



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Jaana T. Turunen

# Kiinteistön hybridilämmitys ja viilennys

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Talotekniikka

Opinnäytetyö

1.6.2021

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Jaana Turunen Kiinteistön hybridilämmitys ja viilennys 53 sivua + 2 liitettä 1.6.2021
Tutkinto	insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-tekniikka
Ohjaajat	suunnittelujohtaja Johannes Helander yliopettaja Jukka Yrjölä
<p>Rakennusten lämmitys ja sähkönkäyttö muodostavat lähes 40 prosenttia energian loppukäytöstä. Suomi on sitoutunut EU:n energia- ja ilmastotavoitteisiin. Päästövähennyksiin päästään vähentämällä fossiilisten polttoaineiden kulutusta. Yhtenä vaihtoehtona on tuottaa kiinteistön vaatima lämmitys- ja jäähdytysenergia lämpöpumpuilla. Tutkimuksen tavoitteena on koota tietoa lämpöpumppujärjestelmän suunnittelusta painottuen järjestelmän kalleimpaan osaan energiakaivokenttään.</p> <p>Tutkimusmenetelminä olivat kirjallisuustutkimus, haastattelut ja omakohtaiset laskelmat Earth Energy Designer -energiakentän simulointiohjelmalla. Esimerkkikohteena oli Helsinkiin sijoittuva sairaala ja sen energiakenttä. Tavoitteena oli selvittää, miten eri seikat vaikuttavat energiakaivoista saatavaan lämpömäärään.</p> <p>Laskelmien perusteella todettiin, että energiakaivon halkaisijan tulisi olla mahdollisimman pieni ja energiakaivossa tulisi olla mahdollisimman isot putket mahdollisimman kaukana toisistaan. Energiakaivossa vesi toimii eristeenä. Mitä suurempi on vesimäärä putkien ympärillä, sitä suurempi on energiakaivon lämpövastus. Suomen kallioperä sopii energiakaivoille. Tiivistä suorakaiteen tai neliömuotoista energiakenttää ei tule käyttää. Sopiva energiakaivonetäisyys on 15–20 metriä. Energiakentän sijainnilla on merkitystä, Lapissa tarvitaan yli kaksinkertainen energiakaivojen yhteispituus, jotta päästäisiin samaan lämmön tuottoon kuin Helsingissä. Meri lämmittää maaperään esim. Oulussa.</p>	
Avainsanat	energiakaivo, energiakaivokenttä, maalämpöpumppu

Author Title Number of Pages Date	Jaana Turunen Hybrid Heating and Cooling in Buildings 53 pages + 3 appendices 1 June 2021
Degree	Master of Engineering
Degree Programme	Building Service Engineering
Instructors	Johannes Helander, Planning Director Jukka Yrjölä, Principal Lecturer
<p>The goal of the final year project was to produce information about the design of heat pump systems, especially the energy well field, the most expensive part of the system.</p> <p>The research methods were literature research, interviews and calculations with the EDD (Earth Energy Designer) energy field simulation program. An example was a hospital and its energy field in Helsinki. The purpose of was to find out how different things affect the amount of heat obtained from the energy wells.</p> <p>The calculations showed that the diameter of the energy well should be as small as possible, the diameter of the pipe should be large, and the pipes should be as far apart as possible, near the wall in the energy well.</p> <p>Furthermore a rectangular or square energy field should not be used. A suitable distance between energy wells is 15 to 20 meters. Additionally, the geographical location of the energy well is important as more than double the total length of the energy wells would be needed for the same heat production in Lapland as in Helsinki. The sea warms the bedrock, for example in Oulu. The thesis is suitable for anyone interested in geothermal systems.</p>	
Keywords	energy well, energy well field, ground source heat pump

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lämpöpumpputekniikka	3
2.1	Maalämpöpumppu	3
2.2	Lämpöpumppujen erityispiirteitä	4
2.3	Lämpöpumpun ja kylmäkoneen toiminta	4
2.4	Lämpöpumpun mitoitus	7
2.5	Lämpöpumppuprosessi ja kylmäaineen tilapiirros	8
3	Lämpöpumppujen energialähteet	12
3.1	Lämpöä vesistöstä	12
3.2	Lämpöä poistoilmasta	13
3.3	Lämpöä maankamarasta	13
3.3.1	Energiakaivot	15
3.3.2	Vinot energiakaivot	17
3.3.3	Geolämpökaivot	17
3.4	Yhden tavanomaisen energiakaivon mitoitus	18
3.5	Energiakaivokentän mitoitus	19
4	Lisälämpö	21
4.1	Sähkö lisälämmönlähteenä	21
4.2	Kaukolämpö lisälämmönlähteenä	21
5	Jäähdytys	22
5.1	Kaukojäähdytys	22
5.2	Maalämpöpumpulla jäähdyttäminen	23
6	Käytännön esimerkki	24
6.1	Lämmityksen ja jäähdytyksen tehontarpeet	24
6.2	Lämmitystehon jakautuminen maalämmölle ja kaukolämmölle	25
6.3	Jäähdytys ja lauhdelämpö	26
6.4	Hukkalämpö	26
6.5	Energiankierrätys	27
6.6	Energiakaivokenttä	27

6.7	Maalämpöpumppu	29
6.8	Lämpöpumppu ja automaatio	30
7	Energiakenttätutkimus	31
7.1	Tutkimuksen tavoite ja haasteet	31
7.2	Tietokoneohjelmat	31
7.3	Tutkimuksen lähtötiedot	32
7.4	Perustapaus	34
7.5	Tutkimuskohteet	36
7.5.1	TRT-mittaus ja EED-simulointi	36
7.5.2	Maaliuoksen virtaus, putkietäisyys ja putkikoko	37
7.5.3	Keruuputkien välimatka energiakaivossa	38
7.5.4	Simulointijakson pituuden vaikutus	39
7.5.5	Energiakaivokentän muoto	40
7.5.6	Energiakaivojen välimatka	41
7.5.7	Maaperä ja kivilaji	42
7.5.8	Energiakaivokentän maantieteellinen sijainti	43
7.5.9	Maaliuoksen lämpötilamuutokset	45
7.6	Tiivistelmä energiakenttätutkimuksen tuloksista	46
7.7	Pohdintaa energiakenttätutkimuksen tuloksista	47
8	Lämpöpumppuhankkeen suunnitteluprosessi	47
9	Pohdintaa	48
10	Yhteenveto	50
	Lähteet	51
	Liitteet	
	Liite 1. Laskentasuunnitelma	
	Liite 2. Perustapaus	

## Lyhenteet ja käsitteet

EED-simulointi	EED (Earth Energy Designer) -tietokoneohjelmalla mallinnetaan energiakaivojen pitkäaikaiskuormitusta.
Energiakaivo	Energiakaivolla tarkoitetaan sekä lämpö- että jäähdytyskaivoa.
Energiakenttä	Energiakenttä on usean energiakaivon ryhmä.
Geoenergia	Geoenergia on lämmitys- että jäähdytysenergiaa, jota saadaan maaperästä, kallioperästä, pohjavedestä ja vesistöistä. Lämmön pääasiallinen energianlähde on maan pintaan varastoitunut aurinkoenergia.
Geoterminen energia	Geoterminen energia on maan sisuksesta johtuva lämpö.
Lämpökaivo	Lämpökaivo on energiakaivo, yleensä tarkoitetaan alle kilometrin syvää reikää.
Maankamara	Maankamara muodostuu maaperästä ja kallioperästä.
Maaperä	Maaperällä tarkoitetaan irtomaata, joka on kallion päällä.
Tehollinen syvyys	Energiakaivon tehollinen syvyys tarkoittaa kaivossa olevan vesipatsaan pituutta. Esimerkiksi jos energiakaivossa on 250 m vettä, on kaivon tehollinen syvyys 250 metriä.
TRT-mittaus	Thermal Response Test, eli terminen vastetestti. Testissä mitataan, kuinka paljon kallio pystyy vastaanottamaan lämpöä. Tulosten perusteella pystytään tulkitsemaan kallioperän lämmönjohtavuus, kallion häiriintymätön lämpötila sekä porakaivon vastus.

## 1 Johdanto

Maailmanlaajuinen siirtyminen fossiilista polttoaineista uusiutuviin energialähteisiin on alkanut. Fossiilisten polttoaineiden vähetessä, ilman saastumisen lisääntyessä ja huolen lisääntyessä ilmaston epävakaudesta vauhdittaa uuden maailmanlaajuisen energiatalouden syntyä. Vanha, hiileen ja öljyyn pohjautuva energiatalous on korvautumassa uudella auringosta ja tuulesta peräisin olevalla energialla. [1, s. 13.]

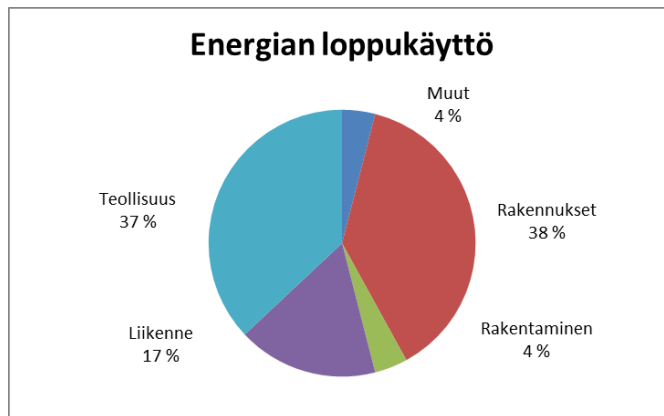
Kansainvälinen aikavälin 2010–2050 energiapolitiikka on sovittu maailmanlaajuisesti Kioton ja Balin sopimuksissa sekä EU:n energia- ja ilmastotavoitteissa. Eurooppalaisten tavoitteiden mukaan vuoden 2020 jälkeen rakennettavat talot ovat lähes nollaenergiataloja. Samalla lisätään olemassa olevien ja uusien kiinteistöjen omaa energian tuottoa uusiutuvilla energiamuodoilla, lähinnä maalämmöllä, bioenergialla ja tuulienergialla. Teollisuusmaissa pääpaino on energiankäytön vähentämisellä ja energiatehokkuuden lisäämisellä. Tässä rakennusten energiankulutus on keskeisessä asemassa. [2, s. 225.]

Suomessa syntyvistä kasvihuonekaasupäästöistä suurin yksittäinen osuus tulee rakennusten energian käytöstä, noin kolmannes. Lähes saman verran kasvihuonekaasupäästöjä tulee teollisuudesta. Liikenteen päästöt ovat alle 20 prosenttia (kuva 1).



Kuva 1. Suomen kasvihuonekaasupäästöjen lähteet [3, s. 304].

Rakennusten lämmitys ja sähkönkäyttö muodostavat lähes 40 prosenttia energian loppukäytöstä (kuva 2). Kun tarkastellaan ilmastovaikutuksia, huomataan, että lämmitysmuodon valinnalla on merkitystä. Rakennuksien lämmitysenergian lähteenä maalämmön käyttö on ekologinen vaihtoehto, uusiutuva lämmitysmuoto. [4, s. 110.]



Kuva 2. Energian loppukäyttö [3, s. 304].

Päästövähennyksiin päästään vähentämällä fossiilisten polttoaineiden kulutusta. Yhtenä vaihtoehtona fossiilisten polttoaineiden kulutuksen alentamiseen on tuottaa kiinteistöjen vaatima lämmitysenergia lämpöpumpuilla. Kesällä tarvitaan jäähdytystä ilmaston lämpenemisen ja rakennusten eristystason paranemisen myötä. Jäähdytyksen tarpeen kasvu on tuonut myös lämpöpumpumarkkinoille lisäkannattavuutta.

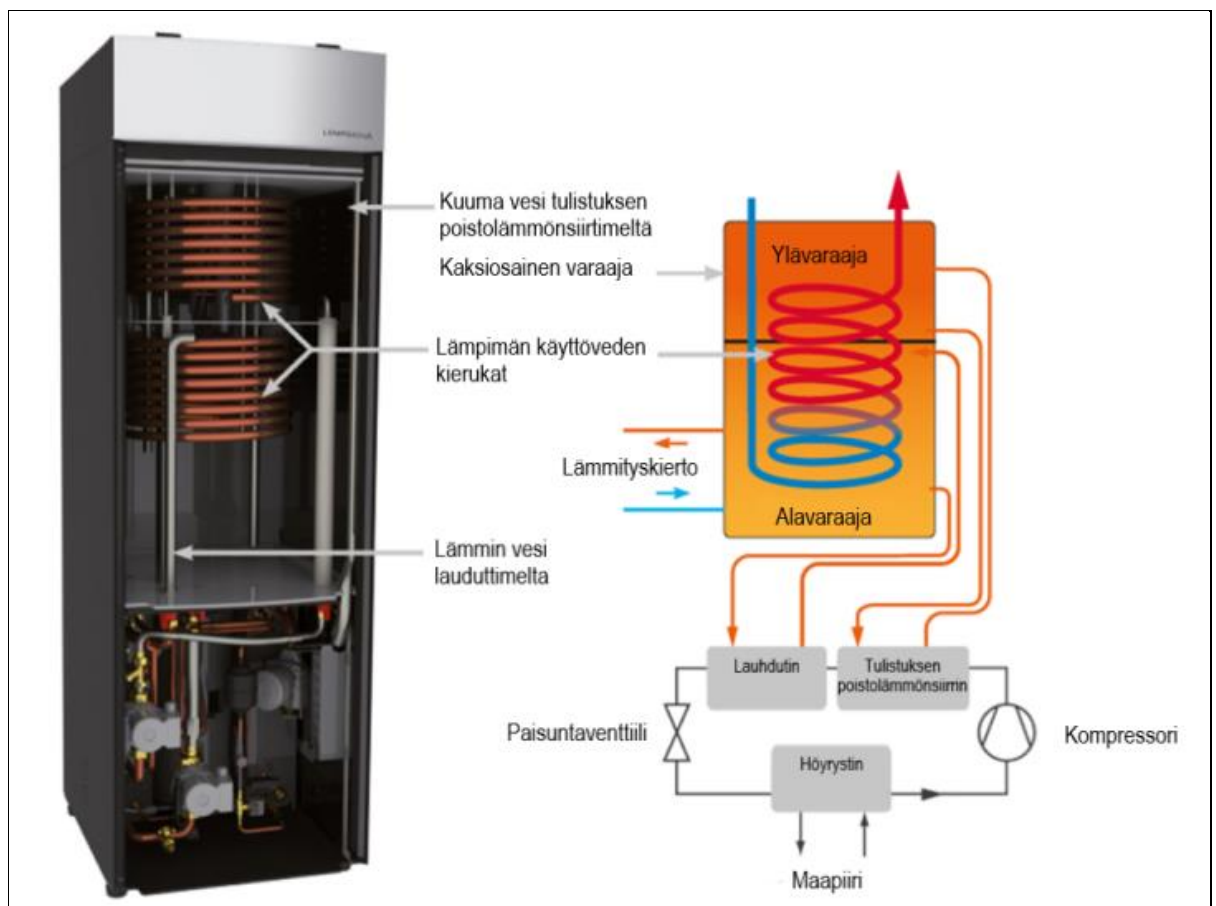


## 2 Lämpöpumpputekniikka

### 2.1 Maalämpöpumppu

Lämmitysenergia tuotetaan lämpöpumpuilla ilmaisenergioiden ja kompressorien avulla. Maalämpöpumppulämmityksessä hyödynnetään maan pintakerrokseen tai vesistöön varastoitunutta auringon lämpöenergiaa. Talvella routarajan alapuolella maan lämpötila on 3–10 °C. Kosteaa maata ja vesistöjä ovat parhaita lämmönlähteitä, koska niissä siirtyy nopeasti uutta lämpöä pois pumpatun lämmön tilalle. [5, s. 182.]

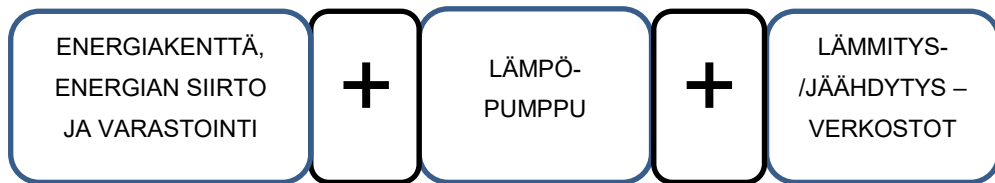
Maalämpöpumppujärjestelmä koostuu sisäänrakennetusta lämminvesivaraajasta, kompressorista, lämmönsiirtimestä, paisuntaventtiilistä ja suljetusta kylmäainepiiristä (kuva 3). Isoissa lämmitysjärjestelmissä lämminvesivaraajat ovat erillisiä laitteita.



Kuva 3. Leikkaus maalämpöpumpusta ja toimintaperiaate [6].

## 2.2 Lämpöpumppujen erityispiirteitä

Lämpöpumppujärjestelmiin liittyy erityispiirteitä, joita muissa energiajärjestelmissä ei ole. Erityispiirteiden tiedostaminen on avainasemassa arvioitaessa ja suunniteltaessa lämpöpumppujärjestelmiä. Maalämpöpumppujärjestelmä toimii korkeintaan yhtä hyvin kuin järjestelmän heikoin lenkki (kuva 4). Ongelmia voi olla lämpöpumpun lisäksi lämmönkeruussa, lämmitysverkostossa sekä varastoinnista. Järjestelmän heikoin lenkki dominoi koko järjestelmän toimintaa ja taloudellista kannattavuutta huomattavan paljon.



Kuva 4. Heikoin lenkki –periaate, maalämpö.

Kylmäaineen vaatimuksena on myrkyttömyys ja palamattomuus. Lämpöpumpuissa käytetään yleensä HFC-kylmäaineita. HFC (Hydro-Fluoro-Carbon) sisältää vetyä ja fluoria. HFC-kylmäaineet eivät aiheuta otsonikatoa, mutta ne ovat kasvihuonekaasuja. HFC-kylmäaineita ja niiden seoksia ovat mm. R134a, R410A, R407C, R410A ja R507. [7, s. 33.]

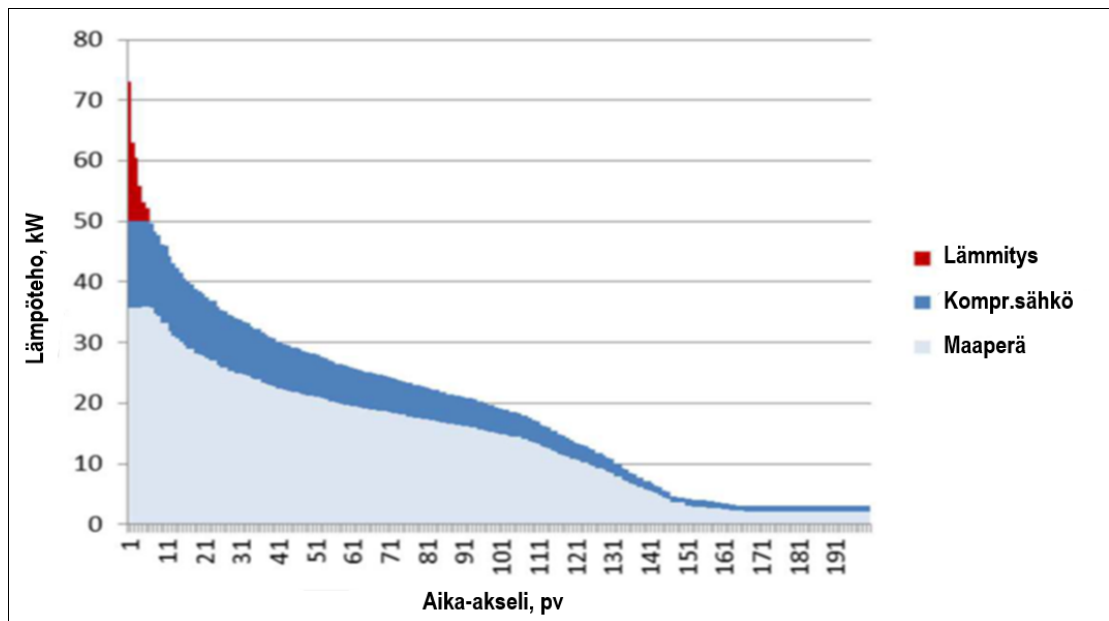
Lämpöpumpun mitoitus, toiminta-alue ja hyötysuhde vaikuttavat lämpöpumpun suorituskykyyn. Lämmityskohteen lämpötilat ja lämmöntarve vaihtelevat. Esimerkiksi kosteissa tiloissa on lattialämmitys päällä, kun taas muita tiloja ei tarvitse kesällä lämmitellä. Lämpöpumpun hyötysuhde riippuu käyttötavasta ja käyttöolosuhteista. Jotta lämpöpumppu toimisi mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella, on rakennuksen lämmitysverkostojen lämpötilatasot suunniteltava perinteistä matalammaksi.

