

Ville-Veikko Sutinen

**KESKISYVÄ MAALÄMPÖ JA SEN MAHDOLLISUUDET MUHOKSEN MUODOS-
TUMAN ALUEELLA**

KESKISYVÄ MAALÄMPÖ JA SEN MAHDOLLISUUDET MUHOKSEN MUODOS- TUMAN ALUEELLA

Ville-Veikko Sutinen
Opinnäytetyö
Kevät 2020
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t): Ville-Veikko Sutinen

Opinnäytetyön nimi: Keskisyvä maalämpö ja sen mahdollisuudet Muhoksen muodostuman alueella

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Geothermal Heating and Its Possibilities in Muhos Formation Area

Työn ohjaaja: Veli-Matti Mäkelä

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2020

Sivumäärä: 40

Tämä opinnäytetyö on toteutettu toimeksiantona Muhoksen kunnalle, jossa on suunnitteilla keskisyvä geenergia -hanke. Hankkeen tavoitteena on tutkia mahdollisuutta hyödyntää keskisyvää geotermistä lämpöä Muhoksella ja kartoittaa reunaehdot ja edellytykset keskisyvän geotermisen lämmön hyödyntämiseen alueellisena keskitettynä lämmitysmuotona. Lisäksi tavoitteena on tuottaa pohjatietoa geotermisen lämmön tuotannon monistettavan ja skaalattavan mallin ja teknisten ratkaisujen suunnittelulle. Opinnäytetyön aiheena oli keskisyvä geotermisen lämpö, ja tavoitteena oli kartoittaa, missä ja miten keskisyvää geotermistä lämpöä on hyödynnetty. Kartoitusta tehtiin tutkimalla asiaan liittyvää kirjallisuutta sekä käyttämällä tietopankkeja internetissä.

Työssä tarkastellaan esimerkkitoteutuksia ja esitellään teknisiä ratkaisuja geotermisen energian hyödyntämiseen sekä lyhyesti Muhoksen muodostuma ja miksi juuri se alue on otollinen kohde keskisyvälle geotermisen lämmön talteenotolle. Lisäksi työssä tutkitaan miten erilaiset geologiset olosuhteet vaikuttavat maasta hyödynnettävän geotermisen energian määrään. Työssä esitellään myös aiheeseen liittyvää sanastoa sekä termejä.

Esimerkkitoteutuksiin valittiin kohteita, joissa geotermisen lämpö on lähtökohtaisesti hankittu syväältä tai keskisyväältä maasta. Kohteissa on tarkasteltu tekniikan lisäksi myös maaperän ominaisuuksia ja lämmönlähteitä. Esimerkit ovat maakohtaisia ja niissä esitellään maan yleinen tilanne geotermisen energian hyödyntämisessä sekä tarkemmin yksittäistapauksia ja niissä sovellettuja tekniikoita. Saksassa, Ranskassa ja Iso-Britanniassa geotermiset lämpölaitokset hyödyntävät geotermisiä poikkeamia, joitten avulla saadaan hyödynnettyä normaalia suurempia lämpötiloja.

Geotermistä lämpöä on hyödynnetty jo pitkään maailmalla mutta se on Suomessa vielä uusi ja vähän tutkittu lämmöntuotantomuoto. Siihen liittyvä tutkimus on ajankohtaista ja tarpeellista. Tammiukuussa 2020 käynnistyi Suomen ensimmäinen geolämpölaitos. Useita laitoksia on suunnitteilla ympäri Suomea.

Asiasanat: geotermisen energia, kapasiteetti, lämmön talteenotto, maalämpö, teknologia

SANASTO

Avoin systeemi	Avoin systeemi on termodynaaminen systeemi, joka vaihtaa ympäristön kanssa ainetta sekä energiaa.
Akviferi	Akviferi eli pohjavesivarasto on maa- tai kivilajiesiintymä, joka varastoi ja johtaa vettä. Akviferi saa vetensä sateena, joista, järvistä tai toisista pohjavesivarastoista. Varasto on uusiutuva, mutta jos sitä käytetään nopeammin kuin se ehtii uusiutua, se ehtyy.
CHP	Combined Heat and Power, laitos, joka tuottaa lämpöä ja sähköä.
DBHE	Deep Borehole Heat Exchanger on syvä maalämpökaivo, jolla hyödynnetään geotermistä energiaa.
EGS	Enhanced Geothermal Systems (myös HDR Hot Dry Rock Systems) on järjestelmä, jota käytetään kohteissa, joissa geotermisessä varannossa ei ole luonnollisesti esiintyvää geotermistä nestettä.
Geoterminen gradientti	Geoterminen gradientti on suure, joka ilmaisee lämpötilan nousua maanpinnan alla syvyyden kasvaessa.
Hydraulinen johtavuus	Hydraulinen johtavuus eli vedenläpäisevyys on nesteen huokoisessa väliaineessa virtaamisen helppoutta kuvaava suure.
HWR	Hot Wet Rock Systems, järjestelmä, joka hyödyntää geotermisessä varannossa luonnollisesti olevaa geotermistä nestettä, jota on kertynyt huokosiin kiviin tai luonnollisiin murtumiin.
Injektiokaivo	Injektiokaivolla tarkoitetaan kaivoa, jonka avulla pumpataan neste maaperässä sijaitsevaan varantoon, jossa neste lämpiää geotermisen energian avulla.

ORC	ORC eli Organic Rankine Cycle on Rankine-kiertomalli, joka saa nimensä orgaanisesta nesteestä, jolla on suuri molekyylimassa. Nesteellä tapahtuu höyrystyminen tai kiehuminen matalammassa lämpötilassa kuin vedellä. Nesteen avulla voidaan hyödyntää matalampaa, 85-asteista tai teoreettisesti jopa matalampaa lämmönlähdettä Rankine-kierrossa.
Rankine Cycle	Rankine Cycle eli Rankine-kierto on malli, jolla voidaan tutkia höyryturbiinijärjestelmien toimintaa.
Suljettu systeemi	Suljettu systeemi on termodynaaminen systeemi, joka vaihtaa ympäristön kanssa energiaa mutta ei ainetta.
Tuotantokaivo	Tuotantokaivolla tarkoitetaan kaivoa, josta geoterminen neste pumpataan varannosta maanpinnalle käytettäväksi lämmityksessä tai sähköntuotannossa.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	3
SANASTO.....	4
SISÄLLYS.....	6
1 JOHDANTO.....	7
2 GEOTERMINEN LÄMPÖ.....	9
3 MUHOKSEN MUODOSTUMA.....	13
4 TEKNIIKAT.....	15
4.1 Syvä maalämpökaivo (DBHE).....	15
4.1.1 Sijainnista riippumatonta energiaa.....	17
4.1.2 Syvän maalämpökaivon tuotantokapasiteetti.....	17
4.2 Kaivopari (Doublet).....	18
4.2.1 Pohjavesivaraston hyödyntäminen.....	19
4.2.2 Lämmön- ja sähköntuotantokapasiteetti.....	20
4.2.3 Riskienhallinta.....	20
4.3 Enhanced Geothermal Systems (EGS).....	21
4.3.1 Geotermistä energiaa kallioperästä.....	22
4.3.2 Tuotantokapasiteetti sekä tekniikkaan liittyvät riskit.....	23
5 ESIMERKKITOTEUTUKSET.....	24
5.1 Iso-Britannia.....	24
5.2 Ranska.....	27
5.3 Saksa.....	32
5.3.1 Riem, München.....	33
5.3.2 Prenzlau.....	33
6 YHTEENVETO.....	34
LÄHTEET.....	35

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö tehtiin Muhoksen kunnalle, jossa on suunnitteilla keskisyvä geoenergia -hanke. Hankkeen tavoitteena on tutkia mahdollisuutta hyödyntää keskisyvää geotermistä energiaa Muhoksella ja kartoittaa reunaehdot ja edellytykset keskisyvän geotermisen lämmön hyödyntämisestä alueellisena keskitettynä lämmitysmuotona. Lisäksi tavoitteena on tuottaa pohjatietoa geotermisen lämmön tuotannon monistettavan ja skaalattavan mallin ja teknisten ratkaisujen suunnittelulle. Tämä opinnäytetyö käsittelee keskisyvää geotermistä lämpöä, joka tarkoittaa lämpöä, joka sijaitsee noin 500 - 2000 m syvällä maassa. Työssä myös tarkastellaan muutamaa tapausta, joissa lämpö hankitaan syvemmältä kallioperästä, ja esitellään tekniikkaa, jolla lämpöä voidaan hyödyntää. Työn tarkoituksena on selvittää, missä ja miten geotermistä lämpöä on hyödynnetty maailmalla ja esitellä esimerkkiratkaisuja näistä järjestelmistä.

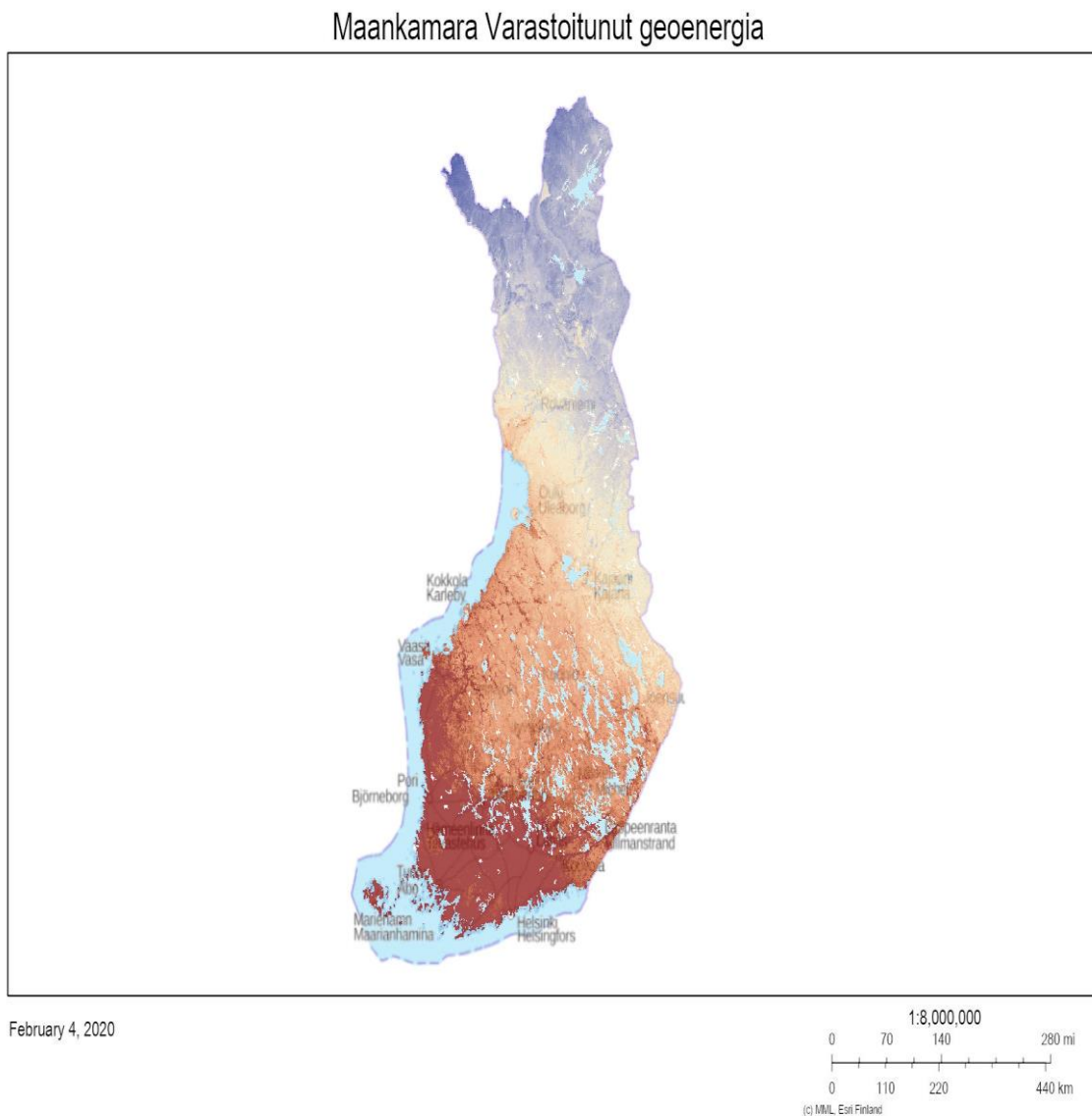
Maalämpö on maahan tai veteen varastoitunutta energiaa, josta suurin osa on peräisin auringosta ja vähäisesti maaperästä. Maalämpöä on perinteisesti hankittu maalämpökaivoista, jotka ovat syvyydeltään tyypillisesti noin 150 - 300 m. Geotermisen lämpö on taas maan kuoreen varastoitunutta lämpöä, joka syntyy maan sisällä alkuaineiden luonnollisen puoliintumisen seurauksena. (1.) Euroopan parlamentti ja neuvosto antoi 11. päivä joulukuuta 2018 direktiivin uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämiseksi (uudelleenlaadittu), minkä mukaan geotermisellä energialla tarkoitetaan maaperän pinnan alle lämmön muodossa varastoitunutta energiaa (2). Tässä työssä kuitenkin keskitytään niin kutsuttuun syvään ja varsinkin keskisyvään geotermiseen lämpöön, joka on geotermistä energiaa. Termit geoenergia ja geotermisen energia tarkoittavat yleisellä tasolla kaikkea maa- ja kallioperästä sekä vesistöistä saatavaa lämmitys- ja viilennysenergiaa.

