

Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Henry Hällfors

Tekonurmen lämmitys lähdelämmöllä: lämmönvarastointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

09.02.2021

Tekijä Otsikko	Henry Hällfors Tekonurmen lämmitys lähdelämmöllä: lämmönvarastointi
Sivumäärä Aika	77 sivua + 12 liitettä 09.02.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	energiajärjestelmien johtava asiantuntia, diplomi-insinööri Mika Autiopelto yliopettaja Aki Valkeapää
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena on selvittää lämpökaivokentän mitoitusperiaatteita niin, että saadaan lämpökaivokentän elinkaarikustannukset minimoitua. Tavoitteena on esittää, miksi tekonurmen lämmitys lähdelämmöllä on kannattavampaa kuin fossiilisilla polttoaineilla. Pyrkimyksenä on myös saada tietoa siitä, miten lähtötietojen muutokset vaikuttavat elinkaarikustannuksiin.</p> <p>Insinööriyössä tekonurmen lämmönlähteenä hyödynnetään kesäisin aurinkolämpöä ja talvisin maalämpöä. Kesällä tekonurmesta kerätty aurinkolämpö varastoidaan maahan, jota puolestaan voidaan talvella hyödyntää. Lämpökaivokentän mitoitukset perustuvat EED simulointituloksiin sekä kustannuslaskelmiin.</p> <p>Insinööriyön tulosten perusteella nähdään, miten muutokset lähtötiedoissa vaikuttavat lämpökaivokentän aktiivisyyteen ja edelleen rakennuskustannuksiin. Tuloksista ilmenee, että lämpökaivokentän lataus aurinkolämmöllä tuo säästöjä investointikustannuksiin. Kustannustehokasta olisi myös sijoittaa lämpökaivot kentässä pitkittäin, jolloin myös vinoporatuja kaivoja saadaan suurin mahdollinen määrä. Tuloksissa on esitetty, miten lämpökaivokentän lämpökaivojen vähimmäis- ja enimmäismäärät voidaan laskea virtauksen ja painehäviön avulla.</p>	
Avainsanat	tekonurmi, lähdelämpö, lämpökaivo

Author Title	Henry Hällfors Artificial Turf Heating with Source Heat: Heat Storage
Number of Pages Date	77 pages + 12 appendices 09 February 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC Design
Instructors	Mika Autiopelto, Principal Consultant, Energy systems Aki Valkeapää, Principal Lecturer
<p>The aim of this bachelor's thesis was to study the dimensioning principles of a field of geothermal heat wells in order to minimise their life cycle maintenance cost. The target was to establish why artificial turf field heating with geothermal heat wells would be more profitable than heating with fossil fuels. Furthermore, the effect of changes in initial data on the life cycle costs for the field of geothermal heat wells was discussed.</p> <p>The artificial turf field studied in this thesis utilized solar heating as during the summertime and a field of geothermal heat wells in the wintertime. During the summertime, heat collected from the artificial turf field is stored in the geothermal heat wells to be utilized in the wintertime. The sizing of the field was based on EED simulations and cost calculations.</p> <p>The thesis showed how changes to initial data impact both the activity in the field of geothermal wells and the building costs. Furthermore, charging solar energy into the heat wells yields investment savings, also achievable through lengthwise placement to maximize the amount of diagonally drilled geothermal heat wells.</p>	
Keywords	artificial turf, source heat, heat well

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Maankamara	3
2.1	Maanpeite ja tärkeät pohjavesialueet	3
2.2	Kallioperän ominaisuuksia	3
2.3	Maalämpöpotentiaali	5
3	Lämpökaivotyöt	7
3.1	Lämpövastetestit	7
3.2	Lämpökaivot	9
3.3	Lämmönkeruuputkisto	16
3.4	Kokoomakaivot	22
3.5	Vaaka- ja runkoputkisto	22
3.6	Lämmönkeruuneste	23
3.7	Pumput	26
4	Menetelmät	28
4.1	Kohteen lähtötiedot	28
4.2	EED	30
5	Tulokset	34
5.1	Lämpövastetestit	34
5.2	Lämpökaivot	35
5.3	Lämmönkeruuputki	36
5.4	Lämmönkeruuneste	39
5.5	Pumput	39
5.6	EED-simuloinnit	42
5.7	Kustannuslaskelma	65
6	Pohdinnat	72

6.1	Lähtöarvot	72
6.2	Ehdotus	72
6.3	Simulointiohjelmat	76
6.4	Maankamara	77
6.5	Itsearviointi	77
	Lähteet	78
	Liitteet	
	Liite 1. Kustannuslaskelmat	
	Liite 2. Söderkullan tekonurmen asemakuva	
	Liite 3. Lämpökaivokentän tehon tuntidata	
	Liite 4. Simulointien lähtötiedot, muutokset ja tulokset	
	Liite 5. Söderkullan tekonurmen uusi asemakuva ehdotus	
	Liite 6. Lämpökaivon muuttujien vaikutus aktiivisyvyyteen	
	Liite 7. Lämpökaivon muuttujien vaikutus aktiivisyvyyteen, osa 1	
	Liite 8. Lämpökaivon muuttujien vaikutus aktiivisyvyyteen, osa 2	
	Liite 9. Lämpökaivon virtauksen vaikutus painehäviöön ja Reynoldsin lukuun	
	Liite 10. Simulointi 24	
	Liite 11. Simulointi 31	
	Liite 12. Simulointi 35	

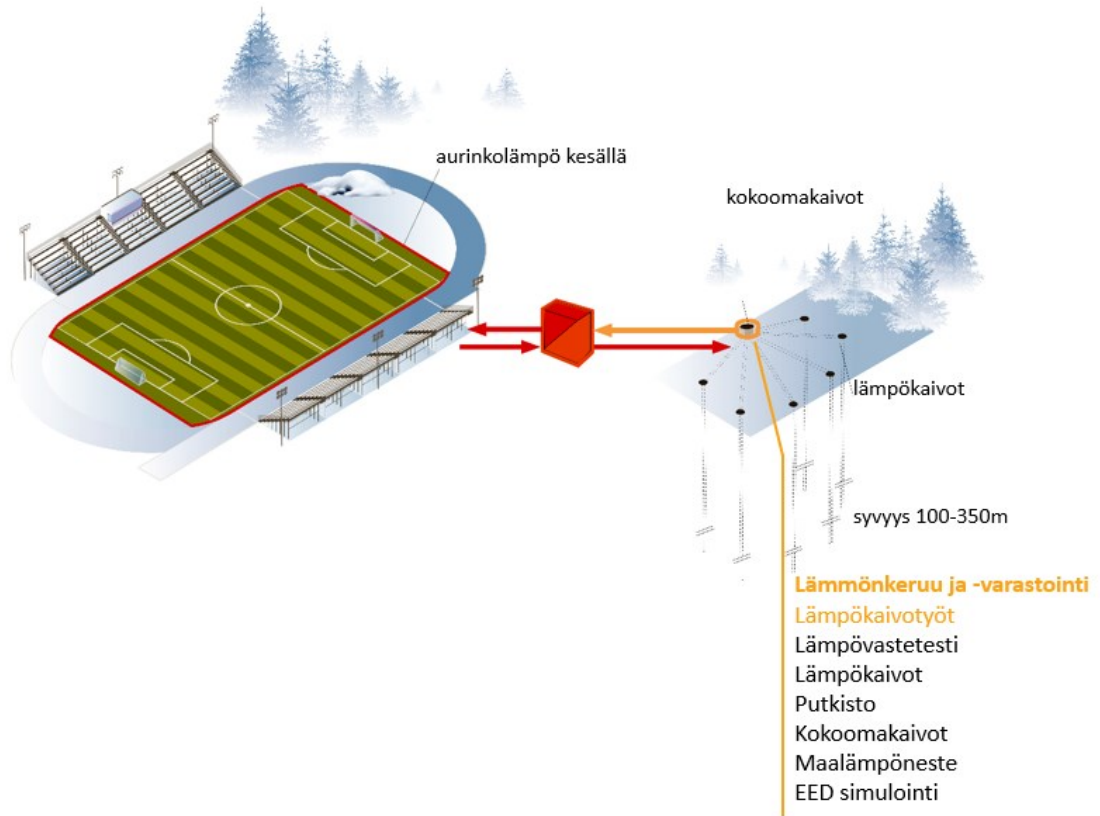
Lyhenteet

FCG	Finnish Consulting Group. Suomalainen konsulttiyritys.
EED	Earth Energy Designer. Lämpökaivojen simulointiohjelma.
TRT	Thermal Response Test. Lämpövastetesti, josta saadaan kallion termofyysikaalisia ominaisuuksia.
IDA ICE	Indoor Climate and Energy. Dynaaminen simulointiohjelma.
PE	Polyeteeni
SDR	Standard Diameter Ratio. Suhdeluku, joka määrittää putken ulkohalkaisijan suhteen seinämävahvuuteen.

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tilaaja on FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy:n johtava energia-asiantuntija Mika Autiopelto. Insinööriyössä tutkitaan jalkapallotekonurmen lämmittämistä lähdelämmöllä. Lämmönlähteinä hyödynnetään kesäisin aurinkolämpöä ja talvisin maalämpöä. Kesällä tekonurmesta kerätty aurinkolämpö varastoidaan maahan, josta sitä voidaan hyödyntää talvella kentän lämmittämiseen. Tässä insinööriyössä keskitytään lämpökaivokentän mitoittamisperiaatteiden selvittämiseen niin, että saadaan lämpökaivokentän elinkaarikustannukset minimoitua.

Insinööriyön tavoite on käsitellä ne osa-alueet tekonurmen lähdelämpöjärjestelmästä, jotka vaikuttavat lämpökaivojen lämmönkeruuseen ja -varastointiin. Työ tehdään helpottamaan lämmönkeruun ja -varastoinnin suunnittelua. Kuvassa 1 on esitetty insinööriyön rajaukset.



Kuva 1. Insinööriyön sisällön rajaus [1].

Tekonurmikenttiä on rakennettu Suomeen runsaasti 2000-luvulta lähtien, mutta valitettavasti kenttiä ei ole saatu ympärivuotiseen käyttöön johtuen Suomen huonoista sääoloista ja toisaalta kalliista lämmityskustannuksista. Tällä hetkellä Suomessa on noin 60 lämmitettyä tekonurmikenttää, joista lähes kaikki lämmitetään kaukolämmöllä. Korkeat lämmityskustannukset rajoittavat ulkotekonurmilla pelattavien lajien harjoittelumahdollisuuksia, sillä suurin osa Suomen kaukolämmöllä lämmitetyistä tekonurmista on kustannusten vuoksi suljettuina kylmällä kaudella [2]. Tekonurmikenttien lämmitykseen kuluva energia voi vaihdella saman säävyöhykkeen sisällä riippuen siitä, onko kenttä osittain pois päältä tai käytetäänkö esimerkiksi lumen aurausta sulattamisen sijaan. Tarvittava lämpöenergia vaihtelee välillä 155–3 000 MWh vuodessa [3]. Hyvin toimiva Etelä-Suomessa sijaitseva lämmitetty tekonurmikenttä vaatii lämpöenergiaa vuodessa 300–600 MWh:n verran, riippuen talviolosuhteista [12]. Tekonurmikentän lämmityskustannukset voivat olla 10 000–220 000 € vuodessa. Vaihtamalla kaukolämpö lähdelämpöön voidaan

tehdä säästöjä, sillä maasta saatava lämpöenergia on ilmaista. Lähdelämmön tapauksessa kustannukset tulevat järjestelmän rakentamisesta ja lämmönsiirtonesteen pumpaamisesta.

2 Maankamara

2.1 Maanpeite ja tärkeät pohjavesialueet

Lämpökaivoilla saatava lämpöenergia pyritään saamaan pelkästään kalliosta, jonka termogeologiset ominaisuudet ovat paremmat kuin maapeitteellä. Kallion päällä on useimmiten maapeite, jonka paksuus vaihtelee paikoittain. Suomessa maapeitteen paksuus voi olla jopa 100 metriä, mutta keskipaksuus on noin 8,5 metriä. Maapeitteen osuus lämpökaivossa joudutaan putkittamaan, jotta maa ei sortuisi kaivoon tai lämmönkeruuputkiston rikkoontuessa lämmönsiirtoneste ei pääsisi sekoittumaan pohjaveden kanssa. Maapeitteen putkitus tuottaa lisäkustannuksia, mutta maapeitteen ollessa paksu saattaa kallion lämpötila nousta, mikä parantaa kalliolämpöjärjestelmän toimintaa. [4; 5.]

Maalämpökaivojen rakentamisesta saattaa aiheutua riskejä ympäristölle, kuten pohjaveden virtauksen muuttuminen sekä suolaisen ja makean pohjaveden sekoittuminen. Ympäristöministeriö suosittelee, että vedenottamoiden läheisyyteen ei rakennettaisi maalämpöjärjestelmiä. Mitä enemmän kunta on riippuvainen pohjavedestä, sitä tiukemmat ehdot on asetettu lämpökaivojen poraamiseksi. Vedenottamoiden läheisyydeksi lasketaan alue, jossa pohjaveden viipymä vedenottamolle on alle 60 vuorokautta. Yli kymmenen lämpökaivon muodostama kenttä tärkeällä pohjavesialueella edellyttää aina luvan hakemista aluehallintovirastolta. [4; 5.]

2.2 Kallioperän ominaisuuksia

Kallioperä koostuu useasta eri kivilajista. Suomen kallioperä koostuu pääosin graniitista, liuskeista, gneisseistä ja muista syväkivilajeista. Euroopan unionin paksuin kallioperä on tutkitusti Suomessa. Kallioperä on paikoittain 230 kilometriä paksu, mutta tyypillisimmin se vaihtelee 40–65 kilometrin välillä. Kallioperästä saatavaan lämpöenergian määrään

vaikuttavia tekijöitä ovat kivilajien lämmönjohtavuus (k), ominaislämpökapasiteetti (C_p) ja tiheys (ρ). Taulukossa 1 on esitetty mittausten määrä kivilajia kohti (N) ja kivilajikohtaiset keskiarvot lämmönjohtavuudelle (k), ominaislämpökapasiteetille (C_p) ja tiheydelle (ρ). Suluissa olevat arvot ovat Peltoniemen ja Kukkosen (1995) aineistosta koko Suomen keskiarvoista. Suluttomat arvot ovat Helsingin alueelta saaduista keskiarvoista. [5]

Taulukko 1. Taulukossa esitettynä N suuruus maastonäytteiden otosta, lämmönjohtavuus (k), ominaislämpökapasiteetti (C_p) ja tiheys (ρ) [5].

Kivilaji	N	k [W/m·K]	C_p [J/kg·K]	ρ [kg/m ³]
Amfiboliitti	10 (80)	2,66 (2,63)	731	2906 (2963)
Gabro	1 (105)	3,25 (2,71)	712	2804 (2937)
Graniitti	16 (272)	3,20 (3,61)	721	2640 (2670)
Grano- ja kvartsidioriitti	12 (270)	3,17 (3,61)	731	2675 (2699)
Kiillegneissi	9 (181)	2,87 (2,86)	725	2707 (2758)
Kvartsi-maasälpägneissi	2 (15)	3,10 (3,59)	723	2794 (2673)

Mitä suurempi lämmönjohtavuus kallioperässä on, sitä paremmin saadaan lämpöä johdettua. Ominaislämpökapasiteetti puolestaan kertoo kivilajin kyvystä varastoida lämpöä: mitä suurempi se on, sitä enemmän kivilaji pystyy varastoimaan lämpöä. [5]

Terminen diffusiviteetti tarkoittaa miten nopeasti kallio reagoi lämpötilan muutoksiin. Suurella diffusiviteetillä kallion lämpötila voi muuttua nopeasti. Termisen diffusiviteetin selvittämiseen tarvitaan tilavuuslämpökapasiteetti, joka saadaan kaavalla

$$C = \rho * C_p,$$

jossa C on tilavuuslämpökapasiteetti (J/m³*K), ρ on tiheys (kg/m³), C_p on ominaislämpökapasiteetti (J/kg*K). Terminen diffusiviteetti saadaan kaavalla

$$\alpha = \frac{k}{\rho * C_p},$$

jossa α on termien diffusiviteetti (m^2/s), k on maankamaran lämmönjohtavuus ($\text{W}/\text{m}^*\text{K}$), ρ on tiheys (kg/m^3), C_p on ominaislämpökapasiteetti ($\text{J}/\text{kg}^*\text{K}$). Tilavuuslämpökapasiteetin (C) ja diffusiviteetin (α) tulokset laskuista on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Tilavuuslämpökapasiteetin (C) ja diffusiviteetin (α) kivilajikohtaiset keskiarvot [5].

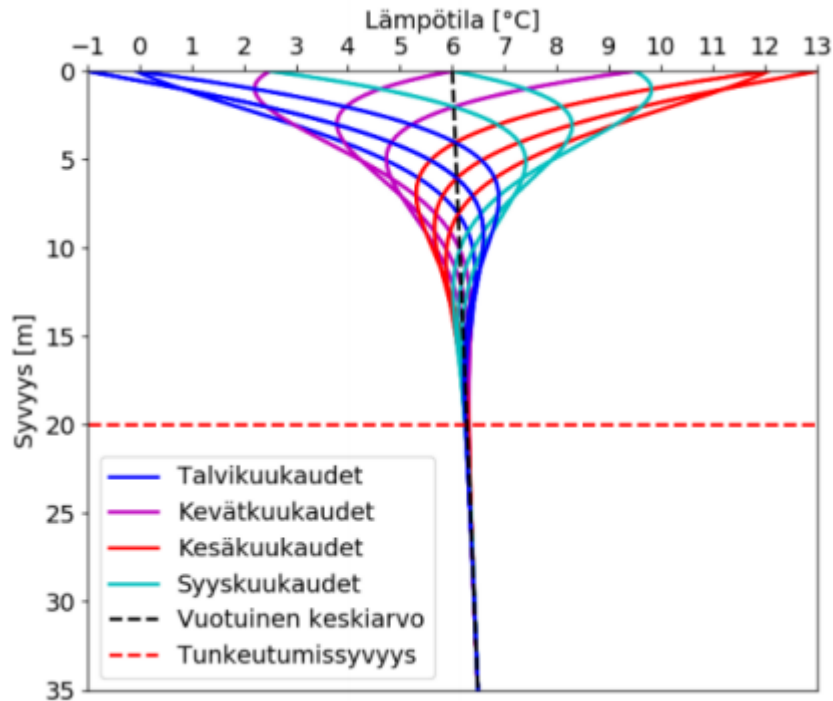
Kivilaji	C [$\text{MJ}/\text{m}^3\cdot\text{K}$]	α [mm^2/s]
Amfiboliitti	2,106	1,190
Gabro	1,996	1,628
Graniitti	1,905	1,682
Grano- ja kvartsidioriitti	1,952	1,612
Kiillegneissi	1,967	1,442
Kvartsi-maasälpagneissi	2,021	1,551

Kallioperän tehollisia ominaisuuksia on kuitenkin vaikea tietää etukäteen, koska samanimiset kivilajit voivat olla hyvinkin erilaisia, mikä näkyy kiven lämpöominaisuuksien vaihteluissa. Kivilajit voivat olla esimerkiksi termisesti anisotrooppisia, mikä tarkoittaa sitä, että lämmönjohtavuus on kiteen suuntaan riippuvainen. Kiven suuntaus ja koostumus voivat vaikuttaa lämmönjohtavuuteen siten, että eri suunnista mitattuna lämmönjohtavuus vaihtelee. Pinnan läheisyydessä kallioperä voi olla rikkonainen, mikä mahdollistaa pohjaveden liikkumisen kallion sisällä sekä tehokkaamman maalämmön tuoton. Paras tapa saada tehollinen yhteisvaikutus esille, on suorittaa lämpövastetesti, joka edustaa koko kiven tehollisia lämpöominaisuuksia. [4; 5; 6.]

2.3 Maalämpöpotentiaali

Maalämpö syntyy maankuoressa tapahtuvasta radioaktiivisesta hajoamisesta sekä auringon säteilystä. Maanpinnan ja maapallon kuumen ytimen välinen lämpötilaero saa aikaan lämpövuon, joka tarkoittaa jatkuvaa lämmintä virtaa maanpintaa kohden. Suomessa lämpövuon suuruus on keskimäärin 42 milliwattia neliometriä kohden. Auringon säteily tuottaa huomattavasti suuremman määrän lämpöä kuin lämpövuon, mutta absorptio suora vaikutus ei pääse syvälle maahan saakka. Vuotuisen lämpötilavaihtelun

vaikutus ulottuu alle 20 metriin. Geoenergia eli ”maalämpö” pääasiallinen energialähde on maan pintaan varastoitunut aurinkoenergia. Geoterminen energia eli kilometrien syvyydestä saatava lämpö, energialähde on maan sisuksesta johtuva lämpö. Kuvasta 2 nähdään, kuinka 20 metrin syvyydestä lähtien maankamaran lämpötila on ilmastosta riippumaton. [5]



Kuva 2. Vuotuisen lämpötilavaihtelun vaikutus maankamaraan eri syvyyksissä [5].

Maanpinnan vuoden keskilämpötila Suomessa on 0,5–7,6 astetta, jotka ovat hyvin matalia lämpötiloja verrattuna Keski-Eurooppaan [5]. Maanpinnasta alaspäin mentäessä, rupeaa lämpötila nousemaan. Lämmönjohtavuus ja lämpövuoto määrittävät lämpötilan kasvun nopeuden. Jos oletetaan, että maankamara on homogeeninen, voidaan keskilämpötila maankamarassa laskea noin tuhannen metrin syvyyteen asti kaavalla

$$T(z) = T_0 + \frac{q}{k} * z,$$

jossa T on maankamaran lämpötila ($^{\circ}\text{C}$), z on syvyys (m), T_0 on maanpinnan keskilämpötila ($^{\circ}\text{C}$), q on geometrinen lämpövuoto maanpinnalla (W/m^2), k on maankamaran lämmönjohtavuus ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$). Kaavassa näkyvää merkintää q/k kutsutaan myös gradientiksi, joka tarkoittaa lämpötilan kasvua metriä kohden (K/m). Suomessa gradientti on tyypillisesti 1,0–1,5 astetta sataa metriä kohden. [5; 6.]

Suomi ei sijaitse vulkaanisesti aktiivisella alueella, josta saataisiin matalista syvyyksistä korkeita lämpöjä. Suomessa voidaan kuitenkin maalämpöpumpun sekä vesialkoholi-seoksen avulla tuoda tehokkaasti lämpöä matalistakin lämpötiloista. Matalalämpötilaista maalämpöä löytyy sen sijaan kaikkialta Suomesta. Maalämpöpumpun ja maalämmön tuottama lämpöenergian suhde voidaan laskea kaavalla

$$Q_{\text{lämpöpumppu}} = \frac{COP}{COP - 1} * Q_{\text{maalämpö}},$$

jossa $Q_{\text{lämpöpumppu}}$ on lämpöpumpusta tuotettu lämmitysenergia ($\text{W}\cdot\text{h}$), COP on lämpöpumpun lämpökerroin ja $Q_{\text{maalämpö}}$ on kallioperästä saatu maalämmön määrä ($\text{W}\cdot\text{h}$). [4, 5, 6]

3 Lämpökaivotyöt

3.1 Lämpövastetestit

Lämpövastetestin (TRT-testi) avulla saadaan tietoa kallioperän termofysikaalisista ominaisuuksista, jotka vaikuttavat lämpökaivokentän mitoitukseen. Mitattavia ominaisuuksia ovat

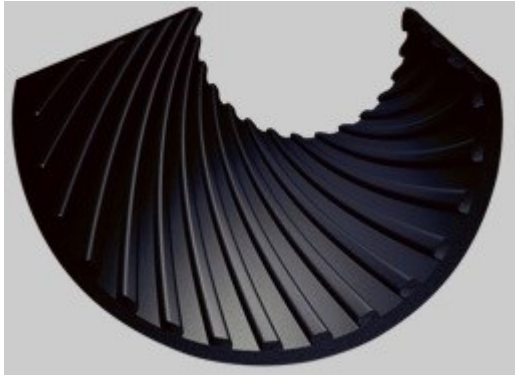
- Kallioperän keskimääräinen häiriötön lämpötila poratussa lämpökaivossa
- Lämpökaivon keskimääräinen lämpövastus. Lämpövastus sisältää useamman komponentin:

- Kollektorissa virtaavan lämmönkeruunesteen lämpövastus, joka on riippuvainen lämmönkeruunesteen virtausnopeudesta sekä itse liuoksen komponenteista.
 - Kollektorin seinän lämpövastus
 - Lämpökaivon täytemateriaalin lämpövastus
- Kallioperän keskimääräinen tehollinen lämmönjohtavuus lämpökaivon ympärillä

Lämpökaivoa lämmittäessä saadaan pienempi lämpövastus kuin lämmötossa. Lämpövastetesti perustuu lämpökaivon lämmitykseen, ja suositeltavaa on, että lämpövastukseksi lämmötossa käytetään arvoa, joka on 0,02 Km/W suurempi kuin mitattu arvo. [7]

Suomen kallioperässä olevat eri kivilajit johtavat lämpöä eri tavalla. Kallioperän koostumus vaihtelee paikoittain hyvin merkittävästi, minkä vuoksi lämpökaivoista saatavaa lämpöenergian määrää ei voida tarkalleen tietää ennen lämpövastetestiä [8]. Lämpökaivojen määrän ylittäessä 10 kpl olisi suositeltavaa tehdä kaksi tai useampaa lämpövastetestiä [9].

Lämpövastus vaihtelee lämmityksessä välillä 0,06–0,15 K/(W/m), riippuen kollektorityypistä. Pohjavesitäytteisissä rihlatuissa (kuva 3) U-keruuputkella varustetuissa kaivoissa lämpövastus on tyypillisesti 0,09 K/(W/m). Pohjavesitäytteisissä kaivoissa, joissa on kaksi U-keruuputkea, lämpövastus on tyypillisesti hieman alhaisempi kuin yhdellä U-putkella varustetuissa, mikä johtuu suuremmasta lämmönsiirtopinta-alasta kaivon seinämään nähden. [10]



Kuva 3. Rihlattu lämmönkeruuputki [11].

Kun lämpövastetesti on suoritettu, voidaan määrittää, montako ja kuinka syvää lämpökaivoa lämpökenttä vaatii optimaalisen lämpömäärän saavuttamiseksi [8]. Lämmönvastetestin mittauksen kesto tulee olla vähintään kolme vuorokautta [10].

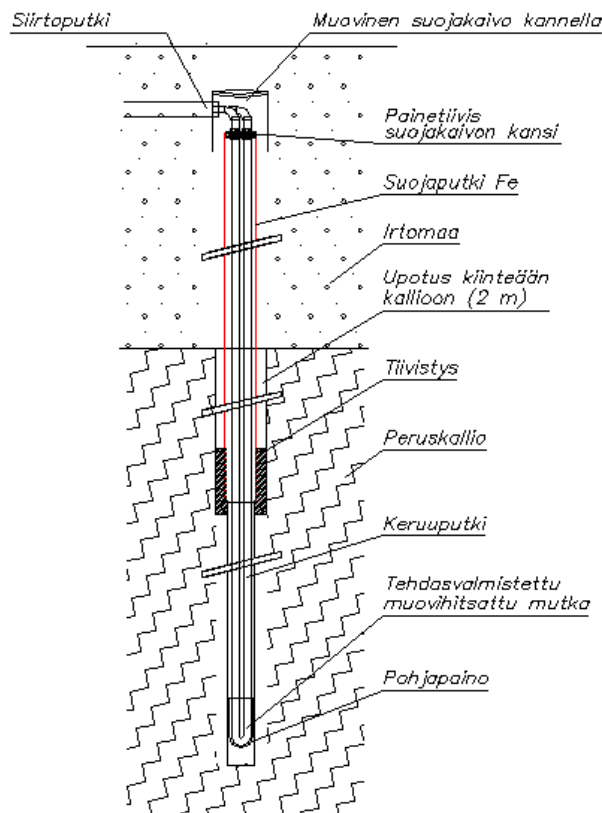
Lämpövastetestin hinta määräytyy termisen vastetestin sekä testikaivon porauksen perusteella, ellei lämpövastetestiä toteuteta ensimmäiseen onnistuneeseen tavoitesyvyyteen porattuun lämpökaivoon [12].

- Termiseen vastetestiin kuuluu alueen maalämpöpotentiaalin tarkistaminen, lämpövastetesti, lämpökentän simulointi (EED), mitoitusaineisto ja sen läpikäynti sekä dokumenttien luovutus.
- Testikaivon poraukseen kuuluu lämpökaivon poraus lämmönvastetestiä varten, kivituhkan keruu ja poisvienti umpikontissa, suojaputken asennus kaivon alkuosuudelle, suojaputken tiivistys kiinteään kallioon betonoimalla, kollektoriputkien kaivoon asentaminen, maalämpönesteen laitto kollektoreihin. Testikaivon porauksen kustannuksiin vaikuttaa lämpökaivon syvyys.

3.2 Lämpökaivot

Lämpökaivolla tarkoitetaan maahan porattua reikää, joka sisältää useita komponentteja. Kuvassa 4 on esitetty lämpökaivon leikkauskuva ja lämpökaivoon sisältyvät komponentit.

Lämpökaivon leikkauskuva

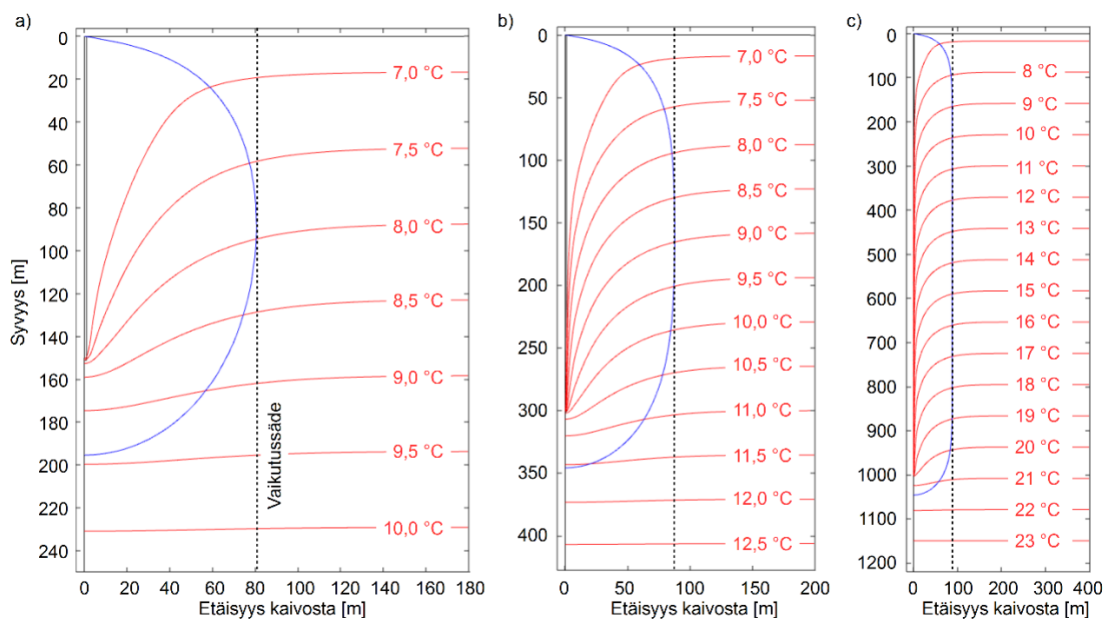


Kuva 4. Lämpökaivon leikkauskuva [12].

Suojaputkea tarvitaan aina, jotta lämpökaivoon ei sortuisi maata. Suojaputken materiaalina on teräs tai muovi, ja se upotetaan kiinteään kallioon noin 2–6 metrin syvyyteen. Pohjavesialueilla tulee kuitenkin lisätä vähintään kuusi metriä suojaputkea ja lämpöpumpun tulee olla varustettu vuodonilmaisimella. Halkaisijaltaan 115 millimetrisen lämpökaivon suojaputki on 139 millimetriä. [13]

Kaivoon tulee lisätä myös eriste, joka suojaa, mikäli lämmönkeruuputkisto sattuisi rikkoutumaan, jolloin lämmönsiirtoneste ei pääsisi sekoittumaan pohjaveden kanssa. Eristys voidaan tehdä betonoimalla, manglaamalla tai muovisella putkella ja laajenevilla tiivistysaineilla. Suojaputken tiiviys ja kunto tulee tarkistaa koeponnistuksella sekä ennen että lämmönkeruuputkiston asennuksen jälkeen [13; 14].