## 2.3 Lämpöpumpun ja kylmäkoneen toiminta

Lämpöpumppuja tarvitaan, kun halutaan siirtää lämpöä matalasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan. Käyttökohteita ovat esimerkiksi huonetilojen lämmitys, ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmitys. Lämpöpumpun tuottama lämpö muodostuu lämmönlähteistä otettavan ilmaislämmön ja kompressorin käyttämän sähkön summana. Usein

lämpöpumppua ei mitoiteta koko energiantarpeelle vaan loppuosa tuotetaan jollain muulla lisälämmöllä. Tilannetta voidaan kuvata pysyvyyskäyrällä (kuva 5).

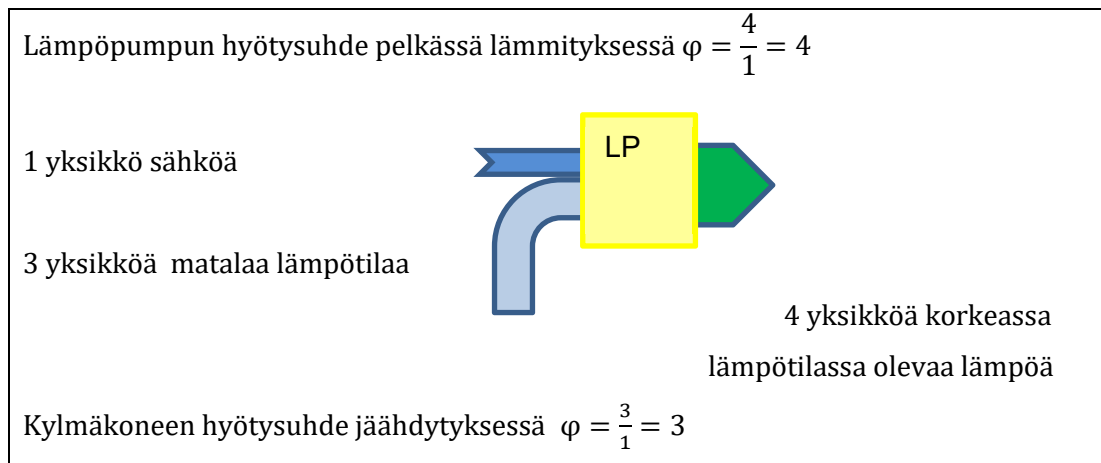
Pysyvyyskäyrä kuvaa lämpöpumpun tuottamaa lämmitystehoa ja lisälämmön tarvetta. Kuvassa 5 x-akseli kuvaa aikaa päivinä ja y-akseli osoittaa lämpötehoa kW:na. Vaalean sininen väri kuvaa maaperästä maalämpöpumpun avulla saatavaa lämpöä, sininen kompressorin sähkönkulutuksesta tulevaa lämpöä ja punainen väri on lisälämmityksen tarve, joka tuotetaan joillaan muulla lämmönlähteellä.



Kuva 5. Pysyvyyskäyräesimerkki [8, s. 1].

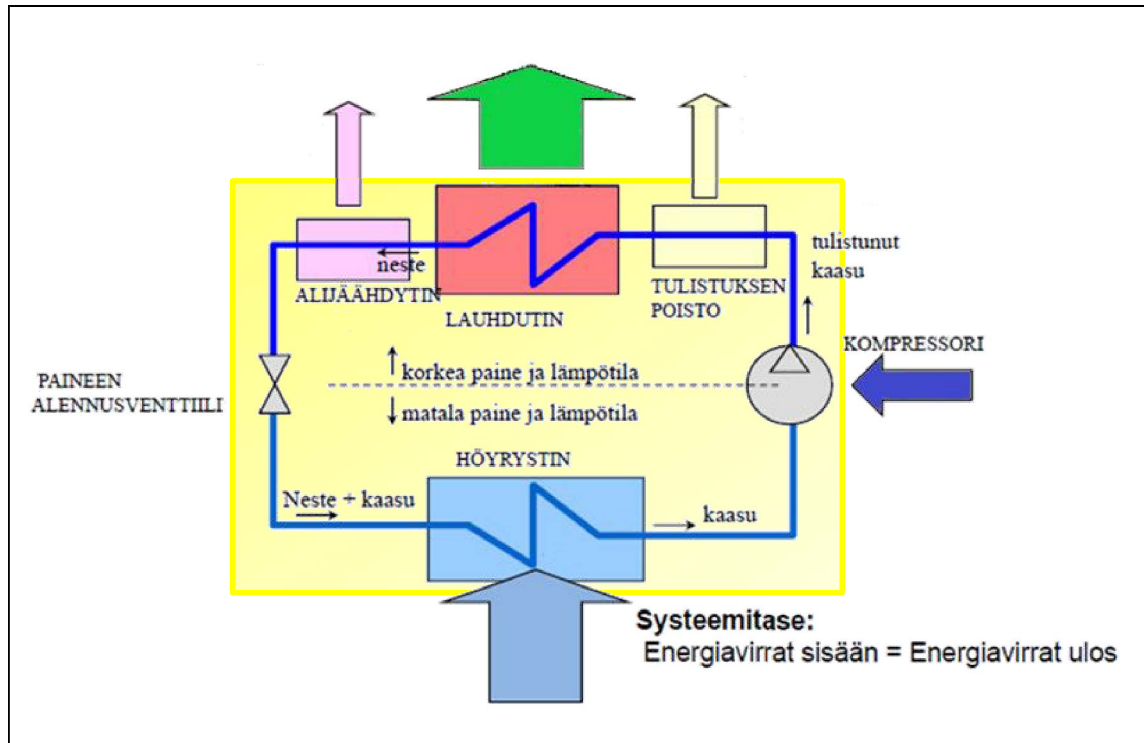
Kuvassa 6 lämpöpumppu ottaa maaperästä, ilmasta, vedestä tai jäähdytyksestä 3 yksikköä lämpöä. Lämpöpumppu käyttää sähköä yhden yksikön. Energian säilymislain mukaan energiaa ei voida luoda eikä hävittää. Energia ainoastaan muuttuu muodosta toiseen. Sähkö muuttuu lämmöksi. Saadaan (3+1) 4 yksikköä lämpöä. Lämmityksen hyötysuhde on 4 ja jäähdytyksen 3. Jos sekä lämpö että jäähdytys hyödynnetään, laitoksen kokonaishyötysuhde on (4+3) 7.

Energiaa maalämpöpumpusta saadaan ulos yhtä paljon kuin maalämpöpumppuun menee. Termodynamiikan ensimmäinen pääsäännön mukaan suljettujen systeemin energia säilyy, energiavirrat sisään = energiavirrat ulos.



Kuva 6. Periaatekaavio maalämpöpumpun hyötysuhteen muodostumisesta

Kuvassa 7 on esitetty lämpöpumpun toimintaperiaate ja kylmäaineen olomuodon muutokset. Maaliuoksen lämpö siirtyy höyrystimessä kylmäaineeseen, jota kompressori sähköän avulla puristaa kasaan. Syntyy kuumaa kaasua, joka poistuu lauhduttimen, tulistuksen poiston ja alijäähdytyksen kautta. Kaasu muuttuu nesteeksi. Ylimääräinen paine poistuu paineen alennusventtiiliin kautta. Nesteen ja kaasun seos palaa takaisin höyrystimelle.

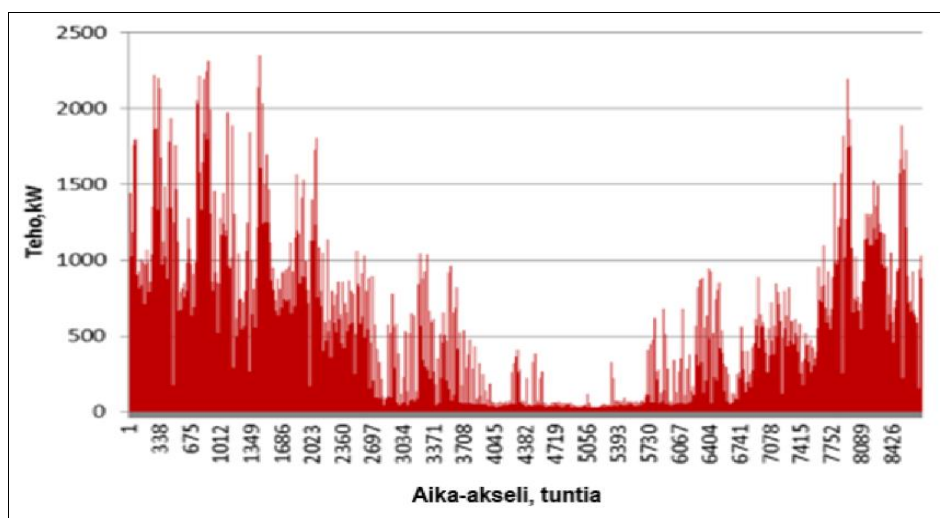


Kuva 7. Lämpöpumpun toimintaperiaate [8, s. 20].

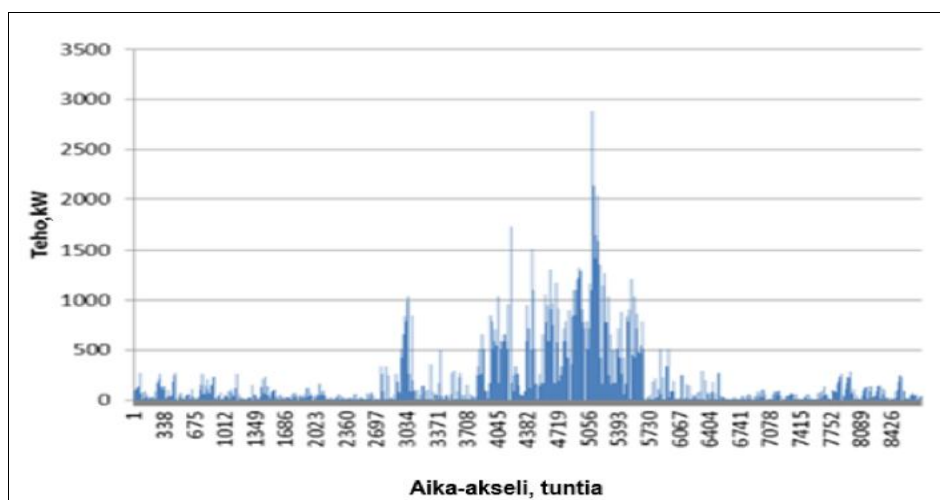
## 2.4 Lämpöpumpun mitoitus

Lämpöpumpujärjestelmän suunnittelun ja mitoittamisen tärkeimmät lähtötiedot ovat rakennuksen lämmitys- ja jäähdytystarve sekä niiden jakautuminen.

Kuvien 8 ja 9 kuvioiden pinta-alat kuvaavat lämmitys- ja jäähdytysenergian kokonais- tarvetta. Viivojen korkeudet kuvaavat energiatarpeen suuruuden vaihtelua. Pystyakse- lilla on tehontarve ja vaaka-akselilla on aika. Jäähdytyksen käyttöajan pituus ratkaisee, mihin järjestelmään maalämpöpumpun tuottamaa jäähdytystä kannattaa käyttää. Uu- diskohteissa on kiinnitettävä huomiota energiasimuloinnin luotettavuuteen.

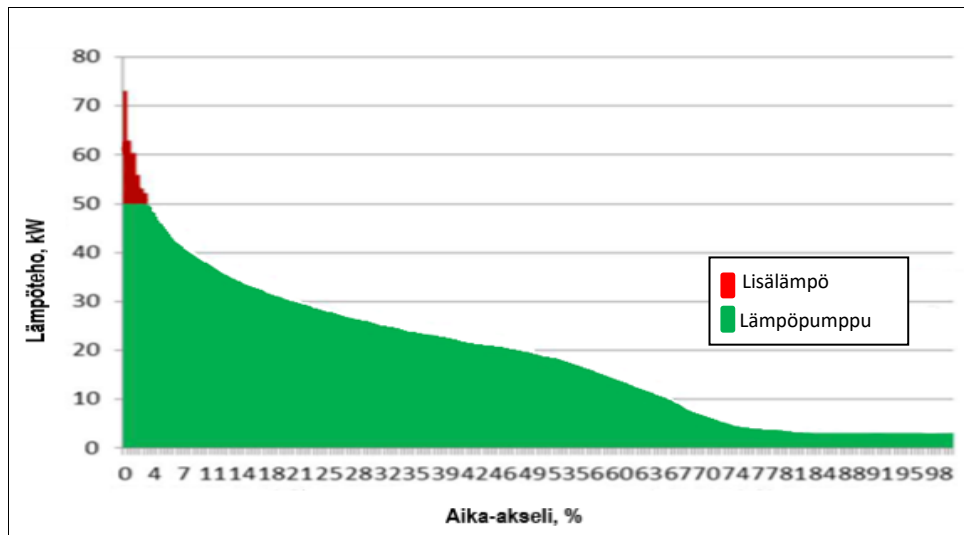


Kuva 8. Esimerkki lämpökuorman vaihtelusta [9].



Kuva 9. Esimerkki jäähdytyskuorman vaihtelusta [9].

Tuntitason lämmönmittauksen perusteella voidaan muodostaa vuorokausijakaumia. Tuntikuormat järjestetään suuruusjärjestykseen suuremmasta pienempään. Näin saadaan lämpöpumppujärjestelmän mitoitus varten pysyvyyskäyrä. Lisälämmön tarvetta kuvaa kuvassa punainen väri (kuva 10).

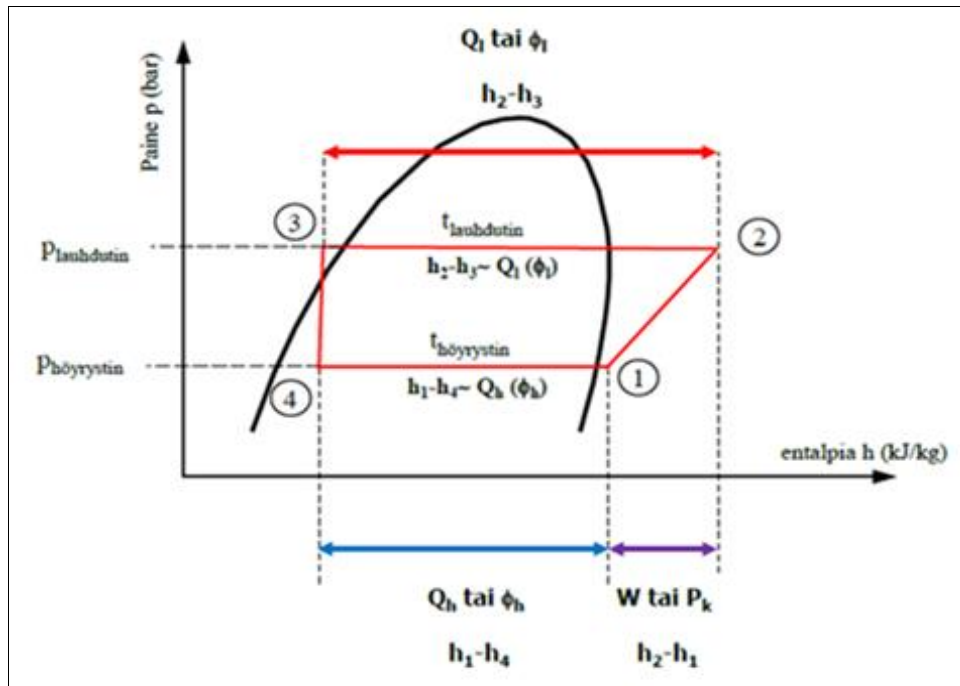


Kuva 10. Esimerkki lämmityskuorman pysyvyyskäyrästä [10, s. 4].

Esimerkiksi kuvan 10 lämpöpumpputeholla 50 kW saadaan tuotettua yli 95 % lämpöenergian tarpeesta, loppulämmön tarpeesta 5 % tuotetaan esim. sähköllä. Lämmöntuotanto toteutetaan siten, että haetaan optimipiste pääoma- ja käyttökustannusten välillä. Mitoituksen optimipiste riippuu lisäenergian hinnasta. Koko tehon kattamiseen tarvittavan lämpöpumppujärjestelmän investoinnin takaisinmaksuaika on pitkä. Lämpöpumppujärjestelmä ja tarvittava lisälämpö on suunniteltava aina kokonaisuutena, sillä lämpöpumppuinvestoinnista saatava taloudellinen hyöty voi huveta kalliiseen lisälämpöön.

## 2.5 Lämpöpumppuprosessi ja kylmäaineen tilapiirros

Lämpöpumppujen ja kylmäkoneiden kylmäprosessia kuvataan log p,h -piirroksella. Siitä nähdään lämpömäärät,  $Q_l$  ja  $Q_h$  sekä puristustyö  $P_k$  janoina massayksikköä kohden (kJ/kg) (kuva 11).



Kuva 11. Kylmäaine ja prosessin merkinnät log p,h -piirroksessa [11, s. 60].

Lämpöpumpun COP tarkoittaa lauhtuttimen tehon ja kompressorin ottotehon suhdetta eli entalpiaerojen suhdetta. Kaava 1 esittää lämpöpumpun hyötysuhdetta.

$$(h_2 - h_3) / (h_2 - h_1) = COP_{Hp}. \quad (1)$$

Vastaavasti jäädytyskoneen COP on höyrystimen tehon ja kompressorin ottotehon suhdetta. Kaava 2 esittää jäädytyskoneen hyötysuhdetta.

$$(h_1 - h_4) / (h_2 - h_1) = COP_{Ref}. \quad (2)$$

$$\text{Tästä voidaan osoittaa, että } COP_{Hp} = COP_{Ref} + 1. \quad (3)$$

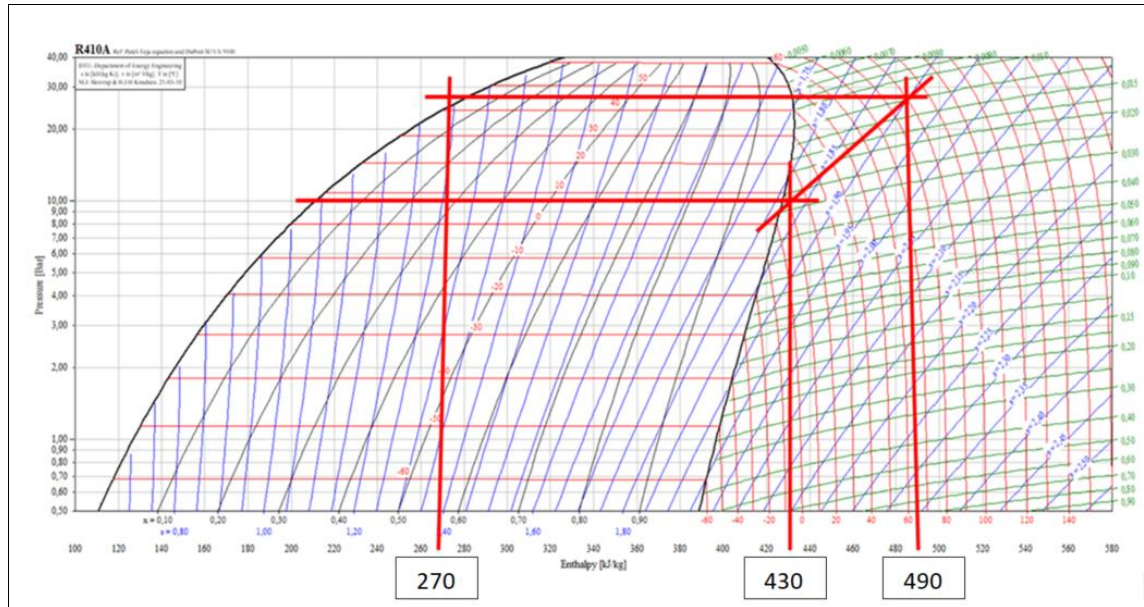
Mitä pienempi on lauhtumis- ja höyrystymislämpötilojen erotus, sitä suurempi on lämpöpumpun COP [12, s. 165].

Laskuesimerkki, kun maalämpöpumpun käyntiolosuhteet ovat seuraavat [10]:

Kylmäaine on R410A	
Höyrystymislämpötila	-3 °C
Lauhtumislämpötila	45 °C

Lämpöpumpun antoteho = lauhduttimen teho	9 kW
Kompressorille virtaavan kylmäaineen lämpötila	1 °C
Puristuksen jälkeen kylmäaineen lämpötila	+90 °C
Paisuntaventtiilille virtaavan kylmäaineen lämpötila	+39 °C

Käyntiolosuhteiden arvojen perusteella perusteellaa piirretään log p,h -piirros (kuva 12.).



