



Kasper Tilli

Keskisyvien geolämpökaivojen soveltuvuus lämmön tuotantoon ja varastointiin Suomessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Rakennusmestari, LVI (AMK)

Rakennusalan työnjohto

Opinnäytetyö

11.5.2022

Tiivistelmä

| | |
|-----------------------|--|
| Tekijä: | Kasper Tilli |
| Otsikko: | Keskisyvien geolämpökaivojen soveltuvuus lämmön tuotantoon ja varastointiin Suomessa |
| Sivumäärä: | 44 sivua |
| Aika: | 11.5.2022 |
| Tutkinto: | rakennusmestari, LVI (AMK) |
| Tutkinto-ohjelma: | rakennusalan työnjohto |
| Ammatillinen pääaine: | LVI-tekniikka |
| Ohjaajat: | lehtori Jyrki Viranko kehityspäällikkö Juha Solantie |

Keskisyvät geolämpökaivot ovat Suomessa kehityksen kohteena oleva uusi ilmastoystävällinen energiantuotantomuoto. Keskisyvät geolämpökaivot ovat perinteisiä maalämpökaivoja huomattavasti syvempiä, ja täten niiden energiantuotto on suurempi. Suomessa keskisyvän geolämpökaivon syvyydeksi on määritelty 1-3 kilometriä. Tämän opinnäytetyön tilaajana oli suomalainen energia-alan yritys. Työn tarkoituksena oli tuottaa teoriapohjainen katsaus keskisyvien geolämpökaivojen teknologioista ja niiden hyödynnettävyydestä Suomessa.

Opinnäytetyön toteutustapana oli alan verkkoaineistoihin perehtyminen ja Suomessa toteutettavien geolämpökaivojen hankevastuuhenkilöiden haastattelut. Teoriaosudessa käsiteltiin keskisyvien geolämpökaivojen oleelliset osa-alueet kaivon poraukseen ja tekniikkaan liittyen. Tämän lisäksi perehdyttiin kaivojen rakennuslupakäytäntöihin, geotermisen energian varastointiin ja sen kartoitukseen sekä tarkasteltiin lyhyesti keskisyvien lämpökaivojen hyödyntämistä Ruotsissa ja Norjassa. Teoriaosuuden jälkeen perehdyttiin hankekohtaisesti Suomessa toteutuneisiin tai toteutettaviin keskisyvien kaivojen tilanteisiin. Näiden hankkeiden tarkastelu toteutettiin haastatteleamalla hankkeiden yhteyshenkilöitä, minkä jälkeen kustakin hankkeesta kirjoitettiin yhteneväiset katsaukset.

Opinnäytetyön tuloksena todetaan, että keskisyvät geolämpökaivot ovat potentiaalinen energiantuotantomenetelmä tukemassa siirtymistä hiilineutraalisuuteen tulevaisuudessa energia-alalla. Suomessa kaivojen potentiaalia kuitenkin rajoittaa vielä alalla vallitseva kokemattomuus ja sen seurauksena hankkeiden toteutuksen korkeat kustannukset. Suurimmaksi pullonkaulaksi on noussut kaivojen poraus, johon tulevaisuudessa pyritään löytämään ratkaisuja. Haasteista huolimatta moni energia-alan toimija on lähtenyt mukaan keskisyvien kaivojen pilotointihankkeisiin, minkä vuoksi alan tulevaisuuden näkymät ovat hyvät.

Avainsanat: keskisyvä geolämpökaivo, geoenergia, geolämpö

Abstract

Author: Kasper Tilli
Title: Suitability of medium-deep geothermal wells for producing and storing heat in Finland
Number of Pages: 44 pages
Date: 11 May 2022

Degree: Bachelor of Construction Management
Degree Programme: Construction Site Management
Professional Major: HVAC Engineering
Supervisors: Jyrki Viranko, Senior Lecturer
Juha Solantie, Project Development Manager

The purpose of this Bachelor's thesis was to provide a theoretical overview of medium-deep geothermal well technologies and their usability in Finland.

The final year project was carried out by studying literature and interviewing persons responsible of medium-deep geothermal well projects in Finland. Furthermore, key areas of drilling and heat extraction technologies used in medium-deep geothermal wells were discussed and permission protocols, energy storing and survey of geological feasibility reviewed. In addition, the utilization of medium-deep geothermal wells in Sweden and Norway was briefly examined. Moreover, medium-deep geothermal well projects in Finland were studied by interviewing a contact person of each project.

It is shown that medium-deep geothermal wells are a potential energy production method when aiming for carbon neutrality in future. The full potential of these wells is still limited because of the inexperience in the industry, which is the main cause for cost overruns. The drilling process has become the biggest bottleneck in the field that needs to be solved. Regardless of the challenges, many companies at the energy sector have invested in medium-deep geothermal well projects. Therefore, future prospects of the medium-deep wells are positive.

Keywords: medium-deep geothermal well, geothermal energy, geothermal heat

Sisällys

Sanasto

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Geoenergia ja sen eri käsitteet | 2 |
| 2.1 | Geoenergia | 2 |
| 2.2 | Keskisyvä geoterminen energia | 2 |
| 2.3 | Tehostettu geoterminen energia Suomessa | 6 |
| 3 | Lämpöpumpun toiminta ja sen hyötysuhteet | 6 |
| 3.1 | COP | 8 |
| 3.2 | SCOP | 8 |
| 4 | Kollektoriputki | 8 |
| 4.1 | Koaksiaalikollektori | 10 |
| 4.1.1 | Kaksinkertainen teräs koaksiaaliputki, jossa on eristävä fluidi | 11 |
| 4.1.2 | Koaksiaalinen putki lämmöneristekerroksella | 11 |
| 4.1.3 | Vakuumeristetty koaksiaaliputki | 12 |
| 5 | Poraustekniikat ja kaivon viimeistely | 14 |
| 5.1 | Kiertoporaustekniikka | 15 |
| 5.1.1 | Porausfluidit | 16 |
| 5.1.2 | Kaivon casingputkitus ja sementointi | 16 |
| 5.2 | Ilmavasaratekniikka | 17 |
| 5.3 | Vesivasaratekniikka | 18 |
| 5.4 | Sähkön hyödyntäminen porauksessa | 19 |
| 6 | Keskisyvien geotermisten lämpökaivojen porauksen ympäristönäkökulma ja siihen liittyvä lainsäädäntö | 20 |
| 6.1 | Ympäristön puolesta huomioon otettavia tekijöitä | 20 |
| 6.2 | Lupakäytännöt | 21 |
| 7 | Lämmön varastointi | 23 |
| 7.1 | Kaivojen lataus kaukolämpölaitosta hyödyntäen | 24 |
| 7.2 | Kaivojen lataus kiinteistön viilennyksestä saatavalla energialla | 24 |

| | | |
|-------|--|----|
| 8 | Keskisyvän geotermisen lämmön potentiaali ja sen kartoitus Suomessa | 24 |
| 8.1 | Keskisyvään geotermiseen kaivoon liittyvät geotieteelliset selvitykset | 25 |
| 8.1.1 | Kirjallisuuskatsaus kohteen geologisista piirteistä | 25 |
| 8.1.2 | Koekairaus | 26 |
| 8.1.3 | Geofysikaaliset rakenneluotaukset | 26 |
| 8.2 | Keskisyvän geotermisen energian potentiaali Uudellamaalla | 27 |
| 8.3 | Geoterminen gradientti | 28 |
| 9 | Keskisyvien geotermisten lämpökaivojen hyödyntäminen Ruotsissa ja Norjassa | 29 |
| 9.1 | Ruotsin tilanne | 29 |
| 9.2 | Norjan tilanne | 30 |
| 10 | Keskisyvien geotermisten lämpökaivojen nykytila Suomessa | 31 |
| 10.1 | Espoo, Koskelo | 32 |
| 10.2 | Vantaa, Varisto | 33 |
| 10.3 | Salo, Korvenmäki | 35 |
| 10.4 | Tampere, Tarastenjärvi | 36 |
| 10.5 | Helsinki, Ruskeasuo | 38 |
| 11 | Yhteenveto | 39 |
| | Lähteet | 41 |

Sanasto

| | |
|--------------------|--|
| Ajotaktiikka: | Kaivon toiminta eri ajankohtina. |
| Casingputki: | Suojaputki, joka asennetaan kaivon ulkokehälle vasten kallion seinämää. |
| DGSW: | <i>Deep Geothermal Single Well</i> . Keskisyvää geolämpökaivoa huomattavasti syvempi yhden kaivon toteutusmalli. |
| Kaivon lataaminen: | Lämpöenergian syöttäminen kaivoon, jolloin energian saanti kaivon käyttöjaksoilla paranee. |
| Kaivon purkaminen: | Lämpöenergian hyödyntäminen kaivosta kaivon käyttöjaksoilla. |
| Kollektori: | Kaivoon asennettu putki, jossa lämmönkeruuneste kiertää. |
| Lämpövuoto: | Lämpövirran tiheys, jonka yksikkö on W/m^2 . |
| ROP: | <i>Rate of penetration</i> . Arvo, joka ilmaisee porausnopeutta. Sen yksikkö on m/h. |

1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö on katsaus keskisyvien geolämpökaivojen potentiaalista lämmöntuotantoon ja varastointiin Suomessa. Työ painottuu nimenomaan lämmöntuotantoon, eikä työssä käsitellä esimerkiksi sähköntuotantoa geotermisellä energialla. Työssä käydään läpi aluksi teoriaa keskisyvien kaivojen osalta. Teoriaosuus keskittyy keskisyvien kaivojen laitteistoon, kaivon porausteknologioihin, ympäristön vaikutuksiin ja lainsäädäntöön, energian varastointiin sekä geotermisen lämmön potentiaaliin Suomessa. Yhteneväisen kallioperän vuoksi työssä tarkastellaan Suomen lisäksi geotermisen energian hyödyntämistä Ruotsissa ja Norjassa.

Teoriaosuuden jälkeen kartoitetaan keskisyvien kaivojen tilannetta Suomessa. Tavoitteena on vertailla Suomen eri hankkeita ja tuoda esille niissä ilmeneviä eroavaisuuksia. Lopuksi yhteenvedossa esitetään hankkeiden onnistumisen kannalta oleellisia tekijöitä ja läpikäydään keskisyvien kaivojen teknologioihin liittyviä jatkoselvityksiä.

Opinnäytetyön tilaajana on suomalainen energiayritys St1 Oy, jonka visiona on fossiilisten energioiden korvaaminen uusiutuvilla ratkaisulla. St1 keskittyy toteuttamaan visionsa kolmella eri liiketoiminta-alueella, jotka ovat polttoaineen tuotanto jätteistä, sähkön tuotanto tuulivoimalla ja lämmön tuotanto maa- ja kallioperästä. St1 on osa St1 Nordic Oy-konsernia. Työn tavoitteena on lisätä yleisellä tasolla ymmärrystä keskisyvien geolämpökaivojen toiminnasta, erinäisten teknologioiden hyödyntämisestä ja siitä, mikä on keskisyvien kaivojen tuottaman geolämmön potentiaali Suomessa nyt ja tulevaisuudessa. Opinnäytetyötä käytetään informatiivisena tietopakettina tilaajayrityksen liiketoimintakehityksessä.

Kiinnostuin opinnäytetyöni aiheesta tehdessäni esitelmän geotermisen energian hyödyntämisestä opintoihini sisältyvän englannin kielen kurssin yhteydessä. Opinnäytetyön kirjoittaminen aiheesta tuntui luontevalta vaihtoehdolta perehdyt-

tyäni aiheeseen syvemmin. Lisäksi aihe on erittäin ajankohtainen ottaen huomioon esimerkiksi Suomen ilmastotavoitteet ja siinä fossiilisten polttoaineiden aiheuttamien päästöjen vähentämisen ja niiden korvaamisen energiantuotannossa. Vaikka Suomessa kallioperä on kylmä ja kova, uskotaan keskisyvillä geotermisillä lämpökaivoilla olevan mahdollisuus vastata osaltaan näihin tavoitteisiin. Tämä edellyttää kuitenkin sekä lisätutkimuksia, että sijoituksia pilotointihankkeisiin. Geotermisen energian laajamittaiseen hyödyntämiseen tarvittavaa tietoa ja osaamista lisäämällä kaivojen toteutuskustannuksia voidaan optimoida.

2 Geoenergia ja sen eri käsitteet

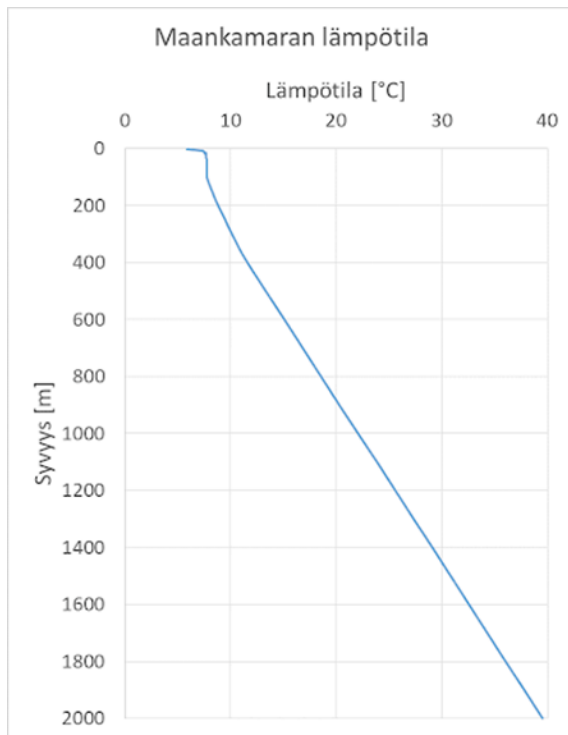
2.1 Geoenergia

Geoenergialla tarkoitetaan lähellä maanpintaa sijaitseavaa matalan lämpötilan geotermistä lämmitys- ja viilennysenergiaa. Kansankielessä geoenergialla yleisesti tarkoitetaan maalämpöä. Suomessa tällaista energiaa hyödynnetään eri syvyyksistä erilaisilla tekniikoilla. Yleisin geoenergian hyödyntämismalli on kalliinon porattava noin 200–600 metriin ulottuva energiakaivo. Porauksen jälkeen kaivon lasketaan yleensä U-muotoinen kollektori, jossa virtaa vesi-etanoli-liuos. Muita geoenergian hyödyntämiskäytöksiä ovat lähelle maanpintaa vaakatasoon asennettava maakeruupiiri, vesistöjen pohjavesiin asennetut keruuputkistot, perustuspaaluihin liitetyt keräimet ja pohjavesimuodostumien hyödyntäminen kahdella kaivolla. [1, s. 8–9.]

2.2 Keskisyvä geotermisen energia

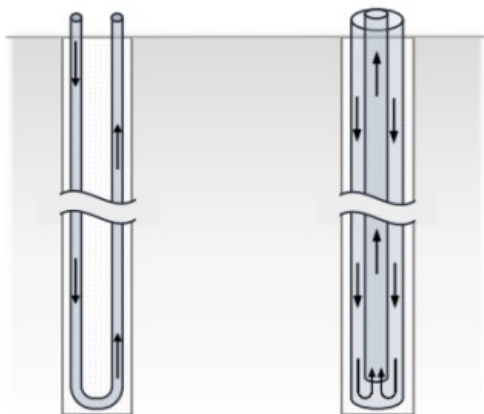
Syvennälle porattaessa, noin 1–3 kilometriin, yhä suurempi osa energiasta on peräisin maan syvyyksissä tapahtuvasta radioaktiivisten aineiden hajoamisesta, sekä maan ytimestä ja vaipasta johtuvasta lämmöstä [2, s. 6]. Tätä energiamuotoa kutsutaan keskisyväksi geotermiseksi energiaksi, johon tämä työ pääosin keskittyy. Kallioperän lämpötilat ovat näissä syvyyksissä jo huomattavasti korkeammat verrattuna perinteisen maalämmön syvyyksiin, sillä maankamaran

lämpötila kasvaa yleensä lineaarisesti syvemmälle mentäessä [3]. Kuvassa 1 on esitetty lämpötilan nouseminen syvyyden kasvaessa.



