

Joni Kemppainen

Lämpökaivojen käyttö rakennuksen lämmityksessä

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Talotekniikan koulutusohjelma
Insinöörityö
30.11.2012

Tekijä Otsikko	Joni Kemppainen Lämpökaivojen käyttö rakennuksen lämmityksessä
Sivumäärä Aika	44 sivua + 1 liite 30.11.2012
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	LVI-suunnittelupainotteinen suuntautumisvaihtoehto
Ohjaajat	LVI-osastopäällikkö Ilkka Kiiski yliopettaja Jukka Yrjölä
<p>Tässä opinnäytetyössä käsitellään rakennuksen lämmitykseen käytettävien lämpökaivojärjestelmien suunnittelua. Työn tavoitteena oli kuvata suunnittelu- ja mitoitusprosessi sekä esittää lämpökaivojärjestelmän suunnittelunäkökohtia.</p> <p>Työ toteutettiin keräämällä suunnittelun perustiedot tutkimusraporteista, kirjallisuudesta ja verkkosivuilta. Lisäksi merkittävänä apuna työn toteuttamiseen olivat asiantuntijahaastattelut, sillä kirjallisuudessa ei ole esitetty yksiselitteistä Suomeen soveltuvaa suunnittelu- ja mitoitusohjetta.</p> <p>Tulokseksi saatiin rakennuksen lämpökaivojärjestelmän suunnitteluohje, joka soveltuu opiskelun tueksi, suunnittelumenetelmien arviointiin ja järjestelmän mitoituksen avuksi. Lisäksi työssä laadittiin maalämpöhankkeen muistilista ja yksinkertaistettu maaperän lämpökäyttäytymisen esimerkilaskelma.</p> <p>Työn tulokset auttavat sisäistämään lämpökaivojärjestelmän suunnittelun päävaiheet ja ne toimivat pohjana yksityiskohtaiselle suunnittelu- ja mitoitusohjeelle. Jatkokehityksen kannalta tärkeää on saada lisää lämpökaivojärjestelmien käyttö- ja toiminnan seurantatietoa.</p>	
Avainsanat	maalämpö, lämpökaivo, maalämpöjärjestelmä, uusiutuvat energialähteet.

Author Title	Joni Kemppainen Using geothermal wells for heating of a building
Number of Pages Date	44 pages + 1 appendices 30 November 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation	HVAC Engineering, Design Orientation
Instructors	Ilkka Kiiski, Head of HVAC Department Jukka Yrjölä, Principal Lecturer
<p>The final year project looked into the design of a geothermal well system to be used for heating a building. The goals were to describe the design process and to present some design details.</p> <p>For the Bachelor's thesis, research, literature and web pages concerning geothermal heating systems were studied. Especially interviews with professionals who interpreted the many practices of design and discussed their advantages and disadvantages were essential sources of information.</p> <p>The results of the project were a design manual for geothermal well systems, a check list for a geothermal energy project, and a sample calculation for the heat flow to a geothermal well.</p> <p>The project clarified the main stages of the design of a geothermal well system. The results can be used as a basis for further research and for the development of manuals for geothermal energy systems.</p>	
Keywords	geothermal energy, geothermal well, geothermal system, renewable energy sources.

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Lämpökaivojen lämmönsiirtymisen mallit	2
2.1	Lämpökaivon ulkopuolinen lämmönsiirtyminen	2
2.2	Lämpökaivon sisäpuolinen lämmönsiirtyminen	4
2.3	Analyttisten ja numeeristen mallien vertailu	5
3	Maaperän lämpökäyttäytyminen ja esimerkkilaskelma	7
3.1	Laskelman periaatteet	8
3.2	Lähtötiedot	9
3.3	Tulokset ja niiden epävarmuustekijät	9
4	Järjestelmien kuvaus ja vertailu	10
4.1	Pohjavesijärjestelmä	10
4.2	Pintavesijärjestelmä	11
4.3	Lämpökaivojärjestelmä	11
5	Lämpökaivojen mitoituksesta	12
5.1	Maaperätutkimus sekä TRT- ja DTS-mittaukset	12
5.2	Kohteen lämmitys- ja jäähdytystarpeet	15
5.3	Rakennusluvan erityisehdot ja kohteen erityisvaatimukset	16
5.4	Laitos ja sen käyttötapa	16
6	Lämpökaivoihin perustuvan maalämpöhankkeen muistilista	17
7	Nykyiset mitoitusmenetelmät ja ongelmakohtat	18
7.1	Suunnittelun nykyiset periaatteet	18
7.2	Tietokoneohjelmat lämpökaivojärjestelmien suunnitteluun ja simulointiin	19
8	Lämpökaivojärjestelmiä hyödyntäviä esimerkkikohteita	19
9	Suunnittelunäkökohtia	22
9.1	Lähtötietojen selvitys	22
9.1.1	Kustannus- ja kannattavuusselvitys	22
9.1.2	Maaperätutkimus	23

9.1.3	Kohteen lämmitys- ja jäähdytystarpeet	24
9.1.4	Rakennuslupa ja kohteen erityisvaatimukset	24
9.1.5	Laitos ja sen käyttötapa	25
9.1.6	Kohteen sijainti ja olosuhteet	26
9.2	Lämpökaivon mitoitus ja sijoittaminen	27
9.3	Laitteiston suunnittelu	29
9.3.1	Lämpöpumppu	29
9.3.2	Putkisto	31
9.3.3	Lämmönsiirtoaine	38
9.4	Lämpökaivojärjestelmän käyttöikä ja huoltotarpeet	39
10	Yhteenveto ja johtopäätökset	40
	Lähteet	42
	Liitteet	
	Liite 1. Maaperän lämpökäyttämisen esimerkkilaskelma	

1 Johdanto

Lämpökaivojen käyttö rakennuksen lämmityksessä on lisääntynyt energian hinnan nousun ja ympäristövaatimusten kiristymisen myötä. Ilmaston lämpeneminen vaatii uusiutuvien energialähteiden, muun muassa maa- ja kalliolämmön, hyödyntämistä. Lämpökaivo energiantuottojärjestelmänä on myös ympäristön kannalta edullinen ratkaisu, koska sen hiilijalanjälki on pieni. Tämä johtuu ensisijaisesti siitä, että lämpökaivojärjestelmän lämpöpumpun vuosihyötysuhde vaihtelee tyypillisesti välillä 3,5 ... 5 eli järjestelmän vaatima sähköenergian määrä on 29 ... 20 % käyttöön saatavasta energiasta. Koska menetelmä on Suomessa melko uusi, vakiintuneita mitoitusohjeita ei vielä ole yleisesti käytössä. Käyttökokemuksia rakennetuista järjestelmistä ei ole kuin muutamiin vuosien ajalta, minkä vuoksi käytettyjen mitoitusmenetelmien palautteita ei ole paljon saatavissa.

Auringosta varastoituu lämpöenergiaa maa- ja kallioperän lisäksi myös veteen ja ilmaan. Näiden lämmönlähteiden lämpöenergian siirtämiseksi rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen tarvitaan lämpöpumppuja. Erilaisia lämpöpumppuja ovat maalämpö-, poistoilma-, ulkoilmavesi- ja ilmalämpöpumput. Maalämpöpumppuja käytetään kolmen eri lämmönlähteen tapauksessa, joita ovat maaperä, lämpökaivo ja vesistö.

/28/

Työn tavoitteena on kuvata lämpökaivojärjestelmän suunnittelu- ja mitoitusprosessi, sekä laatia suunnitteluohje. Työssä käsitellään lämpökaivoja lämpöpumppujen lämmönlähteenä rakennuksen lämmityskäytössä ja kuvataan mitoitusperiaatteet tällä tekniikalla lämpökaivoja käytettäessä.

Opinnäytetyön tilaaja Hepacon Oy on talotekniikan konsultointipalveluja tarjoava, vuonna 1978 perustettu yritys. Yhtiössä työskentelee noin 40 henkilöä ja sen toimipiste sijaitsee Helsingissä, Malmin konsulttikeskuksessa. Tällä opinnäytetyöllä pyritään antamaan tilaajalle suunnittelutyötä selkeyttävä ohje lämpökaivojen käytöstä lämpöpumppulämmityksessä.

2 Lämpökaivojen lämmönsiirtymisen mallit

Lämpökaivon lämmöntuoton mitoituksessa tarkastellaan erikseen lämpökaivon ulkopuolista ja erikseen sisäpuolista lämmönsiirtymistä.

On olemassa sekä numeerisia että analyttisiä malleja. Numeeriset mallit ovat tarkempia ja monimutkaisempia kuin analyttiset mallit. Analyttisessä tarkastelussa joudutaan olettamaan kallioperä rakenteeltaan homogeeniseksi ja ominaisuuksiltaan isotrooppiseksi, eli suunnasta riippumattomaksi. Äärelliseen elementtimenetelmään pohjautuvilla 3D-malleilla pystytään kuvaamaan lämmönsiirtoa yksityiskohtaisemmin esimerkiksi eri maakerroksissa ja pohjavedessä. /20/

2.1 Lämpökaivon ulkopuolinen lämmönsiirtyminen

1. Kelvinin viivamalli

Kelvinin malli oli ensimmäinen laskumalli lämmönsiirtymisestä lämpöputken ympärillä maassa. Kelvinin mallissa maa oletetaan äärettömäksi lämpötilaltaan muuttumattomaksi väliaineeksi ja lämpökaivoa tarkastellaan äärettömänä viivamaisena lähteenä. Tämä malli jättää huomiotta lämmönsiirtymisen lämpökaivon pituussuunnassa sen ulkopuolella. Näin ollen lämmönjohtumisprosessi maassa pidetään yksiulotteisena. Kelvinin mallia on käytetty laajasti eräissä analyttisissä menetelmissä, joissa tarkastellaan lämmönsiirtymistä lämpökaivossa. /1/

2. Sylinterimalli

Sylinterimallissa lämpökaivo on oletettu äärettömäksi sylinteriksi, jota ympäröi homogeeninen väliaine. Väliaineella katsotaan olevan vakio-ominaisuudet. Tässä mallissa myös oletetaan, että lämmönsiirtyminen lämpökaivon ja maaperän välillä on häviötön ("with perfect contact is of pure heat conduction"). /1/

3. Eskilsonin malli

Kelvinin malli ja sylinterimalli eivät ota huomioon lämpökaivon pystysuuntaista lämpövirtaa. Sen vuoksi kyseiset mallit eivät kuvaa riittävän hyvin lämpökaivon lämpötilan

pitkäaikaista muutosta. Eskilsonin mallissa maan oletetaan olevan homogeeninen, jolla on vakio alku- ja loppulämpötila ("boundary temperature"). Lisäksi lämpökaivon putken ja sisäpuolisen täyteaineen lämpökapasiteetti jätetään huomioimatta. Täyteaine on jälkikäteen kuivaan lämpökaivoon lisättyä vettä tai pohjavettä. Yksi Eskilsonin mallin eduista on se, että sen avulla voidaan tarkastella lämpötilannetta monien lämpökaivojen yhteisvaikutuksesta. Mallilla voidaan ottaa huomioon lämpötilan vaihtelua lämpökaivon ympärillä, joka johtuu vaihtelevista lämmönotto- ja luovutuspulseista. Tämän mallin heikkous on kuitenkin siinä, että se on aikaa vievä eikä sitä voida helposti käyttää suoraan käytännön energialaskenta- ja analyysiohjelmassa. /1/

4. Rajallinen viivamalli

Rajallinen viivamalli perustuu Eskilsonin malliin. Tässä mallissa on tehty seuraavia välttämättömiä oletuksia.

- a. Maata tarkastellaan homogeenisena puoliäärettömänä väliaineena, jonka lämpöfysikaaliset ominaisuudet säilyvät vakiona.
- b. Maanpinnan lämpötila on vakio ja sama alusta alkaen koko tarkasteltavan ajan.
- c. Lämpökaivon säteen suuntainen ulottuvuus jätetään huomioimatta eli lämpökaivo katsotaan viivamaiseksi lähteeksi maanpinnasta tiettyyn tarkastelusyvyteen asti.
- d. Perustapauksessa lämpövirta koko lämpökaivon pituudella oletetaan pysyvän vakiona. /1/

5. Lyhyen ajan askelmalli

Yavuzturk ja Spitler esittivät lyhyen ajan askelmallin (short time-step model), jolla pystytään ottamaan huomioon lämpökaivon, sen putkiston ja täyteaineen, veden, lämpökapasiteetti. Tämä malli on tarkka alle tunnin tarkastelujaksoissa. /1/

6. Muut numeeriset mallit

Kirjallisuudesta voi löytää runsaasti erilaisia teorioita ja laskentamalleja lämpökaivojärjestelmän yksityiskohtien tarkasteluun, esimerkiksi useamman rinnakkaisen U-putken yhteisvaikutuksesta (Muraya 1996). /1/

2.2 Lämpökaivon sisäpuolinen lämmönsiirtyminen

Täyteaineen eli veden ominaisuudet ja lämpökaivon lämpöputkien järjestely vaikuttaa lämpökaivon sisäpuoliseen lämpövastukseen, jolla on merkittävä vaikutus lämpökaivojärjestelmän tehokkuuteen. Lämpökaivon sisäpuolisen lämmönsiirtymisen määrittämisen oleellinen osa on tarkastella lämmönsiirtoliuoksen meno- ja paluulämpötilaa lämpökaivossa suhteessa lämpökaivon seinämän lämpötilaan, sen lämpövirtaan ja lämpövastukseen. /1/ Seuraavat mallit kuvaavat tätä ilmiötä.

1. Yksiulotteinen malli

Yksinkertaistetussa yksiulotteisessa mallissa tarkastellaan U-putkea yhtenä kappaleena. Tässä mallissa lämpökaivon lämpökapasiteetti ja täyteaineen, joka on vettä, ja putken seinämän aksiaalinen lämpövirta katsotaan mitättömiksi suhteessa ulkopuoliseen maahan. Tästä johtuen lämpövirta putken sisällä on likipitään tasainen. Menetelmän kehittäjien mukaan yksiulotteinen malli on riittävä tavanomaisiin mitoitus tapauksiin. Kuitenkin tämä malli on riittämätön, jos halutaan ottaa huomioon U-putken haarojen lämpötilojen vaikutukset toisiinsa. Sen vuoksi on kehitetty myös kaksiulotteinen malli, joka esitellään seuraavassa. /1/

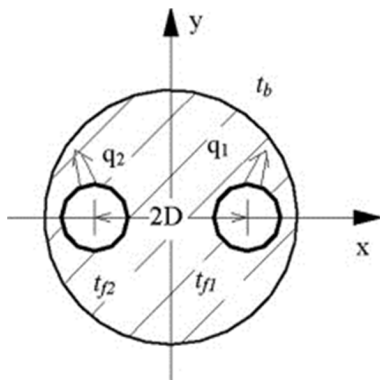
2. Kaksiulotteinen malli

Kaksiulotteinen malli (Kuva 1) esittää ratkaisun putkien välisen lämpövastuksen määrittämiseen lämpökaivoa vastaan kohtisuorassa tasossa. Kuvassa on esitetty jäähdytystapaus, jossa U-putkesta virtaa lämpöä lämpökaivoon. Voidaan olettaa, että lämmitystapauksessa periaate on vastaava paitsi, että lämpökaivosta virtaa lämpöä U-putkiin eikä toisin päin. U-putken molemmat haarat käsitellään erikseen. U-putken haarojen lämpötilat saadaan seuraavasta kaavasta (kaava 1), kun otetaan vertailupisteeksi lämpö-

kaivon seinämän lämpötila, jonka oletetaan myös olevan tasainen lämpökaivon syvyydellä. /1/

$$\begin{cases} t_{f1} - t_b = R_{11}q_1 + R_{12}q_2 \\ t_{f2} - t_b = R_{12}q_1 + R_{22}q_2 \end{cases} \quad (1)$$

Kaavassa 1 R_{11} ja R_{22} ovat lämpövastuksia U-putken haaroissa virtaavien nesteiden ja lämpökaivon seinämän välillä, R_{12} on U-putken haarojen välinen vastus ja t_{f1} ja t_{f2} ovat U-putken haaroissa virtaavien aineiden lämpötilat sekä q_1 ja q_2 lämpötehot. /1/



Kuva 1. Kaksiulotteinen malli.