Kuva 12. Laskuesimerkin log p,h -piirros

Laskentakaavoja:

Höyrystimen teho

$$\phi_h = q_m * (h_1 - h_4) \quad (4)$$

Lauhduttimen teho

$$\phi_l = q_m * (h_2 - h_3) \quad (5)$$

Kompressorin ottoteho

$$P_k = q_m * (h_2 - h_1) \quad (6)$$



## Lämmitys- ja jäähdytysteho

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta t}{t} = q_m \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (7)$$

Q	on lämpöenergia, kJ
m	on massa, kg
c <sub>p</sub>	on ominaislämpö, vesi 4,2 kJ/kg°C
Δt	on lämpötilan muutos, °C
q <sub>m</sub>	on massavirta kg/s

## Kylmäaineen massavirta

$$q_m = \frac{\dot{Q}_1}{h_1 - h_3} = \frac{9 \text{ kW}}{490 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 270 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,0409 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 147 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (8)$$

## Hyörytimen ottoteho

$$\dot{Q}_h = q_m \cdot (h_1 - h_4) = 0,0409 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left( 430 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 270 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 6,5 \text{ kW} \quad (9)$$

## Kompressorin ottoteho, sähköteho

$$P_k = q_m \cdot (h_2 - h_1) = 0,0409 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left( 490 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 430 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 2,5 \text{ kW} \quad (10)$$

Tarkastus  $\dot{Q}_l = \dot{Q}_h + P_k = 6,5 \text{ kW} + 2,5 \text{ kW} = 9 \text{ kW} \quad (11)$

## Lämpöpumpun lämpökerroin

$$\varphi = \frac{\dot{Q}_l}{P_k} = \frac{9 \text{ kW}}{2,5 \text{ kW}} = 3,6 \quad (12)$$

### 3 Lämpöpumppujen energialähteet

Monen lämmönlähteen järjestelmät ovat yleistyneet. Suuressa maalämpöjärjestelmässä voidaan käyttää jopa neljästä viiteen eri lämmönlähdettä. Yleisimmät lämmönlähteet ovat kallioperän energiakaivot sekä jäähdytyksestä, poistoilmasta ja jätevedestä saatava hukkalämpö. Muita lämmönlähteitä ovat vesistöistä ja maaperästä vaakaputkilla saatava lämpö, ulkoilmasta ja auringosta saatava lämpö, jäähdytyskoneiden lauhde-lämpö, prosessilämpö ja savukaasuista saatava hukkalämpö.

#### 3.1 Lämpöä vesistöistä

Hyvissä olosuhteissa vesistö on ehtymätön lämmönlähde ja energiakaivoja edullisempi rakentaa. Rakennusluvan saanti edellyttää vesialueen omistajan luvan. Lämpöä vesistöistä otettaessa putkistot upotetaan ja ankkuroidaan pohjaan pohjapainojen avulla. Vaakaputkistosta saatava lämpö riippuu veden lämpötilasta. Luonnonvesistöt ovat hyviä lämmönlähteitä, mutta ne eivät aina sovellu lämmönlähteeksi. Rakentamisessa on haasteita, mikäli lämpötila-, virtaus- ja pohjaolosuhteet vaihtelevat paljon. Vesistöön rakentaessa tulee ottaa huomioon mm.

- putkistot eivät sovellu virtapaikkaan tai laivareitille
- keruuputkiston kiinnitys on oltava luotettava
- veden syvyyden pitää olla sopiva, ei liian matala tai syvä
- veden lämpötilan on oltava riittävän korkea ja lämminvesikerroksen on oltava riittävän paksu
- vesistön pohjanmuodon on oltava tasainen, ei isoja kiviä.

Vaakaputkistoissa lämpöolosuhteet palautuvat täysin ennalleen joka vuosi auringon lämmittäessä maata ja vesistöä.

### 3.2 Lämpöä poistoilmasta

Poistoilman käyttö lisälämmönlähteenä on yleistymässä. Poistoilmalämpöpumppu tuottaa lämpöä vuodenajasta ja ulkolämpötilasta riippumatta. Poistoilmalämpöpumppu siirtää lämmön tuloilmaan, lämpimään käyttöveteen tai vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään. [13].

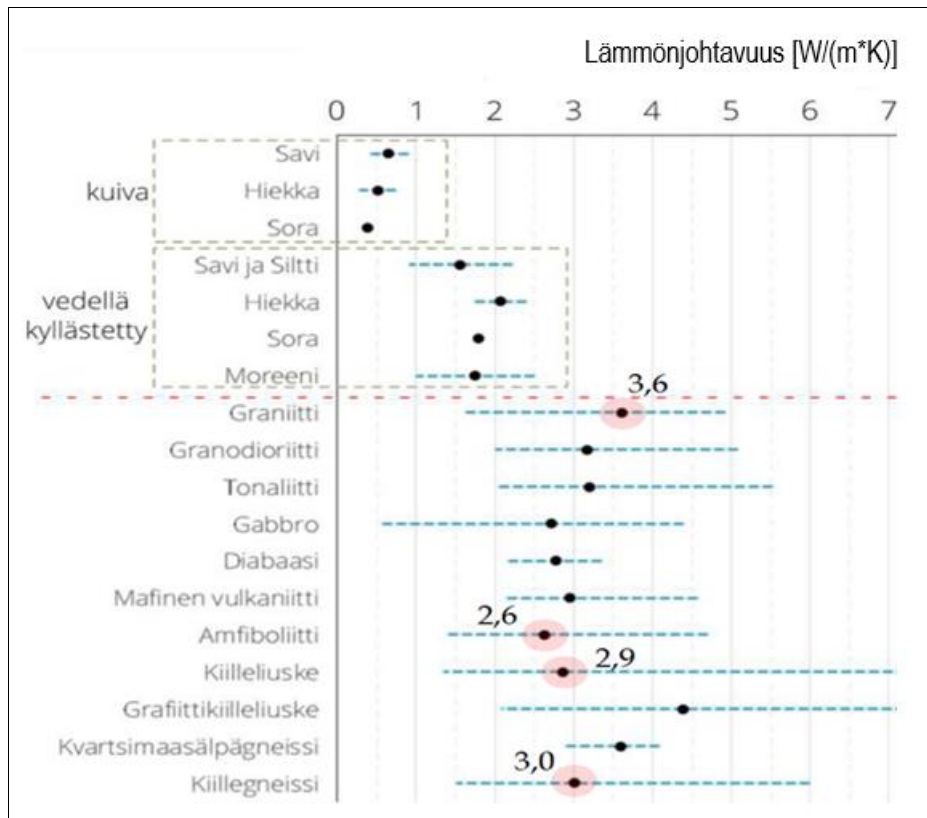
### 3.3 Lämpöä maankamarasta

Maankamaralla tarkoitetaan sekä maaperää että kallioperää. Maaperä käsittää kallioperän päällä olevan irtonaisen maa-aineksen. Alimpana kallioperän päällä on pohjamooreni, sora ja hiekka. Näiden päällä saattaa olla savea ja silttiä. [14.] Vaakaputket upotetaan maaperään routarajan alapuolelle. Vaakaputkipiirejä käytetään pienissä kohteissa lähinnä omakotitaloissa. Nykyisin yleisin tapa ottaa maankamarasta lämpöä on energiakaivo.

Eri kivilajien välillä on vaihtelua: mitä kovempi kiviaines on, sitä parempi on lämmönjohtavuus. Kuivat ja karkeat irtomaalajit ovat heikoimpia lämmönjohtavuudeltaan, kun taas kallio on paras. Kallioperän rikkonaisuudella on vaikutusta energiakaivosta saatavaan energiamäärään. Mikäli kallio on rikkonaista ja sen raoissa liikkuu paljon vettä, silloin saada enemmän energiaa kuin ehjästä kalliosta. Pohjaveden pinnan korkeudella on myös vaikutusta saatavan energian määrään. Maanpinnan tapahtumat eivät vaikuta energiakaivojen lämpötiloihin, mutta maaperään kohdistettu energian ottaminen aiheuttaa maaperän viilenemiseen. Maaperän ominaisuudet tulee aina selvittää ennen energiakaivon mitoitusta. Geologisista kartoista saadaan suuntaa-antavaa tietoa tontilla olevan kallion laadusta.

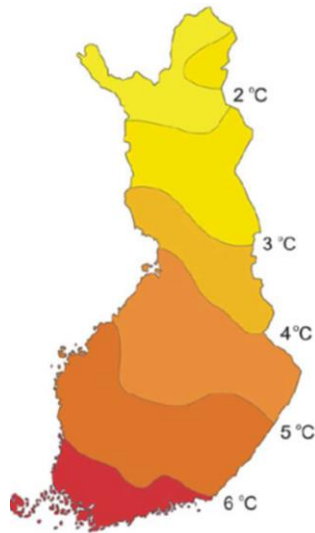
Energiakaivon tarkat ominaisuudet voidaan selvittää (Thermal Response Test) TRT-mittauksella. TRT-mittauksella selvitetään, kuinka paljon kallio pystyy vastaanottamaan lämpöä. Energiakaivon menevän ja tulevan nesteiden lämpötilaero mitataan, jolloin siitä saadaan energiakaivon lämmönjohtavuus ja lämpövastus. Jos energiakaivon lämpövastus on pieni, kalliosta lämpö siirtyy hyvin. Mitä korkeampi on lämmönjohtavuus, sitä enemmän kalliosta voidaan ottaa lämpöä. [15, s. 89.]

Suomen kallioperän kivilajien lämmönjohtavuuksissa on isoja eroja, esimerkiksi vuolu-  
kiven keskimääräinen lämmönjohtavuus on 6,4 W/(m<sup>2</sup>K), graniitin 3,6 W/(m<sup>2</sup>K), ja kiille-  
liuskeen 2,9 W/(m<sup>2</sup>K) (kuva 13). Kallioperän lämmönjohtavuus vaikuttaa tarvittavien  
energiakaivojen määrään ja syvyyteen.



Kuva 13. Kivilajien lämmönjohtavuus [16, s. 29].

Suomi on pitkä maa, jolloin maaperän lämpötilaerot Etelä- ja Pohjois-Suomen välillä ovat suuret (kuva 14).



Kuva 14. Suomen maaperän lämpötilat [17, s. 79].

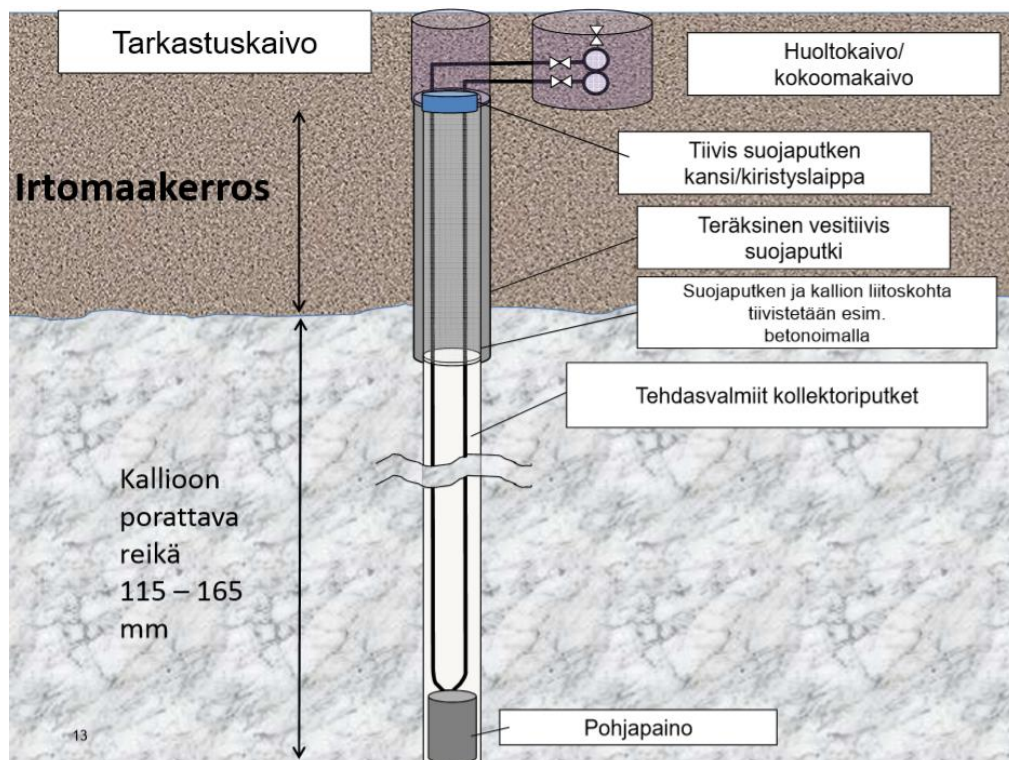
Maaperän ja paikkakunnan maan lämpötila vaikuttaa lämmönsaantiin. Esimerkiksi maan lämpötila 300 metrin syvyydessä Etelä-Suomessa on noin 10 °C, kun taas Pohjois-Suomessa se on noin 4 °C. Rakennetuilla alueilla maan pintakerroksen lämpötila on korkeampi. Rakennetun ympäristön vaikutus voi ylittää noin 50 metrin syvyyteen saakka.

### 3.3.1 Energiakaivot

Energiakaivot ovat nykyisin yleisin maalämpöpumpun lämmönlähde. Suomessa normaali energiakaivon syvyys on 200–400 metriä. Usean energiakaivon ryhmää kutsutaan energiakentäksi. Hyvin harvoin kallio on pinnasta lähtien ehjää ja tiivistä. Kallion rikkonaisuus vähenee syvemmälle mentäessä. [3, s. 304.] Energiakaivot voidaan porata, kun kiintokallion pinta on riittävän lähellä maan pintaa ja kallion päällä oleva irtomaakerros on riittävän ohut. Irtomaakerroksen kohdalla käytetään suoja-putkea. Suoja-putken upotussyvyys vaihtelee kalliopinnan kiinteyden mukaan. Suoja-putki ja energiakaivo vesieristetään vähintään 6 metrin syvyyteen maanpinnasta. Eristäminen tehdään muovisella eristysputkella tai betonoimalla. Tällä estetään hulevesien pääsy pora-

reikään. Energiakaivo suojataan suojahatulla. Tiivis suojaputkenliitos estää pinta- ja pohjavesien sekoittumisen. [18, s. 33.] Energiakaivo täyttyy normaalisti pohjavedellä. Jos energiakaivo ei itsekseen täyty pohjavedellä, se täytetään, koska maan lämpö siirtyy vedestä putkiin. [19, s. 23.]

Energiakaivot ovat tyypillisesti 4,5 tuumaa eli 114,3 mm halkaisijaltaan. Porausreikään laitettava kollektori on ns. U-putki (kuva 15). Reikään upotetaan rinnakkain kaksi muoviputkea, jotka on liitetty alapäästä yhteen U-kirjaimen muotoiseksi. Kollektorien yleisimmät koot ovat 40 mm ja 45 mm. Yli 300 metriä syvissä energiakaivoissa suositellaan käytettäväksi 45 mm kollektoreita pienemmän painehäviön takia. Putkipinta-alan kasvattaminen ja putkien pitäminen erillään toisistaan parantavat toimintaa. Kollektori lasketaan energiakaivon pohjalle pohjapainon avulla. Muoviputki ja lämmönkeruuneste ovat vettä kevyempiä eivätkä pysy alhaalla ilman pohjapainoa. [8, s. 13.] Maalämpöpumppujen lämmönkeruunesteena käytetään maaliuosta, joka sisältää vettä, denaturointiainetta ja 28 % etanolia. Liuos on ympäristölle vaaratonta ja nopeasti hajoavaa. Liuoksen jäätympiste on  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Kuva 15. Energiakaivon periaaterakenne [8].

### 3.3.2 Vinot energiakaivot

Vinot energiakaivot ovat yleisiä, koska tontit ovat usein pieniä ja energiakaivoille on tilaa niukasti. Energiakaivoja ei saa tehdä naapurin puolelle, ei edes syvällä maan alla. Käytännössä energiakaivoa porattaessa maaperäominaisuudet aiheuttavat porareikään vinoutta. Vinoon mennyt poraus voi aiheuttaa haittaa viereiselle tontille porattiin reikiin. Vinoon poraus voi estää myös toisen kiinteistön maanalaisen tilojen rakentamisen. Ellei naapurikiinteistö pysty rakentamaan omia maanalaisia tiloja, voidaan porareikä joutua poistamaan käytöstä esimerkiksi betonoimalla se. [18, s. 43.] Energiakaivo voidaan naapurin suostumuksella porata naapurin kiinteistön puolelle ulottuvana vinoreikä. Näissä tapauksissa on syytä perustaa rasite. Rasite turvaa energiakaivon pysyvyyden, vaikka naapurikiinteistössä omistaja vaihtuisi. [20, s. 85.]

### 3.3.3 Geolämpökaivot

Geoterminen energia on maan sisuksesta johtuva lämpö. Geolämpökaivoista on tarkoitus saada lämpöä sadan tai jopa tuhannen kerrostalon tarpeisiin eli tuottaa kokonaisen kaupunginosan lämmöntarve. Geolämmön käytön yleistymiseen on useita haasteita. Syvien reikien poraaminen on hidasta ja kallista. Lisäksi kulutuksen vaihtelevuus vuoden- ja vuorokaudenaikojen mukaan on haaste maalämpöjärjestelmille ja aiheuttaa lisälämmityksen tarvetta.

Espoon Koskelossa on otettu käyttöön Suomen ensimmäinen geolämpölaitos. Siinä on yksi reikä, joka ylittää 1,3 kilometrin syvyyteen (taulukko 1). Espoon Koskelon geolämpökaivo voi yksinään lämmittää neljä kerrostaloa. Geolämpökaivoon pumpataan kylmää vettä. Pohjalla lämmennyt vesi pumpataan ylös putkella, jonka sisähalkaisija on noin 8 senttiä. Putken reunoilla on eriste, jotta lämmin vesi ei jäähtyisi. Putken rakenne muistuttaa termospulloa. Koskelon geolämpökaivo on ensimmäinen tyyppiään Pohjoismaissa. [21.]

Espoon Otaniemessä on St1:n geolämpökaivot. Ne ulottuvat 6,4 kilometriin asti (taulukko 1). Se perustuu kahteen 6,4 kilometrin syvään reikään ja kallioperän halkeamiin. Suomessa ei ole kilometrien syvyyksissä olevia maanalaisia vesiesiintymiä, siksi vettä joudutaan pumppaamaan maan alla sijaitseviin heikkous- eli rakovyöhykkeisiin. Teknologia kulkee nimellä EGS eli Enhanced Geothermal System. St1:n geolämpövoimala

tulee olemaan valmistuessaan maailman syvin geotermisen energian lämmöntuotantolaitos. [22.]

Taulukko 1. Esimerkkejä geolämpökaivoista [21].

	Syvyys	Neste	Hyötysuhde	Hetkellinen teho	Jatkuva teho (kk)	Vuosituotanto
<b>Perinteinen maalämpö</b>	300 m	28 % etanoli	3 – 4	8 – 25 kW	5 – 7 kW	24 – 30 MWh
<b>Espoo Koskelo</b>	1,3 km	vesi	3,5 – 4,5	500 kW	250 – 300 kW	yli 1 000 MWh
<b>Mänttä–Vilppula Kolho</b>	1,5 km	vesi	3,3 – 4,5	480 kW	(selviää käytön myötä)	1 500 MWh
<b>Espoo Otaniemi</b>	6,4 km (x2)	vesi	9	10 000 – 30 000 kW	10 000 – 30 000 kW	80 000 – 240 000 MWh
<b>Tampere Nekala</b>	6 – 7 km	vesi	9	6 000 kW	3 000 kW	18 000 MWh

### 3.4 Yhden tavanomaisen energiakaivon mitoitusesimerkki

Energiakaivoista saatava vuotuinen lämpöenergia voidaan laskea lämpökertoimen avulla (kaava 13). Lämpöpumpun vuotuinen lämpökerroin on 4,48. Energiantarve, joka halutaan tuottaa lämpöpumpulla, on 24 200 kWh.

$$\phi_{kaivo} = \left(1 - \frac{1}{\phi}\right) * Q_{lämpö} \quad (13)$$

$$\phi_{kaivo} = \left(1 - \frac{1}{4,48}\right) * 24\,200 \text{ kWh} = 18\,798 \text{ kWh.}$$

Energiakaivosta saatava vuotuinen lämpöenergia on noin 18 800 kWh.