Geotermisen lämpö on vielä uusi ja vähän tutkittu lämmöntuotantomuoto Suomessa, ja siihen liittyvä tutkimus on ajankohtaista ja tarpeellista. Tarvitaan geologista ja teknistä selvitystä, jotta keskisyvän geotermisen lämmön soveltuvuutta esimerkiksi kunnan energiantuotannon osana voidaan tarkastella luotettavasti. Muhoksen kunnan hankkeen onnistuneella lopputuloksella voi olla merkittävä vaikutus geotermisen energian hyödyntämiselle ja kuntien energiantuotannon siirtymiselle kohti hiilineutraaliutta. Geotermisen energian innovaatiot ja käyttö tarjoaa uudenlaisen mahdollisuuden kuntien kiinteistöjen kaukolämmityksessä. Tällä voidaan merkittävästi nopeuttaa puu- ja kasvipohjaisten sekä fossiilisten polttoaineiden käytöstä luopumista energiantuotannossa. (3.)

Tammikuussa Espoossa, Koskelossa käynnistyi Suomen ensimmäinen geolämpölaitos. Geolämpölaitoksen rakensivat yhdessä QHeat ja NREP ja laitos hyödyntää keskisyvää geotermistä lämpöä, joka hankitaan 1,3 km syvästä kaivosta (4). QHeatin mukaan geotermisellä lämmöllä voidaan vähentää kiinteistöjen lämmityksestä johtuvia päästöjä jopa 95 % verrattuna perinteiseen kaukolämpöön. Tämä on ilmastotavoitteiden kannalta merkittävää, sillä lämmitys aiheuttaa tällä hetkellä noin viidesosan Suomen hiilidioksidipäästöistä (5).

2 GEOTERMINEN LÄMPÖ

Geologian tutkimuskeskus on vastikään julkaissut geotermisen energiapotentiaalikartan Suomessa. Kuvassa 1 on geotermisen energiapotentiaalin kartta, jonka mukaan Suomen ”kuuma kohta” tulee Muhoksen muodostuman kohdalle.



GTK
Copyright 2018

KUVA 1. Geotermisen energiapotentiaali, varastoitunut geoenergia (6)

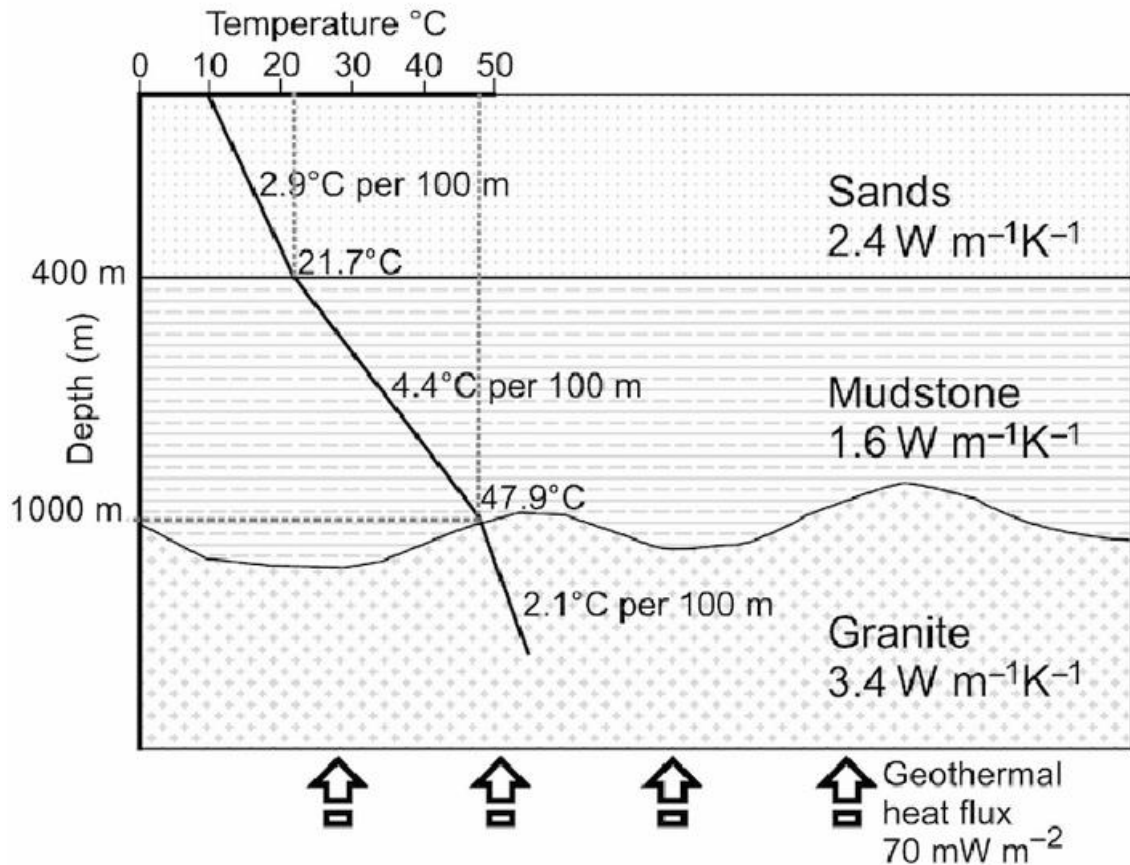
Geotermistä lämpöä on hyödynnetty ympäri maailmaa jo useita vuosia. Islannissa 90 % taloista lämmitetään maalämmöllä ja 66 % koko maan energiasta tuotetaan geotermisellä energialla (7). Turkissa on jo vuodesta 1987 asti käytetty geotermistä kaukolämmitystä, ja lämpöpumppujen avulla tehdään 40 - 45-asteisesta vedestä kaukolämpöä (8). Turkki on viime vuoden aikana ohittanut Italian johtavana maana geotermisellä energialla tuotetussa sähkössä Euroopassa (9). Turkki, Italia ja Islanti ovatkin erityistapauksia geotermisen energian kannalta, kun Turkissa saadaan jo 540 metrin syvyydestä 198-asteista vettä ja Islannissa päästään 200 °C:seen tuhannen metrin syvyyteen mentäessä. (10; 7.) Italiassa, Toscanan alueella Larderellon kylässä sijaitsee maailman ensimmäinen geoterminen voimalaitos, joka valmistui vuonna 1904. Arvellaan, että voimalaitos käytti sähköntuottoon alueella maanpinnalle noussutta tulistettua höyryä. (11.) Varsinkin Keski-Euroopassa, Saksassa ja Ranskassa käytetään maalämmöllä tuotettua kaukolämpöä.

Suomeen verrattuna Keski-Euroopassa onkin otollisemmat olosuhteet geotermisen energian hyödyntämiseen. Suomessa ja muissakin Pohjoismaissa Fennoskandian (tai Baltian) kilven alueella geoterminen gradientti on noin 8 - 15 K/km tai 0,8 - 1,5 °C / 100 m. (12; 13.) Maan lämpötila lähellä pintaa on vuoden ympäri 2 - 8 °C, mikä tarjoaa hyvät mahdollisuudet esimerkiksi viilentämiseen kesäisin. Tämä tarkoittaa, että Etelä-Suomessa 300 metrin syvyydessä maksimi lämpötila on noin 10 - 12 °C. Keski-Suomessa Pyhäsalmissa on saatu 22 °C:n lämpötila 1450 metrin syvyydestä, ja Itä-Suomessa Outokummun alueella saavutettiin 40 °C:n lämpötila 2500 metrin syvyydestä. Jotta päästäisiin 100 °C:n lämpötiloihin on porattava 6 - 8 km:n syvyyteen. Suomen kallioperässä kiven huokoisuus ja veden määrä on vähäistä. Tämän takia geotermiset järjestelmät (HWR), jotka käyttävät kuumaa vettä, joka löytyy luonnollisesti kallioperästä, ovat huono vaihtoehto Suomessa. (12; 14.)

Suomen Espoossa, Otaniemessä on myös käynnissä syvä geoterminen pilottiprojekti, jossa St1:llä on tavoitteena porata kaksi reikää 6 - 7 km:n syvyyteen ja luoda näin EGS-järjestelmä. Turku Energia on tehnyt aiesopimuksen St1:n kanssa vuonna 2016, ja suunnitteilla on syvä geoterminen laitos Turkuun. (14; 15.) Tämän lisäksi työ- ja elinkeinoministeriö on myöntänyt 2 miljoonaa euroa geotermisen energiantuotantolaitoksen rakentamiseen Tampereelle. Suunnitelman mukaan tuotantolaitos tulee Nekalaan ja lämpökeskus tuottaisi 29 050 MWh lämpöä vuodessa kaukolämpöverkkoon. Lämpö hankittaisiin 8 km syvästä lämpökaivosta. (16.) Myös Hiedanrantaan Tampereelle on suunniteltu vastaavaa lämpökaivoa (17).

Useimmissa kohteissa maapalloa geotermisen energian suora käyttö ei ole kovin houkutteleva vaihtoehto. Keskimääräinen geotermisen gradientti maailmalla on noin $2,5\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$, joka tarkoittaa, että olisi porattava $1,4\text{ km}$:n syvyyteen, jotta voitaisiin savuttaa $45\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötila. Tätä lämpötilaa voidaan jo käyttää tilojen lämmitykseen. Maan geotermisen gradientti ei ole jakautunut tasaisesti kaikkialle, ja on olemassa alueita, joissa voi löytää normaalista poikkeavan suuria lämpötiloja jo matalissa syvyyksissä. Näitä alueita kutsutaan geotermisiksi poikkeamiksi.

Poikkeamia voivat olla mannerlaattojen erkanevat alueet, kuten Islannissa. Poikkeamia esiintyy myös lähenevien laattojen ali työntymis-alueilla, joissa on vulkaanista toimintaa esimerkiksi Italiassa. Myös mannerlaattojen alle voi syntyä ”kuumia kohtia”, joista magma alkaa nousta riippumatta mannerlaattojen rajoista. Poikkeamia voi liittyä myös maankuoren heterogeenisyyteen tai lämpötilan siirtymään nesteen virtauksen takia. Pariisin ja Southamptonin geotermiset järjestelmät ovat esimerkkejä varannoista, joissa on poikkeavan suuret lämpötilat johtuen eristävästä kerroksesta, jolla on huono lämmönjohtavuus. (18, s. 21.) Kuvassa 2 on esimerkki kuvitteellisesta geotermisestä gradientista, joka kulkee kolmen eri kivikerroksen läpi. Poikkeaman voi aiheuttaa myös kivien radioaktiivinen hajoaminen, kuten uraanin ja kaliumin hajoaminen kallioperän graniitissa. Tästä löytyy esimerkkejä Lounais-Englannista, jossa on mitattu maan korkein lämpövuoto (19, s. 4 - 5).