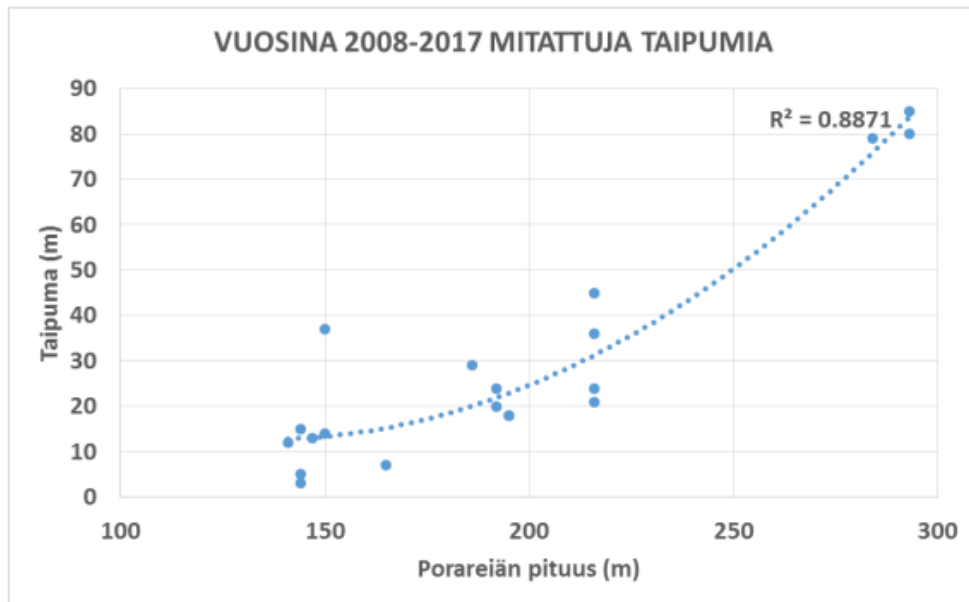
Pystysuorien lämpökaivojen minimietäisyys toisistaan on 15 metriä. Vinoon poratuissa lämpökaivoissa minimietäisyys on viisi metriä, jotta lämpökaivot vaikuttaisivat toisiinsa mahdollisimman vähän [13]. Kuvassa 5 näkyy yksittäisen kaivon vaikutus kallion lämpötilaan 50 vuoden aikana, ja vaikutuksen raja-arvona on 0,1 kelviniä. Kuvan 5 osassa a) on esitetty 150 metrin syvyisen kaivon vaikutusalue, joka ulottuu 81 metrin etäisyydelle kaivosta. Kuvan osissa b) ja c) on puolestaan esitetty 300 ja 1 000 metriä syvien kaivojen vaikutusalue, joka ulottuu 88 metrin etäisyydelle kaivoista. Lämpökaivon syvyydestä riippumatta kaivojen vaikutusalue ylittää korkeintaan 88 metriin saakka, jota suuremmilla etäisyyksillä kallion lämpötila on muuttumaton. [5]



Kuva 5. Yksittäisen kaivon vaikutussäde kallion lämpötilaan: a) 150 metriä, b) 300 metriä, c) 1000 metriä [5].

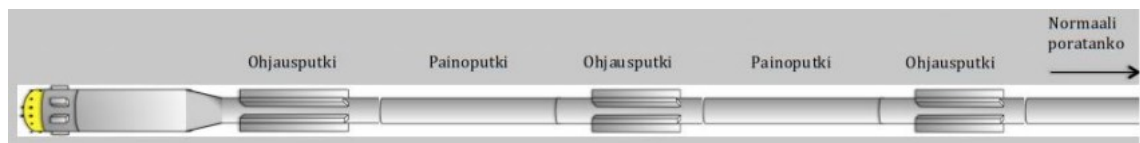
Lämpökaivojen porausreiät taipuvat lähes aina, mutta taipuman suuruuteen vaikuttavat erityisesti kallioperän ominaisuudet, kuten kallioperän rakoilu, rakenteet, kivilajit ja niiden ominaisuudet. Taipuvuuteen vaikuttavat myös käytetty porauskalusto sekä poraajan ammattitaito. Taipumalla tarkoitetaan lämpökaivon pohjan lopullista etäisyyttä suunnitellusta pystysuorasta lämpökaivosta. Vuosina 2008–2017 Helsingin kaupunki on suorittanut mittauksia eri hankkeiden lämpökaivojen taipumista. Mittaustuloksia on 22:sta toteutuneesta 140–300 metrin syvisestä lämpökaivosta, joissa taipumat vaihtelevat 3–85 metrin välillä. Kuvasta 6 näkyy mitattujen lämpökaivojen taipumia suhteessa kaivojen

syvyyteen. Kuvasta ilmenee, että syvyyden kasvaessa taipuman määrä nousee. Lämpökaivokentän taipumat eivät useimmiten ole haitaksi, mikäli taipuma johtuu kallioperän ominaisuuksista, sillä lähekkäin poratut reiät taipuvat samansuuntaisesti. Etukäteen taipumien suuntaa ja suuruutta on kuitenkin mahdotonta arvioida. [4]



Kuva 6. Vuosina 2008–2017 Helsingissä mitattujen lämpökaivojen taipumia suhteessa kaivojen syvyyteen [4].

Suorusporaus tehdään, kun halutaan varmistaa, että lämpökaivon porausreikä olisi mahdollisimman suora. Ohjureilla tarkoitetaan ohjausputkea, joka liitetään poratankoihin. Tämä estää porakruunun tankokaluston taipumisen lämpökaivoa porattaessa. Kuvassa 7 on esitelty ohjureiden käytöstä periaate, joissa ohjausputket estävät poratankon taipumisen. [4]

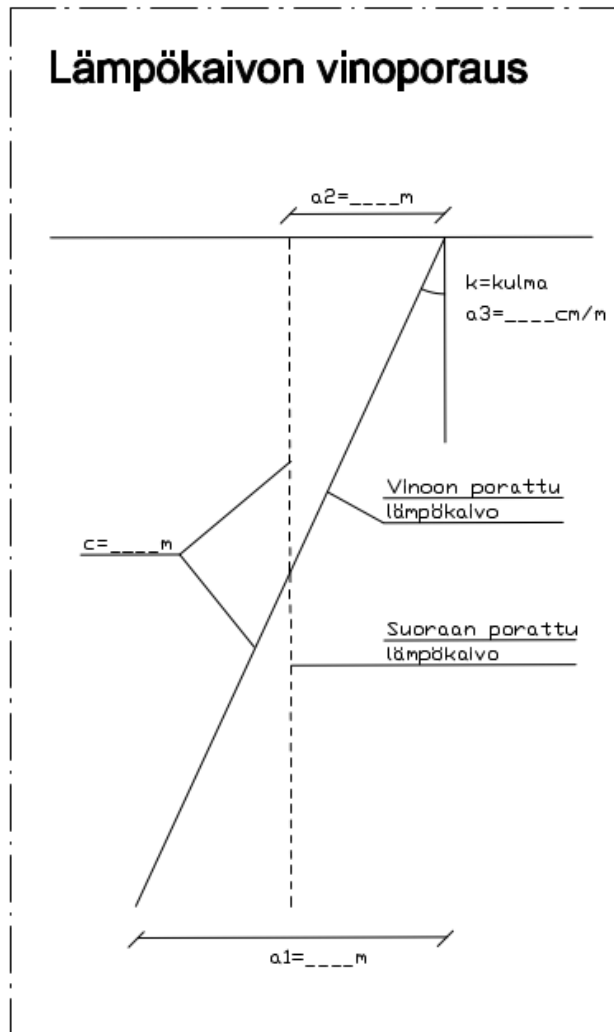


Kuva 7. Periaatekuva suorusporausesta, jossa porauskruunu on vasemmalla [4].

Vuonna 2017 Helsingin kaupunki teki Pohjois-Pasilan Postipuiston alueella koeporauksia, jossa kokeiltiin ohjureiden vaikutusta poraukseen. Porauksia tehtiin yhteensä kuusi

kappaletta, joista kolmeen käytettiin ohjureita. Porausreiät ovat 300 metrin syvyisiä ja lähellä toisiaan, jotta geologiset vaikutukset minimoitaisiin. Ilman ohjureita tehdyissä porauksissa reiät taipuivat 79–85 metriä, kun taas ohjureilla porattuna taipuma oli vain 11–22 metriä. Suoruusporaus on kuitenkin menetelmä, jota harvoin käytetään, sillä porausreiän suoruudella ei varsinaisesti ole merkitystä. Suoruusporausta voidaan kuitenkin edellyttää tiiviisti rakennetuilla alueilla tai maanalaisten tilojen ja raakavesitunnelin läheisyydessä. Suoruusporauksen kustannusvaikutus poraukseen on noin 5–10 prosenttia. [4]

Lämpökaivoja porataan myös tarkoituksella vinoon, jolloin suojaetäisyyttä viereiseen lämpökaivoon voidaan vähentää. Kuvassa 8 havainnollistetaan lämpökaivon vinoporausten periaatetta. Kuva auttaa hahmottamaan muun muassa laskennassa, jossa selvitetään, kuinka monta metriä lämpökaivo menee vinoon (a_1), kuinka paljon voidaan teoreettisesti lämpökaivojen suojaetäisyyttä vähentää (a_2) sekä kuinka monta senttimetriä lämpökaivo menee vinoon yhtä metriä kohden (a_3). [15]



Kuva 8. Leikkaus lämpökaivon vinoporausesta.

Vinoon poratessa tiedetään lämpökaivon haluttu syvyys (c) sekä kulma (k). Suorakulmaisen kolmion trigonometrian avulla voidaan selvittää, kuinka paljon lämpökaivo menee kokonaisuudessaan vinoon (a_1), mikä voidaan laskea kaavalla

$$a_1 = \sin k * c,$$

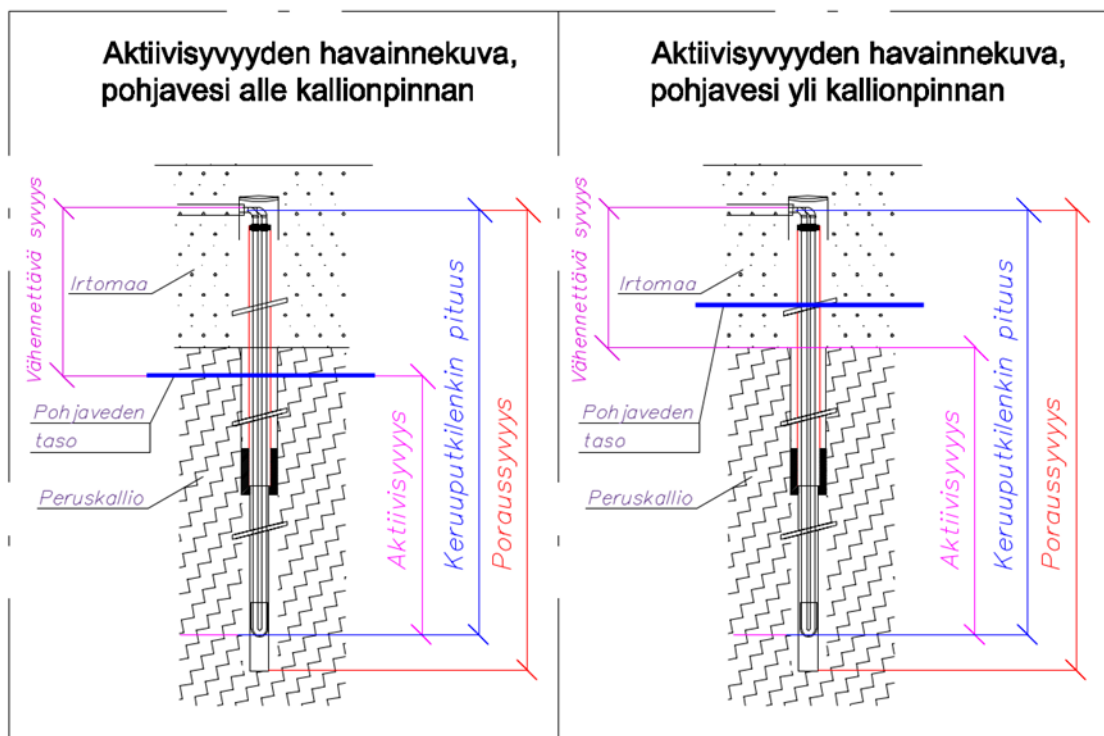
jossa k on vinoporauskuksen kulma ja c on lämpökaivon syvyys. Lämpökaivojen teoreettinen suojaetäisyyden väheneminen (a_2) voidaan laskea kaavalla

$$a_2 = \frac{\sin k * c}{2}.$$

Se, kuinka monta senttimetriä (a_3) lämpökaivo menee vinoon yhtä metriä kohden, selviää alla olevalla kaavalla. [15]

$$a_3 = \sin k * 100$$

Lämpökaivon suunnittelussa on otettava huomioon, että lämpöä ei saada koko poraus-
syvyydeltä vaan pelkästään aktiivisyvyyden pituudelta. Aktiivisyvyys tarkoittaa syvyyttä,
josta lämpökaivo saa tuotettua lämpöä. Aktiivisyvyys määritellään kahdella tapaa, mikä
ilmenee kuvasta 9. Pohjaveden ollessa alle kallionpinnan keruuputken alin piste ja poh-
javeden taso määrittävät aktiivisyvyyden. Pohjaveden tason ollessa korkeammalla kuin
peruskallio, määrittyy aktiivisyvyys keruuputken alimmasta pisteestä peruskallion pin-
nalle. Lämpökaivon aktiivisyvyys saadaan mitattua vähentämällä lämpökaivoon asenne-
tun putkilenkin pituudesta joko veden pinnan syvyys tai kallionpinnan syvyys lämpökaivon
ylimmästä kohdasta. Vähennettäväksi syvyydeksi valitaan suurempi edellä mainituista.
[12]



Kuva 9. Aktiivisyvyyden esittävät havainnekuvat [12].

Pohjoismaissa lämpökaivot täyttyvät itsestään pohjavedellä muutaman päivän kuluessa porauksesta. Jos pohjaveden taso on liian alhainen eikä lämpökaivo täyty itsestään, voidaan lämpökaivo täyttää vedellä, bentoniitillä, betonilla tai kvartsihiekalla [16]. Täyteaineen määrä litroina saadaan laskettua kaavalla

$$Määrä = (\pi * r_1^2 * l_1 * 1000) - (\pi * r_2^2 * l_2),$$

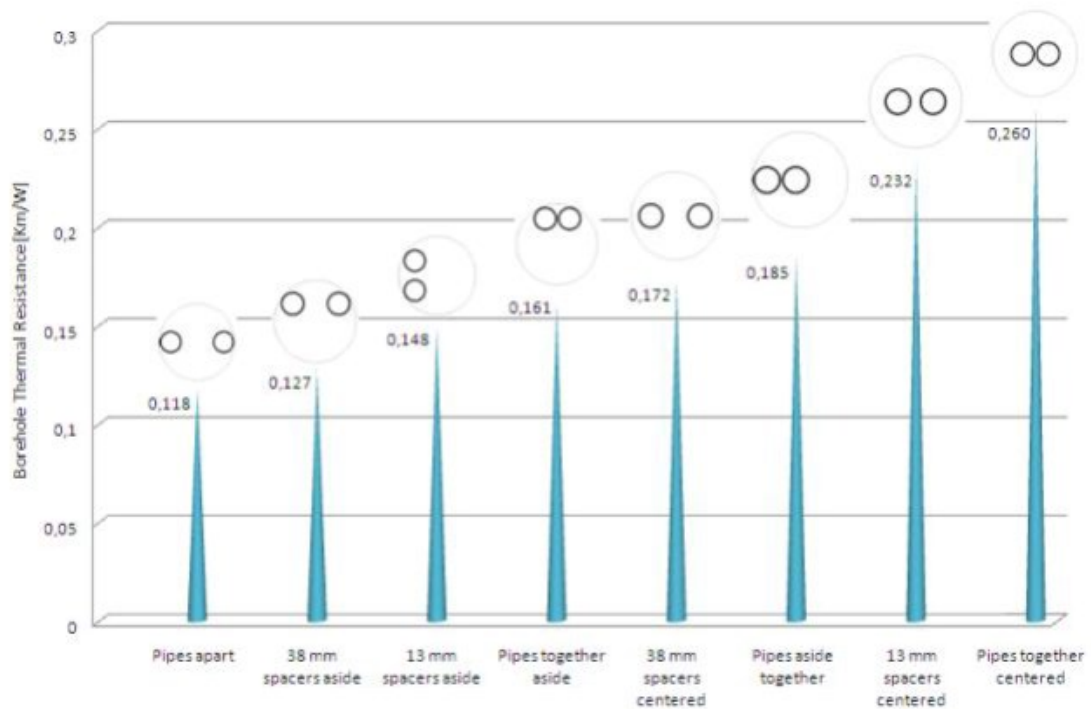
jossa r_1 on lämpökaivon säde (m), r_2 on lämmönkeruuputken säde (m), l_1 on lämpökaivojen yhteenlaskettu syvyys (m), l_2 on lämmönkeruuputken yhteenlaskettu syvyys, jossa on huomioitu meno sekä paluulämmönkeruuputki.

3.3 Lämmönkeruuputkisto

Lämmönkeruuputkiston materiaalina käytetään usein polyeteenistä valmistettuja muoviputkia, joiden lämmönjohtavuus on noin 0,42 W/mK, mikä on hyvä arvo. Harvemmin käytettyjä lämmönkeruuputken materiaaleja ovat teräs, kupari, polyvinyylikloridi (PVC) sekä muut muoviseokset. [16]

Lämpökaivoissa yleisin lämmönkeruutapa on U-keruuputki, jolla on korkea lämpövastus, mikä johtaa heikkoon lämmönkeräyskykyyn. Lämpövastuksen suuruuteen vaikuttaa esimerkiksi putkimateriaalin heikko lämmönjohtavuus, meno- ja paluuputken välinen lämmönsiirtyminen, putkien etäisyys kaivon seinämästä sekä kaivon täyteaineen lämmönjohtokyky. [16]

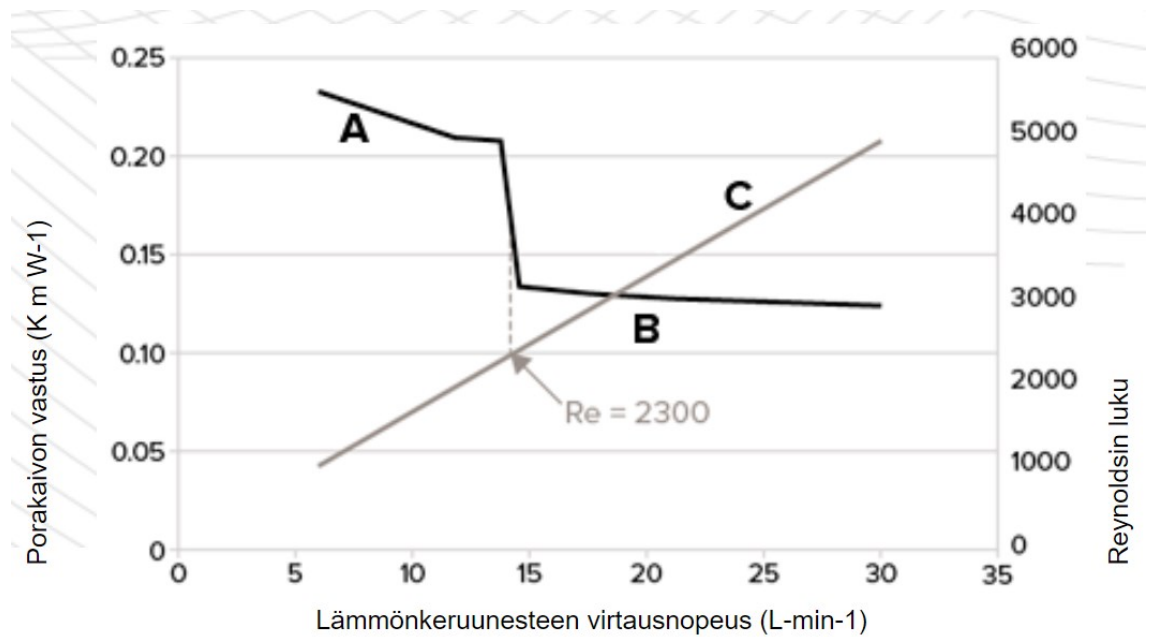
Kuvassa 10 on esitelty U-putken sijainnin vaikutus lämpökaivon sisäiseen lämpövastukseen. Minimaalinen lämpökaivon sisäinen lämpövastus saadaan, kun lämmönkeruuputket sijoitetaan erilleen toisistaan vastakkaisille puolille kaivon seinämää. [16]



Kuva 10. Lämmönkeruuputkien sijainnin vaikutus lämpökaivon sisäiseen lämpövastukseen [16].

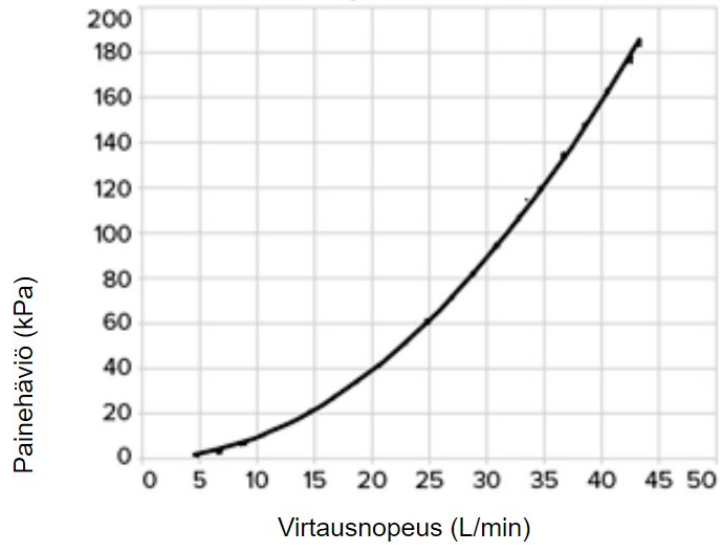
On huomioitava, että lämmönkeruuputkien kulku lämpökaivoissa ei aina ole suoraviivaista, vaan putket voivat mutkitella ja kulkea välillä erillään ja välillä yhdessä, sillä lämmönkeruuputket tulevat kelassa työmaalle. Lämmönkeruuputkien väliin voidaan asentaa tukikappaleita, jotka pitävät putket erillään toisistaan ja mahdollisimman lähellä lämpökaivon seinämää. Lämpökaivon lämpövastus selviää parhaiten lämpövastetestillä, jonka perusteella voidaan olettaa, että muutkin kaivot kulkevat saman lailla. [1]

Lämmönkeruuputkena voidaan käyttää normaalia sileäpintaista putkea tai rihlattua putkea (kuva 3). Kallion terminen johtavuus ja porakaivon termiset vastukset ovat kaksi vaikuttavaa tekijää kallion ja nesteen lämmönsiirtokykyyn. Kallion termisiin ominaisuuksiin ei voida vaikuttaa, koska ne ovat yhteydessä sijainnin geologisiin tekijöihin. Lämmönkeruuputken rihlatun sisäpinnan avulla voidaan parantaa lämmönsiirtokykyä kallion ja nesteen välillä. Rihlat luovat suuremman turbulenttivirtauksen, jonka avulla virtausnopeutta voidaan pienentää. Virtauksen ollessa pienempi vähenee myös energiankulutus, mikä puolestaan lyhentää takaisinmaksuaikaa 5–10 prosentilla ja pidentää lämpöpumpun käyttöikä. [11.] Kuvassa 11 on esitetty lämpökaivon vastuksen suuruus laminaarisessa ja turbulentiisessa virtauksessa.



Kuva 11. Laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen vaikutus lämpökaivo vastukseen A. Laminaarivirtaus B. Turbulenttivirtaus C. Reynoldsin luku [11].

Kuvan 11 mukaan suuremmalla virtausnopeudella saadaan alhaisempi vastus, mikä on hyvä mutta tuottaa pumpulle korkeamman energiankulutuksen. Virtauksen suurentuessa myös painehäviö kasvaa, mikä tarkoittaa sitä, että pumpun tulee olla suurempi. Pienet muutokset virtausnopeudessa voivat aiheuttaa suuria muutoksia painehäviöön. [11.] Kuvasta 12 nähdään virtausnopeuden vaikutus painehäviöön.




Kuva 12. Virtausnopeuden vaikutus painehäviöihin. 200 metrin lämpökaivo, jossa 40 millimetrin SDR11 U-putki. Nesteenä on käytetty vettä, joka on +10 °C [11].

Kuvan 12 perusteella painehäviö on verrannollinen virtausnopeuden neliöön, jolloin kaksinkertainen virtaus antaa nelinkertaisen painehäviön [11].

Taulukossa 3 on esitetty erikokoisille TurboCollectoreille ja sileille putkille ideaaliset virtausarvot.

Taulukko 3. MuoviTechin taulukko, jossa selviävät eri putkikokojen ideaalivirtaukset [9].

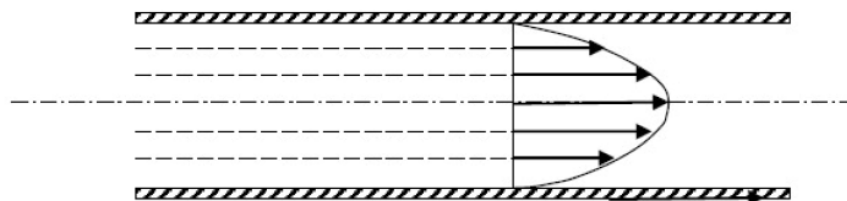
 Darcy-Weisbach Head Loss and Flow Velocity for the collectors Based on DIN 8074									
Pipe Size	O.D. (mm)	I.D. (mm)	Wall (mm)	Flow (l/min)	Re	Velocity (m/s)	Head Loss (Pa/m)	Recommended for Turbocollector	Recommended for Smooth
DN 32 SDR 17	32	28.2	1.9	20	2397	0.533	265		
DN 32 SDR 17	32	28.2	1.9	25	2997	0.667	383	*	
DN 32 SDR 17	32	28.2	1.9	30	3596	0.800	519	*	*
DN 32 SDR 17	32	28.2	1.9	34	4076	0.907	641		*
DN 32 SDR 17	32	28.2	1.9	40	4795	1.067	842		
DN 40 SDR 17	40	35.3	2.4	25	2397	0.427	136		
DN 40 SDR 17	40	35.3	2.4	30	2877	0.512	183	*	
DN 40 SDR 17	40	35.3	2.4	36	3452	0.615	248	*	*
DN 40 SDR 17	40	35.3	2.4	40	3836	0.683	296		*
DN 40 SDR 17	40	35.3	2.4	45	4315	0.768	361		
DN 45 SDR 17	45	39.7	2.6	27	2302	0.364	89		
DN 45 SDR 17	45	39.7	2.6	36	3069	0.486	143		
DN 45 SDR 17	45	39.7	2.6	42	3580	0.566	185	*	
DN 45 SDR 17	45	39.7	2.6	45	3836	0.607	208		
DN 45 SDR 17	45	39.7	2.6	50	4262	0.674	248		
DN 50 SDR 17	50	44.2	2.9	32	2455	0.350	72		
DN 50 SDR 17	50	44.2	2.9	38	2915	0.415	96	*	
DN 50 SDR 17	50	44.2	2.9	45	3452	0.492	127	*	*
DN 50 SDR 17	50	44.2	2.9	50	3836	0.546	152		*
DN 50 SDR 17	50	44.2	2.9	55	4220	0.601	178		

Note: Calculation is based on the thermophysical properties of fluid mixture of water and ethanol glycol (C₂H₅OH) 25% wt. at 0°C and safety factor 1,1. Freezing point: -15°C

Low flow rate
 Optimal flow rate
 Good flow rate
 Too high flow

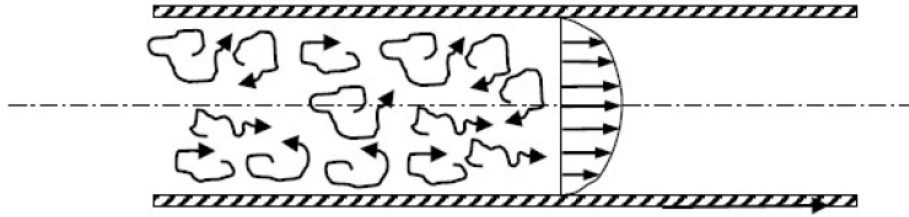
The purpose of this guide is to enhance the quality of the technical support for the Muovitech customers. The user is expected to have an understanding of the equations and principles involved their applicability and limitations. Use of this data is not intended to replace the evaluation of a professional consultant in this field. All tables, figures, equations, and results may be considered as recommendations only

Lämmönkeruuputkessa voi olla kahdenlaista virtausta, laminaarista sekä turbulენტtista. Laminaarisessa virtauksessa virtaus kulkee kohtisuoraan eivätkä partikkelit törmäile toisiinsa, mikä ilmenee kuvasta 13. [2]



Kuva 13. Nopeusprofiili laminaariselle virtaukselle [2].

Turbulenttinen virtaus syntyy, kun virtausnopeus nousee riittävän suureksi, jolloin virtauksessa partikkelit alkavat törmäilemään toisiinsa, jolloin myös vastuksen suuruus kasvaa. [2.] Tämä nähdään kuvasta 14.



Kuva 14. Nopeusprofiili turbulenttiselle virtaukselle [2].

Reynoldsin luvun avulla selvitetään, onko virtaus laminaarinen vai turbulenttinen. Reynoldsin luku saadaan laskettua kaavalla

$$Re = \frac{d_s * v}{\nu},$$

jossa d_s on putken sisähalkaisija (m), v on virtausnopeus (m/s), ν on liuoksen kinemaattinen viskositeetti (m^2/s). Virtausnopeus saadaan laskettua kaavalla

$$v = \frac{4 * q_v}{1000 * d_s * \pi},$$

jossa q_v on tilavuusvirta (dm^3/s). Kinemaattinen viskositeetti saadaan laskettua kaavalla

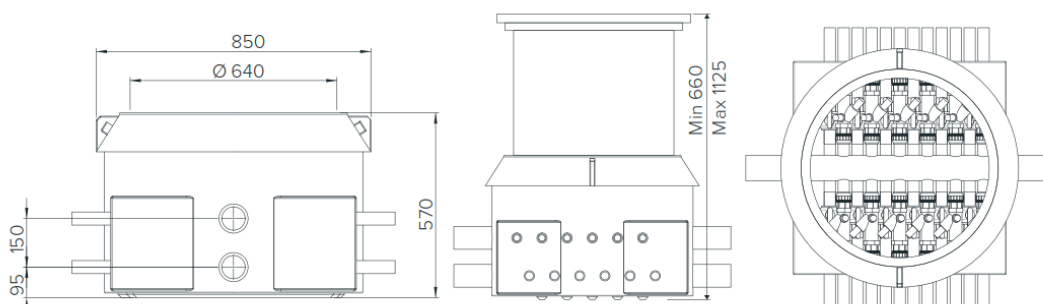
$$\nu = \frac{\eta}{\rho},$$

jossa η on liuoksen dynaaminen viskositeetti ($Pa*s$) ja ρ on liuoksen tiheys (kg/m^3) tai kaavalla, joka esitetty lämmönkeruunesteen puolella. [2]

Reynoldsin luvun ollessa pienempi kuin 2 320, on kyseessä laminaarinen virtaus. Reynoldsin luvun ollessa välillä 2 320–3 000 ollaan siirtymäalueella, jossa virtauksella on taipumus olla turbulenttinen, eli virtaus käyttäytyy epämääräisesti eikä palaudu enää laminaariseksi. Rihlatulla lämmönkeruuputkella Reynoldsin luvun ollessa suurempi kuin 3 000 voidaan olettaa virtaus täysin turbulenttiseksi. Sileällä lämmönkeruuputkella Reynoldsin luvun ollessa suurempi kuin 4 000 voidaan olettaa virtaus täysin turbulenttiseksi. [2; 9.]

3.4 Kokoomakaivot

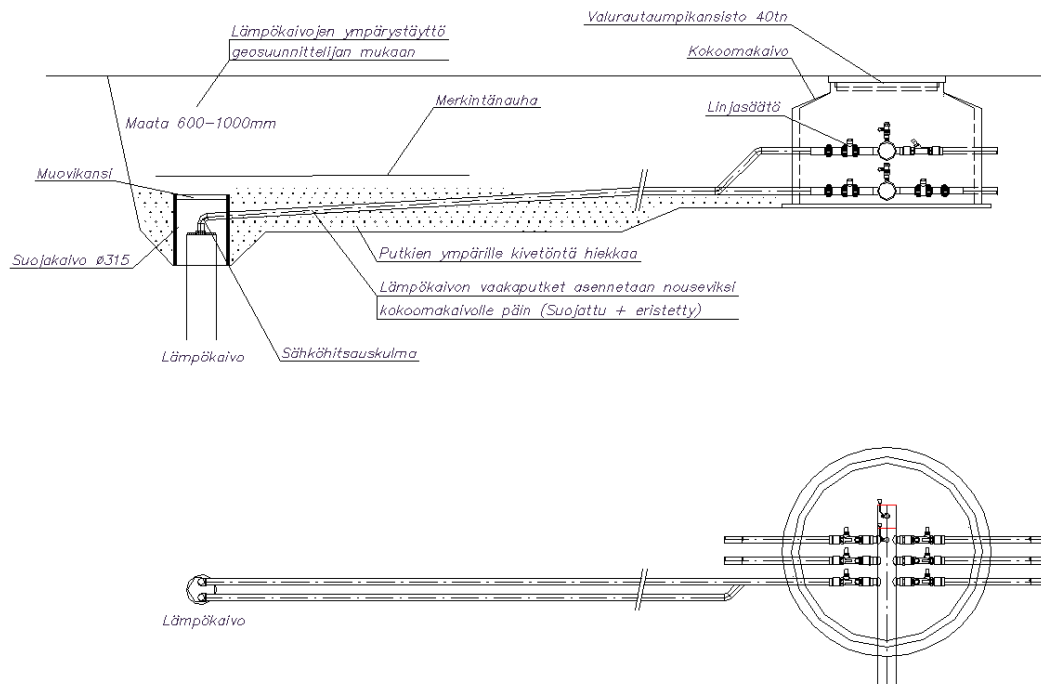
Kokoomakaivoja käytetään yleisesti suuremmissa hankkeissa ja useita kaivoja voidaan kytkeä sarjaan tarvittaessa. Kokoomakaivot valmistetaan polyeteenistä UV-suojalla. Kokoomakaivoon sisältyy kansi (komposiittikansi 1,5 tonnille), virtausmittari (kuituvahvisteista muovista) ja sulkuventtiili (polyeteeniä). Komponentit hitsataan yhteen, jolloin korrosio ei vaikuta ja järjestelmä on turvallinen. Komposiittikannen voi korvata ajokelpoisella kannella 40 tonnia varten. Kokoomakaivoja on useita kokoja, mutta isoissa kohteissa hyviä on esimerkiksi MuoviTechin valmistama COMPACT (runkoputki 40–110 millimetriä, liitäntöjä enintään 12 kappaletta ja 32–45 millimetrin kokoisia kollektoreita) tai DN1200 (runkoputki 40–160 millimetriä, liitäntöjä enintään 20 kappaletta ja 32–50 millimetrin kokoisia kollektoreita). Kuvassa 15 on esitelty MuoviTechin COMPACT-kokoomakaivon periaatekuva. [11]



Kuva 15. MuoviTech, COMPACT-kokoomakaivon periaatekuva [11].

