakaivon lämmönvastus on vakio, joka määrittää, kuinka suuri on keskilämpötilan ero porakaivon seinämän ja kylmänsiirtoaineen välillä tietyn syötetyn tai otetun lämpötehon kohdalla. Mitä pienempi porakaivon lämmönvastus on, sitä suurempi on lämpö- ja kylmäjärjestelmän tehoaste.

Kallioperän keskilämpötilan +8,3 °C voidaan todeta olevan normaali ko. alueella.

Saatu  $\lambda$ -arvo 4,3 W/Km on selkeästi ko. alueelle tyypillisten kalliolajien keskiarvon yläpuolella.

Porakaivon lämmönvastus  $R_b=0,10$  Km/W on mittauksessa käytetyn keruuputken kohdalla normaali arvo. Kun kaivosta otetaan lämpöä, tulee arvoon lisätä 0,03, jolloin siitä tulee 0,13 Km/W. Kun kaivoa lämmitetään, kuten testissä, saadaan pienempi porakaivonvastus kuin normaalissa käytössä, johtuen lämmityksestä aiheutuvista kaivon pystysuuntaisista virtauksista.

Nämä parametrit kuvaavat kallion lämpöominaisuuksia riittävän hyvin, jotta voitaisiin tehdä mitoitus esimerkiksi Earth Energy Designer-ohjelman avulla.

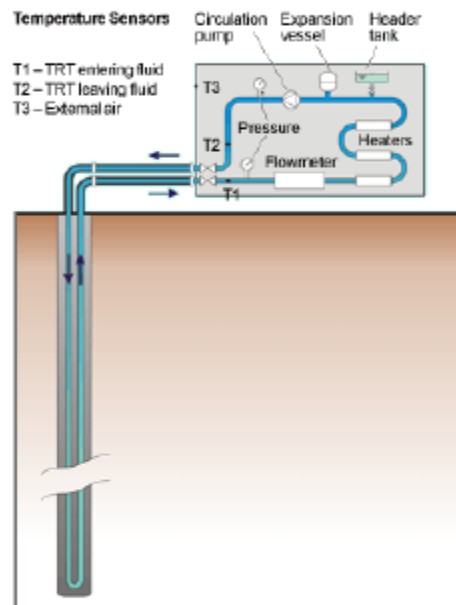
Alla laskelman yksityiskohtainen erittely

Mittaukseen käytettiin seuraavia laitteita: kiertopumppu, lämpövastus ja lämpötilan dataloggeri antureineen. Mittauslaitteet liitetään porakaivon keruuputkiin (tavallisesti U-muotoinen putki, jonka halkaisija on 40 mm), jotka on täytetty nesteellä (nk. kylmänsiirtoaine). Nestettä kierrätetään porakaivon keruuputkissa ja luetaan ympäristön sekä nesteen syöttö- ja ottolämpötilat. Alkuvaiheessa nesteen annetaan kiertää muutama tunti kallion keskilämpötilan mittaamiseksi. Sen jälkeen kytketään lämpövastus päälle ja

## TRT- mittausraportti Kallioharjuntie 1-6

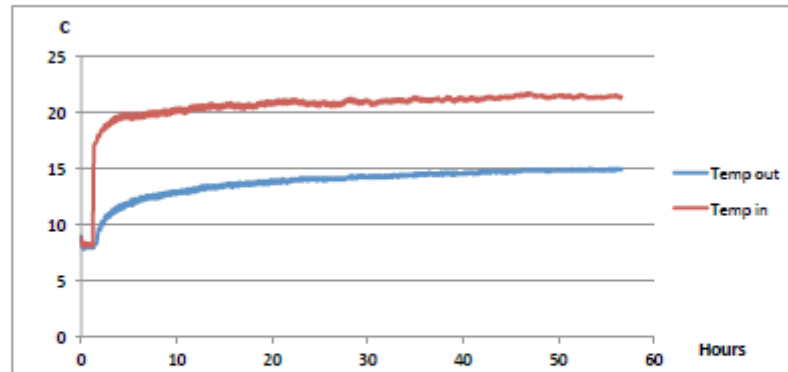
nesteen virratessa kallioon siihen syötetään tasaisesti tietty teho eli nestettä lämmitetään. Nesteen virratessa alas porakaivoon ja porakaivosta ylös, osa tästä lämmöstä siirtyy porakaivon täytteeseen (tässä tapauksessa veteen) ja porakaivoa ympäröivään kallioon. Tämä mittausvaihe kestää yleensä 48–60 tuntia. Pumpun nopeus ja syöttöteho mitoitetaan vastaamaan suunnitellun energiakaivokentän käyttöolosuhteita. Vaikka meidän leveysasteillamme kallioon ei yleensä syötetä energiaa vaan sieltä otetaan energiaa.