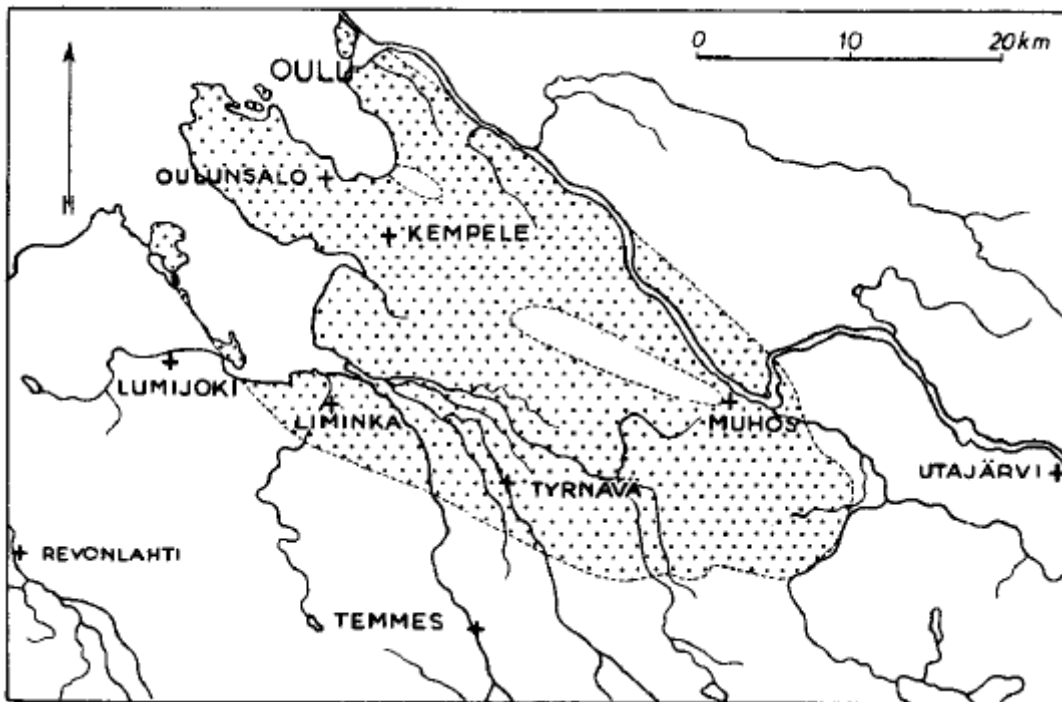


KUVA 2. Geoterminen gradientti (18, s. 22)

Kuvan 2 esityksen mukaan geoterminen gradientti vaihtelee eri kivilajien muodostamien kerrosten välillä. Tämä johtuu kerrosten erilaisista lämmönjohtavuuksista. Fourierin lain mukaan kivimuodostelmalla, jolla on huono lämmönjohtavuus, täytyy olla korkea geoterminen gradientti säilyttääkseen tasaisen lämpövuon. Ensimmäisessä kerroksessa, jonka kivilaji on hiekka, geoterminen gradientti on $2,9\text{ °C} / 100\text{ m}$ ja lämmönjohtavuus $2,4\text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$. Seuraavassa kerroksessa on mutakiveä, jonka geoterminen gradientti on korkeampi $4,4\text{ °C} / 100\text{ m}$ ja lämmönjohtavuus matalampi $1,6\text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$. Viimeinen kerros on graniittia, jonka geoterminen gradientti on matala $2,1\text{ °C} / 100\text{ m}$ ja lämmönjohtavuus $3,4\text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$. Lämpöä eristävän mutakivikerroksen ansiosta graniitin pintakerroksesta, noin tuhannen metrin syvyydestä, voidaankin löytää normaalia korkeampi lämpötila verrattuna pinnalla sijaitsevan hiekkakerroksen geotermisen gradientin antamaan oletukseen. (18, s. 21 - 22.)

3 MUHOKSEN MUODOSTUMA

Kuvassa 3 on havainnollistettu Muhoksen muodostuma, joka on noin 1300 miljoonaa vuotta vanha, syvimiltään noin 1 km syvä sedimenttikivimuodostuma Pohjois-Pohjanmaalla. Muodostuma jatkuu Muhokselta Tyrnävän ja Kempeleen kautta Hailuotoon. Muodostuma on noin 25 km leveä ja 80 km pitkä. (20; 21, s. 5.)



KUVA 3. Muhoksen muodostuma (22)

Muhoksen kohdalla savikivimuodostuman päällä on noin 10 - 100 metriä paksu maalajikerros, joka tekee lämpökaivojen poraamisesta vaikeampaa. Tarvittaessa näillä savikivialueilla on maanpeitteen paksuus suositeltavaa selvittää jo suunnitteluvaiheessa lämpökaivon tai -kaivokentän rakentamismahdollisuuksien varmistamiseksi. (13, s. 8.) Itse savikiveä Muhoksen kohdalla on 475 metriä ja syvimiltä kohdin noin 1000 metriä. Muhoksen rautatieaseman lähellä kairauksessa peruskallio tavoitettiin 527 metrin syvyydessä. Muodostuman pohjalla on konglomeraatti- ja arkoosisedimenttikivikerrokset sekä muodostuman alla on graniitista ja gneissistä muodostuva peruskallio. (20; 22, s. 15.)

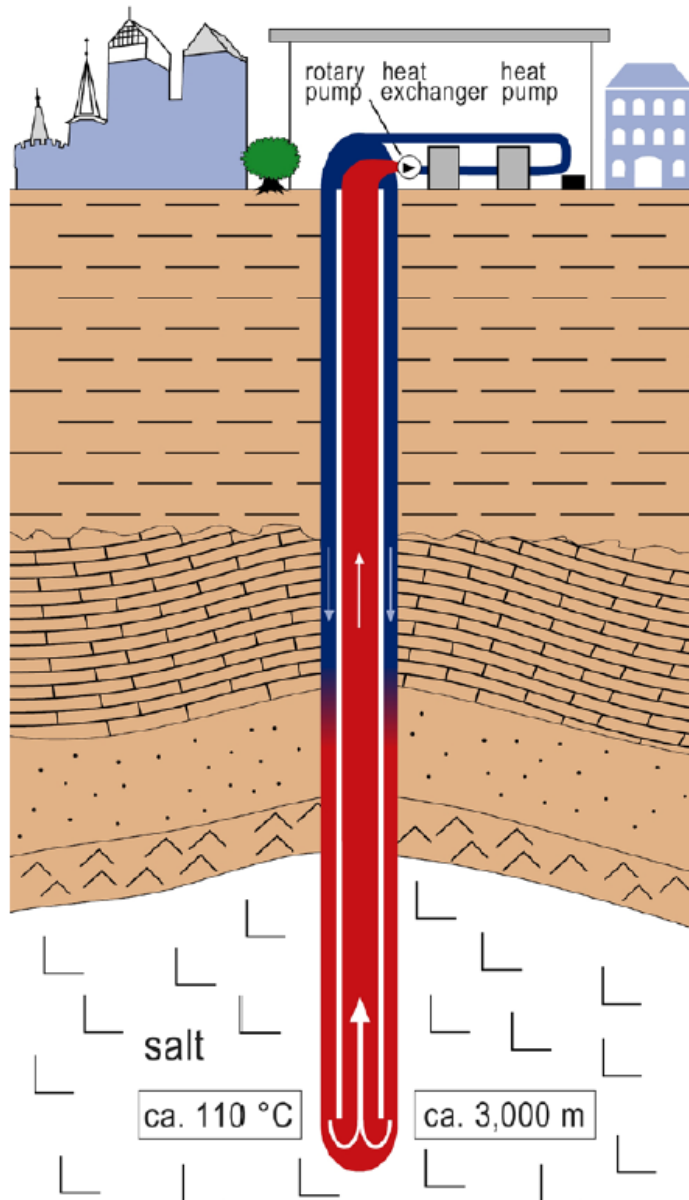
Muhoksen muodostuman alueella sijaitseva sedimenttikivi on pääosin silttikiveä ja saviliusketta (21, s. 5). Tämä sedimenttikerros toimii eräänlaisena eristeenä, joka estää maan sisältä nousevan geotermisen energian pääsyä läpi kerroksesta. Tämän takia arvellaan eristekerroksen geotermisen gradientin olevan normaalia suurempi ja sen alla olevassa rajapinnassa normaalia suurempi lämpötila. Muodostuman potentiaali keskisyvän geotermisen lämmön tuotantoon olisi siis lähes kaksinkertainen verrattuna keskimäärin Suomessa vallitsevaan tilanteeseen. (23.)

4 TEKNIIKAT

Maasta voidaan talteen ottaa geotermistä energiaa usealla eri tavalla. Tässä luvussa käydään läpi yleisimpiä tekniikoita, joilla voidaan hyödyntää geotermistä energiaa. Tekniikat voidaan jakaa tapauksiin, joissa lämmönlähde on vesistölämpö, maalämpö tai kalliolämpö (13, s. 5). Jako voidaan tehdä myös järjestelmiin, joissa käytetään nestettä, jolla on suuri tai matala entalpia. Korkean entalpian järjestelmissä tuotetaan sähkövoimaa. Matalan entalpian järjestelmät käyttävät geotermistä energiaa pääosin lämmitykseen, myös sähkön tuotantoon esimerkiksi ORC-järjestelmällä. Kaikki tekniikat hyödyntävät kuitenkin geotermistä energiaa. Luvussa esitellyiden tekniikoiden tuotantokapasiteetit kuvaavat järjestelmien suuruusluokkaa. (24, s. 9.)

4.1 Syvä maalämpökaivo (DBHE)

Syvä maalämpökaivo on tekniikaltaan samankaltainen kuin perinteinen maalämpökaivo ja käytännössä se on suurikokoinen lämmönsiirrin. Syvässä porakaivossa välittäjäaine kiertää suljetussa systeemissä ja lämpö siirtyy aineen mukana syvyyksistä pinnalle. Kuvassa 4 on esimerkki syvästä maalämpökaivosta. Lämpö johtuu kivistä kehyksen läpi nesteeseen, jota kierrätetään lämpökaivossa. Jos käytetään koaksiaaliputkea, kylmä neste pumpataan alaspäin kaivoon sisäputkea ympäröivässä tilassa. Kylmän nesteen liikkeessä putkea alaspäin neste lämmitetään ja se nousee pinnalle eristettyä sisäputkea pitkin (kuva 4).



KUVA 4. Deep Borehole Heat Exchanger (24, s. 30)

Ammoniakkia käytetään usein välityksineena. Kaivoa ympäröivät kivet jäätyvät lämmön siirtymisen takia ja horisontaalinen lämpötilagradientti kasvaa sekä lämpö alkaa virtaamaan ympäröivältä alueelta kohti kaivoa. Verrattuna avointa systeemiä hyödyntävään järjestelmään ei tällä tekniikalla ole tutkimusreikää tehtäessä riskiä, jossa havaittaisiin geotermisen varannon olevan riittämätön tai huonolaatuinen. (24, s. 30 - 31.)

4.1.1 Sijainnista riippumatonta energiaa

Syvä maalämpökaivo ei ole riippuvainen huokoisista pohjavesivarannoista ja voidaan asentaa teoreettisesti ihan kaikkialle. Koska tekniikka hyödyntää suljettua systeemiä, sillä ei ole paikallista vaikutusta maaperän luonnolliseen kemialliseen tasapainoon. Saostumis- ja liukenemisreaktiot, joita voi tapahtua EGS-järjestelmissä sekä järjestelmissä, joissa lämmönlähde on pohjavesivarasto, ovat myös poissuljettuja. Tekniikkaa käytetään tyypillisesti noin 800 - 3000 metrin syvyydessä, ja lämmönlähteenä toimii maalämpö tai kalliolämpö. Syvä maalämpökaivo soveltuu hyvin käytettäväksi projekteihin, joissa tarkoitus on tuottaa sijainnista riippumatonta lämpöä keskikorkeista lämpötiloista aina noin 60-asteiseen lämpötilaan asti. Kapasiteetti riittää esimerkiksi toimistorakennuksen lämmitystarpeeseen tai teollisuudessa lämmitykseen tai viilennykseen. (24, s. 30 - 31; 25.)

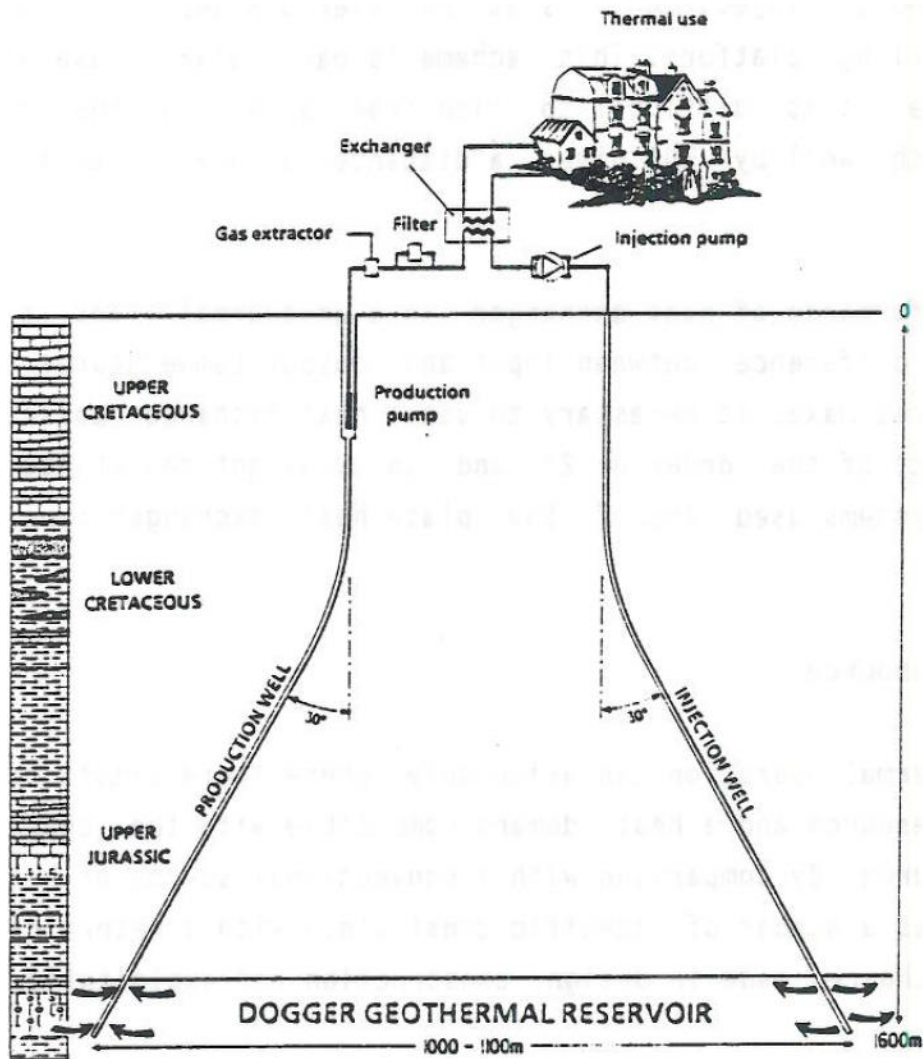
4.1.2 Syvän maalämpökaivon tuotantokapasiteetti

Maalämpökaivosta saatavan hyödynnettävän energian määrä riippuu pääsääntöisesti pinnanalaisesta lämpötilasta ja alueet, joissa on positiivinen geoterminen poikkeama ovat otollisia kohteita tekniikalle. Muita tärkeitä muuttujia ovat ympäröivä lämmönjohtavuus sekä lämpötilagradientti. Hyödynnettävän energian määrä riippuu myös käyttöajasta, kaivon mallista, nousuputkesta sekä rakentamiseen käytettyjen materiaalien termisistä ominaisuuksista. Mitä pitempi kaivo on, sitä suurempi lämmönsiirtopinta-ala sillä on. Syvän maalämpökaivon lämpökapasiteetti on tyypillisesti noin 100 - 350 kilowattia, joka on paljon pienempi kuin avointa systeemiä hyödyntävillä järjestelmillä on. Tämä johtuu pienemmästä lämmönsiirtopinta-alasta, joka on kosketuksessa kivimassan kanssa, koska pinta-ala vastaa vain kaivon ulointa kehystä. Tuotantokapasiteetin määrä on aina kuitenkin tapauskohtainen. (24, s. 30 - 31; 25.)