3.5 Vaaka- ja runkoputkisto

Lämpökaivon vaakaputkia käytetään lämmönsiirtämiseen lämpökaivon ja kokoomakaivon välillä. Suojaputkien korkeus säädetään haluttuun tasoon ja lämpökaivoputkien yläpää katkaistaan sopivan mittaiseksi siten, että ilma pääsee poistumaan putkistosta kokoomakaivoille. Vaakaputkien tulee olla eristettyjä, jotta lämpökaivosta saatu lämpö ei karkaa. Vaakaputket voivat olla valmiiksi eristettyjä PE-putkia, tai ne voidaan eristää esimerkiksi styroksi kouruilla. [12.] Kuvasta 16 nähdään havainnekuva kulkuväylästä kokoomakaivon ja lämpökaivon väliltä.



Kuva 16. Havainnekuva, jossa kulkuväylä kokoomakaivolta lämpökaivolle [12].

Runkoputkistolla siirretään lämpöä kokoomakaivojen ja sulkuventtiilikaivon välillä. Sulkuventtiilikaivolla tarkoitetaan kokoomakaivoa, johon muut kokoomakaivot yhdistetään. Runkoputken materiaalina käytetään polyeteeniä, joka on joko valmiiksi eristetty tai eristetään asennettaessa eristekouruilla. [12]

3.6 Lämmönkeruuneste

Lämmönsiirtonesteellä siirretään lämpöä lämpökaivoista putkistoa pitkin lämpöpumpulle. Suomen kylmien talvien vuoksi keruuputkistoissa kiertävän lämmönsiirtonesteen tulee kestää pakkasta. Lämmönsiirtonesteinä käytetään yleisesti 25–30 prosentista vesi-etanoliseosta, jonka avulla lämmönsiirtoneste ei jäädy kovilla pakkasilla. [16]

Suomessa käytetyin lämmönsiirtoneste on Altian valmistama Naturet. Naturet- tuotteet valmistetaan denaturoidusta etanolista, vedestä ja pienestä määrästä korroosioinhibiittiseokseta. Altian valmistamia Naturet –17 °C ja Naturet GeoSafe -lämmönsiirtonesteitä

ei ole luokiteltu akuutisti myrkyllisiksi tai haitallisiksi. Vahinkotilanteessa, jossa maalämpönestettä joutuu pohjaveteen, alkaa sen komponentit hajota biologisesti ja laimentua veden virtauksien mukana. Pohjavesialueella ei suositella käytettäväksi normaalia maalämpönestettä vaan esimerkiksi Altian Naturet GeoSafe –nestettä. [17; 18.]

Naturet lämmönsiirtonesteen jäätymispiste on -17 astetta etanolipitoisuuden ollessa 28 prosenttia. Lämmönsiirtonesteen tiheys, lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti ja kinemaattinen viskositeetti vaihtelevat nesteen lämpötilasta ja etanolin painoprosenttiosuudesta riippuen. Tiheys saadaan laskettua kaavalla

$$\begin{aligned} \rho = & 987,8132 + 0,4205762 * T - 1,5016 * 10^{-2} - 4,0273 * 10^{-6} * T^3 - 9,0771 * x \\ & - 2,4229 * 10^1 * x^2 + 58,59776 * x^3 - 3,9852 * T * x + 3,200024 * T * x^2 \\ & + 0,05253268 * T^2 * x - 4,6783 * 10^2 * x^2 \end{aligned}$$

jossa ρ on tiheys (kg/m^3), T on liuoslämpötila ($^{\circ}\text{C}$) ja x on painoprosenttiosuus. Lämmönjohtavuus saadaan laskettua kaavalla

$$\begin{aligned} \lambda = & 0.5645022 + 0.00127497 * T - 2.2567 * 10^{-7} * T^2 - 6.2843 * 10^{-1} * x + 0.2467922 \\ & * x^2 - 2.0238 * 10^{-3} * T * x \end{aligned}$$

jossa λ on lämmönjohtavuus, T on liuoslämpötila ($^{\circ}\text{C}$) ja x on painoprosenttiosuus. Ominaislämpökapasiteetti saadaan laskettua kaavalla

$$\begin{aligned} C_p = & 4.221013 - 5.7570 * 10^{-3} * T - 1.7665 * 10^{-5} * T^2 + 8.6870 * 10^{-8} * T^3 \\ & + 2.700127 * x - 1.2230 * 10^1 * x^2 + 8.971068 * x^3 + 0.0314671 * T * x \\ & - 1.8120 * 10^{-2} * T * x^2 + 7.9605 * 10^{-5} * T^2 * x - 7.7525 * 10^{-5} * T^2 \\ & * x^2 \end{aligned}$$

jossa C_p on ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK), T on liuoslämpötila ($^{\circ}\text{C}$) ja x on painoprosenttiosuus. Kinemaattinen viskositeetti saadaan laskettua kaavalla

$$\begin{aligned} nu = & -2,7723 * -1,9878 * 10^{-2} * T + 2,9640 * T^{-4} * T^2 - 6,9587 * 10^{-7} * T^3 + 3,6085 \\ & * x - 6,0183 * x^2 + 2,63869 * x^3 - 2,6785 * 10^{-2} * T * x + 0,04898696 \\ & * T * x^2 - 4,0447 * 10^{-4} * T^2 * x + 2,1364 * 10^{-4} * T^2 * x^2 \end{aligned}$$

$$\nu = 10^{-3} * 10^{nu}$$

jossa ν on kinemaattinen viskositeetti (m^2/s), T on liuoslämpötila ($^{\circ}C$) ja x on painoprosenttiosuus. Lämmönsiirtonesteen jäätymispiste voidaan laskea kaavalla

$$\text{Jäätymispiste} = -5,0102 + 57,994 * x - 639,03 * x^2 + 1121,4 * x^3 - 670,83 * x^4$$

jossa x on painoprosenttiosuus. Jos tiedetään jäätymispiste mutta ei lämmönsiirtonesteen painoprosenttiosuutta, voidaan se laskea kaavalla

$$x = 0,0078889 - 0,024287 * \text{Jäätymispiste} - 0,00084026 * \text{Jäätymispiste}^2 \\ - 0,00002094 * \text{Jäätymispiste}^3 - 1,7249 * 10^{-7} * \text{Jäätymispiste}^4$$

jossa x on painoprosenttiosuus. [12; 19.]

Hyvässä lämmönsiirtonesteessä on

- alhainen jäätymispiste
- pieni viskositeetti
- hyvä lämmönjohtavuus
- korkea ominaislämpökapasiteetti
- yhteensopivuus muiden materiaalien kanssa
- korkea pintajännitys
- alhainen vaahtoamistaipumus
- alhainen diffuusitaipumus
- alhainen erottumiskyky esimerkiksi jäätymistilanteissa
- kemikaalisesti stabiili

- palamaton
- myrkytön
- biologisesti hajoavaa
- hyvä saatavuus ja halpa hinta

Lämmönsiirtonesteen suuren määrän vuoksi liuoksen valinnalla on vaikutus järjestelmän investointi- sekä käyttökustannuksiin. [2; 16; 19.]

3.7 Pumput

Lämpökaivokenttään tarvitaan pumppu maalämpönesteen liikuttamiseen. Pumpun valintaan vaikuttavat virtaama, kokonaispaine sekä maalämpönesteen ominaisuudet. Pumpun valinta voidaan tehdä laskemalla painehäviö

$$\Delta P = \frac{f * (\rho * Q^2 * l)}{(2 * d)}$$

jossa f on kitkakerroin, ρ on tiheys, Q on virtaus (m^3/s), l on putken pituus ja d on putken halkaisija [9]. Kitkakerroin riippuu virtausjärjestelmästä ja voidaan laskea seuraavilla kaavoilla

$$f = \frac{64}{Re}, \text{ jos } Re \leq 2300$$

$$f = \frac{1}{(0,79 * \ln Re - 1,64)^2}, \text{ jos } Re \geq 2300$$

Pumput tulee mitoittaa talviolosuhteita varten, jolloin tilavuusvirta on suurempi [9]. Kun järjestelmään on valittu sopiva pumppumalli, voidaan pumpun sähköverkosta ottama teho lämmitys- ja lataustilanteessa laskea kaavalla

$$P = \frac{\Delta p * qv}{\eta},$$

jossa P on pumpun sähköverkosta ottama teho (kW), Δp on kokonaispaine (kPa), qv on virtaama (m^3/s) ja η on pumpun kokonaishyötysuhde. Sähköverkosta otettu teho on latauksessa (kesä) pienempi kuin lämmityksessä (talvi) [2]. Hyötysuhde pumpulle eli COP (Coefficient of Performance) saadaan laskettua kaavalla

$$COP = \frac{\eta_c * T_L}{T_L - T_H},$$

jossa COP on hyötysuhde, η_c on ideaalisuuskerroin, jonka suuruus on 0,5–0,7, T_L on lämpöpumpun lauhtumislämpötila (K), joka on yleensä 1–3 °C korkeampi kuin lämpöpumpulla tuotetun lämmitysveden lämpötila, T_H on lämpöpumpun höyrystymislämpötila (K), joka on yleensä 5–10 °C alempi kuin lämpöpumpun lämmönlähteenä käyttämän veden tai liuoksen lämpötila. Hyvällä pumpulla on korkea hyötysuhde ja pieni ottoteho. [20]

Tekonurmikentälle tulee selvittää pumpun käyttötunnit lämmitystä (talvea) ja latausta (kesää) varten, jonka jälkeen voidaan laskea vuoden aikana käytetty energian määrä (MWh/a). Pumpun käyttötuntien selvittämisessä tulee ottaa huomioon, että pumput voivat olla sammuksissa ulkolämpötilan vuoksi esimerkiksi lämpötilan alittaessa –26 °C tai ollessa 5–10 °C, jolloin kenttää ei ole järkeä lämmittää tai ladata. Sähköenergian määrä (MWh) saadaan laskemalla käyttötunnit (h) kerrottuna ottoteholla (kW) ja jakamalla se tuhannella. Kun kerrotaan sähköenergian määrä (MWh) sähkön hinnalla (€/MWh), saadaan käyttökustannusten määrä vuodessa (€/a). Latauksen ja lämmityksen vuotuiset kustannukset tulee laskea erikseen, ja lopulta ne voidaan yhdistää, jolloin saadaan vuoden kokonaiskustannus (€/a). [2; 12.]

4 Menetelmät

4.1 Kohteen lähtötiedot

Insinööriyön kohteena on Sipoon Söderkullan urheilukenttä. Tekonurmen lämpöenergian tarve on 578 MWh vuodessa, josta lähdelämmöllä (lämpöpumpun tuottama energia) tuotetaan 491 MWh vuodessa ja loput saadaan kaukolämmöllä. IDA ICE-datan perusteella saatava lämpöenergia vuodessa on 706 MWh, josta lähdelämmöllä tuotetaan 600 MWh ja loput tuotetaan kaukolämmöllä. Lämmitysjärjestelmän mitoitusteho on 526 kW, josta 320 kW tuotetaan lähdelämmöllä ja 206 kW kaukolämmöllä. [12]

Taulukko 4. Tekonurmen lämpöenergian ja -tehon tarpeen ja lämmönlähteiden osuudet tarvittavasta lämpöenergiasta ja -tehosta [12].

Lämmönlähde	Lämpöenergia [MWh]	Lämpöenergia [MWh]	Lämpöteho [kW]
Maalämpö	525	430	280
Sähkö	75	61	40
Lähdelämpö	600	491	320
Kaukolämpö	106	87	206
Yhteensä	706	578	526

Lämpökaivokenttään on mahdollista ladata lämpöä kesällä. Lämpökaivokenttä on mitoitettu talvella lämpötilalle 0/–3 °C ja kesällä +13/9 °C. Lämpökaivokentän putkiston rakennepaine on vähintään 10 bar. Liuospumpun mitoituksessa lämpökaivojen suunniteltuna aktiivisyvyytenä käytetään 275 metriä. [12]

Urheilukentälle on suunniteltu 28 kappaletta lämpökaivoja, joiden halkaisija on 115 millimetriä ja syvyys 280 metriä. Lämpökaivot on sijoitettu 20 metrin suojavälitäisyydelle toisistaan. Osa lämpökaivoista porataan vinoon 10 cm/m eli 6 asteen kulmaan. Liitteessä 2 on esitetty lämpökaivokentän asemapiirustus, jossa on merkittynä lämpökaivojen sijainnit ja porauskaltevuudet. Lämpökaivojen kokonaisaktiivisyvyystarve on 7 700 metriä. Mikäli kokonaisaktiivisyvyystarvetta ei saavuteta suunnitellulla kaivomäärällä, porataan suunnitelmassa varalla olevia kaivoja lisätyönä niin, että tavoite saavutetaan.

Lämpökaivokentässä käytetään seuraavia tuotteita

- Suojaputki 139,7 x 5 millimetriä, Muovitech
- Suojaputken kansi 139,7 millimetriä 2 x 45 millimetriä, Muovitech
- Turbocollector-lämmönkeruuputki 2x45mm, 45x2.4, PN10, SDR17, Muovitech
- Compact-kokoomakaivo 40 tonnin kannella, PN10, Muovitech
- DN1200-sulkuventtiilikaivo 40 tonnin kannella, PN10, Muovitech
- Inflex Thermal-vaakaputki 40 millimetriä, PN10, SDR17, Muovitech
- PE-putki, runkoputki 110 ja 160 millimetriä, PN10, SDR17, Muovitech
- Naturet -17 °C (28 p-%) lämmönsiirtoneste, Altia

Lähtötietoihin on merkitty, että kaivot porattaisiin 280 metrin syvyisiksi, mutta halutaan myös vertailla, miten alla mainitut muuttujat vaikuttavat lämpökaivon syvyyteen sekä kustannuksiin. EED-simuloinneissa vaihtuvia muuttujia ovat

- | | |
|--|---------|
| • Lämpöenergia kaivokentästä/kaivokenttään | MWh/a |
| • Lämpökaivojen määrä | kpl |
| • Lämpökaivojen syvyys | m |
| • Lämpökaivojen suojaetäisyys | m |
| • Lämmönkeruuputkien etäisyys toisistaan | mm |
| • Maanperänlämmönjohtokyky | W/(m*K) |
| • Lämpökaivon vastus | (m*K)/W |
| • Lämmönkeruunesteen pienin keskimääräinen lämpötila | °C |
| • Lämpökaivon täytteen lämmönjohtavuus | W/(m*k) |
| • Maan pinnan keskilämpötila | °C |

- Maaperän lämpövuoto W/m^2

4.2 EED

Earth Energy Designer (EED) -simulointiohjelmalla voidaan simuloida lämpökaivokentän toimivuutta.

Simuloidessa 280 metrin syvyistä kaivokenttää on käytetty taulukon 5 mukaisia lähtöarvoja.

Taulukko 5. EED-simulointiohjelman asetetut lähtötiedot.

Lämpökaivon syvyys ollessa		280 m
Maaperän ominaisuudet		Yksikkö Määrä
Lämmönjohtokyky	[W/(m*K)]	3,4
Volumetrinen lämpökapasiteetti	[MJ/(m ³ *K)]	2,16
Maapinnan lämpötila	[°C]	5,6
Maaperän lämpövuoto	[W/m ²]	0,05
Porausreikä		
Kaivojen asettelu		333
Aktiivisyvyys	[m]	275
Suojaetäisyys	[m]	20
Halkaisija	[mm]	114,3
Kontak.lämpövast putki/kaivoneste	[(m*K)/W]	0,08
Täytteen lämmönjohtavuus	[W/(m*K)]	0,6
Virtaus kaivoille	[l/s]	23,1
U-putki		
Ulkohalkaisija	[mm]	45
Seinäpaksuus	[mm]	2,6
Lämmönjohtokyky	[W/(m*K)]	0,42
U-kappaleen putkiväli	[mm]	69
Lämpövastus		
Neste/maa	[(m*K)/W]	0,11
Sisäinen	[(m*K)/W]	-
Lämmönsiirtoneste		
Lämmönjohtokyky	[W/(m*K)]	0,41
Kapasiteetti	[J/(Kg*K)]	4 209
Tiheys	[Kg/M ³]	970
Viskositeetti	[Kg/(m/s)]	0,0084
Jäätymispiste	[°C]	-18
Max keski lämpötila	[°C]	15
Min keski lämpötila	[°C]	-1,5
Simulaatiojakso		
Simulointiaika	[a]	30
Alkamis kuukausi	[kk]	1

Lähtöarvojen lisäksi EED:hen lisätään IDA ICE:illa tehty yhden vuoden tuntikohtainen teho, jossa on esitetty kaivolta tuleva sekä sinne menevä teho. Liitteessä 3 on esitetty yhden vuoden tuntikohtaisen tehon kaavio. Vuoden tuntikohtainen teho syötetään EED:hen muistion muodossa. Kuvassa 17 on esitetty esimerkki vuoden 2023 tuntikohtainen teho muistion muodossa. Teho on ilmaistu watteina (W) kuvassa 17.

Uudet_EED_tehot.txt - Notepad

File Edit Format View Help

3 1

dateformat ymd % Finland, etc

dateseparator -

2023-01-01 00:00	-213928,00	4,15
2023-01-01 01:00	-248475,00	4,75
2023-01-01 02:00	-253090,00	4,94
2023-01-01 03:00	-253718,00	5,11
2023-01-01 04:00	-252584,00	5,18
2023-01-01 05:00	-250656,00	5,33
2023-01-01 06:00	-249903,00	5,42
2023-01-01 07:00	-248914,00	5,47
2023-01-01 08:00	-248914,00	5,55
2023-01-01 09:00	-248793,00	5,56
2023-01-01 10:00	-248204,00	5,63
2023-01-01 11:00	-248468,00	5,59
2023-01-01 12:00	-249272,00	5,47
2023-01-01 13:00	-249721,00	5,33
2023-01-01 14:00	-249082,00	5,38
2023-01-01 15:00	-246108,00	5,83
2023-01-01 16:00	-240940,00	6,58
2023-01-01 17:00	-238154,00	7,09
2023-01-01 18:00	-237782,00	7,25
2023-01-01 19:00	-237882,00	7,25
2023-01-01 20:00	-237909,00	7,25
2023-01-01 21:00	-237957,00	7,23

Kuva 17. Esimerkki yhden vuoden tuntikohtaisesta tehosta muistion muodossa.

EED simuloineilla tarkastellaan, tulisiko lämpökaivokenttä toimimaan vähintään 30 vuoden ajan. Vaikka lämmönsiirtonesteen jäätymispiste on $-18,5$ astetta, tulee ottaa huomioon, että lämmönkeruuputkien ulkopuolella on pohjavettä, mikä on talvella altis jäätymiselle. Tämän takia lämmönsiirtonesteen pienin keskimääräinen lämpötila pidetään $-1,5$ asteessa, vaikka alin sallittu lämpötila on -5 astetta. Tämän avulla ehkäistään kaivojen jäätyminen.

EED:n optimointityökalua käytetään lämpökaivokentän vaihtoehtoisissa ratkaisuissa, joissa halutaan nähdä, mitä EED ehdottaa lämpökaivojen syvyydeksi tai lukumääräksi, jotta lämpökaivokenttä toimisi optimaalisesti. Optimointityökalun avulla saadaan helposti

paljon toimivia vaihtoehtoja lämpökaivokentälle. Optimointityökalussa voidaan asettaa raja-arvoja kaivojen asetteluvaihtoehdoille, pinta-alalle, kaivojen suojaetäisyydelle, kaivojen syvyydelle ja kaivojen lukumäärälle. Optimointityökalulle syötetyt raja-arvot ovat

• Kaivojen asetteluvaihtoehdot	333	
• Pinta-ala	100 x 200	m
• Kaivojen suojaetäisyys	20	m
• Kaivojen syvyys	275 tai 100–600	m
• Kaivojen lukumäärä	28 tai 1–80	kpl

Simulointiohjelma antaa monta eri vaihtoehtoa, joista pyritään valitsemaan kaikista todennukaisiin. Pinta-alan pituudet ovat lähellä todellisuutta. Lämpökaivojen suojaetäisyys toisistaan on vähintään 20 metriä, mutta todellisuudessa sitä on vaikea arvioida, sillä osa lämpökaivoista porataan vinoon liitteen 2 mukaisesti. Optimointityökalulla halutaan selvittää, mitä EED ehdottaa syvyydeksi, jos kaivomäärä pidetään 28 kappaleessa. Työkalulla halutaan myös selvittää, kuinka monta kaivoa tulee kaivokentässä olla, jotta aktiivisyys saadaan pidettyä 275 metrissä.

Taulukossa 6 on esitetty suoritettavat simuloinnit sekä simulointien eroavaisuudet. Simuloinneissa on selvitetty, miten erilaiset muutokset lähtötietoihin vaikuttavat lämpökaivokentän toimintaan. Taulukossa on kaksi lähtötilannetta, simulointi 1 ja simulointi 4. Simulointi 1 on lähtötilanne, johon voidaan verrata suurinta osaa simuloinneista. Simulointi 4 on lähtötilanne, johon voidaan verrata simulointeja, joissa on laskettu lämpökaivovastus (5, 6, 7, 29 ja 30).

Taulukko 6. EED:llä tehtävät simuloinnit ja niiden eroavaisuudet.

Simuloinnit	Muutos	Yksikkö	Arvosta	Arvoon	Huom.
Nro.					
1	Lähtötilanne	-	-	-	
2	Lämpökaivojen suojaetäisyys	[m]	20	25	
3	Lämpökaivojen suojaetäisyys	[m]	20	30	
4	Lähtötilanne lasketulla lämpökaivovastuksella	[(m*K)/W]	0,11	Laskettu	
5	Lämmönkeruuputkien etäisyys toisistaan	[mm]	69	59	Käytetään laskettua lämpökaivovastusta
6	Lämmönkeruuputkien etäisyys toisistaan	[mm]	69	49	Käytetään laskettua lämpökaivovastusta
7	Lämpökaivon täytteen lämmönjohtavuus	[W/(m*K)]	0,6	2,4	Käytetään laskettua lämpökaivovastusta
8	Maanperän lämmönjohtokyky	[W/(m*K)]	3,4	2,4	
9	Maanperän lämmönjohtokyky	[W/(m*K)]	3,4	4,4	
10	Lämpökaivo vastus	[(m*K)/W]	0,11	0,09	
11	Lämpökaivo vastus	[(m*K)/W]	0,11	0,14	
12	Lämpökaivo vastus	[(m*K)/W]	0,11	0,17	
13	Pienin keskimääräinen nesteen lämpötila	[°C]	-1,5	-0,5	
14	Pienin keskimääräinen nesteen lämpötila	[°C]	-1,5	-1	
15	Maan pinnan lämpötila	[°C]	5,6	6,6	
16	Maan pinnan lämpötila	[°C]	5,6	7,6	
17	Lämpökaivon häiriötön lämpötila	[°C]	-	-	Häiriöttömän lämpökaivon syöttämisellä tulee lämpövuoto nollata
18	Lämpökaivon häiriötön lämpötila	[°C]	5,6	6,6	Häiriöttömän lämpökaivon syöttämisellä tulee lämpövuoto nollata
19	Lämpökaivon häiriötön lämpötila	[°C]	5,6	7,6	Häiriöttömän lämpökaivon syöttämisellä tulee lämpövuoto nollata
20	Lämpökaivon häiriötön lämpötila	[°C]	5,6	8,6	Häiriöttömän lämpökaivon syöttämisellä tulee lämpövuoto nollata
21	Lämpöenergia kaivokentästä	[MWh/a]	525	360	
22	Lämpöenergia kaivokentästä	[MWh/a]	525	400	
23	Lämpöenergia kaivokenttään	[MWh/a]	0	250	
24	Lämpöenergia kaivokentästä/kaivokenttään	[MWh/a]	525/0	430/250	
25	Kaivojen määrä	[kpl]	28	44	Laskettu optimointityökalun avulla
26	Aktiivisyvyys	[m]	275	379	Laskettu optimointityökalun avulla
27	Kaivojen määrä	[kpl]	28	36	Laskettu optimointityökalun avulla sekä kaivokentän lataus otettu huomioon
28	Aktiivisyvyys	[m]	275	333	Laskettu optimointityökalun avulla sekä kaivokentän lataus otettu huomioon
29	Lämmönkeruuputken koko	[mm]	45	40	Kokonaispainehäviö pysyy samana kuin 45:ssä
30	Lämmönkeruuputken koko	[mm]	45	50	Kokonaispainehäviö pysyy samana kuin 45:ssä

Taulukossa 6 merkittyjen simulointien jälkeen pohditaan, halutaanko suorittaa lisää simulointeja ja mitä muutoksia tulee tällöin tehdä lähtötietoihin. Simulointien jälkeen tehdään kustannuslaskelma, josta selviää, mikä on investoinnin kannalta paras ratkaisu. Kustannuslaskelmat koostuvat tuotteiden kyselyajankohdan hinnoista sekä asennustyöstä.

5 Tulokset

5.1 Lämpövastetestit

Kohteeseen ei ole vielä tehty lämpövastetestä, mutta voidaan olettaa, että kallioperän keskimääräinen lämmönjohtavuus pysyy samana kuin viereisen tontin lämmönjohtavuus, joka on 3,4 W/(m*K). Lämpökaivon teoreettiseksi häiriöttömäksi lämpötilaksi saadaan 8,4 °C. Lämpökaivon lämpövastukseksi voidaan olettaa 0,09 (m*K)/W, joka on nor-

maaliarvo käytetyille kollektorityypille. Kun lämpökaivoista otetaan lämpöä, syntyy pystysuuntaista konvektiovirtausta. Konvektiovirtauksen takia lämpövastuksena voidaan käyttää arvoa, joka on 0,01–0,02 (m*K)/W suurempi kuin mitattu arvo. Tällöin lämpökaivon lämpövastukseksi saadaan 0,11 (m*K)/W. Kaivon latauksessa käytetään oletettua lämpövastusta 0,09 (m*K)/W. [7]

5.2 Lämpökaivot

Veden heikon lämmönjohtavuuden vuoksi haluttiin vertailla bentoniittia vaihtoehtoisena kaivon täyteaineena. SWOT-analyysin avulla voidaan vertailla veden sekä bentoniitin vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia. Pohjoismaissa harvemmin käytetään bentoniittia, sillä kaivot täyttyvät itsestään vedellä, mikä on ilmaista.

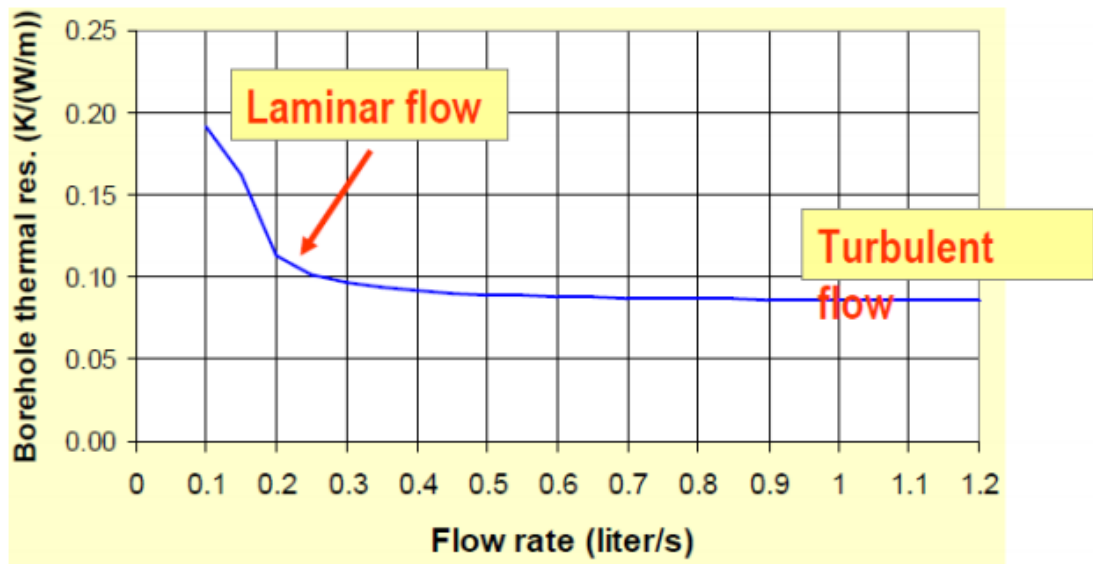
Taulukko 7. SWOT-analyysi lämpökaivon täyteaineesta.

Bentoniitti	Vesi
Vahvuudet	
Suurempi lämmönjohtavuus	Ilmaista
Aktiivisyvyyttä ei tarvitse huomioida	Kokemus
Heikkoudet	
Kallis	Matala jäätymispiste
Matala jäätymispiste	Matala lämmönjohtavuus
Mahdollisuudet	
Säästöä pumppauskustannuksissa	
Vähentää lämpökaivojen määrää	
Uhat	
Halkeilu	Jäätyminen
Riittääkö teho kaivoissa	

Taulukossa 7 todetaan, että bentoniitillä ei aktiivisyvyyttä tarvitse huomioida toisin kuin vedellä. Tällä tarkoitetaan sitä, että bentoniitin ollessa täyteaineena lämpökaivo täytetään koko matkalta, jolloin voidaan hyödyntää koko kaivon pituutta lämmönkeruussa.


5.3 Lämmönkeruuputki

Tavanomainen lämpövastus sileälle putkelle on 0,095 (m²K)/W ja TurboCollectorille 0,09 (m²K)/W. Kuvassa 18 on esitetty TurboCollectorin tavanomainen lämpövastus.



Kuva 18. Virtauksen vaikutus lämpövastukseen TurboCollector-putkessa.

Kun huipputeho lämmityksessä on 280 kW ja lämpötilan muutos 3 astetta, saadaan kokonaisvirtaamaksi 23,1 l/s eli 1 386 l/min. Kun lämpökaivoja on 28 kappaletta, saadaan yhden kaivon virtaukseksi 0,825 l/s eli 49,5 l/min. Kuvasta 19 nähdään, että virtaama 49,5 l/min on hyvin suuri 45 millimetrin TurboCollectorille. Kuvassa 19 on esitetty erikoisille TurboCollectoreille ja sileille putkille ideaaliset virtausarvot.