#### Yhden energiakaivon suuruusluokan arviointi

Koko energiakaivon syvyys	250 m
• savikerros	15 m
• hiekkaa	10 m
• graniittia	225 m
Saven lämmönjohtavuus	1,6 W/(m*K)
Märän hiekan lämmönjohtavuus	2,4 W/(m*K)
Graniitin lämmönjohtavuus	3,4 W/(m*K)



15 m/ 250 m x 1,6 W/(m*K) = 0,096 W/(m*K)	0,1 W/(m*K)
10 m/ 250m x 2,4 W/(m*K) = 0,096 W/(m*K)	0,1 W/(m*K)
225 m/250 m x 3,4 W/(m*K) = 3,06 W/(m*K)	3,1 W/(m*K)
Koko energiakaivon lämmönjohtavuus, $\lambda$	3,3 W/(m*K)

Teoriassa yhdestä energiakaivosta voitaisiin saada jatkuvaa lämpötehoa (kaava 14):

$$Q = \frac{2\pi\lambda H(T_0 - T_1)}{\ln\left(\frac{H}{d}\right)} \quad (14) [16]$$

$$= \frac{2\pi \cdot 3,3 \frac{W}{mK} \cdot 250m \cdot (8^\circ C - 1^\circ C)}{\ln\left(\frac{250m}{0,12m}\right)} = 4\,748\,W$$

$T_0$  on maanpinnan keskimääräinen lämpötila

$T_1$  on keruunesteen keskimääräinen lämpötila

$H$  on kaivonsyvyys

$d$  on kaivon halkaisija

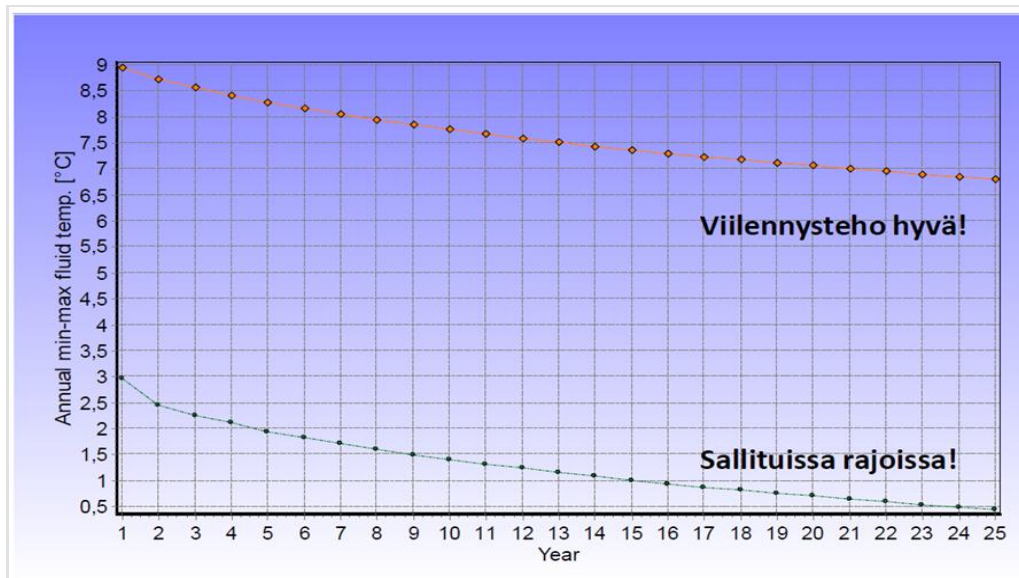
Teoriassa vuodessa yhdestä 250 metriä syvästä energiakaivosta voitaisiin ottaa lämpöenergiaa ( $8760\,h \cdot 4,748\,kW =$ ) n. 41 500 kWh.

### 3.5 Energiakaivokentän mitoitus

Energiakaivokentän mitoitus ei onnistu ”peukalosäännöillä”. Energiakaivokentän mitoitus vaatii erityisosaamista ja tietokoneohjelmien käyttöä. Tietokoneohjelmien avulla selvitetään mm. energiakaivojen lukumäärä ja sijoittelun vaikutukset maaperän pitkäaikaiskuormitettavuuteen. Hetkellinen tuntitason kuormitus saadaan simuloitua esim. IDA ICE -ohjelmalla ja energiakaivojen pitkäaikaiskuormitus EED (Earth Energy Designer) -ohjelmalla. Energiakaivokentän mitoitukseen vaikuttavat monet eri tekijät, joten suunnittelu ja mitoitus kannattaa teettää asiantuntijoilla.

Lämmönsiirtoon vaikuttavat monet tekijät kuten kivilajin lämmönjohtavuus ja kallion lämpötila. Lisäksi on huomioitava myös vierekkäisten energiakaivojen etäisyys toisiinsa nähden. Energiakaivojen oikea mitoitus on olennaista energian riittävyyden ja vuosisäästöjen kannalta. Pahimmat virheet mitoituksessa johtavat energiakaivojen jäätymiseen. Jos energiakaivoa kuormitetaan 30 W/m, lämmönsiirtoliuoksen keskilämpötila

saisi olla alimmillaan  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , eli esimerkiksi lähtevä liuos on  $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja palaava liuos on  $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (kuva 16).



Kuva 16. Mitoitus esimerkki keruunesteen keskimääräisestä lämpötilasta, kun kaivoväli on 20 m [16, s. 61].

Energiakaivojen ryhmittelyllä ja etäisyydellä toisiinsa nähden on vaikutusta pitkäaikaisaantoon. Sopivat etäisyydet voivat vaihdella porareiän kaltevuuskulmasta, pohjaveden virtausolosuhteista ja maaperästä riippuen, sekä etäisyydestä muihin kohteisiin (taulukko 2).

Taulukko 2. Suositeltavia minimietäisyyksiä energiakaivon ja muiden kohteiden välillä [18, s. 25].

Kohde	Suosittelu 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 [4]
Viemärit ja vesijohdot	3 m (omat putket)-5 m (muiden putket)**
Tunnelit ja luolat	25 m, etäisyys selvitetään tapauskohtaisesti

\* porareiän ollessa pystysuora  
\*\* etäisyys riippuu maaperän laadusta, kaivusyvydestä ja kaivantoon sijoitettavista putkista

## 4 Lisälämpö

Lisälämmöllä on pystyttävä nostamaan maalämpöpumpun tuottamaa matalaa lämpötilaa korkeampaan lämpötilaan. Lämpöpumppujärjestelmä on tarkasteltava ja suunniteltava aina kokonaisuutena. Lisälämmön kustannusosuus on ratkaiseva tekijä. Lisälämmön säädön on oltava myös helppoa ja nopeaa. Mahdollisia lisä- ja varalämmön tuotantotapoja ovat sähkölämmitys ja varaajaratkaisu, öljykattila, kaasukattila ja erilaiset lämpövarastot.

### 4.1 Sähkö lisälämmönlähteenä

Sähkö on yleisin lisälämmönlähde pienissä kohteissa, koska laitteet ovat edullisia ja helposäätöisiä. Pienissä kohteissa vastukset ovat varaajissa. Suuremmissa kohteissa käytetään sähkökattiloita. Sähkökattilan kannattavuus kaukolämpöön verrattuna tulee pienestä perusmaksusta. Sähkökattila voidaan kytkeä suoraan lämmitysverkoston menoputkeen. Sähkökattilan valinta lisälämmöksi voi aiheuttaa tarpeen sähköliittymän suurentamisen tai pienjänniteliittymän vaihtamiseen keskijänniteliittymään. Keskijänniteliittymä tarjoaa edullisemman sähkön siirtohinnan, mutta tontille tarvitaan tällöin sähkömuuntamo, joka aiheuttaa huomattavia lisäkustannuksia.

### 4.2 Kaukolämpö lisälämmönlähteenä

Kaukolämpö on suositeltava vaihtoehto lisälämmönlähteeksi lämpöpumppujärjestelmän rinnalle suurissa kiinteistöissä, joissa on vähän hukkaenergiaa sisäiseen kierrätykseen tai pieni tontti, joka rajoittaa energiakaivokentän kokoa. Kaukolämpösiirtimet tulee kytkeä rinnan maalämpöpumppujen kanssa. Silloin maalämpölaitteita ei tarvitse mitoittaa koko maksimiteholle. Kaukolämmön kannalta haaste on ensiöpuolen paluuveden vähäinen jäähtyminen. Kaukolämmössä pyritään mahdollisimman suureen paluuveden jäähtymiseen. Kaukolämpö toimii varajärjestelmänä maalämpöjärjestelmän huollon aikana.

Kaukolämpö kehittyy koko ajan ympäristöystävällisempään suuntaan. Suurin osa kaukolämmöntoimittajista on jo luopunut tai on luopumassa kivihielestä. Esimerkiksi Vantaan Energialla kolme neljäsosaa kaukolämmöstä tuotetaan jätevoimalassa jätteistä.

Helenillä on suuria maanalaisia lämpöpumppuja, joilla tuotetaan noin kymmenen prosenttia Helsingin kaukolämmöstä. [23, s. 46.]

## 5 Jäähdytys

Jäähdytyksen tarve kasvaa ilmaston lämpenemisen ja rakennusten eristystason parantamisen myötä. Jäähdytystarvetta aiheuttavat mm.

- rakennuksen tavanomaiset sisäiset kuormat, valaistus, laitteet, ja ihmiset
- auringon säteily suurten lasipintojen läpi
- uusien toimisto-, ja liikerakennusten tiukentuneet sisäilmavaatimukset
- uusissa asuintaloissa on yllämpöongelmia uusien energiavaatimusten vuoksi.

Käytännössä lähes kaikki uudet rakennukset vaatisivat jonkinlaisen jäähdytysjärjestelmän.

### 5.1 Kaukojäähdytys

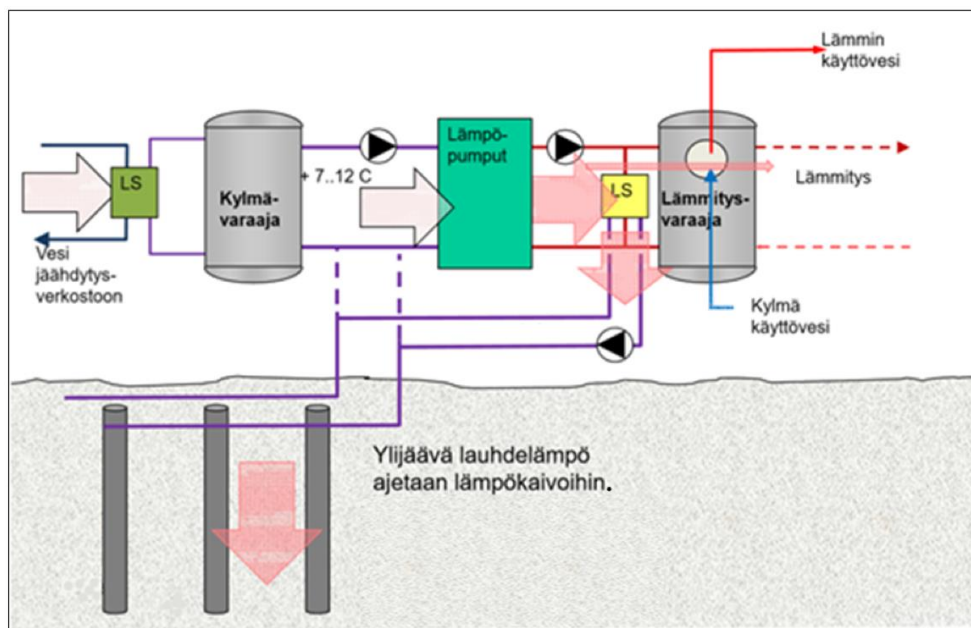
Jäähdytysenergiaa siirretään kuluttajalle kaukojäähdytysverkon avulla. Kaukojäähdytys on ympäristöystävällinen, taloudellinen ja vaivattomin tapa hoitaa jäähdytys. Esimerkiksi Helsingin Energian asiakkaalle toimittaman jäähdytysveden lämpötila on 8 °C ja paluueden lämpötila on 16 °C. Lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuus paranee huomattavasti, kun kaukolämmitys ja kaukojäähdytys ovat samassa prosessissa. [24, s. 565.]

Helsingin Energia tuottaa jäähdytysenergiaa vapaajäähdytyksenä merivedestä. Kesällä, meren lämmitessä, jäähdytysenergiaa tuotetaan jäähdytyskoneilla. Talvisin sähkön tuotannosta saatava lämpö menee kaukolämmöksi. Helsingin Energialla on maailman suurin yhdistetty kaukolämmön ja -jäähdytyksen lämpöpumppulaitos, jossa lämmön lähteenä toimii puhdistettu jätevesi. Prosessissa jätevesi puhdistetaan ja samalla jäteveden lämpö otetaan talteen. Laitoksen kaukojäähdytysteho on 60 MW ja kaukolämmitysteho 90 MW. [25, s. 112–114.]

## 5.2 Maalämpöpumpulla jäähdyttäminen

Maalämpöpumpua voidaan käyttää jäähdytykseen. Lämpöpumppu vastaa toimintaperiaatteeltaan täysin jäähdytyskonetta. Jäähdytyskäytöllä saadaan energiakentästä tehokas ja taloudellinen. Energiatehokkuus on huipussaan, kun sekä lämpöä että jäähdytystä hyödynnetään. Jäähdytyskäyttö parantaa lämmityskäyttöä, koska kaivokentän lämpötila pysyy korkeana koko vuoden. Prosesissa jäähdytyksestä syntynyt lämpö johdetaan takaisin energiakaivoihin. Maaperä toimii tasapainottavana lämpövarastona.

Maaperää voidaan hyödyntää ympärivuotisena jäähdytyslähteenä. Maalämpöjärjestelmällä jäähdytys on edullista, koska vapaajäähdytystä saadaan keväällä ja alkukesällä energiakaivosta. Kesällä lämmönkeräyspiiriä voidaan käyttää jäähdytyskoneena toimivan lämpöpumpun lämpövarastona. Kuvassa 17 on esitetty yhdistetyn lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän toimintaperiaate. Punaiset nuolet kuvaavat lämmön suuntaa. LS on lämmönsiirrin.



Kuva 17. Yhdistetyn lämmitys- ja jäähdytyslaitoksen toimintaperiaate [10, s. 7].

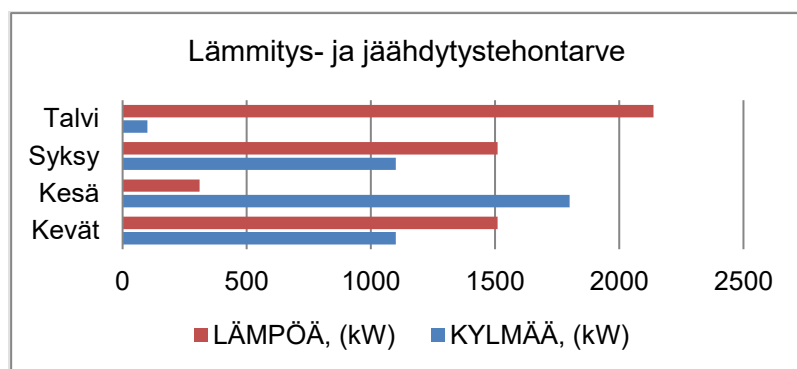
Maalämpöjärjestelmällä voidaan tuottaa jäähdytystä kolmella eri tavalla. Lämmön tuotannon sivutuotteena syntyy jäähdytystä, vapaajäähdytystä otetaan maaperästä (kuvassa 17 katkoviiva) tai koneellinen jäähdytys lämpöpumpuilla, jolloin ylijäävä lauhdelämpöä pumpataan maahan. Maahan pumpattu lämpöä käytetään lämmityskautena.

## 6 Käytännön esimerkki

Tutkimuskohteena on sairaala, joka on uudiskohde. Kohteeseen tulee maalämpöverkoston lisäksi kaukolämpö- ja kaukokylmäverkosto. Lisäksi kohteessa otetaan ulospuhallettavasta poistoilmasta lämpöä talteen lämpöpumpun avulla. Tontti on suhteellisen pieni, mikä rajoittaa energiakaivojen lukumäärää. Rakennuksen alimmassa kerroksessa on parkkihalli, josta päästään tarkastamaan rakennuksen alla sijaitsevia energiakaivoja.

### 6.1 Lämmityksen ja jäähdytyksen tehontarpeet

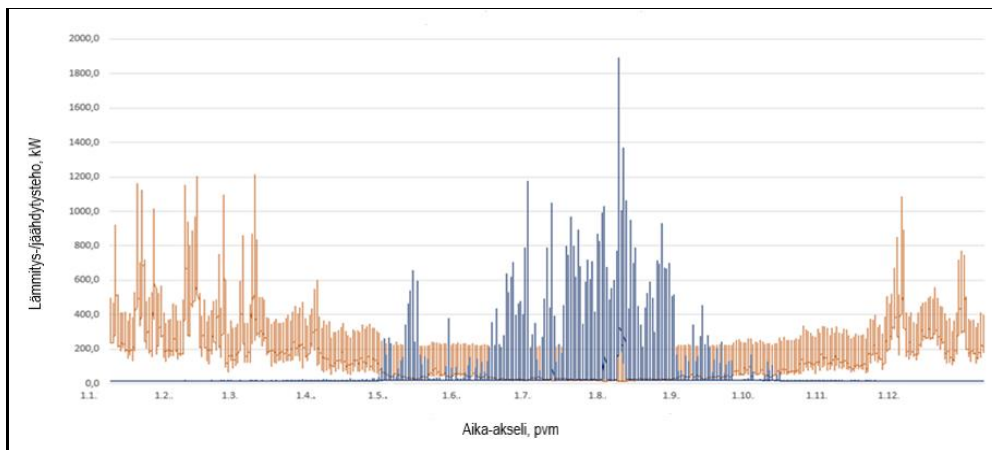
Lämpöpumppujärjestelmän valinnassa ja mitoituksessa tulee ottaa huomioon kaikki kiinteistön lämmitys- ja jäähdytysenergiavirrat. Suurissa kiinteistöissä, joissa lämpöpumput eivät kykene tuottamaan riittävää jäähdytystä, täytyy jäähdytys tuottaa esimerkiksi kaukokylmällä. Yleensä lämpöpumppujen on kannattavinta hyödyntää ensin kiinteistön sisäiset hukkalämpövirrat, kuten poistoilman lämpö ja jäähdytyksen lauhde. Ulos johdettavaa lämmitysenergiaa voi monesti kierrättää takaisin kiinteistön lämmitysverkostoihin. Kohteessa lämmitys- ja jäähdytystehontarpeet vaihtelevat vuodenaikojen mukaan (kuva 18).



Kuva 18. Lämmitys- ja jäähdytystehontarve kW:ina

Lämpöpumppujärjestelmän mitoitus perustuu vuosittaisiin tuntikohtaisiin energiankulutusten tuntisarjoihin. Lämmitystarpeen tuntitasoisella kulutusprofiililla on vaikutusta kannattavan tehomitoituksen laatimisessa. Kun huomioidaan rakennuksesta saatavat hukkaenergiat, vältetään energiakentän ylimitoitus.

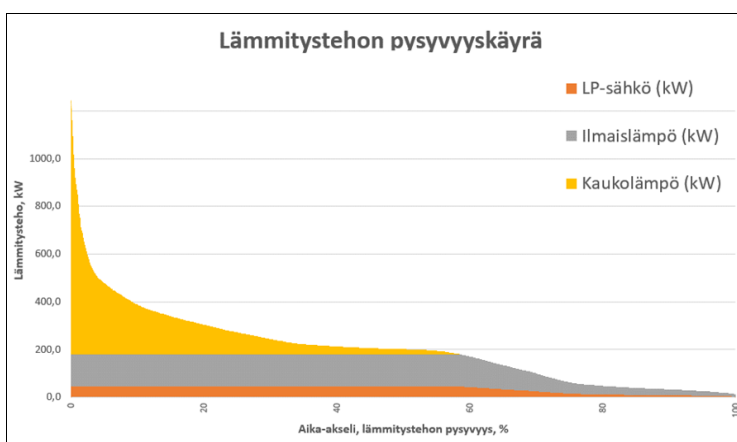
Kuvasta 19 näkyy miten lämmityksen ja jäähdytyksen tehon tarve jakautuu vuoden pituiselle ajanjaksolle. Sininen käyrä kuvaa jäähdytyksen tarvetta ja punainen lämmityksen tarvetta. Y-akselilla on lämmitys- ja jäähdytysteho, (kW) ja x-akselilla on aika (pvm).



Kuva 19. Kohteen lämmitys- ja jäähdytystehon tarve [9].

## 6.2 Lämmitystehon jakautuminen maalämmölle ja kaukolämmölle

Maalämpö (ilmaislämpö) ei yksin riitä kattamaan koko lämmöntarvetta. Lisälämpönä käytetään kaukolämpöä. Lämminkäyttövesi lämmitetään kaukolämmön avulla, samoin talvella sulanapitoalueet. Tässä sairaalakohteessa maalämpöpumpulla saadaan lämmitystehontarpeesta eli 180 kW eli noin 8 %, josta sähkön osuus on 50 kW, mutta maalämmön osuus rakennuksen energiatarpeesta on noin 75 % (kuva 20).