4.2 Kaivopari (Doublet)

Kaivoparitekniikka hyödyntää pohjavesivarastoa lämmönlähteenä tai EGS-järjestelmissä kalliolämpöä. Vesi nostetaan uppopumppujen avulla pohjavesivarannoista pinnalle, jossa sen lämpö otetaan talteen lämmönsiirtimellä. Siirtimestä lämpö siirtyy sekundääripiiriin, kuten kaukolämpöverkoon. Jos geotermisellä vedellä on matala mineraalipitoisuus, se voidaan periaatteessa pumpata jäähtymisen jälkeen viemärijärjestelmään sekä mereen, jokeen tai järveen. Yleensä jäähtynyt vesi kuitenkin pumpataan takaisin pohjavesivarantoon injektiokaivon kautta. Vesi tulee pumpata tietyn etäisyyden päästä hydraulisen korkeuden vakauttamiseksi ja ympäristölle turvallisen hävittämisen vuoksi. Tekniikka koostuu useammasta kaivosta ja hyödyntää ainakin yhtä tuotantokaivoa sekä yhtä injektiokaivoa. Kuvassa 5 on periaatteellinen kuva kaivoparista, joka on käytössä Ranskassa.

Useamman tuotantokaivon ja injektiokaivon yhdistelmä on myös mahdollinen. Järjestelmässä, jossa käytetään kaivoparitekniikkaa, voidaan kaivot porata pystysuoraan. Usein kaivot kuitenkin porataan samalta porauskentältä vinosti, koska kohteen syvyyteen voidaan päästä suunnatulla poraamisella. Tämä pidentää kaivon osuutta, joka on yhteydessä geotermiseen varantoon ja mahdollistaa suuremman alueen varannosta hyödynnettäväksi. Lisäksi maanpinnalla sijaitseva laitos, poraustyömaa sekä putkisto vievät vähemmän tilaa, kun kaivojen päät ovat toisiaan lähellä. Kaivopareja on käytetty paljon maailmalla ja tekniikka on hyvin tunnettua. Varsinkin Ranskassa hyödynnetään paljon kaivoparilaitoksia, mutta tekniikka on käytössä myös Italiassa, Puolassa, Itävallassa, Venäjällä sekä Saksassa. Tekniikka ei kuitenkaan ole loppuun hiottua, koska jokainen niin kutsuttu hydroterminen projekti on paikkakohtainen ja laitokset mitoitetaan teknisesti ja rakennetaan kohdetta varten. (24, s. 15 - 16.)



KUVA 5. Periaatteellinen kuvaaja geotermisestä putkistosta (26)

4.2.1 Pohjavesivaraston hyödyntäminen

Kaivopari toimii alueilla, joissa voidaan hyödyntää pohjavesivarantoa, jolla on hyvä hydraulinen johtavuus eli hyvä vedenläpäisevyys mikä tarkoittaa, että varannosta löytyy huokoista, läpäisevää kiveä ja mahdollisia murtumia joihin vesi varastoituu. Tyypillinen syvyys järjestelmälle on noin 1000 - 4500 metriä (25, s. 5). Tärkeä muuttuja pohjavesivarannon lämpötilan lisäksi on sen tuottavuus, joka voidaan saavuttaa taloudellisesti sekä teknisesti hyväksyttävällä veden pinnan alenemisen määrällä. Kaivon tuottavuus voidaan määrittää tuotantokaivon testauksella mutta myös arvioimalla ennen porausta käyttäen paikallisten varantojen muuttuja-arvoja. (24, s. 15.) Alueilla, joissa sijaitsee positiivinen geoterminen poikkeama, voidaan kaivoparitekniikkaa käytettäessä tehdä säästöjä poraushinnassa, koska käytettävä lämpötila voidaan hankkia matalammasta syvyydestä (24, s. 19).

4.2.2 Lämmön- ja sähköntuotantokapasiteetti

Kaivopareilla voidaan tuottaa joko lämpö- tai sähköenergiaa. Lämpökapasiteetti tekniikalla on tyyppillisesti noin 25 MW ja sähkökapasiteetti noin 2,5 MW (25, s. 5). Tuotantokapasiteetti riippuu kuitenkin geotermisen varannon tuottavuudesta sekä lämpötilasta, joten jokainen laitos on tapauskohtainen. Sähkövoiman tuotanto voimalaitoksella, jossa käytetään perinteistä Rankinen höyrykiertoa, saadaan huono hyötysuhde alle 180-asteisella vedellä. 100 - 180-asteista vettä voidaan käyttää kuitenkin sähkön tuottamiseen ORC-voimalaitoksella, joka hyödyntää orgaanista Rankine-kiertoa tai Kalina-kiertoa (24, s. 16; 18, s. 28 - 29.)

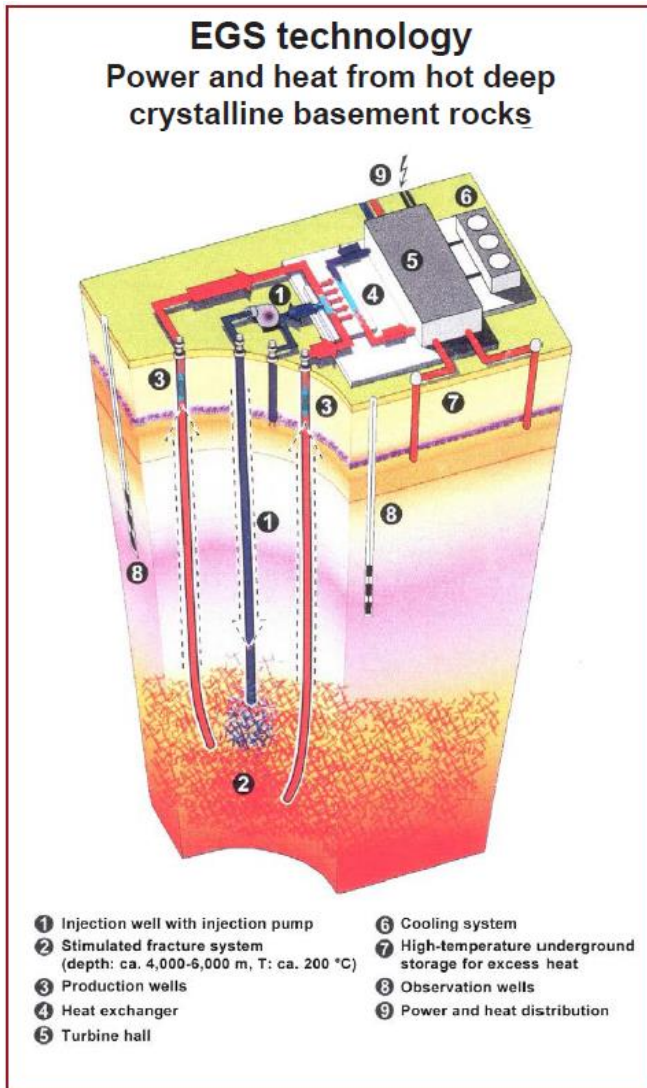
4.2.3 Riskienhallinta

Kaivoparia suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon mahdolliset tekniikkaan liittyvät riskit. Tekniikalla on olemassa riski, jossa porataan yksi tai useampi kaivo geotermiseen varantoon ja huomataan varannon olevan riittämätön tai huonolaatuinen. Laadulla tarkoitetaan veden kemiallista koostumusta, kun taas muuttujat, kuten huokoisuus ja läpäisevyys vaikuttavat kaivon tuottavuuteen. Vesi voi pitää sisällään aineita, kuten kaasuja, tai olla mineraalipitoista. Tämä voi vaikeuttaa tai estää lämmön hyödyntämisen. Kaivoparia suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon myös kaivojen välille tarvittava etäisyys. Tuotantokaivon ja injektiokaivon välillä täytyy olla riittävä etäisyys, jotta vältetään niin kutsutulta hydrauliselta tai termiseltä oikosululta, eli kaivojen välillä ei saa olla suoraa yhteyttä. Veden virtaus muihin vesivarantoihin on myös estettävä asentamalla tarvittaessa sulkuja. Etäisyyden täytyy olla niin suuri, että lämpötilan alenemista ei tapahdu tuotantokaivossa kylmän paluuveden injektio seurauksena. Välimatkan täytyy kuitenkin olla tarpeeksi lyhyt, jotta tuotantokaivon sekä injektiokaivon välinen hydraulinen johtavuus eli vedenläpäisevyys ylläpidetään. (24, s. 17 - 18.)

4.3 Enhanced Geothermal Systems (EGS)

EGS-tekniikalla voidaan hyödyntää syvällä maan uumenissa olevaa lämpöenergiaa riippumatta luonnollisesti esiintyvistä vettä pitävistä rakenteista. Järjestelmä on käytännössä kaivopari ja koostuu useammasta kaivosta, joista vähintään yksi toimii injektiokaivona ja toinen tuotantokaivona. Nesteelle luodaan keinotekoinen varasto vesisärötyksellä eli hydraulisella murtamisella. Vesisärötys tapahtuu injektoimalla suuri määrä vettä kallioperään, jolloin syntyy uusia murtumia ja luonnollisesti esiintyvät murtumat laajenevat ja syntyy vettä pitävä rakenne. Tekniikkaa kutsutaan myös peruskallion stimulaatioksi. Stimulointi kasvattaa luonnollista huokoisuutta ja parantaa läpäisevyyttä sekä geotermisen varannon tuottavuutta. Kylmää vettä pumpataan injektiokaivosta varantoon, jossa veden lämpötila nousee. Lämminnynyt vesi pumpataan tuotantokaivosta ylös käytettäväksi lämmityksessä tai sähköntuotannossa.

Tekniikalle klassinen termi on Hot Dry Rock, mutta myös muita termejä käytetään kuten Deep Heat Mining, Hot Fractured Rock ja Stimulated Geothermal System. Yleisin ja käytetyin termi tällä hetkellä on Enhanced Geothermal System (EGS). Tällä hetkellä EGS-tekniikka ja sen hyödyntäminen on vielä uutta ja sen tutkiminen on vielä työn alla, mutta työ on tuottanut jo muutamia pilottiprojekteja. Kuvassa 6 on esitetty EGS-järjestelmä ja sen komponentit. (24, s. 23; 18, s. 32 - 33.)



KUVA 6. EGS-järjestelmä (24, s. 23)

4.3.1 Geotermistä energiaa kallioperästä

EGS-tekniikalla pyritään hyödyntämään yli 150 - 200-asteista geotermistä lämpöä, joka sijaitsee yli 3000 metrin syvyydessä alueella, jossa lämmönlähteenä on kuiva ja kuuma peruskallio eli kalliolämpö. Kohde sijaitsee yleensä kiteisessä peruskalliolla ja harvemmin tiiviissä sedimenttikivessä. Maan ylimmän kuoren kiteinen peruskallio on hauras ja murtunut. Osa murtumista on avoimia ja täynnä hyvin mineraalipitoista vettä. Peruskallion voidaan kuvailla käyttäytyvän kuin pohjavesivaranto, jolla on todella matala vedenläpäisevyys. Jotta saavutetaan tarpeelliset virtaukset ja lämpötilat, täytyy keinotekoisella varastolla olla tarpeeksi suuri pinta-ala, joka toimii lämmönsiirtimenä. Injektiokaivosta pumpataan vettä varastoon, ja vesi virtaa lämmönsiirto pinta-alan läpi, jossa ve-

teen sitoutuu lämpöenergiaa peruskalliosta. Järjestelmässä kiertävä vesi ei ole pelkästään peruskalliossa olevaa geotermistä vettä vaan sekoitus geotermistä vettä sekä ulkopuolelta tuotua injektiovetä. Vesisekoitus toimii välittäjäaineena ja peruskallio lämpölähteenä. (24, s. 23.)