 Darcy-Weisbach Head Loss and Flow Velocity for the collectors Based on DIN 8074									
Pipe Size	O.D. (mm)	I.D. (mm)	Wall (mm)	Flow (l/min)	Re	Velocity (m/s)	Head Loss (Pa/m)	Recommended for Turbocollector	Recommended for Smooth
DN 32 SDR 17	32	28.2	1.9	20	2397	0.533	265		
DN 32 SDR 17	32	28.2	1.9	25	2997	0.667	383	*	
DN 32 SDR 17	32	28.2	1.9	30	3596	0.800	519	*	*
DN 32 SDR 17	32	28.2	1.9	34	4076	0.907	641		*
DN 32 SDR 17	32	28.2	1.9	40	4795	1.067	842		
DN 40 SDR 17	40	35.3	2.4	25	2397	0.427	136		
DN 40 SDR 17	40	35.3	2.4	30	2877	0.512	183	*	
DN 40 SDR 17	40	35.3	2.4	36	3452	0.615	248	*	*
DN 40 SDR 17	40	35.3	2.4	40	3836	0.683	296		*
DN 40 SDR 17	40	35.3	2.4	45	4315	0.768	361		
DN 45 SDR 17	45	39.7	2.6	27	2302	0.364	89		
DN 45 SDR 17	45	39.7	2.6	36	3069	0.486	143		
DN 45 SDR 17	45	39.7	2.6	42	3580	0.566	185	*	
DN 45 SDR 17	45	39.7	2.6	45	3836	0.607	208		
DN 45 SDR 17	45	39.7	2.6	50	4262	0.674	248		
DN 50 SDR 17	50	44.2	2.9	32	2455	0.350	72		
DN 50 SDR 17	50	44.2	2.9	38	2915	0.415	96	*	
DN 50 SDR 17	50	44.2	2.9	45	3452	0.492	127	*	*
DN 50 SDR 17	50	44.2	2.9	50	3836	0.546	152		*
DN 50 SDR 17	50	44.2	2.9	55	4220	0.601	178		

Note: Calculation is based on the thermophysical properties of fluid mixture of water and ethanol glycol (C₂H₅OH) 25% wt. at 0°C and safety factor 1,1. Freezing point: -15°C

■ Low flow rate
■ Optimal flow rate
■ Good flow rate
■ Too high flow

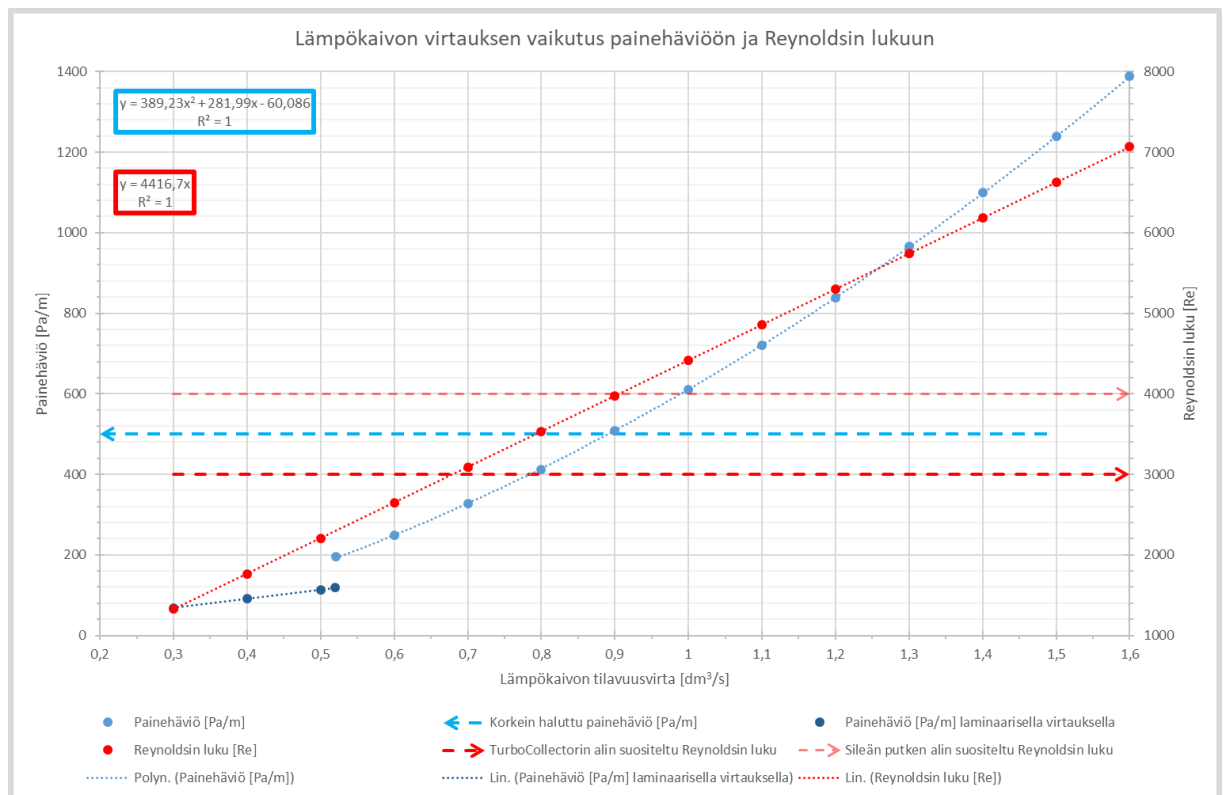
The purpose of this guide is to enhance the quality of the technical support for the Muovitech customers. The user is expected to have an understanding of the equations and principles involved their applicability and limitations. Use of this data is not intended to replace the evaluation of a professional consultant in this field. All tables, figures, equations, and results may be considered as recommendations only

Kuva 19. MuoviTechin taulukko, josta selviävät eri putkikokojen ideaalivirtaukset [9].

Täytyy kuitenkin huomioida, että kuva 19 on suuntaa antava ja sen arvot ovat valideja, kun ideaaliolosuhteet, kuten tietty lämpötila ja neste, vallitsevat. Taulukosta nähdään eri lämmönkeruuputkille ideaaliarvot Reynoldsin luvusta, virtauksesta, virtausnopeudesta ja painehäviöstä.

Laskettaessa lämpökaivokentälle sopivaa virtausta, voidaan luoda kaavio, jonka avulla se sujuu helposti. Kuvassa 20 on esitetty kaavio 45 millimetrin lämmönkeruuputkelle, jonka avulla voidaan rajata pienin sekä suurin virtaus yhtä lämpökaivoa kohden. Kuvassa on laskettu eri virtauksille Reynoldsin luku sekä painehäviö. Painehäviössä (Pa/m) on otettu huomioon meno- sekä paluuputki, eli todellisuudessa painehäviö putkimetriä kohden on puolet kuvassa 20 esitetystä arvoista. Lämpökaivon virtaukselle saadaan rajattua alue, jonka avulla voidaan laskea lämpökaivojen määrä lämpökaivokentässä. Minimivirtaus saadaan, kun Reynoldsin luku (punainen viiva) ja alin suositeltu Reynoldsin luku (punainen katkoviiva joko TurboCollectorille tai sileälle putkelle) kohtaavat. Maksimivirtaus saadaan, kun painehäviö (sininen viiva) ja korkein haluttu painehäviö (sininen

katkoviiva) kohtaavat. Korkein haluttu painehäviö on ennalta määritetty arvo, ja mitä suurempi kyseinen arvo on, sitä suuremmaksi pumpun kustannukset nousevat.



Kuva 20. Lämpökaivon virtauksen vaikutus painehäviöön ja Reynoldsin lukuun. Painehäviö (Pa/m) on laskettu 45 millimetrin lämmönkeruuputkelle ja siinä on huomioitu meno- sekä paluuputki.

Kuvasta 20 nähdään, että TurboCollector-putkella yhden lämpökaivon minimivirtaama on noin 0,7 l/s ja maksimivirtaama on noin 0,9 l/s. Kaivokentän kokonaisvirtaaman ollessa 23,1 l/s saadaan selville kaivojen määrä 26–33 kappaletta, kun jaetaan kokonaisvirtaama minimi- ja maksimivirtaamilla. Talvella Reynoldsin luku saa arvon 3 000–4 000 ja painehäviö arvon 500 Pa/(kaivometriä kohden).

Mikäli halutaan käyttää sileää lämmönkeruuputkea TurboCollectorin sijaan, joudutaan korkeinta haluttua painehäviötä nostamaan yli 600 Pa:iin/m. Näin ollen saadaan minimivirtaamaksi 0,9 l/s ja maksimivirtaama puolestaan riippuu valitusta painehäviöstä. Esimerkiksi kun painehäviön rajaa nostetaan 700 Pa:iin/m, saadaan maksimivirtaamaksi 1,1 l/s.

5.4 Lämmönkeruuneste

Lämpökaivokenttä on mitoitettu talvella lämpötilalle 0/-3 °C ja kesällä +13/9 °C. Lämmönkeruunesteen keskilämpötila on talvella -1,5 °C ja kesällä +11 °C. Taulukossa 8 on esitelty lämmönkeruunesteen eroavaisuuksia talvi- ja kesäaikaan sekä se, miten eroavaisuudet vaikuttavat Reynoldsin lukuun ja painehäviöön.

Taulukko 8. Lämmönkeruunesteen eroavaisuudet talvi- ja kesäaikana.

	Selite	Etanoli	Etanoli	Yksikkö
		Talvi	Kesä	
Liuos	Pitoisuus	28,00 %	28,00 %	[Paino %]
	Jäätymispiste	-18,38	-18,38	[°C]
	Ominaislämpökapasiteetti	4,21	4,24	[kJ/kgK]
	Tiheys	968	961	[kg/m ³]
	Kinemaattinen viskositeetti	7,24E-06	3,55E-06	[m ² /s]
	Lämmönjohtavuus λ	0,407	0,417	[W/mK]
	Prandtlin luku	72,61	34,73	
Lämmönkeruupukisto	Tilavuusvirta (q _v)	0,825	0,825	[dm ³ /s]
	Massavirta (q _m)	0,799	0,793	[kg/s]
	Virtausnopeus (v)	0,663	0,663	[m/s]
	Reynoldsin luku (Re)	3644	7431	
	Re * k/d	0,92	1,87	
	Kitkakerroin (λ)	0,041	0,034	
	Painehäviö (Δp)	119,8	99,5	[kPa]
	Painehäviö (Δp)	436	362	[Pa/m]

Taulukosta näemme, että mitoittaessa tulisi käyttää talviolosuhteita, jolloin Reynoldsin luku on matalampi ja painehäviö korkeampi, jolloin saadaan mitoitettua oikeankokoinen pumppu talviolosuhteisiin nähden ja virtaus saadaan pysymään turbulenttina. Laskennallisesti Reynoldsin luku vaihtelisi vuodenaikojen mukaan 3 644:n ja 7 431:n välillä. Painehäviö puolestaan välillä 362–436 Pa/m.

5.5 Pumput

Pumpun valintaa varten tulee tietää järjestelmän painehäviö, jotta voidaan mitoittaa sopiva pumppu järjestelmälle. Taulukossa 9 on esitetty painehäviölaskuri järjestelmälle. Painehäviölaskurissa on lueteltuna lämmönkeruunesteen, lämmönkeruuputkien, runkoputkien sekä vaakaputkien eri ominaisuuksia. Painehäviölaskurissa joudutaan mitoittamaan jokaisen runkoputken osio erikseen, kuten taulukosta 10 näkyy.

Taulukko 9. Painehäviölaskuri, jossa on laskettuna eri putkiosuuksien painehäviöt.

	Selite	Etanoli	Yksikkö
Liuos	Pitoisuus	28,00 %	[Paino %]
	Jäätymispiste	-18,38	[°C]
	Ominaislämpökapasiteetti	4,21	[kJ/kgK]
	Tiheys	968	[kg/m ³]
	Kinemaattinen viskositeetti	7,24E-06	[m ² /s]
	Lämmönjohtavuus λ	0,407	[W/mK]
	Prandtlin luku	72,61	
Lämmönkeruupukisto	Tilavuusvirta (q_v)	0,829	[dm ³ /s]
	Massavirta (q_m)	0,803	[kg/s]
	Virtausnopeus (v)	0,666	[m/s]
	Reynoldsin luku (Re)	3662	
	Re * k/d	0,92	
	Kitkakerroin (λ)	0,041	
	Painehäviö (Δp)	120,8	[kPa]
	Painehäviö (Δp)	439	[Pa/m]
Vaakaputki 40	Tilavuusvirta (q_v)	0,829	[dm ³ /s]
	Massavirta (q_m)	0,80	[kg/s]
	Virtausnopeus (v)	0,85	[m/s]
	Reynoldsin luku (Re)	4140	
	Re * k/d	1,18	
	Kitkakerroin (λ)	0,0394	
	Painehäviö (Δp)	40,9	[kPa]
	Painehäviö (Δp)	787,5	[Pa/m]
Runkoputkisto 110	Tilavuusvirta (q_v)	5,0	[dm ³ /s]
	Massavirta (q_m)	4,82	[kg/s]
	Virtausnopeus (v)	0,59	[m/s]
	Reynoldsin luku (Re)	8473	
	Re * k/d	0,82	
	Kitkakerroin (λ)	0,0330	
	Painehäviö (Δp)	8,3	[kPa]
	Painehäviö (Δp)	109,4	[Pa/m]
Runkoputkisto 160	Tilavuusvirta (q_v)	9,9	[dm ³ /s]
	Massavirta (q_m)	9,63	[kg/s]
	Virtausnopeus (v)	0,54	[m/s]
	Reynoldsin luku (Re)	11415	
	Re * k/d	0,75	
	Kitkakerroin (λ)	0,0306	
	Painehäviö (Δp)	0,7	[kPa]
	Painehäviö (Δp)	56,3	[Pa/m]

Taulukossa 10 on laskettu painehäviötä eri osuuksille, minkä jälkeen ne on yhdistetty.

Taulukko 10. Runkoputkien 110 ja 160 eri osuuksien painehäviöt.

Runkoputki 110	
Putkiston osio	Painehäviö [kPa]
Osa 1	8,3
Osa 2	
Osa 3	
Osa 4	
Yhteensä	8,3

Runkoputki 160	
Putkiston osio	Painehäviö [kPa]
Osa 1	2,4
Osa 2	0,7
Osa 3	
Osa 4	
Yhteensä	3,1

Taulukosta 11 näkyy koko järjestelmän kokonaispainehäviö, lukuun ottamatta lämmönjakuhuonetta. Lämpökaivokentän vaikeimman reitin kokonaispainehäviöksi on saatu noin 173 kPa, joka on pumpun valinnassa mitoittava tekijä.

Taulukko 11. Lämpökaivokentän kokonaispainehäviö ennen lämmönjakuhuonetta.

Kokonaispainehäviö	
Putkiston osio	Painehäviö [kPa]
Lämmönkeruuputkisto	121
Runkoputki 110	8
Runkoputki 160	3
Vaakaputket 40	41
Yhteensä	173,2

Pumpun käyttötunnit lämmityksessä (talvi) ja latauksessa (kesä) selviävät IDA ICE:illa tehdystä simuloinnista, jossa on esitetty vuoden tuntikohtainen teho (liite 3). Simuloinnista selviävät tarkat tunnit, jolloin tekonurmikenttää on lämmitetty ja ladattu. Taulukossa 12 on esitetty talven ja kesän käyttötunnit, pumpun ottoteho, saatu energia, sähkön hinta, kustannus talvi- ja kesäkausilta erikseen sekä talven ja kesän yhteenlaskettu kustannus.

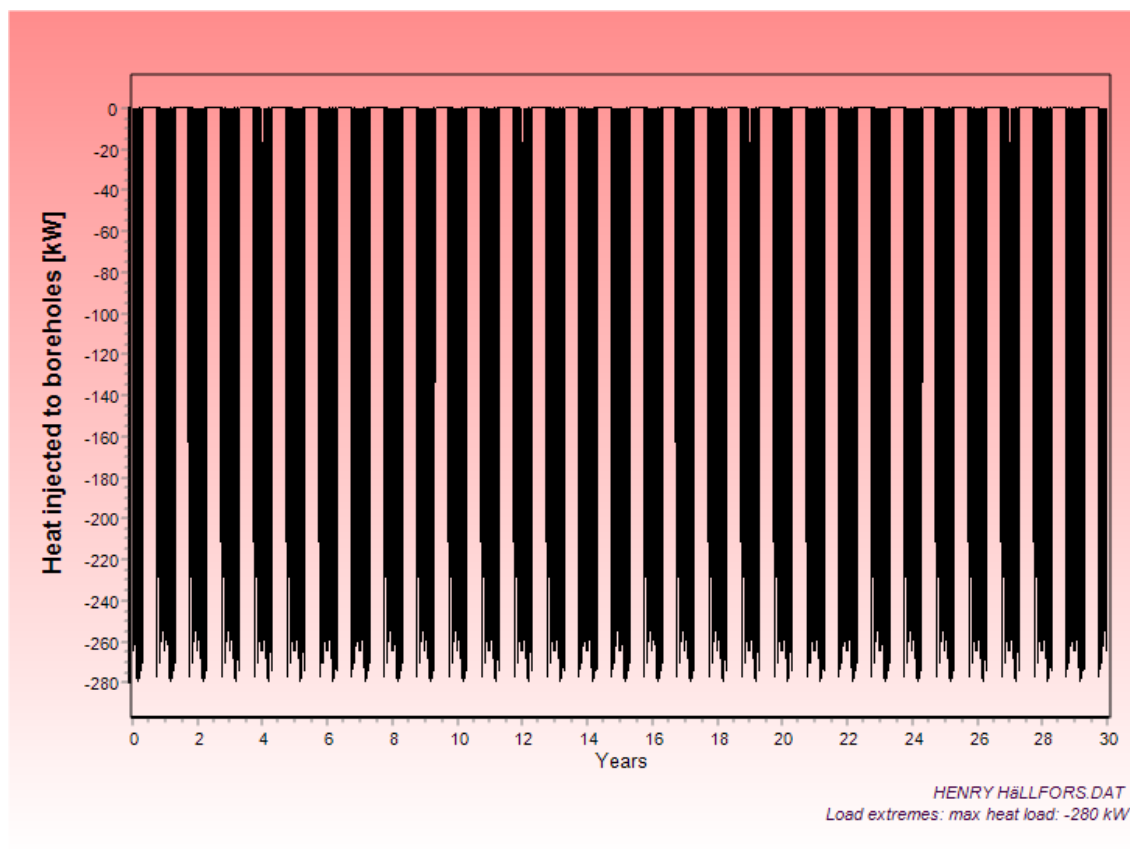
Taulukko 12. Pumpun yhden vuoden käytön kustannus.

	Käyttötunnit	Ottoteho	Energia	Sähkön hinta	Kustannus	Yht. Kustannus
	[h/a]	[kW]	[MWh/a]	[€/MWh]	[€/a]	[€/a]
Talvi	3 176	7,4	24	100	2 350	3 873
Kesä	2 672	5,7	15	100	1 523	

Kustannukset 30 vuoden käytön jälkeen ovat talven osalta 70 500 euroa ja kesän osalta 45 690 euroa. Yhteensä pumpun käyttö tuo siis kustannuksia 30 vuodessa 116 190 euroa. Lämpökaivojen määrä ei vaikuta pumpun käyttökustannuksiin, mikäli painehäviö ei muutu, sillä kokonaisvirtaama pysyy samana. Kuitenkin kokonaispainehäviön muutos vaikuttaa pumpun hankintakustannuksiin.

5.6 EED-simuloinnit

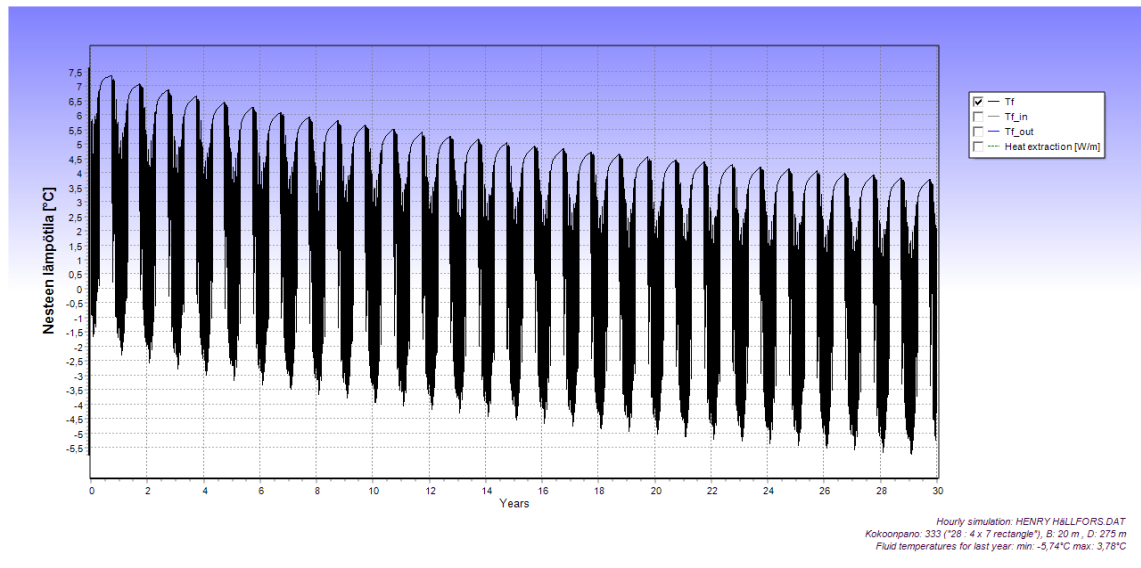
Simuloinnit 1–20, 25, 26, 29 ja 30 on simuloitu huomioimatta lämpökaivokentän latausta. Kuvassa 21 on esitetty EED:hen syötetyn tuntikohtaisen simulointidatan tiedot edellä mainituissa simuloineissa. Kaivokentästä saatava lämpöenergia on 525 MWh/a ja lämmityksen huipputeho on 280 kW.



Kuva 21. Lämpökaivokentän tuntikohtainen data ilman latausta.

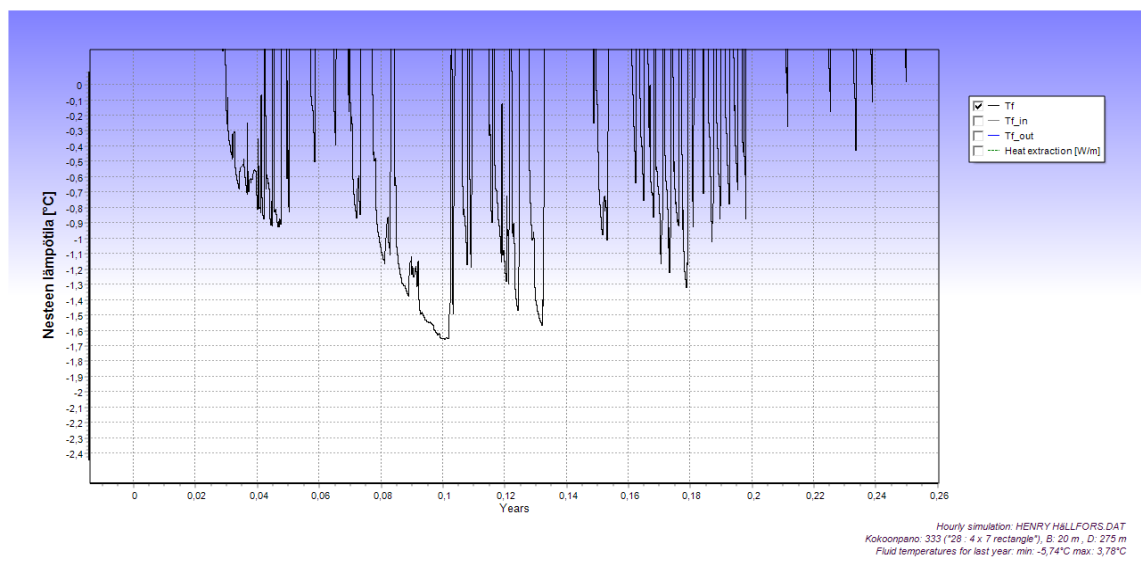
5.6.1 Simulointi numero 1

Ensimmäinen simulointi on tehty lähtötietojen mukaan ilman latausta. Kuvassa 22 on esitetty lämmönkeruunesteen keskilämpötila 30 vuoden ajalta.



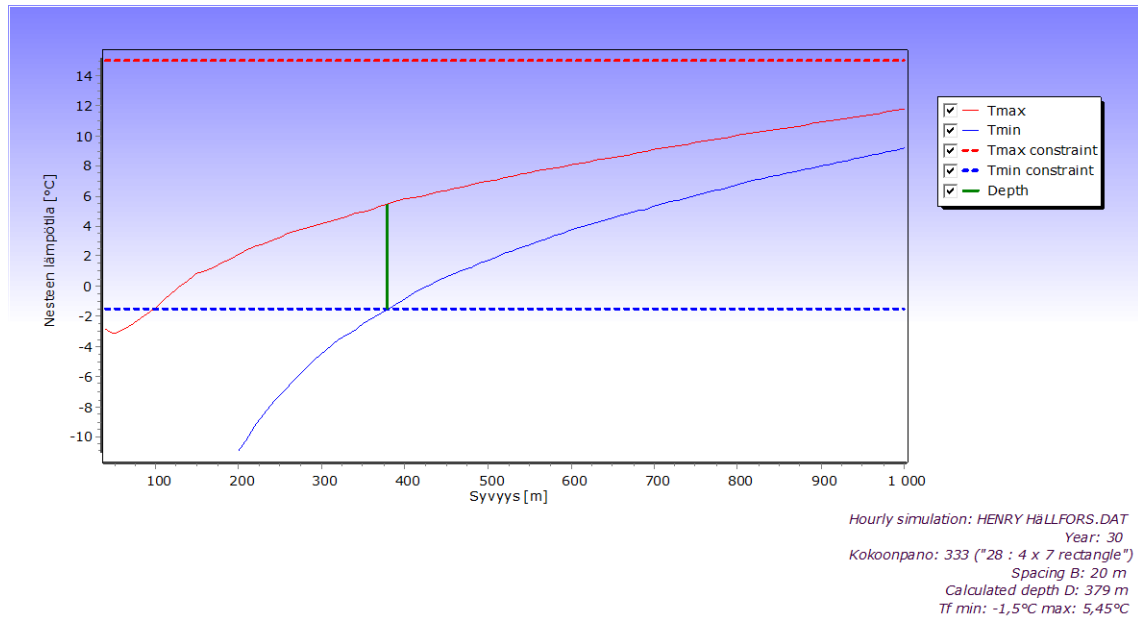
Kuva 22. Lämmönkeruunesteen keskilämpötilan muutos 30 vuoden aikana.

Kuvasta 22 ilmenee, että lämmönkeruunesteen keskilämpötila laskee $-5,74$ asteeseen 30 vuoden aikana, mikä tarkoittaa sitä, että kaivo tulisi jäätymään ennen 30 käyttövuotta. Kuvassa 23 on esitetty lämmönkeruunesteen keskilämpötila ensimmäisen talven aikana.



Kuva 23. Lämmönkeruunesteen keskilämpötila ensimmäisen talven aikana.

Kuvassa 23 ilmenee, että lämmönkeruunesteen keskilämpötila alittaa $-1,5$ asteen jo ensimmäisen talven aikana. EED:n avulla voidaan laskea lämpökaivon vaadittu aktiivisyvyys, jossa lämmönkeruunesteen keskilämpötila ei alittaisi $-1,5$ astetta 30 vuoden aikana. Kuvassa 24 on esitetty EED:n laskema aktiivisyvyyden määrä.



Kuva 24. Tarvittu aktiivisyvyys, jossa lämmönkeruunesteen keskilämpötila ei alittaisi $-1,5$ astetta 30 vuoden aikana.

Kuvassa 24 aktiivisyvyys määrittyy, kun lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila ja Tmin kohtaavat. EED:n laskennan mukaan lämpökaivon aktiivisyvyyden ollessa 379 metriä lämpökaivokenttä ei jäätyisi 30 vuoden aikana.

5.6.2 Simulointi numero 2 ja 3

Simuloinneissa on muutettu lämpökaivojen suojaetäisyyttä toisiinsa. Simuloinneilla haluttiin selvittää, miten lämpökaivojen suojaetäisyyden muutos vaikuttaa aktiivisyvyyteen. Saatuja tuloksia voidaan verrata simulointiin 1.

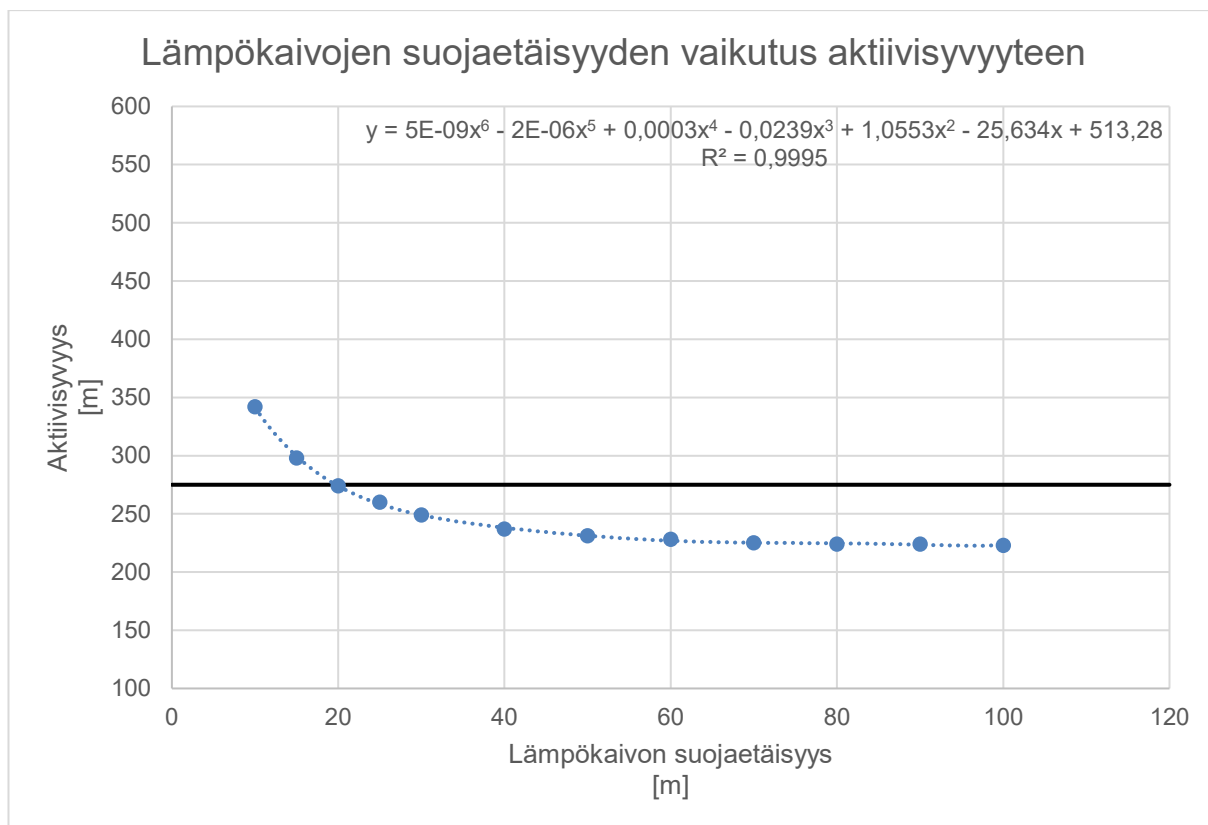
Toisessa simuloinnissa suojaetäisyyttä on muutettu 20 metristä 25 metriin. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan $-4,85$ astetta 30 vuoden aikana.

Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, joudutaan aktiivisyvyyttä muuttamaan 275 metristä 358 metriin.

Kolmannessa simuloinnissa suojaetäisyyttä on muutettu 20 metristä 30 metriin. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan $-4,27$ astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, joudutaan aktiivisyvyyttä muuttamaan 275 metristä 343 metriin.

Verrattaessa simuloiteja 2 ja 3 simulointiin 1 huomamme, että viiden metrin lisäyksellä lämpökaivojen suojaetäisyyteen saamme aktiivisyvyyttä vähennettyä noin 15 metriä. Tullee kuitenkin huomioida, että suojaetäisyyden vaikutus aktiivisyvyyteen riippuu siitä, kuinka syvä lämpökaivo on.

Lämpökaivokentästä otettua lämpöenergian määrää on vähennetty niin, että aktiivisyvydeksi riittäisi 275 metriä. Syvyyttä vähentämällä pystymme havainnoimaan kuinka paljon lämpökaivojen suojaetäisyyden muutos vaikuttaa aktiivisyvyyteen. Kuvassa 25 on esitetty lämpökaivojen suojaetäisyyden muutoksen vaikutus aktiivisyvyyteen. Kuvan perusteella suurentamalla viisi metriä suojaetäisyyttä voidaan pienentää aktiivisyvyyttä 14 metriä. Tällä on suuri vaikutus, sillä 14 metriä kerrottuna 28 kappaleella lämpökaivoja on 392 metriä kokonaisaktiivisyvyyttä, eli yli yhden kaivon verran.

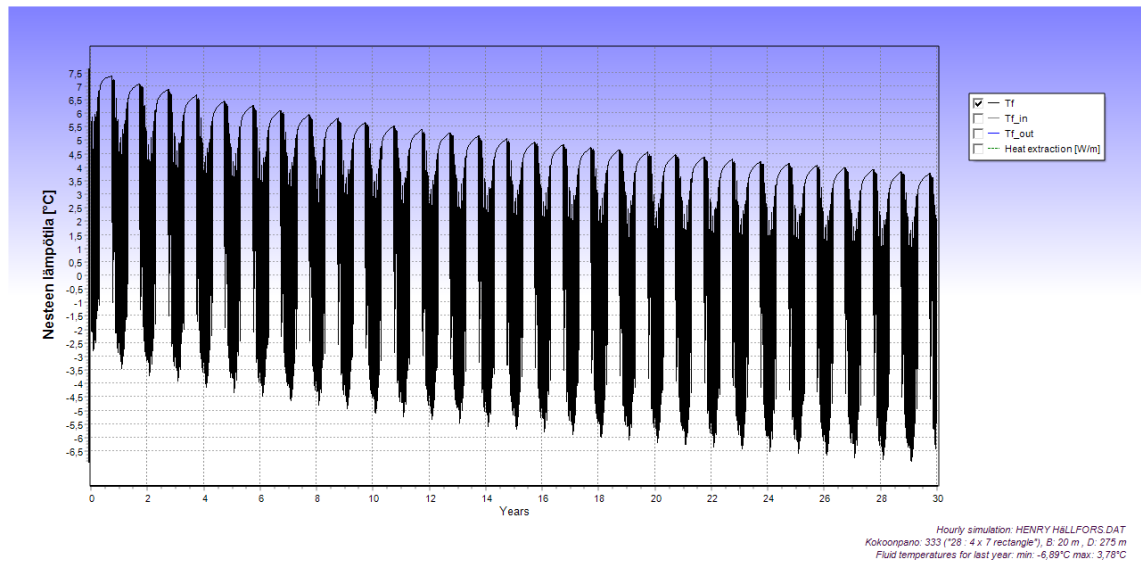


Kuva 25. Lämpökaivojen suojaetäisyyden vaikutus aktiivisyyteen.