3. Näennäiskolmiulotteinen malli

Tämä malli ottaa huomioon edellisen mallin lisäksi myös nesteen lämpötilan vaihtelun lämpökaivon syvyydellä. /1/

2.3 Analyttisten ja numeeristen mallien vertailu

Numeeriset mallit ovat analyttisiä malleja joustavampia ja tarkempia erityisesti lyhyen aikavälin laskentatapauksissa, mutta laskennallisesti epäkäytännöllisempiä monimutkaisuutensa ja laajuutensa vuoksi. Monimutkaisuuden takia numeerisia malleja on hankalaa liittää sellaisenaan suunnittelu- ja energia-analyysiohjelmiin, ja ne vaativat suurikokoisen tietokannan. /1/

Analyttiset mallit perustuvat usein oletuksiin ja yksinkertaistuksiin monimutkaisten algoritmien ratkaisemiseksi. Analyttisten mallien perusidea, jossa oletuksena on vii-

vamainen lämpölähde lämpökaivon keskellä, ei ota huomioon lämpökaivossa olevan U-putken todellista kokoa, minkä vuoksi tulokset ovat hieman epätarkempia numeerisiin malleihin verrattuna. Laskennallisesti analyttiset mallit vievät huomattavasti vähemmän aikaa ja ovat sellaisenaan liittämiskelpoisia erilaisiin suunnittelu- ja simulointiohjelmiin. Taulukoissa 1 ja 2 on yhteenveto lämpökaivon sisä- ja ulkopuolisen lämmönsiirtymisen laskentamalleista ja niiden ominaisuuksista. /1/

Taulukko 1. Lämmönsiirron mallien vertailu. Lämpökaivon ulkopuolinen lämmönsiirtyminen. /1/

Lämmön siirtyminen	Malli	Menetelmä	Terminen vuorovaikutus porareikien välillä	Reunailmiö
Lämpökaivon ulkopuolella	Kelvinin viivamalli	Ääretön viivälähde	Kyllä	Ei
	Sylinterimalli	Ääretön sylinterilähde	Kyllä	Ei
	Eskilsonin malli	Numeeriset ja analyttiset yhdistelmät	Kyllä	Kyllä
	Rajallinen viivamalli	Analyttinen	Kyllä	Kyllä
	Lyhyen ajan askelmalli	Numeeriset	Kyllä	Kyllä

Taulukko 2. Lämmönsiirron mallien vertailu. Lämpökaivon sisäpuolinen lämmönsiirtyminen. /1/

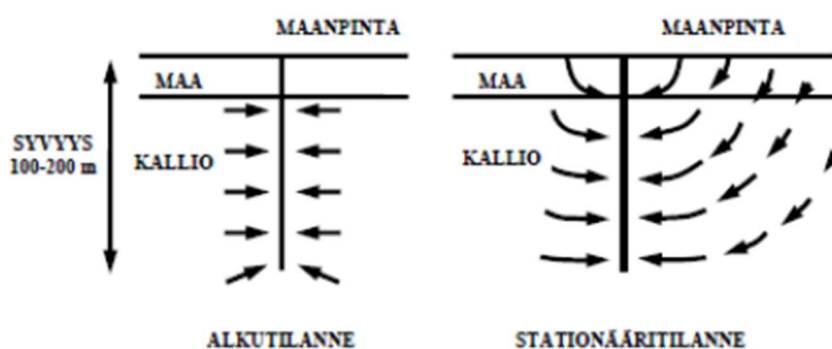
Lämmön siirtyminen	Malli	Terminen vuorovaikutus U-putken haarojen välillä	Lämpövirta lämpökaivon syvyysuunnassa
Lämpökaivon sisäpuolella	Yksiulotteinen malli	Ei	Ei
	Kaksiulotteinen malli	Kyllä	Ei
	Näennäiskolmiulotteinen malli	Kyllä	Kyllä

3 Maaperän lämpökäyttäytyminen ja esimerkkilaskelma

Suomessa geoenergiakohteet ovat yleensä lämmityspainotteisia, jolloin kallioperä jäähtyy vuosien kuluessa. Alkutilanteessa lämpövirta lämpökaivoon on radiaalista, mutta lämmönoton jatkuessa siirrytään kohti stationääritilannetta, jolloin yhä suurempi osa lämmöstä on peräisin maanpinnalta (Kuva 2). Stationääritilanteessa auringosta tuleva lämpöenergia kompensoi kaivosta otettavaa energiamäärää. Kun stationääritilanne on saavutettu, tyypillisen lämpökaivon tapauksessa noin 25 vuoden jälkeen, ja oletetaan, että maanpinnan keskilämpötila on vuosittain vakio, syntyy kolmiulotteinen virtaustilanne, jossa maanpinta toimii positiivisena termisenä rajapintana. /12; 20/

Vuosien kuluessa lämpövirran osuudet maanpinnalta ja kaivoa ympäröivästä kalliosta muuttuvat siten, että 25 lämmönottovuoden jälkeen 32 % lämpövirrasta on peräisin maanpinnalta ja 68 % kallioperästä. 100 vuoden kuluttua molemmat osuudet ovat noin 50 % ja tuhannen vuoden päästä 85 % maanpinnalta sekä 15 % kallioperästä. /12/

Lämpökaivon lämpötilaan lämmönotto vaikuttaa siten, että kaivon lämpötilan laskusta kolmasosa tapahtuu ensimmäisen lämmönottopäivän aikana ja kaksi kolmasosaa kahden ensimmäisen kuukauden aikana. Nopeahkon lämmönlaskun seurauksena lämpökaivon lämpötila stabiloituu eikä siis muutu enää juuri ollenkaan. Esimerkiksi aikavälillä 25–500 vuotta lämmönoton aloituksesta on kaivossa tapahtuva lämpötilan lasku vain 5 %. /12/



Kuva 2. Lämpökaivon latautuminen /12/.

3.1 Laskelman periaatteet

Tätä työtä varten lämpökaivon ja sitä ympäröivän maaperän ominaisuuksien tarkastelun vuoksi laadittiin Excel-laskentataulukko, joka noudattaa yksiulotteista lämmönsiirtymismallia. Nimensä mukaisesti malli perustuu yksiulotteisuuteen, jolloin tarkasteluun otetaan vain lämpökaivoa vasten vaakasuoraan kohdistuva lämpövirta. Kyseisessä lämmönsiirtymismallissa oletetaan, että lämpökaivo on sisältä homogeeninen ja sen lämpötila on vakio. Lisäksi yksinkertaisuuden vuoksi mallissa on valittu tarkkailukohteeksi lämpökaivon korkeuden suuntainen 1 metriä korkea alue, jonka oletetaan toistuvan samanlaisena lämpökaivon syvyydellä. Mallista saadaan lopputuloksena esimerkiksi 200 metriä syvästä lämpökaivosta saatava keskimääräinen lämpöteho valitun ajanjakson aikana.

Lämmönsiirtymismallin perusajatukset ovat seuraavat. Lämpökaivoa ympäröivä, leveysuunnassa tietyn suuruinen alue koostuu pienemmistä vyöhykkeistä. Näitä vyöhykkeitä kutsutaan donitseiksi. Jokaisella donitsilla on tietty lämpökapasiteetti annettavanaan lämpökaivolle. Lämpökapasiteetti riippuu donitsin koosta, joka taas tulee donitsin etäisyydestä edelliseen. Alussa lämpöä oletetaan virtaavan vain lämpökaivoon nähden lähimmästä donitsista. Tämä alkuvaihe kestää niin lyhyeen ajan, että käytännössä lämpö virtaa heti alusta saakka jokaisesta donitsista. Tietyn ajan kuluttua lämmön oletetaan virtaavan seuraavaksi uloimmalta donitsilta ja niin edelleen. Tämä ajan muutos on ohjelmassa syöttötieto, esimerkiksi 0,4 h. Mitä pienemmän ajan muutoksen malliin syöttää, sitä paremmin tulokset vastaavat todellisuutta. Tarkalleen todellisuutta vastaavassa laskelmassa tulisi lämpövirta integroida ajan suhteen. Lämmönsiirtymismalli laskee jokaisen donitsin osalta donitsissa vallitsevat alku- ja loppulämpöenergiakapasiteetit. Näin ollen ensimmäisen, lämpökaivoa lähimpänä olevan donitsin, alku- ja loppulämpöenergiakapasiteettien erotuksen perusteella kullakin ajanhetkellä saadaan lämpökaivolle tarjottava lämpöenergia. Lisäksi lämpöenergiakapasiteettien avulla malli laskee donitsin alku- ja loppulämpötilat eri ajankohtina, jolloin tuloksena nähdään esimerkiksi maaperän jäähtyminen ajan suhteen jokaisessa donitsissa.

3.2 Lähtötiedot

Lähtötietoina mallissa ovat seuraavat syöttöarvot, porakaivon halkaisija, maaperän lämmönjohtavuus, maan alkulämpötila, porakaivon lämpötila, maalajin tiheys ja ominaislämpökapasiteetti sekä lämpökaivon syvyys. Lisäksi lähtötiedoksi muutettavina syöttöarvoina on myös etäisyys lämpökaivosta maaperässä sekä etäisyyden muutoskerroin. Viimeisenä lähtötietona lämmönsiirtymismalliin syötetään ajan muutos delta-h. Kuva 3 on esitetty esimerkkitapauksen lähtötietojen kuvankaappaus mallin Excel-tiedostosta.

Syöttötiedot on merkitty keltaisella.

Lämpökaivon halkaisija	d_r	0,2 m
Lämmönjohtavuus	λ	3,25 W/°Cm
Maan alkulämpötila	t_{maa}	8 °C
Lämpökaivon lämpötila	t_r	0 °C
Tiheys	ρ	2750 kg/m ³
Ominaislämpökapasiteetti	c_p	1,5 kJ/kg°C graniitti
Lämpökaivon syvyys	h_r	200 m
Etäisyys lämpökaivosta	d_1	0,5 m
Etäisyyden muutoskerroin	emk	1,2
Ajan muutos	d_h	0,4 h

Kuva 3. Lämmönsiirtymismalli, esimerkkitapauksen lähtötiedot.

3.3 Tulokset ja niiden epävarmuustekijät

Edellä esitetyillä, esimerkkitapauksen lähtötiedoilla, Excel-laskentataulukolla laadittu lämmönsiirtymismalli antaa yhden 200 m syvän lämpökaivon keskimääräiseksi lämmitystehoksi 3,3 kW, joka vastaa 47,3 kWh/m energiaa kaivometriä kohti 118 päivän valitulla ajanjaksolla. Tämän ajanjakson aikana maaperän lämpötila laskee lämpökaivoa lähimpänä olevan donitsin osalta 8 °C:sta 2,3 °C:seen. Esimerkkitalauksessa lämpökaivon lämpötilaksi on otettu 0 °C. Jos oletetaan, että lämpökaivon lämpötila voi laskea lämmityskauden aikana -3 °C:seen, nousee lämpökaivosta saatava energiamäärä noin arvoon 65 kWh/m. Toisaalta peräkkäisten lämmityskausien jälkeen maaperän lämpötila ei todennäköisesti ehdi palautua 8 °C:seen. Esimerkkilaskelmassa lämpökaivon lämpöti-

laksi on oletettu 0 °C, vaikka tavanomaisessa käyttötilanteessa lämpökaivon lämpötila voi laskea jopa -4 °C:seen. Jos maalämpöjärjestelmää käytetään kesäisin tilojen jäädytykseen ja lauhdelämpö vietään maaperään, sen lämpötila nousee, minkä ansiosta lämpöä voidaan ottaa enemmän.

Mallista saadut tulokset eivät ole tarkkoja, mutta ovat havainnollistavia ja suuntaa antavia. Epätarkkuutta aiheuttavat seuraavat seikat.

1. Veden virtaamaa ei huomioida. Vedellä on hyvä ominaislämpökapasiteetti ja runsas veden virtaama kuljettaa siten tehokkaasti lämpöä lämpökaivon laajemmalla alueelta.
2. Lämmönsiirtymisen yksiulotteinen tarkastelu ei huomioi muun muassa alhaalta vaikuttavaa geotermistä lämpövirtaa.
3. Mallissa oletetaan, että lämpövirta lämpökaivoon pienenee valitun ajan jakson alusta alkaen, mikä ei vastaa todellista lämmönottoa lämmityskauden aikana. Lämmityskauden huipputehontarve sijoittuu Suomessa ajanjaksolle tammikuu - helmikuu.