Mittauksen periaatekaavio:



# TRT- mittausraportti Kallioharjuntie 1-6

Suoritetun mittauksen aika-lämpötiläkäyrät:



Mittaustulos. Y-akseli kuvaa celsiusasteita, X-akseli aikaa tunneissa.

Mittausta suoritetaan ensin muutaman tunnin ajan ilman syöttölämpöä. Näin saadaan mitattua kallion keskilämpötila.

Kun lämpövastus kytketään päälle, kylmänsiirtoaineen lämpötila nousee aluksi nopeasti ja sen jälkeen koko ajan hitaammin syöttölämmön siirtyessä kallioon. Tämä kuvastuu keruuputkien syöttö- ja ottolämpötilojen välisenä erotuksena.

Signhild Gehlin, Luulajan tekninen korkeakoulu, kuvaa opinnäytteessään (LTU-LIC-1998:37) termiseen vastetestiin liittyvää teoriaa ja käytäntöä. Sovellamme tässä pääosiltaan tätä menetelmää.

Opinnäytteessä oleva matemaattinen kaava ilmaisee, miten kylmänsiirtoaineen keskilämpötila (syöttö- ja ottolämpötilan välinen erotus),  $T_f$ , ajan mittaan muuttuu tasaisen lämmönsyötön aikana, teholla  $Q$ .

Kaava on analyyttisen funktion approksimaatio. Vaaditaan tietty aika, noin ½ - 1 tuntia testeissä normaalisti käytetyillä arvoilla, jotta approksimaatio olisi riittävän hyvä:

$$T_f = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot H} \ln(t) + \frac{Q}{H} \left( \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left( \ln\left( \frac{4 \cdot \alpha}{r_{\text{bott}} \cdot r_{\text{bott}}} \right) - E_c \right) + R_b \right) + T_{\text{sur}} \quad (1)$$

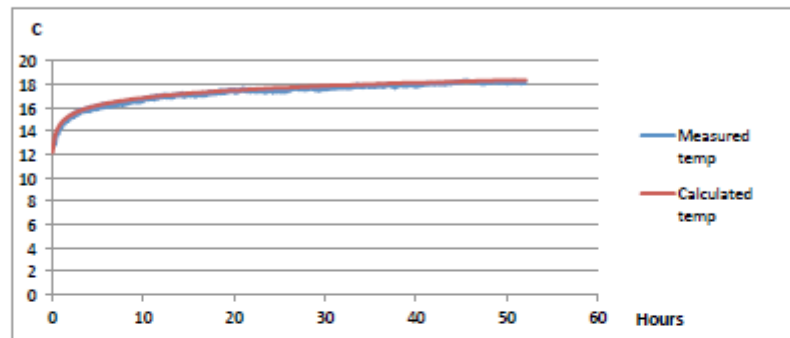
$Q$  on syöttöteho [W],  $H$  on tehollinen poraussyvyys [m],  $\lambda$  on kallion keskimääräinen lämmönjohtokyky eli konduktiivisuus (lambda) [W/Km],  $\alpha$  on termien diffuusiokerroin (lambda ja kallion lämpökapasiteetin välinen suhde) [m<sup>2</sup>/s],  $t$  on aika sekunneissa lämmönsyötön alkamisesta,  $r_{\text{bott}}$  on porareian säde,  $E_c$  on Eulerin vakio (0,5772),  $R_b$  on porakaivon lämmönvastus (porakaivon vastus), ja  $T_{\text{sur}}$  on ympäröivän peruskallion keskilämpötila.

## TRT- mittausraportti Kallioharjuntie 1-6

Yllä olevan yhtälön avulla ja analysoimalla lämpötiläkäyrän ominaisuuksia, voidaan Lambda-arvo ja porakaivonvastus määrittää.

Kun tunnetaan  $\lambda$  -arvo, porakaivon lämmönvastus ja peruskallion lämpötila, voidaan yhtälön (1) avulla laskea arvioitu keskilämpötiläkäyrä, jonka tulee mahdollisimman tarkkaan vastata mitattuja arvoja, mikäli mittaukset ja laskelmat on tehty oikein.

Kuten alla olevasta kuvaajasta ilmenee, vastaavuus on ensimmäisen tunnin jälkeen erittäin hyvä:



Syöttöteho mitattiin ja se oli melko tasainen mittauksen aikana ollen keskimäärin 11854 W.

Poraussuunnitelma As. Oy Pellosharju (muokattu)

Porauskulmat	
Kaivo nro.	Kallistus
1	13cm/m
2	24cm/m
3	13cm/m
4	16cm/m
5	25cm/m
6	11cm/m
7	20cm/m
8	15cm/m
9	13cm/m
10	8cm/m
11	6cm/m
12	25cm/m
13	20cm/m
14	5,5cm/m
15	15cm/m
16	12cm/m
17	23cm/m
18	13cm/m
19	14cm/m
20	14cm/m
21	11cm/m
22	17cm/m
23	11cm/m
24	11cm/m

Energiakaivot 24x240m

— = Energiakaivo