4.3.2 Tuotantokapasiteetti sekä tekniikkaan liittyvät riskit

EGS-tekniikalla voidaan tällä hetkellä tuottaa suurin määrä energiaa verrattuna muihin geotermistä energiaa hyödyntäviin tekniikoihin, mutta se vaatii syvimät porausreiät, korkeat lämpötilat sekä peruskallion stimuloinnin ja näin ollen on myös hyvin kallis toteuttaa (24, s. 8 - 9). Tekniikan lämpökapasiteetti on tyypillisesti noin 25 MW ja sähkökapasiteetti noin 2,5 MW. Koska kyseessä on kaivoparitekniikka, hyödynnettävän energian määrä riippuu geotermisen varannon tuottavuudesta ja lämpötilasta ja on lopulta tapauskohtainen. Tekniikkaan liittyvät riskit ovat samat kuin perinteisellä kaivoparilla mutta laajuudeltaan suuremmat. Laitoksen onnistumisen kannalta on tärkeää, että saavutetaan riittävä veden virtaama. Virtaaman suurus riippuu kalliosta luonnollisesti esiintyvien murtumien sekä keinotekoisesti laajennettujen tai luomien murtumien huokoisuudesta sekä läpäisevyydestä. (25, s. 5).

5 ESIMERKKITOTEUTUKSET

Tässä luvussa tarkastellaan esimerkkitoteutuksia geotermisen lämmön hyödyntämisestä Euroopan alueelta. Esimerkkitoteutuksissa on lähtökohtaisesti hankittu keskisyvältä tai syvältä maasta geotermistä lämpöä. Southamptonin ja Pariisin esimerkeissä on saatu normaalia korkeampia lämpötiloja lämpökaivoista eristävien sedimenttikerrostumien ansiosta.

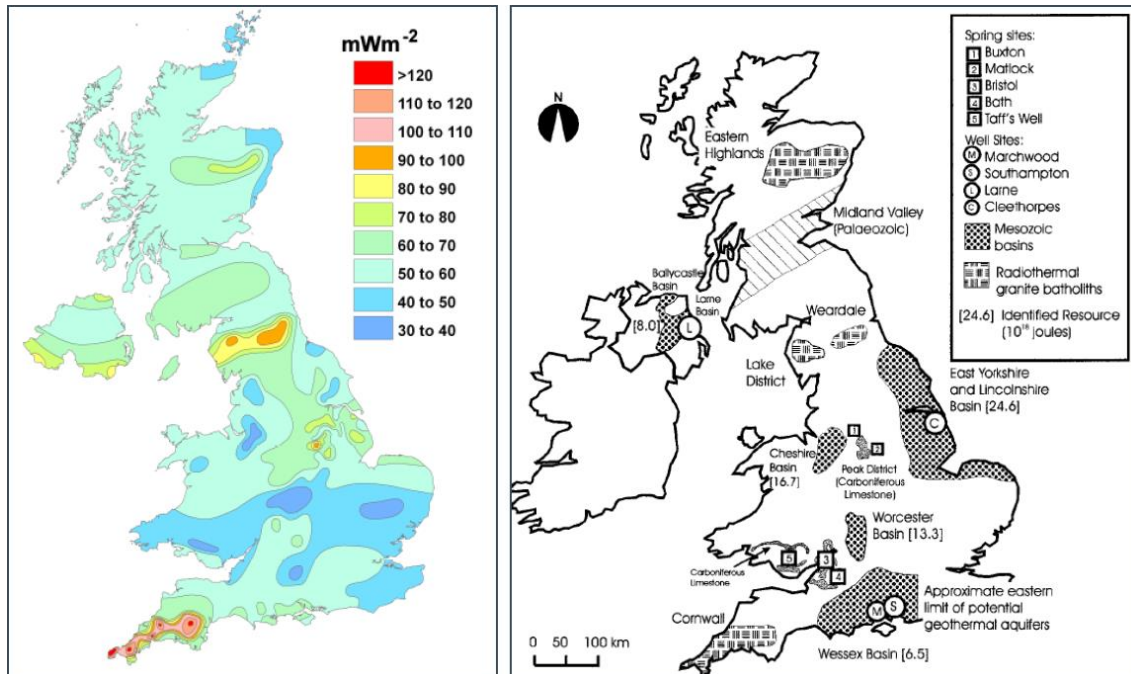
5.1 Iso-Britannia

Englannissa, Southamptonin kaupungissa vuonna 1981 porattiin kaivo 1800 metrin syvyyteen, jossa törmättiin pohjavesivarastoon eli akviferiin (27). Pohjaveden lämpötila oli 76 °C, ja vesi nousee luonnollisesti 100 metrin päähän maan pinnasta, josta se pumpataan lämpölaitokselle. Pinnalla veden lämpötilaksi saadaan 74 °C. Kuuman geotermisen veden osuus kaukolämmityksestä on noin 18 %, polttoöljyn osuus noin 10 % sekä loput 70 % kaukolämmöstä tuotetaan maakaasulla. (28.)

Projektin rakennus aloitettiin vuonna 1987, kun kaupunginvaltuusto huomasi, että kaukolämmitysjärjestelmään pystyttiin liittämään muita lämpölähteitä ja hyödyntämään esimerkiksi hukkalämpöä. Järjestelmään lisättiin pienikokoinen CHP-moottorivoimalaitos sekä lämpöpumppuja. Tämän jälkeen järjestelmä on kasvanut paljon. CHP-laitoksen osuus kasvoi huomattavasti, kun siihen lisättiin Wärtsilän CHP-moottorivoimalaitos ja vuonna 1994 järjestelmään liitettiin kaukojäähdytys. (27.)

Lämpölaitoksella lämpö siirretään geotermisestä vedestä kaukolämmitysveteen. Geotermisen veden lämpö siirretään lämpösiirtimen läpi ja yhdessä absorptiolämpöpumppujen avulla lämpö siirretään puhtaan veden veteen. Viilennetty 28-asteinen suolavesi lasketaan mereen. Lämpölaitoksella sijaitsee lämpösiirtimet, suolavesi- ja vesisuodattimet, lämpöpumput sekä Wärtsilän kaksipolttoaineinen 5,7 MW:n CHP-moottorivoimalaitos, joka vastaa järjestelmän sähköntuotannosta sekä valvonta- ja hallintajärjestelmä. Ylijäämäenergia myydään verkkoon ja CHP-moottorivoimalaitoksen hukkalämpö siirretään absorptiolämpöpumppujen avulla kaukolämpöveden. Kun kaukolämmityksen kysyntä on poikkeuksellisen suuri, voidaan lämpöä tuottaa myös varakattiloilla. (28; 29.) Kuvasta 7 voidaan havaita, että Southamptonin kaupunki, joka sijaitsee Englannin etelärannikolla, ei sijaitse suuren lämpövoiman alueella. Southampton sijaitsee Wessexin hautavajoaman alueella. Southamptonin

energiajärjestelmä onkin Englannin ensimmäinen ja kuuluisin toimiva geoterminen lämmitysjärjestelmä, jonka onnistumisen takasi paksu sedimenttikivikerros, jolla on huono lämmönjohtavuus sekä pohjavesivarasto eli akviferi sopivassa syvyydessä. (18, s. 22.)



KUVA 7. Lämpövuoto sekä radioaktiivinen graniitti Iso-Britanniassa (19)

Vuosittain kaukolämmitysjärjestelmä tuottaa yli 30 000 MWh lämpöä ja moottorivoimalaitokselta myydään 4000 MWh:n edestä sähköä sekä 1200 MWh sähköstä menee kaukojäähdytykseen. CHP-moottorivoimalaitoksella saadaan vähennettyä CO₂-päästöjä yli 10 000 tonnia vuodessa. Järjestelmään kuuluu 20 suurta asiakasta Southamptonin keskustassa. Vettä pumpataan kaupungin läpi kaukolämpöputkistolla, jolla on pituutta noin 11 km. Lämpöhäviö putkistossa on 0,5 °C kilometriä kohden. (28.)

Southamptonin lämpökaivon loppusyvyudeksi saatiin 5994 jalkaa eli noin 1827 metriä. Reiän halkaisija on 50 metriin asti 26 tuumaa eli 66 senttiä. Sen jälkeen halkaisija oli 44,45 senttiä 915 metriin asti ja siitä eteenpäin 31,75 senttiä aina kaivon pohjaan asti. (30.) Kuvassa 8 on esitetty kaivon ominaisuuksia sekä kivilajit eri syvyyksissä. Kuvassa vasemmassa reunassa on esitetty kerrostumien geologiset ajanjaksot, kerrostumat sekä syvyys jalkoina. Keskellä kuvaa kerrotaan kiven litologia eli fyysiset piirteet, kuten koostumus, raekoko, rakenne tai väri. Oikealla on nähtävissä kaivossa käytetyn kehyksen koko.

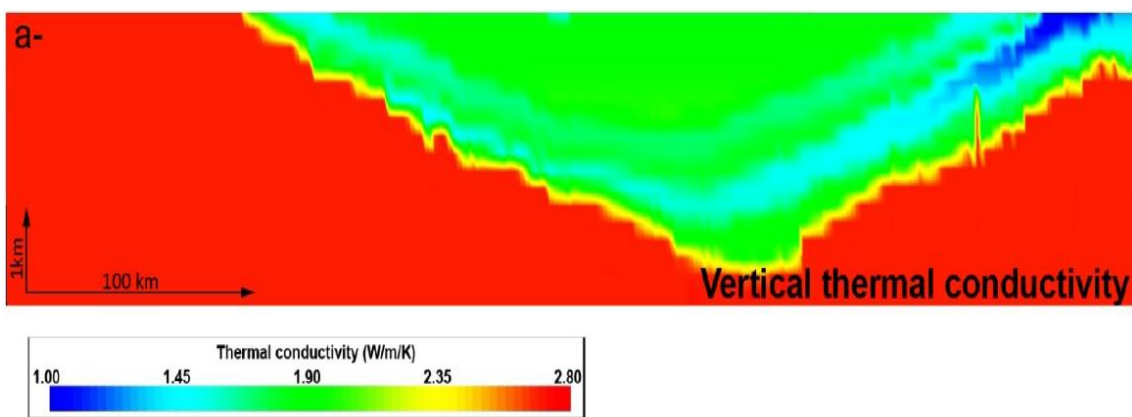
SOUTHAMPTON NO. 1				LOCATION				
SUMMARISED WELL LOG				Latitude 50° 54' 24" N Longitude 1° 24' 33" W Grid Reference SU 41559 12018				
Stratigraphy	Depth in feet below KB	Graphical Log	Core <small>Hydratation shown, DFT's</small>	Lithological Description	Casing	Electrical Log Suites		
						Schlumberger	Tesol	
RECENT AND TERTIARY				CLAYS, olive and pale grey SANDS, greenish and olive grey with some silt	26"			
CRETACEOUS	UPPER CHALK	1000		CHALK, white and pale grey with some flints				
	MIDDLE CHALK							
	LOWER CHALK							
	UPPER GREENSAND			SANDSTONE and SILTSTONE, green, glauconitic				
	GAULT CLAY	2000		CLAY, dark grey				
JURASSIC	PORTLAND BEDS			SANDSTONE, green, glauconitic SANDSTONE, grey, calcareous LIMESTONE, grey, silty and sandy				
	UPPER	KIMMERIDGE CLAY		MUDSTONE and SILTSTONE, dark grey, calcareous, finely micaceous and carbonaceous, occasional thin limestones				
		CORALLIAN BEDS			LIMESTONE, pale grey, oolitic SANDSTONE and MUDSTONE, calcareous	17 1/4"		
		OXFORD CLAY	3000		MUDSTONE, dark grey, calcareous with SILTSTONE, grey-brown			
		KELLAWAYS BEDS CORNBRASH						
	MIDDLE	FOREST MARBLE			LIMESTONE, grey, bioclastic MUDSTONE, grey, calcareous, interbeds of LIMESTONE, shaly, sandy			
		GREY OOLITE, ATHELSTAN OOLITE FORMATION			LIMESTONE, buff to white, oolitic, bioclastic			
		FULLER'S EARTH			LIMESTONE, buff, oolitic, pisolitic with sparry matrix			
		INFERIOR OOLITE			MUDSTONE, grey, silty, calcareous, thin shaly limestone			
					LIMESTONE, bioclastic with sparry matrix			
	LOWER	UPPER LIAS SANDS	4000		SANDSTONE, very fine-grained, grading downwards to siltstone			
		UPPER LIAS CLAYS			SILTSTONE, grey, calcareous			
		MIDDLE LIAS SILTS AND CLAYS			SILTSTONES and MUDSTONES, grey, calcareous			
		BELEMNITE MARL			MUDSTONE, grey, calcareous and LIMESTONE, grey, argillaceous			
		GREEN AMMONITE BEDS						
BLACK VEN MARL, AND SHALES WITH REEF								
TRIASSIC	BLUE LIAS							
	PENARTH GROUP	5000		LIMESTONE, pale grey, hard MUDSTONES, green and grey, calcareous MUDSTONES and SILTSTONES, red to brown, anhydritic				
	MERCIA MUDSTONE GROUP							
DEVONIAN	SHERWOOD SANDSTONE GROUP			SILTSTONE, reddish brown, thin SANDSTONE bands				
	OLD RED SANDSTONE	5000		SANDSTONE, reddish brown, fine-to medium-grained CONGLOMERATE, pale green to reddish brown SANDSTONE, purplish red to grey with bands of SILTSTONE, purplish red and grey	9 1/8"			
				TD 5994 feet below KB				

KUVA 8. Southamptonin geoterminen kaivo (30)

Iso-Britanniassa on myös meneillään maan ensimmäinen geoterminen voimalaitosprojekti, jolla on tarkoitus tuottaa vain sähköenergiaa. Projekti alkoi 1970-luvulla ja Cornwallin kuntaan, Penrynin kaupungin lähelle porattiin kolme reikää: kaksi noin 2000 metriin ja yksi 2600 metriin. Reiät saatiin valmiiksi 1980-luvun alkupuoliskolla. Projektin sanotaan auttaneen suuresti EGS-järjestelmien kehityksessä. Projektin EU-rahoitus kuitenkin katkaistiin 1990-luvun alussa, kun Ranskan Soultz-sous-Forêtsin EGS-projekti aloitettiin. Projekti otettiin uudelleen esille Britanniassa ja poraukset aloitettiin vuonna 2018. Projektin tarkoituksena on porata kaksi kaivoa, tuotantokaivo 4500 metrin syvyyteen sekä injektiokaivo 2500 metrin syvyyteen. Lämpökaivon odotetaan tuottavan noin 190-asteista vettä. (31.)