4 Järjestelmien kuvaus ja vertailu

4.1 Pohjavesijärjestelmä

Pohjavesijärjestelmä perustuu kahteen pystykaivoon, joista toinen on lämmönlähteenä toimiva pohjavesikaivo ja toinen pohjaveden purkukaivo (Kuva 4). Lämmönlähteestä kierrätetään lämpöpumpulla lämpöä käyttökohteisiin, esimerkiksi rakennuksen tiloihin. Käytetty, lämmitykseen hyödynnetty vesi palaa lämpöpumpun kautta pohjaveden purkukaivoon. Näin muodostetaan niin sanottu avoin piiri. Järjestelmän hyvät puolet ovat sen edullinen hankintakustannus ja vähäinen maapinta-alan tarve verrattuna muihin järjestelmiin. Pohjavesijärjestelmän laajempaa käyttöä heikentää muun muassa pohjaveden rajoitettu saatavuus ja korkeat, korroosiosta sekä tukkeutumista, johtuvat huoltokustannukset. Lisäksi pohjaveden käyttöön lämmönlähteenä saattaa liittyä viranomaissäädöksiä, jotka rajoittavat järjestelmän käyttöä. /1/

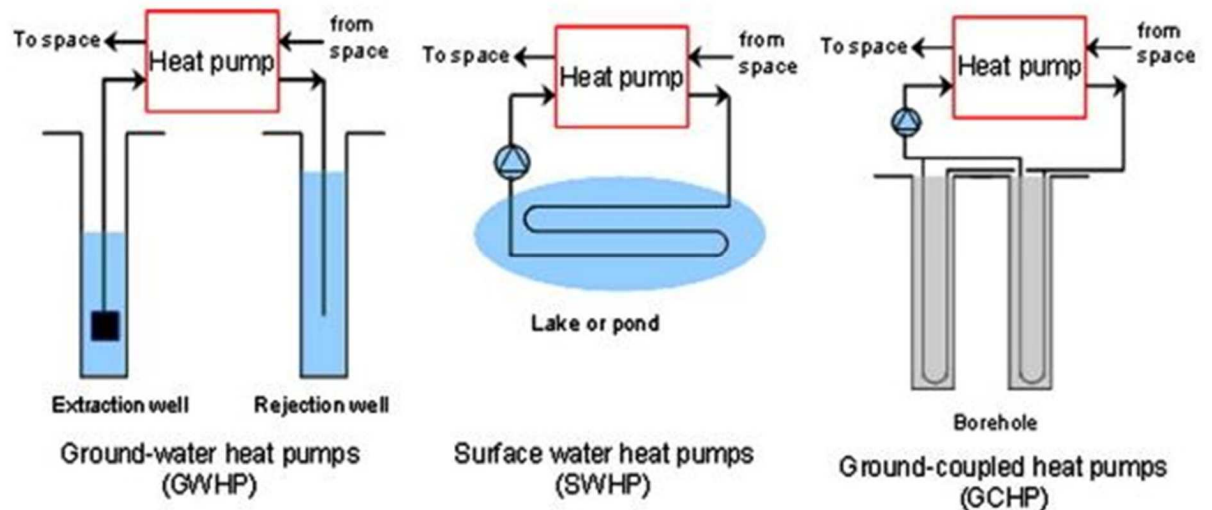
4.2 Pintavesijärjestelmä

Pintavesijärjestelmä pohjautuu osin pohjavesijärjestelmän peruseräiteeseen, mutta se on suljettu piiri (Kuva 4). Lisäksi kaivojen sijasta pintavesijärjestelmässä lämmönlähteenä ja samalla purkualueena käytetään esimerkiksi luonnon järveä tai tekojärveä. Lämmönsiirto tapahtuu pintaveden asennetussa polyeteeniputkistossa, jonka sisällä virtaavan lämmönsiirtoliuoksen avulla lämpö pumpataan lämmönlähteen kautta käyttökohteisiin ja jäädytettävistä tiloista lämpöä palautetaan lämpöpumpun kautta takaisin lähteeseen. Pintaveden lämpötilan vaihtelevuus vuodenaajasta riippuen on pintavesijärjestelmässä merkittävä haittapuoli. Toisaalta pintavesijärjestelmä saattaa vaatia vähemmän putkimetrejä kuin esimerkiksi lämpökaivojärjestelmä ja on halvempi toteuttaa, jos riittävän suuri vesialue on käytettävissä. /1/

4.3 Lämpökaivojärjestelmä

Lämpökaivojärjestelmä on toinen suljetun piirin maalämpöpumppujärjestelmä (Kuva 4). Se voidaan toteuttaa joko vaakasuorina kaivantoina tai pystysuorina porareikinä. Vaakasuorassa kaivannossa polyeteeniputkisto asennetaan pituussuuntaisena noin 1–2 metrin syvyyteen maaperään. Koska putkisto on suhteellisen lähellä maanpintaa, on vaakasuora kaivanto alttiimpi ympäristön lämmönvaihteluille pystysuoriin porareikiin verrattuna. Lisäksi vaakasuora kaivanto vaatii paljon enemmän maapinta-alaa kuin pystysuorat porareivät. Sekä vaakasuorissa kaivannoissa, että pystysuorissa porareifissä lämmönsiirto toteutuu samalla periaatteella kuin pintavesijärjestelmässä eli putkiston sisällä virtaavan lämmönsiirtoliuoksen avulla. /1/

Pystysuorat porareivät ovat tavallisesti noin 20–200 m syviä ja halkaisijaltaan 100–200 mm. Ruotsalaisen Accio-yrityksen tutkimustulosten perusteella halkaisijaltaan 115 mm porareikä antaisi parhaan tehon. Suurin osa Suomessa porattavista rei'istä onkin nykyisin 115 mm. Porareian sisällä on kaksi putkea, jotka yhdistetään alapäästä liitoskappaleella U-putkeksi. U-putken halkaisija on tyypillisesti 19–38 mm, ja sen sisällä virtaa lämmönsiirtoliuos. Lämpökaivojärjestelmä voi koostua yhdestä, kymmenistä ja tai jopa sadoista porareifistä. Lämpökaivon ja U-putken välinen alue täytetään Suomessa vedellä, mutta joissain maissa esimerkiksi Ruotsissa, käytetään täyteaineena myös betonilaastia, jolla pyritään estämään pohjaveden saastumista. /1; 2; 27./



Kuva 4. Lämpöpumpujärjestelmät. Pohjavesi-, pintavesi- ja porareikäjärjestelmä /1/.

5 Lämpökaivojen mitoituksesta

Ennen kuin mitoitus aloitetaan, kannattaa lämpökaivojärjestelmän toteutusmahdollisuus ja kannattavuus selvittää kustannuslaskelmalla. Lämpökaivojärjestelmien mitoituksen lähtökohtia ovat seuraava /3/:

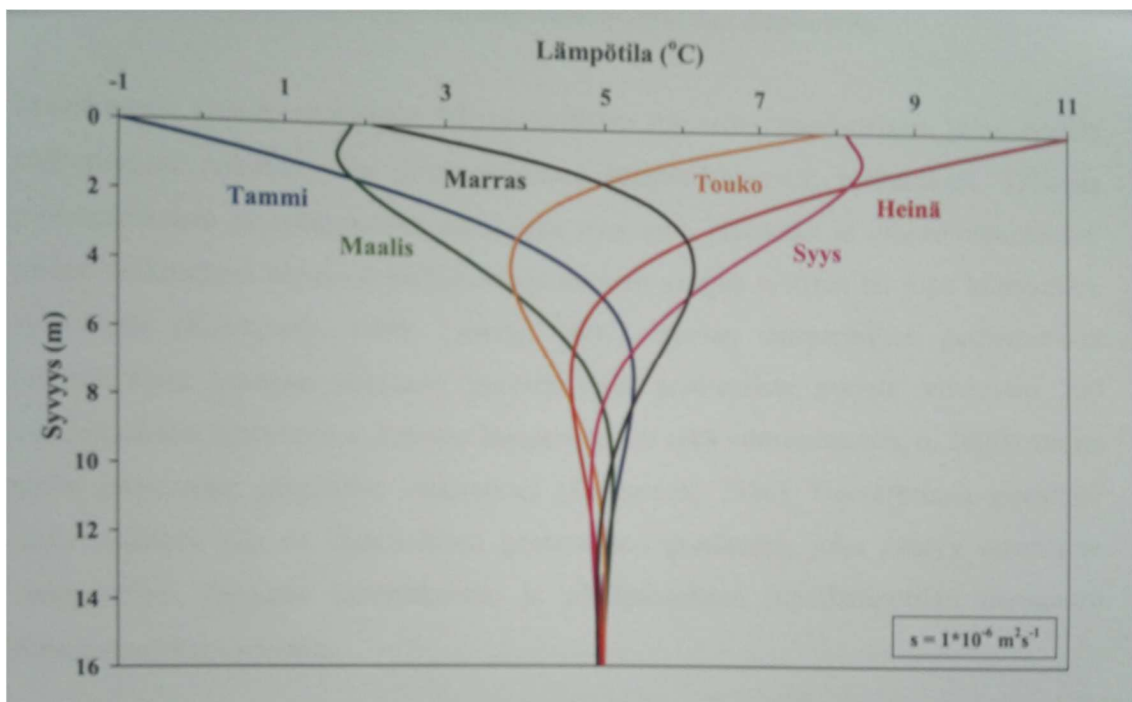
1. Maaperän rakenne ja lämpötekniset ominaisuudet, joka selvitetään maaperätutkimuksella
2. Kohteen lämmitys- ja jäähdytystarpeet
3. Rakennusluvan erityisehdot ja kohteen erityisvaatimukset
4. Laitos ja sen käyttötapa.

5.1 Maaperätutkimus sekä TRT- ja DTS-mittaukset

Maaperätutkimus tehdään ennen rakennuksen perustöiden aloittamista. Tutkittavaa aluetta voidaan tarkastella karttatiedon perusteella, katselmoida pintapuolisesti paikan päällä tai tarkemmin maaperäkairauksella. Maaperätutkimuksen tavoite on pääsääntöisesti saada selville alueen rakennettavuuteen vaikuttavat asiat ja se, miten ne tulee huomioida perustuksissa yms. maanalaisissa rakenteissa. Kairamalla saadaan tarkkaa

tietoa maalajikerroksista. Lisäksi kairaamalla voidaan selvittää kalliopinnan syvyys, jolla on merkitystä lämpökaivojen porauksen kannalta. Maaperätutkimuksen kustannuksiin vaikuttaa suuresti tutkimuksen laajuus, koska kairaaminen on kallista, mutta arviolta kustannus on noin tuhannesta eurosta ylöspäin. /20/

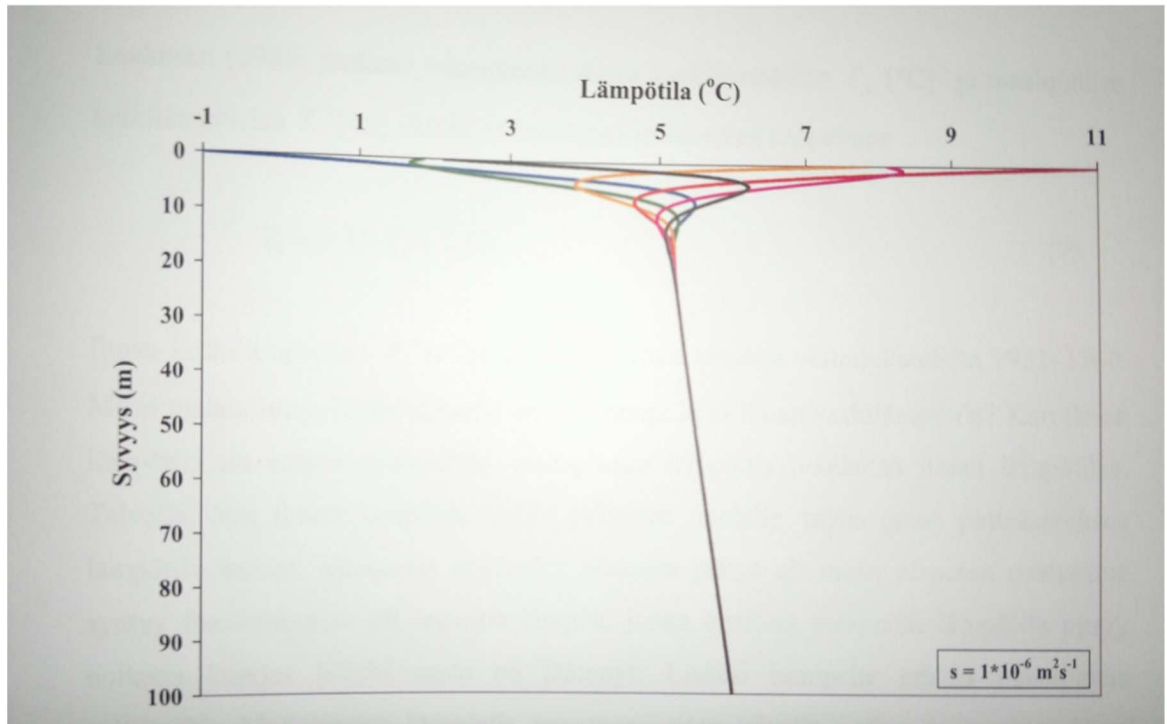
Tarkemmin sanottuna maaperätutkimuksella selvitetään maaperän tehollinen lämmönjohtavuus ja sen lämpötilavaihtuvuus. Maaperän tehollinen lämmönjohtavuus ottaa huomioon paitsi johtumisen, myös pohjaveden vaikutuksen, joiden lisäksi se riippuu muun muassa maa-, kivilajista ja maaperän kosteudesta. Lämmönjohtavuus on irtomaalajeilla luokkaa 1–1,5 W/Km ja suomalaisen kallioperän osalta 2,5–3,5 W/Km. Maaperän tehollinen lämmönjohtavuus voi kuitenkin vaihdella välillä 1,5–6 W/Km, jonka vuoksi maaperän ominaisuudet on tärkeää tuntea tarkasti ennen suunnitteluprosessin aloitusta yli- tai alimitoituksen välttämiseksi. Vuodenaikojen vaihtelut vaikuttavat maaperässä noin 15 metrin syvyyteen, minkä jälkeen lämpötila pysyy siltä osin vakiona (Kuva 5 ja Kuva 6).



Kuva 5. Maanpinnan (0–16 m) teoreettiset lämpötila-syvyyskäyrät joka toiselle kuukaudelle /12/.

Etelä-Suomessa maaperän lämpötila on 100 metrin syvyydessä noin 7–8 °C ja lämpötilan nousee 1–1,5 °C/100 m alaspäin mentäessä. Tästä johtuen Suomessa maaperän geotermisen lämmön merkitys on vähäinen, koska lämpötila nousee hitaasti syvyysmetriä kohden ja siihen vaikuttava geotermisen lämpövuo on pieni: 0,03–0,07 W/m².

Koska geotermisen lämmön osuus on Suomessa vähäinen, tulee lämpökaivon lämpö sitä ympäröivästä massasta johtumalla. Muualla, esimerkiksi joillain alueilla Euroopassa, geotermien lämpövuoto on noin $0,1 \text{ W/m}^2$. /3/ Maaperätutkimus on yleisesti ottaen Suomessa melko harvinaista, koska kalliolaatu tunnetaan sen verran tarkasti, ettei maaperätutkimukseen aina kannata panostaa /16/.



Kuva 6. Maaperän (0-100m) teoreettiset lämpötila-syvyyskäyrät joka toiselle kuukaudelle /12/.

Maaperätutkimusta vastaava toimenpide, TRT-mittaus (Thermal Response Test) eli terminen vastetesti tehdään yleensä suuren, monista lämpökaivosta koostuvan geotermiajärjestelmän suunnittelua ja mitoitus varten. TRT-mittaus on suurilla geotermiakentillä välttämätön, jotta energiakentän ja -järjestelmän toimivuus voidaan optimoida välttämättä muun muassa ali- tai ylimitoitus. TRT-mittauksia suorittaa GTK ja niitä tehdään kohteesta riippuen vähintään yksi ja tarpeen vaatiessa maksimissaan kolme. /23/

TRT-mittauksen tuloksista tulkitaan lämmönsiirtoon vaikuttavat ominaisuudet, kuten kallioperän tehollinen lämmönjohtavuus ja energiakaivon lämpövastus ja niiden perusteella päätellään, miten hyvin kyseinen alue soveltuu geotermian tuotantoon. Toisin sanoen mitataan, kuinka paljon kallio pystyy vastaanottamaan lämpöä. TRT-tutkimus koostuu mittauskohteesta tehtävästä kenttätyöstä sekä mittauksessa kertyneen datan

analysoinnista ja hyödyntämisestä. GTK:n toimeksiannot ovat asiakkaan kohteen mukaan yksilöityjä ja hinnoitellaan sen mukaan. Suurissa kohteissa TRT-mittauksen kustannus maksaa itsensä heti takaisin, kun lämpökaivojärjestelmän mitoitus voidaan optimoida. /20; 23./

Lämpökaivojen lämpötilaseuranta voidaan toteuttaa DTS-mittauksella (Distributed Temperature Sensing). DTS-mittauksia tekee GTK ja menetelmä perustuu optiseen lämpötilamittaukseen valokuidusta DTS-laitteella. Valokuitukaapeli lasketaan mittauskaivoon ja siihen lähetetään DTS-laitteella laserpulssit. Näin saadaan lämpötilat mitatuksi samanaikaisesti kaivon pituudelta jopa puolen metrin välein ja 0,1 °C:n tarkkuudella. Valokuitukaapeli voi olla maksimissaan neljä kilometriä pitkä, mutta sen pituus ei vaikuta mittauksen keston, sillä pituudesta riippumatta kesto on muutamasta minuutista puoleen tuntiin. DTS-menetelmän käyttö on hyödyllistä paitsi kentän seurannan kannalta myös tutkimusmielessä. Seurantamittausten perusteella voidaan analysoida lämpökaivon ja -kentän käyttäytymistä ja esimerkiksi mahdollista rakennuksen lämmönvuotoa. /24/ Jos rakennuksessa ilmenee lämmönvuotoa maaperään, se voidaan havaita DTS-menetelmällä, koska lämpökaivon tai -kentän lämpötilaseurannassa havaitaan tällöin lämpötilan nousua.