Kuva 1. Outokummussa mitattu maankamaran lämpötila eri syvyyksissä [3].

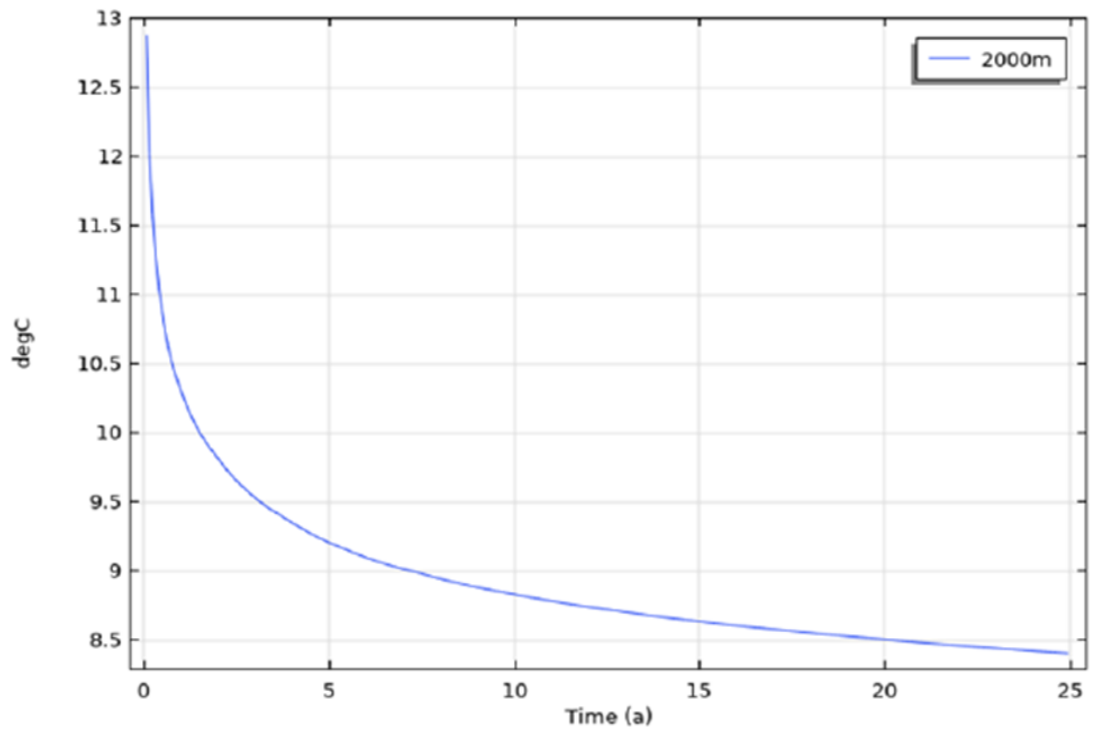
Keskisyvän geolämpökaivon toimintaperiaate on käytännössä sama kuin perinteisissä energiakaivoissa. Keskisyvät kaivot ovat kuitenkin huomattavan syviä, ja niissä käytetään useimmiten U-kollektorin sijasta koaksiaalikollektoria. Kuvasta 2 käyvät ilmi näiden kollektorityyppien eroavaisuudet. Kollektorityypin valintaan vaikuttaa moni seikka, mutta ennen kaikkea valinnalla pyritään varmistamaan mahdollisimman suuri energiansaanti kaivosta.



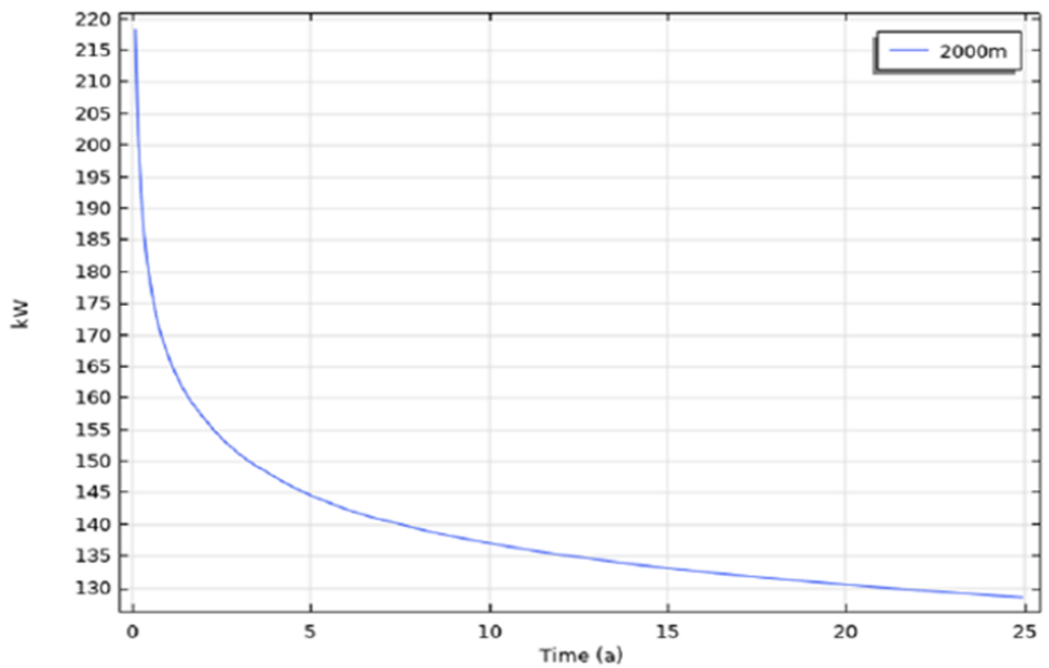
Kuva 2. Kuvassa vasemmalla U-kollektori ja oikealla koaksiaalikollektori [4, s. 14].

Keskisyvistä kaivoista on kiinnostuttu etenkin kaupunkialueilla, joissa rakennukset on rakennettu tiiviisti toisiinsa nähden ja tilaa on vähän. Koska useammasta matalasta kaivosta koostuvan energiakaivokentän rakentaminen ahtaalle tontille on usein haastavaa, pystytään lämmön tuotto korvaamaan yhdellä syvällä kaivolla. Näin ollen kaivot soveltuvat erityisesti Helsingin kaltaiseen urbaaniin ympäristöön. [1, s. 10.]

Keskisyvien kaivojen ollessa uutta teknologiaa ei niiden elinkaaresta ja energiantuotannosta ole vielä pitkäaikaista näyttöä saatavilla. Kaivojen käyttäytymistä pystytään kuitenkin ennustamaan simuloinnin avulla. Kuvissa 3 ja 4 on simuloitu 2 000 metrin syvyistä kaivoa 25 vuoden aikajänteellä. Kyseessä on avoin koaksiaalikollektorirakenne. [5.]



Kuva 3. Kuvasta on havaittavissa kallioperän lämpötilan huomattava lasku ensimmäisen viiden vuoden aikana [5].



Kuva 4. Kaivosta saatava lämpöteho laskee merkittävästi ensimmäisen viiden vuoden aikana [5].

2.3 Tehostettu geoterminen energia Suomessa

Porattaessa 6–10 kilometrin syvyyteen voi kallioperän lämpötila Suomessa nousta yli 100 asteeseen, ja näin kaivossa lämmennyt vesi kelpaa lämmitysjärjestelmään sellaisenaan, eikä lämpöpumppuja tarvita. Tällöin yleisin toteutusmalli on porata kaksi lähes yhtä syvää reikää, joista toisesta kylmä vesi virtaa reiän pohjalle ja toisesta reiästä lämmennyt vesi pumpataan ylös. Tätä tuotantomenetelmää kutsutaan tehostetuksi geotermiseksi systeemiksi (eng. Enhanced Geothermal System, EGS). Tämän menetelmän avulla on mahdollista päästä käsiksi valtaviin energiamääriin. Kansainvälinen uusiutuvaa energiaa edistävä järjestö IRENA on laskelmiensa mukaan arvioinut geotermisten energianvarantojen olevan noin 50 000 kertaa öljyä ja maakaasua suuremmat [6].

Kaivojen välisen riittävän virtauksen saavuttamiseksi on kalliossa esiintyviä luonnollisia rakoja suurennettava ja lisättävä. Yleensä tämä toteutetaan hydraulisella stimuloinnilla eli syöttämällä kaivoon vettä erittäin korkealla paineella. Stimuloinnin seurauksena aiheutuu ns. indusoituja maanjäristyksiä, jotka voivat olla haitallisia lähiympäristölle. [1, s. 42–43.] Rakojen avartaminen on myös mahdollista toteuttaa esimerkiksi happokäsittelyllä [7].

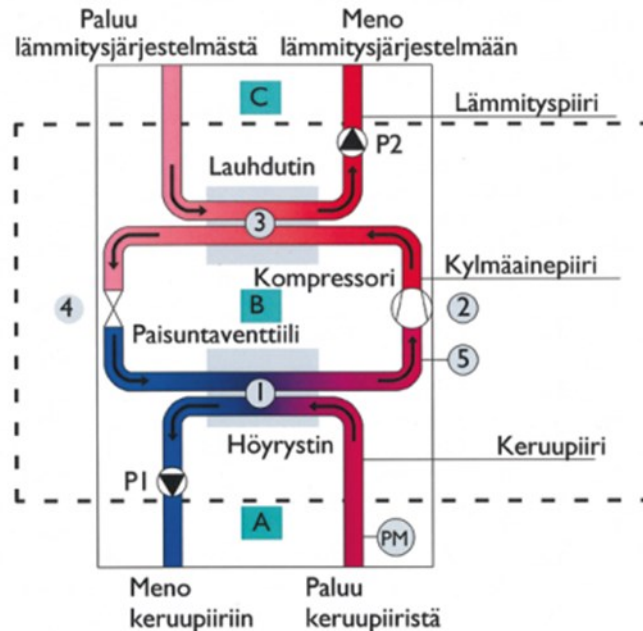
6–10 kilometrin syvyyteen on myös mahdollista porata kahden reiän lisäksi useampia reikiä tai vain yksi reikä. Yhtä syvää reikää hyödyntävä menetelmä on englanniksi nimeltään Deep Geothermal Single Well (DGSW). Sen energiatuotto on huomattavasti maltillisempi kuin EGS-järjestelmillä, joissa lämmönkeuruuneste on kosketuksissa kallion kanssa pidemmän aikaa. DGSW-järjestelmän hyvä puoli on siinä, ettei silloin kallioperää tarvitse stimuloida. Useamman kuin kahden reiän poraaminen on kustannussyistä harvinaista.

3 Lämpöpumpun toiminta ja sen hyötysuhteet

Suomen kallioperässä 1–3 kilometrin syvyydessä oleva lämpötila ei ole tarpeeksi korkea, jotta kaivon lämpöä pystyttäisiin hyödyntämään lämmitykseen

sellaisenaan. Tästä syystä keskisyvä lämpökaivo tarvitsee lämpöpumpun nostamaan kaivosta palaavan nesteen lämpötilaa lämmitysjärjestelmään sopivaksi.

Lämpöpumpun toiminta alkaa sen höyrystimessä, kun lämmönlähteessä lämmentynyt lämmönkeruuneste luovuttaa lämpöä lämpöpumpun kylmäainetta sisältävään piiriin. Lämpenemisen seurauksena kylmäaine alkaa kiehua ja muuttua kaasumaiseksi. Höyrystimeltä kaasuksi muuttunut kylmäaine siirtyy seuraavaksi lämpöpumpun kompressoriin, kun taas lämmönkeruuneste palaa takaisin lämmönlähteeseen lämpenemään. Kompressorissa kaasun puristuessa kasaan sen lämpötila kasvaa jopa yli sataan asteeseen. Kompressorista kaasumainen kylmäaine johdetaan lämpöpumpun lauhduttimeen, jossa se luovuttaa lämpönsä lämmitysverkkoon. Kylmäaineen lämpötilan laskiessa sen olomuoto muuttuu takaisin nesteeksi. Lauhduttimelta nestemäinen kylmäaine johdetaan paisuntaventtiilille, jonka tarkoitus on laskea kylmäaineen painetta ja samalla sen lämpötilaa. Paisuntaventtiililtä kylmäaineen matka jatkuu höyrystimelle ja kierto alkaa alusta. [8.] Kuvassa 5 on esitetty lämpöpumpun toiminta.



Kuva 5. Lämpöpumpun toimintaperiaate [9, s. 12].

Lämpöpumpun toiminta ja prosessi saattavat vaihdella hankekohtaisesti etenkin lämpötilojen, paineiden ja virtausten osalta. Myös lämpöpumpuissa kiertävissä kylmäaineissa on eroja, esimerkiksi kylmäaineen höyrystymislämpötilassa.

3.1 COP

Lämpöpumpun hyötysuhdetta kuvaa sen lämpökerroin eli COP-arvo (Coefficient Of Performance). Tämä arvo kertoo, kuinka paljon lämpöpumppu tuottaa lämpöenergiaa tietyllä hetkellä tietyissä olosuhteissa suhteessa sen käyttämään sähköenergiaan. Esimerkiksi lämpökertoimen ollessa 4 tämä tarkoittaa sitä, että 1 watin sähköenergialla pystytään tuottamaan 4 wattia lämpöenergiaa. Lämpöpumpun lämpökerroin on sitä korkeampi, mitä pienempi on lämpötilaero lämmönlähteen ja lämpöä eteenpäin luovuttavan putkiston välillä. COP-arvon huono puoli on se, että se ei huomio lämmöntarpeen vaihtelua vuodenajoin. Lisäksi lämpöpumpuille ilmoitetut COP-arvot vastaavat yleensä Keski-Euroopan ilmasto- ja lämmitysolosuhteita, joten Suomen ilmastoon nämä arvot ovat liian optimistisia. [10, s. 33.]

3.2 SCOP

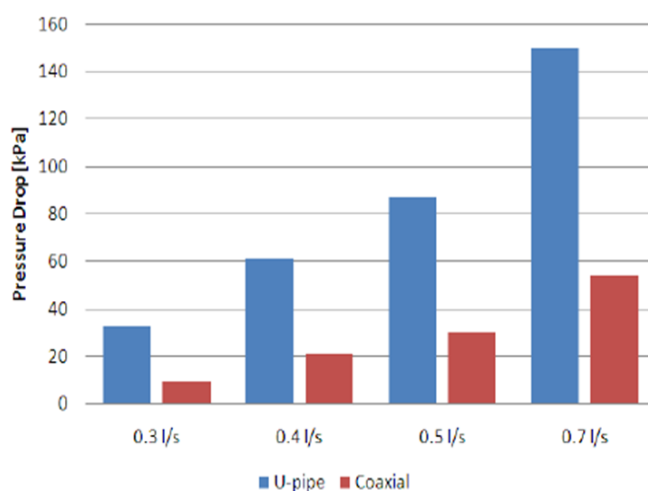
COP-arvoa realistisemmän hyötysuhteen kertoo SCOP (Seasonal COP = Seasonal Coefficient Of Performance) eli vuotuinen lämpökerroin. SCOP-arvossa on huomioitu vuodenaikojen ja lämpötilojen muutosten vaikutus hyötysuhteeseen. Tästä syystä se sopii paremmin vertailukelpoiseksi arvoksi hyötysuhteita tarkasteltaessa. SCOP-arvo on Euroopassa laskettu kolmella eri ilmastovyöhykkeellä: Etelä-Eurooppa (Ateena), Keski-Eurooppa (Strasbourg) ja Pohjois-Eurooppa (Helsinki). [10, s. 33–34.]