5.6.3 Simulointi numero 4

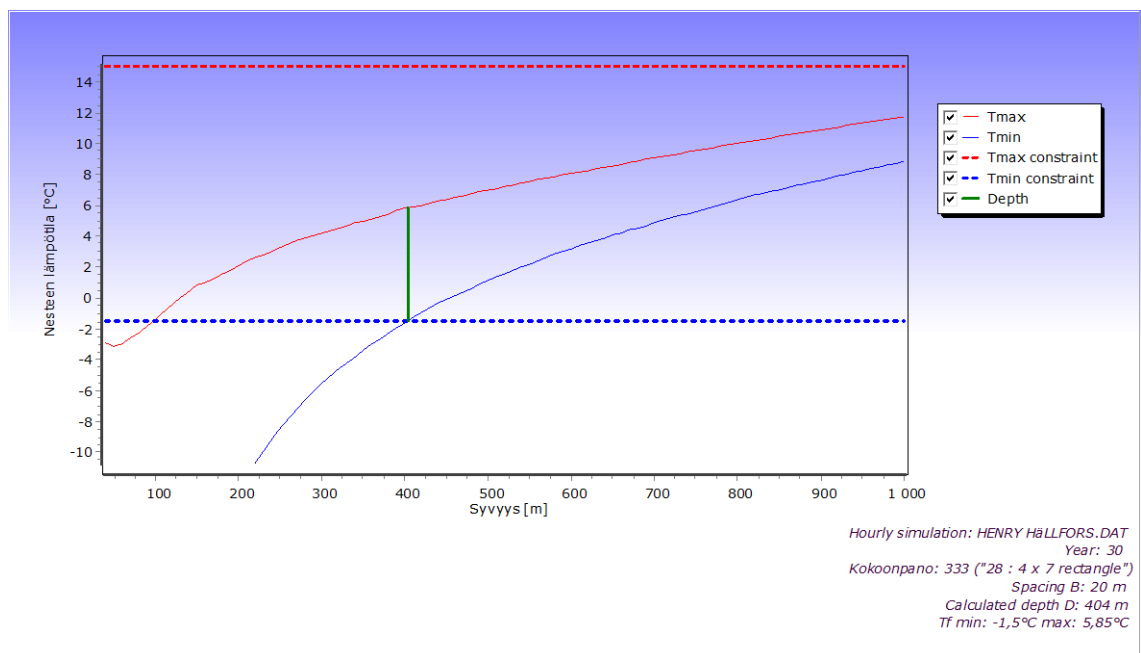
Neljäs simulointi on lähes identtinen kuin 1. Ainoa eroavaisuus on se, että tässä EED on laskenut lämpökaivojen lämpövastuksen. Lämpövastuksen laskemisella tarkoitetaan sitä, että EED laskee teoreettisen lämpökaivojen lämpövastuksen syötetyillä lähtötiedoilla. Neljäs simulointi tehtiin, jotta voitaisiin vertailla muita simulointeja lähtökohtiin, joissa on laskettu lämpövastus.

Laskettu lämpövastus on lähtötiedoilla 0,1457 (m*K)/W. Simuloinnilla 4 selviää lämmönkeruunesteen alin keskilämpötila, joka on 30 vuoden päästä -6,89 astetta. Kuvassa 26 on esitetty lämmönkeruunesteen keskilämpötila.



Kuva 26. Lämmönkeruunesteen keskilämpötila 30 vuoden ajalta lasketulla lämpövastuksella.

Vaadittava aktiivisyvyys on 404 metriä, jotta lämmönkeruunesteen keskilämpötila ei alittaisi $-1,5$ astetta. Kuvassa 27 on esitetty aktiivisyvyyden vaadittu määrä, jotta lämmönsiirtonesteen keskilämpötila ei alittuisi.



Kuva 27. Lasketun lämpövastuksen vaadittu aktiivisyvyyden määrä, jotta lämmönsiirtonesteen keskilämpötila ei alittuisi.

5.6.4 Simulointi numero 5 ja 6

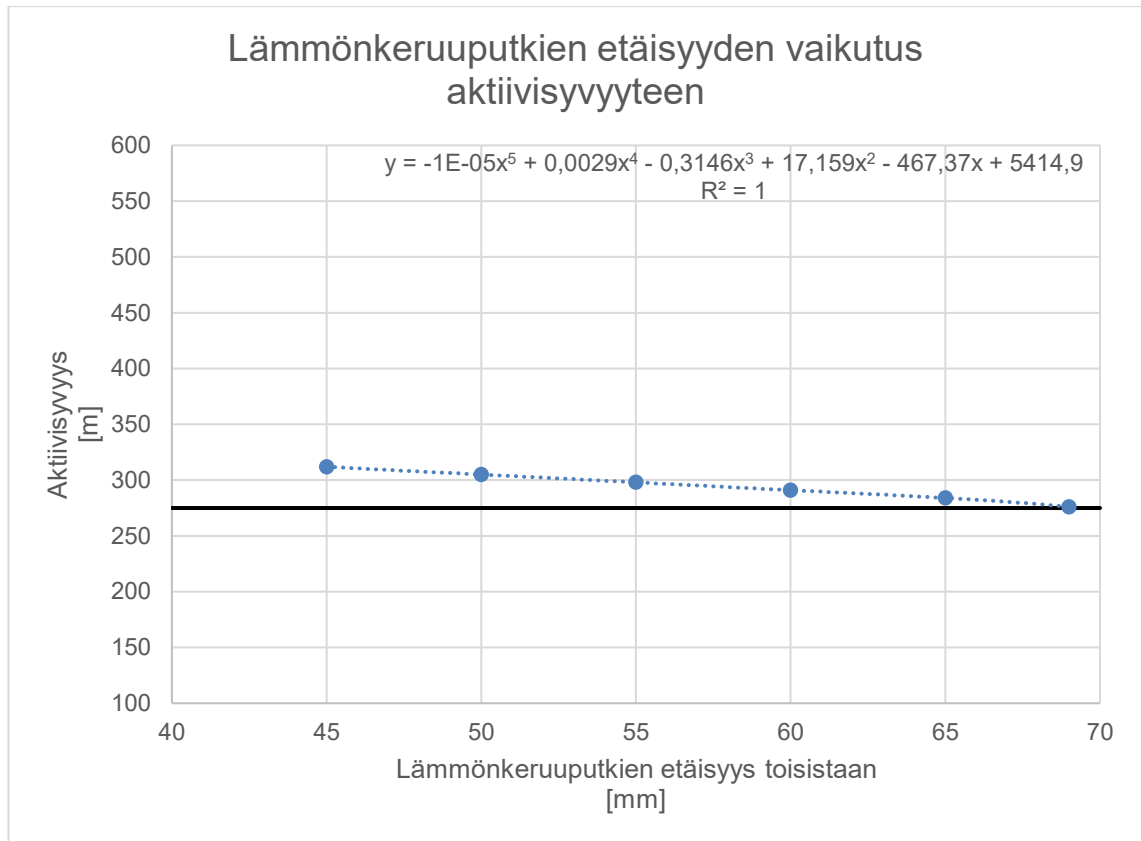
Simuloinneissa on muutettu lämmönkeruuputkien välistä etäisyyttä lämpökaivossa. Simuloinneilla haluttiin selvittää, miten lämmönkeruuputkien etäisyys toisistaan vaikuttaa aktiivisyyteen. Saatuja tuloksia voidaan verrata simulointiin 4, sillä laskuissa on käytetty laskettua lämpövastusta.

Viidennessä simuloinnissa lämmönkeruuputkien etäisyyttä toisiinsa on muutettu 69 millimetristä 59 millimetriin. Lämmönkeruuputkien etäisyyden muutos vaikuttaa lämpövastukseen, joka muuttuu arvosta 0,1457 (m³K)/W arvoon 0,1733 (m³K)/W. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan -7,76 astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila -1,5 astetta, joudutaan aktiivisyyttä muuttamaan 275 metristä 420 metriin.

Kuudennessa simuloinnissa lämmönkeruuputkien etäisyyttä toisiinsa on muutettu 69 millimetristä 49 millimetriin. Lämmönkeruuputkien etäisyyden muutos muuttaa lämpövastusta arvosta 0,1457 (m³K)/W arvoon 0,2003 (m³K)/W. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan -8,66 astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila -1,5 astetta, joudutaan aktiivisyyttä muuttamaan 275 metristä 438 metriin.

Verrattaessa simulointeja 5 ja 6 simulointiin 4 huomamme, että lähentämällä lämmönkeruuputkia 10 millimetriä, joudutaan aktiivisyyttä lisäämään noin 16 metriä. Tulee kuitenkin huomioida, että lämmönkeruuputkien etäisyyden vaikutus aktiivisyyteen riippuu siitä, kuinka syvä lämpökaivo on.

Lämpökaivokentästä otettua lämpöenergian määrää on pienennetty niin, että aktiivisyydeksi riittäisi 275 metriä. Tällöin päästään näkemään, kuinka paljon lämmönkeruuputkien etäisyys toisistaan vaikuttaa aktiivisyyteen, mikä ilmenee kuvasta 28. Lähentämällä lämmönkeruuputkia 10 millimetriä, joudutaan aktiivisyyttä lisäämään 15 metriä. Tällä on suuri vaikutus, sillä 15 metriä kerrottuna 28 lämpökaivolla tuo 420 metriä kokonaisaktiivisyyttä, eli noin puolentoista kaivon verran.



Kuva 28. Lämmönkeruuputkien etäisyyden vaikutus aktiivisyvyteen.

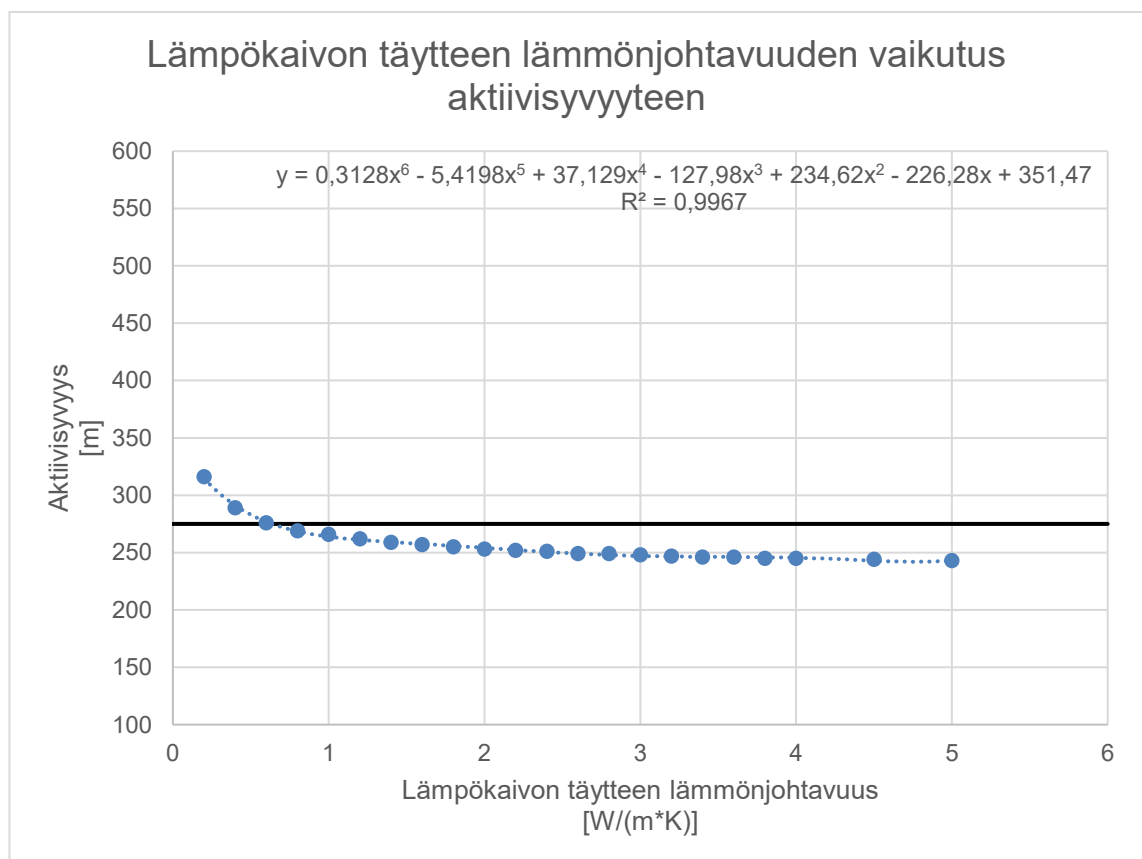
5.6.5 Simulointi numero 7

Simuloinnissa on muutettu lämpökaivon täyteen lämmönjohtavuutta. Simuloinneilla haluttiin selvittää, miten lämpökaivon täyteen lämmönjohtavuus vaikuttaa aktiivisyvyteen. Saatuja tuloksia voidaan verrata simulointiin 4, sillä laskuissa on käytetty laskettua lämpövastusta.

Seitsemännessä simuloinnissa on muutettu lämpökaivon täyteen lämmönjohtavuutta 0,6:sta arvoon 2,4 W/(m*K), joka on bentoniitin lämmönjohtavuus. Lämpökaivon täyteen lämmönjohtavuuden muutos muuttaa lämpövastusta 0,1457:sta arvoon 0,095 (m*K)/W. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan -5,02 astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila -1,5 astetta, joudutaan aktiivisyvyttä muuttamaan 275 metristä 368 metriin.

Verrattaessa simulointia 7 simulointiin 4 voidaan huomata, että nostamalla lämpökaivon täytteen lämmönjohtavuutta $2,4 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$, voidaan vähentää aktiivisyvyyttä noin 36 metriä. Vaikka kokonaisaktiivisyvyytenä tämä olisi erittäin suuri määrä, niin on hyvä muistaa, että bentoniitti ei ole ilmaista. Tulee ottaa myös huomioon, että lämpökaivon täytteen lämmönjohtavuuden vaikutus aktiivisyvyyteen riippuu siitä, kuinka syvä lämpökaivo on.

Lämpökaivokentästä otettua lämpöenergian määrää on pienennetty niin, että aktiivisyvyydeksi riittäisi 275 metriä. Tällöin päästiin näkemään, kuinka paljon lämpökaivon täytteen lämmönjohtavuus vaikuttaa aktiivisyvyyteen, mikä näkyy alla olevasta kuvasta 29. Lämpökaivon täytteen lämmönjohtavuuden ollessa $2,4 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ (bentoniitti) voidaan aktiivisyvyyttä vähentää 25 metriä. Tämä on merkittävä ero, sillä 28 lämpökaivon kokonaisyyvyyttä kyetään vähentämään 700 metrin verran, mikä vastaa kahta ja puolta lämpökaivoa.



Kuva 29. Lämpökaivon täytteen lämmönjohtavuuden vaikutus aktiivisyvyyteen.

5.6.6 Simulointi numero 8 ja 9

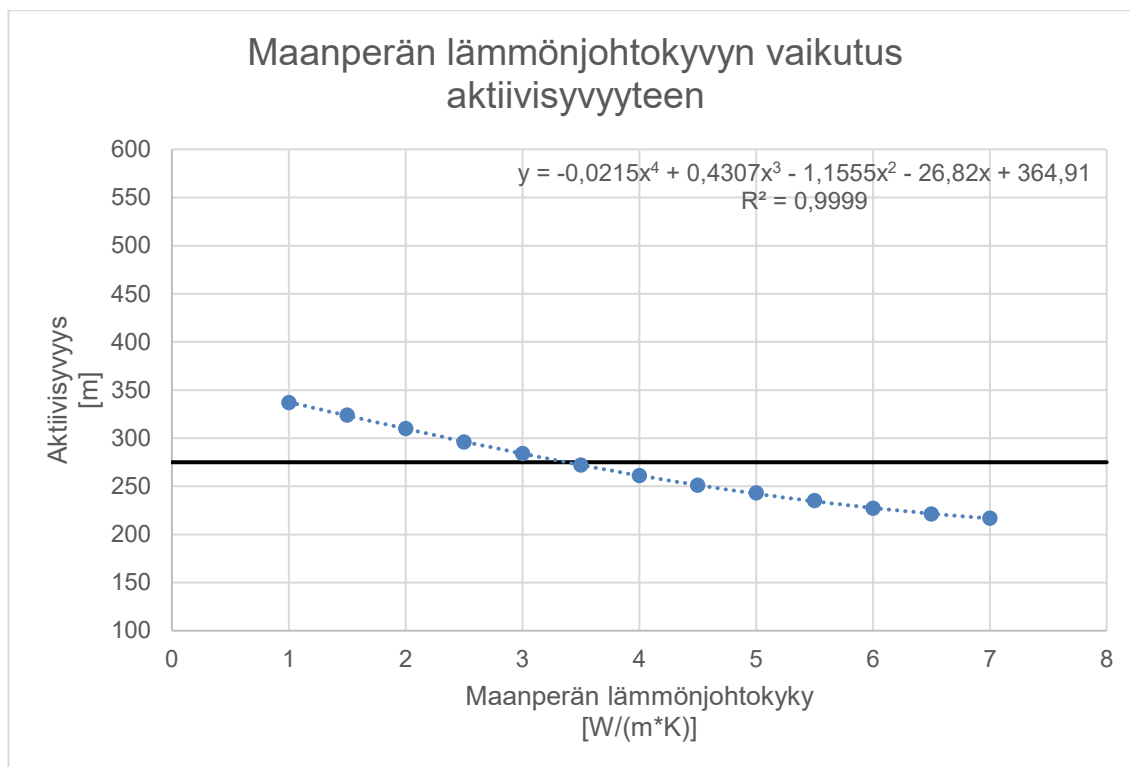
Simuloinnissa on muutettu maaperän lämmönjohtokykyä. Simuloinneilla haluttiin selvittää, miten maaperän lämmönjohtokyky vaikuttaa aktiivisyvyyteen. Saatuja tuloksia voidaan verrata simulointiin 1.

Kahdeksannessa simuloinnissa maaperän lämmönjohtokykyä on muutettu 3,4:stä arvoon 2,4 W/(m*K). Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan -7,76 astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila -1,5 astetta, joudutaan aktiivisyvyyttä muuttamaan 275 metristä 401 metriin.

Yhdeksännessä simuloinnissa maaperän lämmönjohtokykyä on muutettu 3,4:stä arvoon 4,4 W/(m*K). Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan -4,48 astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila -1,5 astetta, joudutaan aktiivisyvyyttä muuttamaan 275 metristä 355 metriin.

Verrattaessa simulointeja 8 ja 9 simulointiin 1 huomamme, että lisäämällä tai vähentämällä maanperän lämmönjohtokykyä 1 W/(m*K), saadaan aktiivisyvyyttä lisättyä tai vähennettyä noin 23 metriä. Tässä tulee kuitenkin huomioida, että maaperän lämmönjohtokyvyn vaikutus aktiivisyvyyteen riippuu siitä, kuinka syvä lämpökaivo on.

Tässäkin simuloinnissa lämpökaivokentästä otettua lämpöenergian määrää niin, että aktiivisyvydeksi riittäisi 275 metriä, jolloin pystyttiin näkemään, kuinka paljon maanperän lämmönjohtokyky vaikuttaa aktiivisyvyyteen. Maanperän lämmönjohtokyvyn vaikutus aktiivisyvyyteen nähdään kuvasta 30. Kuvan perusteella 1 W/(m*K):n lisäys tai vähennys maaperän lämmönjohtokykyyn lisää tai vähentää aktiivisyvyyttä noin 22 metriä. Tämä on merkittävä ero, sillä 28 lämpökaivon kokonaisaktiivisyvyyttä saadaan muutettua 616 metriä, eli yli kahden kaivon syvyyden verran.



Kuva 30. Maanperän lämmönjohtokyvyn vaikutus aktiivisyvytyteen.

5.6.7 Simulointi numero 10, 11 ja 12

Simuloinneissa on muutettu lämpökaivon lämpövastusta. Simuloinneilla haluttiin selvittää, miten lämpökaivon lämpövastus vaikuttaa aktiivisyvytyteen. Saatuja tuloksia voidaan verrata simulointiin 1.

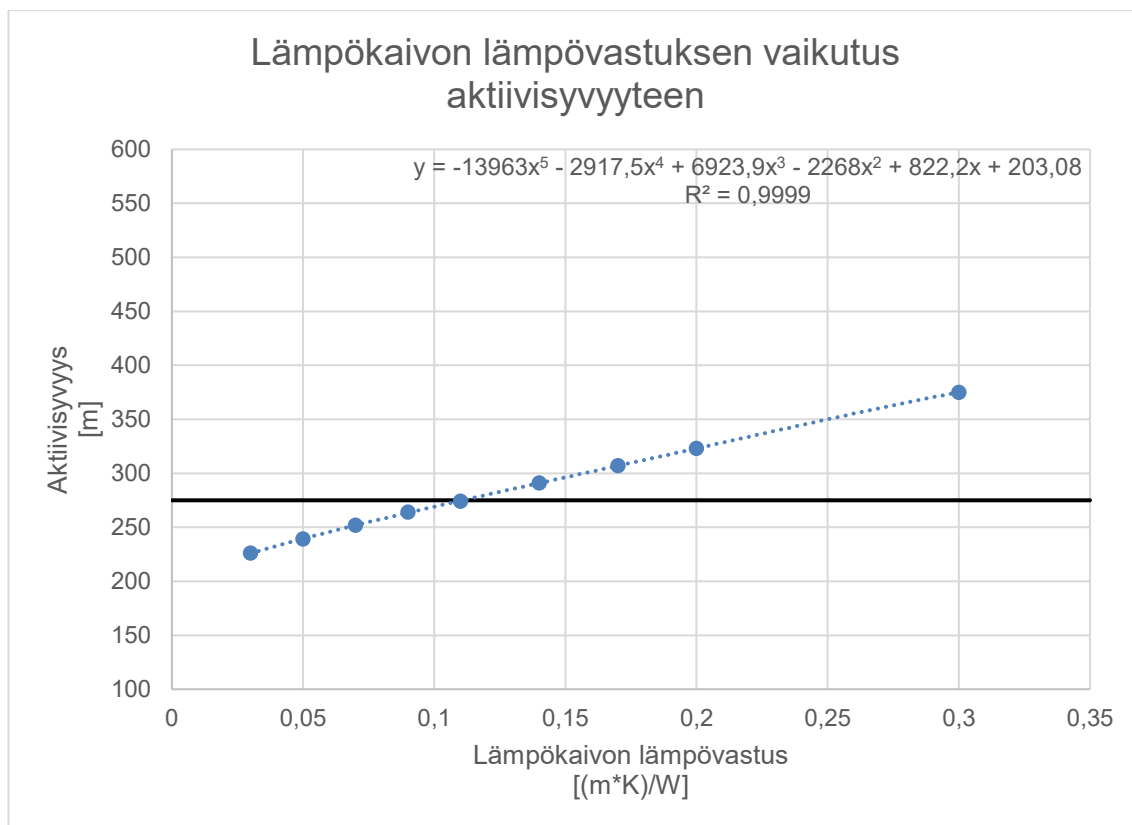
Simuloinnissa 10 lämpökaivon lämpövastusta on muutettu 0,11:stä arvoon 0,09 (m*K)/W. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan -5,1 astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila -1,5 astetta, joudutaan aktiivisyvyttä muuttamaan 275 metrissä 364 metriin.

Simuloinnissa 11 lämpökaivon lämpövastusta on muutettu 0,11:stä arvoon 0,14 (m*K)/W. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan -6,71 astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila -1,5 astetta, joudutaan aktiivisyvyttä muuttamaan 275 metrissä 401 metriin.

Simuloinnissa 12 on lämpökaivon lämpövastusta muutettu arvosta 0,11 (m³K)/W arvoon 0,17 (m³K)/W. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan –7,68 astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila –1,5 astetta, joudutaan aktiivisyvyttä muuttamaan 275 metristä 418 metriin.

Verrattaessa simuloiteja 10, 11 ja 12 simuloitiin 1, voidaan huomata, että lisäämällä lämpökaivon lämpövastusta 0,03 (m³K)/W, joudutaan kasvattamaan aktiivisyvyttä noin 20 metriä. Tulee kuitenkin huomioida, että lämpövastuksen vaikutus aktiivisyvyyteen riippuu siitä, kuinka syvä lämpökaivo on.

Lämpökaivokentästä otettua lämpöenergian määrää on vähennetty niin, että aktiivisyvydeksi riittäisi 275 metriä, jolloin pystytään näkemään, kuinka paljon lämpökaivon lämpövastus vaikuttaa aktiivisyvyyteen. Kuva 31 ilmaisee lämpökaivon lämpövastuksen vaikutuksen aktiivisyvyyteen, ja siitä selviää, että lisäämällä tai vähentämällä lämpökaivon lämpövastusta 0,02 (m³K)/W, voidaan lisätä tai vähentää aktiivisyvyttä noin 13 metriä. Tämä on merkittävä ero, sillä kun kaivoja on 28 kappaletta, muodostuu kokonaisaktiivisyvydeksi 364 metriä, eli yli yhden kaivon verran.



Kuva 31. Lämpökaivon lämpövastuksen vaikutus aktiivisyvyteen.

5.6.8 Simulointi numero 13 ja 14

Simuloinneissa on muutettu lämmönkeruunesteen pienintä keskimääräistä lämpötilaa. Simuloinneilla haluttiin selvittää, miten lämmönsiirtonesteen pienin keskimääräinen lämpötila vaikuttaa aktiivisyvyteen. Saatuja tuloksia voidaan verrata simulointiin 1.

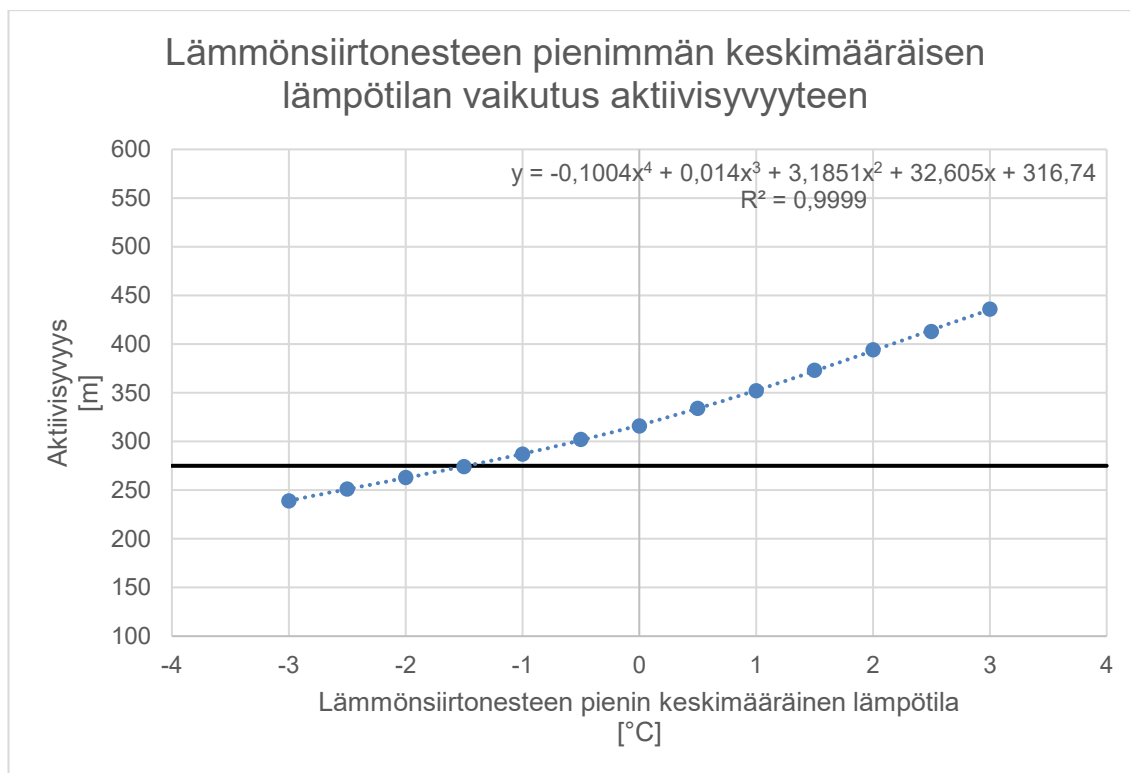
Simuloinnissa 13 lämmönkeruunesteen pienin keskimääräinen lämpötila on muutettu $-1,5$ asteesta $-0,5$ asteeseen. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan $-5,74$ astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, joudutaan aktiivisyvyttä muuttamaan 275 metristä 409 metriin.

Simuloinnissa 14 lämmönkeruunesteen pienin keskimääräinen lämpötila on muutettu $-1,5$ asteesta $-1,0$ asteeseen. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi

saadaan $-5,74$ astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, joudutaan aktiivisyvyyttä muuttamaan 275 metristä 395 metriin.

Verrattaessa simulointeja 13 ja 14 simulointiin 1, voidaan huomata, että lisäämällä $0,5$ astetta lämmönkeruunesteen pienimpään keskimääräiseen lämpötilaan joudutaan aktiivisyvyyttä lisäämään noin 15 metriä. Tulee kuitenkin huomioida, että lämmönkeruunesteen pienimmän keskimääräisen lämpötilan vaikutus aktiivisyvyyteen riippuu siitä, kuinka syvä lämpökaivo on.

Pienennettäessä lämpökaivokentästä otettua lämpöenergian määrää, saadaan aktiivisyvydeksi riittämään 275 metriä. Näin päästiin näkemään, kuinka paljon lämmönkeruunesteen pienin keskimääräinen lämpötila vaikuttaa aktiivisyvyyteen, mikä ilmenee kuvasta 32. Kuvan perusteella $0,5$ asteen lisäys tai vähennys lämpökaivon lämpövästuksessa antaa mahdollisuuden lisätä tai vähentää aktiivisyvyyttä noin 12 metriä. Tällä on merkitystä, sillä kun lämpökaivoja on 28 kappaletta, saadaan kokonaisaktiivisyvyyden muutokseksi 336 metriä, eli yli yhden kaivon verran.



Kuva 32. Lämmönsiirtonesteen pienimmän keskimääräisen lämpötilan vaikutus aktiivisyyteen.

5.6.9 Simulointi numero 15 ja 16

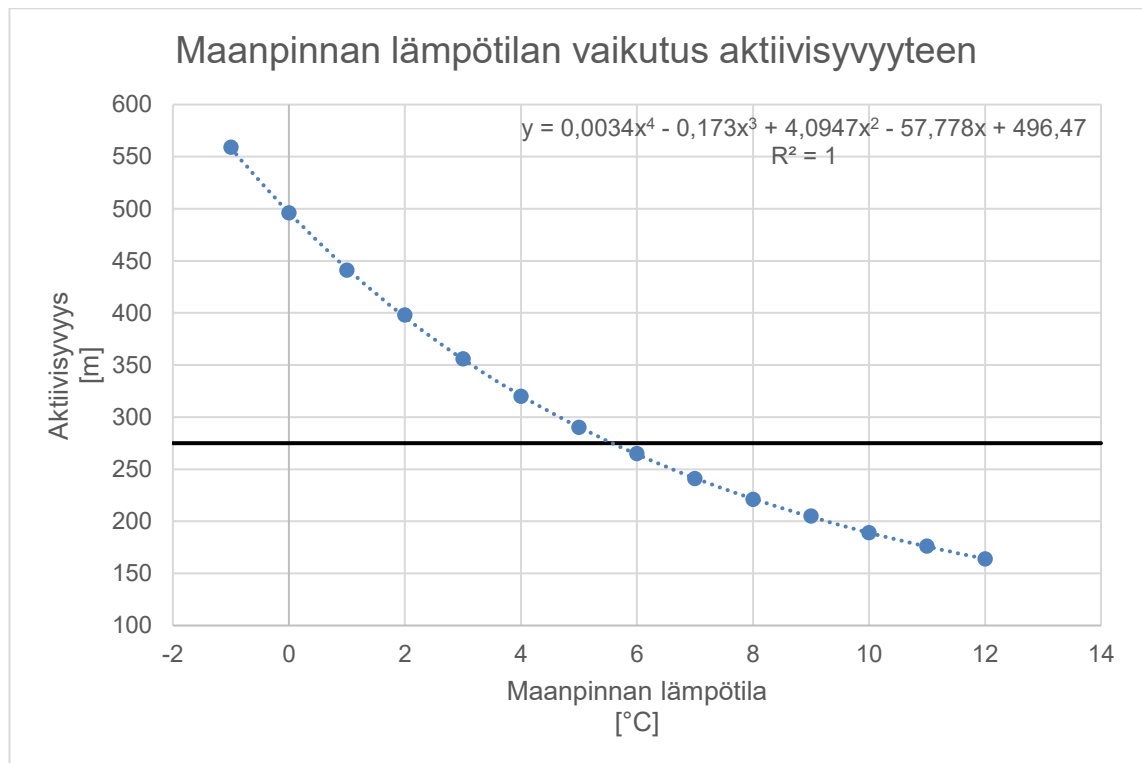
Simuloinneissa on muutettu maanpinnan lämpötilaa. Simuloinneilla haluttiin selvittää, miten maan pinnan lämpötila vaikuttaa aktiivisyyteen. Saatuja tuloksia voidaan verrata simulointiin 1.

Simuloinnissa 15 maanpinnan lämpötila on muutettu 5,6 asteesta 6,6 asteeseen. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan $-4,74$ astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, joudutaan aktiivisyyttä muuttamaan 275 metristä 349 metriin.

Simuloinnissa 16 maanpinnan lämpötila on muutettu 5,6 asteesta 7,6 asteeseen. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan $-3,74$ astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, joudutaan aktiivisyyttä muuttamaan 275 metristä 322 metriin.

Verrattaessa simulointeja 15 ja 16 simulointiin 1, voidaan huomata, että lisäämällä yhden asteen maanpinnan lämpötilaan voidaan vähentää aktiivisyyttä 30 metriä. Tulee kuitenkin huomioida, että maanpinnan lämpötilan vaikutus aktiivisyyteen riippuu lämpökaivon syvyydestä.