5.2 Kohteen lämmitys- ja jäähdytystarpeet

Toinen lämpökaivojärjestelmän mitoituksen lähtökohta on suunnittelukohteen lämmitys- ja jäähdytystarpeiden määrittäminen riittävällä tarkkuudella. Tämä tapahtuu laatimalla lämmityksen ja jäähdytyksen tehoprofiilit eli pysyvyytkuvaajat, joissa kuvataan lämpöteho tai jäähdytystehontarve ajan funktiona. Lämmitys- ja jäähdytystarpeiden määrittäminen saattaa olla hankalaa. Esimerkiksi uusiin toimistorakennuksiin sovellettavat uudet rakentamismääräykset ja sisäisten jäähdytyskuormien ennustettavuus aiheuttavat epävarmuutta (esimerkiksi serveritilat). Tämä on merkittävä ongelma, koska lämpökaivojärjestelmä tulisi suunnitella ja asentaa ennen muun rakentamisen alkua eli projektin alkuvaiheessa. Toisin sanoen lämpökaivojärjestelmää on työlästä muuttaa jälkikäteen, mikä lisää suunnittelulähtökohtien tarkan määrittämisen tärkeyttä esimerkiksi lämmitys- ja jäähdytystarpeiden osalta. /3/

5.3 Rakennusluvan erityisehdot ja kohteen erityisvaatimukset

Lämpökaivojärjestelmän mitoituksen lähtökohtana selvitetään myös mahdolliset kohteeseen liittyvät erityispiirteet. Näitä ovat rakennusluvan erityisehdot ja kohteen erityisvaatimukset. Rakennusluvan erityisehtoja ovat esimerkiksi suojaetäisyydet naapuriin ja tunneleihin sekä porareikiin liittyvät ehdot kuten reikien suunta, poraamisen tarkkuusvaatimus ja porareian sijainnin mittaaminen jälkikäteen. /3/

Lämpökaivojärjestelmään liittyvistä lupa-asioista on lisää luvussa 9.1.4.

5.4 Laitos ja sen käyttötapa

Itse laitos ja sen käyttötapa tulee myös määrittää. Suunnittelussa kokonaisvirtaamat mitoitetaan höyrystiniirin optimivirtaaman mukaiseksi. Jos maalämpöpiiriin ajetaan suuria lauhdelämpöjä, tulee järjestelmän rakenteeseen erityisvaatimuksia muun muassa suurten hetkellisvirtaamien ja lämpötilaerojen vuoksi. Yleisesti ottaen lämpökaivojärjestelmän suunnittelussa teknisen eliniän pitäisi olla vähintään 50 vuotta, jonka ajan järjestelmän tulisi toimia teknisesti ja rakenteen kestää. Mitoituslähtökohtana pidetään sitä, että lämmönsiirtoliuospiirin keskilämpötilan muutosnopeus ei ylitä $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C/v}$. Lisäksi yli- tai alimitoittamisen välttäminen on tärkeää. Ylimitoitus lisää jo muutenkin investoinniltaan kalleimman lämmönkeräysmenetelmän kustannuksia. Vähäisen alimitoituksen seurauksena maamassan lämpötila laskee nopeammin, mikä vähentää lämpöenergiansaantia. Merkittävä alimitoitus johtaa lämpöenergiansaannin tyrehtymiseen ja siten järjestelmän toiminnallisiin ongelmiin. /3/

6 Lämpökaivoihin perustuvan maalämpöhankkeen muistilista

Lämpökaivojärjestelmään perustuvan maalämpöhankkeen toteuttajan kannattaa huomioida seuraavat asiat /3/:

1. Selvitys siitä, onko ratkaisu kustannustehokas eli kannattava ja toteuttamiskelpoinen eli mahdollinen.
2. Hankkeen luvansaantimahdollisuuksien ja naapurien mielipiteen selvittäminen. Lisäksi lupaviranomaiset voivat vaatia erilaisia lisäselvityksiä.
3. Investointiin ja lupa-asioihin vaikuttavien lämmönlähteiden selvittäminen etukäteen, mihin kuuluvat maaperätutkimus lämpökaivojen lämmönvastemittauksiin ja vesistömittaukset vesistöputkistojen kartoituksiin.
4. Lämmön- ja jäähdytyksen tarpeiden mitoittaminen lämpökaivohankkeessa 20 %:n tarkkuudella, jotta muutoinkin korkea investointikustannus saataisiin pysymään minimissään.
5. Teknisen tilan tarve. Mitä energiatehokkaampi ratkaisu halutaan, sitä enemmän tilaa maalämpökeskus vaatii. Laitteet itsessään ovat melko halpoja, mutta vievät tilaa ja tilakustannus on osa kokonaishinnasta.
6. Mahdollisten suurien kompressorien äänekkyyden huomioon ottaminen maalämpökeskustilan sijoittamisessa ja äänieristeissä.
7. Lämpöpumppukoneiden suoritusarvojen määrittely tarkka. Arvot pitää pystyä todentamaan jälkikäteen. Huomionarvoista on myös se, että eri valmistajien tarjoamat tuotteet vaihtelevat paljon. Toisin sanoen tarjottavien koneiden mitoitusarvoissa ja varusteluissa on merkittäviä eroja, jonka vuoksi niiden suorituskyky tulisi saattaa vertailukelpoiseksi.
8. Suuren lämpöpumppujärjestelmän toteuttaminen erillisurakoina, koska kaikkea vaadittavaa erityisosaamista ei yhdellä toimittajalla ole. Kokonaisuus voidaan

jakaa esimerkiksi lämpöpumppulaitteiden urakkaan, lämpökeskuksen putki-, sähkö- ja automaatiourakkaan sekä lämpökaivourakkaan.

9. Aikataulutus. Hankkeessa tietyt osat tai palvelut voivat viedä paljon aikaa, joka tulee ottaa huomioon aikatauluissa. Lisäksi kokeneista lämpökaivohankkeen suunnittelijoista on pulaa johtuen osittain siitä, että lämpökaivojärjestelmät ovat melko uusi menetelmä ja mitoitusmenetelmät ovat epämääräiset.
10. Ammattitaito. Lämmönkeräysjärjestelmien runkojohtojen ja kaivorakenteiden rakentaminen vaatii erikoisammattilaista. Lisäksi rakenteiden huollettavuus on varmistettava. /3/

7 Nykyiset mitoitusmenetelmät ja ongelmakohdat

7.1 Suunnittelun nykyiset periaatteet

Nykyisissä mitoitusmenetelmissä epätarkkuutta aiheuttavat ”nyrkkisäännöt” ja kokemusperäiset arviot. Lisäksi maaperätutkimuksen tuloksia ei osata riittävästi ottaa huomioon. Lämpökaivojärjestelmien suunnitteluun ei ole saatavissa yleistä koulutusta, jolloin mitoitusmenetelmät eivät ole vakiintuneet alan käyttöön.

Olemassa olevien lämpökaivojärjestelmien käytön aikaista seurantatutkimusta ei ole riittävästi, mikä johtuu osin siitä, että järjestelmiä on rakennettu Suomessa vasta vähän aikaa.

Mitoitusmenetelmien kehitystä viedään kuitenkin Suomessa aktiivisesti eteenpäin sekä laite- että tutkimuspuolella. Laittevalmistajat tekevät mitoitusmenetelmien kehittämiseksi omaa työtään. Tutkimuspuolelta Geologian tutkimuskeskus GTK tekee perustutkimusta mitoituksen tarkkuuden parantamiseksi. Lisäksi GTK tekee energiakaivokenttien mitoitukseen ja TRT-tulosten tulkintaan liittyen kehitystyötä sekä analyyttisellä että numeerisella puolella. Viiva- ja sylinterilähde tulkintaan voidaan rinnastaa myös superpositiomenetelmä, jota myös sovelletaan uusimmissa tutkimuksissa. /20/ Superpositiomenetelmällä voidaan analysoida eri tilanteita yksittäisinä tapauksina ja vasta lopuksi yhdistää ne kuvaamaan monimutkaisempaa tilannetta.

7.2 Tietokoneohjelmat lämpökaivojärjestelmien suunnitteluun ja simulointiin

Lämpökaivojärjestelmien mitoitukseen käytetään useimmiten erilaisia suunnittelu- tai simulointiohjelmiä. Yksi suosituimmista mitoitukseen käytettävistä ohjelmista on Blocconin Earth Energy Designer (EED). EED perustuu Eskilsonin malliin (ks. luku 2.1, kohta 3) Ohjelman käytössä lähtötietoina annetaan maaperän tiedot, jos niitä on saatavissa, käytettävä maa-ala ja lämmityksen ja jäähdytyksen huipputehot sekä vuosienenergia. Maapiirin mitoitukseen vaikuttavat myös lämpö- ja kylmäkertoimet, joten suunnittelu- vaiheessa laitevalmistajat antavat laite-ehdotuksensa. EED:ssä käytetään myös ”nyrkki-sääntöjä,” jolloin mitoituskohteen tulee kuitenkin olla perustapaus ja suunnittelijalla täydellinen ymmärrys siitä, mitä on tekemässä. /4/

8 Lämpökaivojärjestelmiä hyödyntäviä esimerkkikohteita

Lämpökaivojärjestelmiä hyödyntäviä lähivuosina toteutuneita kohteita ovat esimerkiksi Ruusutorpan ala-aste ja Malmin sairaalan laajennus.

Ruusutorpan ala-aste on vuonna 2002 valmistunut Espoon kaupungin ekokokeilurakennus. Rakennuksen jäähdytykseen käytettävän lämpökaivojärjestelmän mitoitti VTT. Tämä kallioenergiaan perustuva järjestelmä on ollut käytössä yhtäjaksoisesti vuodesta 2002 alkaen, ja sillä jäähdytetään ympäri vuoden koulun erityis- ja teknisiä tiloja. Jäähdytettävien tilojen pinta-ala on noin 425 m², ja järjestelmä on toiminut moitteettomasti tuottaen noin 400 MWh jäähdytysenergiaa. Keskimääräinen lämpökaivojärjestelmän jäähdytysteho Ruusutorpan ala-asteella on ollut noin 15 kW. Ruusutorpan ja muiden vastaavien kohteiden seurantatuloksien perusteella kalliojäähdytys energialähteenä on osoittautunut ekologiseksi ja huoltovapaaksi ratkaisuksi. Lisäksi näissä kyseisissä uusiutuvaa energiaa hyödyntävissä kohteissa hiilidioksidipäästöt ovat sähkönkulutussäästöjen vuoksi pienemmät perinteisiin jäähdytysjärjestelmiin verrattaessa. Esimerkiksi Ruusutorpan ala-asteella hiilidioksidipäästöt ovat laskennallisesti vähentyneet noin 150 tonnia käyttöönottopäivästä lähtien kalliojäähdytyksen ansiosta. /5/

Lisäksi esimerkkinä mainittakoon Tom Allen Oy, joka on vuodesta 1994 lähtien suunnitellut ja toteuttanut muun muassa 4000 suomalaisen kotitalouden maalämpöratkaisut. Tom Allen Oy:n referensseihin kuuluu myös useita suurempia kiinteistökohteita, joista

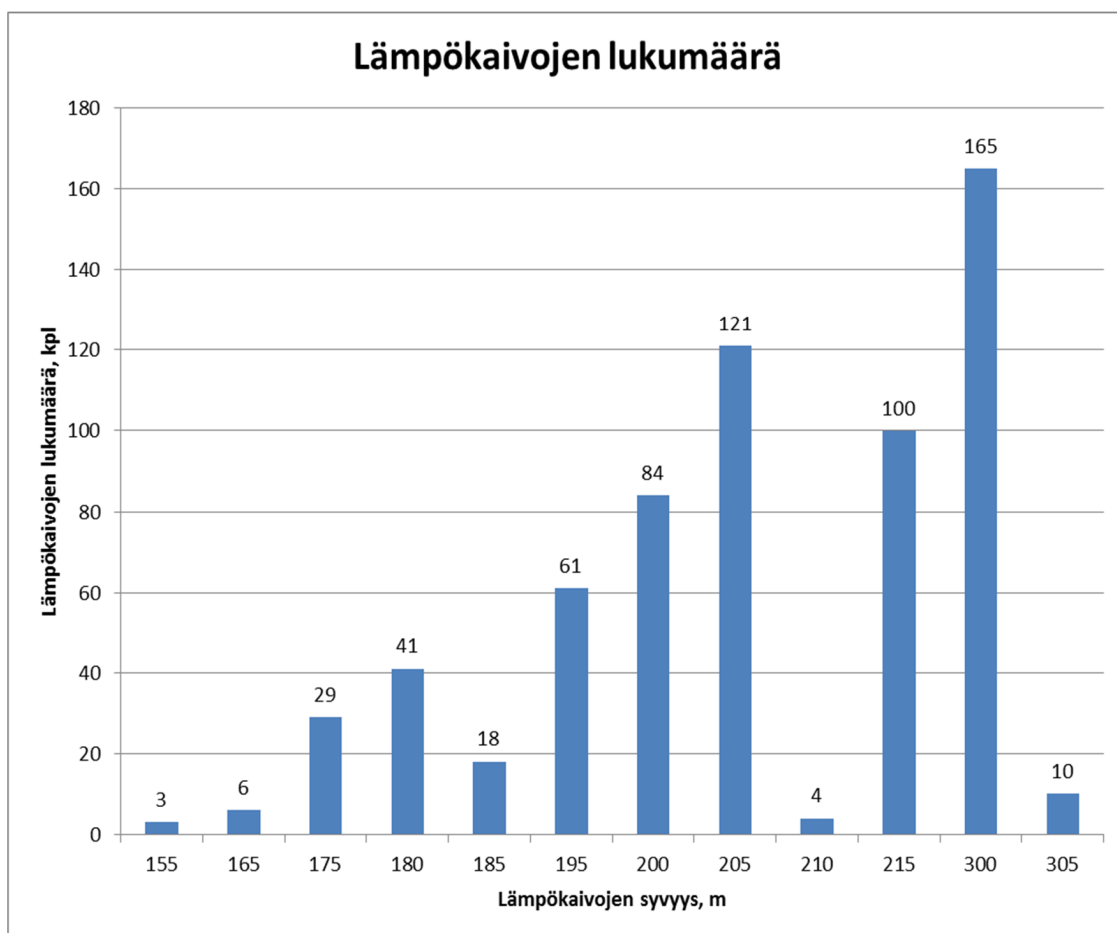
esitetään seuraavassa otanta toteutuneista lämpökaivoratkaisuista (Taulukko 3 ja Kuvio 1) havainnollistamaan kohteiden laajuutta ja yleisempiä lämpökaivojen syvyyksiä. /18/ Taulukossa Taulukko 3 lukumäärät on esitetty eri kohteiden yhteenlaskettuina määrinä, esimerkiksi laskutoimitus 12+5+3+4+5 osoittaa viiden eri kohteen lämpökaivojen lukumäärän.