4 Kollektoriputki

Keskisyvien geolämpökaivojen kollektoria valittaessa tulee ottaa huomioon monia tekijöitä. Yksi vaikuttava tekijä on lämmön siirtyminen syötetyn ja palaavan

nesteen välillä. Tätä tilannetta kutsutaan termiseksi oikosuluksi. Termisen oikosulun vaikutus kaivosta saatavaan energiaan riippuu virtauksen suuruudesta. Suuremmilla virtausnopeuksilla termisen oikosulun vaikutus vähenee, koska kontakti nesteiden välillä lyhenee. Kaivon käydessä suuremmilla virtausnopeuksilla kaivon tuottoon vaikuttaa enemmän U-putken heikko lämpövastus. Kaivossa U-putken ympärillä sijaitsevalla vedellä on heikko lämmönjohtavuus, jolloin U-putken sijasta koaksiaalisen kollektorin hyödyntäminen keskisyvissä kaivoissa on parempi vaihtoehto. Tulevaisuudessa Suomessa on tarkoitus hyödyntää keskisyviä kaivoja entistä suuremmilla virtausnopeuksilla. Tämän seurauksena kaivoissa voidaan käyttää esimerkiksi muovisia kollektoreja. Muoviset kollektoriputket ovat myös huomattavasti halvempia, ja niiden saatavuus on parempi verrattuna esimerkiksi metallisiin vakuuieristettyihin koaksiaalikollektoreihin. [11.]

Toinen huomioon otettava seikka kollektorin valinnassa on U-putkissa tapahtuva painehäviön nousu virtausnopeuksien kasvaessa. Asia ilmenee kuvassa 6. Painehäviön kasvaessa U-putkessa liian suureksi tulisi tällöin putken halkaisijaa kasvattaa saadakseen pidettyä painehäviöä kurissa. Toisin kuin U-putki, koaksiaaliputki hyödyntää porareistä suuremman poikkipinta-alan virtauksen maksimoimiseksi ja soveltuu täten paremmin suuremmille virtausnopeuksille. [4, s. 17.]

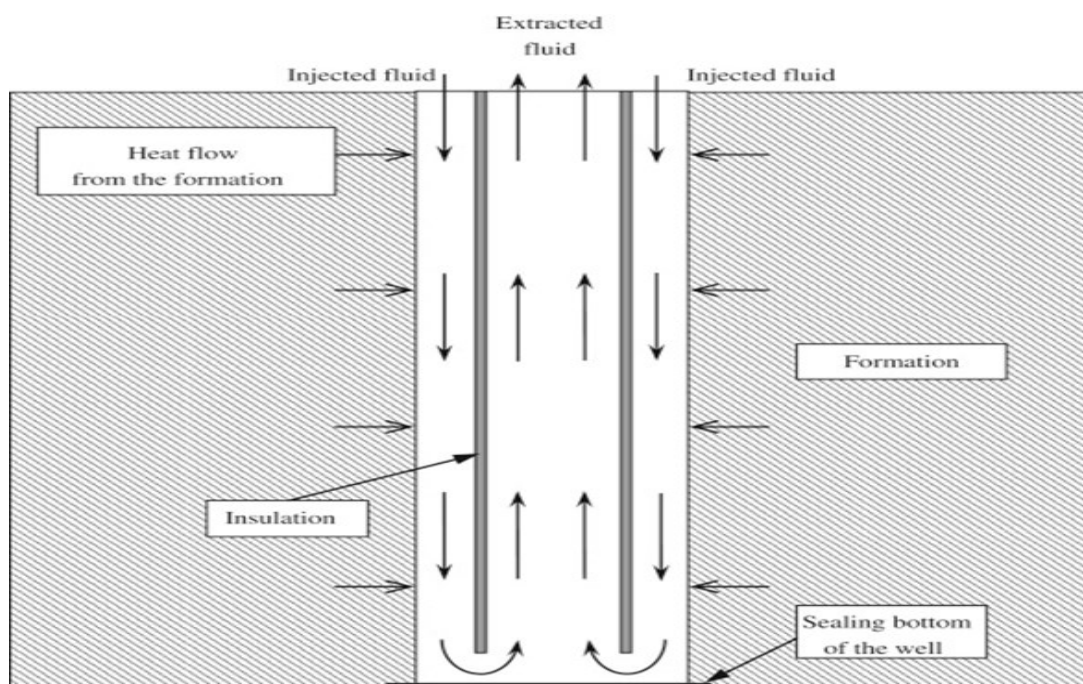


Kuva 6. U-putken ja koaksiaaliputken painehäviön nousu virtausnopeuden kasvaessa [4, s.17].

4.1 Koaksiaalikollektori

Vaikka Suomessa teräksiset koaksiaalikollektorit ovat jäämässä historiaan, tutkitaan tässä työssä niiden soveltuvuutta keskisyvissä geolämpökaivoissa [11]. Koaksiaalikollektorin toiminta perustuu siihen, että porattuun kaivoon asennetaan putki, jonka ulkopuolella virtaa kaivoon menevä neste. Kaivossa lämpöä keräävä neste pumpataan putken sisäpuolta pitkin ylös. Termisen oikosulun välttämiseksi putkella tulee olla hyvä eristävyys etenkin pienemmillä virtausnopeuksilla. [4, s. 17.]

Kuvassa 7 on esitetty koaksiaaliputki avoimessa järjestelmässä. Tällöin lämmönkeruuneste on kosketuksissa kallioon. Järjestelmä voi myös olla suljettu, jolloin kaivo casingputkitetaan koko matkalta ja sen seurauksena lämmönkeruuneste ei ole kontaktissa kallioon. [12.] Suljettu järjestelmä mahdollistaa kaivon hyödyntämisen suuremmilla virtausnopeuksilla. Jos avoimessa järjestelmässä virtaus kasvaa liian suureksi, on mahdollista, että lämmönkeruuneste tunkeutuu kalliossa sijaitseviin rakoihin ja seisminen riski kasvaa. Lämmönkeruunesteen menetyksen seurauksena kaivon toiminta heikkenee. [11.]



Kuva 7. Koaksiaaliputken toimintaperiaate kuvattuna avoimessa järjestelmässä [13, s. 250].

4.1.1 Kaksinkertainen teräs koaksiaaliputki, jossa on eristävä fluidi

Yksi kollektoriratkaisu on kaksinkertainen teräksinen koaksiaaliputki, jossa on tarkoitus jättää rengasmaisen välitila kahden putken väliin. Tämä tila toimii eristeenä, kun se täytetään lämmöneristefluidilla. Putken välitilan lämmöneristeenä voidaan käyttää esimerkiksi kaasumaisessa olomuodossa olevaa ilmaa tai typpeä. Typen lämmönjohtavuus vaihtelee 0,025–0,032 W/(mK) lämpötiloissa 0–100 °C. [14, s. 60.]

Edellä esitellyn putkistoratkaisun huonoja puolia ovat sen porauskalustolle asettamat vaatimukset. Kaksinkertaisen teräksisen koaksiaaliputken asennus vaatii porauskalustolta nostolaitteen korkeaa nostokapasiteettia ja soveltuvuutta keskittää putki siten, että se on vakaa kaivon sisällä. Kaksikerroksisen putken asennuksessa korkean painon lisäksi haasteena on rengasmaisen välitilan täyttäminen lämmöneristävällä fluidilla. Huomionarvoista on se, että investointikulujen minimoimiseksi voi harkita poraustankojen hyödyntämistä käyttämällä ne putken toisena kerroksena, mikäli se on mahdollista. [14, s. 60.]

4.1.2 Koaksiaalinen putki lämmöneristekerroksella

Sisempänä koaksiaaliputkena voidaan käyttää poraustankoja, joiden pinnalle asetetaan lämmöneriste. Yleensä eristeenä toimii polyuretaanivahto tai sitä vastaava aine, jolla on hyvä eristysominaisuus. Eristeen asennukselle on monia eri vaihtoehtoja. Yksi vaihtoehtoista on eristää putket polyuretaanivaahdolla samalla tavalla, kuin kaukolämpöverkon putket eristetään. Tämä vaihtoehto vaatii putkien toimittamisen kyseistä eristeratkaisua tarjoavalle toimijalle. Eristeen asennuksen jälkeen putket tulee pinnoittaa, jolla estetään lämmönkeruunesteen tunkeutuminen itse lämmöneristeeseen. Polyuretaanieristeen asennus tapahtuu kahdessa osassa. Ensiksi vahto asennetaan putken ympärille tehtaalla. Toinen vaihe suoritetaan putken kaivon asentamisen yhteydessä, jolloin kierrellitokset eristetään. Yksi tapa hoitaa liitosten eristäminen on käyttää tiivistä kumista pantaa, jossa asennuksen jälkeen pantaan porataan pieni reikä, josta polyuretaanivahto voidaan injektoida. Vaahdon injektoinnin jälkeen porattu reikä

tulee tilkitä. Tämä menetelmä takaa varman tavan eristää putkien liitokset. Liitosten eristäminen on myös mahdollista tehdä muilla toimenpiteillä, esimerkiksi hyödyntämällä esivalmistettuja polyuretaanivaahtoelementtejä liitoskohtiin. Molemmissa edellä mainituissa menetelmissä tulee käyttää suojaavaa (polymeeri) ulkoputkea. [14, s. 61–62.]

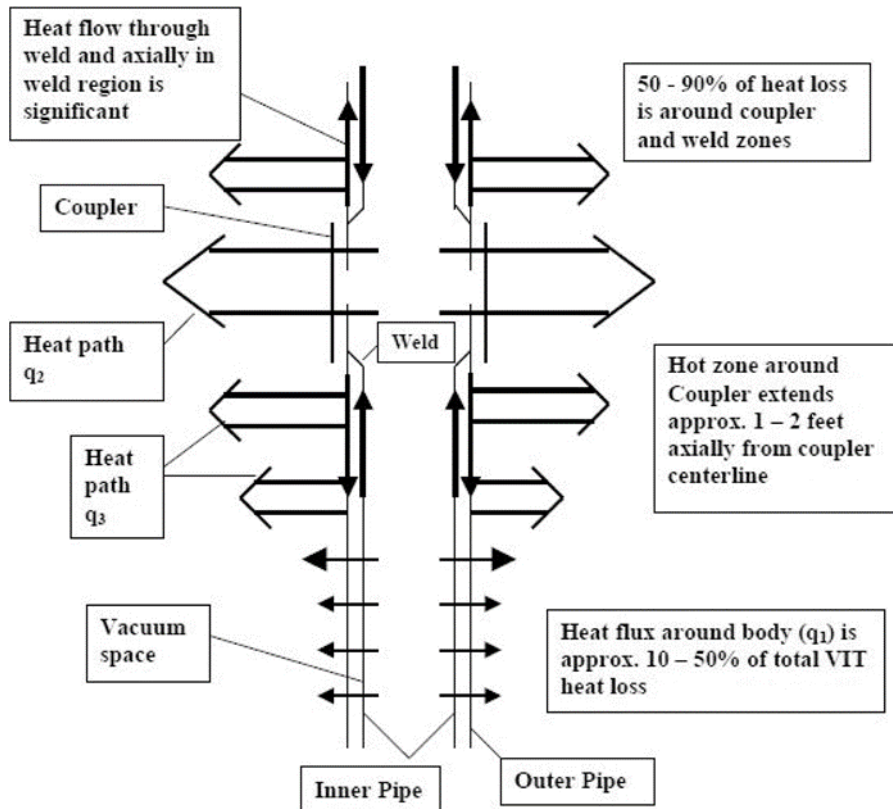
Tämä menetelmä soveltuu ainoastaan noin 500 metriä syviin energiakaivoihin. Syvemmällä olevissa kaivossa ulkopuolinen paine kasvaa liian korkeaksi, ja tästä syystä eristeratkaisuksi tulee tutkia erilaisia suuremman tiheyden omaavia vaahtomuovimateriaaleja. Tulevaisuudessa tämä voi mahdollistaa kyseisen putkitusratkaisun hyödyntämisen myös syvemmissä kaivoissa. [14, s. 62.]

Tämän putkitusratkaisun huonoja puolia ovat korkeat kustannukset, jotka aiheutuvat putkien toimittamisesta eristettäväksi ja mutkikkaasta sekä aikaa vievästä asennusprosessista. Putken laskeminen kaivoon ja mahdolliset vauriot nostettaessa putkea ylös kaivosta heikentävät ratkaisun toteuttamiskelpoisuutta. Näitä haasteita pystytään torjumaan käyttämällä ”suojaputkena” poratankoja, joissa on suurempi halkaisija. Tämä voi kuitenkin edellyttää vielä entistäkin haastavimpia toimintatapoja putken alas laskun yhteydessä. Tämän kollektoriratkaisun hyviä puolia puolestaan ovat sen matala paino kaivossa vallitsevan nosteen ansiosta ja erinomainen eristävyys. Polyuretaanivaahtoratkaisulla lämmönjohtavuus on $0,024 \text{ W/(m K)}$. [14, s. 62.]

4.1.3 Vakuumieristetty koaksiaaliputki

Vakuumieristetty koaksiaaliputki koostuu kahdesta eri putkesta, joiden väliin tehdään tyhjiö. Ilma poistetaan putkien välistä valmistusvaiheessa hyödyntämällä vakuumpumppua. Kun tyhjiö on saavutettu, putket sinetöidään ja hitsataan. Tällä menetelmällä saadaan luotua erittäin korkea eristävyys ja näin minimoidaan lämmön siirtyminen virtaavien nesteiden välillä. [14, s. 63.]

Vakuumieristetyissäkin putkissa tapahtuu lämpöhäviötä. Se tapahtuu kolmella eri tavalla, joko säteilemällä vakuumiselta putkiosuudelta tai putkien liitoskohdista tai konvektion ja konduktion välityksellä putken hitsaussaumoista. Kuvassa 8 on kuvattu tarkemmin kohdat, joissa lämpöhäviötä ilmenee. Etenkin putkien liitoskohdissa syntyvä lämpöhäviö on merkittävä. [14, s. 63.]

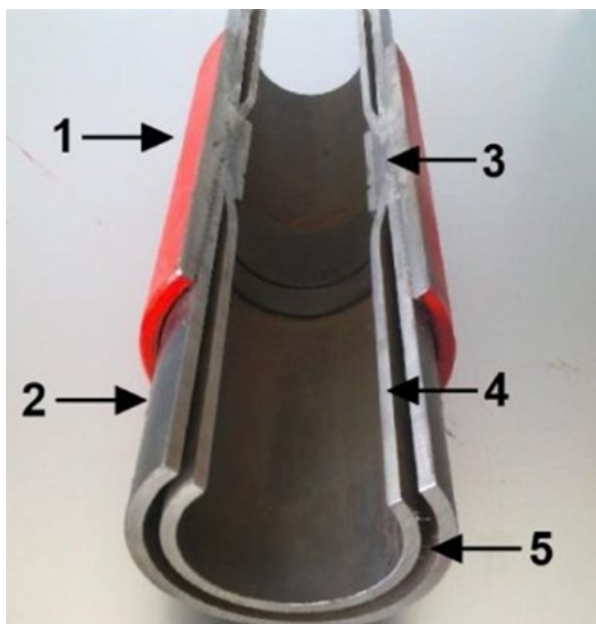


Kuva 8. Kuvassa osoitettu kohdat, joissa lämpöhäviötä tapahtuu [14, s. 63].