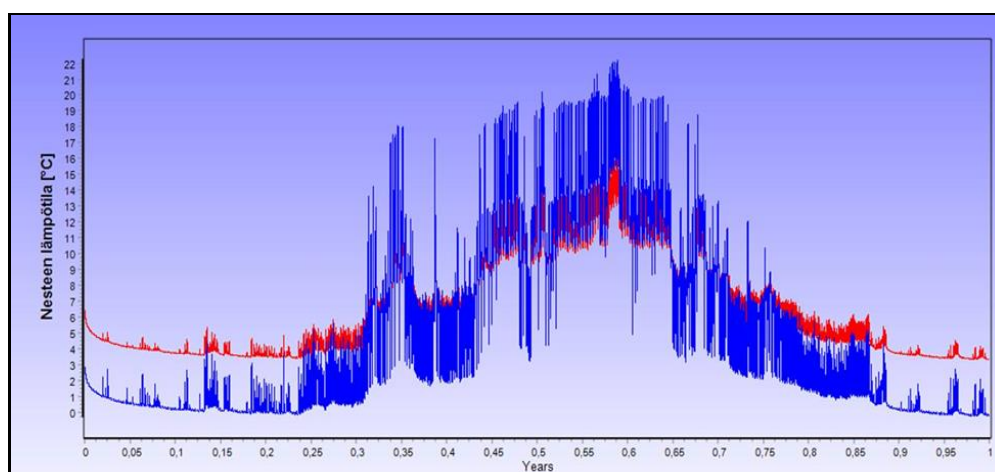


Kuva 20. Lämmitystehon pysyvyyskäyrä [9].

### 6.3 Jäähdytys ja lauhdelämpö

Jäähdytysverkostossa lämmennyt vesi voidaan jäähdyttää energiakaivoista saatavalla viileämmällä nesteellä. Tämä energiakaivoista saatava vapaajäähdytys on suositeltavaa, koska jäähdytysverkostosta saatava lämpö saadaan näin varastoitua maahan. Toimenpide parantaa seuraavan lämmityskauden aikana lämpöpumpun hyötysuhdetta. Maaperään kesäaikana ladattu lämpö vähentää tarvittavien energiakaivojen lukumäärää.

Kuvassa 21 oleva käyrä kuvaa maakenttään menevän nesteen lämpötiloja (sininen) ja kentästä palaavan nesteen lämpötiloja (punainen) ensimmäisen käyttövuoden aikana. Y-akselilla on lämpötila (°C) ja x-akselilla aika (vuosina). Kesällä lauhdelämpöä palautetaan maahan noin 150 kW:n verran. Kesällä menolämpötila on enimmillään noin 22 °C ja paluulämpötila noin 16 °C. Talvella kenttään menevän veden lämpötila vaihtelee 0–4 °C ja paluuvesi 4–6 °C.



Kuva 21. Maakenttään menevä ja sieltä palaavan nesteen lämpötila [9].

### 6.4 Hukkalämpö

Poistoilman lämmöntalteenoton lämpöpumppujärjestelmä (PILP) on taloudellisesti kannattava, erityisesti silloin kun rakennuksessa on paljon poistoilmaa. Esimerkiksi sairaaloissa on suuri kesäaikainen jäähdytystarve ja jäähdytyksestä seuraa ylimääräistä lämpöä. Poistoilman lämpö otetaan talteen poistoilmakanavaan sijoitettavalla nestekiertoisella lamellipatterilla. Poistoilman lämmöntalteenoton kannattavuus paranee ilmavirran



kasvaessa. Poistoilman hukkalämmön käyttäminen lämpöpumppujen keruuenergiana on kannattavaa, sillä keruunesteen lämpötila pysyy ympäri vuoden korkeana. Kiinteistöt, jotka tuottavat enemmän lämpökuormaa kuin ne itse kuluttavat, voivat myydä hukkalämpöä kaukolämpöyhtiölle tai viereisille kiinteistöille.

## 6.5 Energiankierrätys

Rakennuksessa on yhtäaikaista lämmitys- ja jäähdytystarvetta. Suuren jäähdytystarpeen rakennuksissa lämpöpumppujärjestelmä voidaan mitoittaa jäähdytystarpeen mukaan, jolloin voidaan luopua erillisistä vedenjäähdytyskoneikoista. Erillisen jäähdytysjärjestelmän karsiminen kiinteistön tekniikasta pienentää investointikustannuksia. Esimerkiksi ilmankuivatus vaatii yhtä aikaa jäähdytystä ja lämmitystä. Tällaisessa tapauksessa poistoilmalämpöpumpuilla otetaan jäähdytysverkostosta lämpöä. Saatu lämpö voidaan hyödyntää kaikissa lämmitysverkostoissa ja käyttöveden lämmityksessä.

## 6.6 Energiakaivokenttä

Maalämpöpumpun teho mitoitetaan saatavilla olevan maalämpöenergian mukaan. Tontin koko aiheuttaa rajoitteita kaivomäärälle. Energiakaivokentästä saatava energia voidaan simuloida esimerkiksi (Earth Energy Designer) EED -sovelluksella. Laskennasta saadun maalämpöenergian määrän perusteella voidaan valita suurin mahdollinen lämpöpumppu, jolla energiakaivokenttää voidaan kuormittaa. Energiakaivokenttä tulee aina mitoittaa maasta saatavan energian mukaan, ei lämpöpumpun tehon perusteella.

Energiakaivojen sijoittelulla on merkitystä. Liian tiiviisti sijoitetut energiakaivot varastavat toisiltaan maaperän energiaa. Heikoin kaivokentän muoto on ns. säännöllinen matriisimuoto. Kohteessa tontin pienuuden vuoksi 17 energiakaivoa on sijoitettu rakennuksen alle (kuva 22). Tarvittavan kaivomäärän poraaminen tontille ei ole aina mahdollista etäisyysvaatimusten tai muiden seikkojen takia. On otettava huomioon mm. rakennuksen perustukset, kantavat betonilaatat, muiden järjestelmien putkistot ja kanavat.

Kun energiakaivot sijoitetaan rakennuksen alle, tulee ottaa huomioon muutamia seikkoja. Energiakaivojen kokoomakaivolle on oltava huoltoreitti, koska kokoomakaivossa on jakotukki ja venttiilit, joita tulee tarvittaessa päästä huoltamaan. Yksittäiselle energia-

kaivolle tulee päästä, jotta voidaan huoltaa ja tarkistaa energiakaivon suojaputken kannen paikallaan pysyminen. Pohjaveden paine saattaa nostaa suojaputken kannen ja riskinä on tällöin veden nousu. Energiakaivojen keruuputket yhdistetään kokoomakäivossa. Rakennuksen sisään kokoomakäivosta jatketaan yhdellä putkiparilla. Putkimateriaalina kaivokentän vaakaputkistossa käytetään valmiiksi eristettyä PE-putkea. Sisätiloissa putkimateriaalina voidaan käyttää muoviputkea tai RFe-terasputkea.

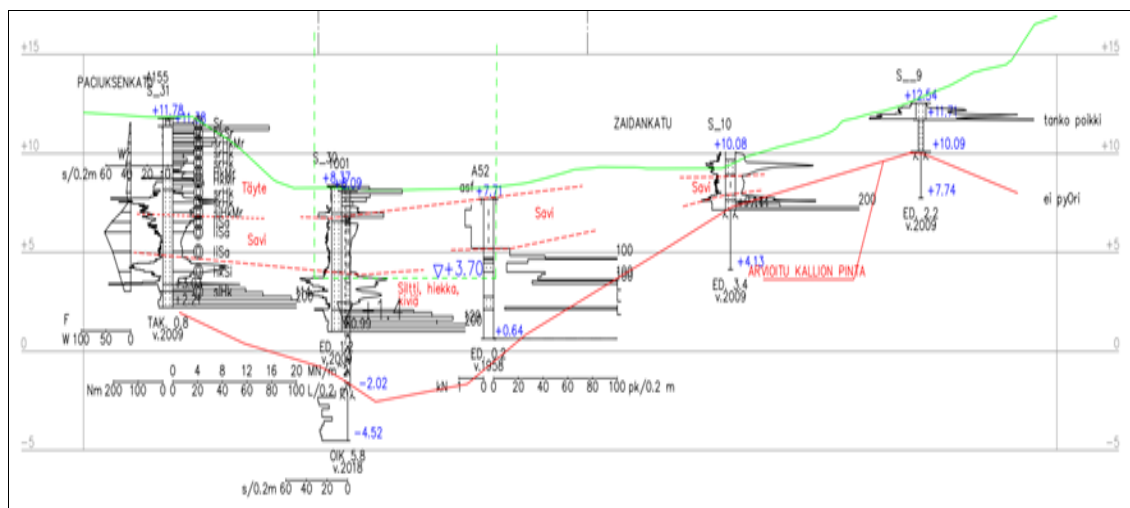
Kuvassa 22 siniset ympyrät kuvaavat energiakaivon vaikutusaluetta. Ympyrän halkaisija on välimatka seuraavaan energiakaivoon. Vihreät viivat kuvaavat maalämpöputkia. Maalämpöputkien risteyskohdassa on kokoamakaivo. Punaisella on merkitty laatta- ja anturaperustukset. Energiakaivoja ei tulisi suunnitella perustuksien tai kantavien rakenteiden kohdalle.



Kuva 22. Energiakaivojen sijainti ja vaikutusalue [26].

Energiakaivojen sijoitteluun vaikuttaa tontin koon lisäksi maaperä. Pohjatutkimuksen tavoite on selvittää rakennuspaikan maaperän olosuhteet (kuva 23) niin, että aiotun rakennuksen perustaminen ja tarvittavat rakennustyöt voidaan luotettavasti suunnitella ja turvallisesti toteuttaa. [3, s. 238.]

Kuvassa 23 on rakennusalueen maaperästä leikkauspiirustus. Siinä vihreä viiva kuvaa maan pintaa ja punainen viiva kallion pintaa. Kuvasta huomataan, ettei kallio mene suoraviivaisesti vaan siinä on monttu ja mäki. Lisäksi pehmeän maaperän kerrospaksuus vaihtelee. Pohjan tutkimusleikkauksen mukaan maaperä tontilla on vaihteleva ja siten myös haastava.



Kuva 23. Pohjan tutkimusleikkaus

## 6.7 Maalämpöpumppu

Maalämpöpumpuille pitää saadaan pitkät käyntiajat, koska lukuisat käynnistymiskerrat kuluttavat lämpöpumppuja. Jotta lämpöpumppujärjestelmä olisi helposti säädettävissä, on parempi valita monta pientä lämpöpumppua kuin yksi suuri lämpöpumppu. Tulistuksenpoiston lämmönsiirtimillä varustetut maalämpöpumput ovat oikea valinta, jos kohteissa käyttöveden lämmitys tehdään maalämmöllä.

Kompressorityyppi ja kylmäaine vaikuttavat lämpöpumpun ominaisuuksiin. Mäntäkompressori on yleinen pienemmissä lämpöpumpuissa. Sen vahvuudet ovat tunnettavuus, yksinkertaisuus ja hyvä hyötysuhde laajalla painesuhdealueella. Scroll-kompressori on syrjäyttänyt mäntäkompressorin teholuokassa alle 100 kW. Sen etuina ovat hiljainen käyntiäänä ja tasainen käynti. Ruuvikompressoreita käytetään suurimmissa lämpöpumpuissa. Ruuvikompressorin etuja ovat helppo säädettävyys ja pieni fyysinen koko suhteessa tehontarpeeseen. [27, s. 121.] Taulukossa 3 on esimerkkinä Oilonin kiinteistölämpöpumppuja.

Taulukko 3. Oilonin lämpöpumppuja [28].

Tyyppi	P-sarja, 100 °C (120 °C)	S-sarja, 85 °C	RE-sarja, 62 °C
Kompressori	Mäntä	Ruuvi	Scroll
Kylmäaine	R-134a, R-1234ze + muita	R-134a, R-1234ze, +muita.	R-410A
Lämpöteho	30 – 450 kW	180 – 2000 kW	210 – 420 kW

Lämpöpumppua valittaessa on huomioitava saatavan lämmitystehon lisäksi, myös kuinka lämmintä vettä se pystyy valmistamaan (taulukko 4).

Taulukko 4. Oilonin RE-sarjan lämpöpumppuja yhdellä koneikolla [28].

Malli (kW B0/W35)	Kylmäaine	Kompressori	Tuotto	B0/W35 kW / COP	B0/W65 kW / COP
28 HT	R-134a	ZHI11M4E	75 °C	27,7 / 4,4	23,9 / 2,6
28	R-410A	ZHI27K1P	68 °C	27,6 / 4,9	28,4 / 2,5
33	R-410A	ZHI32K1P	68 °C	32,3 / 4,8	34,3 / 2,5
38	R-410A	ZHI35K1P	68 °C	36,5 / 4,7	38,6 / 2,5
42	R-410A	ZHI40K1P	68 °C	41,5 / 4,8	43,0 / 2,5
48	R-410A	ZHI46K1P	68 °C	47,7 / 4,8	49,4 / 2,6

Lämpöpumppu voi koostua yhdestä tai useammasta koneikosta. Koneikot ovat modulaarisia ja niitä voidaan kytkeä useita yhteen. Esimerkiksi, jos halutaan lämpötilaltaan 60 °C:n vettä ja lämmitystehon tarve 90 kW: tarvitaan kaksi RE 48 kW -koneikkoa (taulukko 4), joissa on scroll-tyyppinen kompressori (taulukko 3).

## 6.8 Lämpöpumppu ja automaatio

Lämpöpumppu-urakka suositellaan eriyttäväksi putkiurakasta. Lämpöpumppua ohjaava automaatio on hyvä sisällyttää lämpöpumppu-urakkaan, jolloin urakoitsijalla on kokonaisvastuu järjestelmän toiminnasta. Urakkaan kannattaa sisällyttää myös järjestelmän jälkiseuranta- ja säätövelvollisuus. Lämpöpumppujärjestelmää ohjaavan automaatiojärjestelmän olisi hyvä ohjata myös kaikkia muita lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmiä ja lisälämmönlähteitä, jotta välttyttäisiin ristiriitaisilta ohjauksilta. Rakennuksen energianmittauksien on syytä olla laajat, jotta lämpöpumppujärjestelmän toimintaa voidaan seurata mahdollisimman tarkasti.

## 7 Energiakenttätutkimus

### 7.1 Tutkimuksen tavoite ja haasteet

Energiakenttä on maalämpöjärjestelmän kallein osa, ja siksi sitä tarkastellaan tässä opinnäytteessä tarkemmin. Perustapauksena käytetään Helsingissä olevaa rakennusta ja energiakenttää. Tarkoituksena on verrata perustapausta ja muihin tapauksiin: Miten eri seikat vaikuttavat energiakaivoista saatavaan energian määrää ja kustannuksiin? Liitteenä olevassa laskentasuunnitelmassa on esitetty case-tapaukset. Energiakentän simuloinnin tuloksena saatiin koosteita, grafiikkaa energiakaivon syvyydestä sekä taulukoita mahdollisista energiakentän muodosta.

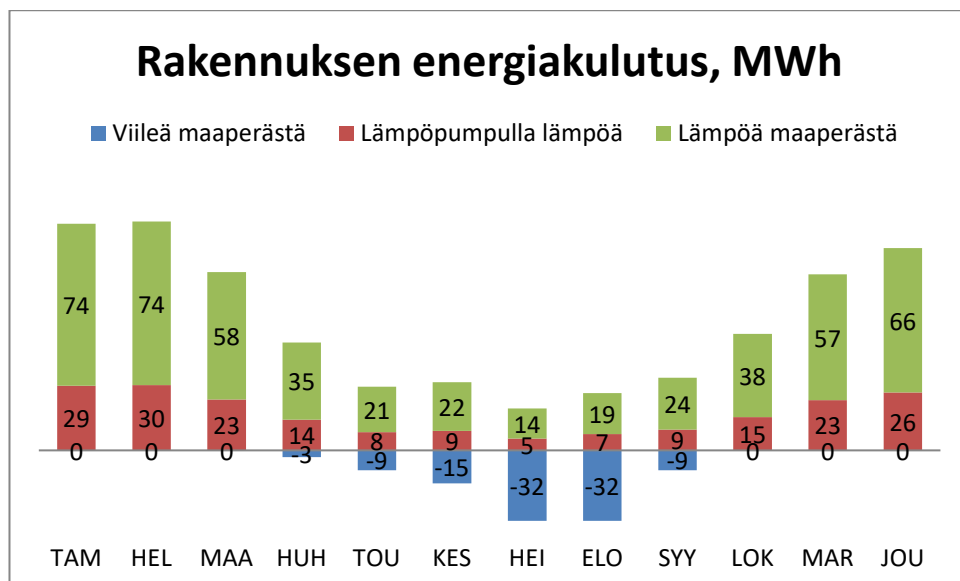
Ensimmäisen simulointikerran jälkeen analysointivaiheessa huomasin, että ohjelmasta automaattisesti tulleet maan lämpötila-arvot olivat puutteelliset. Saadun lisäinformaation ja uusintasimuloinnin jälkeen laskentaan saatiin oikeat arvot.

### 7.2 Tietokoneohjelmat

Earth Energy Designer (EED) -ohjelma on suosittu energiakenttien simulointiohjelma. Ohjelman ovat laatineet ruotsalaiset prof. Göran Hellström ja tohtori Per Eskilson Lundin yliopistosta, Johan Claesson Chalmersin yliopistosta, tohtori Thomas Blomberg, Blocon AB:sta ja tohtori Burkhard Saksasta. Ohjelma ottaa huomioon maankamaran lämpöominaisuudet, rakennuksesta johtuvat lämpö- ja jäädytyskuormat, energiakaivojen väliset etäisyydet sekä energiakaivokentän jäähtymisen. [29.] Kuukausittainen energijakauma ja energiamäärät tulee laskea jollain toisella laskentaohjelmalla, esim. IDA ICE:lla, kuten tässä tapauksessa on tehty.

### 7.3 Tutkimuksen lähtötiedot

Tutkimuksen perustapauksena on Helsingissä oleva sairaala (uudisrakennus). Koh-teessa lisälämmön tarve ja lämmin käyttövesi tuotetaan kaukolämmön avulla. Maaläm-pöpumppujärjestelmää käytetään mahdollisimman paljon energian tuotantoon ja varas-tointiin. Kuvassa 24 vihreät pylväät kuvaavat maaperästä saatavaa lämpöä, siniset pylväät kuvaavat viilennystarvetta ja punaiset lämpöpumpun sähkönkäyttöä MWh:ina. Kesällä tarvitaan viilennystä lämmityksen lisäksi. Kesällä ylimääräinen lämpö pumpa-taan takaisin maahan.



Kuva 24. Rakennuksen energiantarve.

Rakennuksen lämmitykseen tarvitaan energiaa 700 MWh ja viilennykseen 100 MWh. Lämpöpumppua ei käytetä käyttöveden lämmittämiseen. Lämpöpumppu mitoitetaan osateholle, joten huippukuormaa ei huomioida. Lämpöpumppu tuottaa noin 700 MWh lämpöenergiaa. Se koostuu kahdesta osasta, maaperästä saadaan noin 500 MWh ja lämpöpumpun sähkönkäytöstä saadaan lämpöenergiaa noin 200 MWh. Kesällä viilen-nyksestä saatava lämpöenergiaa pumpataan maahan, noin 100 MWh:n verran, joten maaperästä saadaan vuoden aikana lämpöenergiaa noin 400 MWh. Arvot on saatu si-muloimalla IDA ICE -ohjelmalla (kuva 25).

Peruskuorma

**Peruskuorma (Ilman LKV):**

Vuosittainen energia ja kuukausittainen profiili

Kuukausittaiset energia-arvot



[MWh]	Lämpö	Viileä	Maa
Vuotuinen	2003,000	663,000	Päivitys
SPF	3,50	99999,00	
	<input type="checkbox"/> Suora	<input checked="" type="checkbox"/> Suora	
Tammikuu	102,800	0,000	73,429
Helmi	103,800	0,000	74,143
Maalis	81,200	0,000	58,000
Huhtik	49,200	2,900	32,243
Saattaa	28,900	8,800	11,843
Kesäkuu	31,000	14,700	7,443
Heinäkuu	18,500	32,400	-19,186
Elokuu	26,300	32,400	-13,615
Syyskuu	33,300	8,800	14,986
Lokakuu	53,400	0,000	38,143
Marrasku	79,500	0,000	56,786
Joulukuu	92,000	0,000	65,714
Summa:	699,9	100	399,93

**Lämminkäyttövesi (LKV):**

Vuotuinen  SPF

[MWh]	Lämpöpumppu	Maa	Rakennus
Lämpö	$699,9 \times 1 / 3,5 = 199,97$	$+ 699,9 \times 2,5 / 3,5 = 499,93$	$= 699,9$
LKV	$0 \times 1 / 3 = 0$	$+ 0 \times 2 / 3 = 0$	$= 0$
Viileä	$100 \times 0 = 0$	$+ -100 \times 1 = -100$	$= -100$
Lämpö	Lämpöpumppu 199,97	Maa 499,93	Rakennus 699,9
Viileä	Lämpöpumppu 0	Maa 100	Rakennus 100

Maaperästä saatu lämpöenergia  $-499,93 + 0 - 100 = -399,93$

Kuva 25. Rakennuksen peruskuorma

## 7.4 Perustapaus

Perustapauksena on Helsingissä oleva energiakenttä. EED-ohjelmassa on käytetty seuraavia lähtöarvoja:

- Maaperä on graniittia.
- Mitoitus on osateholle.
- Simulointiajanjakso on 50 vuotta.
- Energiakaivoväli on 20 m.
- Energiakaivosyvyyden maksimi on 350 metriä.
- Energiakaivon U-putki on PE DN40.
- Energiakaivon halkaisija on 4½".
- Keruunesteen tilavuusvirtaus per energiakaivo on 0,5 l/s.