Taulukko 3. Tom Allen Oy:n toteuttamat suuremmat lämpökaivokohteet /18/.

Lämpökaivojen lukumäärä, [kpl]	Lämpökaivojen syvyys, [m]
3	155
3+3	165
12+5+3+4+5	175
5+4+10+5+5+4+8	180
12+6	185
16+5+4+5+13+12+6	195
20+4+20+24+16	200
6+8+4+3+7+6+7+7+4+7+6+12+10+6 +13+15	205
4	210
24+6+4+19+4+4+6+26+7	215
165	300
*10	*305

*) viilennys

**Kuvio 1. Tom Allen Oy:n suuremmat lämpökaivokohteet. Lämpökaivojen lukumäärä syvyyksi-
en suhteen. /18/**



Edellä esitetyn Taulukko 3 ja Kuvio 1 perusteella 205 metriä syvät kaivot ovat olleet useimmin eri kohteissa toteutuneita ratkaisuja. Kyseisiä lämpökaivoja on rakennettu 121 kappaletta jakautuen 16 eri kohteeseen. 300-metrisiä lämpökaivoja on määrällisesti toteutettu eniten, 165 kappaletta, mutta ne ovat kaikki valmistuneet yhteen kohteeseen, Sipoon logistiikkakeskukseen. Sipoon logistiikkakeskus onkin Suomen suurin maalämpöön perustuva energiantuotantolaitos. Kohteen tarvitsemasta energiasta puolet tuotetaan maalämmön ja puolet biopolttoaineita hyödyntävän yhdistelmälaitoksen avulla. /18/

9 Suunnittelunäkökohtia

Tässä luvussa esitellään suunnittelunäkökohtia tarkoituksena tarjota tietopaketti maalämpöpumpputekniikalla toteutetun lämpökaivojärjestelmän suunnittelua varten. Tietopakettiin on koottu eri käytännöistä sopivimmat, joiden eroavaisuuksia on käsitelty haastatteluissa. Tietopaketti soveltuu aiheen opiskelun tueksi, suunnittelumenetelmien arviointiin ja järjestelmän mitoituksen avuksi.

9.1 Lähtötietojen selvitys

9.1.1 Kustannus- ja kannattavuus selvitys

Lämpökaivojärjestelmän kannattavuus tulee selvittää hankkeen alussa. Kannattavuus-tarkastelu perustuu kustannuslaskelmaan, kohteen tietoihin ja muihin kohteen lämmitys-ratkaisuihin. Kustannuslaskennassa otetaan huomioon lämpökaivon rakentamisen, laitteiston ja putkiston sekä lämpökeskuksen tilakustannukset.

Lämpökaivon rakentamisen kustannuksiin vaikuttavat maakerroksen paksuus kallion päällä ja kallion rikkonaisuus. Maakerroksen paksuuden vaikutus poraamiskustannuksiin on merkittävä. Kallioporaaminen maksaa noin 30 €/m, kun maaperäporaaminen, jolloin siis joudutaan poraamaan maakerroksen läpi ennen kuin saavutetaan sen alla oleva kallioperä, maksaa yli kaksinkertaisesti, 70–80 €/m. Suomessa kallioperä on usein noin 5 metrin syvyydessä. /19/

Lämpökaivojärjestelmän investointikustannus koostuu käytännössä kolmesta osasta, jotka ovat lämpöpumppu, porareikä ja asennustyöt. Kokonaisinvestointikustannukset ovat pientalossa noin 15 000–20 000 € jakautuen edellä mainittujen kolmen osan kesken niin, että jokaisen osuus on kolmannes kokonaissummasta. Esimerkiksi lämpöpumpun osuus on siis noin 5 000–6 000 €. /19/ Lämpökaivourakoitsijat yhteistyökumpaneineen tarjoavat nykyään yhä laajempia kokonaisuuksia kaivon porauksesta kokonaisjärjestelmätoimituksiin saakka /20/. Tämä vaikuttaa osaltaan siihen, että hinnoissa ja tarjotuissa tuotteissa on eroavaisuuksia, minkä vuoksi lämpökaivojärjestelmää suunnitteleva voi kilpailuttaa järjestelmän osat ja työn osuudet eri toimittajilla. Putkiston kustannukset sisältyvät monesti lämpökaivon osalta poraamiskustannuksiin ja lämmön-

jakokeskukselle menevän osuuden osalta asennustöihin. Putkiston kustannusosuuteen vaikuttavat materiaali, pituus ja se, joudutaanko putkistoa varten louhimaan kalliota.

Maalämpökeskuksen tilakustannus on merkittävä. Mitä energiatehokkaampi järjestelmä on, sitä suurempi tila vaaditaan. Esimerkiksi teknisen tilan kustannus on Haahtela Kehitys Oy:n mukaan n. 2200 €/m², alv 23 %. /6/

Kannattavuustarkastelussa suunnittelun lämpö- ja jäähdytysjärjestelmän kustannuksia verrataan vaihtoehtoihin ratkaisuihin. Vaihtoehtoisia lämmöntuottoratkaisuja ovat kaukolämpö, suora sähkölämmitys, varaava sähkölämmitys, puulämmitys ja näihin kytketyt lämmöntuottotavat kuten aurinkolämpö- ja ilmalämpölaitteistot, Taulukko 4.

Taulukko 4. Kohteen ominaisuuksien vaikutukset kannattavuuteen.

Kohteen ominaisuus	Vaikutus kannattavuuteen
Rakennuksen eristystaso heikko	++
Aurinkolämpö- ja ilmalämpölaitteisto	-
Puulämmitys (esim. pelletti)	-
Kaukolämpö	-

Koska maalämpöjärjestelmän investointikustannus on melko suuri, se tulee kannattavammaksi suuren energiakulutuksen kohteissa. Tällaisia ovat rakennukset, joiden eristykset ovat huonot. Jos kohteessa on jo asennetut aurinko- ja ilmalämpölaitteisto, maalämpöjärjestelmällä saatava hyöty pienenee. Puulämmitys ja kaukolämpö ovat investointikustannuksiltaan melko kalliita, mutta energiakustannuksiltaan edullisia. Näiden syiden vuoksi maalämpöjärjestelmän investointi ei ole kovin kannattava.

9.1.2 Maaperätutkimus

Suomessa maaperätutkimusta ei läheskään aina tehdä, koska maaperän kalliolaatu tunnetaan. Maaperätutkimuksessa selvitetään maaperän tehollinen lämmönjohtavuus ja lämpötilan muuttuminen syvyysuunnassa, kallion päällä olevat maakerrokset sekä pohjaveden korkeusasema ja virtaama. Pohjaveden virtaamaa voidaan arvioida mahdollisten lähistöllä olevien lämpökaivojen virtaamien perusteella. Taulukko 5 kuvataan

tavanomaisten maalajien lämmönjohtavuudet /8/. Esimerkiksi Geologian tutkimuskeskus GTK käyttää kallioperän lämmönjohtavuusarvona pääasiassa vain geofysikaalisiin paikkatutkimuksiin perustuvia tuloksia, tai tilaajan niin halutessa teoreettisen mallinuksen, niin sanotun feasibility-studyn, kirja-arvoja. /20/

Taulukko 5. Maalajien lämmönjohtavuuksia. Muokattu Nordell, Bo. Bergvärme och bergkyla. Nordbygg 2004 -verkkodokumentista. /8/

Maalaji	Lämmönjohtavuus, [W/Km]	Suosittelava lämmönjohtavuus, [W/Km]
Savi (kuiva)	0,4–0,9	0,4
Savi (märkä)	0,9–2,2	1,6
Gneissi	1,9–4,0	2,9
Graniitti	2,1–4,1	3,4

9.1.3 Kohteen lämmitys- ja jäähdytystarpeet

Lämpökaivojärjestelmä on lämmöntuotantotavoista investoinniltaan kallein. Tämän vuoksi ylimitoittamisen välttämiseksi kohteen lämmitys- ja jäähdytystarpeet tulisi selvittää 20 %:n tarkkuudella. Kohteen lämmitys- ja jäähdytystarpeiden selvittämiseksi laaditaan tehoprofiilit eli pysyvyysskuvaajat. Toisessa kuvaajassa kuvataan lämpötehortarve ja toisessa kuvaajassa jäähdytystehontarve ajan funktiona. /7/

Vaadittavat tehontarpeet lasketaan uudisrakennuksen osalta tapauskohtaisesti Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D5 avulla. /7/ Olemassa olevan kohteen lämmitystehon tai -energiantarpeet voidaan määrittää toteutuneiden kulutustietojen perusteella. Esimerkiksi öljylämmitteisen kohteen tehontarve voidaan määrittää öljykattilan vuosihyötysuhteen ja öljyn kulutuksen avulla. /19/

9.1.4 Rakennuslupa ja kohteen erityisvaatimukset

Rakennuslupa sekä mahdolliset muut kohteen erityisvaatimukset tulee selvittää suunnitteluprosessin alussa. Lämpökaivohankkeen lupa-asiat on ratkaistu eri kunnissa eri tavoin. Lämpökaivot tulivat rakennuslupan piiriin 1.5.2011 alkaen. Uudistuksella pyritiin yhdenmukaistamaan aiempaa laajaa ja siten monimutkaista lupakäytäntöä. Lämpökaivorakentamisen suhteen vaatimukset ja lupakäytännöt vaihtelevat kuitenkin edel-

leen huomattavasti kunnittain. /3; 9./ Lisäksi kuntien rakennusvalvonnan sivuilta on saatavissa tietoa vaihtelevasti /20/.

Ennen lämpökaivohankkeiden tulemista lakimääräyksellä luvanvaraiseksi, osassa kunnista vaadittiin rakennuslupa, kun taas toisissa kunnissa riitti toimenpidelupa tai vain toimenpideilmoitus. Nykyään esimerkiksi Helsingissä vaaditaan olemassa olevan lämmitysjärjestelmän uusimisessa lämpökaivojärjestelmään toimenpidelupa. Uudiskohteen tapauksessa lämpökaivon rakentamisen lupa sisältyy kohteen rakennuslupaan. Mikäli uudisrakentamiskohteen rakennusluvan myöntämisen jälkeen syntyy tarve lämpökaivojärjestelmän rakentamiselle, vaaditaan toimenpidelupa erikseen. /9; 10./

Lisäksi muun muassa naapureilta tulee pyytää suostumusta lämpökaivon rakentamiseen, jos reikä porataan lähemmäksi kuin 7,5 metriä tontin rajasta. Näin menetellään siis myös, jos poraus on kalteva niin, että se jossain kohden on lähempänä kuin 7,5 metrin päässä tontin rajasta. Luvan saamiseksi lämpökaivon rakentamiseen vaikuttavat myös mahdolliset suunnitteilla olevat tai olemassa olevat maanalaiset tunnelit sekä pohjavesialueet. /9; 10./ Erityisesti lämpökaivojen sijoittaminen pohjavesialueille on tällä hetkellä herättänyt voimakasta keskustelua. Keskustelua herättäviä kysymyksiä ovat muun muassa, miten kaivot vaikuttavat pohjaveden virtaukseen maa- ja kallioperässä sekä kuinka todennäköistä on, että kalliopohjaveden eri kerrostumat sekoittuvat ja mitä siitä seuraa jos niin käy. /19/

9.1.5 Laitos ja sen käyttötapa

Olennainen osa suunnittelua on selvittää maalämpöpumppulaitoksen rakenne ja sen käyttötapa. Vaihtoehtoja on monia, jolloin suunnittelijan tulisi valita tapauskohtaisesti sopivin ratkaisu. Lämpökaivojärjestelmä koostuu maalämpökeskuksesta, lämmönkeräysputkistosta, lämpökaivosta ja lämmitysverkostosta. Järjestelmä on mahdollista mitoittaa lämpöpumpun osalta joko täysitehoiseksi tai osa-tehoiseksi. Jos päädytään osatehojärjestelmään, tulee lämpökaivon rinnalla olla toinen, varalämmöntuottojärjestelmä. /3; 11./ Yleisin lämpökaivojärjestelmän rinnalla käytetty lämmitysjärjestelmä on sähkö, jolloin esimerkiksi varaajan sähkövastuksella tuotetaan loput tarvittavasta lämmitysenergiasta. On hyvä muistaa, että myös täysteholämpöpumpulla toimivaa lämpö-

kaivojärjestelmää varten vaaditaan sähkövastus taustatueksi, jos esimerkiksi lämpöpumppu rikkoutuu. /19/

Tällä hetkellä valinta täystehoisen ja osa-tehoisen lämpöpumpun välillä kallistuu useimmiten täystehoisen suuntaan, mutta täysteholämpöpumpun kannattavuuteen vaikuttavat muun muassa sähkötariffit. Täysteholämpöpumppu tulee entistä kannattavamaksi, jos sähkötariffi on sellainen, että sähkön hinnan huiput kohdistuvat vastaaviin lämmitysenergian huipputarpeisiin ja muina aikoina sähkön hinta on alhainen. /19/

9.1.6 Kohteen sijainti ja olosuhteet

Kohteen sijainnin mukaan saadaan selville muun muassa paikkakuntaakohtainen mitoitusulkolämpötila, jota tarvitaan tehontarpeiden laskentaa varten. Paikkakuntaakohtaiset mitoitusulkolämpötilat jaetaan Suomen alueella neljään vyöhykkeeseen (Taulukko 6). Etelä-Suomen mitoitusulkolämpötila on –12 astetta Pohjois-Suomen mitoitusulkolämpötilaa korkeampi. Mitoitussisälämpötilalla +21 astetta Pohjois-Suomen mitoitussisä- ja ulkolämpötilojen ero on 26 % Etelä-Suomen vastaavaa eroa suurempi. Tämä merkitsee sitä, että lämmitysenergian tarve on 26 % suurempi Pohjois-Suomessa vastaavassa kohteessa kuin Etelä-Suomessa, mikä tulee huomioida lämpökaivojärjestelmän mitoituksessa.