Olenainen osa vakuumieristeisissä putkissa on niissä käytettävä getter-materiaali. Tämä höyrystymätön getter-materiaali sijaitsee putkien väliin muodostetussa tyhjiössä, jossa sen tehtävä on poistaa metallien pinnoilta muodostuvia kaasuja. Getter-materiaalin tarkoitus on pitää putkien välinen tyhjiö hyvälaatuisena. [14, s. 63.]

Vakuumiputkien yhdistäminen tapahtuu muhviiliitoksella, jossa on kierteet. Liitokseen sisältyy sisäinen liitoseriste, itse muhvi ja o-rengas (kuva 9). Sisemmän putken pinta on lisäksi päällystetty useammalla eristekerroksella ja alumiinifoliolla. Kun putkien välistä ilma on poistettu, putket testataan. Yksi tärkeimmistä

testeistä on lämmönläpäisykertoimen eli U-arvon testaus. Vakuumieristeiselle putkelle ei ole yhtä tarkkaa lämmönjohtavuusarvoa, sillä tähän arvoon vaikuttaa moni seikka. Vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi putken geometrinen muoto, lämmönkeruunesteen tyyppi ja liitosten eristävyys. [14, s. 64.]



Kuva 9. Vakuumieristetyin koaksiaaliputken eri kerrokset kuvattuna. (1. muovi, 2. ulompi koaksiaaliputki (esim. L80), 3. sisäinen liitoseriste ja hitsisauma, 4. sisempi koaksiaaliputki (esim. 13CR85), 5. putkien välinen tyhjiö sekä getter-materiaali) [14, s. 64].

Vakuumieristetyin koaksiaaliputken ulompana putkimateriaalina käytetään useimmiten L80 tyyppin terästä. Sisemmän putken materiaalina käytetään kromiseosterästä, kuten 13CR85, 13CR95 ja 13CR110. Kromiseosta hyödyntämällä saadaan parempi korroosionkestävyys. [14, s. 64.]

5 Poraustekniikat ja kaivon viimeistely

Geotermisten lämpökaivojen porauksessa on mahdollista käyttää kierto-
porausta, perkussiota (poravasarointi) tai lämpöä hyödyntäviä teknologioita. [15, s. 10]. Suomen keskisyvissä geotermisissä lämpökaivohankkeissa on hyödynnetty joko kierto-
porausta- tai perkussiotekniikkaa. Lämpöä hyödyntävät teknologiat, kuten plasmatekniikka, ovat vasta kehitysvaiheessa. Uusia porausteknologioita

kehitetään jatkuvasti kustannustehokkuuden kasvattamiseksi, sillä juuri porauksesta aiheutuvat kustannukset ovat merkittävässä roolissa hankkeen kokonaiskustannuksia tarkasteltaessa. Porauksesta aiheutuvia kustannuksia ovat esimerkiksi poranterät ja niiden vaihtaminen, joka vie huomattavasti aikaa syvemmälle porattaessa.

5.1 Kiertoporaustekniikka

Kyseinen tekniikka perustuu maan pinnalla tuotettuun energiaan, joka johdetaan poratankojen kautta reiän pohjalle pyörimisliikettä hyödyntäen. Kiertoporausta voidaan hyödyntää monissa eri kalliotyypeissä valitsemalla optimaalinen poranterä. Poranteriä on useita erilaisia, mutta kaksi suosituinta mallia ovat roller-cone-terä ja drag-terä (kuva 10). Drag-terän hyvä puoli on se, ettei siinä ole liikkuvia osia verrattuna roller-cone-terään. ROP-arvoa ja terien käyttöikää tarkasteltaessa, roller-cone-terä soveltuu paremmin koviin kallioihin ja drag-terä taas pehmeisiin sedimenttikivi muodostumiin. [16, s. 120.] Kiertoporausta on hyödynnetty pisimpään, ja se on tunnettu tekniikka ympäri maailmaa. Sen toimivuudesta on paljon näyttöä, ja siksi se on luotettava menetelmä kaivojen poraukseen. Lisäksi kiertoporaus soveltuu erinomaisesti pehmeämpiin kallioperiin, ja tästä syystä se sopii erityisesti Keski-Euroopan geotermisten kaivojen porausmenetelmäksi. [15, s. 10.]



Kuva 10. Esimerkki kahdesta Roller-cone-terästä ja kahdesta drag-terästä [16, s. 121].

5.1.1 Porausfluidit

Optimaalisen porausfluidin hyödyntäminen porauksessa on tärkeää. Porausfluidin yksi tehtävistä on kiertää kaivossa ja nostaa porauksesta syntyvä porausjäännös maanpinnalle. Yleensä fluidi pumpataan alas porareikään poraustankojen sisällä, ja sen jälkeen se ruiskuaa poranterän rei'istä samalla irrottaen porausjäännöksen kaivon pohjalta. Tästä se jatkaa matkaansa kohti maanpintaa poratankojen ja kaivon seinämän välisessä tilassa. Maanpinnalla porausfluidista erotellaan porausjäännös. Tämän jälkeen fluidi jäähtyy, ja sen ominaisuuksia säädetään tarvittaessa, jotta se voidaan syöttää kaivoon uudelleen. Porausfluidin muita tärkeitä tehtäviä ovat poranterän viilentäminen ja sen voiteleminen, joilla estetään terän ylikuumentuminen ja näin sen käyttöikä pitenee. [16, s. 123.] Lisäksi porausfluidin käyttö laskee kaivon sortumisen riskiä porauksen yhteydessä [7].

Yleisesti ottaen kaikki kaasut tai nesteet soveltuvat tähän tehtävään. Porausfluidit voidaan kuitenkin jakaa kolmeen kategoriaan, jotka ovat vesi-, öljy- ja kaasupohjaiset porausfluidit. Usein käytetty vesipohjainen porausfluidi on veden ja mudan seos. [16, s. 123.]

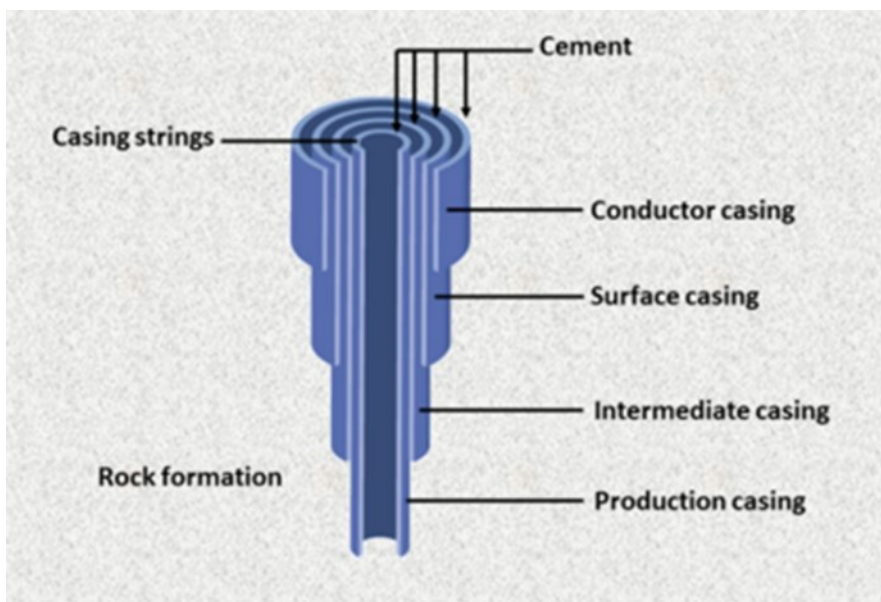
Mikäli porattavassa kalliossa ilmenee paljon ruhjeita tai murtumia, tulee se huomioida porausfluideissa. Fluideihin on mahdollista lisätä lisäaineita, jolla estetään sen tunkeutuminen kallion rakovyöhykkeisiin. Menetetystä porausfluidista on taloudellista haittaa, ja lisäksi se voi aiheuttaa paineen laskun kaivossa ja täten saattaa kaivo epävakaiseen tilaan. [16, s. 124.]

5.1.2 Kaivon casingputkitus ja sementointi

Casingputkituksen tarkoitus on suojata kaivoa porauksen edetessä sekä sen tuotantovaiheessa. Casingputkituksen tärkeimmät tehtävät ovat estää pohjavesien saastuminen, porausfluidien menetys ja sen seurauksena seisminen riski, kaivon romahtaminen ja ns. kaasuräjähdykset (eng. blowout). Casing koostuu useasta metallisesta putkesta, jonka halkaisija pienenee portaittain syvemmälle

mentäessä (kuva 11). Casingputken ja kaivon seinämän välinen tila sementoidaan, millä varmistetaan putken riittävä tuenta ja estetään kalliosta esiintyvien korroosiota aiheuttavien nesteiden pääsy putken ulkopinnalle. Kun casing on asennettu ja onnistuneesti sementoitu, poraamista jatketaan aina pienemmällä terällä. Tällä estetään putkituksen vaurioituminen. Tästä syystä jokaisen casingosuuden jälkeen kaivon halkaisija pienenee. [16, s. 124–125.]

Casingputkituksen syvyyteen ja täten putkien määrään vaikuttavat monet tekijät, kuten kallion vakaus ja sen geologiset piirteet. Sedimenttikivimuodostumissa casing on usein tärkeämpi kuin kovassa kiteisessä kalliosta. Casingputkituksen syvyydellä on merkittävä rooli kokonaiskustannuksissa, sillä putkitus on kallis ja aikaa vievä prosessi. [16, s. 125–126.]



Kuva 11. Esimerkki porakaivosta, jossa useampi casingkerros [16, s. 125].

5.2 Ilmavasaratekniikka

Ilmavasaratekniikka on perkussioon perustuva porausmenetelmä. Ilmavasaratekniikka perustuu paineilmalla tuotettuun pystysuuntaiseen voimaan, joka ohjataan kaivon pohjalle poravasaraan. Poravasaraassa sijaitsee mäntä, joka lyö po-

rakruunua ja näin sirpaloittaa kalliota. Ilmavasaratekniikalla on saavutettu lupavia ROP-arvoja varsinkin kovassa graniittisessa kalliossa. Ilmavasaratekniikka on tehokkaampi porausmenetelmä kuin perinteinen kiertoporaus. Ilmavasaratekniikan huonona puolena on sen soveltumattomuus käytettäväksi tiheiden porausfluidien kanssa. Tällöin poran vasaratekniikka ei toimi kunnolla, ja se ei pysty nostamaan porausjäännöstä tarpeeksi tehokkaasti syviä kaivoja porattaessa. [16, s. 142–143.]

ST1:n porakaivo hankkeissa ilmavasaratekniikalla porattaessa porausfluidista käytetään termiä poravaahto. Poravaahdolla on osittain samat tehtävät kuin porausfluidilla, joista tärkeimmät ovat kallion pintajännityksen laukaiseminen ja porausjäännöksen toimittaminen maanpinnalle. Poravaahdot ovat yleensä saippuapohjaisia seoksia. [12.]

Ilmavasaratekniikassa ilmenevät ongelmat liittyvät laitteiston mekaaniseen kestävyyskykyyn. Syvemmälle porattaessa painehäviö kasvaa pakottaen näin nostamaan painetta entisestään. Tämän seurauksena erittäin korkealla paineella tuotetut iskut metalliosien välillä aiheuttavat kulumista ja pitkällä aikavälillä rikkovat laitteistoa. [12.]

5.3 Vesivasaratekniikka

Toinen perkussioon perustuva porausmenetelmä on vesivasaratekniikka. Tässä vesi, ilman sijaan, siirtää energian kaivon pohjalle. Toimintaperiaate on sama kuin ilmavasaratekniikassa. Vesivasaralla voidaan kuitenkin saavuttaa jopa kaksinkertainen tehon tuotto ilmavasaraan verrattuna. Toisin kuin ilmavasaralla, vesivasaralla ei teoreettisesti ole rajoitteita kaivon syvyyden suhteen ja tällä menetelmällä onkin porattu jopa 4 300 metrin syvyyteen. Vesivasaratekniikka on myös energiaystävällisempi, johtuen ilmavasaratekniikan vaatimista kompresso-reista ja niiden energiankulutuksesta. Energian siirtäminen hydraulisesti veden avulla voi vähentää polttoaineen kulutuksen jopa alle kolmannekseen. Vesivasaratekniikka vaatii toimiakseen suuria määriä puhdasta vettä, joten veden kier-

rättäminen on suositeltavaa. Mikäli vesi halutaan kierrättää, joudutaan se ohjaamaan erillisen puhdistusjärjestelmän läpi. [17.] Vesivasaratekniikassa ongelmat liittyvät ilmavasaratekniikan tavoin mekaaniseen kestävyYTEEN. Vesivasaratekniikassa iskujen välissä metalliosien väliin kulkeutuva vesi on haitallista aiheuttaen laitteiston kulumista ja hajoamista. [12.]

Vesivasaratekniikkaa käytetään Tampereella käynnissä olevassa geotermisessä lämpökaivohankkeessa. Tekniikka soveltuu hyvin Suomeen, sillä Suomen kova graniittinen kallioperä kestää hakkaavaan liikkeeseen perustuvan porausmenetelmän paremmin kuin Euroopan tyypillinen hiekkakivi. [18.]

5.4 Sähkön hyödyntäminen porauksessa

Sähkövirran hyödyntäminen porauksessa on kehitysvaiheessa oleva porausteknologia. Sähköä hyödyntävät poraustekniikat kuluttavat huomattavasti vähemmän energiaa verrattuna muihin aiemmin mainittuihin menetelmiin. Siksi monet toimijat ovat kiinnostuneita sen kehittämistä ja saattamisesta kaupalliseen käyttöön. Toiminta perustuu ”poranterään”, joka syöttää mikrosekunteja kestäviä korkeajännitteisiä pulsseja elektrodeihin, jotka ovat joko kontaktissa tai lähellä kontaktia kallioon nähden. Elektrodit ja kallio ovat yleensä nestemäisen, yleensä veden, sähköeristeen ympäröimänä. Korkeajännitteinen pulssi elektrodien välillä aiheuttaa läpilyönnin, joka aiheuttaa kallion pirstoutumisen. [19, luku 1.]

Plasmatekniikka (eng. Plasma Channel Drilling (PCD)) on yksi sähkövirtaa hyödyntävistä porausteknologioista. Se hyödyntää lyhytkestoisia pulssin nousuajoja, jolloin läpilyöntikentän vahvuus kasvaa nopeammin vedessä kuin kalliolla. Tämän seurauksena läpilyönti tapahtuu kalliossa, eikä sähköeristeessä (vesi) rikkoen näin kiviainesta. [19, luku 1.]

GA Drilling on slovakialainen yritys, joka kehittää plasman hyödyntämiseen perustuvaa porausteknologiaa. Yrityksen kehittämän PLASMABIT®:n on tarkoitus muuttaa syvän kaivon porauskustannukset kasvamaan lineaarisesti porauksen

edetessä. Tämä perustuu siihen, että porausnopeus ei hidastu kovemmissakaan kallioissa. Tähän asti porauskustannukset ovat kasvaneet enemmän eksponentiaalisesti syvemmissä kaivoissa. Tämän teknologian hyvä puoli on siinä, ettei ”poranterä” vaadi kosketusta kallioon ja täten mekaanista kulumista ei juuri tapahdu. Tämän seurauksena porauksesta jää pois esimerkiksi porakruunujen vaihtaminen, joka on kallis ja aikaa vievä toimenpide. [20.]

6 Keskisyvien geotermisten lämpökaivojen porauksen ympäristönäkökulma ja siihen liittyvä lainsäädäntö

6.1 Ympäristön puolesta huomioon otettavia tekijöitä

Keskisyvien ja matalien porakaivojen porauksessa ei ole suuria eroavaisuuksia. Ero on lähinnä porauskalustossa, joka on syvemmälle porattaessa järeämpää. Poraukseen tarvittava tila on vähäinen, eikä meluhaittoja synny enempää verrattuna tavalliseen poraus- tai rakennustyömaahan. [21, s. 3.]