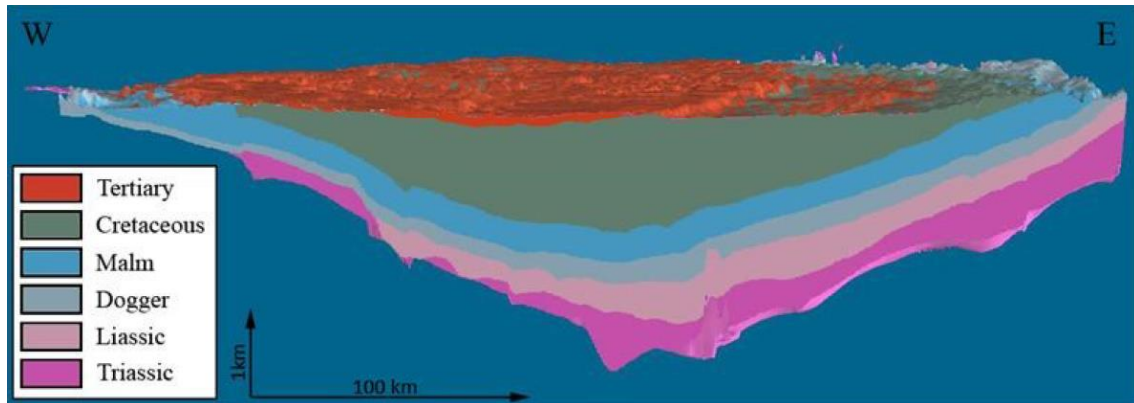
5.2 Ranska

Ranskassa, Pariisin sedimenttivajoaman alueella sijaitsee viisi suurta pohjavesivarastoa eli akvifeeria, joita Ranskassa on hyödynnetty geotermisen kaukolämmön tuottamiseen. Ranskassa on 74 geotermistä lämpölaitosta, joista vanhin on rakennettu Melun-l'Almontissa vuonna 1969. 46 geotermistä lämpölaitosta käyttää Doggerin pohjavesivarantoa. Näillä laitoksilla tuotetaan geotermistä energiaa 6 - 7 %:lle 11 miljoonasta ihmisestä. Pariisin alueella saadaan 56 - 85-asteista vettä 1600 - 1800 metrin syvyydestä. (32.) Pariisin sedimenttivajoaman poikkeavan suuret lämpötilat johtuvat pääosin Schistes Carton -sedimenttikerrostuman matalasta lämmönjohtavuudesta (kuva 9).



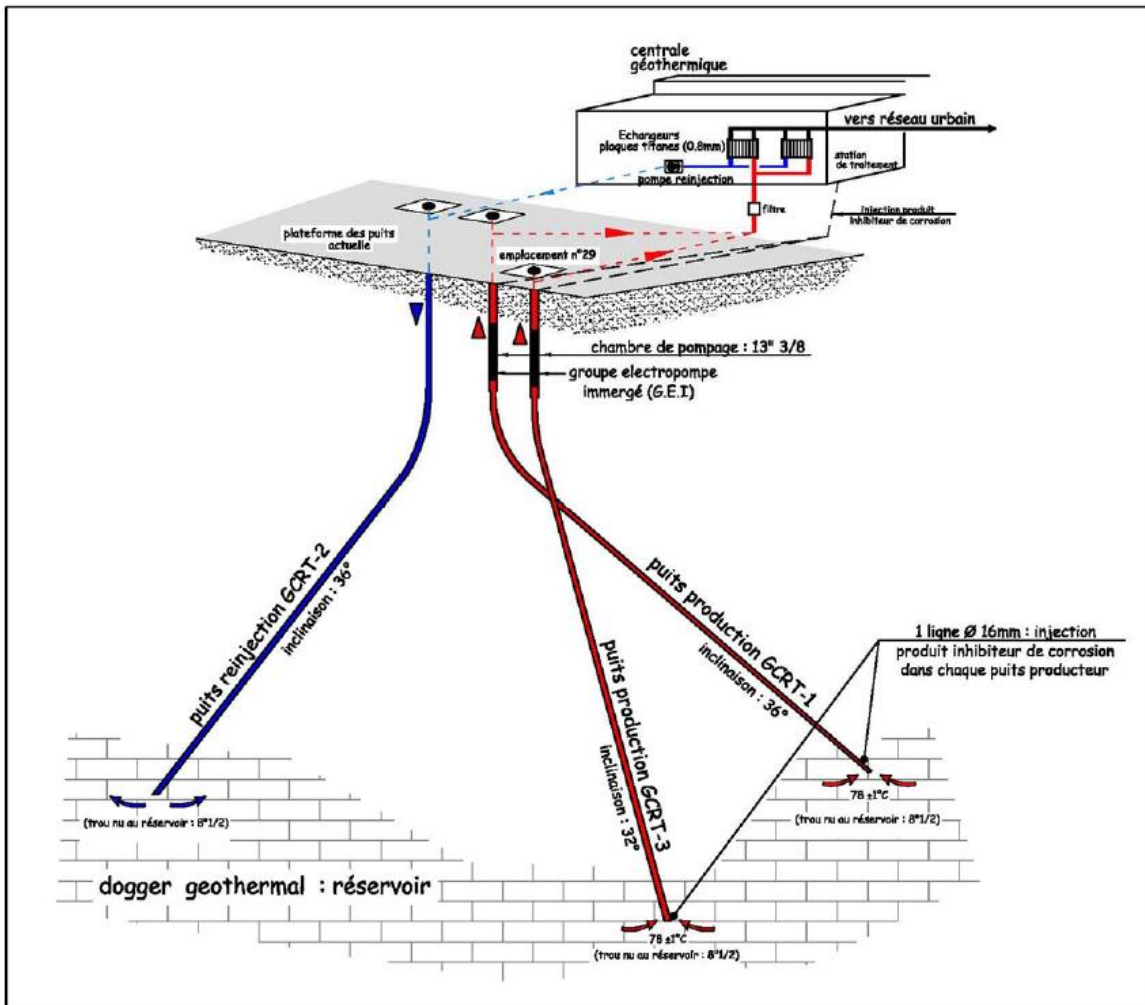
KUVA 9. Pystysuora lämmönjohtavuus Pariisin alueella (33)

Poikkeuksellisen suuret lämpötilat paikantuvat tämän eristävän sedimenttikerroksen alle, vajoaman reunoille noin 1000 metrin syvyyteen, josta ne "valuvat" vajoaman mukana kohti sen keskipistettä. Vajoaman pohja lisää myös lämpötilan vaihtelua ja sedimenttikerroksen pohjalla tapahtuva lämmön siirtyminen indikoi lämmöntuotantoa, joka luultavasti liittyy radioaktiiviseen hajoamiseen. Sedimenttikerros on paksuimmasta kohdasta 2500 metriä paksu. (33; 34.) Kuvassa 10 on esitetty Pariisin sedimenttivajoaman itä-länsiprofiili, jossa näkyy kuusi eri sedimenttikerrosta.



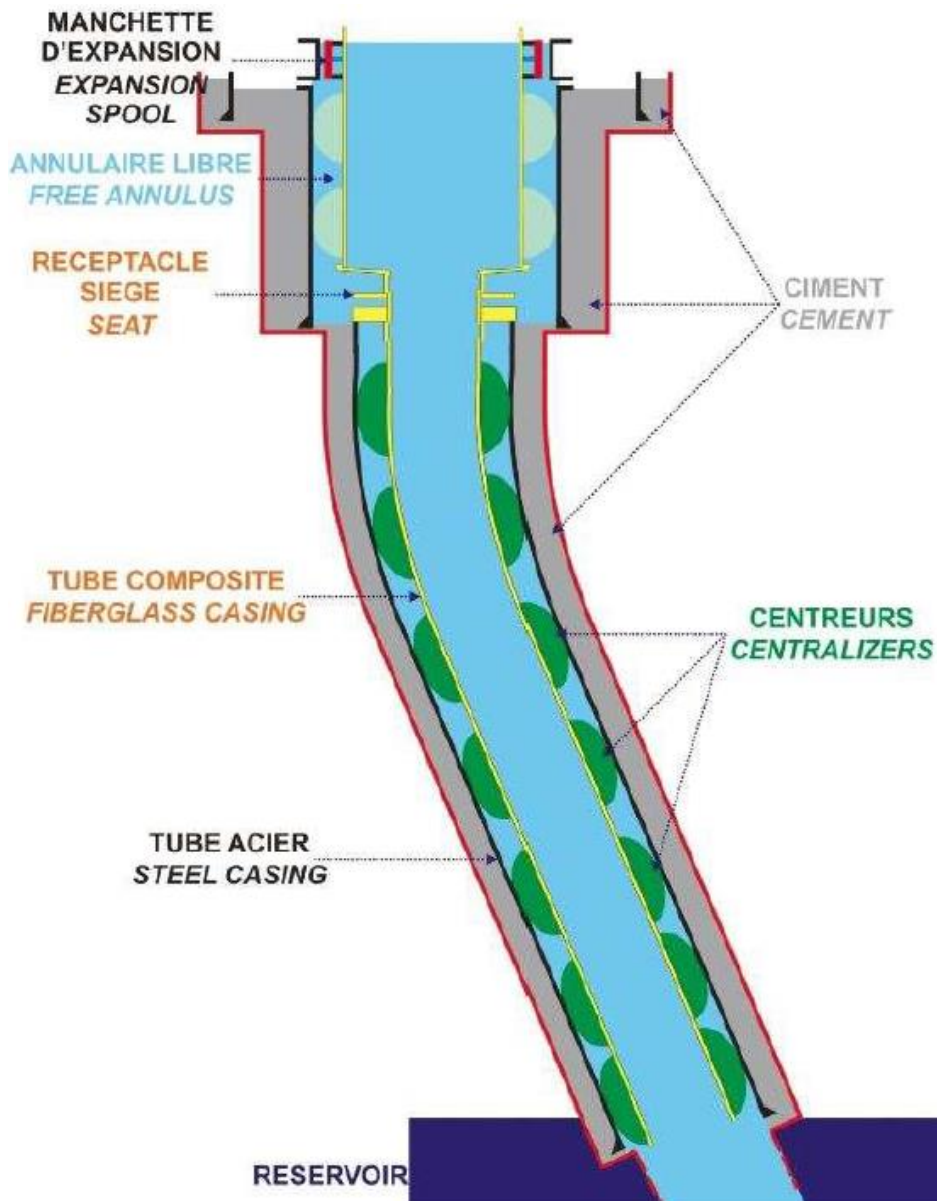
KUVA 10. Pariisin sedimenttikerrokset (33)

Riippuen nesteen suolapitoisuudesta geotermistä lämpöä on hankittu Pariisin sedimenttivajoaman Albian ja Neocomian pohjavesivarannoista käyttämällä yhtä kaivoa ja Doggerin vesivarannosta käyttäen kaivoparia. Kaivopari, jota käytetään suuressa osassa järjestelmiä Pariisin sedimenttivajoaman alueella, koostuu suljetusta putkistopiiristä, jossa kierrätetään geotermistä vettä. Geoterminen neste nostetaan tuotantokaivosta, minkä jälkeen se kulkee lämmönsiirtimen läpi ja luovuttaa lämmön jakeluverkkoon. Sen jälkeen vesi injektoidaan taikaisin pohjavesivarastoon. Kuvassa 11 on esitetty periaatteellinen kuva geotermisestä putkistosta, joka hyödyntää Doggerin pohjavesivarantoa. (34.)