Taulukko 6. Säävyöhykkeet. Muokattu Suomen rakentamismääräyskokoelman osasta D5. /7/

Säävyöhyke	Mitoittava ulkoilman lämpötila, [°C]	Vuoden keskimääräinen ulkoilman lämpötila, [°C]	Lämmityskauden keskimääräinen ulkoilman lämpötila, [°C]
I	–26	+5	+1
II	–29	+4	0
III	–32	+2	–1
IV	–38	0	–5

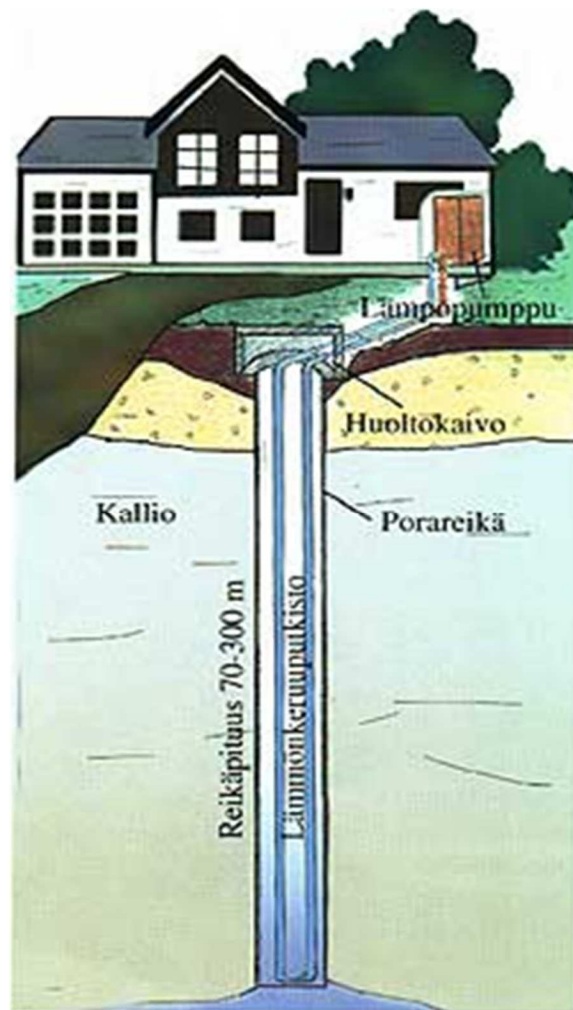
9.2 Lämpökaivon mitoitus ja sijoittaminen

Lähtötietojen selvittämisen jälkeen voidaan mitoittaa lämpökaivo. Ohjeellinen arvo lämpökaivon vuotuiselle lämmöntuottokyvyille syvyysmetriä kohden on 50 kWh/m,r U-putken haaraa kohti, jolloin koko kaivoa kohden 100 kWh/m,r. Lämpöpumpppujärjestelmän tuottamaan kokonaisenergiamäärään vaikuttaa merkittävästi lämpöpumpun lämpökerroin. Lisäksi vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi kivilaji, rakentamiskohteen maantieteellinen sijainti ja pohjaveden virtaus. Kivilaji määrittää maaperän lämmönjohtavuuden ja maantieteellinen sijainti sen lämpötilat. /12/ Kallioraoissa liikkuva pohjavesi parantaa lämmönsiirtymistä ja lämmönjohtavuuden tehollista arvoa. Pohjaveden virtaus tulee huomioiduksi TRT-mittauksen (Thermal Response Test) tulkinnessa ja siksi tuloksesta käytetään nimitystä tehollinen lämmönjohtavuus. TRT-mittauksella eli termisellä vastetestillä selvitetään lämpökaivon termisiä ominaisuuksia. /20/

Lopullisesta mitoituksessa käytettävästä lämpökaivon lämmöntuottokyvystä on olemassa erilaisia arvioita, esimerkkinä Nibe Energy Systems Oy:n Reijo Pekkosen mukaan turvallinen alue on noin 152–154 kWh/m, jolloin esimerkiksi 150 kWh/m kävisi myös. /16/ Vaikuttaa kuitenkin siltä, että edellä mainittu 100 kWh/m on lähempänä useimmiten käytettyä tilannetta, koska Lämpöässä Oy:ssä käytetään mitoituksessa ehdottomana maksimina 120 kWh/m ja mieluiten 100–120 kWh/m. /17/ Lämpökaivojen mitoituksessa käytetään useimmiten tietokoneohjelmaa, joista yksi käytetyimmistä on EED (Earth Energy Designer). Lisäksi esimerkiksi Nibellä ja Lämpöässällä on olemassa omat mitoitusohjelmansa ja taulukkonsa suunnittelun tueksi /16; 17/.

Porareiän syvyys määräytyy kohteen lämmitystehontarpeen mukaan. Mitä suurempi lämmitystehon tarve on, sitä syvempi yksittäisen porareiän tulisi olla. Muussa tapauksessa, joka on yleistä, porareikiä tehdään useampi, jolloin saadaan lämpökaivojen syvyys pysymään sopivalla alueella. Lämpökaivossa olevan U-putken halkaisija on tyypillisesti noin 2–4 cm ja itse porareikä 4,5–6,5 tuumaa, joka siis on halkaisijaltaan noin 11–17 cm. /13/ Porareiän päällä on huoltokaivo, josta kaivoa on mahdollista huoltaa esimerkiksi rikkoutuneiden U-putken osalta. U-putken rikkoutuminen on kuitenkin varsin harvinaista, ja yleensäkin lämpökaivo selviää huoltotoimenpiteittä. Osittain siitä syystä huoltokaivo asennetaan maakerroksen alle, koska sitä ei todennäköisesti tarvitse koskaan käyttää. Huoltokaivon kautta putket viedään lämpöpumpulle. (Kuva 7)

Poratek - Suomen kaivonporausurakoitsijat ry on kaivonporausalan etujärjestö asiakkaille ja urakoitsijoille, ja se on yksi Suomen Lämpöpumppuyhdistys SULPU ry:n perustajajäsenistä. Poratekin sivuilla on määritetty normilämpökaivon kriteerit, joilla on pyritty varmistamaan kasvavaan energialähteeseen, maalämpöön liittyvien lämpökaivojen ammattitaitoinen ja hyvillä materiaaleilla toteutettu tekeminen. Normilämpökaivolla tarkoitetaan minimikriteerit täyttävää lämpökaivoa. Normilämpökaivon kriteerejä ovat muun muassa kaivon sijoitus- ja mitoitusperiaatteet ja kaivon määrätyt rakenteelliset yksityiskohdat kuten suojaputken tarve maaosuudella. /14/



Kuva 7. Periaatekuva lämpökaivosta /13/.

Lämpökaivon sijoittaminen kuuluu myös suunnittelijan tehtäviin. Kaivo kannattaa pyrkiä sijoittamaan ensisijaisesti siten, että keruuputket on helppo johtaa lämpöpumpulle,

mutta kuten mitoittamiseen, sijoittamiseenkin liittyy erilaisia huomioon otettavia seikkoja. Lämpökaivon sijoittamiseen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa etäisyydet erilaisista kohteista. Näitä etäisyyksiin vaikuttavia seikkoja ovat muun muassa muut lämpö-, talousvesikaivot, rakennukset ja mahdolliset paikalliset pohjaveden virtausolosuhteet. Taulukko 7 on esitetty erilaisien kohteiden suositeltuja minimietäisyyksiä lämpökaivosta. /15/

Taulukko 7. Suositellut minimietäisyydet lämpökaivosta. Muokattu Lämpö-oppaasta. /15/

Kohde	Suositteltu minimietäisyys, [m]
Lämpökaivo	20
Porakaivo	40
Rengaskaivo	20
Rakennus	3
Kiinteistön raja	10*
Kiinteistökohtainen jätevedenpuhdistamo	Kaikki jätevedet 30, harmaat vedet 20
Viemärit ja vesijohdot	5

*) porareian ollessa pystysuora

Kun lämpökaivoja on useita, ne sijoitetaan usein tontin kulmaan viuhkamaiseen muotoon. Lämpökaivoista johdetaan keruuputket yhteiseen kokoojakaivoon (esimerkiksi Muovitech), josta kokoojaputki johtaa lämpöpumpulle. Näin ollen lämmönkeruuputkien pituus saadaan minimoitua. /29/

9.3 Laitteiston suunnittelu

9.3.1 Lämpöpumppu

Maalämpöpumppu tulee sijoittaa tilaan, jota ei tarvitse pitää täysin hiljaisena ja tilaan tulee olla helppo pääsy huoltoa ja ylläpitoa varten /15/. Maalämpöpumpun suunnittelussa tärkeimmät huomioon otettavat arvot ovat lämpöpumpun osuus lämmityksen mitoitustehosta ja energiantarpeesta. Suurissa kohteissa teho-osuudeksi pyritään valitsemaan 70–80 % mitoitustehosta, jolloin lämmitysenergiaosuudeksi saataisiin 98–

99 %. /16/ Toisen arvion mukaan teho-osuuden ollessa 70–80 % saadaan sillä tuotettua 95 % lämmitysenergiatarpeesta /19/. Joka tapauksessa johtopäätöksenä voi pitää sitä, että kyseisellä osa-tehoalueella lisälämmitysjärjestelmän tarvitsee tuottaa vain noin 1–5 % lämmitysenergiatarpeesta. Maalämpöpumppu valitaan yleensä joko täystehoisena tai osa-tehoisena, ja sen rinnalla voidaan käyttää esimerkiksi sähköä, kaukolämpöä, öljyä tai pellettiä. /20/

Suurissa lämmityskohteissa ei ole välttämättä järkevää käynnistellä satojen kilowattien lämpöpumppuja esimerkiksi kesäaikana lämpimän käyttöveden valmistamista varten, jos tarve voidaan täyttää nopeammin ja vähemmän laitteistoa rasittamalla toisella energialähteellä, vaikka se olisikin käyttökustannuksiltaan kalliimpi. /20/

Pientalokohteissa osa-tehomitoitus on ollut pitkään määräävä, mutta trendi on kohti täystehoisia lämpöpumppuja. Vanhempaa tekniikkaa edustava niin sanottu on-off-lämpöpumppu mitoitetaan osatehoiseksi, jotta sen käynti ei olisi pätkivää vaativamman lämmityskauden ulkopuolella. Täystehomitoitus vaatii on-off-tyyppisessä lämpöpumpussa kalliimman lämpöpumpun, jonka kustannuksia, kuten hankintahinta, sähkönkulutus ja mahdollinen sulakekoon kasvu, on verrattava sähkövastuksen käytöstä johtuviin kustannuksiin. Uudet lämpöpumput pystyvät erityisesti kompressorin invertterisäädön avulla mukautumaan vaihtelevaan kuormitukseen ja toimimaan näin täystehoisina kovimmilla pakkasilla. Invertterisäädettyjen lämpöpumppujen hinnat ovat viime vuosina laskeneet, mutta moni pientalorakentaja tekee edelleen valintansa vain hinnan perusteella. /20/

Huomioon otettava seikka lämpöpumpun ja sen komponenttien mitoittamiseen ja valitsemiseen liittyen on myös se, että tulevaisuudessa lämpöpumppuasentajat tarvitsevat sertifikaatin, joka myönnetään hyväksytyin koulutusohjelman jälkeen tai hyväksytyin kouluttajan toimesta. Tällöin asentajan on ostettava mitoittaa ja valita lämpöpumpun komponentit, kun aiemmin mitoitusvastuu on ollut maalämpöjärjestelmän suunnittelijalla. /15/

9.3.2 Putkisto

Yleisesti lämmönkeruuputkistona käytetään tavallista muoviputkea, tarkemmin sanotuna PE DN 32/40/50 PN 6/10 -polyeteeniputkea /12/. Putkisto on siis ulkohalkaisijaltaan 32, 40 tai 50 millimetriä, joista yleisimmin käytetään kokoja 32 ja 40, ja paineluokka on tarkkaan ottaen 6,3 bar tai 10 bar. Taulukko 8 on esitetty sisä- ja ulkohalkaisijat käytettävien putkien osalta.

Taulukko 8. Lämmönkeruuputkistossa käytettyjen muoviputkien koot. /31/

Putkityyppi PE			
PN6,3		PN10	
d_u	d_s	d_u	d_s
32	28	32	26,2
40	35,2	40	32,6
50	44	50	40,8

Putkien liitokset tehdään muovisilla hitsauskappaleilla tai sinkkikadon kestävillä messinkiliittimillä. Lämmönkeruuputkiston tulee täyttää normin EN 12201 vaatimat ominaisuudet. /15/ Putkisto-osien mitoituksessa määräävät parametrit ovat painehäviö ja virtausmäärät, joista vastaa LVI-suunnittelija /20/. Lämmönkeruuputkiston painehäviö saadaan lämmönsiirtoliuoksen ominaisuuksien avulla selville. Lämmönsiirtoliuoksen meno- ja paluulämpötilaero on noin 3 °C. Esimerkiksi Tom Allenilla käytetään arvoina $t_m = 0$ °C ja $t_p = -3$ tai -4 °C. /29/ Lisäksi usein käytetään 25–30-prosenttista lämmönsiirtoliuosta /30/. Seuraavissa taulukoissa on esitetty tyypillisesti käytetyn lämmönsiirtoliuoksen, etanoli-vesiliuoksen tiheys ja dynaaminen viskositeetti (Taulukko 9) sekä ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus (Taulukko 10) /25/.

Taulukko 9. Etanoli-vesiliuosten tiheys ja dynaaminen viskositeetti. Muokattu lähteestä. /25/

Lämpötila, [°C]	Tiheys, [kg/m ³] p- % 50	p- % 40	p- % 30	p- % 20	Dynaaminen viskositeetti [10 ⁻³ Pa*s] p- % 50	p- % 40	p- % 30	p- % 20
-30					4,33	4,41	4,48	4,54
-20	943,76	962,52	974,91		3,11	3,14	3,16	3,19
-10	936,56	956,06	970,32	977,64	2,30	2,30	2,31	2,31
0	929,17	949,34	965,24	975,57	1,74	1,74	1,73	1,73
10	921,59	942,38	959,73	972,52	1,35	1,34	1,34	1,33
20	913,77	935,15	953,78	968,61	1,07	1,06	1,05	1,00
30	905,71	927,64	947,37	963,91	0,87	0,96	0,80	0,84

Taulukko 10. Etanoli-vesiliuosten ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus. Muokattu lähteestä. /25/

Lämpötila, [°C]	Ominaislämpökapasiteetti, [kJ/kg °C] p- % 50	p- % 40	p- % 30	p- % 20	Lämmönjohtavuus [W/m °C] p- % 50	p- % 40	p- % 30	p- % 20
-30	3,22	3,44	3,67	3,90	0,293	0,326	0,364	0,407
-20	3,22	3,43	3,65	3,87	0,295	0,331	0,372	0,418
-10	3,22	3,43	3,64	3,85	0,297	0,335	0,378	0,428
0	3,24	3,44	3,64	3,83	0,299	0,338	0,384	0,437
10	3,26	3,45	3,64	3,83	0,300	0,341	0,389	0,445
20	3,29	3,47	3,65	3,83	0,300	0,343	0,394	0,452
30	3,33	3,51	3,67	3,84	0,300	0,345	0,397	0,459

Esimerkkitapauksena lämmönkeruuputkiston mitoituksena voisi olla seuraava. Oletetaan, että rakennuksen lämmitystehontarve on 100 kW, lämmitysenergiantarve on 300 MWh ja lämpöpumpun lämpökerroin COP on 3. Koska COP on 3, lämpöpumppu ottaa tässä tapauksessa sähköverkosta 33 kW ja maasta 67 kW. Niillä se tuottaa 100 kW lämmitystehoa. Vastaavasti lämmitysenergia jakautuu siten, että lämpöpumppu tuottaa 300 MWh 100 MWh:n sähköenergialla ja lämpökaivoista saadaan 200 MWh. Valitaan lämpökaivosyvyudeksi esimerkiksi 200 m, jolloin lämpökaivosta saatava lämmitysenergia on $200 \text{ m/kaivo} * 100 \text{ kWh/m} = 20 \text{ MWh/kaivo}$. 200 MWh:n lämmitysenergian tuottamiseen vaaditaan siis tässä tapauksessa 10 lämpökaivoa. Vastaavasti 67 kW:n lämmitysteho jakautuu 10 lämpökaivon kesken siten, että $67 \text{ kW} / 10 \text{ lämpökaivoa} = 6,7 \text{ kW/lämpökaivo}$.