Maaliuksen suurin keskimääräinen lämpötila (kaava 16) on kesällä korkeintaan 15 °C ja talvella matalimmillaan –1 °C.

$$\text{keskimääräinen lämpötila} = \frac{\text{tulolämpötila} + \text{menolämpötila}}{2} \quad (16)$$

Hintatietoina on käytettyseuraavia tietoja:

- kallion poraushinta 30 €/m
- pehmeän maan osuus 10 m
- pehmeään maahan poraus 60 €/m
- ojan kaivuu 5 €/m.

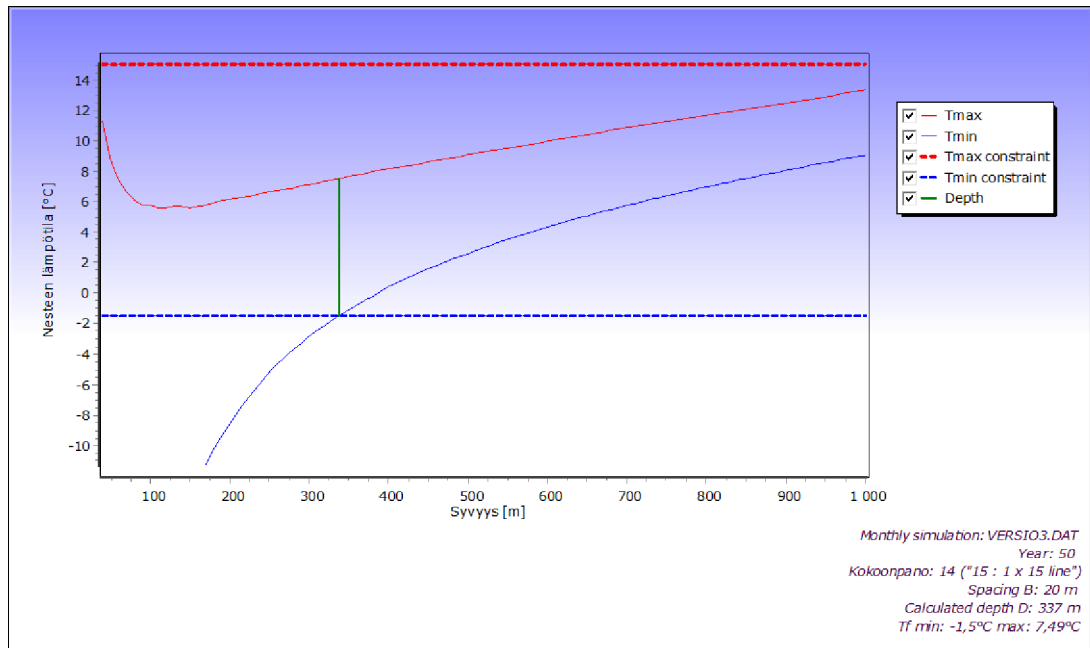


Simuloinnin tuloksena saatiin taulukossa 5 esitetyt kuukausittaiset liuksen keskilämpötilat eripituisilla käyttöjaksoilla. Taulukosta 5 havaitaan, että 50 vuoden kuluttua helmikuussa keruunesteen keskimääräinen lämpötila (tulo- ja menonesteen lämpötilan keskiarvo) on  $-1,5$  °C. Heinäkuussa keruunesteen keskimääräinen lämpötila on  $7,5$  °C. Viidessäkymmenessä vuodessa keskimääräisen lämpötilan pudotusta oli tapahtunut vajaat  $3$  °C.

Taulukko 5. Maaliuksen lämpötilavaihtelu perustapauksessa 50 vuoden aikana.

Maaliuksen keskimääräiset lämpötilat kuukauden lopussa, °C					
HELSINKI	1. vuosi	2. vuosi	5. vuosi	10. vuosi	50. vuosi
TAM	1,7	1,1	0,6	0,2	-1,3
HEL	1,4	0,9	0,4	0,0	-1,5
MAA	2,7	2,3	1,8	1,4	-0,1
HUH	5,0	4,7	4,3	3,8	2,4
TOU	7,0	6,7	6,3	5,8	4,4
KES	7,5	7,2	6,8	6,4	4,9
HEI	10,1	9,8	9,4	8,9	7,5
ELO	9,7	9,4	9,0	8,6	7,1
SYY	7,1	6,8	6,4	6,0	4,6
LOK	4,8	4,6	4,2	3,8	2,3
MAR	2,9	2,7	2,3	1,9	0,5
JOU	1,9	1,7	1,3	0,9	-0,5

Kuvassa 26 punainen katkoviiva kuvaa asettua keskimääräistä maksimilämpötilaa, joka on  $15$  °C ja sininen katkoviiva kuvaa keskimääräistä minimilämpötilaa, joka on  $-1,5$  °C. Kaarevat viivat kuvaavat keruunesteen lämpötilamuutosta suhteessa energiakaivon syvyyteen, kun aikaa on kulunut 50 vuotta. Punainen yhtäjaksoinen viiva kuvaa on maksimilämpötilaa ja sininen yhtäjaksoinen viiva minimilämpötila. Vihreän viivan pituus edustaa maksimi- ja minimilämpötilan erotusta. Sinisen katkoviivan ja kaarevan sinisen ehyen viivan risteyskohta kuvaa pienintä vaatimukset täyttävää kaivosyvyttä. Simuloimalla energiakaivon syvyydeksi saatiin 337 metriä, energiakaivoja on 15 kappaletta 20 metrin välein, maaliuksen minimilämpötila on  $-1,5$  °C ja maksimilämpötila on  $7,5$  °C. Tarkastelujakso on 50 vuotta.



Kuva 26. Perustapauksessa simuloimalla saatu energiakaivon syvyys

## 7.5 Tutkimuskohteet

Helsingin kohdetta pidetään perustapauksena, jota verrataan eri tilanteisiin. Mitä tapahtuu, jos energiakaivon arvoja muutetaan? Miten kallion kivilaji vaikuttaa? Millainen on hyvä kentän muoto? Miten energiakaivokentän maantieteellinen sijainti vaikuttaa? Entä jos simulointijakson 50 vuoden sijasta käytettäisiin 25 vuotta, mitä siitä seuraisi? Miksi tarvitaan TRT-mittaus ja EED-simulointi? Eri tilanteiden ja arvojen muutoksia esitellään kohdissa 7.5.2.–7.5.9. verrattuna kohteeseen 7.4. perustapauksen perustietoihin.

### 7.5.1 TRT-mittaus ja EED-simulointi

TRT-mittauksella ja EED-simuloinnilla varmistetaan, että energiakaivokentästä saadaan varmuudella riittävästi energiaa koko rakennuksen elinkaaren ajan. TRT-mittauksessa (Thermal Response Test eli terminen vastetestti) maaperään porataan energiakaivo, johon asennetaan testilaitteet. TRT-testissä mitataan, kuinka paljon kallio pystyy vastaanottamaan lämpöä. Tulosten perusteella pystytään arvioimaan kallioperän lämmönjohtavuus ja siitä saatava lämpöenergia.

EED (Earth Energy Designer) tietokoneohjelmalla mallinnetaan energiakaivojen pitkäaikaiskuormitusta. Energiakentän alimitoitus on suuri riski. Kun energiakentästä otetaan liian paljon lämpöenergiaa, maaperä alkaa jäähtyä. Alimitoitus energiakaivokentässä tuottaa ongelmia vasta noin 8–10 vuoden käytön jälkeen. Tässä vaiheessa urakoitsijan takuu on loppunut, ja lisäporaukset jäävät kiinteistön omistajan vastuulle.

### 7.5.2 Maaliuoksen virtaus, putkietäisyys ja putkikoko

Lämpöpumput tarvitsevat nestevirtaaman, jotta ne toimisivat. Liian pieni virtaama kasvattaa energiakaivoon menevän ja energiakaivosta tulevan keruunesteen lämpötilaeroa (taulukko 6). Taulukossa 6 on vertailtu kollektoriputken kokoa, kollektoriputkien etäisyyttä toisiinsa nähden ja maaliuoksen virtausnopeutta. Esimerkki on laadittu siten, että kaikki energiakaivot antavat saman verran (500 MWh/v) lämpöenergiaa vuodessa. Energiakaivot on laitettu paremmuusjärjestykseen.

Taulukko 6. Keruuputken koko, etäisyys ja maaliuoksen virtaus.

Paremmuusjärjestys			5.	3.	2.	1.	4.	6.	4.
Keruuputki	DN40	DN45	DN40	DN45	DN45	DN50	DN45	DN45	DN45
Hinta, 1000 €	0	0	162	155	153	150	161	163	161
Energiakaivojen lukumäärä, kpl	1	1	15	14	14	14	15	15	15
Energiakaivon syvyys, m	0	0	337	347	342	334	335	338	335
Energiakaivon yhteispituus, m	0	0	5055	4858	4788	4676	5025	5070	5025
Energiakaivon halkaisija, mm	114	114	114	114	114	114	140	152	152
Keruuputken halkaisija, mm	40	45	40	45	45	50	45	45	45
Keruuputkien etäisyys, mm	60	60	60	60	60	60	76	84	84
Virtaus per energiakaivo, l/s	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6
Energiakaivon lämpövaste sisäinen, (m·K)/W	0,86	0,8	0,5	0,43	0,43	0,37	0,54	0,59	0,59
Reynoldsin luku	2223	1966	2779	2458	2949	2656	2458	2458	2949
Tehollinen energiakaivon lämpövastus, (m·K)/W	0,25	0,23	0,16	0,15	0,14	0,12	0,17	0,18	0,17

Taulukosta 6 huomataan, että ensimmäisen ja viimeisen energiakaivon yhteispituuden välillä on eroa melkein 400 metriä. Keruuputken koko vaikuttaa energiakaivon lämpövastukseen sekä painehäviöön. Tyypillinen kollektorikoko on 2x40 mm. Suurissa koh-teissa, jossa on jäähdytystä ja joissa tarvitaan suuri nestevirtaus, käytetään 2x50 mm:n kollektoria. Halkaisijaltaan suuremmassa keruuputkessa painehäviö on pienempi. Mitä paksumpi putken seinämävahvuus on, sitä suurempi on energiakaivon lämpövastus. Suomen kallioperän keskimääräinen lämmönjohtavuus on noin 3,4 W/K\*m. Koska ve-den lämmönjohtavuus (0,6 W/K\*m) on pienempi, vesi toimii energiakaivossa eristeenä. Mitä suurempi on vesimäärä putkien ympärillä, sitä suurempi on energiakaivon lämpö-vastus, joten energiakaivon suurentaminen ei kannata.

Energiakaivoissa pyritään minimoimaan lämpövastus. Halkaisijaltaan pienempi ener-giakaivo on parempi. Suomessa porataan yleensä 115 mm (4,5") tai 140 mm (5,5") energiakaivoja. Tehokkain vaihtoehto saadaan, kun valitaan pieni energiakaivon halkaisija ja mahdollisimman isot putket, jotka ovat mahdollisimman kaukana toisistaan ja joissa on iso virtaus.

### 7.5.3 Keruuputkien välimatka energiakaivossa

Taulukossa 7 on esitetty perustapauksen (luku 7.4) keruuputkien välimatkan vaikutusta energiakaivossa. Keruuputkien välimatka on mitattu putken keskeltä keskelle.

Taulukko 7. Keruuputkien etäisyys, energiakaivon yhteispituus ja lukumäärään

Keruuputkien etäisyys mm	Energiakaivojen lukumäärä, kpl	Energiakaivon yhteispituus, m	Hinta-arvio, 1000 EUR
40	17	5695	183
60	15	5055	162
70	14	4760	153

Taulukosta 7 huomataan, että putkietäisyyden kasvaessa energiakaivojen määrä vä-henee ja yhteispituus pienenee. Keruuputket pyritään saamaan mahdollisimman kauas toisistaan ja mieluiten kiinni energiakaivon seinämään, jolloin energiakaivon lämpövas-tus on mahdollisimman pieni.

#### 7.5.4 Simulointijakson pituuden vaikutus

Taulukossa 8 on esitetty, miten perustapauksen (luku 7.4) simulointiajan muuttamien vaikuttaa energiakaivojen määrään ja energiakaivojen yhteispituuteen ja hintaan. Simulointi 50 vuoden päähän on parempi vaihtoehto, sillä yhden energiakaivon lisäyksellä saadaan energiakentän toimintavarmuutta lisättyä 25 vuotta.

Taulukko 8. Simulointijakso 25 ja 50 vuotta.

Ajanjakso, vuotta	Energiakaivojen lukumäärä, kpl	Energiakaivon syvyys, m	Energiakaivon yhteispituus, m	Hinta-arvio, 1000 EUR
25	14	336	4699	151
50	15	337	5055	162

Simuloinnin tuloksena saatiin taulukossa 9 esitetyt kuukausittaiset maaliuksen keskimääräiset lämpötilat eripituisilla käyttöjaksoilla. Taulukosta 9 havaitaan, että simulointijakson ollessa 25 vuotta viiden vuoden kuluttua maaliuksen lämpötila käy helmikuussa nollan alapuolella  $-0,2$  °C.

Taulukko 9. Maaliuksen lämpötilavaihtelut 25 vuoden aikana

MAALIUKSEN KESKIMÄÄRÄINEN LÄMPÖTILA (kuukauden lopussa) [°C]	VUOSI 1	VUOSI 2	VUOSI 5	VUOSI 10	VUOSI 25
TAM	1,22	0,49	0,0	-0,5	-1,3
HEL	0,8	0,28	-0,2	-0,7	-1,5
MAA	2,23	1,79	1,3	0,9	0,0
HUH	4,75	4,38	3,9	3,5	2,7
TOU	6,86	6,53	6,1	5,6	4,8
KES	7,4	7,1	6,7	6,2	5,4
HEI	10,2	9,87	9,4	9,0	8,2
ELO	9,75	9,48	9,1	8,6	7,8
SYY	6,94	6,67	6,3	5,8	5,0
LOK	4,53	4,26	3,9	3,4	2,6
MAR	2,5	2,24	1,9	1,4	0,6
JOU	1,42	1,18	0,8	0,4	-0,4

Simuloinnin tuloksena saatiin taulukossa 10 esitetyt kuukausittaiset maaliuksen keskimääräiset lämpötilat eripituisilla käyttöjaksoilla. Taulukosta 10 havaitaan, että simulointijakson ollessa 50 vuotta maaliuksen lämpötila painuu nollan alapuolelle 50. vuo-

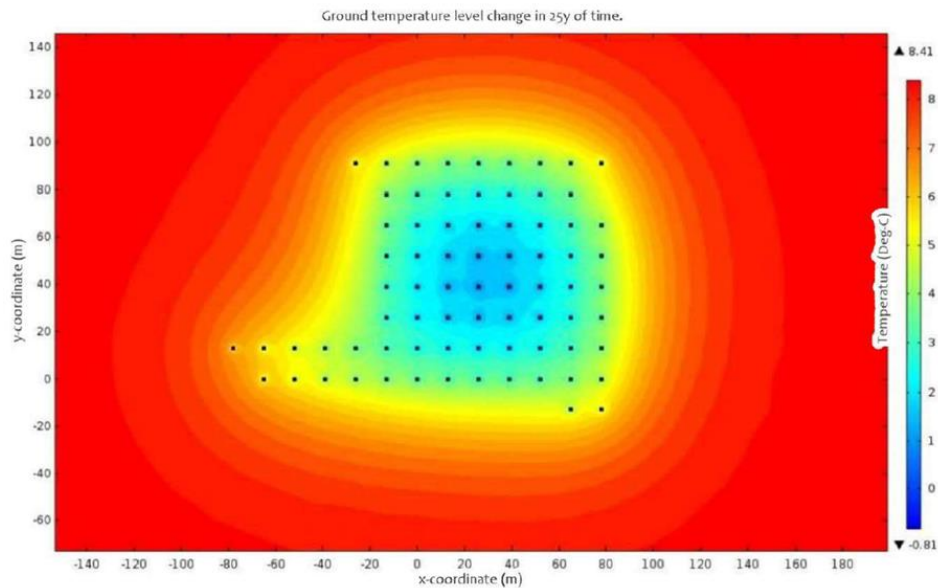
den tammikuussa  $-1,3$  °C, kun taas simulointijakson ollessa 25 vuotta maaliuoksen lämpötila meni nollan alapuolelle 5. vuoden helmikuussa.

Taulukko 10. Maaliuoksen lämpötilavaihtelut 50 vuoden aikana

MAALIUOKSEN KESKIMÄÄRÄINEN LÄMPÖTILA (kuukauden lopussa) [°C]	VUOSI 1	VUOSI 2	VUOSI 5	VUOSI 10	VUOSI 50
TAM	1,7	1,1	0,6	0,2	-1,3
HEL	1,4	0,9	0,4	0,0	-1,5
MAA	2,7	2,3	1,8	1,4	-0,1
HUH	5,0	4,7	4,3	3,8	2,4
TOU	7,0	6,7	6,3	5,8	4,4
KES	7,5	7,2	6,8	6,4	4,9
HEI	10,1	9,8	9,4	8,9	7,5
ELO	9,7	9,4	9,0	8,6	7,1
SYY	7,1	6,8	6,4	6,0	4,6
LOK	4,8	4,6	4,2	3,8	2,3
MAR	2,9	2,7	2,3	1,9	0,5
JOU	1,9	1,7	1,3	0,9	-0,5

### 7.5.5 Energiakaivokentän muoto

Laskennallisesti suora kaivolinja on paras, mutta käytännössä U-kirjaimen muotoista energiakenttää käytetään, koska tällöin energiakenttä mahtuu helpommin tontille. L-mallinen energiakenttä on myös hyvä, jos se sopii tontin muotoon. Tiivistä suorakaiteen tai neliön muotoista energiakenttää ei tule käyttää, koska keskimäiset energiakaivot jäähtyvät liian nopeasti. Esimerkiksi kuvasta 27 havaitaan, että kun kaikista energiakaivoista on otettu saman verran lämpöä, keskimäiset energiakaivot ovat sinisiä eli jäähtyneitä. Ratkaisu voisi olla, että talvella keskimäisistä energiakaivoista otettaisiin vähemmän lämpöä kuin reunoilla olevista energiakaivoista. Toinen vaihtoehto voisi olla, että keskimäisiä energiakaivoja lämmitettäisiin kesäaikana koneellisesta jäähdytyksestä syntyvällä hukkalämmöllä, jolloin kesän aikana maaperä elpyisi.



Kuva 27. Esimerkki maan lämpötilan muutoksesta 25 vuoden kuluessa [30, s. 28].

#### 7.5.6 Energiakaivojen välimatka

Energiakaivojen keskinäiset vaikutukset pitää huomioida mitoituksessa. Lämpöpumput kuormittavat jokaista energiakaivoa ja jokainen lämpöenergiakaivo jäädyttää ympärillä olevaa kalliota. Jäähtyneestä energiakaivokentästä ei saada haluttua määrää energiaa ja pahimmillaan energiakaivokenttä pääsee jäätymään. Taulukossa 11 energiakaivojen välimatka on esitetty energiakaivon keskeltä keskelle. Energiakaivojen välimatka vaikuttaa energiakaivojen määrään, syvyyteen ja yhteispituuteen ja sitä kautta hintaa.

Taulukko 11. Energiakaivojen välimatka.

Energiakaivojen väli, m	Energiakaivoja, kpl	Energiakaivon syvyys, m	Energiakaivon yhteispituus, m	Hinta-arvio, 1000 EUR
20	15	337	5 055	162
15	16	337	5 392	172
10	18	338	6 084	194
8	19	346	6 574	209
5	54	219	11 830	389

Energiakaivojen etäisyyden pienetessä energiakaivojen lukumäärä kasvaa ja energiakaivokentän investointikustannukset kasvavat (taulukko 11). Energiakaivojen välien pienentäminen lisää energiakaivon yhteispituutta. Energiakaivovälin kutistaminen 20

metristä 10 metriin aiheuttaa 20 %:in lisäyksen energiakaivon yhteispituuteen. Saman verran tulee lisäkustannuksia. Jos energiakaivojen välimatkana käytetään 8 metriä, niin kustannukset nousevat 30 %. Sopivin energiakaivoetäisyys on 15–20 metriä.

#### 7.5.7 Maaperä ja kivilaji

Taulukossa 12 on esitetty Suomen yleisimpien kivilajien lämmönjohtavuus. Arvot perustuvat GTK:n laboratoriossa mitattuihin kivilajityyppeihin. Suomen kallioperä on hyvä lämmönjohtavuuden kannalta (taulukko 12).

Taulukko 12. Suomen yleisimpien kivilajien lämmönjohtavuus [16].