Kaivojen porauksessa on kiinnitettävä huomiota reikien pystysuoruuteen sekä yhdensuuntaisuuteen. On huolehdittava, etteivät porareiät taivu muiden kaivojen vaikutusalueelle, sekä varmistettava se, että reiät pysyvät tontin rajojen sisäpuolella. Matalissa lämpökaivoissa on usein havaittu suuriakin taipumia, koska taipuman estämiseksi ei ole määrätty toimenpiteitä. [21, s. 3.]

Geologisten olosuhteiden vaihtelevuus tuo haasteita keskisyvän geotermisen lämpökaivon poraukseen. Etelä-Suomessa kallioperä muodostuu pääasiassa kovista gneisseistä, granitoideista ja liuskeista. Kalliossa voi esiintyä heikkousvyöhykkeitä, jotka mahdollisesti hankaloittavat ja hidastavat reiän poraamista sekä voivat vaatia reiän lujittamista ja pahimmassa tapauksessa heikkousvyöhykkeessä voi esiintyä indusoitua seismisyyttä. Porareiässä esiintyvät vettä hyvin johtavat rako- ja ruhjevyyhykkeet on syytä tunnistaa ja tiivistää. Mikäli nämä vettä johtavat rakenteet jäävät huomioimatta, pääsee lämmönkeruuneste vuotamaan kallioon heikentäen lämmöntalteenottoa, ja pahimmassa tapauk-

sessä lämmönkeruuneste voi indusoida seismisyyttä. Tällaiset rakenteet voidaan tiivistää esim. sementoinnilla. Kovuudesta huolimatta Etelä-Suomen kallioperässä esiintyy vilkasta koostumus- ja rakennevaihtelua, joka aiheuttaa porauksen edetessä muuttuvia tilanteita. [21, s. 3.]

Porauksen yhteydessä syntyvä kivimurska tulee hävittää toimittamalla se esimerkiksi kunnan jätehuoltoon. Perinteisistä kivilajeista, kuten gneissistä ja graniitista, ei yleensä aiheudu ympäristöhaittaa. Mikäli kivimurskassa havaitaan rikkipitoisia yhdisteitä (kiisumineraaleja), tämä tulee ottaa huomioon murskan käsittelyssä. [21, s. 3.]

Alueilla, joissa hyödynnetään pohjavettä joko irtomaakerroksista tai kallioperästä, tulee poraus suorittaa siten, ettei kaivossa tapahtuva virtaus pääse sekoittumaan pohjaveteen. Ongelma ratkaistaan asentamalla casingputkitus riittävän syvälle. Syvyyteen vaikuttavat paikalliset geologiset olosuhteet. [21, s. 3.]

Irtomaakerroksissa esiintyvät pohjavesimuodostumat esiintyvät korkeintaan muutaman kymmenen metrin syvyydellä. Kalliopohjavettä on mahdollista hyödyntää syvemmältäkin, mutta sen käyttöä rajoittaa veden muuttuminen suolaiseksi 300–600 metrin syvyydessä. Syvällä kallioperässä esiintyvällä pohjavedellä on korkea suolapitoisuus, ja mikäli sitä sekoittuu merkittävässä määrin lämmönkeruunesteeseen, tämä saattaa aiheuttaa putkiston korroosio-ongelmia. Veden korkea suolapitoisuus voi edellyttää erikoisementtien käyttöä rakojen tiivistämiseksi. [21, s. 3.]

6.2 Lupakäytännöt

Kaivojen rakentaminen vaatii joko toimenpide- tai rakennusluvan, jonka kunnan rakennusvalvontaviranomainen käsittelee ja myöntää. Hanketta suunniteltaessa on myös huomioitava, onko kunnan rakennusjärjestyksessä tai asema- ja yleiskaavoissa määräyksiä energiakaivojen rakentamisesta. Kaavoissa saatetaan velvoittaa liittyminen kaava-alueilla sijaitsevaan kaukolämpöverkkoon ja täten

käytännössä poissulkea geoenergian hyödyntämisen mahdollisuus. On kuitenkin mahdollista, että kunta voi myöntää MRL:n (maankäyttö- ja rakennuslaki) mukaisen luvan poiketa kyseisestä kaavasta, mikäli tietyt ehdot täyttyvät. Ympäristöministeriö on vuonna 2019 julkaissut selvityksen *Selvitys geotermisen energian syväreikäporaamisesta, siihen liittyvistä ympäristönäkökohdista sekä riskienhallinnasta*. Siinä annetaan suosituksia esimerkiksi syvien energiakaivojen seismiseen monitorointiin ja sitä koskevaan päätöksentekoon. Energiakaivoilla on seisminen riski, mikäli lämmönkeruuneste on kosketuksissa kallioperään. Yksittäisillä kaivoilla seisminen riski on pieni, koska lämmönkeruuneste virtaa kohti kaivoa eikä siitä pois päin. Pieniä nk. indusoituja maanjäristyksiä on kuitenkin mahdollista syntyä, jos lämmönkeruuneste pääsee virtaamaan kaivoa ympäröivän kallion rakoihin. Syvemmälle mentäessä voi indusoitua suurempia maanjäristyksiä ja siksi tämä ongelma ilmeneekin yleensä tehostetuissa geotermisissä lämpölaitoksissa. Luvan myöntämisen yhteydessä mahdolliset ympäristöriskit tarkastellaan hankekohtaisesti. Riskien minimoimiseksi, luvassa voidaan erikseen asettaa vaatimuksia esim. porauspölyn ja porausvesien käsittelylle, porareian suunnalle ja ulottuvuudelle sekä porauksen ajankohdille. [1, s. 13–14.]

Lupaviranomaisten linja matalien energiakaivojen rakentamisesta pohjavesialueille on tiukentunut vuosien saatossa, eikä lupia ole enää myönnetty. Vielä ei ole kuitenkaan haettu toimenpidelupaa keskisyvän geotermisen lämpökaivon poraamisesta pohjavesialueelle, joten on vaikea arvioida, millaiseksi lupakäytäntö muotoutuu. [1, s. 13–14.]

Helsingin Koskelassa oli tarkoitus edistää syvälämpöteknologian hyödyntämistä alueratkaisuna korttelitasolla. Tämä hanke ei kuitenkaan toteutunut, mutta projektin myötä perehdyttiin Helsingin luvituskäytäntöihin 1 000–2 000 metrin kaivoissa. Hanketta varten Quantitative Heat Oy (QHeat) ja Geologian tutkimuskeskus (GTK) laativat simulaatiot kaivojen pitkäaikaisesta keskinäisvaikutuksesta toisiinsa. Tällä pystyttiin osoittamaan, että syvemmät kaivot ovat täysin vertailukelpoisia matalien 0–300 metriä syvien kaivojen kanssa. Simulaatiot

osoittivat, että kaivon etäisyyden ollessa yli 70 metriä toiseen kaivoon on vaikutus merkityksetön alle 1 000 vuoden tarkastelujaksolla. Kaivon välien ollessa 30 metriä ne eivät häiritse toisiaan alle 100 vuoden jaksolla. Näiden tulosten pohjalta todettiin syvempien kaivojen luvituskäytäntöjen olevan samanlaiset kuin matalissa kaivoissa. Kaivon lupa voi olla joko osana perinteistä rakennuslupaprosessia tai omalla toimenpideluvalla. Espoossa luvituskäytännöt ovat samankaltaisia keskisyvien kaivojen osalta. [22.]

7 Lämmön varastointi

Keskisyvät geolämpökaivot mahdollistavat niiden lataamisen kesäaikaan, kun energian tarve on vähäistä. Lataamisella tai lämmön varastoinnilla tarkoitetaan sitä, että kaivoon johdetaan kallioperää korkeampaa lämpöä. Näin kaivon käyttöikä kasvaa ja energian saanti käyttöjaksoilla paranee. Lataamisessa voidaan hyödyntää esimerkiksi kiinteistön jäähdytyksestä kesällä syntyvää lauhdelämpöä tai kaukolämpölaitoksen ylijäämälämpöä. Edellä mainitut ratkaisut eroavat kuitenkin huomattavasti toisistaan toteutuksen ja saavutetun hyödyn suhteen. Kaukolämpölaitoksen ylijäämälämpöä hyödynnettäessä pystytään kesällä varmaan suuria määriä lämpöenergiaa maahan useaa kaivoa hyödyntäen ja purkamaan sitä akun lailla talven kulutushuippuina. Lauhdelämpöä hyödynnettäessä voidaan kaivon lämmöntuottoa parantaa pienissä määrin käyttöjaksoilla. [10.] Näistä kahdesta varastointitavasta ja niiden toiminnasta yksityiskohtaisemmin on kerrottu luvuissa 7.1 ja 7.2.

Lämmön varastointi onnistuu myös perinteisissä energiakaivoissa ja maalämpöratkaisuissa, mutta tällöin mittasuhteet ovat huomattavasti pienemmät. Keski-syvän ja perinteisen maalämpökaivon latauksessa on myös teknisiä eroja, jotka johtuvat kaivojen eri syvyyksistä ja lämpötilatasoista. [1, s. 10.]

Kaivoissa, joissa käytetään koaksiaalikollektoria, virtaus on latauksessa päinvastainen kuin kaivoa purettaessa. Latauksessa lämmönkeruuneste virtaa kaivon pohjalle putken sisäpuolella ja palaa maan pinnalle putken ulkopuolella. Näin ollen lämpöä saadaan johdettua paremmin kallioon. [11.]

7.1 Kaivojen lataus kaukolämpölaitosta hyödyntäen

Keskisyviin geolämpökaivoihin on mahdollista varastoida energiaa hyödyntämällä kaukolämpölaitoksen kesällä tuottamaa ylijäämälämpöä. Tämä edellyttää sitä, että kaivot sijaitsevat laitoksen läheisyydessä. Näin saatu lämpöenergia olisi ilmaista, mikä lisää varastoinnin kannattavuutta. Varastoinnin kannattavuuden maksimoimiseksi tulisi rakentaa yhden kaivon sijasta energiakaivokenttä, joka koostuu useammasta yksittäisestä kaivosta. Kaivojen sijoittelulla on suuri vaikutus lämmön varastoinnin potentiaaliin, jotta kaivoa kohden syntyvä lämpöhäviö pystytään minimoimaan. Kaivojen suunnittelussa ja sijainnin valinnassa tulee ottaa huomioon myös kallion lämmönjohtavuus. Suurella lämmönjohtavuudella pystytään kaivoon varastoimaan nopeasti energiaa, mutta tällöin myös varastoitu energia pyrkii ”karkaamaan” pois päin kaivosta. [11.]

7.2 Kaivojen lataus kiinteistön viilennyksestä saatavalla energialla

Esimerkiksi kiinteistön lämmityskäyttöön rakennettuja kaivoja voidaan kesäaikana ladata kiinteistöjen viilennyksestä syntyvällä lauhdelämmöllä. Tällöin varastoinnilla saavutettu hyöty on huomattavasti pienempi kuin kaukolämmön tuotantoa hyödynnettäessä. Lauhdelämmöllä saavutettava hyöty on oikeastaan minimaalisen pieni, johtuen Suomen vähäisistä hellepäivistä sekä lauhdelämmön matalasta lämpötilasta. Jos lauhteen lämpötilaa halutaan nostaa erikseen lämpöpumpulla, tämä lisää kustannuksia ja näin ollen laskee latauksen kokonaiskannattavuutta. Toisin kuin aiemmassa esimerkissä tässä kaivoja on yleensä vähemmän, eivätkä ne muodosta kaivokenttää. Lisäksi kaivot pyritään sijoittamaan riittävän kauas toisistaan, jotta ne eivät viilentäisi toisiaan purun aikana. [11.]

8 Keskisyvän geotermisen lämmön potentiaali ja sen kartoitus Suomessa

Suomessa maalämpö on kasvattanut suosiotaan 2000-luvun aikana sekä kotitalouksien että isompien kiinteistöjen lämmitysratkaisuna. Suomessa maalämmön

potentiaali vaihtelee alueellisesti huomattavasti, mutta geoenergiaa pystytään siitä huolimatta hyödyntämään kaikkialla. Alueilla, joissa maalämmön potentiaali on heikompaa, voidaan tilannetta kompensoida poraamalla syvempi kaivo. [23.]

8.1 Keskisyvään geotermiseen kaivoon liittyvät geotieteelliset selvitykset

Kaivon syvyyden kasvaessa geotieteellisten selvitysten merkityksellisyys kasvaa hankkeen onnistumisen kannalta. Syvemmälle porattaessa kaivon porauskustannukset kokonaiskustannuksista ovat yhä suuremmassa roolissa. Kaivon sortuminen ja sen seurauksena uuden kaivon porauksesta syntyvät kustannukset ja viivästykset jarruttavat syvempien kaivojen kilpailukyvykkyyttä tulevaisuudessa. Kaivon sortumiseen ja muihin porauksessa syntyviin ongelmiin on kuitenkin mahdollista varautua erilaisilla geotieteellisillä selvityksillä. Selvitysten ja kallioperän kartoituksen laajuuteen vaikuttaa syvyyden lisäksi kaivon toiminta-periaate. Koska tämä opinnäytetyö keskittyy yhden kaivon järjestelmään eikä EGS-järjestelmään, käyn seuraavaksi läpi tälle työlle oleellisia kallioperän kartoitusmenetelmiä. EGS-järjestelmissä kallioperää tutkitaan vielä huomattavasti laajemmin. [7.]

8.1.1 Kirjallisuuskatsaus kohteen geologisista piirteistä

Geotermien gradientti on yleensä melko tasaista läpi Suomen, joten sen kartoitus ei tavallisesti vaadi erillistä tutkimista. Alueellista vaihtelua on kuitenkin havaittavissa varsinkin pohjois-eteläsuunnassa, joten on syytä tarkistaa kirjallisuudesta, millä alueella porauskohde sijaitsee. Sen sijaan keskisyvissä kaivoissa on syytä perehtyä kaivon stabiilisuuteen, jonka selvittäminen on syytä aloittaa perehtymällä alueen geologiaan ominaisuuksiin. Alueselvitys on hyvä aloittaa kirjallisuuskatsauksella, josta selviävät mahdolliset puutteet aiemmissa tiedoissa sekä yleisimmät kivilajit ja mahdolliset rakennemuutokset kallioperässä. Rakennemuutokset, kuten erilaiset rakosysteemit, on syytä tiedostaa, koska ne ovat potentiaalisia riskitekijöitä porauksessa. Suomen maa- ja kallioperästä on saatavilla hyvin tietoa Geologian tutkimuskeskuksesta, joka tuottaa

puolueetonta tutkimustietoa ja palveluita elinkeinoelämän ja yhteiskunnan tarpeisiin. Suomen hankkeissa geologista selvitystä on tehty yhteistyössä GTK:n ja yliopistoiden kanssa. Selvityksen voi teettää myös alan eri konsulttiyrityksillä. [7.]

8.1.2 Koekairaus

Koekairaus on Suomessa etenkin malminetsinnässä käytetty menetelmä, jolla saadaan tarkkaa tietoa kallioperän eri ominaisuuksista. Koekairausta voidaan hyödyntää myös keskisyvien geokaivokohteiden kartoitukseen. Kirjallisuuskatsauksen pohjalta tehtyä geologista mallia on mahdollisuus testata koekairauksen avulla ja sitä kautta saada yksityiskohtaista tietoa kivilajeista ja kaivon mahdollisesta toiminnasta. Koska porauskustannukset ovat yleisesti ottaen hyvin suuret, koekairausta harvemmin tehdään lämpökaivoalalla. [7.]