Lämmönsiirtoaineena on 30 % etanolia sisältävä vesiliuos. Oletetaan edelleen, että lämpöpumpulta lähtevä ja sinne palaava lämmönsiirtoliuos on lämpötiloiltaan $t_m -2 \text{ °C}$ ja $t_p +1 \text{ °C}$. Lämmönkeruuputkistoksi valitaan PEM DN50 PN10, jolloin sisähalkaisija on 40,8 mm ja putkiston karheuslukuna käytetään arvoa 0,007 mm. Lämmönsiirtoliuoksen ominaislämpökapasiteetti on valituilla lämpötiloilla ja pitoisuus-%:lla 3,64 kJ/kg °C (Taulukko 10). Lisäksi interpoloimalla saadaan valittuja arvoja vastaavat tiheydet 966,256 kg/m³ ja 964,689 kg/m³ sekä dynaamiset viskositeetit $1,846 * 10^{-3} \text{ Pa*s}$ ja $1,691 * 10^{-3} \text{ Pa*s}$ (Taulukko 9). Näiden tietojen avulla selvitetään ensin lämmönsiirtoaineen massavirta q_m (kaava 2).

$$q_m = \frac{\Phi}{c_p \Delta t} = \frac{6,7 \text{ kW}}{3,64 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times 3 \text{ °C}} = 0,61 \text{ kg/s, missä} \quad (2)$$

q_m on massavirta, kg/s

c_p on ominaislämpökapasiteetti, kJ/kg °C

Δt on lämmönsiirtoliuoksen meno- ja paluulämpötilojen ero, °C.

Massavirrasta saadaan johdettua tilavuusvirta q_V (kaava 3).

$$q_V = \frac{q_m}{\rho} = \frac{0,61 \text{ kg/s}}{\frac{(966,256+964,689)\text{kg/m}^3}{2}} = 6,35 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,635 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}} \approx 0,64 \text{ l/s, missä} \quad (3)$$

q_V on tilavuusvirta, l/s

q_m on massavirta, kg/s

ρ on tiheys, kg/m³.

Dynaamisesta viskositeetista saadaan johdettua kinemaattinen viskositeetti ν (kaava 4).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\frac{(1,846+1,691)*10^{-3} \text{ Pa*s}}{2}}{\frac{(966,256+964,689)\text{kg/m}^3}{2}} = 0,00183 * 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}, \text{ missä}$$

ν on kinemaattinen viskositeetti, 10⁻³ m²/s

μ on dynaaminen viskositeetti, 10⁻³ Pa*s

ρ on tiheys, kg/m³.

(4)

Näillä tiedoilla voidaan laskea ja selvittää putkivirtauksen painehäviölaskennan peruskaavoilla putkiston kitkavastuskerroin R eli painehäviö/metri (Pa/m) ja kokonaispainehäviö Δp tietyllä metrimäärällä. Tässä esimerkissä käytettyjen oletusten ja edellä olevien laskutoimitusten perusteella saadaan yhden lämpökaivon osalta seuraavat arvot:

$R = 91 \text{ Pa/m}$ ja $\Delta p = 39342 \text{ Pa} \approx 0,39 \text{ bar}$, kun putkiston pituudeksi valitaan 430 m (kaivon U-putki 2*200 m + vaakaputkisto kaivosta 2*15 m) ja kertavastuslukujen summaksi oletetaan 3.

Putkikokoa pienentämällä olisi kitkavastuskerroin, kokonaispainehäviö ja virtausnopeus kasvaneet huomattavasti. Esimerkiksi yhtä kokoa pienemmän, DN40 putken tapauksessa olisivat kitkavastuskerroin ja kokonaispainehäviö lähes kolminkertaistuneet ja virtausnopeus kasvanut noin 60 %. Pienemmän paineluokan (PN6,3) tapauksessa putken sisähalkaisija olisi ollut suurempi ja painehäviö ja virtausnopeus laskeneet. Sisähalkaisi-

jat olisivat kasvaneet, koska luokassa PN6,3 putkien seinämävahvuudet ovat pienemmät kuin suuremman paineluokan putkissa PN10. Vastaavasti muuttamalla lämmönsiirtoliuoksen lämpötilaeroa esimerkiksi 4 °C:seen virtausnopeus laskisi noin neljänneksen, ja painehäviö olisi alle 60 % alkuperäisestä. Tässä esimerkkilaskussa mitoitettiin lämmönkeruuputkisto vain yhden lämpökaivon osalta. Luonnollisesti kokonaisvaltaisessa mitoitusprosessissa olisi mitoitettu myös yhdeksän muun lämpökaivon osuudet ja valittu sopivat koot eri putkisto-osuuksille.

Kokonaisvaltaisessa mitoitusprosessissa mitoituskriteereinä käytetään laitevalmistajien antamia arvoja virtauksen (l/s) ja painehäviön (kPa) osalta. Esimerkiksi Tom Allenilla käytetään muun muassa Colebrook-White-kaavaan perustuvaa, Nordisk Wavin A/S:n kehittämää ilmaislaskentaohjelmaa virtausnopeuden ja painehäviöiden selvittämiseen. /29; 31./ Laskentatyökaluna tässä esimerkkitapauksessa käytettiin putkivirtauksen painehäviölaskennan peruskaavoihin perustuvaa Excel-laskentataulukolla laadittua apuvälinettä. Kuva 8 on kuvankaappaus esimerkkitapauksen tuloksista edellä mainitulla työkalulla.

Putken painehäviöiden laskentataulukko

Putken painehäviöiden laskentataulukko														
Laske														
	nro	aine	1=VESI											
Virtaava aine	3	VESI	2=ILMA	Putken karheus	0,007 mm	Harmaisiin soluihin syötetään alkuarvot								
Aineen lämpötila		°C	3=MUU	Vedellä (1) ja ilmalla (2) syötetään lämpötila										
Tiheys	ks. solu H3	kg/m3	Syötä tiheys	965	kg/m3	Muilla aineilla (3) syötetään tiheys ja kinemaattinen								
Kinemaattinen visk.	ks. solu H3	m2/s	Syötä kinemaattinen viskositeetti	2E-06	m2/s	viskositeetti								
Putkiosa nro	Virtaus l/s	d_s mm	A m ²	v m/s	Re	Re*k/d	Lambda	p_{dyn} Pa	R Pa/m	Pituus m	Δp_{kitka} Pa	Kertavastuslukujen summa	Δp_{kerta} Pa	$\Delta p_{yhteensä}$ Pa
a	0,64	40,8	0,0013	0,5	9556	2	0,032	115,62	91	430	38995,2	3	346,86	39342

Kuva 8. Lämmönkeruuputkiston mitoitus-esimerkkitapaus / 26/.

Lämmönkeruuputkiston mitoituksessa merkittävä huomioon otettava seikka lämmitys- ja jäähdytystarpeen määrittämisessä sopivaksi on rakennuksen tilavuus. Lisäksi vaikuttavia tekijöitä ovat myös rakennuksen eristys, maantieteellinen sijainti ja mahdolliset kohteessa olemassa olevat lämmönlähteet. Jos rakennus sijaitsee Pohjois-Suomessa, on lämmitystarve talvisin suurempi ja jäähdytystarve kesäisin pienempi kuin Etelä-Suomessa. Maakerroksien paksuus ja pohjavesiolosuhteet vaikuttavat myös lämpökaivon mitoituksessa. Esimerkiksi pohjavesialueella on, lämmönkeruuta ajattellen, positiivinen vaikutus. Pohjavesi lämpökaivossa ja pohjaveden virtaama lisäävät lämmönlähteestä saatavaa energiaa veden hyvän lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin ansiosta. /15/

Suomen markkinoilla lämmönkeruuputkea kehittävä ja toteuttava yritys on muiden muassa Ab Muovitech Finland Oy. Muovitechillä on tuotevalikoimassaan maalämmön lämmönkeruuputkeksi tarjolla niin sanottua perinteistä PE-putkea ja Turbo PE-putkea. Turbo PE-putki on pidemmälle kehitetty versio perinteisestä lämmönkeruuputkesta, jonka sisäpuoli on sileä. Turbo PE-putken sisäpuoli ei ole sileä, vaan poimuinen ja sen lämmönsiirtokyky on perinteistä putkea parempi. Lämmönsiirtokykyyn merkittävimmin vaikuttava tekijä on lämmönsiirtovastus. Mitä matalampi lämmönsiirtovastus on, sitä enemmän voidaan tehoa siirtää jokaista lämmönkeruuputkimetriä kohden. Lämmönkeruuputkeen siirrettävä teho voidaan laskea seuraavalla kaavalla (kaava 5). /22/

$$\Phi = \frac{1}{\sum R} \times \Delta T, \text{ missä} \quad (5)$$

Φ on teho, W

l on putkipituus, m

$\sum R$ on putkimateriaalin ja pintojen lämmönsiirtovastuksen summa, Km/W

ΔT on lämmönsiirtoliuoksen ja täyteaineen (veden) lämpötilaero, °C.

Putken lämmönsiirtovastus R lasketaan kaavalla 6.

$$\sum R = \frac{1}{\alpha_s \pi d_s} + \frac{1}{2\pi\lambda_p} \times \ln \frac{d_u}{d_s} + \frac{1}{\alpha_u \pi d_u}, \text{ missä} \quad (6)$$

$\sum R$ on putkimateriaalin ja pintojen lämmönsiirtovastuksen summa, W/Km

α_s on putken sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin, W/m²K

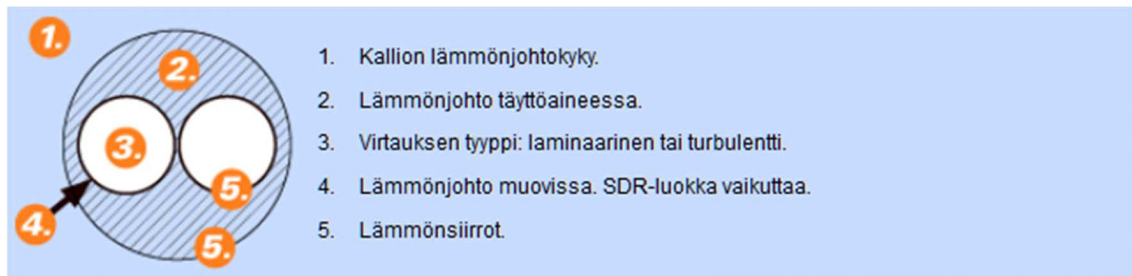
d_s on putken sisähalkaisija, m

λ_p on putken seinämämateriaalin lämmönjohtavuus, W/Km

α_u on putken ulkopuolinen lämmönsiirtokerroin, W/m²K

d_u on putken ulkohalkaisija, m.

Kokonaislämmönsiirtovastukseen vaikuttavat lisäksi kallion ja täyttöaineen lämmönjohtavuus, virtauksen tyyppi eli laminaarinen vai turbulenttinen, lämmönjohtavuus muovissa ja lämmönsiirrot. Lämmönsiirtoliuoksen virtauksen tulee olla turbulenttista, koska se parantaa putken sisäpuolista lämmönsiirtokerrointa eli pienentää lämmönsiirtovastusta. Lämmönsiirrot voivat tapahtua esimerkiksi lämmönkeruuputkesta täyttöaineeseen (veteen) ja täyttöaineesta (vedestä) lämpökaivon ulkopintaan. Lämmönkeruuputkiston lämmönsiirtovastukseen vaikuttavat tekijät on esitetty Kuva 9. /22/



Kuva 9. Lämmönkeruuputkiston lämmönsiirtovastukseen vaikuttavat tekijät. Muokattu lähteestä. /22/

9.3.3 Lämmönsiirtoaine

Lämmönsiirtoaine on lämmönkeruuputkiston, U-putken, sisällä virtaava lämmönsiirtoliuos. Lämmönsiirtoliuos on tyypillisesti vesi-alkoholiliuos, ja Suomessa nykyisin yleisimmin veden kanssa sekoitettu aine on etanoli. Harvemmin käytettyjä lämmönsiirtoliuoksia ovat esimerkiksi betaiini ja kaliumformiaatti. Näistä kaliumformiaatti soveltuu paremmin jäähdytysjärjestelmiin kuin maalämpöjärjestelmiin. Aikaisemmin on käytetty myös etyleeni- ja propyleeniglykolia sekä metanolia. Eteenkin etyleeniglykoli ja metanoli on kuitenkin todettu haitallisiksi, ja jos niitä on vielä joissain kohteissa käytössä, tulisi ne korvata vähemmän haitallisiin lämmönsiirtoliuoksiin. Etanolia on saatavissa valmiina lämmönsiirtoliuksena, jonka jäätymispiste on -17 °C ja leimahduspiste $+29\text{ °C}$. /15/

Altia Oyj on suomalainen yritys, joka valmistaa Rajamäen tehtaillaan lämmönsiirtoaineksi soveltuvaa Naturet-maalämpönestettä. Naturet tuoteperheeseen kuuluu muun muassa edellä mainittu valmis lämmönsiirtoliuos (jäätymispiste on -17 °C ja leimahduspiste $+29\text{ °C}$) nimeltään Naturet Maalämpöneste -17° . Lisäksi Altia Oyj:n Naturet tuoteperheeseen kuuluu kaksi muuta maalämpönestevaihtoehtoa. Nesteiden etanolipitoisuudet vaihtelevat noin välillä 28–90 p-%. Naturet-tuotteiden pakkauskoot ovat 30 l kanisteri, 200 l tynnyri, 1000 l kontti ja säiliöautotoimitus. Taulukko 11 ja Taulukko 12 on esitelty Naturet-maalämpönesteiden tuoteperhe ja etanoli-vesiliuosten teknisiä tietoja. Etanoli-vesiliuosten ominaisuudet ovat $+20\text{ °C}$:n lämpötilassa. /21/

Taulukko 11. Naturet-maalämpönesteiden tuoteperhe. Muokattu lähteestä. /21/

Tuote	Etanolipitoisuus, [p-%]	Laimennussuhde Naturet: vesi
Naturet Maalämpöneste Strong	n. 90	1: 2
Naturet Maalämpöneste	n. 60	1: 1
Naturet Maalämpöneste -17°	n. 28	valmis lämmönsiirtoliuos

Taulukko 12. Etanoli-vesiliuosten teknisiä tietoja. Muokattu lähteestä. /25/

Paino-%	Tilavuus-%	Leimahduspiste, [°C]	Jäätymispiste, [°C]	Kiehumispiste, [°C]
10	12,4	52	-5	91,6
20	24,6	35	-11	87,1
30	36,3	29	-19	84,5
40	47,4	28	-29	82,9
50	57,9	28	-37	81,8
60	67,7	27	-43	80,9
70	77,0	25	-53	80,0
80	85,5	22	-70	79,2
90	93,3	18	-103	78,4
100	100,0	13	-110	78,3

9.4 Lämpökaivojärjestelmän käyttöikä ja huoltotarpeet

Lämpökaivoa ei tarvitse huoltaa. Lämpöpumpun huolto pitää sisällään keruupiirin suodattimien puhdistuksen. Laitevalmistaja antaa lämpöpumpun mekaanisille komponenteille erimittaisen takuun. Vikatilanteessa osa, myös kompressori, on yleensä halvinta vaihtaa eikä korjata. /20/

Oikein mitoitettu ja käytetty lämpökaivo toimii ongelmitta vuosikymmeniä. Tarkemmin sanottuna lämpökaivojärjestelmän suunnittelussa teknisen eliniän pitäisi olla vähintään 50 vuotta, jonka ajan järjestelmän tulisi toimia teknisesti ja rakenteen kestää. Sama pätee lämpöpumppuunkin, tosin lämpöpumpun komponenttien eli kiertopumppujen ja kompressorien käyttöikä voi vaihdella suuresti. Väärin käytettynä lämpöpumpun kallein komponentti eli kompressori voi rikkoutua parissa vuodessa. Oletettavaa on, että yli kymmenen vuoden ikäisen lämpöpumpun kunnostaminen uutta vastaavaksi voi tulla kalliimmaksi kuin täysin uuden ja ominaisuuksiltaan paremman hankkiminen. Laitteistojen eliniät vaihtelevat laite- ja valmistajakohtaisesti. /20/

10 Yhteenveto ja johtopäätökset

Mielenkiinto lämpökaivojen käyttöä kohtaan rakennuksen lämmityksessä on lisääntynyt energian hinnan nousun ja ympäristövaatimusten kiristymisen myötä. Lämpökaivo energiantuottojärjestelmänä on myös ympäristön kannalta edullinen ratkaisu, koska sen hiilijalanjälki on pieni. Suomessa maalämmön hyödyntäminen on ollut suhteellisen vähäistä Ruotsiin verrattuna ja näin ollen maalämmön mitoitusmenetelmät kaipaavat kehitystyötä ja yhtenäistämistä. Käyttökokemuksiakaan rakennetuista järjestelmistä ei ole pitkältä ajalta, mikä merkitsee sitä, että järjestelmien käytönaikaisia mittaustietoja on vain vähän.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin lämpökaivojärjestelmiä ja maa- ja kallioperän lämpökäyttäytymistä. Työn tarkoituksena oli auttaa lämpökaivojärjestelmän suunnittelussa. Opinnäytetyön tavoitteena oli kuvata maalämpöpumpputekniikan suunnittelu- ja mitoitusprosessi, sekä esittää suunnittelunäkökohtia.