Lämpökaivokentästä otettua lämpöenergian määrää on pienennetty niin, että aktiivisyydeksi riittäisi 275 metriä, mikä mahdollistaa sen, että näemme kuinka paljon maanpinnan lämpötila vaikuttaa aktiivisyyteen. Kuva 33 havainnoi maanpinnan lämpötilan vaikutusta aktiivisyyteen, ja sen perusteella lisäämällä tai vähentämällä yhden asteen verran maanpinnan lämpötilaa voidaan lisätä tai vähentää aktiivisyyttä noin 24 metriä. 24 metriä on merkittävä tulos, sillä 28 lämpökaivon kokonaisaktiivisyyden muutokseksi tulee 672 metriä, eli noin kahden ja puolen kaivon verran.



Kuva 33. Maanpinnan lämpötilan vaikutus aktiivisyyteen.

5.6.10 Simulointi numero 17, 18, 19 ja 20

Simuloinneissa on muutettu lämpökaivon häiriötöntä lämpötilaa. Simuloinneilla haluttiin selvittää, miten lämpökaivon häiriötön lämpötila vaikuttaa aktiivisyyteen. Saatuja tuloksia voidaan verrata simulointiin 1.

Simuloinnissa 17 lämpökaivon häiriötön lämpötila on 5,6 astetta. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan $-7,76$ astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, joudutaan aktiivisyyttä muuttamaan 275 metristä 532 metriin.

Simuloinnissa 18 lämpökaivon häiriötön lämpötila on 6,6 astetta. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan $-6,76$ astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, joudutaan aktiivisyyttä muuttamaan 275 metristä 462 metriin.

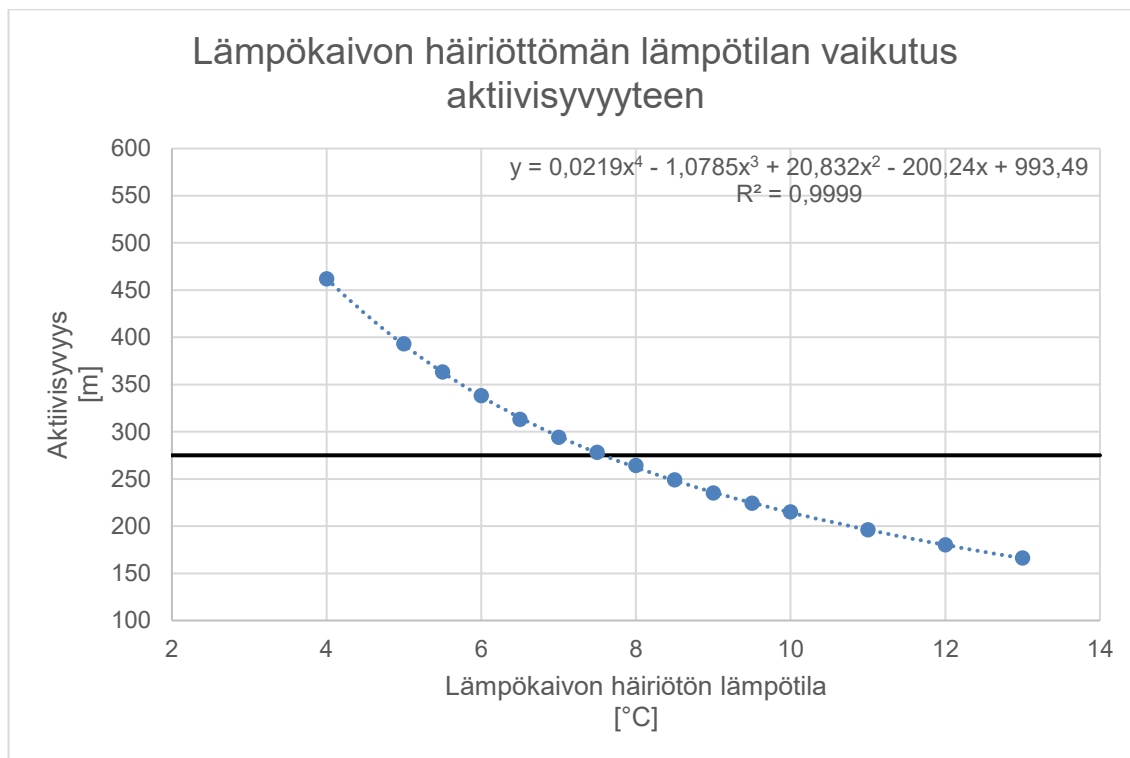
Simuloinnissa 19 lämpökaivon häiriötön lämpötila on 7,6 astetta. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan $-5,76$ astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, joudutaan aktiivisyyttä muuttamaan 275 metristä 409 metriin.

Simuloinnissa 20 lämpökaivon häiriötön lämpötila on 8,6 astetta. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan $-4,76$ astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, joudutaan aktiivisyyttä muuttamaan 275 metristä 371 metriin.

Verrattaessa simulointeja 17, 18, 19 ja 20 toisiinsa voidaan huomata, että lisäämällä yhden asteen lämpökaivon häiriötöntä lämpötilaa voidaan vähentää aktiivisyyttä 38–50 metriä. Tulee kuitenkin huomioida, että lämpökaivon häiriöttömän lämpötilan vaikutus aktiivisyyteen riippuu siitä, kuinka syvä lämpökaivo on.

Pienennettäessä lämpökaivokentästä otettua lämpöenergian määrää niin, että aktiivisyydeksi riittäisi 275 metriä, päästään näkemään, kuinka paljon lämpökaivon häiriötön lämpötila vaikuttaa aktiivisyyteen. Kuvassa 34 on esitetty lämpökaivon häiriöttö-

män lämpötilan vaikutus aktiivisyvyteen. Kuvasta nähdään, että lisäämällä tai vähentämällä yhden asteen verran lämpökaivon häiriötöntä lämpötilaa aktiivisyvyttä voidaan lisätä tai vähentää noin 30 metriä. Tämä on merkittävää, sillä 28 lämpökaivon kokonaisaktiivisyvydeksi muodostuu 840 metriä, eli kolmen kaivon syvyyden verran.



Kuva 34. Lämpökaivon häiriöttömän lämpötilan vaikutus aktiivisyvyteen.

5.6.11 Simulointi numero 21 ja 22

Simuloinneissa on muutettu vuodessa saatua lämpöenergiaa kaivokentästä. Simuloinneilla haluttiin selvittää, millä lämpöenergian määrällä kaivokenttä ei alittaisi lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alinta pistettä sekä mikä olisi aktiivisyvyys tilanteessa, jossa lämpöenergiaa ei haluta laskea alle 400 MWh/a. Saatuja tuloksia voidaan verrata simulointiin 1.

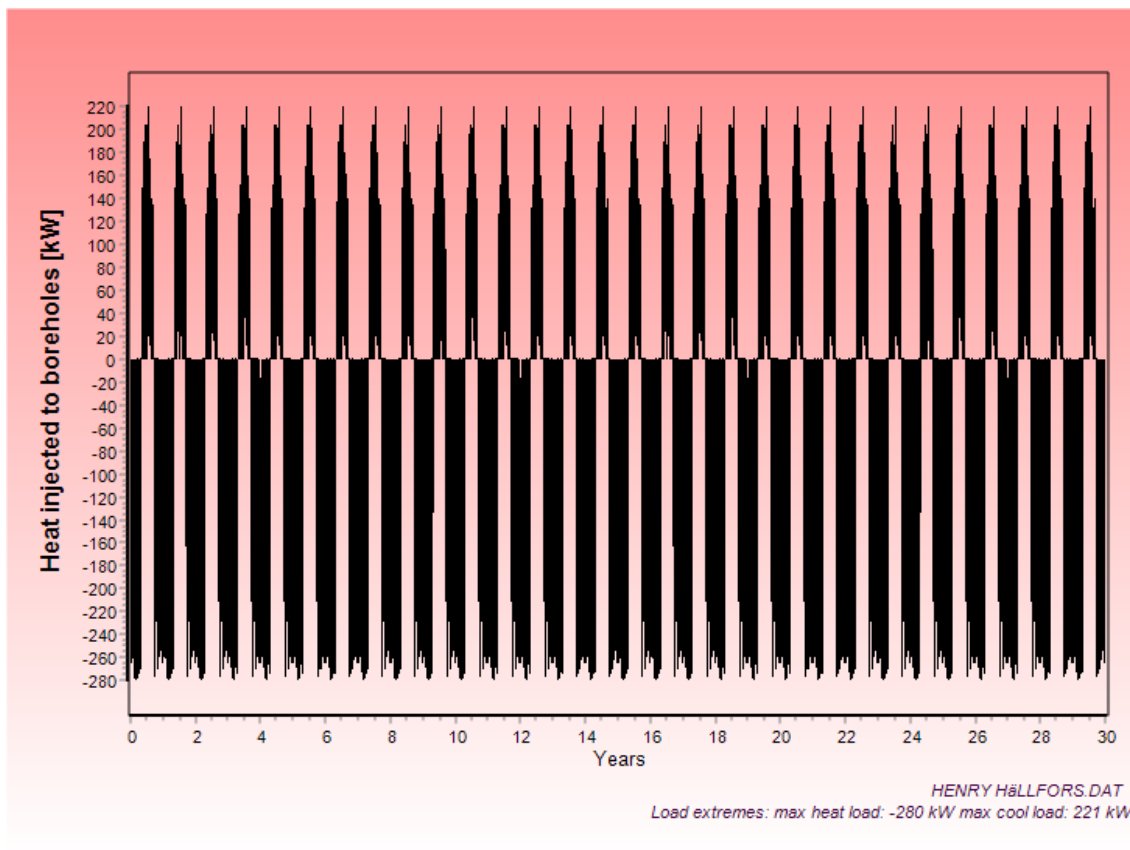
Simuloinnissa 21 vuodessa saatua lämpöenergiaa kaivokentästä on muutettu 525:stä 360 MWh:iin vuodessa. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saa-

daan $-1,47$ astetta 30 vuoden aikana. Simuloinnissa selvitettiin, kuinka paljon lämpöenergiaa kaivokentästä voidaan ottaa vuodessa, jotta lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alin piste ei alittuisi.

Simuloinnissa 22 vuodessa saatua lämpöenergiaa kaivokentästä on muutettu 525:stä 400 MWh:iin vuodessa. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan $-2,53$ astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, joudutaan aktiivisyvyyttä muuttamaan 275 metristä 301 metriin. Simuloinnin tarkoituksena oli selvittää, kuinka paljon aktiivisyvyyttä joudumme lisäämään, mikäli kaivokentästä saatua lämpöenergiaa vuodessa pienennettäisiin 400 MWh.

5.6.12 Simulointi numero 23 ja 24

Simuloinneissa on muutettu vuodessa kaivokentästä saatua lämpöenergiaa sekä lisätty lämpöenergiaa kaivokenttään 250 MWh:n latauksella vuodessa. Simuloinneilla haluttiin selvittää, miten lämpökaivokentän lataus vaikuttaa aktiivisyvyyteen sekä millä lämpöenergian määrällä lämmönsiirtonesteen pienin keskilämpötila ei alittuisi. Saatuja tuloksia voidaan verrata simulointiin 1. Kuvasta 35 näkyy EED:hen syötetty tuntikohtainen data 30 vuoden ajalle. Datassa on otettu huomioon lämpökaivokentän lataus.



Kuva 35. EED:hen syötetty tuntidata 30 vuodelle, jossa on otettu huomioon lataus.

Simuloinnissa 23 on lisätty vuodessa ladattu lämpöenergia kaivokenttään. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan $-3,87$ astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, joudutaan aktiivisyvyyttä muuttamaan 275 metristä 333 metriin.

Simulointia voidaan verrata simulointiin 1, jolloin nähdään, kuinka paljon aktiivisyvyyttä saadaan vähennettyä lataamalla kaivokenttää. Simulointien perusteella saadaan aktiivisyvyyttä vähennettyä 46 metriä kaivoa kohden, eli yhteensä 1 288 metriä kokonaisaktiivisyvyyttä.

Simulointiin 24 on lisätty vuoden aikana ladattu lämpöenergia kaivokenttään sekä muutettu vuodessa otettua lämpöenergian määrää kaivokentästä 525 MWh:sta 430 MWh:iin. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan $-1,46$ astetta 30 vuoden aikana.

Simulointia 24 voidaan verrata simulointiin 21. Vertailussa nähdään, kuinka paljon enemmän lämpöenergiaa voidaan kaivokentästä ottaa vuodessa lataamalla kaivokenttää. Simuloinnin perusteella latauksen avulla saadaan otettua 70 MWh/a enemmän lämpöenergiaa kaivokentästä.

5.6.13 Simulointi numero 25 ja 26

Simuloinneissa on haluttu selvittää, mikä on vaadittu aktiivisyvyys, kun kaivomäärä pidetään 28 kappaleessa, sekä mikä on vaadittu kaivomäärä, kun aktiivisyvyys pidetään 275 metrissä. Simuloinneissa on käytetty EED:n optimointityökalua. Simuloinneissa ei ole otettu kaivokentän latausta huomioon.

Simuloinnissa 25 on selvitetty, kuinka monta lämpökaivoa tulisi olla, jotta kaivokentän lämmönsiirtonesteen pienin keskilämpötila ei alittuisi. EED:n optimointityökalu ehdotti ratkaisuksi 44 lämpökaivoa, muodossa 4 x 11. Lämmönsiirtonesteen pienimmäksi keskilämpötilaksi saadaan $-1,1$ astetta. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, voidaan aktiivisyvyttä vähentää 275 metrissä 266 metriin, mikä tarkoittaa kokonaisaktiivisyvydessä 396 metriä. Teoreettisesti voitaisiin myös vähentää kaivokentästä puolitoista kaivoa ja pitää aktiivisyvytenä tällöin 275 metriä.

Simuloinnissa 26 on selvitetty, kuinka syvä aktiivisyvyyden tulisi olla, jotta 28 lämpökaivoa riittäisi. EED:n optimointityökalu ehdotti 379 metriä aktiivisyvydeksi, jolloin lämmönsiirtonesteen pienin keskilämpötila olisi $-1,5$ astetta.

5.6.14 Simulointi numero 27 ja 28

Simuloinneissa on haluttu selvittää, mikä on vaadittu aktiivisyvyys, kun kaivomäärä pidetään 28 kappaleessa sekä mikä on vaadittu kaivomäärä, kun aktiivisyvyys pidetään 275 metrissä. Simuloinneissa on käytetty EED:n optimointityökalua ja kaivokentän lataus on otettu huomioon.

Simuloinnissa 27 on selvitetty, kuinka monta lämpökaivoa tulisi olla, jotta kaivokentän lämmönsiirtonesteen pienin keskilämpötila ei alittuisi. EED:n optimointityökalu ehdotti ratkaisuksi 36 lämpökaivoa muodossa 4 x 9, jolloin lämmönsiirtonesteen pienimmäksi

keskilämpötilaksi saadaan $-1,4$ astetta. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, voidaan aktiivisyvyyttä vähentää 275 metristä 272 metriin, eli kokonaisaktiivisyvyydestä 108 metriä. Verratessa simulointia 27 simulointiin 25 huomataan kaivokentän latauksen hyödyt. Kaivokentän latauksen avulla voidaan lämpökaivojen määrää laskea 8 kappaleella, mikä vähentää kokonaisaktiivisyvyyttä 2 200 metriä.

Simuloinnissa 28 on selvitetty, kuinka syvä aktiivisyvyyden tulisi olla, jotta 28 lämpökaivoa riittäisi. EED:n optimointityökalu ehdotti 333 metriä aktiivisyvyydeksi, jolloin lämmönsiirtonesteen pienimmäksi keskilämpötilaksi tulisi $-1,5$ astetta. Verratessa tätä simulointiin 26 huomataan kaivokentän latauksen hyödyt. Kaivokentän latauksen avulla voidaan lämpökaivojen aktiivisyvyyttä laskea 46 metriä kaivoa kohden, eli kokonaisaktiivisyvyytenä 1 288 metriä.

5.6.15 Simulointi numero 29 ja 30

Simuloinneissa on haluttu selvittää, kuinka syviä lämpökaivot voivat olla, kun lämmönkeruuputken kokoa muutetaan mutta lämmönkeruuputken painehäviön halutaan pysyvän samana (117 kPa). Simuloinneissa ei ole otettu kaivokentän latausta huomioon. Tuloksia voidaan verrata simulointiin 4.

Simuloinnissa 29 on lämmönkeruuputken kokoa muutettu 45 millimetristä 40 millimetriin. Jotta 117 kPa:n painehäviö toteutuisi 40 millimetrin lämmönkeruuputkella, tulee aktiivisyvyyden olla 153 metriä. Lämmönkeruuputken koon muutos vaikuttaa lämpökaivovastukseen, jonka muutos on arvosta $0,1457 \text{ (m}^*\text{K)/W}$ arvoon $0,149 \text{ (m}^*\text{K)/W}$. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan $-18,8$ astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, joudutaan aktiivisyvyyttä muuttamaan 153 metristä 406 metriin.

Simuloinnissa 30 on lämmönkeruuputken kokoa muutettu 45 millimetristä 50 millimetriin. Jotta 117 kPa:n painehäviö toteutuisi 50 millimetrin lämmönkeruuputkella, tulee aktiivisyvyyden olla 442 metriä. Lämmönkeruuputken koon muutos muuttaa lämpökaivovastuksen suuruutta arvosta $0,1457 \text{ (m}^*\text{K)/W}$ arvoon $0,1455 \text{ (m}^*\text{K)/W}$. Lämmönsiirtonesteen

keskilämpötilan alimmaksi pisteeksi saadaan $-0,31$ astetta 30 vuoden aikana. Jotta saataisiin toteutettua lämmönsiirtonesteen alin keskilämpötila $-1,5$ astetta, voidaan aktiivisyyttä pienentää 442 metristä 404 metriin.

5.7 Kustannuslaskelma

Taulukossa 13 on esitetty simuloinnin numero 1 eri lämpökaivotyön osuuksien kustannukset prosentteina. Kustannuksiin on otettu huomioon materiaalien hinnat sekä arvioitu työnteen kustannus. Kustannukset perustuvat FCG:ltä sekä MuoviTechiltä saaduista tiedoista. Prosenttiosuuden avulla voidaan nähdä, mitkä tekijät vaikuttavat kustannuksiin eniten (suuri prosenttiosuus) ja mihin seikkoihin sen sijaan ei voida niinkään vaikuttaa.

Taulukko 13. Eri osioiden osuus kustannukseen simuloinnissa yksi.

Kustannukset alv 0 %	Kustannuksen osuus
Lämpökaivotyöt	100 %
Lämpövastetesti	2 %
Separointikontti	2 %
Poraus	64 %
Lämmönkeruuputki pohjapainolla	10 %
Lämmönkeruuputkien kulmat	0 %
Suojaputki	2 %
Suojaputken kansi	1 %
Suojakaivo	0 %
Suojakaivon kansi	0 %
Vaakaputket	5 %
Kokoomakaivo	5 %
Runkoputkisto	1 %
Runkoputken eriste EPS 30 mm	2 %
Sulkuventtiilikaivo	1 %
Kokoomakaivon valurautakansi 40 tn	0 %
Muovilaippapaketti kahdella DN150 suluilla	0 %
Lämmönsiirtoneste	4 %

Mikäli kaikki lämpökaivot täytettäisiin bentoniitillä, olisi bentoniitin osuus kokonaiskustannuksesta noin 35 prosenttia. Kustannuslaskelmissa on huomioitava, että lämpökaivotöiden hinnat vaihtelevat yrityskohtaisesti sekä eri paikkakuntien välillä.

Kustannuslaskelmat suoritettiin jokaiselle 30 simuloinnille, jolloin voidaan verrata toimivia ratkaisuja, miten tietyt muutokset vaikuttavat kustannukseen, sekä nähdä, mikä vaihtoehtoista olisi kustannustehokkain. Taulukossa 14 on esitetty kaikkien 30 simuloinnin kustannuslaskelmat, joissa otetaan huomioon muutettu lähtötieto, arvojen muutos, alkuperäinen aktiivisyvyys, alkuperäinen lämmönkeruunesteen pienin keskimääräinen lämpötila 30 vuoden aikana sekä alkuperäinen kustannus. Lisäksi taulukossa on kerrottu,

missä aktiivisyvydessä kaivokenttä toimii, mitä lämpökaivokentällä saadaan tuotettua sekä mitkä ovat kustannukset. Liitteessä 1 on taulukko 14 suurempana.

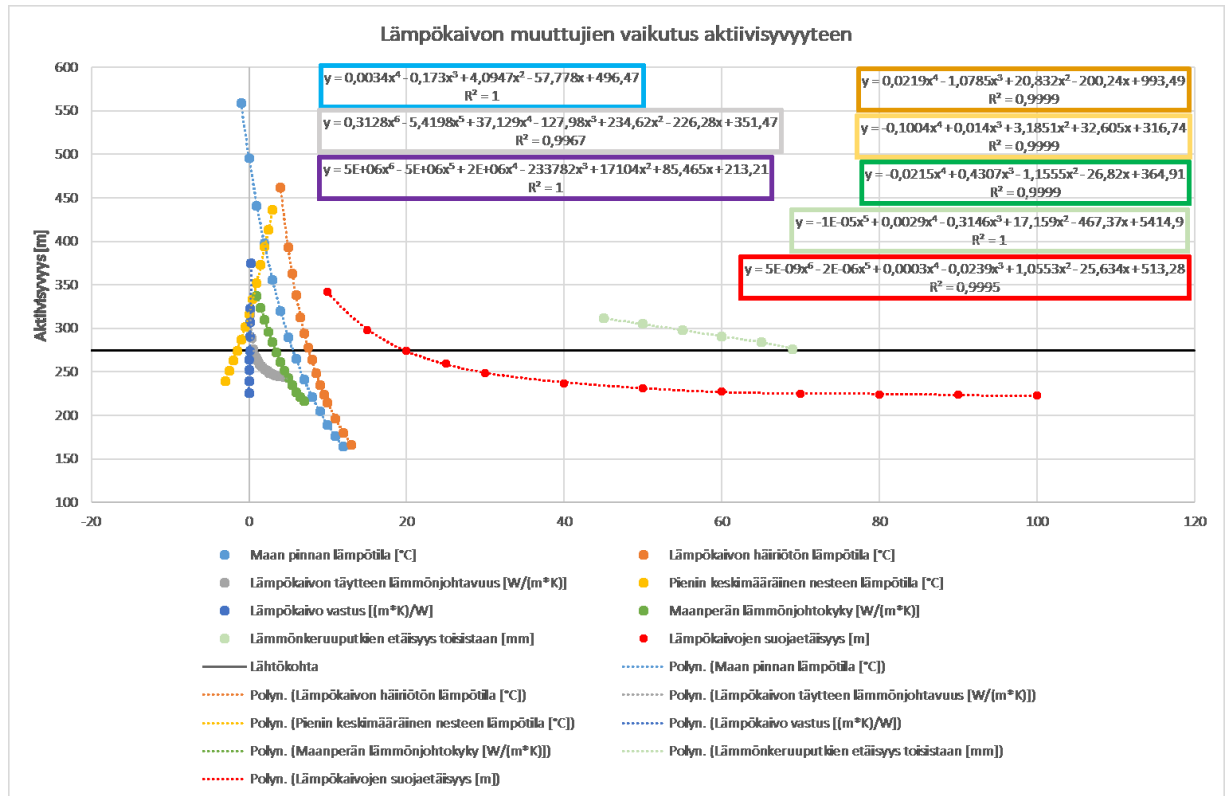
Taulukko 14. Kustannuslaskelmat.

Simulointi	Muutos	Yksikkö	Arvosta	Arvoon	Syvyys	Aktiivisyvyys	Optimointityökalu	Lämmönkeruun keskimääräinen lämpötila 30v jälkeen	Kustannus	Aktiivisyvyys jossa -1,5 °C toteutuu	Lämpöenergia kaivokentästä	Lämpöenergia kaivokenttään	Lämpöteho kaivokentästä	Lämpöteho kaivokenttään	Kustannus jossa -1,5 °C toteutuu
Nro.					[m]	[m]	Kyllä/Ei	[°C]	[€]	[m]	[kWh/ma]	[kWh/ma]	[W/m]	[W/m]	[€]
1	Lähtötilanne	-	-	-	280	275	Ei	-5,74	222 000	379	49	0	26	0	284 000
2	Lämpökaivojen suojaetäisyys	[m]	20	25	280	275	Ei	-4,85	222 000	358	52	0	28	0	272 000
3	Lämpökaivojen suojaetäisyys	[m]	20	30	280	275	Ei	-4,27	222 000	343	55	0	29	0	263 000
4	Lähtötilanne lasketulla lämpökaivovastuksella	[(m ² K)/W]	0,11	Laskettu	280	275	Ei	-6,89	222 000	404	46	0	25	0	299 000
5	Lämmönkeruuputkien etäisyys toisistaan	[mm]	69	59	280	275	Ei	-7,78	222 000	420	45	0	24	0	309 000
6	Lämmönkeruuputkien etäisyys toisistaan	[mm]	69	49	280	275	Ei	-8,66	222 000	438	43	0	23	0	320 000
7	Lämpökaivon täyteen lämmönjohtavuus	[W/(m ² K)]	0,6	2,4	280	280	Ei	-5,02	340 000	368	51	0	27	0	434 000
8	Maanperän lämmönjohtokyky	[W/(m ² K)]	3,4	2,4	280	275	Ei	-7,76	222 000	401	47	0	25	0	297 000
9	Maanperän lämmönjohtokyky	[W/(m ² K)]	3,4	4,4	280	275	Ei	-4,48	222 000	355	53	0	28	0	270 000
10	Lämpökaivo vastus	[(m ² K)/W]	0,11	0,09	280	275	Ei	-5,1	222 000	364	52	0	27	0	275 000
11	Lämpökaivo vastus	[(m ² K)/W]	0,11	0,14	280	275	Ei	-6,71	222 000	401	47	0	25	0	297 000
12	Lämpökaivo vastus	[(m ² K)/W]	0,11	0,17	280	275	Ei	-7,68	222 000	418	45	0	24	0	308 000
13	Pienin keskimääräinen nesteen lämpötila	[°C]	-1,5	-0,5	280	275	Ei	-5,74	222 000	409	46	0	24	0	302 000
14	Pienin keskimääräinen nesteen lämpötila	[°C]	-1,5	-1	280	275	Ei	-5,74	222 000	395	47	0	25	0	294 000
15	Maan pinnan lämpötila	[°C]	5,6	6,6	280	275	Ei	-4,74	222 000	349	54	0	29	0	266 000
16	Maan pinnan lämpötila	[°C]	5,6	7,6	280	275	Ei	-3,74	222 000	322	58	0	31	0	250 000
17	Lämpökaivon häiriötön lämpötila	[°C]	-	-	280	275	Ei	-7,76	222 000	532	35	0	19	0	376 000
18	Lämpökaivon häiriötön lämpötila	[°C]	5,6	6,6	280	275	Ei	-6,76	222 000	462	41	0	22	0	334 000
19	Lämpökaivon häiriötön lämpötila	[°C]	5,6	7,6	280	275	Ei	-5,76	222 000	409	46	0	24	0	302 000
20	Lämpökaivon häiriötön lämpötila	[°C]	5,6	6,6	280	275	Ei	-4,76	222 000	371	51	0	27	0	279 000
21	Lämpöenergia kaivokentästä	[MWh/a]	525	360	280	275	Ei	-1,47	222 000	274	47	0	36	0	222 000
22	Lämpöenergia kaivokentästä	[MWh/a]	525	400	280	275	Ei	-2,53	222 000	301	47	0	33	0	237 000
23	Lämpöenergia kaivokenttään	[MWh/a]	0	250	280	275	Ei	-3,87	222 000	333	56	27	30	24	257 000
24	Lämpöenergia kaivokentästä/kaivokenttään	[MWh/a]	525/0	430/250	280	275	Ei	-1,46	222 000	274	56	33	36	29	221 000
25	Kaivojen määrä	[kpl]	28	44	280	275	Kyllä	-1,10	328 000	266	45	0	24	0	320 000
26	Aktiivisyvyys	[m]	275	379	384	379	Kyllä	-1,5	284 000	379	49	0	26	0	284 000
27	Kaivojen määrä	[kpl]	28	36	280	275	Kyllä	-1,4	275 000	272	54	26	29	22	273 000
28	Aktiivisyvyys	[m]	275	333	338	333	Kyllä	-1,52	256 000	333	56	27	30	24	257 000
29	Lämmönkeruuputken koko	[mm]	45	40	158	153	Ei	-18,80	144 000	406	46	0	25	0	289 000
30	Lämmönkeruuputken koko	[mm]	45	50	447	442	Ei	-0,31	326 000	404	46	0	25	0	303 000

Kustannuslaskujen perusteella pienempi lämpökaivojen määrä sekä suurempi aktiivisyvyys olisivat eduksi. Mikäli on mahdollista, voitaisiin porata lämpökaivoja vinoon, jolla saataisiin pieniä säästöjä. Simuloinneissa lämpöteho kaivokentästä on 19–36 W/m ja kaivokenttään 22–29 W/m.

Kuvassa 36 on esitetty, miten maan pinnan lämpötila, lämpökaivon häiriötön lämpötila, lämpökaivon täyteen lämmönjohtavuus, pienin keskimääräinen nesteen lämpötila, lämpökaivovastus, maanperän lämmönjohtokyky, lämmönkeruuputkien etäisyys toisistaan sekä lämpökaivon suojaetäisyyden muutokset vaikuttavat aktiivisyvyyteen ja näin ollen kustannuksiin. Lämpökaivokentästä otettua lämpöenergian määrää on pienennetty 360 MWh/a niin, että aktiivisyvydeksi riittäisi 275 metriä lähtötiedoilla. Kuvaan 36 on

yhdistetty kaaviot kohdasta 5.6, jotta voidaan kokonaisuudessaan vertailla muuttujien vaikutusta aktiivisyyteen.



Kuva 36. Lämpökaivon muuttujien vaikutus aktiivisyyteen.

Kuvasta huomataan, että jotkin muuttajat vaikuttavat suuresti lämpökaivon aktiivisyyteen ja jotkut eivät niinkään suuresti. Tulee myös huomata, että on muuttujia, joihin voimme ja joihin emme voi vaikuttaa.

Muuttajat, joihin emme voi vaikuttaa, ovat maan pinnan lämpötila, lämpökaivon häiriötön lämpötila ja maaperän lämmönjohtokyky. On hyvä tietää, miten muuttujien muutos vaikuttaa lämpökaivon aktiivisyyden suuruuteen, mikä näkyy kuvasta 36.

Muuttajat, joihin voimme vaikuttaa, ovat lämpökaivon täytteen lämmönjohtavuus, pienin keskimääräinen nesteen lämpötila, lämpökaivovastus, lämmönkeruuputkien etäisyys toisistaan sekä lämpökaivojen suojaetäisyys.