8.1.3 Geofysikaaliset rakenneluotaukset

Valmiille porakaivolle on mahdollista toteuttaa erilaisia geofysikaalisia rakenneluotauksia, jolla on mahdollista saada yksityiskohtaista tietoa kaivon seinämistä ja sen lähiympäristöstä. Luotausmenetelmästä riippuen on mahdollista saada jopa millimetrin tarkkuudella tietoa kaivossa risteävien rakojen ja kivilajikontaktien suunnista ja kallistuskulmista. Luotauksen heikkoutena on se, että luotauksessa saadaan tietoa kaivon seinämän rakenteista ainoastaan muutaman metrin osalta kaivon seinämästä ulospäin. Luotauksen tekeminen edellyttää, että kaivo on stabiili ja mittalaite saa hyvän kontaktin kaivon seinämään. [7.]

Rakenneluotausten teettäminen koko kaivon matkalta on kallista ja aikaa vievää. Mikäli koekairaus on suoritettu kohteessa, pystytään siitä saaduilla tiedoilla tunnistamaan potentiaaliset ongelmakohdat ja suorittamaan luotaus näissä syvyyksissä. Jos koekairausta ei ole suoritettu, toinen taloudellisesti järkevä vaihtoehto on porauksen aikana tunnistaa ilmaantuvien ongelmien syvyydet tarkan kirjanpidon avulla. Tämänkaltaisen ongelma voi esimerkiksi olla porausfluidissa

tapahtuva äkillinen paineenpudotus. Se yleensä indikoi rakovyöhykkeestä, johon porausfluidi karkaa. Näin kirjanpitoa hyödyntäen pystytään määrittämään syvyydet luotauksille. Tämä menetelmä on kuitenkin melko karkea indikaattori, mutta parempi kuin ei mitään. [7.]

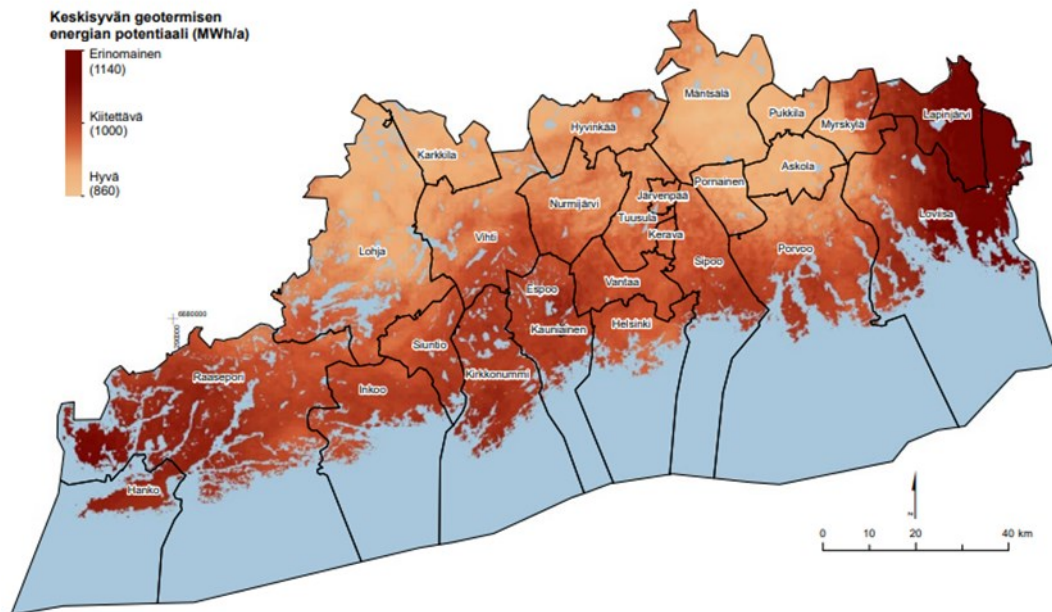
Geofysikaalisia rakenneluotauksia on mahdollista tehdä myös maanpinnalta alueellisena rakennetutkimuksena. Tämän kaltaisia tutkimuksia energiayhtiö Helen Oy on suorittanut Helsingin Keskuspuistossa vuonna 2019. Myös koekairauksesta saataville kairasydämmille on mahdollista tehdä geofysikaalisia rakenneluotauksia tai fyysisiä rakennemittauksia. Tällöin koekairaus tulee suorittaa timanttikairauksena, joka on ainoa tapa saada kokonaisia fyysisiä näytteitä syvältä kallioperästä. Yleisimmillä geolämpökaivojen porausmenetelmillä kuten kiertoporauksella tai ilmavasaratekniikalla kivimurska hajoaa niin pieneksi, että kiven rakenteista ei yleensä saada luotettavaa kuvaa. Kivimurskan tutkiminen on kuitenkin tärkeää, sillä kivimurskalla voidaan saada kontrolli kallioperän kivilajeista ja mineraaleista. On syytä vielä mainita, että näistä kolmesta eri mittausmenetelmästä saadaan kustakin erilaista dataa ja niitä hyödynnetään eri tarkoituksiin. Geofysikaalisia rakenneluotauksia tehdään vielä hyvin vähän lämpökaivoalalla niiden korkean hinnan vuoksi. Tulevaisuudessa tämä voi kuitenkin muuttua. [7.]

8.2 Keskisyvän geotermisen energian potentiaali Uudellamaalla

Uudenmaan alueesta on saatavilla keskisyvän geometrisen energian potentiaalia kuvaava kartta. GTK on Uudenmaan liiton tilauksesta toteuttanut geoenergiaselvityksen, joka antaa yleiskuvaa geoenergian potentiaalista eri syvyyksissä Uudellamaalla. Keskisyvän geotermisen energian potentiaalın laskenta toteutettiin simuloimalla kahden kilometrin syvyistä kaivoa 50 vuoden aikajänteellä. On huomioitava, että laskennassa käytetty kulutusprofiili oli tasainen ja täten keskisyvän geotermisen potentiaalın arvot ovat suurempia kuin todellisuudessa, kulutusprofiilin vaihdeltaessa. Tällaisen 2 kilometriä syvän kaivon teoreettinen tuotto Uudellamaalla on 800–1000 MWh vuodessa. Kuvasta 12 voi havaita geotermisen energian potentiaalın eron pohjoisen ja eteläisen Uudenmaan välillä. Nämä

erot Uudellamaalla johtuvat erityisesti kallioperän geotermisestä lämpövuosta.

[1, s. 30–33.]



Kuva 12. Uudenmaan keskisyvän geotermisen energian potentiaali [1, s. 30].

8.3 Geoterminen gradientti

Geoterminen gradientti eli maankuoressa tapahtuva lämpötilan nousu on Suomessa melko tasaista. Etelä- ja Pohjois-Suomen välillä voidaan kuitenkin nähdä vaihtelua. Etelä-Suomen kallioperässä tämä arvo on noin $2\text{ °C}/100\text{ m}$, kun taas Itä- ja Pohjois-Suomessa se voi olla alimmillaan $1.2\text{ °C}/100\text{ m}$. [24, s. 9.] Vertailuksi mainittakoon Islannin geoterminen gradientti, joka on $5\text{–}15\text{ °C}/100\text{ m}$.

Tämä on yksi syy siihen, miksi juuri syvemmän geotermisen energian hyödyntäminen on Islannissa niin yleistä. Islanti on myös ainoa Pohjoismaa, jossa geotermisellä energialla tuotetaan lämmitysenergian lisäksi sähköä. [25.]

9 Keskisyvien geotermisten lämpökaivojen hyödyntäminen Ruotsissa ja Norjassa

Suomen kallionperä kuuluu yhdessä Ruotsin ja Norjan kanssa Fennoskandian kilpialueeseen. Kallioperä on näissä maissa paikoittain samanlaista, eikä se ole erityisen otollista syvään geotermiseen lämmöntuotantoon. Heikot geologiset olosuhteet eivät ole ainoa syy siihen, miksi syvää geotermistä lämpöä ei hyödynnetä vielä merkittävässä määrin. Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa on laaja valikoima erilaisia energian tuotantomenetelmiä, ja näille on jo olemassa olevat jakeluverkostot valmiina. [25.]

9.1 Ruotsin tilanne

Matalat maalämpökaivot ovat Ruotsissa geoenergian pääasiallinen tuotantomuoto. Siellä on tutkittu myös syvempien geolämpökaivojen potentiaalia energian tuotantoon. Kuvasta 13 on nähtävissä Ruotsissa toteutetut syvät porakaivohankkeet. [26, s. 1.] Ruotsissa geotermisen gradientin ollessa 1,5–3 °C/100 m, tulee porata erittäin syvälle päästäkseen korkeisiin lämpötiloihin [25]. Geologisesti soveltuvia kohteita on löydetty pääosin vain Ruotsin eteläisestä osasta [26, s. 2].

Ensimmäinen syvä porakaivo toteutettiin Skånen läänissä Ljunghusenin kaupungissa vuonna 1955. Tämän 2 270 m syvän kaivon mitattu geotermisen gradientti oli lähes 3,5 °C/100 m. Ruotsin toinen syvä porakaivo kunnostettiin vanhasta öljynporauskaivosta vuonna 1977. Tämä 2 605 m syvä kaivo sijaitsee Höllvikenin kaupungissa lähellä Ljunghusenia, missä ensimmäinen kaivo porattiin. 2 000 m:n syvyydessä mitattu geotermisen gradientti oli 3 °C/100 m. Lounais-Ruotsin lisäksi keskisyville geotermisille lämpökaivoille geologisesti potentiaalisia kohteita on myös löydetty Gotlannin saarelta ja Siljan alueelta Keski-Ruotsista. [26, s. 2.]

| Location | Year | Total drilling depth | Notes | Reference |
|--|-----------|-----------------------------------|---|---|
| Ljunghusen 1 | 1955 | 2270 m | First deep temperature loggings in Sweden | LTH, 1977 |
| Höllviksnäs 1 | 1977-79 | 2 605 m Screen at 1860-2050 m | First geothermal well, logged and pump tested | Gustafson et al 1979 |
| Lund 1 (4 production wells, 6 injection wells) | 1983-85 | 550-700 m (production zone) | First commercial application | Aldenius 2017 |
| Fjällbacka | 1984-1995 | 500 m | HDR project | Wallroth et al. 1999 |
| Lund 2 (2 wells) | 2002-2005 | 3702 m 1927 m | Both deep-seated sandstone layers and the crystalline basement were tested. | Bjelm 2006, Bjelm and Rosberg 2006, Rosberg and Erlström 2019 |
| Malmö (2 wells, one deviated) | 2002-2003 | 2110 m 2801 m MD or 2120 m TVD | Triassic sandstone | DONG 2006a, DONG 2006b, Malmö Stad 2007, Erlström et al. 2018 |
| Birka | 2005 | 1000 m | Impact crater | Henkel et al. 2005 |
| Siljan | 2010-2013 | 500-600 m | Impact crater, shallow geothermal sandstone aquifer. | IGRENE, 2016 |

Kuva 13. Syvien geotermisten lämpökaivojen tutkimusprojektit Ruotsissa [26, s. 2].

Useista syvistä porakaivoista huolimatta Ruotsissa ei ole tällä hetkellä syvään geotermiseen energiaan perustuvaa energian tuotantoa [26, s. 3]. Tulevaisuudessa tähän on kuitenkin mahdollisesti tulossa muutos, sillä Ruotsi on osoittanut kiinnostusta tehostetun geotermisen lämpölaitoksen rakentamiseen. Ruotsissa on suunnitella rakentaa yhteensä viisi lämpölaitosta, jotka hyödyntävät geotermistä energiaa 5–7 km:n syvyydestä. Laitosten rakentamisesta vastaa saksalainen energiayhtiö E.ON. Maan syvyyksissä lämmennyt vesi on tarkoitus hyödyntää kaukolämpöverkossa lämmönsiirtimien avulla. Laitoksen toiminta perustuu samaan periaatteeseen kuin ST1:n laitos Espoossa. [27.]

9.2 Norjan tilanne

Kuten Ruotsissa ja Suomessa, Norjassa geotermistä energiaa hyödynnetään vain perinteisten maalämpökaivojen kautta muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Vasta viime vuosina Norjassa on alettu tutkia syvempien kaivojen potentiaalia. Vuonna 2015 syvin energiakaivo ulottui 500 metrin syvyyteen. Vuonna

2019 julkaistun raportin mukaan Norjassa on kaksi 800 m ja kaksi 1 500 m syvää porakaivoa. Molemmissa kohteissa käytetään koaksiaalisia kollektoreita. Lisäksi kummankin kohteen toisessa kaivossa on asennettuna lämpöanturi, joilla pystytään tarkkailemaan kaivon lämpötilanmuutoksia. [28, s. 1–3.]

1 500 metriä syvät kaivot sijaitsevat Oslon lentokentällä, ja ne valmistuivat vuonna 2018. Porauksen edetessä törmättiin 24 metrin syvyydessä pohjavesimuodostumaan. 70 metriin asti maaperä koostui moreenista, hiekasta ja sorasta. Molemmissa kaivoissa peruskallioon (biotittigneisiä) törmättiin 70 metrin syvyydessä. Peruskalliota peittävä maakerros casingputkitettiin. Porakaivon porauksessa käytettiin ilmasaratekniikkaa, ja porauksen keskimääräinen nopeus (ROP) oli 17 m/h. Projektin suurimmiksi haasteiksi todettiin logistiset vaikeudet, murtumien sementointi ja lämpötilagradientti. Kaivoista saatavalla energialla estetään talvisin lentokentän kriittisten alueiden jäätyminen. [29.]

10 Keskisyvien geotermisten lämpökaivojen nykytila Suomessa

Suomessa keskisyvien geotermisten kaivojen suosio on tällä hetkellä kovassa nosteessa. Espoon Koskelossa sijaitsee Suomen ensimmäinen keskisyvä geotermien lämpökaivo, jonka syvyys on 1,3 km. Se valmistui alkuvuodesta 2020. Tämän lisäksi on käynnissä useita vastaavia hankkeita mm. Salon Korvenmäessä, Vantaan Varistossa, Tampereen Tarastenjärvellä ja Helsingin Ruskeasuolla.

Kartoitin kaivojen tilannetta haastatteleamalla hankkeiden vastuuhenkilöitä. Haastatteluissa kysyin samat ennalta laaditut kysymykset jokaiselta haastateltavalta, joiden pohjalta muodostin kustakin hankkeesta yhteneväiset katsaukset. Kysymysten pääpaino liittyi kaivojen tekniikkaan, porausprosessiin ja törmätyihin ongelmakohtiin. Lopuksi pyysin haastateltavia kertomaan oman näkemyksensä keskisyvien geotermisten lämpökaivojen tulevaisuuden näkymistä.

10.1 Espoo, Koskelo

Espoon Koskelossa keskisyvä geoterminen lämpökaivo tuottaa lämmitysenergiaa 16 000 neliömetrin kokoiseen logistiikkakeskukseen. 1,3 kilometriin ulottuva geolämpökaivo kattaa 60–80 prosenttia rakennuksen lämmityksestä. Kaiwon poraukset alkoivat heinäkuussa 2019, ja lämmöntuotanto käynnistyi tammi-kuussa 2020. Kaivo on Suomen ensimmäinen keskisyvä geolämpökaivo. Hankkeen tilaajana toimi kiinteistöalan yritys NREP Oy, ja kaiwon porauksesta vastasi keskisyviin geotermisiin lämpökaivoihin erikoistunut QHeat. [30.]

NREP pyrkii kiinteistöiden ensisijaisena lämmitysmuotona hyödyntämään maalämpöä. Kaupunkialueilla tilan puutteen vuoksi perinteinen maalämpö ei sovellu lämmitysratkaisuksi isommille kiinteistöille. NREP on lähtenyt mukaan keskisyvän kaiwon pilotointihankkeeseen tutkiakseen vaihtoehtoista lämmöntuottojärjestelmää perinteisen maalämmön korvaajana. [31.]