Tietolähteinä olivat kirjallisuus- ja verkkosivulähteet sekä asiantuntijahaastattelut. Opinnäytetyössä laadittiin yksinkertaistettu laskentamalli lämpökaivoa ympäröivän kallioperän lämpökäyttäytymisestä ja lämmönkeruuputkiston mitoituslaskelma. Näiden pohjalta käsiteltiin lämpökaivojärjestelmän suunnittelunäkökohtia.

Opinnäytetyön lopputuloksena syntyi suunnittelu- ja mitoitusprosessin kuvaus ja lämpökaivojärjestelmän suunnitteluohje. Ohje koostuu lähtötietojen selvityksestä, lämpökaivon mitoituksesta ja sijoittamisesta sekä laitteiston suunnittelusta.

Lähtötietoina tulee selvittää hankkeen kannattavuus, maa- ja kallioperän lämpötekniset ominaisuudet, rakennuksen lämmitystehon tarve ja rakennuslupa-asiat. Lämpökaivon mitoitukseen kuuluu lämpökaivon lämmöntuottokyvyn sekä kaivon syvyys ja U-putken koko. Lisäksi on suunniteltava lämpökaivon sijainti minimietäisyysvaatimuksien pohjalta. Laitteiston suunnittelu sisältää lämmitystehoon perustuvat laitteistovalinnan ja asennustekniset seikat.

Opinnäytetyössä saadut lopputulokset antavat pohjaa yksityiskohtaiselle mitoitusohjeelle ja käytössä olevien järjestelmien arviointiin sekä soveltuvat opiskelutarkoitukseen.

Jatkokehityksen kannalta olisi tarpeellista saada lisää kokemuksia ja mittaustuloksia lämpökaivojärjestelmien toiminnasta. Lämpökaivojärjestelmien suunnittelua ja mitoitus- ta varten olisi syytä laatia yleinen, laitetoimittajista riippumaton mitoitusohjelmisto, joka perustuisi rakennuskohteen todellisiin reunaehtoihin. Lisäksi lämpökaivon yhteis- käyttöä lämmitykseen ja jäähdytykseen tulisi selvittää ja kerätä toteutettujen hankkei- den mittaustietoja. Tulevaisuudessa yhteiskäyttö lisääntynee, ja mitoitusohjelmisto tulisi laajentaa myös tähän tarkoitukseen.

Lähteet

- 1 Yang, H., Cui, P. & Fang, Z. 2010. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. Verkkodokumentti. Applied Energy, Volume 87, Issue 1, Pages 16-27. <<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.metropolia.fi/science/article/pii/S0306261909001743>>. Luettu 18.3.2012.
- 2 Mustafa Omer, Abdeen. 2008. Ground-source heat pumps systems and applications. Verkkodokumentti. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 2, Pages 344-371. <<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.metropolia.fi/science/article/pii/S1364032106001249>>. Luettu 18.3.2012.
- 3 Kauppila, Kari. 2012. Lämpökaivoihin perustuvat suuret lämmitys-/jäähdytysjärjestelmät. Kylmätekniikan koulutuspäivät, Julkaisu nro 71. Suomen Kylmäyhdistys ry.
- 4 Helander, Johannes. 2012. Suunnittelupäällikkö, Wise Group Finland Oy, Helsinki. Sähköpostikeskustelu. 20.3.2012.
- 5 Ritola, Jouko. 2009. Hyviä tuloksia kallioenergiaan perustuvalla jäähdytyksellä. Verkkodokumentti. VTT. <<http://www.vtt.fi/news/2009/01132009.jsp>>. Luettu 10.4.2012.
- 6 Kustannustieto TAKU™ -ohjelma. 2008. Haahtela Kehitys Oy.
- 7 Rakennusten energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 8 Nordell, Bo. 2004. Bergvärme och bergkyla. Verkkodokumentti. Nordbygg. <<http://www.siki.se/downloads/borrhäl.pdf>>. Luettu 24.9.2012.
- 9 Martinkauppi, Kirsi. 2011. Maalämmön luvanvaraisuus Suomessa. Verkkodokumentti. Ympäristöministeriö: Lainsäädäntöneuvos. <http://www.elykeskus.fi/fi/ELYkeskukset/varsinaissuomenely/Ajankohtaista/Rakennusvalvonnan%20ajankohtaispiv%2030032011/06_L%C3%A4mp%C3%B6kaivot_Martinkauppi_Lukkarinen.pdf>. Luettu 24.9.2012.
- 10 Lämpökaivo, toimenpideluvan hakeminen. 2012. Verkkodokumentti. Rakennusvalvontavirasto. <http://www.hel.fi/wps/wcm/connect/279d7d0046b57c7ba28cfb4b7cfe0b37/LAMPOKAIVO_TOIMENPIDELUPA_2012.pdf?MOD=AJPERES&lmod=-1446704124&CACHEID=279d7d0046b57c7ba28cfb4b7cfe0b37>. Luettu 24.9.2012.
- 11 Saksi, Heli. 2008. Kylmäaineen vaikutus pientalomaalämpöpumpun energiatehokkuuteen, Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, ympäristö- ja energia-tekniikan koulutusohjelma. Verkkodokumentti. <<http://www.lampoassa.com/cgi-bin/webio-f?id=125&saitti=lampoassa&hash=17620A39279EBBB775EB92B397B65958>>. Luettu 24.9.2012.
- 12 Leppäharju, Nina. 2008. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Pro gradu -tutkielma. Oulun yliopisto.

- 13 Lämpökaivot. 2009. Verkkodokumentti. Suomen Kaivonporausurakoitsijat ry. <<http://www.poratek.fi/fi/lampokaivot/>>. Luettu 27.9.2012.
- 14 Normilämpökaivon kriteerit. 2009. Verkkodokumentti. Suomen Kaivonporausurakoitsijat ry. <<http://www.poratek.fi/fi/lampokaivot/normilampokaivon+kriteerit/>>. Luettu 27.9.2012.
- 15 Juvonen, Janne (toim.). 2009. Lämpökaivo, maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Verkkodokumentti. Suomen ympäristökeskus: Asiantuntijapalveluosasto. <<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=108597&lan=fi>>. Luettu 28.9.2012.
- 16 Pekkonen, Reijo. 2012. Tekninen tuki ja huoltoneuvonta, Nibe Energy Systems Oy. Finnbuild-messut, Helsinki. Haastattelu 9.10.2012.
- 17 Wentjärvi, Robert. 2012. Kehitysjohtaja, Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy, Lämpöässä. Finnbuild-messut, Helsinki. Haastattelu 9.10.2012.
- 18 Referenssejä. 2012. Verkkodokumentti. Tom Allen Oy. <<http://www.tomallen.fi/referensseja.aspx>>. Luettu 12.10.2012.
- 19 Hirvonen, Jussi. 2012. Toiminnanjohtaja, Suomen Lämpöpumppuyhdistys ry, Helsinki. Haastattelu. 17.10.2012.
- 20 Martinkauppi, Annu. 2012. Geofyysikko, Geologian tutkimuskeskus GTK, Kokkola. Sähköpostihaastattelu. 19.10.2012.
- 21 Suomalainen maalämpöneste luonnollisesti. 2012. Verkkodokumentti. Altia Oyj. <http://www.digipaper.fi/altia_teollisuustuotteet/76662/>. Luettu 22.10.2012.
- 22 Muovitech - Paras maassa. 2012. Verkkodokumentti. Ab Muovitech Finland Oy. <<http://www.muovitech.fi/>>. Luettu 23.10.2012.
- 23 Terminen vastetestit eli TRT-mittaus. 2012. Verkkodokumentti. GTK. <<http://www.gtk.fi/tutkimus/tutkimusohjelmat/energia/trtmittaus.html>>. Luettu 23.10.2012.
- 24 Energiakaivojen lämpötilaseuranta DTS-mittauksella. 2012. Verkkodokumentti. GTK. <<http://www.gtk.fi/tutkimus/tutkimusohjelmat/energia/dtsmittaus.html>>. Luettu 1.11.2012.
- 25 Teollisuustuotteet: tekniset tiedot, tuotetiedot. 2012. Verkkodokumentti. Altia Oyj. <http://www.digipaper.fi/altia_teollisuustuotteet/31381/>. Luettu 5.11.2012.
- 26 Yrjölä, Jukka. 2012. Putken painehäviöiden laskentataulukko. Excel-laskentataulukko.
- 27 Maalämpö - porakaivon mitat. 2012. Verkkodokumentti. Suomen Porauspalvelu Oy. <<http://www.suomenporauspalvelu.fi/maalampo/maalampokaivo-porakaivo>>. Luettu 13.11.2012.
- 28 Lämpöpumput. 2012. Verkkodokumentti. Suomen Lämpöpumppuyhdistys ry. <<http://www.sulpu.fi/lampopumput>>. Luettu 13.11.2012.
- 29 Sarkala, Christian. 2012. Liiketoimintajohtaja, Tom Allen Oy, Porvoo. Puhelin-keskustelu. 14.11.2012.

- 30 Lämpökaivo kalliossa. 2012. Verkkodokumentti. Nibe Energy Systems Oy. <<http://www.nibe.fi/Tuotteet/Maalampopumput/Lampokaivo-kalliossa/>>. Luettu 14.11.2012.
- 31 Colebrook White - flow rate/pressure loss. 2010. Verkkodokumentti. Nordisk Wavin A/S. <<http://beregn.wavin.dk/colebrookwhite/colebrookwhite>>. Luettu 14.11.2012.

Maaperän lämpökäyttötymisen esimerkkilaskelma

Syöttötiedot on merkitty keltaisella.														
Lämpökaivon halkaisija	d_r	0,2	m											
Lämmönjohtavuus	λ	3,25	W/°Cm											
Maan alkulämpötila	t_{maa}	8	°C											
Lämpökaivon lämpötila	t_r	0	°C											
Tiheys	ρ	2750	kg/m ³											
Ominaislämpökapasiteetti	c_p	1,5	kJ/kg°C graniitti											
Lämpökaivon syvyys	h_r	200	m											
Etäisyys lämpökaivosta	d_1	0,5	m											
Etäisyyden muutoskerroin	emk	1,2												
Ajan muutos	d_h	0,4	h											
	d		d_1				d_2							
			0,5				0,6							
	R	mK/W	0,04				0,01							
	A	m ²	0,16				0,09							
	V/l	m ³ /m	0,16				0,09							
	m	kg	454				238							
	C	kJ/°C	680				356							
118	pv	ΣR	0,04				0,05							
47,3	kWh/m	Fii	W/m	178,29			148,7							
3,3	kW													
		Aika, h	d1					d2						
Kum kJ	kJ	0	T_{alku}	Q_{alku}	Q_{loppu}	T_{loppu}	$T_{lisä}$	T_{alku}	Q_{alku}	Q_{loppu}	T_{loppu}	$T_{lisä}$		
71	71,31	0,4	8,0	5442,8	5371,5	7,9		8,0	2851,0	2846,3	8,0			
142	70,44	0,8	7,9	5376,2	5305,7	7,8	0,0	8,0	2846,3	2837,9	8,0			
211	69,63	1,2	7,8	5314,2	5244,6	7,7	0,0	8,0	2839,5	2827,9	7,9	0,0		
280	68,87	1,6	7,7	5256,2	5187,3	7,6	0,0	7,9	2830,7	2816,4	7,9	0,0		
348	68,15	2	7,6	5201,6	5133,4	7,5	0,0	7,9	2820,4	2803,9	7,9	0,0		
416	67,48	2,4	7,6	5149,9	5082,5	7,5	0,0	7,9	2809,1	2790,7	7,8	0,0		
483	66,84	2,8	7,5	5100,9	5034,1	7,4	0,0	7,8	2797,3	2777,1	7,8	0,0		
549	66,22	3,2	7,4	5054,3	4988,0	7,3	0,0	7,8	2784,9	2763,3	7,8	0,0		
615	65,64	3,6	7,4	5009,7	4944,0	7,3	0,0	7,8	2772,3	2749,4	7,7	0,0		
680	65,08	4	7,3	4967,0	4901,9	7,2	0,0	7,7	2759,6	2735,5	7,7	0,0		
744	64,54	4,4	7,2	4926,0	4861,5	7,1	0,0	7,7	2746,8	2721,6	7,6	0,0		
808	64,03	4,8	7,2	4886,7	4822,6	7,1	0,0	7,7	2734,1	2707,9	7,6	0,0		
872	63,53	5,2	7,1	4848,8	4785,3	7,0	0,0	7,6	2721,3	2694,3	7,6	0,0		
935	63,05	5,6	7,1	4812,3	4749,2	7,0	0,0	7,6	2708,7	2680,9	7,5	0,0		
997	62,59	6	7,0	4777,0	4714,4	6,9	0,0	7,6	2696,2	2667,7	7,5	0,0		
1060	62,14	6,4	7,0	4742,9	4680,8	6,9	0,0	7,5	2683,8	2654,7	7,4	0,0		
1121	61,71	6,8	6,9	4709,9	4648,2	6,8	0,0	7,5	2671,6	2641,8	7,4	0,0		
1183	61,29	7,2	6,9	4678,0	4616,7	6,8	0,0	7,5	2659,5	2629,2	7,4	0,0		
1243	60,89	7,6	6,8	4647,0	4586,1	6,7	0,0	7,4	2647,6	2616,8	7,3	0,1		
1304	60,49	8	6,8	4617,0	4556,5	6,7	0,0	7,4	2635,9	2604,6	7,3	0,1		
1364	60,11	8,4	6,7	4587,8	4527,7	6,7	0,0	7,4	2624,4	2592,6	7,3	0,1		
1424	59,74	8,8	6,7	4559,5	4499,7	6,6	0,0	7,3	2613,0	2580,8	7,2	0,1		
1483	59,38	9,2	6,7	4531,9	4472,5	6,6	0,0	7,3	2601,8	2569,2	7,2	0,1		
1542	59,03	9,6	6,6	4505,1	4446,1	6,5	0,0	7,3	2590,8	2557,8	7,2	0,1		
1601	58,69	10	6,6	4479,0	4420,3	6,5	0,0	7,2	2579,9	2546,7	7,1	0,1		