KUVA 11. Kolmen kaivon yhdistelmä (35, s. 11)

Doggerin pohjavesivarantoa hyödynnetään myös kolmen kaivon yhdistelmällä, jossa kaksi kaivosta toimii injektiokaivoina ja yksi tuotantokaivona. Esimerkiksi Melun l'Almontin järjestelmä siirtyi kaksikaivoisesta järjestelmästä uuteen kolmikaivoiseen järjestelmään. Järjestelmä tehdään muuttamalla kaksi vanhaa kaivoa injektiokaivoiksi ja tekemällä uusi tuotantokaivo, joka hyödyntää uutta kaivotekniikkaa. Kuvassa 12 on konsepti uudesta tuotantokaivosta, joka hyödyntää teräskehystä, sekä vapaasti ripustettua lasikuitulinjausta. Konseptin tuotantokaivo on käytössä Bonneuil-sur-Marnen geotermisessä kaukolämpöjärjestelmässä. Uuden tuotantokaivotekniikan avulla voidaan välttyä rapautumilta ja korroosiolta sekä parantaa vedenvirtausta. (36; 37.)

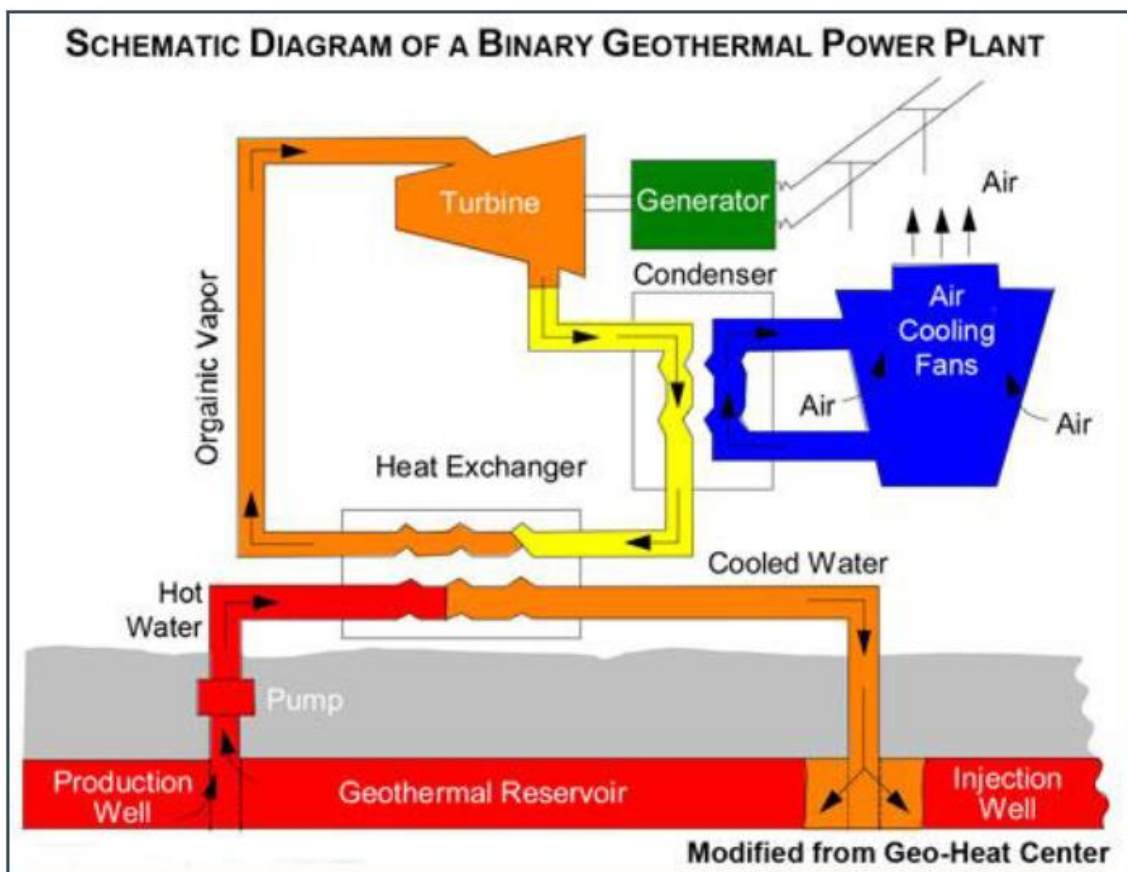


KUVA 12. Yhdistetty teräs- ja lasikuitukehyskaivo (37)

Ranskassa on myös maailman ensimmäinen geoterminen voimalaitos, joka on tyypiltään EGS-järjestelmä. Soultz-sous-Forêtsin EGS-voimalaitos sijaitsee pohjois-Alsacean alueella, *Vallée du Rhinissa* (myös *Upper Rhine Graben* tai URG) Saksan ja Ranskan välissä. Järjestelmä koostuu kolmesta 5000 metriä syvästä kaivosta, jotka on porattu syväälle peruskallion graniittiin, joka tuli vastaan 1400 metrin syvyydessä. Peruskallion 200-asteisessa graniitissa sijaitsevat luonnolliset murtumat laajennettiin pumppaamalla niihin suuri määrä vettä, ja graniittiin syntyi vettä pitävä varanto. Peruskallioon luotiin näin murtumia hydraulisesti. Kaivojen alimmat osat luovat yhdessä geologisen lämmönsiirtimen. Kaivot porattiin epäsuoriksi ja vaikka pinnalla ne ovat vierekkäin, kaivojen

pohjat ovat noin 600 metriä erillään toisistaan. Yksi kaivoista on tuotantokaivo, joka tuottaa mas-
savirtauksella 30 kg/s 150-asteista vettä maanpinnalle. Kaksi kaivoista toimii injektiokaivoina, ja ne
pumppaavat viilennettyä 70-asteista vettä takaisin varantoon.

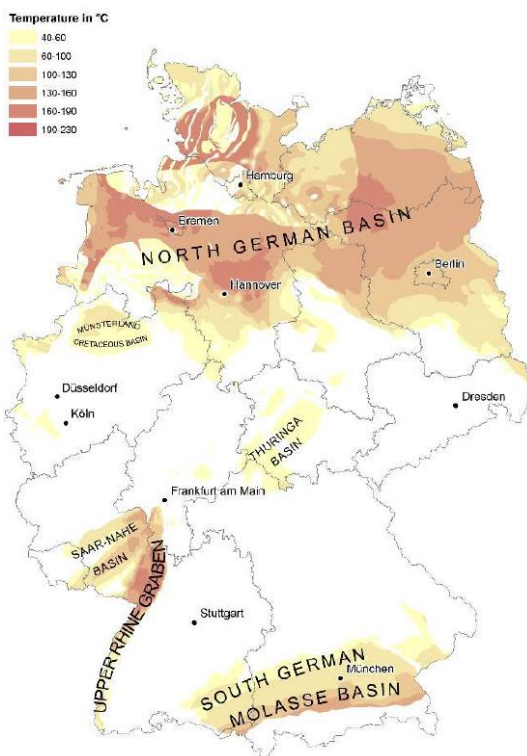
Geotermisen veden suuren suolapitoisuuden (100 g/L) takia lämpö otetaan talteen lämmönsiirti-
messä ORC-yksikön avulla, jossa lämmitetty orgaaninen neste paisuu generaattoriin yhdistetyn
turbiinin läpi. Sen jälkeen neste jäähdytetään ja tiivistetään lauhduttimessa, minkä jälkeen se kul-
kee ilmastointijärjestelmään. Ilmastointijärjestelmä on varustettu tuulettimilla, joiden tarkoitus on
jäähdyttää ORC-yksikköä. ORC-yksikön kapasiteetti on 1,7 MW ja vuosittainen sähkön tuotanto on
noin 11 GWh. EGS-projekti aloitettiin kesäkuussa vuonna 2008 ja järjestelmä saatiin täyteen toi-
mintaan vuoden 2016 puolivälissä. (24, s. 79; 38, s. 1.) Kuvassa 13 on periaatteellinen kuva ORC-
voimalaitoksesta, joka hyödyntää Orgaanista Rankine-kiertoa.



KUVA 13. ORC-voimalaitos (19, s. 22)

5.3 Saksa

Vuoden 2018 lopussa Saksassa oli toiminnassa 180 geotermistä energiaa hyödyntävää laitosta. Osa laitoksista on geotermisiä kylpylöitä. Laitosten asennettu kapasiteetti oli yhteensä noin 394,6 MW ja geoterminen lämmöntuotanto oli 1377,5 GWh vuonna 2017. Kaukolämmityslaitokset kattivat suurimman osan geotermisestä kapasiteetistä 334,5 MW:lla ja 893,3 GWh:n lämmöntuotannolla. Geoterminen sähkön tuotanto perustuu Saksassa ORC-voimalaitoksiin, jotka hyödyntävät orgaanista Rankine- tai Kalina-kiertoa. Nämä tekniikat mahdollistavat sähköntuotannon jopa 100-asteisesta lämmönlähteestä. Vuoden 2018 lopussa yhdeksän geotermistä laitosta tuotti sähköä Saksan sähköverkkoon ja asennettu kapasiteetti oli yhteensä 38 MW. Geologisesti suotuisien olosuhteitten takia geotermiset kaukolämpö ja voimalaitokset sijaitsevat Molasse-sedimenttivajoaman alueella Etelä-Saksassa, Pohjois-Saksan hautavajoamassa tai Upper Rhine Graben hautavajoamaa pitkin (kuva 14). (39.)



KUVA 14. Saksan pohjavesivarasto alueet (39, s. 2)

5.3.1 Riem, München

Vuonna 2003 Riemissä, Münchenin kaupungissa, Saksassa porattiin kaksi syvää porakaivoa entiselle lentokentälle muodostaen geoterminen kaivopari. Projektin tarkoitus oli korvata 8 MW maakaasukäyttöistä kattilakapasiteettia München-Riem kaupunginosassa geotermisellä energialla, jossa lämmönlähteenä olisi pohjavesivarasto. Kaivojen etäisyys pinnalla on vain 15,5 metriä, mutta koska kaivot porattiin epäsuorasti, kaivojen pohjat ovat 2200 metrin päässä toisistaan. Ensimmäisen kaivon syvyydeksi saatiin 3275 metriä, joka vastaa 3019 metriä pystysuoraa syvyyttä. Geotermiselle vedelle saatiin lämpötilaksi 92,8 °C, joka oli suurempi kuin ennustettu. Seuraavan kaivon poraamisessa voitiin hyödyntää ensimmäisen kaivon poraamisesta saatua tieto geologiasta ja kaivolle saatiin syvyydeksi 3225 metriä, joka vastaa 2747 metriä pystysuoraa syvyyttä. Tällä hetkellä kaivopari tuottaa 94-asteista vettä 75 litraa sekunnissa ja järjestelmän lämpökapasiteetti on noin 10 MW. (40.)

5.3.2 Prenzlau

Prenzlauin kaupunki sijaitsee positiivisen geotermisen poikkeaman alueella. Vuonna 1994 valmistunut syvä maalämpökaivo (Deep borehole heat exchanger) asennettiin paikalla sijaitsevaan valmiiksi porattuun geotermiseen porakaivoon. Geoterminen kaivo ei ollut tuottanut haluttua määrää vettä, joten se muunnettiin syväksi maalämpökaivoksi ja porakaivoa syvennettiin 2786 metrin syvyyteen. Kaivon pohjalla saatiin lämpötilaksi 108 °C, ja lämmönsiirtoputken sisähalkaisija on 24,76 cm 950 metriin asti ja 16,82 cm pohjaan asti. Lämmönsiirtopinta-alaa putkistolle tuli yhteensä 1463 m², ja välittäjäainetta kierrätettiin putkistossa vaihtelevalla virtauksella 5 - 65 metriä minuutissa.

Välittäjäaineella kestää noin neljästä kymmeneen tuntiin kiertää putkistossa täysi kierros riippuen virtauksesta. Lämpölaitoksella, joka oli liitetty syvään maalämpökaivoon, oli 9,6 MW:n lämmityskapasiteetti. Kapasiteetti koostui geotermisestä osuudesta 0,6 MW ja öljy- ja kaasukattiloitten 9 MW:n kapasiteetistä. Geoterminen osuus lämpölaitoksella koostui lämmönsiirtimestä ja lämpöpumpusta. Lämpövirta lämmönsiirtimeltä oli 150 kW ja lämpöpumpulta 350 - 500 kW. Lämpökaivosta tullut vesi oli noin 60-asteista, ja se jäähdyi 15-asteiseksi höyrystimessä. Asiakkaiden puolella saatiin lämpötilaksi 40 - 50 °C lämmitykselle ja 65 °C lämpimälle käyttövedelle. Lämmöntuotannon syvän maalämpökaivon osuus oli 120 kW lämmitykselle ja 18,5 kW lämpimälle käyttövedelle. (41; 39.)