Ennen hankkeen käynnistymistä kohteessa tehtiin yliopiston kanssa yhteistyössä geologista selvitystä maa- ja kallioperän piirteistä. Mitään erityisiä tutkimusmenetelmiä kuten koekairausta tai rakenneluotausta ei käytetty. Kaiwon poraus toteutettiin ilmavasaratekniikalla ja kaivossa hyödynnetään metallista vakuuieristettyä koaksiaalikallolektoria. Suurimmat ongelmat porauksen aikana johtuivat rakovyöhykkeiden kautta kaivoon virranneesta vedestä ja paineilmalaitteiston heikosta toimintavarmuudesta. Rakovyöhykkeiden sementointi ja paineilmalaitteiston huolto hidasti porauksen etenemistä aiheuttaen hankkeelle lisäkustannuksia. Koskelossa tavoiteltu kaiwon syvyys oli 2 kilometriä, mutta tavoitteesta jäätii osittain edellä mainittujen syiden vuoksi. Haasteeksi Koskelossa muodostui myös sopivan casingkoon löytäminen. QHeat on selittänyt tämän ongelman heidän seuraavissa hankkeissaan. Haasteista huolimatta Koskelossa poraus eteni ajoittain erinomaisesti saavuttaen hyvinä päivinä jopa ROP-arvon 30–40 m/h. QHeatin teettämien laskelmien ja kokemusten perusteella kaiwon jäähtyminen tapahtuu logaritmisesti, joten kaiwon tavoiteltu elinkaari on vähintään 50–100 vuotta. Kaivoa ei ole tarkoitus ladata hukkalämmöllä kesäaikaan. [32.]

NREP:n Petri Ahola uskoo syvien ja keskisyvien geotermisten lämpökaivojen olevan tulevaisuuden ratkaisu lämmöntuotannossa etenkin kaupunkialueilla. Aholan mukaan keskisyvien kaivojen hyödyntämisessä haasteena ovat kuntien ja kaupunkien eriävät näkemykset kaivojen mahdollisista sijainneista. Etenkin geolämpökaivon rakentamisesta pohjavesialueille ja siihen liittyviä ehtoja tulisi selkeyttää. Toinen haaste alalla on porauskaluston heikko saatavuus, joka johtuu maailmalla vallitsevasta komponenttipulasta, kertoo Ahola. [31.]

10.2 Vantaa, Varisto

Vantaan Varistossa aloitettiin syksyllä 2020 Suomen toisen keskisyvän geolämpökaivon poraukset. Tavoitteena oli saada kahden kilometrin syvyydestä kaivosta lämmitysenergiaa jopa kuuden kerrostalon tarpeisiin ja hyödyntää sitä Vantaan Energian kaukolämpöverkon kautta. [33.] Hankkeen edetessä ilmenneet ongelmat ovat pakottaneet muuttamaan suunniteltua toteutustapaa. Opinäytetyön kirjoitushetkellä hanke on loppusuoralla. Hankkeessa tilaajana toimii Vantaan Energia Oy, ja kaivon porauksesta vastaa QHeat. [34.]

Uusi kiinnostava lämmöntuotantoteknologia ja sen mahdollinen monistaminen tulevaisuudessa herätti kiinnostusta Vantaan Energialla. Lisäksi taustalla vaikutti tarve korvata kustannustehokkaasti polttamalla tuotettua energiaa. Näiden pohjalta päätettiin lähteä mukaan uuden teknologian pilotointihankkeeseen. Koskelon tapaan kohteen geologista selvitystä tehtiin yliopiston kanssa yhteistyössä. Selvitysten ansiosta saatiin tieto, että noin 600 metrin päässä Variston tontista kulkee pitkä ruhjevyöhyke. Ruhjevyöhykkeen todettiin olevan riittävän kaukana porauskohteesta, eikä sen nähty vaikuttavan kaivon rakentamiseen. Kallioperän uskottiin olevan eheä ja soveltuvan näin poraamiselle. Todellisuus oli kuitenkin toinen, ja osittain ruhjevyöhykkeestä johtuen Varistossa on työn kirjoitushetkellä neljä epäonnistunutta porakaivoa ja porauksessa on nyt viides kaivo. Poraus toteutettiin ilmavasaratekniikalla, ja kaivoissa on tarkoitus hyödyntää komposiitista valmistettua koaksiaalikkollektoria. [34.]

1,3 kilometrin syvyydessä ilmennyttä ruhjevöhykettä yritettiin sementoida. Tämä olisi mahdollistanut poraamisen jatkamisen syvemmälle. Sementoinnin aikana maa-ainesta sortui kuitenkin kaivon pohjalle, mikä jumitti porakanget. Sementoinnin epäonnistumisen lisäksi porakanget jumittuivat kaivoon niin voimakkaasti, ettei lukuista yrityksistä huolimatta niitä kaikkia saatu pelastettua. Kaivon sortumisen lisäksi ongelmia aiheuttivat casingputkitus ja jumittuneet poranterät. Teriä ei pystytty pelastamaan kaivojen pohjilta, joten kaivot oli hylättävä. Lisähaasteita toi, Koskelon tapaan, paineilmalaitteiden toiminta. [34.]

Ongelmista johtuen hankkeen toteutustapaa muutettiin ja päädyttiin yhden keskisyvän kaivon sijasta rakentaa kolme matalampaa, noin 800–900 metriä syvää kaivoa. Neljästä epäonnistuneesta kaivosta pystyttiin hyödyntämään kahta kaivoa, mikä nopeutti hankkeen etenemistä. Kaivot ovat lähekkäin toisiaan, mikä edesauttaa kaivojen kesäaikaista latausta. Kaivoja on tarkoitus ladata kaukolämpölaitoksen tuottamalla lämmöllä tai kaukolämpöverkon paluuedellä. Varistossa on myös tutkittu kaivon mahdollista vuorokausitasoista lataamista, jolloin kaivoa ladattaisiin yöaikaan ja purettaisiin aamulla kulutuksen noustessa. Kaivon tavoiteltu elinkaari on vähintään 25 vuotta, mutta siihen vaikuttaa olennaisesti kaivon lataus. [34.]

Vantaan Energian asiakkuusjohtaja Ilkka Rekon mielestä keskisyvän kaivon konsepti ei ole vielä valmis etenäkään uudiskiinteistön lämmitysratkaisuksi heikon onnistumisvarmuuden vuoksi. Kallioperän heikko tuntemus lisää liiaksi riskejä, jotka hankaloittavat aikataulussa pysymistä. Geologista tutkimusta tulee lisätä kohteissa, jotta Variston kaltaisia yllätyksiä ei tapahtuisi ja hankkeet pysyisivät aikataulussa. Ennalta arvaamattoman aikataulun lisäksi hankkeen kokonaiskustannuksia tulee pystyä vähentämään, jotta konseptista saadaan kilpailukykyinen. Keskisyvän kaivon konseptia kuitenkin tukee lämpöpumppujen käyttämisen sähkön siirtyminen halvempaan veroluokkaan vuoden 2022 aikana. [34.]

10.3 Salo, Korvenmäki

Kolmas keskisyvä geoterminen lämpökaivo sijaitsee uuden ekovoimalaitoksen tontilla Korvenmäessä, Salossa. Voimalaitoksesta kesällä syntyvää ylijäämälämpöä on tarkoitus varastoida kallioperään jopa kuuden noin kahden kilometrin syvyisen kaivon avulla. Varastoitua lämpöä on tarkoitus hyödyntää talvella kaukolämpöverkossa kulutushuippujen tasaamiseksi. [35.] Ensimmäisen kaivon poraus alkoi helmikuussa 2021, ja syksyn aikana poraus lopetettiin 1 600 metrin syvyyteen. Opinnäytetyön kirjoitushetkellä kaivon liittyvät maanpäälliset putkistot ovat rakenteilla, ja kaivo on tarkoitus ottaa käyttöön vuoden 2022 aikana. Tämän jälkeen arvioidaan muiden kaivojen porausta ja hankkeen jatkoa. Kuuden kaivon poraaminen edellyttää, että kaikki etenee suunnitelmien mukaisesti. Hankkeessa tilaajana toimii julkisomisteinen Lounavoima Oy, joka vastasi Korvenmäen ekovoimalaitoksen rakennuttamisesta. Porauksesta puolestaan vastasi QHeat. [36.]

Moni asia vaikutti Lounavoiman päätökseen aloittaa keskisyvän kaivon rakentaminen. Keskeisin syy oli mahdollisuus hyödyntää käytännössä ilmaiseksi kesällä syntyvää ylijäämälämpöä. Lisäksi hanketta varten tehty diplomityö ja kaivon lupaavat simuloinnit tukivat tätä päätöstä. Kohteen geologinen selvitys toteutettiin samalla tavalla kuin Koskelossa ja Vantaalla yliopiston kanssa yhteistyössä. Tämän lisäksi diplomityössä oli perehdytty kohteen maa- ja kallioperään. Poraus toteutettiin ilmavasaratekniikalla ja kaivossa on tarkoitus käyttää komposiitista valmistettua koaksiaalikollektoria. [36.]

Porauksen aikana ilmenneet ongelmat liittyivät muiden QHeatin hankkeiden tapaan paineilmalaitteiden toimintaan. Lisäksi haasteena oli löytää kaivoon soveltuva sementtiseos. Kallioperä soveltui hyvin poraamiseen, mutta poraaminen eteni vaihtelevasti. Osittain tästä syystä tavoitesyvyyttä ei saavutettu. Kaivon elinkaarta on vaikea arvioida, koska latauksella on siihen merkittävä vaikutus. Alustavasti tavoitteena on hyödyntää kaivoa vähintään 20 vuoden ajan. [36.]

Lounavoiman toimitusjohtaja Petri Onikki uskoo, että keskisyvät geotermiset lämpökaivot ovat potentiaalisia lämmöntuotantomenetelmiä tulevaisuudessa, kunhan porauskaluston toimintavarmuutta ja porauksen jouhevuutta saadaan parannettua. Alalle tarvitaan kuitenkin vielä paljon lisää kokemusta. Lounavoiman päätös hankkeen jatkamisesta ja uuden kaivon porauksesta oli haastattelun aikaan vielä tekemättä. Ensimmäisestä kaivosta saatavalla datalla on iso rooli päätöksenteossa. Hankkeen jatkamisen puolesta puhuu kuitenkin ensimmäisen kaivon porauksesta saatu varmuus kallioperän eheydestä ja sen luotettavuudesta. [36.]

10.4 Tampere, Tarastenjärvi

Suomen neljäs keskisyvä/syvä geoterminen lämpökaivohanke sijaitsee Tampereen Tarastenjärvellä, jossa vuonna 2020 perustettu 15 suomalaisen energia-alan kaupunkiyhtiön liittouma tutkii geolämmön potentiaalia kaukolämmönlähteenä. Tampereella porattava kaivo eroaa oleellisesti muista Suomen keskisyvistä geotermisistä lämpökaivohankkeista. Suurimmat eroavaisuudet ovat kaivon tavoiteltu syvyys ja porausteknologia. Suunnitelmissa on hyödyntää kaivoa ns. DGSW-menetelmällä. Porakaivo on tarkoitus porata jopa seitsemän kilometrin syvyyteen, mikäli hankkeelle myönnetään riittävästi julkista investointitukea. [37.] Vaikka kaivo ei valmistuttuaan täyttäisi keskisyvän geotermisen lämpökaivon kriteerejä, on hankkeella paljon yhteistä keskisyvien kaivojen kanssa. Tämän vuoksi otin hankkeen tarkasteluun opinnäytetyössäni.

Poraukset käynnistyivät Tarastenjärvellä kesällä 2021, ja marraskuun lopulla 2021 poraus oli edennyt kahteen kilometriin. Hankkeen tilaajana on 15 energia-alan yrityksen muodostama Kaupunkilämpö-konsortio. Porausteknologiasta vastaa eteläkorealainen HanJin D&B, ja operaattorina toimii suomalainen Thermo Rock Oy. [37.]

Hankkeen taustalla on yksinkertainen syy: halu korvata fossiiliset polttoaineet lämmöntuotannossa. Tavoitteena on lämmöntuotantomenetelmä, joka ei ole

riippuvainen lämpöpumppujen vaatimasta sähköstä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kaivosta on porattava riittävän syvä, jotta kaivosta saatavaa lämpöä pystyttäisiin hyödyntämään sellaisenaan ilman lämpöpumppuja. Seitsemän kilometrin syvyydessä kallioperän uskotaan olevan riittävän lämmin, jotta lämpöpumppuja ei enää tarvittaisi. Kaivosta saatavaa lämpöenergiaa tullaan hyödyntämään kaukolämpöverkon kautta. [38.]

Porauskohteessa tehty geologinen kartoitus sisälsi maaperän paksuuden selvittämisen. Muutoin maa- ja kallioperää ei tutkittu. Haastattelun ajankohtana kaivoa oli porattu 1,8 kilometriä, ja siltä osin kallioperä on ollut hyvin vakaa ja luotettava. Kaivossa tullaan hyödyntämään muiden edellä mainittujen hankkeiden tapaan metallista vakuumieristettyä koaksiaalikollektoria. Keskiyävistä geolämpökaivohankkeista poiketen Tampereella poraus toteutetaan vesivasaratekniikalla. Vesivasara valikoitui porausteknologiaksi silloisen saatavuuden vuoksi. Lisäksi vesivasaran uskotaan olevan tehokkaampi poraustapa esim. ilmavasaraan verrattuna etenkin syvälle porattaessa. Vesivasaralla poraus on sujunut vaihtelevasti. Porauskalustoa on jouduttu paljon huoltamaan, joka on aiheuttanut hankkeen viivästymistä. Muiden hankkeiden tapaan kaluston toimintavarmuutta tulisi parantaa. Laitteiston toimiessa poraus on kuitenkin edennyt suunnitellusti, ja porausnopeus on ollut hyvällä tasolla. [38.]

Tarastenjärven hanke keskittyy ensisijaisesti kaivon porauksen demonstrointiin, minkä vuoksi kaivolle ei vielä ole suunniteltu ns. ajotaktiikkaa. Kaivon tarkempaa käyttöä on tarkoitus suunnitella vasta porauksen valmistuttua. Näin ollen kaivon elinkaarta on haastava ennustaa, mutta lähtökohtaisesti kaivoa on tarkoitus hyödyntää kymmeniä vuosia. Poraamista tullaan jatkamaan aina seitsemään kilometriin saakka, mikäli kustannukset pysyvät kohtuullisina ja poraaminen etenee. [38.]

Tampereen Sähkölaitoksen johtaja Jukka Joronen uskoo, että geotermisellä energialla on tulevaisuudessa potentiaalia tukea muita polttoon perustumatto-

mia energiantuotantomenetelmiä. Porausteknologia tulee kehittymään lähitulevaisuudessa, mutta vielä ei ole varmuutta siitä kauanko se vie aikaa, kommentoi Joronen. [38.]

10.5 Helsinki, Ruskeasu

Suomen viidennen keskisyvän geolämpökaivon poraus aloitettiin Helsingin Ruskeasuolla syksyllä 2021. Energia-alan yritys Helen Oy:n pilottikohteena olevan hankkeen tavoitteena on tutkia ja kehittää poraustekniikan lisäksi muita teknisiä ratkaisuja tulevaisuuden geolämpöhankkeille. Kaivosta saatavaa lämpöä tullaan hyödyntämään kaukolämpöverkon kautta ja sen odotetaan kattavan 180 kerrostalohuoneiston lämmöntarve. 2,5 kilometrin syvyisen kaivon porauksen uskotaan valmistuvan kesään 2022 mennessä, ja laitos olisi käytössä vuoden 2022 loppuun mennessä. Helen Oy toimii hankkeessa tilaajana, ja poraamisesta vastaa Finnjet Konsult AB. [39.]