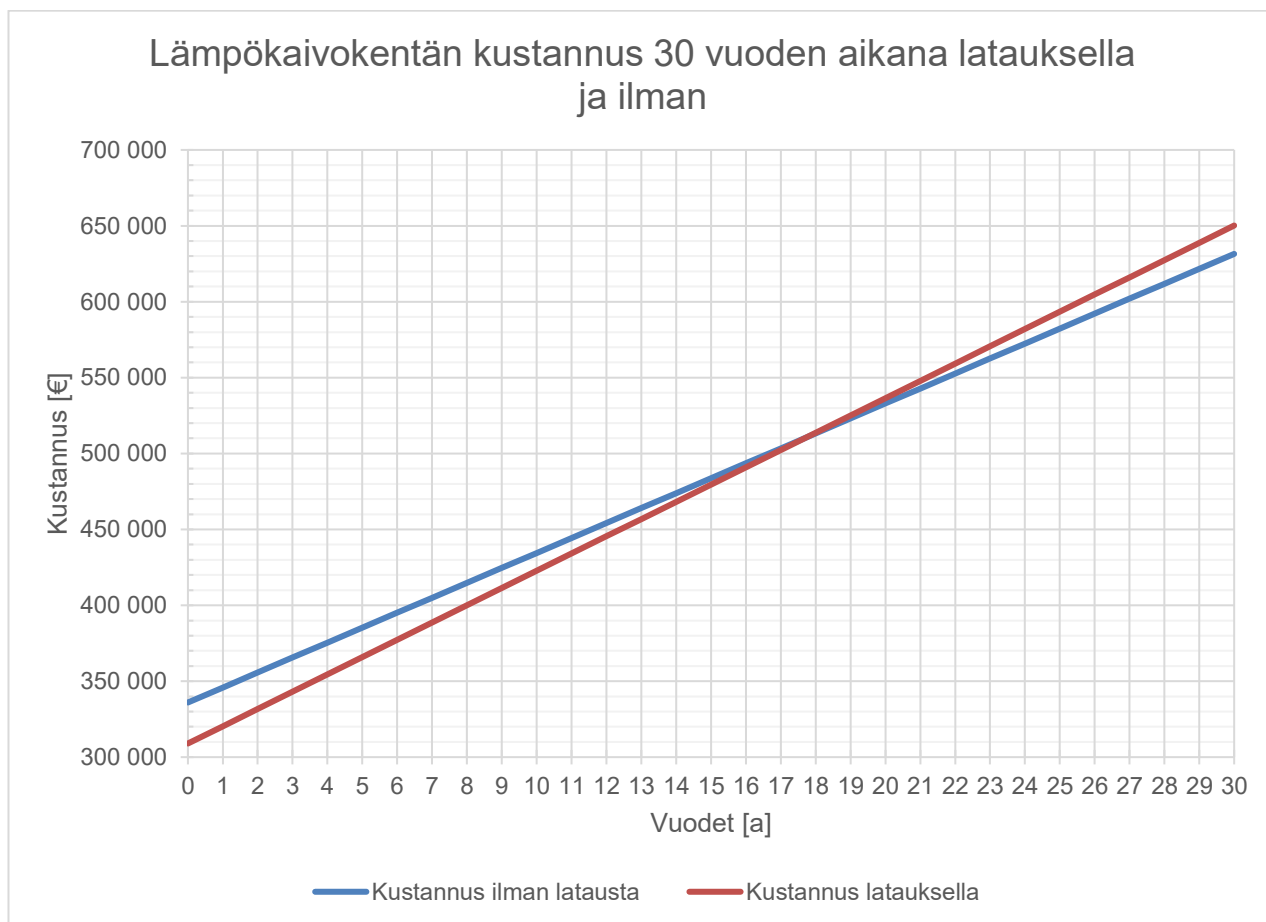
- Lämpökaivon täytteen lämmönjohtavuuteen voidaan vaikuttaa muuttamalla vesi bentoniitiksi, mikä toisi kuitenkin lisää kustannuksia. Verrattaessa simuloiteja 7 ja 4 voidaan huomata, että bentoniittia käytettäessä aktiivisyyttä voidaan vähentää 36 metriä kaivoa kohden, mutta toisaalta kustannukset nousisivat 135 000 eurolla. Tästä syystä bentoniittia käytetään vain tilanteissa, jolloin lämpökaivo ei itsestään täyty pohjavedellä.
- Pienimpään keskimääräiseen nesteen lämpötilaan voidaan vaikuttaa muuttamalla lämmönkeruunesteen toimintalämpötiloja. Verrattaessa simuloiteja 13 ja 1 keskenään voidaan huomata, että kun keskilämpötilaa nostetaan yhdellä asteella (simuloinnissa 13), aktiivisyys kasvaa sekä kustannukset nousevat 18 000 eurolla.
- Lämpökaivovastukseen voidaan vaikuttaa lämmönkeruuputkien valinnalla sekä lämpökaivon virtauksella.
- Lämmönkeruuputkien väliseen etäisyyteen voidaan vaikuttaa asentamalla tukikappaleita.
- Lämpökaivojen suojaetäisyyteen voidaan vaikuttaa, mikäli tontilla riittää tilaa, jolloin etäisyyksiä voidaan esimerkiksi suurentaa. Suoran lämpökaivon kannattavin

ja toimivin suojaetäisyysalue on 15–30 metriä. Lisäämällä lähtötilanteeseen suojaetäisyyttä viisi metriä edellä mainitun alueen sisäpuolella, voidaan tehdä noin 6 000 euron säästö (putkikaivanto huomioituna), mutta mikäli mennään alueen ulkopuolelle, ei työ tässä kohtaa ole kustannustehokasta.

Maanrakennustyöt ovat iso osa kokonaiskustannuksia. Putkikaivanto perustuu, Staran vertailu taulukkoon, joka on arvioltaan 54 €/m ja louhinta 26 €/m³. Urheilukentän tapauksessa oletetaan, että louhintaa tarvitaan noin 150 m³ ja putkikaivantoa noin 900 metriä. Näin ollen kokonaiskustannukseksi tulee noin 52 000 euroa, josta putkikaivannon osuus on 93 prosenttia. On hyvä huomioida, että louhinnan määrää ei pystytä ennalta arvioimaan.

Kuvassa 37 on esitetty kaavio, josta näkyy lämpökaivokentän kustannukset 30 vuoden aikana lämpökaivokentän latauksella ja ilman. Kuvassa vertaillaan simuloitteja 1 ja 23.

Simuloinnissa 1 lämpökaivokentän latausta ei ole otettu huomioon, kun taas simuloinnissa 23 on. Kuvan laskennassa on otettu huomioon lämpökaivotyöt, maanrakennustyöt sekä kompressorin ja pumpun käyttökustannukset.



Kuva 37. Lämpökaivokentän kustannukset 30 vuoden aikana latauksella ja ilman.

Kuvasta ilmenee, että lämpökaivokentän latauksella voidaan lämpökaivotyöt tehdä halvemmalla mutta noin 18 vuoden päästä kustannukset ovat yhtä suuret kuin ilman latausta. Vuodesta 18 eteenpäin ladattu lämpökaivokenttä tulee kalliimmaksi kuin lataamaton, johtuen kesäkauden pumpun käyttökustannuksista.

6 Pohdinnat

6.1 Lähtöarvot

Tuloksissa tulee ottaa huomioon, että Sipoon Söderkullan urheilukentälle ei vielä ole tehty lämpövastetestiä. Näin ollen osa lähtötiedoista on arvioita, jotka pyrkivät vastaamaan todellisuutta, mutta tarkat arvot saadaan lämpövastetestistä. Simuloinneissa on tehty skenaarioita, joissa jokin lähtöarvo muuttuu ja voidaan tarkastella niiden vaikutuksia lämpökaivon aktiivisyyteen.

Simuloinneissa on käytetty viereisen koulun lämpövastetestin tuloksia kallioperän lämmönjohtavuuteen (3,4 W/(m*K)) sekä lämpökaivon vastusta (0,11 (m*K)/W). Voitaisiin olettaa, että kallioperän lämmönjohtavuus sekä lämpökaivon vastus pysyisi samana, mutta siitä ei ole varmuutta ilman lämpövastetestiä. Näin suurelle kaivokentälle olisi hyvä suorittaa 2 tai 3 lämpövastetestiä, jotta saataisiin varmuus kaivokentän toimivuudesta. Yhden ylimääräisen lämpövastetestin tekeminen tuo pienen kustannuksen verrattuna siihen, että lämpökaivokentän elinkaari jää lyhyeksi virheellisen lähtötiedon vuoksi.

6.2 Ehdotus

Tämänhetkisten lähtötietojen perusteella lämpökaivoja voi olla 26–33, jotta saadaan optimaalinen virtaus. Suuremmalla määrällä lämpökaivoja saadaan pienempi aktiivisyys sekä pienemmät painehäviöt. Taulukossa 15 on esitetty lisäsimulointeja, joiden perusteella voitaisiin valita sopiva kaivomäärä kaivokentälle.

Taulukko 15. Lisäsimulointien kustannuslaskelmat.

Simuloinnit	Muutos	Yksikkö	Arvosta	Arvoon	Kaivojen ryhmittä	Aktiivisyys jossa -1,5 °C toteutuu	Lämpöenergia kaivokentästä	Lämpöenergia kaivokenttään	Lämpöteho kaivokentästä	Lämpöteho kaivokenttään	Kustannus jossa -1,5 °C toteutuu
Nro.						[m]	[kWh/m a]	[kWh/m a]	[W/m]	[W/m]	[€]
31	Kaivojen määrä	[kpl]	28	32	4 x 8	300	55	26	29	23	262 000
32	Kaivojen määrä	[kpl]	28	30	5 x 6	315	56	26	30	23	257 000
33	Kaivojen määrä	[kpl]	28	27	3 x 9	341	57	27	30	24	250 000
34	Kaivojen määrä	[kpl]	28	30	3 x 10	311	56	27	30	24	255 000
35	Kaivojen määrä	[kpl]	28	33	3 x 11	289	55	26	29	23	261 000
36	Kaivojen määrä	[kpl]	28	26	2 x 13	343	59	28	31	25	243 000
37	Kaivojen määrä	[kpl]	28	28	2 x 14	322	58	28	31	24	247 000
38	Kaivojen määrä	[kpl]	28	30	2 x 15	306	57	27	31	24	252 000
39	Kaivojen määrä	[kpl]	28	32	2 x 16	290	57	27	30	24	255 000
40											

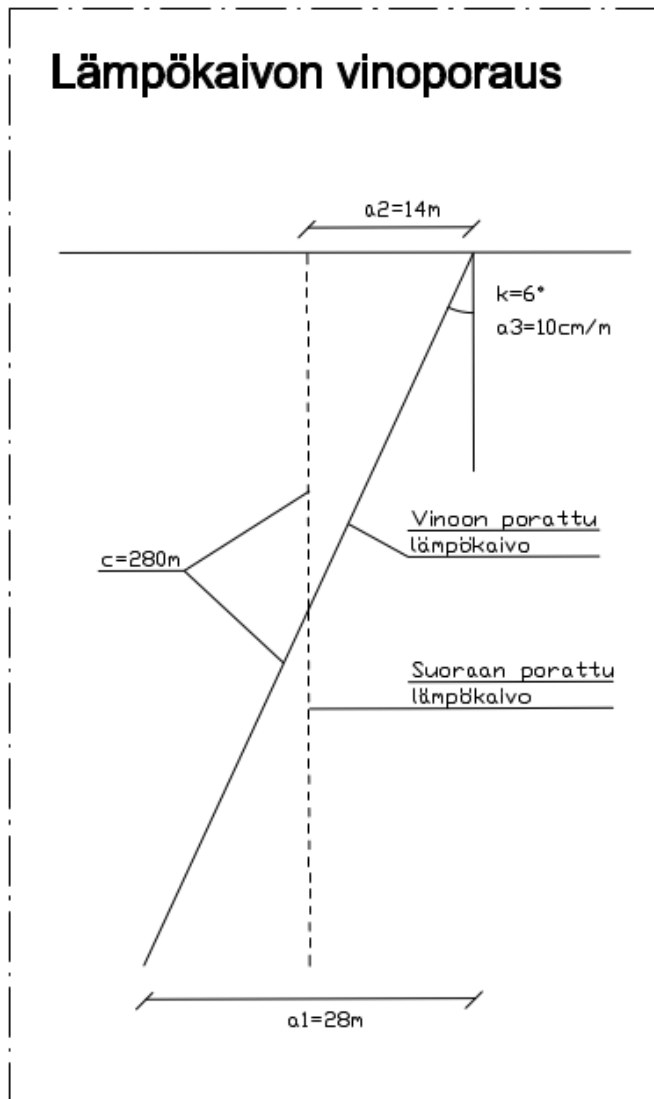
Kaikista simuloinneista suosittelisin simuloiteja 24, 31 ja 35.

Tilanteessa, jossa lämpökaivojen määrää sekä aktiivisyvyyttä ei haluta muuttaa, suosittelisin simulointia 24, jossa aktiivisyvyys on 275 metriä ja kaivojen määrä on 28. Simuloinnissa 24 on vähennetty kaivokentästä otettua lämpöenergiaa 525 MWh:sta 430 MWh:iin vuodessa, jolloin lämpökaivokenttä toimisi optimaalisesti. Lämpökaivon lämmitysteho on 280 kW, virtaus on 0,82 l/s, Reynoldsin luku 3 610, painehäviö (meno-paluu) 429 Pa/m ja kustannus 221 000 euroa ilman putkikaivantoa.

Simuloinnissa 31 lämpökaivojen määrä on 32 kappaletta ja aktiivisyvyys 300 metriä. Lämpökaivon lämmitysteho on 280 kW, virtaus on 0,72 l/s, Reynoldsin luku 3 160, painehäviö (meno-paluu) 340 Pa/m ja kustannus 262 000 euroa ilman putkikaivantoa.

Simuloinnissa 35 on lämpökaivojen määrä 33 kappaletta ja aktiivisyvyys 289 metriä. Lämpökaivon lämmitysteho on 280 kW, virtaus on 0,69 l/s, Reynoldsin luku 3 060, painehäviö (meno-paluu) 320 Pa/m ja kustannus 261 000 euroa ilman putkikaivantoa.

Mikäli on mahdollista, tulisi reunimmaisat lämpökaivot lämpökaivokentästä porata viinon. Vinoporauksella voidaan tehdä säästöä noin 60 €/m, kun otetaan huomioon vaakaputken sekä vaakaputken kanaalikaivuun hinta. Kuvassa 38 nähdään läpileikkaus lämpökaivon vinoporauksesta.



Kuva 38. Leikkaus lämpökaivon vinoporausesta.

Leikkauksen perusteella voisimme vähentää suojaetäisyyttä 14 metrillä simuloinnin 24 vinoon poratuissa lämpökaivoissa. Liitteen 2 mukaan lämpökaivokentässä on 28 kappaletta lämpökaivoja, joista 7 porattaisiin vinoon 6 asteen kulmaan. Vinoon poratuissa lämpökaivoissa vähennetään suojaetäisyyttä 10 metrillä, eli suojaetäisyyttä ei vähennetä suurinta sallittua määrää, sillä halutaan pelata varman päälle. Kun 7 lämpökaivoa porattaisiin vinoon, tulisi säästöä yhteensä 4 200 euroa, eli 1,9 prosentin säästö.

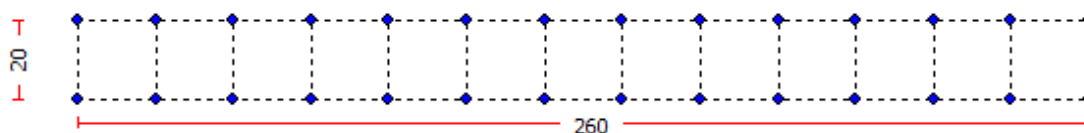
Vaihtoehtoisesti voisimme porata vinoon kaikki reunimmaisiet lämpökaivot lämpökaivokentässä. Kuvassa 39 on esitetty lämpökaivokenttä 4 x 7, joka muistuttaa eniten liitettä 2.



Kuva 39. Lämpökaivokenttä 4 x 7, 28 kpl lämpökaivoja.

Simuloinnin 24 kohdalla voisimme nostaa vinoon porattujen lämpökaivojen määrää 14 kappaleeseen, jolloin vaakasuuntaiset lämpökaivot kuvassa 39 porattaisiin vinoon. Tällä säästettäisiin 8 400 euroa, eli 3,8 prosenttia.

Taulukon 15 perusteella voidaan todeta, että lämpökaivot lämpökaivokentässä on kustannusten vuoksi hyvä sijoittaa pitkittäin (kuva 40) eikä useita rinnakkain (kuva 39). Kun lämpökaivot on sijoitettu pitkittäin (kuva 40), ne häiritsevät vähemmän toisiaan kuin rinnakkain aseteltuna (kuva 39), millä on edullinen vaikutus kustannuksiin.



Kuva 40. Lämpökaivokenttä 2 x 14, 28 kpl lämpökaivoja.

Kun lämpökaivot asetellaan kuvan 40 mukaisesti pitkittäin, voidaan suuri osa lämpökaivoista porata vinoon. Liitteessä 5 on esitelty ratkaisu, jossa lämpökaivokenttä muistuttaa asetelmaltaan simulointia 38. Edellä mainitun ratkaisun lämpökaivokentässä on 30 lämpökaivoa, joiden aktiivisyvyys on 275 metriä. Lämpökaivokentässä 19 lämpökaivoa porataan vinoon, osa 7 ja osa 9 asteen kulmassa. Lämpökaivon lämmitysteho on 280 kW, virtaus on 0,76 l/s, Reynoldsin luku 3 369 ja painehäviö (meno-paluu) 380 Pa/m. Kustannusarvio lämpökaivotöiden osalta on 229 000 euroa ja kanaalikaivuun osalta 40 000 euroa. Kustannusarvioon on otettu huomioon vinoporauksesta tulleet säästöt.

Kyseisestä lämpökaivokentästä saatava lämpöenergian määrä joudutaan pitämään välillä 525–430 MWh vuodessa, jotta lämpökaivokenttä toimisi halutulla tavalla. Taulukon 15 avulla voidaan laskea arvio saatavasta lämpöenergian määrästä kertomalla simuloinnin 38 lämpöenergian määrä metriä kohden (57 kWh/m) kokonaisaktiivisyvyydellä, jolloin saadaan lämpöenergian määräksi 470 MWh vuodessa. Tarkka arvio kaivokentästä saatavasta lämpöenergian määrästä saadaan kuitenkin vasta, kun lämpövastetesti on kohteeseen suoritettu. Simuloinnin 24 perusteella vuodessa saatava lämpöenergian määrä on vähintään 430 MWh.

6.3 Simulointiohjelmat

Simulointiohjelmana EED on hyvin yksinkertainen verrattuna IDA ICE:iin. Tutkimuksia, joissa vertaillaan EED- ja IDA ICE-simulointien tuloksia toteutuneisiin tuloksiin, olisi hyvä suorittaa. Kun verrataan simulointiohjelmien tuloksia toteutuneisiin tuloksiin, näkyisi kumpi simulointiohjelma antaa luotettavampia tuloksia. Simulointeja tehdään useimmiten EED-ohjelmistolla sen yksinkertaisuuden vuoksi. IDA ICE:lla saadaan puolestaan luotettavampia tuloksia, sillä IDA ICE:lla voidaan simuloida useita järjestelmiä kerralla eikä pelkkiä lämpökaivoja.

6.4 Maankamara

Maalämpö on erinomainen lämmitysratkaisu. Ei voida kuitenkaan sanoa, mitä tapahtuu tulevaisuudessa, mikäli maalämmön yleistyessä maankamara imetään kylmäksi. Lämpökaivokenttiä olisi hyvä suunnitella siten, että maasta otetaan saman verran lämpöä kuin sinne ladataan, jolloin vaarana ei olisi maalämmön loppuminen.

Lämpökaivot tulevat yleistymään ja tulevaisuudessa kenties kaikki lämmitys toteutetaan niitä hyödyntäen. Olisi hyvä tehdä lisää tutkimuksia aiheesta, joissa selvittäisiin jatkuvan lämmönkeruun vaikutus maankamaraan. Tutkimuksissa tulisi selvittää, onko maalämpö katoavaa luonnonvaraa vai voisiko sitä hyödyntää loputtomiin. Toisaalta tulisi selvittää, miten lämpökaivot tulisi mitoittaa, jotta maankamaran lämpöenergiavarastot eivät pääsisi ehtymään.

6.5 Itsearviointi

Tehdessäni insinööriyttä olen saanut hyvän yleiskuvan lähdelämmön kokonaisuudesta. Vaikka aihe on haastava ja aiempaa kirjallisuutta on hyvin vähän, sain koottua työn, joka antaa hyvät valmiudet lähteä suunnittelemaan samankaltaisia kohteita. Työssäni käyn myös läpi seikkoja, jotka on hyvä ottaa huomioon suunniteltaessa lämpökaivokenttiä. Insinööriyöllä halutaan tuoda näkemys lämpökaivokenttien säästömahdollisuuksista ja herättää keskustelua sekä kehitysideoita lähdelämmöstä.

Simuloinneista tulee muistaa, että minulla ei ole koulutusta EED-simulointiohjelmalle. Opettelin simulointiohjelman käytön EED:n kotisivujen manuaalien ja esimerkkien avulla. Simulointiohjelman käytössä sain suuresti apua Aki Valkeapäältä sekä Adib Kalantarilta.

Lähteet

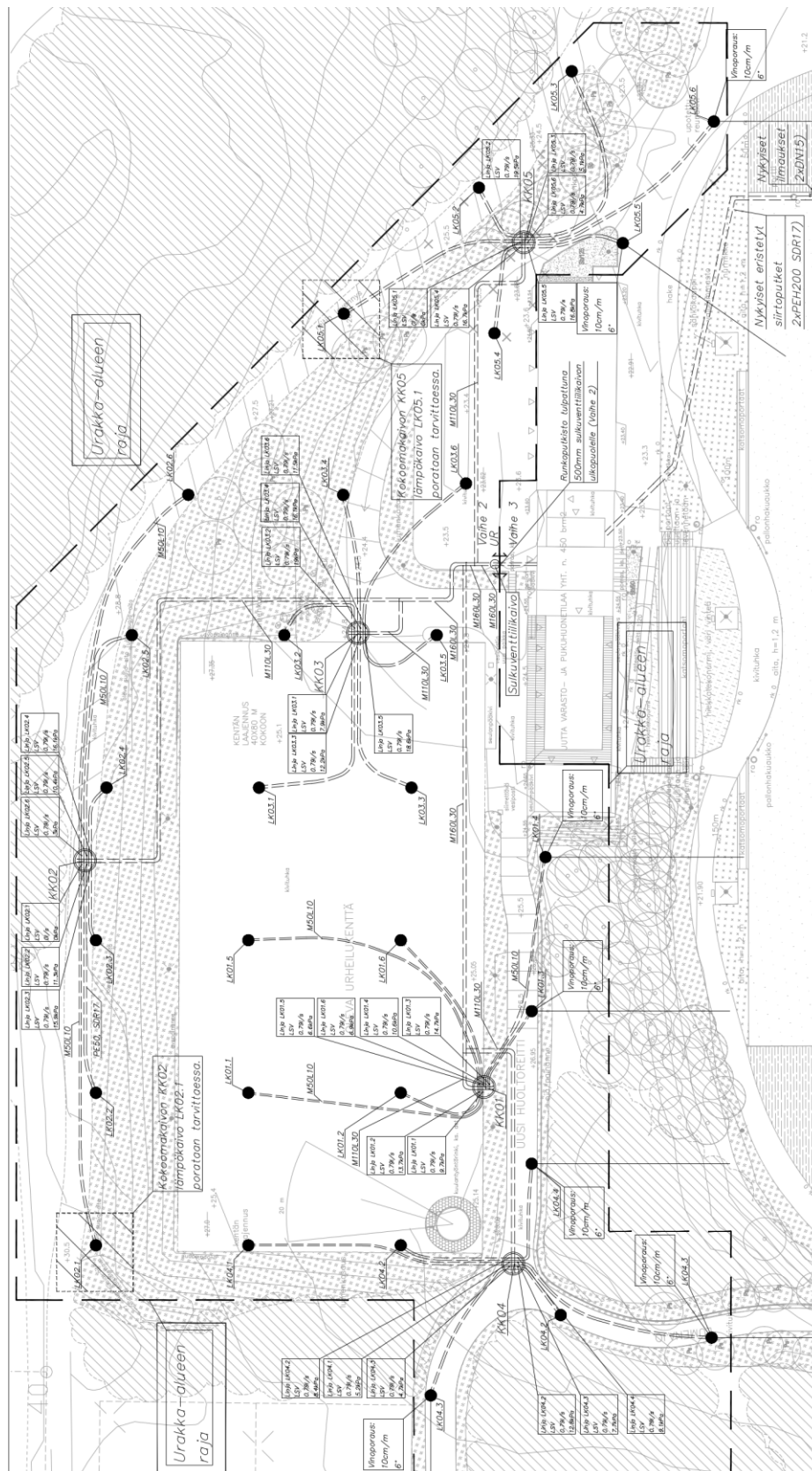
- 1 Autiopelto, Mika. 2020. Diplomi-insinööri. FCG. Helsinki. Keskustelut 2020.
- 2 Pikkarainen, Tero. 2019. Insinööriyö. Tekonurmen energiajärjestelmä: Lämmönluovutusjärjestelmän mitoitus. Metropolian ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 3 Seiro, Jan. 2016. Insinööriyö. Jalkapallokentän lämmityksen energiankulutus suomessa. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 4 Maalämpö työryhmän ehdotus. 2019. Verkkoaineisto. Helsingin kaupunki. <https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/Maalampo-tyoryhman_raportti_keskustelua-varten.pdf> Luettu 02.04.2020.
- 5 Helsingin geoenergia potentiaali. 2019. Verkkoaineisto. Helsingin kaupunki. <https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/Helsingin_geoenergiapotentiaali_luonnos.pdf> Luettu 03.04.2020.
- 6 Maanalaista energiaa. 2017. Verkkoaineisto. Helsingin kaupunki. <<https://www.hel.fi/static/kv/Geo/Julkaisut/julkaisu97.pdf>> Luettu 04.04.2020.
- 7 Riktlinjer för termisk responstest (TRT). 2015. Verkkoaineisto. Svenskt Geoenergicentrum. <http://media.geoenergicentrum.se/2015/11/0_Riktlinjer-f%C3%B6r-Termisk-Responstest_2015.pdf> Luettu 07.10.2020
- 8 TRT-mittaus. 2020. Verkkoaineisto. Geodrill. <<https://www.geodrill.fi/trt-mittaus/>> Luettu 12.02.2020.
- 9 Kalantar, Adib. 2019. Tutkimus ja tuotekehitys. Muovitech. Puhelin- ja s-posti keskustelut 2019–2020.
- 10 Ääneniemen geoenergiapotentiaali. 2018. Verkkoaineisto. Keski-Suomi. <https://www.keskisuomi.fi/filebank/25673-Report_Geoenergy_potential_of_aaneniemi.pdf> Luettu 12.02.2020.
- 11 Turbocollector. Verkkoaineisto. MuoviTech. <<https://www.muovitech.com/default.asp?page=turbo2&show=3>> Luettu 25.06.2020
- 12 Lämpökaivotyöselostus. 2020. Sisäinen aineisto. Finnish Consulting Group. Luettu 29.04.2020.

- 13 Energiakaivo: Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. 2013. Verkkoaineisto. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=4> Luettu 08.04.2020.
- 14 Porausprosessi. 2015. Verkkoaineisto. PT Energia Poraus. <<http://www.pumppu-japaneli.fi/flaria/media/lampokaivoporaus-esite.pdf>> Luettu 21.04.2020.
- 15 Kirja. Matemaattisten Aineiden Opettajien Liitto. MAOL ry. 2005.
- 16 Purhonen, Saku. 2016. Insinööriyö. Energiakaivojen mitoittamiseen liittyvät tekijät. MAMK University of Applied Sciences. Theseus-tietokanta.
- 17 Naturet – ympäristö. Verkkoaineisto. Altian. <<https://www.altiaindustrial.com/fi/naturet-ymparisto>> Luettu 05.07.2020
- 18 Lausunto Naturet-maalämpönesteen pohjavesivaikutuksista. 2014. Verkkoaineisto. Vahanen. <<https://www.altiaindustrial.com/sites/default/files/media/ENV540%20Altia%20Oyj%20lausunto%20maal%C3%A4mp%C3%B6nesteen%20pohjavesivaikutuksista%20tiivistetty.pdf>> Luettu 05.07.2020
- 19 Välilliset jäähdytysjärjestelmät. 2019. Verkkoaineisto. Suomen kylmäyhdistys ry. <<http://www.skil.fi/www/att.php?type=2&id=331>> Luettu 06.07.2020
- 20 Kauppila, Kari. 2017. Raportti. Energiaväylän kuluttajan lämpöpumppukeskus. EnerSys CM Oy. <<https://sykli.fi/wp-content/uploads/2018/05/energiavaylankuluttajanlampopumppukeskus-final-06032018-1.pdf>> Luettu 27.04.2020

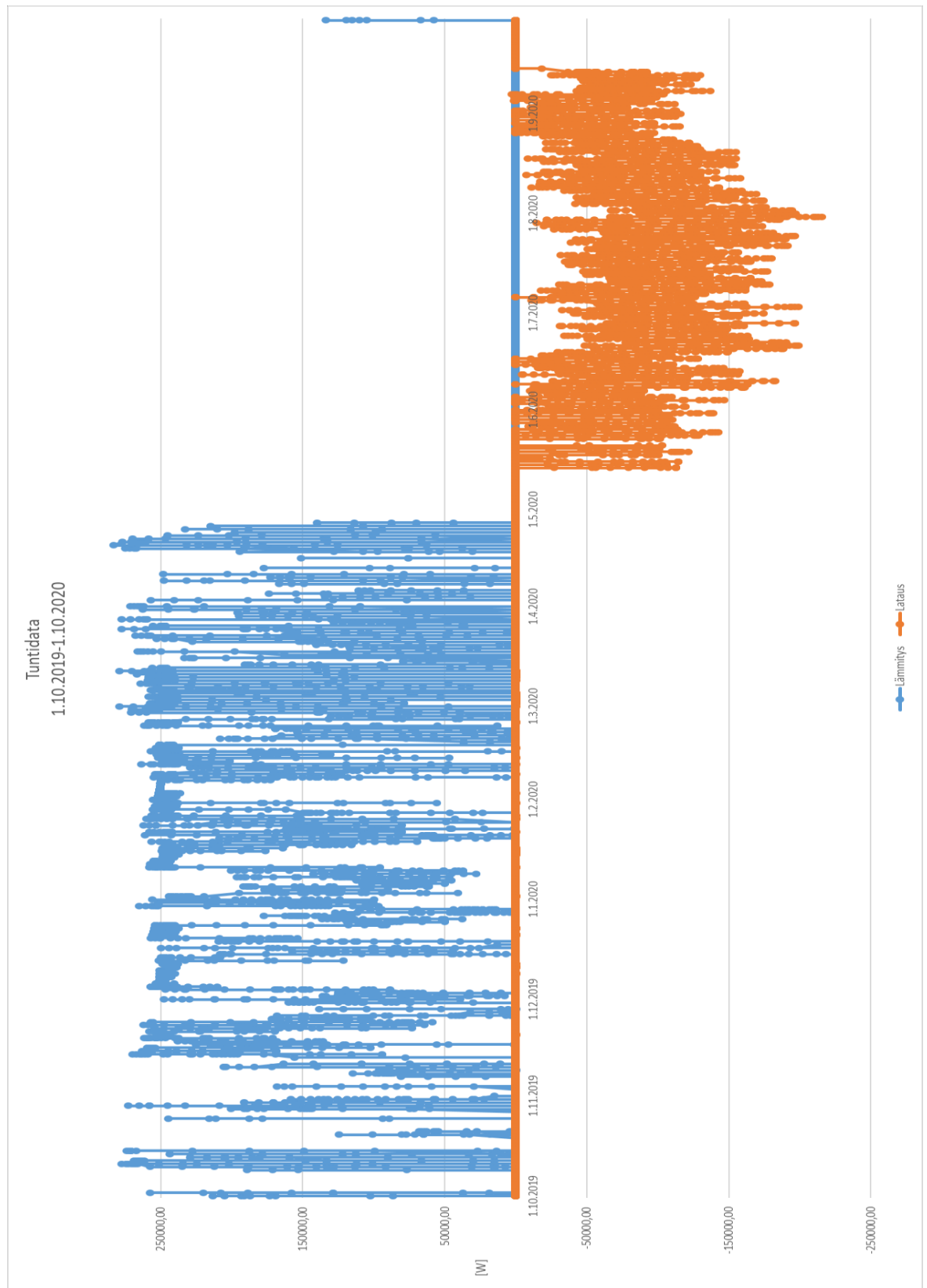
Kustannuslaskelmat

Nro.	Muutos	Yksikkö	Anostus	Arvoon	Syvyys	Aktiivisyys	Optimointityökalu	Lämmönkeruun keskimääräinen lämpötila 30v jälkeen	Kustannus	Aktiivisyys jossa -3,5 °C toteutuu	Lämpöenergia kaivokenttään	Lämpöenergia kaivokenttään	Lämpöteho kaivokenttään	Lämpöteho kaivokenttään	Kustannus jossa -1,5 °C toteutuu
				[m]	[m]	[m]	Kylä/Ei	[°C]	[€]	[m]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[W/m]	[W/m]	[€]
1	lähtötilanne	-	-	-	280	275	Ei	-5,74	222 000	379	49	0	26	0	284 000
2	Lämpökaivojen suojaetäisyys	[m]	20	25	280	275	Ei	-4,85	222 000	358	52	0	28	0	272 000
3	Lämpökaivojen suojaetäisyys	[m]	20	30	280	275	Ei	-4,27	222 000	348	55	0	29	0	269 000
4	lähtötilanne lasketulla lämpökaivoavaruuksella	[(m ²)/W]	0,11	Laskeutu	280	275	Ei	-6,89	222 000	404	46	0	25	0	299 000
5	Lämmönkeruuputkien etäisyys toisistaan	[mm]	69	59	280	275	Ei	-7,78	222 000	420	45	0	24	0	309 000
6	Lämmönkeruuputkien etäisyys toisistaan	[mm]	69	49	280	275	Ei	-8,66	222 000	438	43	0	23	0	320 000
7	Lämpökaivoon täytteen lämmönjohtavuus	[W/(m ² K)]	0,6	2,4	280	280	Ei	-5,02	340 000	368	51	0	27	0	434 000
8	Maanperän lämmönjohtokyky	[W/(m ² K)]	3,4	2,4	280	275	Ei	-7,76	222 000	401	47	0	25	0	297 000
9	Maanperän lämmönjohtokyky	[W/(m ² K)]	3,4	4,4	280	275	Ei	-4,48	222 000	355	53	0	28	0	270 000
10	Lämpökaivo vastus	[W/(m ² K)]	0,11	0,09	280	275	Ei	-5,1	222 000	364	52	0	27	0	275 000
11	Lämpökaivo vastus	[(m ²)/W]	0,11	0,14	280	275	Ei	-6,71	222 000	401	47	0	25	0	297 000
12	Lämpökaivo vastus	[(m ²)/W]	0,11	0,17	280	275	Ei	-7,68	222 000	418	45	0	24	0	308 000
13	Pienin keskimääräinen nesteen lämpötila	[°C]	-1,5	-0,5	280	275	Ei	-5,74	222 000	409	46	0	24	0	302 000
14	Pienin keskimääräinen nesteen lämpötila	[°C]	-1,5	-1	280	275	Ei	-5,74	222 000	395	47	0	25	0	294 000
15	Maan pinnan lämpötila	[°C]	5,6	6,6	280	275	Ei	-4,74	222 000	349	54	0	29	0	266 000
16	Maan pinnan lämpötila	[°C]	5,6	7,6	280	275	Ei	-3,74	222 000	322	58	0	31	0	250 000
17	Lämpökaivoon haiiridion lämpötila	[°C]	-	-	280	275	Ei	-7,76	222 000	532	35	0	19	0	376 000
18	Lämpökaivoon haiiridion lämpötila	[°C]	5,6	6,6	280	275	Ei	-6,76	222 000	462	41	0	22	0	334 000
19	Lämpökaivoon haiiridion lämpötila	[°C]	5,6	7,6	280	275	Ei	-5,76	222 000	409	46	0	24	0	302 000
20	Lämpökaivoon haiiridion lämpötila	[°C]	5,6	8,6	280	275	Ei	-4,76	222 000	371	51	0	27	0	279 000
21	Lämpöenergia kaivokentästä	[MWh/a]	525	360	280	275	Ei	-1,47	222 000	274	47	0	36	0	222 000
22	Lämpöenergia kaivokentästä	[MWh/a]	525	400	280	275	Ei	-2,53	222 000	301	47	0	33	0	237 000
23	Lämpöenergia kaivokenttään	[MWh/a]	0	250	280	275	Ei	-3,87	222 000	333	56	27	30	24	257 000
24	Lämpöenergia kaivokentästä/kaivokenttään	[MWh/a]	5250	430/250	280	275	Ei	-1,46	222 000	274	56	33	36	29	221 000
25	kaivojen määrä	[kp]	28	44	280	275	Kylä	-1,10	328 000	266	45	0	24	0	320 000
26	Aktiivisyys	[m]	275	379	384	379	Kylä	-1,5	284 000	379	49	0	26	0	284 000
27	kaivojen määrä	[kp]	28	36	280	275	Kylä	-1,4	275 000	272	54	26	29	22	273 000
28	Aktiivisyys	[m]	275	333	338	333	Kylä	-1,52	256 000	333	56	27	30	24	257 000
29	Lämmönkeruuputkien koko	[mm]	45	40	158	153	Ei	-18,80	144 000	406	46	0	25	0	288 000
30	Lämmönkeruuputkien koko	[mm]	45	50	447	442	Ei	-0,31	326 000	404	46	0	25	0	303 000