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia geotermisen energian hyödyntämistä maailmalla. Tarkoituksena oli esitellä esimerkkitoteutuksia ja tekniikoita geotermisen energian hyödyntämisestä. Työssä keskityttiin niin kutsuttuun keskisyvään ja syvään geotermiseen energiaan sekä esimerkkitoteutuksiin valikoitui tapauksia Euroopasta. Lisäksi työssä tutkittiin, miten erilaiset geologiset olosuhteet vaikuttavat maasta hyödynnettävän geotermisen energian määrään. Työssä esiteltiin myös aiheeseen liittyvää sanastoa sekä termejä.

Ilmastokriisin takia geotermisen energian hyödyntäminen on kasvussa ympäri maailmaa ja tekniikoita kehitetään jatkuvasti. Vuoden 1970-luvun öljykriisin takia monessa maassa alettiin tutkia geotermisen energian hyödyntämistä ja monet projektit saivatkin alun tuolloin. Kehitys kuitenkin hidastui huomattavasti, kunnes ilmastokriisin myötä tekniikoita alettiin jälleen kehittää. Geotermisen lämmön hyödyntäminen onkin askel kohti hiilidioksidivapaata lämmöntuotantoa.

Geotermistä lämpöä voidaan hyödyntää monella eri tekniikalla, jotka sopivat erilaisiin käyttökohteisiin ja lämmönlähteisiin. Geotermistä lämpölaitosta suunniteltaessa on tärkeää selvittää lämpötilan ja lämmönjohtavuuden lisäksi alueen geologiset olosuhteet, jotta saadaan käsitys kallioperän koostumuksesta ja rakenteesta, irtomaan paksuudesta alueella sekä pohjaveden korkeudesta ja sen mahdollisesta liikkumisesta kallioperässä. Selvittämällä alueen geologiset olosuhteet voidaan haakea paikkoja, joissa onnistumisprosentti geolämpölaitokselle on parempi.

Geotermisen lämmön hyödyntäminen on Suomessa vielä uusi ja vähän tutkittu lämmöntuotantomuoto, ja siihen liittyvä tutkimus on ajankohtaista ja tarpeellista. Tammikuussa 2020 käynnistyi Suomen ensimmäinen geolämpölaitos ja useita laitoksia on suunnitteilla ympäri Suomea.

LÄHTEET

1. Geotermistä energiaa maan uumenista. 2020. Turku Energia. Saatavissa: <https://www.turkuenergia.fi/turku-energia/vastuullista-energiaa/uusiutuvat-energialah-teet/geoterminen-energia/> Hakupäivä 14.02.2020.
2. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001, annettu 11 päivänä joulukuuta 2018, uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämiseksi (uudelleenlaadittu) Saatavissa: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>. Hakupäivä 14.02.2020.
3. Avustushakemus. 2020. Muhoksen kunta. Kuntien ilmastohankkeet-avustushaku. Ympäristöministeriö.
4. Juuti, Petteri 2020. Suomen ensimmäinen geolämpölaitos käynnistyi – se saattaa korvata kivihiilen ja mullistaa lämmöntuotannon: "Olen suorastaan voitonriemuinen". Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-11158359>. Hakupäivä 20.01.2020.
5. QHeat -Konsepti 2020. Quantitative Heat Oy. Saatavissa: <https://www.qheat.fi/fi/konsepti/>. Hakupäivä 27.02.2020.
6. Geoterminen energiapotentiaali, varastoitunut geoenergia. Suomi. Saatavissa: <https://gtkdata.gtk.fi/maankamara/>. Hakupäivä 04.02.2020.
7. Ragnarsson, A 2016. Geothermal Energy Use, Country Update for Iceland. European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France, 19-24 Sept 2016. Saatavissa: https://www.geothermal-energy.org/cpdb/record_detail.php?id=27341. Hakupäivä 12.02.2020.
8. Mertoglu, O - Simsek, S - Basarir, N 2016. Geothermal Energy Use, Country Update for Turkey. European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France, 19-24 Sept 2016. Saatavissa: https://www.geothermal-energy.org/cpdb/record_detail.php?id=27357. Hakupäivä 12.02.2020.
9. Sanner, B 2019. Summary of EGC 2019 Country Update Reports on Geothermal Energy in Europe. European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands, 11-14

June 2019. Saatavissa: <http://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/CUR-00-Summary-Europe.pdf>. Hakupäivä 03.02.2020.

10. Kaya, T 2012. Geothermal Project Development in Turkey — An Overview with Emphasis on Drilling. GRC Transactions, Vol. 36, 2012. Turkish Petroleum International Company, Ankara, Turkey. Middle East Technical University, Ankara, Turkey. Saatavissa: https://www.geothermal-energy.org/cpdb/record_detail.php?id=13949. Hakupäivä 13.02.2020.
11. Scali, M - Cei, M - Tarquini, S - Romagnoli, P 2013. The Larderello – Travale and Amiata Geothermal fields: case histories of engineered geothermal systems since early 90's. European Geothermal Congress 2013, Pisa, Italy, 3-7 June 2013. Saatavissa: https://www.geothermal-energy.org/cpdb/record_detail.php?id=19469. Hakupäivä 17.02.2020.
12. Kukkonen, I 2000. Geothermal energy in Finland. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan, May 28 – June 10, 2000. Saatavissa: https://www.geothermal-energy.org/cpdb/record_detail.php?id=4317. Hakupäivä 27.01.2020.
13. Breilin, O - Huusko, A - Martinkauppi, A - Putkinen, N - Wik, H 2013. Oulun geoenergiapotentiaalin kartoitus, Geologian tutkimuskeskus, 2013, Kokkola, Länsi-Suomen yksikkö. Saatavissa: https://www.ouka.fi/c/document_library/get_file?uuid=1f321dbe-e25d-4ee2-bdcd-c87c31a66450&groupId=64220. Hakupäivä 13.01.2020.
14. Kallio, J 2019. Geothermal Energy Use, Country Update for Finland. European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands, 11-14 June 2019. Saatavissa: <http://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/CUR-10-Finland.pdf>. Hakupäivä 13.01.2020.
15. Laatikainen, Tuula 2019. Turun syvälämpöhanke edistyy. Tekniikka & Talous 22.11.2019.
16. Koskinen, Anu Leena 2018. Tampereelle porataan jopa 8 kilometrin syvyyteen lämpökaivo, joka lämmittäisi tuhat pientaloa. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10559627>. Hakupäivä 10.03.2020.

17. Palomaa, Antti 2018. Tampereen Hiedanrantaan suunnitellaan yli seitsemän kilometrin syvyistä lämpökaivoa. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10474213>. Hakupäivä 10.03.2020.
18. Banks, David 2012. An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling. John Wiley & Sons, Incorporated.
19. Atkins Deep Geothermal Review Study, Final Report, Department of Energy & Climate Change (DECC), October 2013. Saatavissa: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/251943/Deep_Geothermal_Review_Study_Final_Report_Final.pdf. Hakupäivä 17.02.2020.
20. Muhoksen muodostuma. 2020. Tunturisusi. Saatavissa: <https://www.tunturisusi.com/muhoksenkivikunta/>. Hakupäivä 4.2.2020.
21. Tynni, R 1978. Muhoksen muodostuman mikrofossiilitutkimuksen tuloksia. Geologian tutkimuskeskus, Espoo, Suomi 1978. Saatavissa: http://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_030.pdf. Hakupäivä 04.02.2020.
22. Suomen geologinen yleiskartta: kivilajikartan selitys; lehdet C 5 - B 5 Oulu - Tornio = The general geological map of Finland. Saatavissa: http://tupa.gtk.fi/kartta/kivilajikartta400/kls_c5_b5.pdf. Hakupäivä 04.02.2020.
23. Kari, Mikko 2020. Tekninen Johtaja, Muhoksen kunta. Suomi. Keskustelut tammikuu 2020.
24. Stober, I – Fritzer, T – Obst, K – Agemar, T – Schulz, R 2017. Deep Geothermal Energy – Principles and Application Possibilities in Germany. Leibniz Institute for Applied Geophysics (LIAG). Saatavissa: https://www.geotis.de/homepage/sitecontent/info/publication_data/public_relations/public_relations_data/LIAG_Deep_Geothermal_Energy.pdf. Hakupäivä 12.03.2020.
25. Weber, J – Moeck, I 2019. Heat transition with geothermal energy, Chances and opportunities in Germany - Leibniz Institute for Applied Geophysics (LIAG). Saatavissa: https://www.geotis.de/homepage/sitecontent/info/publication_data/public_relations/public_relations_data/Liag-Brosch-waermewende-eng.pdf. Hakupäivä 12.03.2020.

26. Menjoz, A. The geothermal resources in France and the use of geothermal heat. Institut Mixte de Recherches Géothermiques (BRGM/AFME). France. Saatavissa: <https://orkustofnun.is/gogn/flytja/JHS-Skjol/UNU%20Visiting%20Lecturers/Menjoz01.pdf>. Hakupäivä 19.02.2020.
27. Smith, M 2000. Southampton energy scheme. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan, May 28 – June 10, 2000. Saatavissa: https://www.geothermal-energy.org/cpdb/record_detail.php?id=3966. Hakupäivä 28.01.2020.
28. Geothermal energy, District heating scheme, SOUTHAMPTON (United Kingdom), Energie-Cités 2001. Saatavissa: https://geothermalcommunities.eu/assets/elearning/5.13.SOUTH_EN.PDF. Hakupäivä 18.02.2020.
29. Urban Community Heating and Cooling: the Southampton District Energy Scheme. International Energy Agency. Saatavissa: https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/DHC_CHP_Case_Studies/KN1640_Southampton_v2.pdf. Hakupäivä 18.02.2020.
30. Thomas, L.P - Holliday, D 1982. Southampton no.1 (Western Esplanade) geothermal well: geological well completion report. Institute of Geological Sciences. Saatavissa: <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/514817>. Hakupäivä 28.01.2020.
31. Ledingham, P - Cotton, L - Law, R 2019. The United Downs Deep Geothermal Power Project. Proceedings, 44th Workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University, Stanford, California, February 11-13, 2019. Saatavissa: https://www.geothermal-energy.org/cpdb/record_detail.php?id=29039. Hakupäivä 28.01.2020.
32. Boissavy, C – Henry, L – Genter, A – Pomart, A – Rocher, P – Schmidlé-Bloch, V 2019. Geothermal Energy Use, Country Update for France. European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands 11-14 June 2019. Saatavissa: europeangeothermal-congress.eu/wp-content/uploads/2019/07/CUR-11-France.pdf. Hakupäivä 22.01.2020.
33. Bonte, D – Wees, J – Guillou-Frottier, L – Bouchot, V – Serrano, O 2015. Deep Temperatures in the Paris Basin from Tectonic-Heat Flow Modelling. Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015. Saatavissa: https://www.geothermal-energy.org/cpdb/record_detail.php?id=23223. Hakupäivä 19.02.2020.
34. Boissavy, C – Grière, O 2014. New Geothermal Targets in the Paris Basin (France). French Geothermal Association of Professionals, Paris, France. Saatavissa:

- https://www.geothermal-energy.org/cpdb/record_detail.php?id=24894. Hakupäivä 19.02.2020.
35. Bugarel, F 2012. Recent geothermal projects within the Paris Basin. International Geothermal Conference Freiburg 2012, Workshop 2 – International Projects, May 23, 2012. Saatavissa: https://www.cfgservices.fr/wp-content/uploads/igc2012_geothermie-alle-magne-freiburg_cfg.pdf. Hakupäivä 31.03.2020.
 36. Ungemach, P – Antics, M. Geothermal reservoir management. A thirty-year practice in the Paris basin. Geoproduction consultants (GPC), Paris, France. Saatavissa: http://engine.brgm.fr/web-offlines/conference-Launching_Conference_-_Orléans,_France/S5_-_Session_5/42-paper-0-ENGINE_LaunchingConference_12-15022006_Ungemach.pdf. Hakupäivä 27.02.2020.
 37. Boissavy, C – Henry, L – Genter, A – Pomart, A – Rocher, P – Schimdlé-Bloch, V 2019. Geothermal Energy Use, Country Update for France. European Geothermal Congress 2019 Den Haag, The Netherlands, 11-14 June 2019. Saatavissa: <http://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/CUR-11-France.pdf>. Hakupäivä 21.01.2020.
 38. Ravier, G – Seibel, O – Pratiwi, A – Mouchot, J – Genter, A – Ragnarsdóttir, K – Senglen, X 2019. Towards an optimized operation of the EGS Soultz-sous-Forêts power plant (Upper Rhine Graben, France). European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands, 11-14 June 2019. Saatavissa: <http://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/198.pdf>. Hakupäivä 13.03.2020.
 39. Weber, J – Bron, H – Moeck, I 2019. Geothermal Energy Use, Country Update for Germany 2016-2018. European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands, 11-14 June 2019. Saatavissa: <http://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/CUR-12-Germany.pdf>. Hakupäivä 13.02.2020.
 40. Riem 2020. Erdwerk GmbH. Saatavissa: <https://www.erdwerk.com/en/riem>. Hakupäivä 14.01.2020.

41. Sapinska-Sliwa, A – A. Rosen, M – Gonet, A – Sliwa, T 2015. Deep Borehole Heat Exchangers – A Conceptual Review. Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19–25 April 2015 Saatavissa: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/28045.pdf>. Hakupäivä 02.04.2020.