Kivilaji	Lämmönjohtavuuden vaihteluväli, W/(m·K)	Lämmönjohtavuuden keskiarvo
Kvartsiitti	2,56–5,77	4,47
Rapakivi	2,92–4,75	3,84
Graniitti	1,63–4,93	3,61
Granodioriitti	2,01–5,09	3,17
Gneissit	0,99–6,03	3,04
Kiilleliuske	1,35–8,63	2,86
Amfiboliitti	1,37–4,70	2,63
Savikivi	2,20–2,40	2,30

Arvot perustuvat GTK:n laboratoriossa mitattuihin kivilajityyppeihin.

Taulukossa 13 on verrattu perustapauksen (luku 7.4) maaperän lämmönjohtavuuden 3,4 W/(m·K) ja huonomman kivilajin, esimerkiksi kiilleliuskeen 2,9 W/(m·K), lämmönjohtavuuden vaikutusta energiakaivoihin.

Taulukko 13. Hyvän ja huonon kivilajin lämmönjohtavuuden ero.

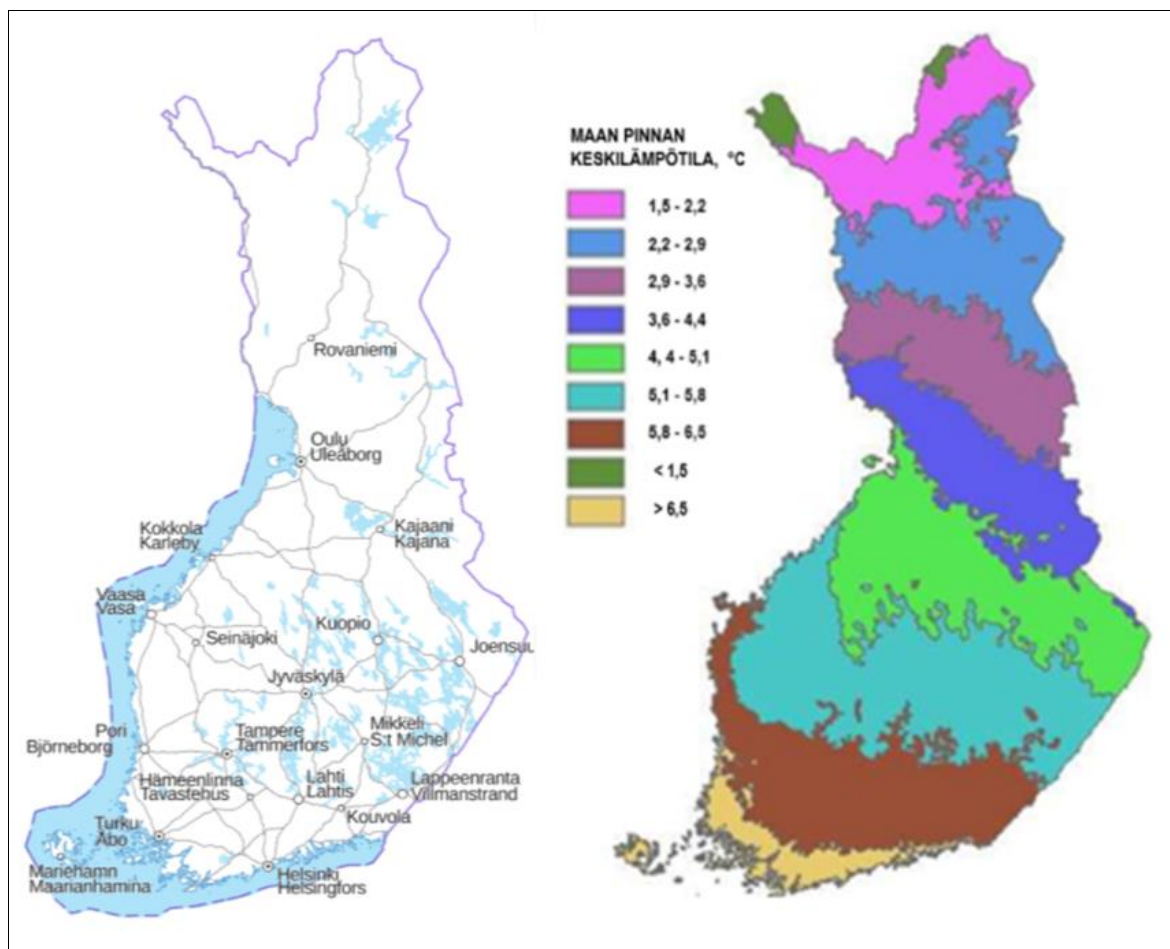
Kivilaji	Maaperän lämmönjohtavuus, W/(m·K)	Maaperän lämpökapasiteetti, MJ/(m <sup>3</sup> ·K)	Pora-reikien lukumäärä, kpl	Energiakaivon syvyys, m	Energiakaivon yhteispituus, m	Hintarvio, 1000 EUR
GRANIITTI	3,4	2,4	15	337	5055	162
KIILLELIUSKE	2,9	2,6	15	348	5220	167

Kivilajilla ei ole suurta vaikutusta lämmönsiirron tehokkuuteen. Kustannusero on noin 3 % hyvän ja heikon maaperän välillä (taulukko 13).



### 7.5.8 Energiakaivokentän maantieteellinen sijainti

Energiakaivokentän sijainnilla on merkitystä. Suomi on pitkä maa ja maanpinnan lämpötila vaihtelut eri paikkakunnilla ovat merkittäviä (kuva 28). Esimerkiksi Helsingissä maan pinnan keskilämpötila on yli 6 °C ja Kilpisjärvellä alle 2 °C.



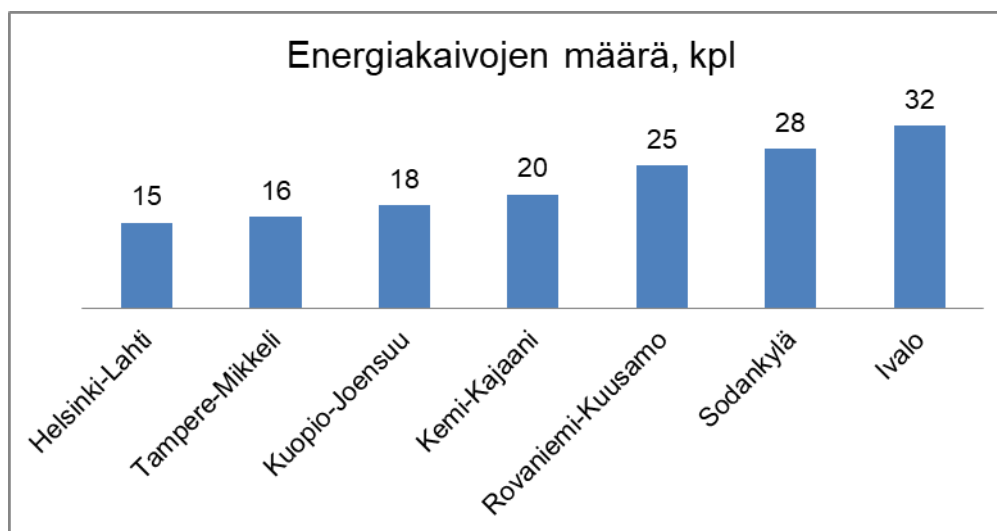
Kuva 28. Paikkakunnat ja maan pinnan keskilämpötilat [31].

Taulukon 14 mukaisesti esimerkiksi Ivalossa tarvitaan yli kaksinkertainen energiakaivojen yhteispituus, jotta päästäisiin samaan energiakaivokentän lämmöntuottoon kuin Helsingissä.

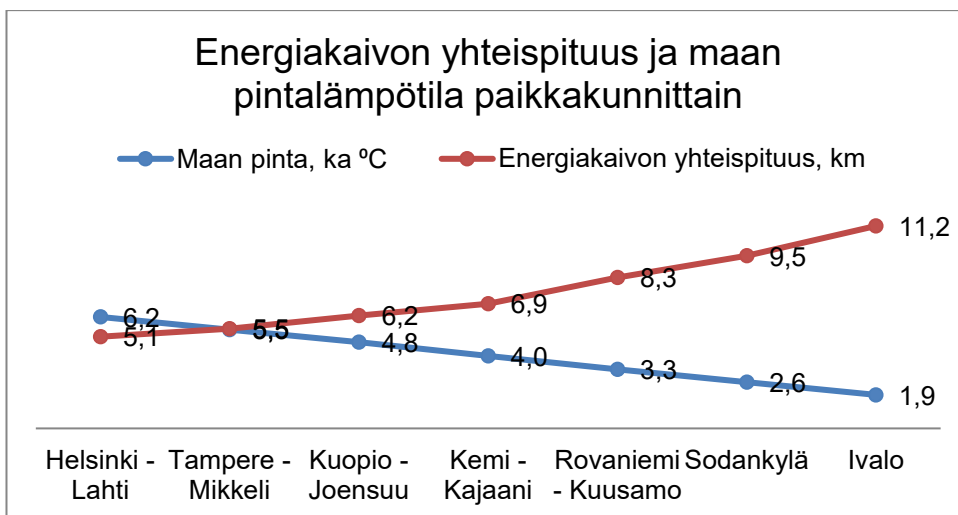
Taulukko 14. Sijainnin vaikutus energiakenttään

Paikkakunta	Maan pinta-lämpötila, ka °C	Energiakaivojen väli, m	Energiakaivojen lukumäärä, kpl	Energiakaivon syvyys, m	Energiakaivon yhteispituus, m	Hinta-arvio, 1000 EUR
Helsinki – Lahti	6,15	20	15	337	5 055	162
Tampere – Mikkeli	5,45	20	16	340	5 440	174
Kuopio – Joensuu	4,75	20	18	346	6 880	199
Kemi – Kajaani	4,00	20	20	344	6 880	220
Rovaniemi – Kuusamo	3,25	20	25	333	8 325	267
Sodankylä	2,55	20	28	340	9 520	305
Ivalo	1,85	20	32	349	11 170	357

Kemi–Kajaani-vyöhykkeen (kuva 28) pohjoispuolella energiakaivojen lukumäärä ja kaivojen yhteispituus alkaa kasvamaan (kuvat 29 ja 30).



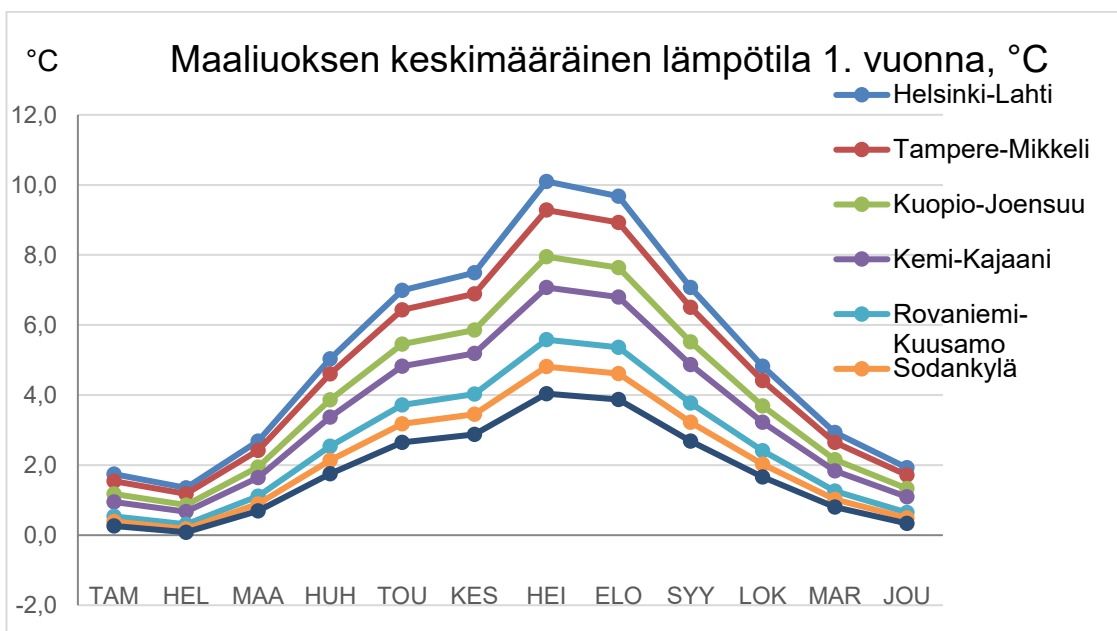
Kuva 29. Energiakaivojen määrä eri paikkakunnilla



Kuva 30. Energiakaivon yhteispituus ja maan pintalämpötila

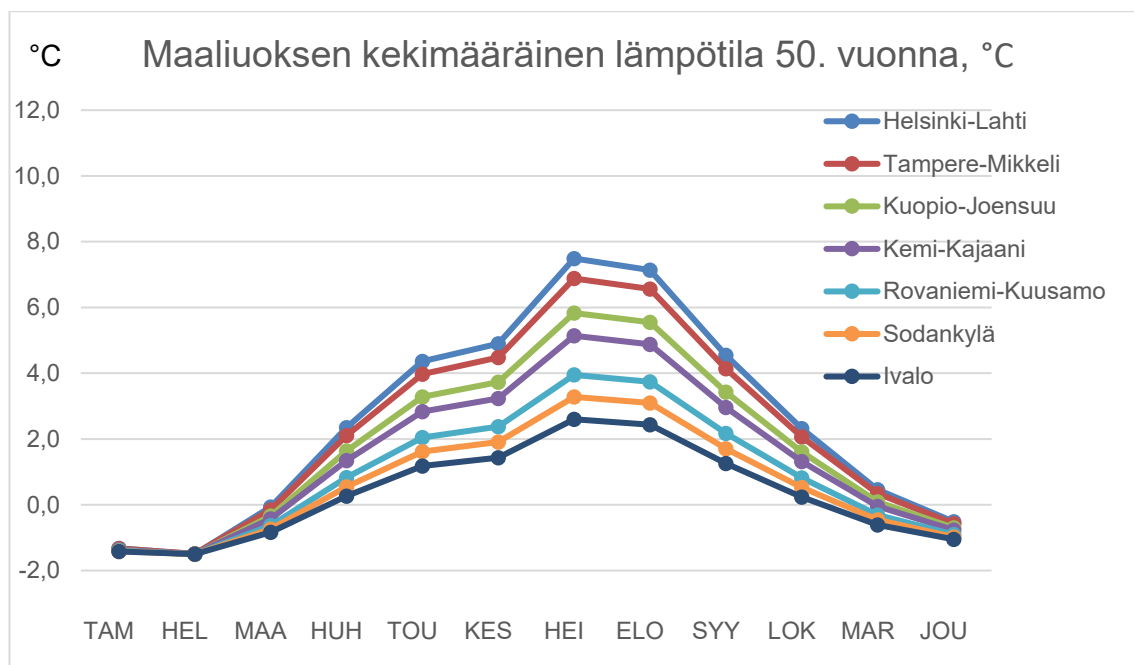
### 7.5.9 Maaliuoksen lämpötilamuutokset

Maaliuoksen keskimääräinen lämpötila ensimmäisenä vuonna Etelä-Suomen ja Pohjois-Suomen välillä kesäkuussa on noin 4,5 astetta. Heinäkuussa ero kasvaa ja on noin kuusi astetta, jolloin Etelä-Suomessa maaliuoksen huippulämpötila on noin 10 astetta ja pohjoisessa noin neljä astetta. Vuoden alin keskimääräinen maaliuoksen lämpötila on etelässä vähän yli yksi aste ja pohjoisessa vähän alle aste (kuva 31).



Kuva 31. Maaliuoksen keskimääräinen lämpötila ensimmäisenä vuonna paikkakunnittain.

Maaliuoksen keskimääräinen lämpötila 50. vuonna Etelä-Suomen ja Pohjois-Suomen välillä kesäkuussa on noin 3,5 astetta. Etelä-Suomen huippulämpötila on enää 7,5 astetta ja Pohjois-Suomessa noin 2,5 astetta. Talvella, joulukuusta maaliskuuhun, keskimääräinen maaliuoksen lämpötila on pakkasen puolella (kuva 32).



Kuva 32. Maaliuoksen keskimääräinen lämpötila 50. vuonna paikkakunnittain.

## 7.6 Tiivistelmä energiakenttätutkimuksen tuloksista

Energiakaivon suurentaminen ei kannata, sillä kallioperän keskimääräinen lämmönjohtavuus on noin 3,4 W/K\*m ja veden noin 0,6 W/K\*m, eli vesi toimii eristeenä energiakaivossa. Energiakaivoissa pyritään minimoimaan lämpövastus. Keruuputket pyritään saamaan mahdollisimman kauas toisistaan ja mieluiten kiinni energiakaivon seinämään, jolloin energiakaivon lämpövastus on mahdollisimman pieni.

Energiakaivovälien pienentäminen lisää energiakaivon yhteispituutta. Käytännössä tontin muoto, maaperä, maanalaiset, kuten muut putket ja rakennustekniset rakenteet, kuten anturat yms. saavat aikaan, ettei energiakenttä ole säännöllisen muotoinen. Tiivistä suorakaiteen tai neliömuotoista energiakenttää ei tule käyttää, koska keskimääräiset energiakaivot jäähtyvät liian nopeasti. Sopivin energiakaivojen välinen etäisyys on 20–15 metriä.

Tehokkain vaihtoehto saadaan, kun valitaan pieni energiakaivon halkaisija ja mahdollisimman isot putket, jotka ovat mahdollisimman kaukana toisistaan ja joissa on suuri virtaus. Kannattaa välttää putken seinämien paksuntamista ja liian suuria vesimääriä putken ympärillä.

Kivilajilla ei ole suurta vaikutusta energiatehokkuuteen, mutta energiakentän sijainnilla on merkitystä. Suomi on pitkä maa ja maanpinnan lämpötila vaihtelut eri paikkakunnilla ovat merkittäviä. Kemi–Kajaani-linjan pohjoispuolella energiakaivojen määrä alkaa kasvamaan merkittävästi.

Simulointi 50 vuoden päähän on parempi vaihtoehto kuin simulointi 25 vuoden päähän. Esimerkitapauksessa yhden energiakaivon lisäyksellä saatiin energiakentän toimintavarmuutta lisättyä 25 vuotta.

### 7.7 Pohdintaa energiakenttätutkimuksen tuloksista

Huomiota kiinnittää se, miten meri vaikuttaa maaperään lämmittävästi. Oulussa on sama maan lämpötila kuin Joensuussa, vaikka Joensuu on noin puolessa välin Oulu–Helsinki-linjaa. Lisäksi Oulussa tarvitaan vain kolme energiakaivoa enemmän kuin Helsingissä, vaikka Helsingin ja Oulun välinen etäisyys linnuntietä mitattuna on noin 540 kilometriä.

## 8 Lämpöpumppuhankkeen suunnitteluprosessi

Maalämmön kanssa käytetään jotain lisälämmönlähdettä. Lisälämmönlähteenä on usein kaukolämpö. Erilaisia lisälämmityksen toteutusvaihtoehtoja kannattaa verrata sekä taloudellisin että teknisin perustein. Suunnitteluprosessin tavoitteena on löytää kohteeseen parhaiten sopiva energiajärjestelmä. Järjestelmä on suunniteltava yhtenä kokonaisuutena muun talotekniikan kanssa. Huomioitavia seikkoja ovat mm. maalämpökeskuksen sijainti, tilavaraukset, ja toiminnot suhteessa muihin järjestelmiin. Teknisten tilojen ja taloteknisten laitteiden sijoittelulla ja tarkalla mitoituksella voidaan säästää suuria summia.

Esiselvitys on tärkein vaihe. Siinä varmistetaan hankkeen toteutustapa, kannattavuus sekä tehdään päätös jatkosuunnittelusta. Esisuunnitteluvaiheessa mitoitetaan järjestelmä alustavasti ja laaditaan alustava kytkentäkaavio.

Luonnossuunnitteluvaiheessa tarkennetaan ja varmistellaan esiselvityksen perusteella jatkoon valittua suunnitelmaa. Luonnossuunnittelussa kuuluu tarkistaa mm.

- energiasimulaatioiden luotettavuus
- energiakaivojen paikat
- energiakenttäluvut
- koeporauskaivot ja TRT-mittaus
- lämpöpumpun COP ja kylmäaine
- lisälämmöntuotto
- automatiikan yhteensopivuus muihin järjestelmiin
- tekniset tilat ja laitteiden äänitasot
- sähkönsyötön riittävyys.

Toteutussuunnittelu- eli työpiirustusvaiheessa suunnittelun tuloksena syntyy hankinta-aineisto. Hankinta- ja rakennusvaiheessa varmistetaan hankintojen ja asennusten onnistuminen sekä eliminoidaan heikot lenkit.

Käytön seurantavaiheessa varmistetaan järjestelmän toimivuus ja elinkaarisäästöjen toteutuminen. Käyttäjät koulutetaan valvomaan laitosta ja toimimaan oikein vikatilanteissa. Käytön seurantavaiheen on tarpeen olla vähintään vuoden mittainen, jotta erilaiset käyttötilanteet tulevat esiin.