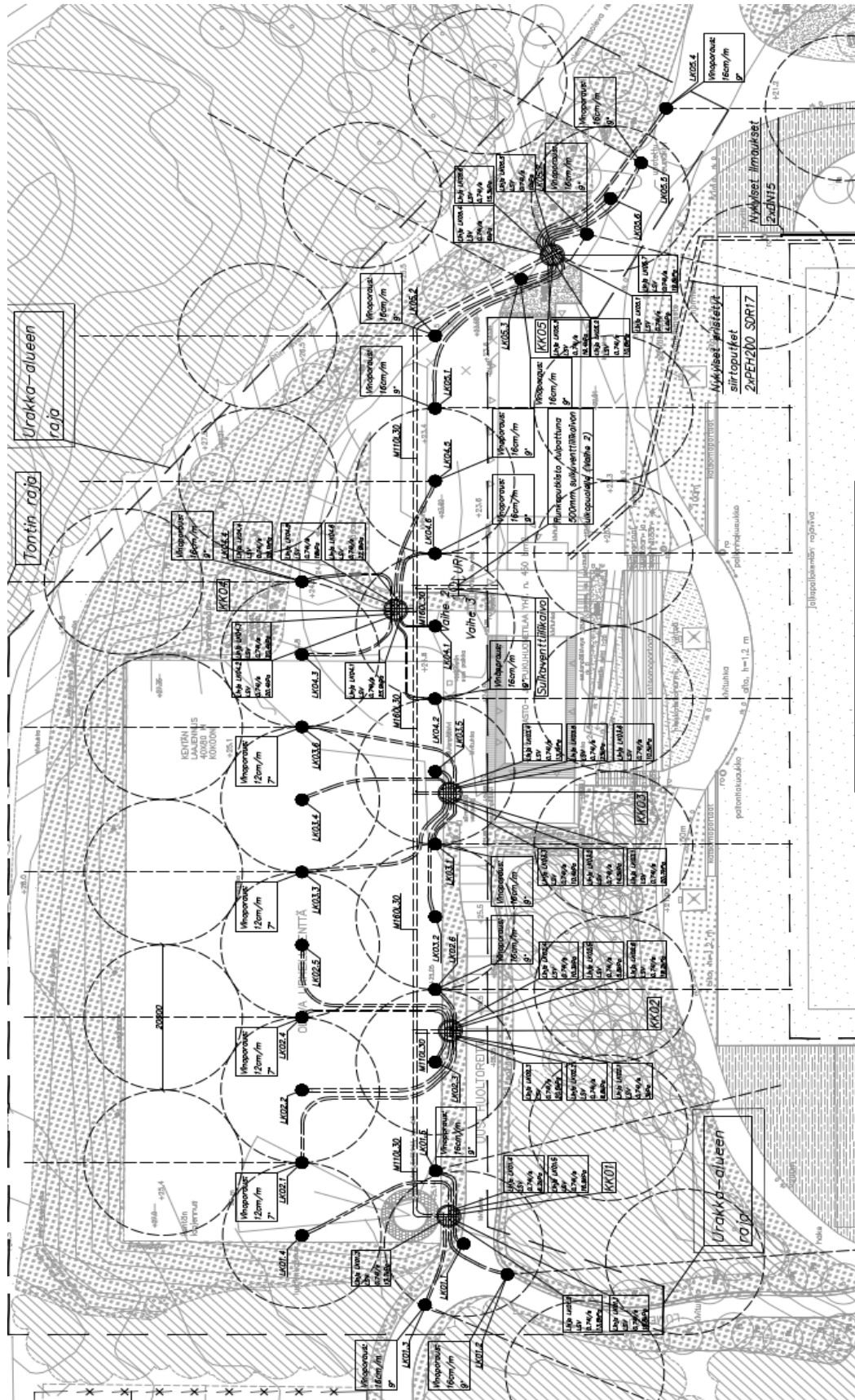
Söderkullan tekonurmen asemakuva



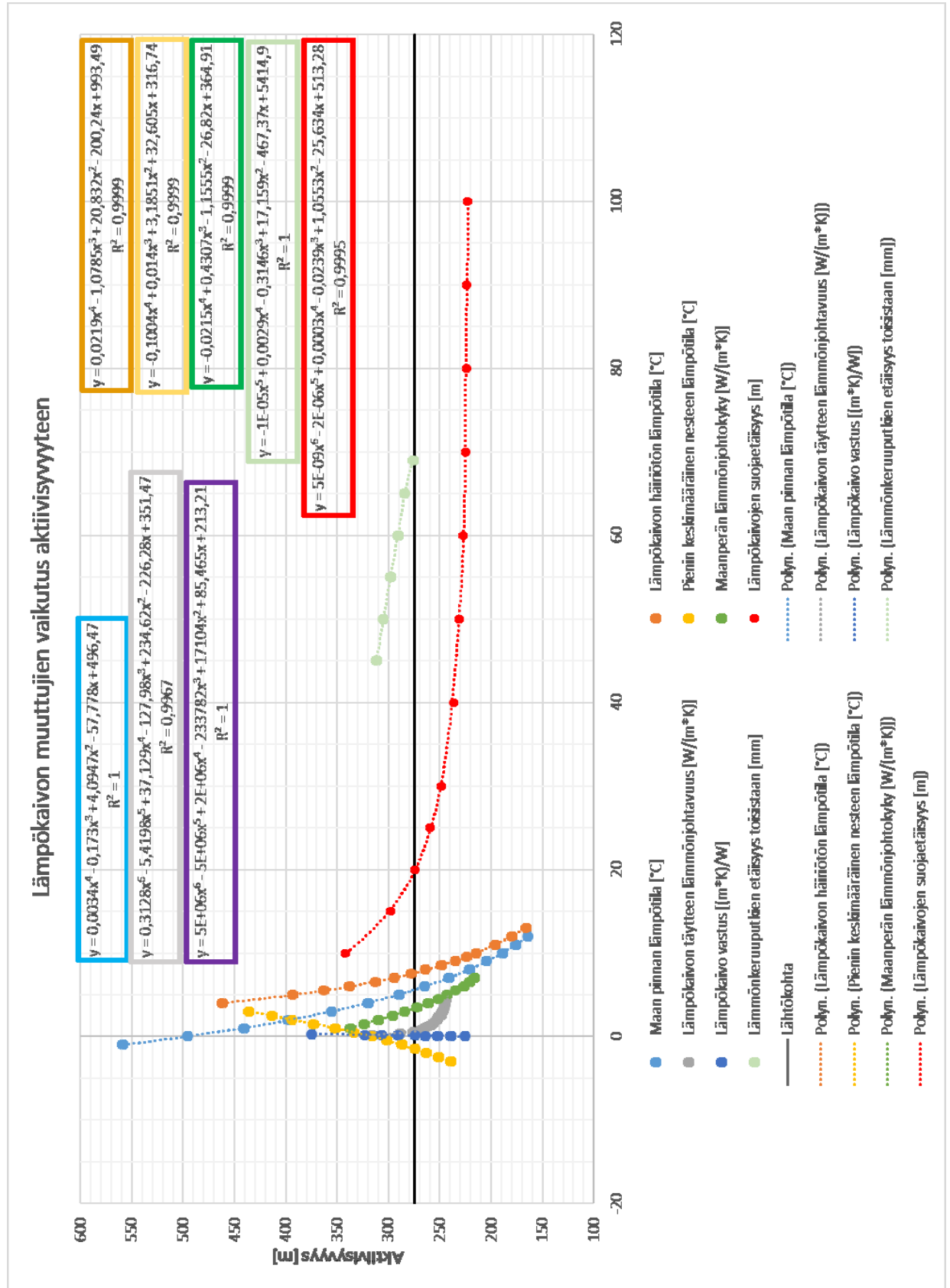
Lämpökaivokentän tehon tuntidata



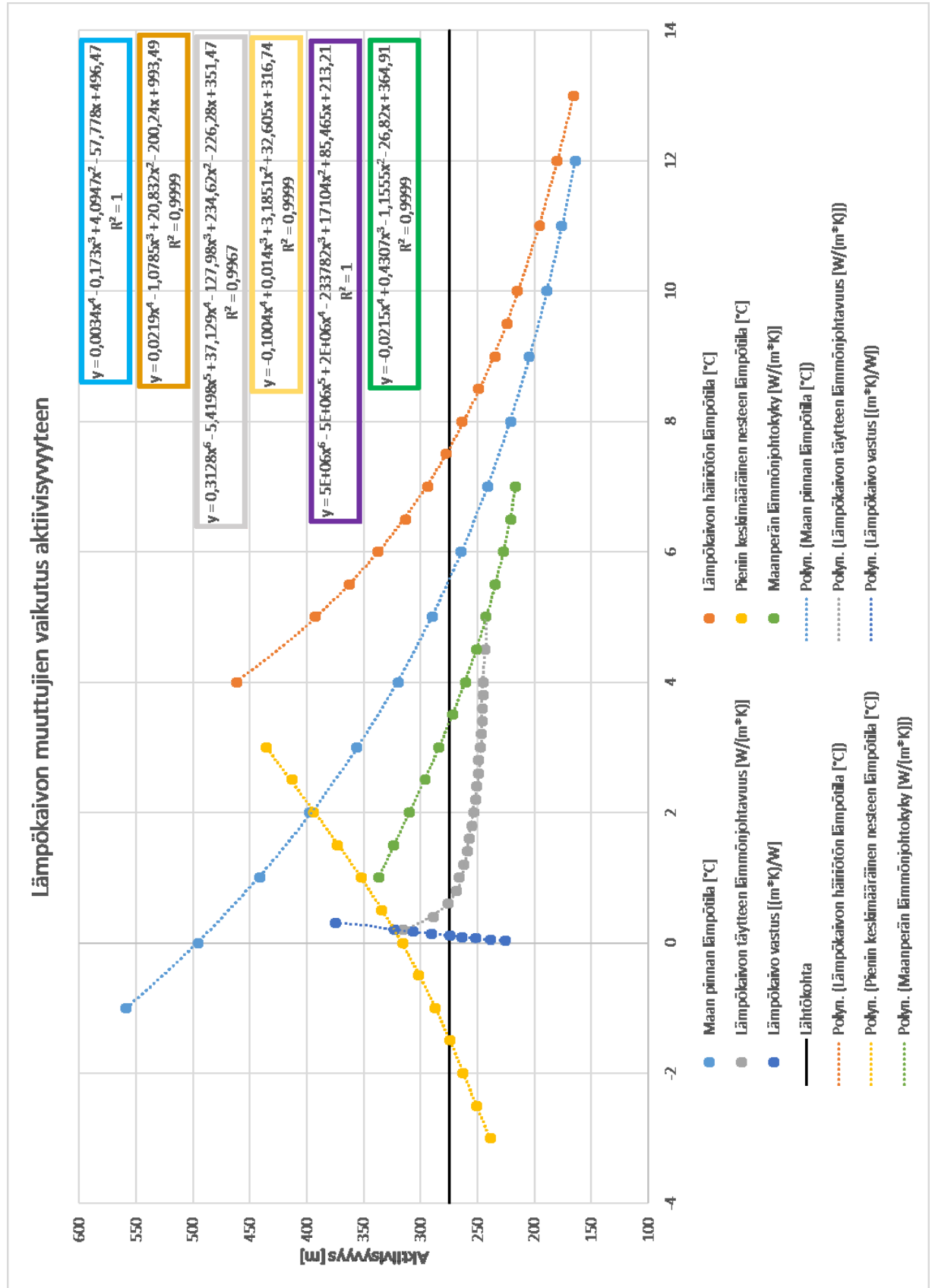
Söderkullan tekonurmen uusi asemakuva ehdotus



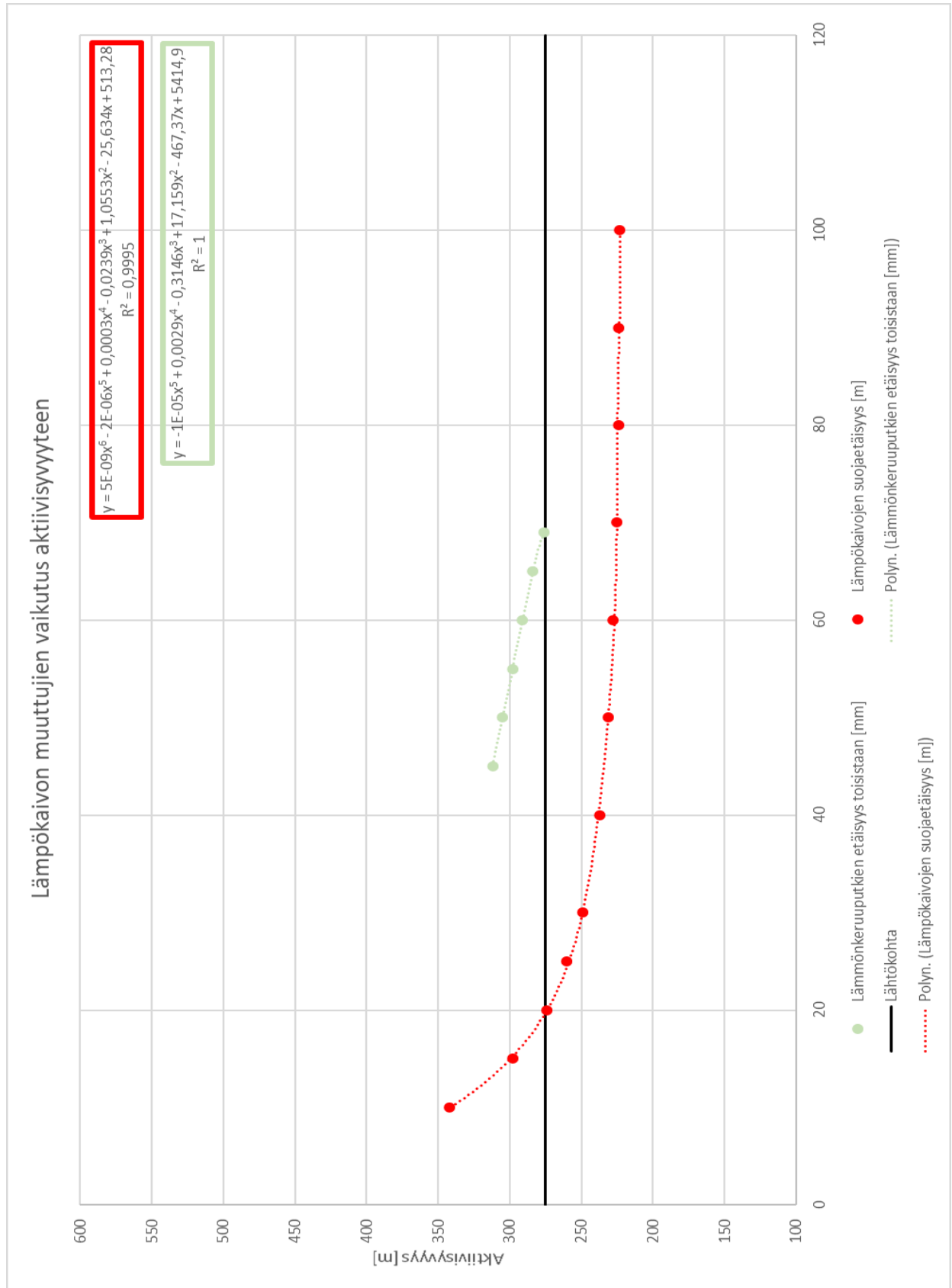
Lämpökaivon muuttujien vaikutus aktiivisyyteen



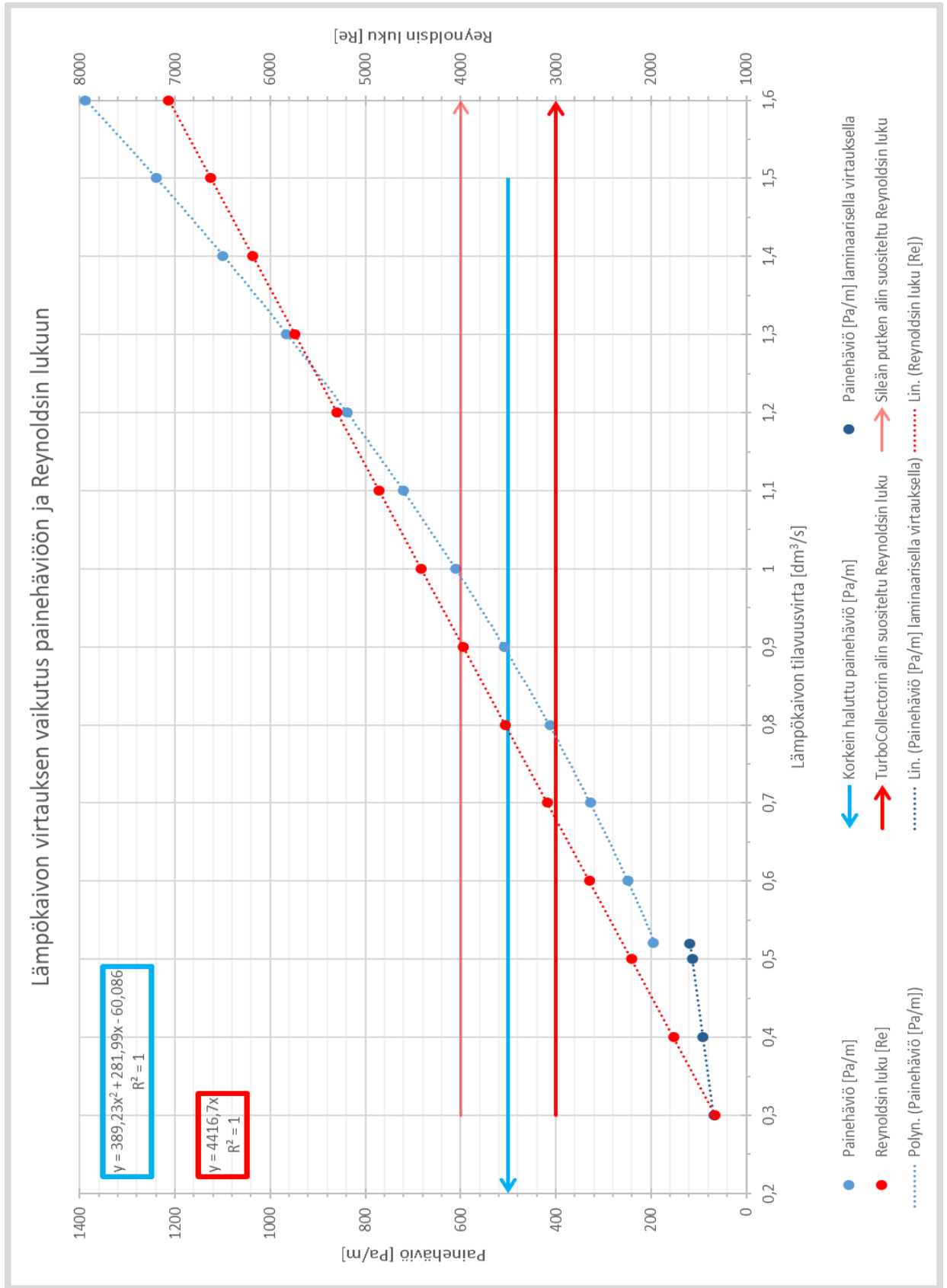
Lämpökaivon muuttujien vaikutus aktiivisyyteen, osa 1



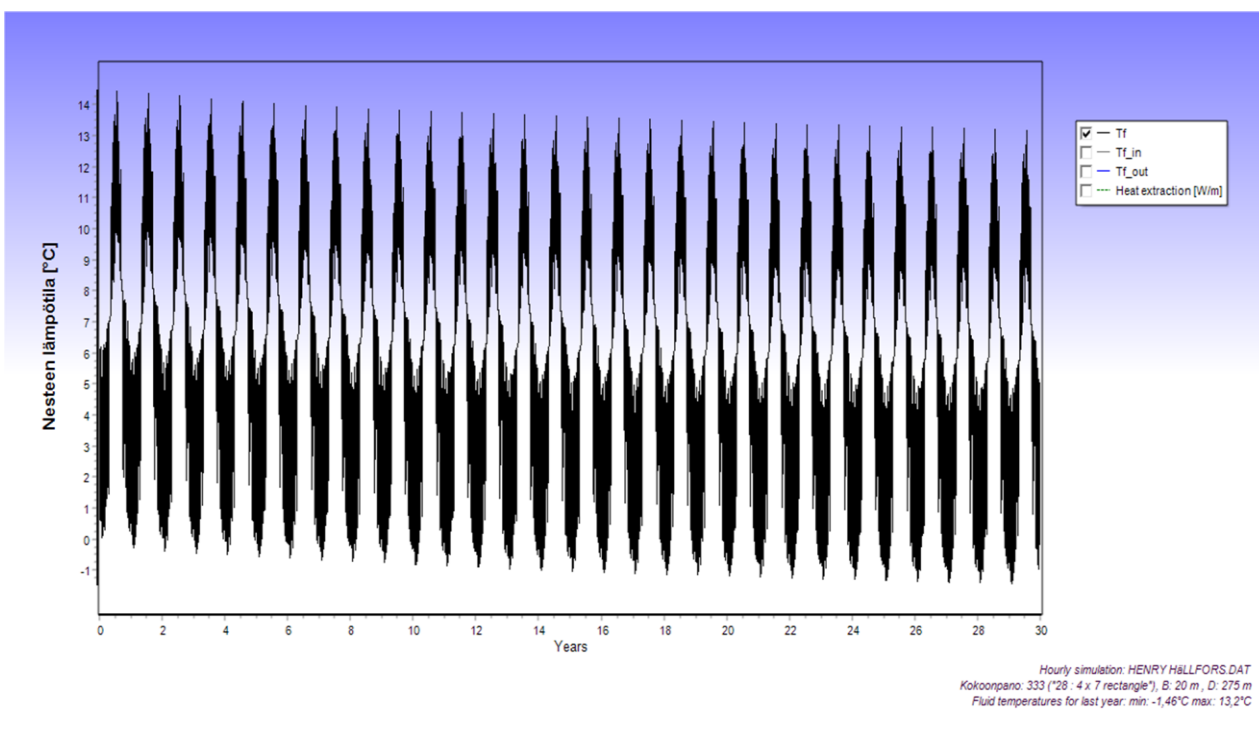
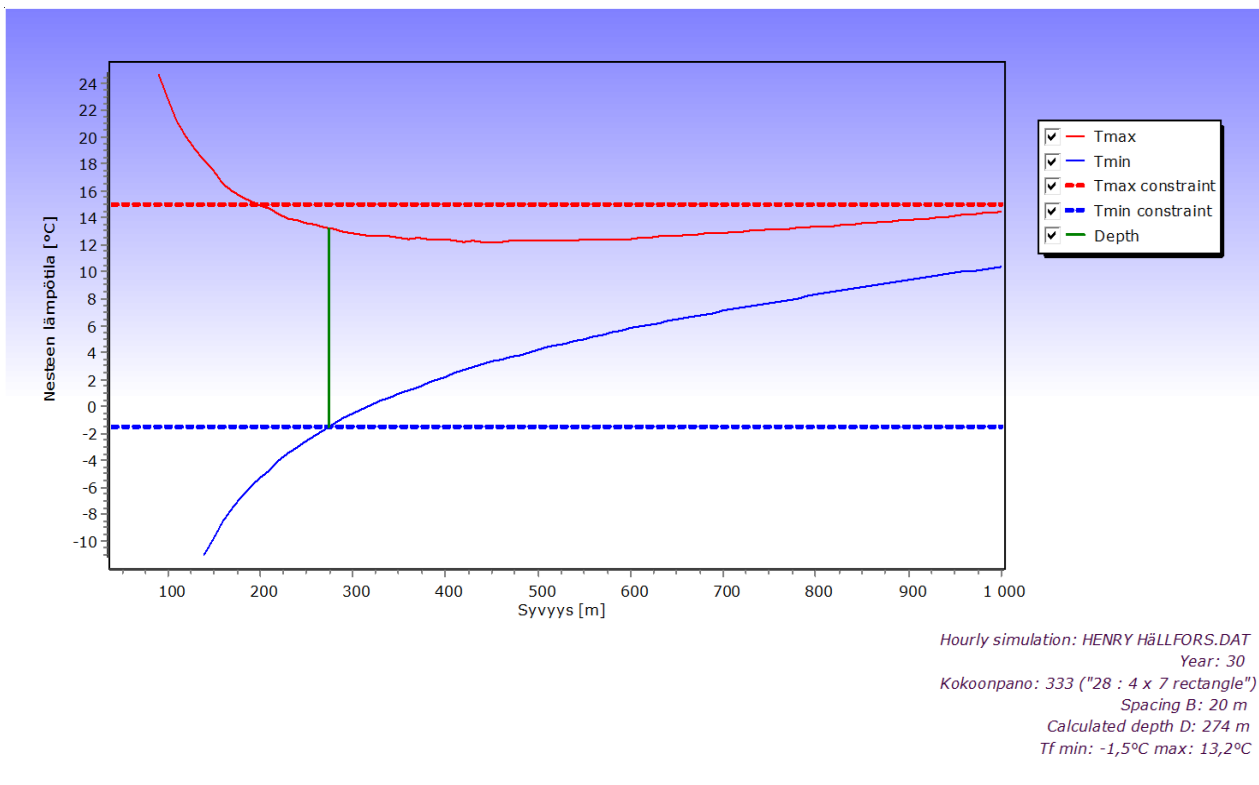
Lämpökaivon muuttujien vaikutus aktiivisyyteen, osa 2



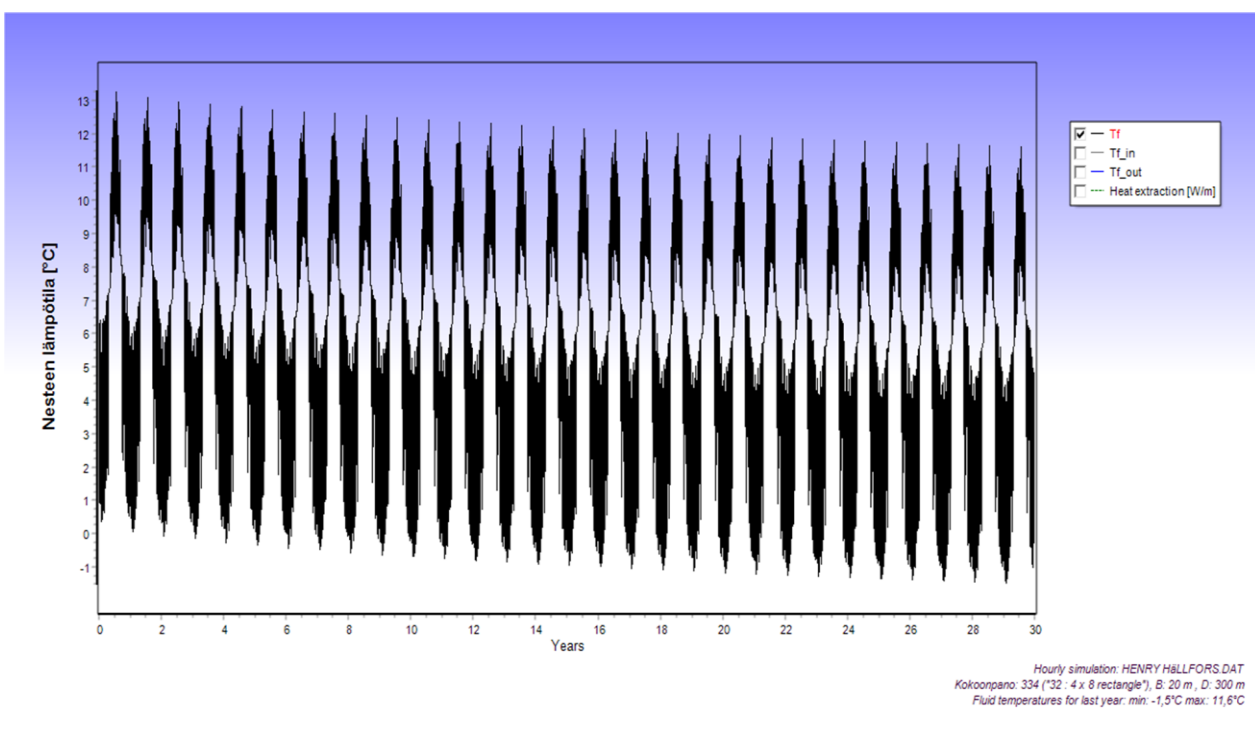
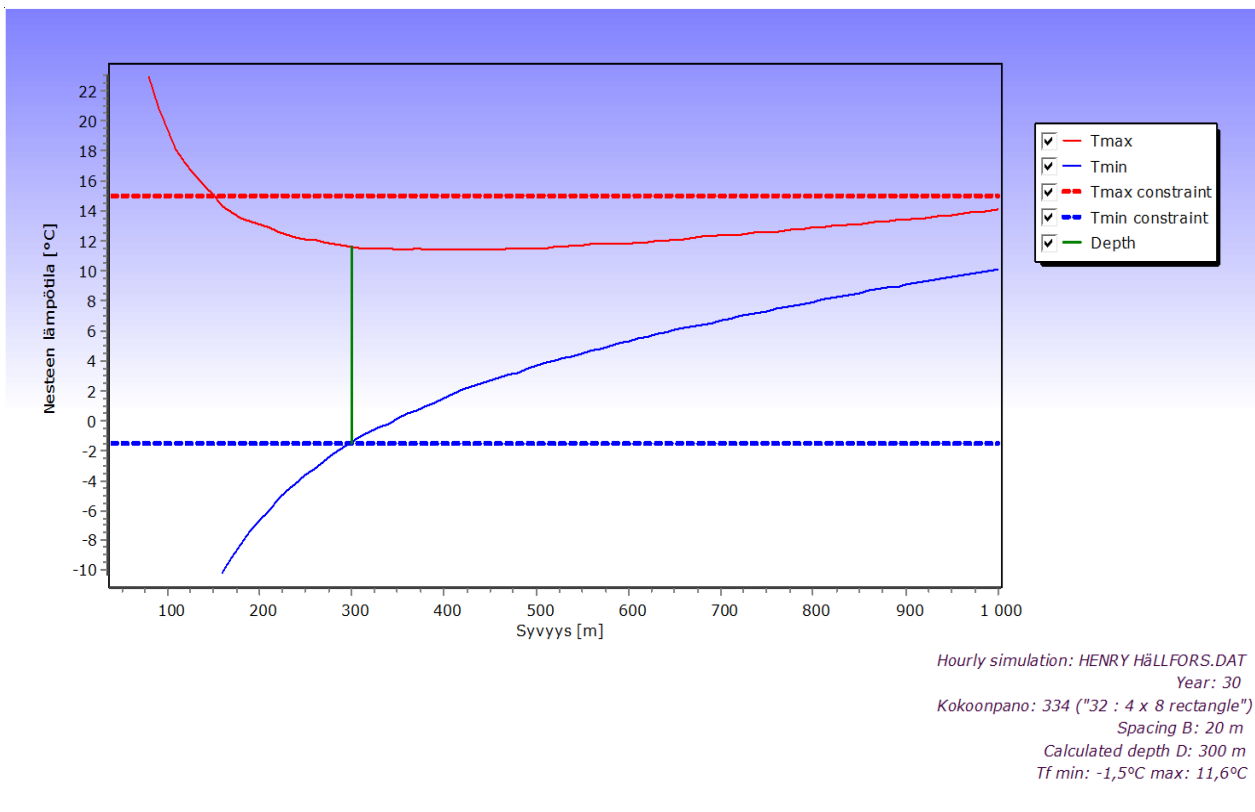
Lämpökaivon virtauksen vaikutus painehäviöön ja Reynoldsin lukuun



Simulointi 24



Simulointi 31



Simulointi 35