Helen näkee geotermisessä energiassa hajautetun energiantuotannon potentiaalia, mutta porauskustannukset ovat vielä suuret saatuun energiaan nähden. Geotermisen energia on yksi fossiilisten energiantuotantomenetelmien korvaaja. Suomen muista hankkeista poiketen Helen teki kohteessa geofysikaalista tutkimusta yhteistyössä GTK:n kanssa. Haastattelun ajankohtana oli vielä liian aikaista sanoa, kuinka hyvin kallioperän tutkimuksista saatu tieto vastasi todellisuutta. Toinen merkittävä eroavaisuus muihin hankkeisiin verrattuna on kaivossa käytettävän koaksiaalikollektorin materiaali. Helen päätyi teettämiensä laskelmien pohjalta hyödyntämään muovista valmistettua kollektoria. Selvitys kaivon ajotaktiikasta on vielä meneillään. Kaivon toimintaa ja sen parametrejä on tutkittu yhteistyössä insinööritoimiston kanssa. Tässä vaiheessa kaivon elinkaarta on vielä haastava arvioida, mutta kaivoa on tarkoitus hyödyntää vuosikymmeniä. Järjestelmä toteutetaan siten, että kesäaikaan kaivoa on mahdollista ladata kaukolämmön paluuedellä. [40.]

Haastattelun aikaan kaivoa oli porattu vasta noin 100 metriä, ja hankkeen alkumetreillä on esiintynyt ongelmia, jotka ovat aiheuttaneet viivästyksiä aikataulussa. Ongelmakohdat liittyivät poraussuunnitelmiin ja porauskalustoon. Hankkeen edetessä mahdollisesti muodostuviin porausaasteisiin Helen on kuitenkin varautunut hyvin. Kaivon porauksessa käytetään ilmavasaratekniikkaa. [40.]

Hankkeessa Helenin projektipäällikkö Sami Mustonen uskoo, että etenkin useammasta keskisyvästä kaivosta koostuva kaivokenttä olisi tulevaisuuden ratkaisu alalla. Helen onkin jo lähtenyt tutkimaan tällaisen ratkaisun toteutusta. Sopivan sijainnin löydyttyä on kohteen kallioperää mahdollisesti tarkoitus tutkia 3d-seismisen heijastustutkimuksen avulla. Tutkimus on kallis, mutta sen avulla saataisiin kallioperästä arvokasta tietoa, joka vähentäisi poraukseen liittyviä riskejä, arvioi Mustonen. [40.]

11 Yhteenveto

Ilmastomuutoksen torjunnassa fossiilisista polttoaineista luopuminen on välttämätöntä. Tarvitaan tilalle siis nopeita, skaalautuvia ja kestäviä energiaratkaisuja. Geolämmöllä on mahdollisuus korvata kivihiilen tai muiden ilmastomuutosta kiihdyttävien energialähteiden käyttöä.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli lisätä ymmärrystä erityisesti keskisyvien geolämpökaivojen toiminnasta, erinäisten teknologioiden hyödyntämisestä ja siitä, mikä on keskisyvien kaivojen tuottaman geolämmön potentiaali Suomessa nyt ja tulevaisuudessa. Sisällössä keskityttiin lämpöpumpun toimintaan, kollektoriputkistoon ja poraustekniikkaan. Lisäksi työssä kuvattiin lyhyesti lämmön varastointiin liittyviä ratkaisuja.

Keskisyvät kaivot ovat Suomessa vielä uutta teknologiaa, mikä näkyy valitettavasti hankkeiden läpivienneissä. Suurimmaksi haasteeksi alalla on muotoutunut kaivojen porauksen toteutus. Suomen kallioperän heikko tuntemus, porauskalustoon liittyvät epävarmuudet ja yleisesti kokemattomuus syvistä porareistä

ovat esimerkkejä siitä, minkä vuoksi Suomen hankkeet ovat siinä tilanteessa, missä ne ovat.

Haasteista huolimatta alalla tapahtuu jatkuvaa kehitystä, kun käynnissä olevat hankkeet etenevät ja samalla mahdollistavat kokemuksen karttumisen alalta. Nämä hankkeet ovat edellytys teknologian kehittämiseksi. Hankkeiden lisäksi tarvitaan myös lisää kirjallisuuteen ja tutkimuksiin perustuvaa aineistoa. Mielestäni tärkeitä jatkoselvityksiä liittyen keskisyviin geolämpökaivoihin ovat esimerkiksi maa- ja kallioperään liittyvät geologiset selvitykset ennen hankkeiden käynnistämistä, kollektoriputken materiaalin vaikutus kaivon toimintaan ja kaivon poraukseen liittyvien ongelmakohtien selvitys.

Keskisyvien geolämpökaivojen potentiaali ja sen mahdollisuus tukea polttoon perustumattomia energiantuotantomenetelmiä on huomioitu myös valtion toimesta. Työ- ja elinkeinoministeriö on myöntänyt useita investointitukia viime vuosina keskisyviin geotermisiin lämpökaivohankkeisiin. Tämän lisäksi keskisyvän kaivon vaatiman lämpöpumpun sähkön verotusta ollaan laskemassa. Lämpöpumpuissa käytettävä sähkö tulee siirtymään vuoden 2022 aikana veroluokkaan II. Myös Energiateollisuus ry:n julkaisema *Rakennusten kaukolämmitys - Määräykset ja ohjeet julkaisu K1/2021* tukee keskisyvien lämpökaivojen tulevaisuuden näkymiä. Julkaisussa K1/2021 kaukolämpöverkon talviaikainen mitoituslämpötila laskettiin lämpötilasta 115 °C lämpötilaan 90 °C. Tämä muutos nostaa lämpöpumppujen hyötysuhdetta kaivoissa, jotka hyödyntävät kaukolämpöverkkoa energian tuotannossa.

Lähteet

- 1 Uudenmaan geoenergiaselvitys. 2020. Verkkoaineisto. Uudenmaanliitto. <https://www.uudenmaanliitto.fi/files/25236/Uudenmaan_geoenergiaselvitys.pdf>. Luettu 6.9.2021.
- 2 Peura, Jutta. 2017. Maanalaista Energiaa, Geoteknisen osaston julkaisu 97. Verkkoaineisto. Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. <<https://www.hel.fi/static/kv/Geo/Julkaisut/julkaisu97.pdf>>. Luettu 6.9.2021.
- 3 Geoenergia. Verkkoaineisto. Geologian tutkimuskeskus. <http://projects.gtk.fi/syvareika/muut_tutkimukset/geoenergia/>. Luettu 10.10.2021.
- 4 Lund, Andreas. 2019. Analysis of deep-heat energy wells for heat pump systems. Verkkoaineisto. Diplomityö. <<https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/41674>>. Luettu 4.12.2021.
- 5 Solantie, Juha. 2022. Kehityspäällikkö. St1 Oy. Aineiston kommentointi ja sähköposti tiedonanto. 8.4.2022.
- 6 Kotimme voivat pian lämmitä syvältä maan ytimestä tulevalla energialla, ja ennen pitkää se saattaa hiljentää tulivuoret. Verkkoaineisto. Yle.fi <<https://yle.fi/aihe/artikkeli/2021/03/31/kotimme-voivat-pian-lammita-syvalta-maan-ytimesta-tulevalla-energialla-ja-ennen>>. Luettu 15.9.2021.
- 7 Rytkönen, Jussi. 2021. Geologi. St1 Oy. Haastattelu. 26.11.2021.
- 8 Manner, Katja. Verkkoaineisto. Miten maalämpöpumppu toimii? Tom Allen Senera. <<https://www.tomallensenera.fi/blogi/miten-maalampopumppu-toimii>>. Luettu 1.10.2021.
- 9 Juvonen, Janne & Lapinlampi, Toivo. 2013. Verkkoaineisto. Energiakaivo – Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas. Ympäristöministeriö. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=4&isAllowed=y>. Luettu 1.10.2021.
- 10 Lämpöpumppujen hankintaopas –kunnat ja taloyhtiöt. 2018. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/files/14752/Lampopumppujen_hankintaopas_kunnat_ja_taloyhtiot.pdf>. Luettu 2.10.2021.
- 11 Haapalahti, Hannes. 2021. Johtaja, Heat from the Ground. St1 Oy. Haastattelu. 23.11.2021.

- 12 Savela, Kristian. 2021 Johtaja, Lähienergia. St1 Oy. Haastattelu 22.11.2021.
- 13 Cheng, Wen-Long & Li, Tong-Tong & Nian Yong-Le & Wang, Chang-Long. 2013. Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544213005951>>. Luettu 12.12.2021.
- 14 Śliwa, Tomasz & Kruszewski, Michał & Zare, Alireza & Assadi, Mohsen & Sapińska-Śliwa, Aneta. 2018. Potential application of vacuum insulated tubing for deep borehole heat exchangers. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650517304182>>. Luettu 1.12.2021.
- 15 Jääskeläinen, Eetu. 2020. Verkkoaineisto. Geotermisten lämpöpumppujen hyödyntäminen kaukolämpöjärjestelmässä. Kandidaattityö. Tampereen yliopisto. Trepo-tietokanta. Luettu 23.11.2021.
- 16 Hirschberg, Stefan & Wiemer, Stefan & Burgherr, Peter. 2015. Energy from the earth, Deep geothermal as a resource for the future? Zürich: vdf Hochschulverlag AG.
- 17 Homuth, Sebastian & Hornich, Wolfgang & Krenn, Harald & Sass, Ingo & Spahn Tilo. 2016. Down-the-Hole Water-Powered Hammer Drilling Method for Medium-deep Geothermal Energy Drilling. Verkkoaineisto. Researchgate. <https://www.researchgate.net/publication/299239498_Down-the-Hole_Water-Powered_Hammer_Drilling_Method_for_Medium-deep_Geothermal_Energy_Drilling>. Luettu 15.11.2021.
- 18 Graniitin vahvuudet. Verkkoaineisto. Kaupunkilämpö. <<https://kaupunkilampo.fi/teknologia/graniitti/>>. Luettu 11.11.2021.
- 19 Biela, Juergen & Marxgut, Christoph & Bortis, Dominik & Kolar, Johann W. 2009. Solid state modulator for plasma channel drilling. Verkkoaineisto. IEEE. <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5211860>>. Luettu 12.11.2021.
- 20 PLASMABIT® keeps drilling costs at depth linear. Verkkoaineisto. GA Drilling. <<https://www.gadrilling.com/plasmabit/>>. Luettu 14.11.2021.
- 21 Kukkonen, Ilmo & Niemi, Rami. 2018. Syvien lämpökaivojen poraukseen ja hyödyntämiseen liittyvät ympäristökysymykset. Loppuraportti Koskelan sairaala-alue. Liite 1. Verkkoaineisto. Quantitative Heat Oy, Helsingin yliopisto. <https://www.hel.fi/static/kanslia/kehittyvakerrostalo/2020/qheat_koskelan%20alueverkko_loppuraportti_julkinen_kaytto.pdf>. Luettu 25.10.2021.

- 22 Loppuraportti Koskelan sairaala-alue. 2020. Verkkoaineisto. Quantitative Heat Oy. <https://www.hel.fi/static/kanslia/kehittyvakerostalo/2020/qheat_koskelan%20alueverkko_loppuraportti_julkisen_kaytto.pdf>. Luettu 25.10.2021.
- 23 Uudellamaalla on hyvät mahdollisuudet geoenergialle, joka on yksi ratkaisu energiasektorin päästöjen vähentämiseen. 2020. Verkkoaineisto. Geologian tutkimuskeskus. <<https://www.gtk.fi/uudellamaalla-on-hyvat-mahdollisuudet-geoenergialle-joka-on-yksi-ratkaisu-energiasektorin-paastojen-vahentamiseen/>>. Luettu 22.11.2021.
- 24 Uski, Marja & Piipponen, Kaiu. 2019. Selvitys geotermisen energian syväreikäporaamisesta, siihen liittyvistä ympäristönäkökohdista sekä riskienhallinnasta. Verkkoaineisto. Institute of Seismology. University of Helsinki. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/301878/Selvitys_geotermisen_syv%C3%A4reian_poraamisesta_siihen_liittyvista_ymparistonakohdista_seka_riskienhallinnasta_Report68.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Luettu 24.9.2021.
- 25 Gehlin, Signhild. 2019. Verkkoaineisto. Rehva. <<https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/geothermal-energy-use-in-the-nordic-countries>>. Luettu 22.10.2021.
- 26 Gehlin, Signhild & Andersson, Olof & Rosberg, Jan-Erik. 2020. Verkkoaineisto. Country Update for Sweden 2020. <<https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01040.pdf>>. Luettu 22.10.2021.
- 27 Richter, Alexander. 2021. Geothermal heat for Malmö/ Sweden from a depth of 7,000m. Verkkoaineisto. ThinkGeoEnergy. <<https://www.thinkgeoenergy.com/geothermal-heat-for-malmo-sweden-from-a-depth-of-7000m/>>. Luettu 23.10.2021.
- 28 Kvalsvik, Karoline H. & Midttømme, Kirsti & Ramstad, Randi K. 2019. Geothermal Energy Use, Country Update for Norway. Verkkoaineisto. European Geothermal Congress. <<https://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/CUR-20-Norway.pdf>>. Luettu 24.10.2021.
- 29 Experience from deep geothermal drilling Oslo Airport. 2018. Verkkoaineisto. Rock Energy AS, Båsum Boring AS. <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/25030/5tor-erik-museaus_rock-energy_deep-boreholes.pdf>. Luettu 27.10.2021.
- 30 Geoterminen Pilottihanke. Verkkoaineisto. NREP Oy. <<https://nrep.fi/hanke/geoterminen-pilottihanke/>>. Luettu 15.11.2021.

- 31 Ahola, Petri. 2021. Head of construction and engineering. NREP Oy. Haastattelu 30.11.2021.
- 32 Niemi, Rami. 2021. Teknologiajohtaja. Quantitative Heat Oy. Haastattelu 3.12.2021.
- 33 Juuti, Petteri. 2020. Verkkoaineisto. Uraauurtavan geolämpölaitoksen poraukset alkoivat Vantaalla, ja pian se tuo kesän lämpöä talveen – minuutin animaatio näyttää, miten laitos toimii. Yle.fi <<https://yle.fi/uutiset/3-11539531>>. Luettu 14.12.2022.
- 34 Reko, Ilkka. 2021. Asiakkuusjohtaja. Vantaan Energia Oy. Haastattelu. 24.11.2021.
- 35 Salon Korvenmäkeen kaukolämmön syvälämpövarasto. 2020. Mediatiedote. Verkkoaineisto. Lounavoima. <<https://www.lounavoima.fi/ajankoh- taista/salon-korvenmakeen-kaukolammon-syvalampovarasto/>>. Luettu 20.11.2021.
- 36 Onikki, Petri. 2021 Toimitusjohtaja. Lounavoima Oy. Haastattelu. 23.11.2021.
- 37 Geolämpö on tulevaisuutta. Verkkoaineisto. Kaupunkilämpö. <<https://kau- punkilampo.fi/>>. Luettu 16.11.2021.
- 38 Joronen, Jukka. 2021. Sähkölaitoksen johtaja. Tampereen Sähkölaitos Oy. Haastattelu. 17.11.2021.
- 39 Ruskeasuon geolämpölaitos. Verkkoaineisto. Helen. <<https://www.he- len.fi/helen-oy/energia/kehityshankkeet/biolampolaitokset/ruskeasuon- geolampolaitos>>. Luettu 19.11.2021.
- 40 Mustonen, Sami. 2021 Projektipäällikkö. Helen Oy. Haastattelu. 25.11.2021.