## 9 Pohdintaa

Maasta saatava lämpö on ilmaista ja uusiutuvaa lähienergiaa, jonka hyödyntäminen on edullista. Jäähdytys tulee lisäämään maalämmön käyttöä. Rakennukset ovat nykyään hyvin tiiviitä. Koneellinen jäähdytys tuottaa hukkalämpöä kesällä. Aikaisemmin jäähdytys on hoidettu vedenjäähdytyskoneilla, ja hukkalämpö on puhallettu taivaalle. Jo keran tuotettua lämpöä ei pidä haaskata, vaan se kannattaa kierrättää. Hukkalämmöllä kannattaa lämmittää maaperää ja ottaa talvella lämpö takaisin. Toinen vaihtoehto olisi laittaa hukkalämpö kaukolämpöverkkoon, mutta kaukolämpöverkkoa ei ole joka paikassa.

Lämmitysjärjestelmän suunnittelussa tärkeintä on ymmärtää kokonaisuus. Lämmitysjärjestelmä on suunniteltava kokonaisuutena, mutta järjestelmä on pidettävä yksinkertaisena ja modulaarisena. Lämmitysjärjestelmä on pilkottava sellaisiin osiin, jotka ovat laskettavissa ja ymmärrettävissä. Modulaarisuudessa hyvä puoli on se, että jos joku osa-alue ei toimi, koko järjestelmä ei lamaannu toimimattomaksi. Lisäksi vikatilanteessa modulaarinen järjestelmä on helpompi korjata. Automaatio tulee pitää yksinkertaisena ja selkeänä. Lämpöpumppua ohjaava automaatio olisi hyvä sisällyttää lämpöpumppu-urakkaan, jolloin urakoitsijalla on kokonaisvastuu järjestelmän toiminnasta.

Keskusteluissa eri toimijoiden kanssa on noussut esille mm. seuraavaa:

- Maalämpöpumpulla on otettu enemmän lämpöä kuin energiakenttä olisi ollut valmis luovuttamaan. Maaperän jäähtyminen on tullut esiin vasta monen vuoden päästä.
- Maalämpölaitteiston käyttöönottoon on varattava aikaa ja rahaa.
- Laitteistoa on seurattava jonkin aikaa. Esimerkiksi, jos yhden kuukauden ajan lämpöpumppua ajetaan liian korkealla lämpötilalla, sillä kustannuksella olisi saanut katettua seurantajakson kulut.
- Oppilaitoksissa ei ole koulutusta alalle. Tutkimuksia ja tutkittua tietoa kaivataan.
- Hukkalämpöä on erityisesti kohteissa, joissa on paineilmajärjestelmiä.
- Savukaasut sisältävät myös paljon hukkalämpöä.
- Automaatiolla on iso rooli järjestelmän toimivuuden kannalta. Automaation toimintaselostuksen tulee olla selkeä ja yksiselitteinen.
- Energianmittauspisteiden määrä ja lämpötilanseuranta ovat tärkeitä.

Tulevaisuudessa energian varastointia on kehitettävä. Ilmaston lämpeneminen muuttaa myös maaperän lämpötilaa. Siitä olisi hyvä tehdä jatkotutkimusta.

## 10 Yhteenveto

Rakennusten lämmitys ja sähkönkäyttö muodostavat lähes 40 prosenttia energian loppukäytöstä. Suomi on sitoutunut EU:n energia- ja ilmastotavoitteisiin. Päästövähennyksiin päästään vähentämällä fossiilisten polttoaineiden kulutusta. Yhtenä vaihtoehtona on tuottaa kiinteistön vaatima lämmitys- ja jäähdytysenergia lämpöpumpuilla.

Lämpöpumppujärjestelmät vaativat paljon erityisosaamista. Lämpöpumpun tuottama lämpö muodostuu lämmönlähteistä otettavan ilmaislämmön ja kompressorin käyttämän sähkön summana. Yleensä lämpöpumppua ei mitoiteta koko energiantarpeelle, vaan loppuosa tuotetaan jollain muulla lisälämmöllä. Lämpöpumppujärjestelmän mitoittamisen tärkeimmät lähtötiedot ovat rakennuksen lämmitys- ja jäähdytystarve sekä niiden jakautumisen selvittäminen. Energiakaivot ovat yleisin maalämpöpumpun lämmönlähde. Lämmönsiirtoon vaikuttavat monet tekijät, kuten mm. vierekkäisten energiakaivojen vaikutus. Energiakentän alimitoituksesta yleensä seuraa, että energiakenttä jäähtyy. Energiakenttä on maalämpöjärjestelmän kallein osa, ja siksi sitä on tarkasteltu tässä tutkimuksessa.

Opinnäytetyö on suunnattu erityisesti niille, jolta suunnittelevat maalämpöjärjestelmiä sekä kaikille asiasta kiinnostuneille. Tutkimuksessa perustapauksena käytettiin Helsingissä olevaa sairaalaa ja sen energiakenttää. Eri tilanteiden ja arvojen muutoksia vertailtiin perustapauksen perustietoihin. Tavoitteena oli selvittää, miten eri seikat vaikuttavat energiakaivoista saatavaan energian määrää ja kustannuksiin ja mitkä muut seikat vaikuttavat maalämpöjärjestelmään. Tutkimusmenetelmänä käytettiin omakohtaisia Earth Energy Designer -simulointiohjelmalla tehtyjä laskelmia.

Laskelmien perusteella voitiin todeta, että energiakaivon halkaisijan tulisi olla mahdollisimman pieni ja energiakaivossa tulisi olla mahdollisimman isot putket mahdollisimman kaukana toisistaan. Energiakaivossa vesi toimii eristeenä. Mitä suurempi on vesimäärä putkien ympärillä, sitä suurempi on energiakaivon lämpövastus. Tiivistä suorakaiteen tai neliömuotoista energiakenttää ei tule käyttää. Sopiva energiakaivoetäisyys on 15–20 metriä. Energiakentän sijainnilla on merkitystä. Meri vaikuttaa maaperään lämmittävästi esim. Oulussa. Ilmaston lämpeneminen muuttaa myös maaperän lämpötilaa. Siitä olisi hyvä tehdä jatkotutkimusta.



## Lähteet

- 1 Brown, Lester R. 2017. The Great Transition: Shifting from Fossil Fuels to Solar and Wind Energy. Suuri energiamurros. Helsinki: Into Kustannus Oy.
- 2 Matalaenergiarakentaminen asuinrakennukset. RIL 249 – 2009. 2009. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- 3 Jääskeläinen, Raimo. 2009. Geotekniikan perusteet. Tampere: AMK-kustannus Oy
- 4 Kurnitski, Jarek. 2012. Energiamääräykset 2012. Helsinki: Suomen Rakennusmedia Oy.
- 5 Harju, Pentti. 2010. Lämmitystekniikan oppikirja. Anjalankoski: Solverpalvelut Oy.
- 6 Maalämpöpumpun tekniset tiedot. 2020. Verkkoaineisto. Lämpöässä Oy. <<https://www.lampoassa.fi/tuotteet/maalampopumppu-vsi/>>. Luettu 23.4.2020.
- 7 Happonen, Taito. 2010. Ilmalämpöpumpun toiminta ja asennus. Kuopio: Itä-Suomen ylisopisto Koulutus- ja kehittämisspalvelu Aducate
- 8 Kauppila, Kari. 2019. EnerSys CM Oy. Kylmätekniiikan, Metropolia, Lämpöpumput ja lauhdelämmön hyödyntäminen luento, lämpöpumppujen lämmönlähteet. Luento 8.8.2019.
- 9 Koskinen, Aaro. 2020. Energiasuunnittelija, Sitowise Oy. Kuvia sairaalaprojektista.
- 10 Kauppila, Kari. 2019. EnerSys CM Oy, Metropolia, Lämpöpumppulaitoksen suunnittelu ja kylmätekniiikka. Luento 22.8.2019.
- 11 Valkeapää, Aki. 2019. Kylmätekniiikka, lämpöpumput ja lauhdelämmöntalteenotto. Kylmäkoneiden ja lämpöpumppujen teoreettiset ja toiminnalliset perusteet sekä laskelmat. Luento 21.1.2019.
- 12 Beggs, Clive. 2002. Energy: Management, supply and Conservation. Great Britain: Martins the Printers Ltd.

- 13 Ketomäki, Jaakko. 2020. Maalämpöpumppu. Verkkoaineisto. Energiatehokas koti -hanke Motiva Oy.  
[https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan\\_suunnittelu/lammitys/i\\_lmalampo-\\_ja\\_maalampopumput/poistoilmalampopumppu](https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan_suunnittelu/lammitys/i_lmalampo-_ja_maalampopumput/poistoilmalampopumppu)>. Luettu 27.5.2020.
- 14 Suomen maaperä. 2020. Verkkoaineisto. Geologian tutkimuskeskus (GTK).  
<<https://kaiva.fi/geologia/suomen-maapera/>>. Luettu 14.5.2020.
- 15 Uusiutuvien lähienergioiden käyttö rakennuksissa. 2014. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry.
- 16 Huusko, Asko. 2019. Geologian tutkimuskeskus GTK. Metropolia ammattikorkeakoulu. Energiakaivot ja kaivokentät. Luento 8.3.2019.
- 17 Leppäharju, Niina. 2008. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Pro gradu -tutkielma, Oulun yliopisto, Fysikaalisten tieteiden laitos.
- 18 Ympäristöopas 2013. 2013. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 19 Laitinen, Jussi. 2013. Pieni suuri energiakirja. Helsinki: Sitra (osa 289).
- 20 Uusiutuvien lähienergioiden käyttö rakennuksissa. 2014. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry.
- 21 Juuti, Petteri. Suomen ensimmäinen geolämpölaitos käynnistyi – se saattaa korvata kivihiiilen ja mullistaa lämmöntuotannon: "Olen suorastaan voitonriemuisen". 2020. Verkkoaineisto. YLE.fi. <<https://yle.fi/uutiset/3-11158359>>. 20.1.2020. Luettu 20.1.2020.
- 22 Puhdasta geolämpöä maan syvyyksistä. Ajankohtaista Geolämmöstä. 2020. Verkkoaineisto. <<https://www.st1.fi/geolampo>>. Luettu 14.3.2021.
- 23 Lämmön varastointia ja pumppausta kaukolämpö fossiilivapaaksi. 2019. Kuntatekniikka 2/2019.
- 24 Kaukolämmön käsikirja. 2006. Helsinki: Energiateollisuus ry.
- 25 Riipinen, Marko. 2007. Rakennusten lämmitysjärjestelmät. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 26 Turunen, Jaana. 2020. LVI-suunnittelija, Sitowise Oy. Kuvia sairaalaprojektista.
- 27 Uusiutuvien lähienergioiden käyttö rakennuksissa. 2014. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry.

- 28 Oilon RE –kiinteistölämpöpumppu. 2020. Verkkoaineisto. Oilon Group Oy. <https://oilon.com/fi/products/oilon-re-kiinteistolampopumppu/>. Luettu 19.2.2020.
- 29 EED – Earth Energy Designer. 2021. Verkkoaineisto. Buildingphysics.com. <https://buildingphysics.com/eed-2/>. Luettu 4.4.2021
- 30 Nadas, Viktoria. 2020. Advanced Design and Control Strategies to Optimize a Deep Borehole Field as Long-Term Thermal Storage. Helsinki: Aalto Yliopisto.
- 31 Karttatasot. GTK Maankamara. 2020. Verkkoaineisto. Geologian tutkimuskeskus GTK. <https://gtkdata.gtk.fi/maankamara/>. Luettu 15.11.2020.

Laskentasuunnitelma

		LASKENTASUUNNITELMA																			
		P	E	R	U	S	A	C	A	S	E	E	C	C	C	C	C	C	C	C	C
PAIKKAKUNNAN VAIKUTUS	MAANPINTÄL °C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
a) Helsinki	6,2																				
b) Tampere	5,5																				
c) Kuopio	7,8																				
d) Kemi	4,0																				
f) Rovaniemi	3,3																				
g) Sodankylä	2,6																				
h) Ivalo	1,85																				
MAAPERÄN VAIKUTUS																					
a) Graniitti	ka3.4 (1.63-4.93)																				
b) Anfibolilitti	ka2.9 (1.37-4.70)																				
PUTKIKOON VAIKUTUS																					
a) PE DN40																					
b) PE DN45																					
c) PE DN50																					
LIUKOSEN VIRTAAIKA, l/s																					
a) 0,4																					
b) 0,5																					
c) 0,6																					
KAIVON REIÄN SUURUUDEN VAIKUTUS																					
a) 4,5 "																					
b) 5,5 "																					
PUTKIVÄLIN VAIKUTUS																					
a) 40																					
b) 60																					
c) 70																					
KAIVOVÄLIN VAIKUTUS, m																					
a) 20																					
b) 15																					
c) 10																					
d) 8																					
e) 5																					
KAIVOKENTTÄN KOKOJA MUOTO																					
a) JDND																					
b) U																					
c) L																					
PERUSKUORMA																					
SIMULOINTIAIKAA																					
a) 25 VUOTTA																					
b) 50 VUOTTA																					

## Perustapaus

EED 4.20 - www.buildingphysics.com - license for Janne.Peltoniemi@metropolia.fi

Syöttö tiedosto: C:\Users\jaanatur\Desktop\Jaanat\VERSIO3.dat

Tämä tulos tiedosto: VERSIO3.CSV Päivä: 25.11.2020 Aika: 15:38:54

Projektin muistilpanot

KOOSTE

HELSINKI PERUSTAPAAUS

Yhteenveto

	162050 EUR	
Porareikien lukumäärä	15	
Porakalvon syvyys	337	m
Porakalvon yhtäispyisyys	5055	m

## SUUNNITELU TIEDOT

MAA

Maaperän lämmönjohtavuus	3,4	W/(m-K)
Maaperän lämpökapasiteetti	2,4	MJ/(m³-K)
Maanpinnan lämpötila	6,15	°C
Maaperän lämpövuoto	0,05	W/m²

Porausreikä

Kokoonpano:	14 ("15 : 1 x 15 ilme")	
Porakalvon syvyys	337	m
Porakalvojen väli	20	m
Porakalvon asennus	Normi-U	
Porakalvon halkaisija	114	mm
U-putken halkaisija	40	mm
U-putken paksuus	2,4	mm
U-putken lämmönjohtokyky	0,42	W/(m-K)
U-putken käyrän halkaisija	60	mm
Kalvonesteeseen lämmönjohtavuus	0,6	W/(m-K)
Kontakt.Lämpövast. putki/kalvoneste	0	(m-K)/W

LÄMPÖVASTUKSET

Porakalvon lämpövastukset lasketaan	
Laskennan monikerrat	10
Sisäinen lämmönsiirto meno ja paluuputken välillä vakio	

LÄMMÖNSIIRTONESTE

Lämmönjohtokyky	0,41	W/(m-K)
Ominaislämpökapasiteetti	4216	J/(Kg-K)
Tiheys	968	Kg/m³
Viskositeetti	0,0063	Kg/(m-s)
Jäätymispiste	-18,5	°C
Virtaus per porakalvo	0,5	l/s

PERUSKUORMA

LKV:n COP	3
vuosi COP(lämmitys)	3,5
vuosi COP(jäähdytys)	1,00E+05

Kuukausittainen energiankulutus [MWh]

Kuukausi	Lämpö	Viljeä	Maa
TAM	103	0	73,4
HEL	104	0	74,1
MAA	81,2	0	58
HUH	49,2	2,9	32,2
TOU	28,9	8,8	11,8
KES	31	14,7	7,44
HEI	18,5	32,4	-19,2
ELO	26,3	32,4	-13,6
SYU	33,3	8,8	15
LOK	53,4	0	38,1
MAR	79,5	0	56,8
JOU	92	0	65,7

Summa	700	100	400		
<b>HUIPPUKUORMA</b>					
Kuukausittaiset huippu Tehot [kW]					
Kuukausi	Huippu lämpö	Kesto [h]	Huippu viilennys	Kesto [h]	
TAM	200	0	0	0	
HEL	200	0	0	0	
MAA	200	0	0	0	
HUH	200	0	60	0	
TOU	160	0	80	0	
KES	112	0	80	0	
HEI	112	0	100	0	
ELO	112	0	100	0	
SYY	160	0	80	0	
LOK	200	0	0	0	
MAR	200	0	0	0	
JOU	200	0	0	0	
Simulointi vuodet	50				
Ensimmäinen toiminta kuukausi	TAM				
<b>LASKETUT ARVOT</b>					
-----					
* Monthly calculation *					
Porakaivon yhteispituus	5055	m			
<b>LÄMPÖVASTUKSET</b>					
Porakaivon lämp.vast sisäinen	0,5	(m-K)W			
Reynoldsin luku	2779				
Lämpöresistanssi neste / putki	0,01482	(m-K)W			
Lämpöresistanssi putken materiaali	0,04844	(m-K)W			
Kosketusvastus putki / kaivoneste	0	(m-K)W			
Porakaivon lämp.vast. neste / maa	0,1434	(m-K)W			
Tehollinen porakaivon lämpövastus	0,1617	(m-K)W			
<b>OMINAISLÄMMÖN OTTOKYKY [W/m]</b>					
Kuukausi	Peruskuorma	Huippu lämpö	Huippu viilennys		
TAM	19,9	28,3	0		
HEL	20,1	28,3	0		
MAA	15,7	28,3	0		
HUH	8,74	28,3	-11,9		
TOU	3,21	22,6	-15,8		
KES	2,02	15,8	-15,8		
HEI	-5,2	15,8	-19,8		
ELO	-3,69	15,8	-19,8		
SYY	4,06	22,6	-15,8		
LOK	10,3	28,3	0		
MAR	15,4	28,3	0		
JOU	17,8	28,3	0		
<b>PERUSKUORMA: NESTEEN KESKILÄMPÖTILAT (kuun lopussa) [°C]</b>					
Vuosi	1	2	5	10	50
TAM	1,74	1,06	0,59	0,15	-1,32
HEL	1,35	0,86	0,4	-0,033	-1,5
MAA	2,68	2,27	1,83	1,39	-0,067
HUH	5,03	4,68	4,25	3,81	2,35
TOU	6,99	6,68	6,25	5,82	4,36
KES	7,49	7,21	6,79	6,35	4,9
HEI	10,1	9,79	9,38	8,94	7,49
ELO	9,68	9,42	9,02	8,58	7,14
SYY	7,07	6,81	6,42	5,99	4,55
LOK	4,82	4,57	4,19	3,76	2,32
MAR	2,93	2,69	2,32	1,9	0,46
JOU	1,93	1,7	1,34	0,92	-0,51

PERUSKUORMA: VUOSI					
Pienin keskimääräinen nesteen lämpötilä	50				
Suurin keskimääräinen nesteen lämpötilä	-1,5				*C lopussa HEL
	7,49				*C lopussa HEI
HUIPPU LÄMPÖKUORMA: NESTEEN KESKILÄMPÖTILAT (kuun lopussa) [°C]					
Vuosi	1	2	5	10	50
TAM	1,74	1,06	0,59	0,15	-1,32
HEL	1,35	0,86	0,4	-0,033	-1,5
MAA	2,68	2,27	1,83	1,39	-0,067
HUH	5,03	4,68	4,25	3,81	2,35
TOU	6,99	6,68	6,25	5,82	4,36
KES	7,49	7,21	6,79	6,35	4,9
HEI	10,1	9,79	9,38	8,94	7,49
ELO	9,68	9,42	9,02	8,58	7,14
SYYY	7,07	6,81	6,42	5,99	4,55
LOK	4,82	4,57	4,19	3,76	2,32
MAR	2,93	2,69	2,32	1,9	0,46
JOU	1,93	1,7	1,34	0,92	-0,51
HUIPPU LÄMPÖKUORMA: VUOSI					
Pienin keskimääräinen nesteen lämpötilä	50				
Suurin keskimääräinen nesteen lämpötilä	-1,5				*C lopussa HEL
	7,49				*C lopussa HEI
HUIPPU JÄÄHDYTYSKUORMA: NESTEEN KESKILÄMPÖTILAT (kuun lopussa) [°C]					
Vuosi	1	2	5	10	50
TAM	1,74	1,06	0,59	0,15	-1,32
HEL	1,35	0,86	0,4	-0,033	-1,5
MAA	2,68	2,27	1,83	1,39	-0,067
HUH	5,03	4,68	4,25	3,81	2,35
TOU	6,99	6,68	6,25	5,82	4,36
KES	7,49	7,21	6,79	6,35	4,9
HEI	10,1	9,79	9,38	8,94	7,49
ELO	9,68	9,42	9,02	8,58	7,14
SYYY	7,07	6,81	6,42	5,99	4,55
LOK	4,82	4,57	4,19	3,76	2,32
MAR	2,93	2,69	2,32	1,9	0,46
JOU	1,93	1,7	1,34	0,92	-0,51
HUIPPU JÄÄHDYTYSKUORMA: VUOSI					
Pienin keskimääräinen nesteen lämpötilä	50				
Suurin keskimääräinen nesteen lämpötilä	-1,5				*C lopussa HEL
	7,49				*C lopussa HEI