

Antti Rasku

# GEOTERMISTEN LAITOSTEN SOVELTUVUUS SUOMEEN

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Seppo Syrjälä  
12/2021

# TIIVISTELMÄ

Antti Rasku: Geotermisten laitosten soveltuvuus Suomeen  
Applicability of Geothermal plants in Finland  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, Ympäristö- ja energiatekniikka  
12/2021

---

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi fossiilisista polttoaineista on luovuttava energiantuotannossa, ja etsittävä tilalle uusia vähäpäästöisempiä energialähteitä. Geotermisen energia on yksi uusiutuvan energian muodoista, jonka energia on peräisin maapallon ytimessä sijaitsevien radioaktiivisten aineiden hajoamisesta. Geotermistä energiaa on hyödynnetty jo pitkään luonnollisista esiintymistä kuten kuumista altaista ja lähteistä, mutta nykyään tuotantoa pyritään tehostamaan luomalla keinotekoisia esiintymiä syvälle kallioperään. Työn tavoitteena on kerätä tietoa geotermisen energian hyödyntämisestä ja löytää keskeisimmät haasteet kehitykselle Suomessa.

Nykyään parhaana tapana hyödyntää geotermistä energiaa pidetään EGS-laitosta (Enhanced Geothermal Systems), jonka tavoitteena on luoda toimiva geotermisen lähde paikkaan, joka ei sellaisenaan sovellu geotermisen energian käyttöön. Tämä toteutetaan poraamalla kallioperään vähintään kaksi syvää kaivoa, joita stimuloimalla kasvatetaan kallioperän veden- ja lämmönjohtokykyä. Maan pinnalla sijaitsee laitos, joka kierrättää vettä kallioperässä kaivoja pitkin ja muuntaa vastaanotetun lämmön sähköksi tai käyttää sen suoraan lämpönä.

Geotermisen laitoksen ei tuota käyttövaiheessaan lainkaan kasvihuonekaasupäästöjä, mutta rakennusvaiheessa etenkin kaivojen poraaminen kuluttaa paljon fossiilisia polttoaineita. Niistä koituvia kasvihuonekaasupäästöjä voidaan vähentää sähköistämällä porauskoneistoa, ja tuottamalla niiden tarvitsema sähkö vähäpäästöisesti. Lisäksi porausvaiheessa pienten maanjäristysten riski kasvaa, joten seismistä aktiivisuutta on monitoroitava ympäröivien ihmisten ja rakennusten suojelemiseksi. Geotermisillä laitoksilla on suuret alkukustannukset johtuen poraamisen kalleudesta, mutta muiden uusiutuvien energialähteiden tapaan pienet muuttuvat kustannukset. Tuotetun energian hinta on muita uusiutuvia vakaampi, sillä geotermisen laitoksen kykenee tuottamaan energiaa tasaisesti ympäri vuorokauden.

Suomessa geotermiset laitokset ovat vasta pilottivaiheessa, mutta Euroopassa on jo toiminnassa olevia laitoksia. Niistä ensimmäinen kaupallisen koon voimalaitos sijaitsee Ranskassa. Työssä tarkastellaan kahta ranskalaista laitosta, joista toinen tuottaa sähköä ja toinen lämpöä. Muita tarkasteltavia laitoksia ovat Italian Ferraran laitos, joka toimii osana kaukolämpöjärjestelmää, sekä Gross Schönebeckin koelaitos, jossa testattiin geotermisen laitoksen suorituskykyä.

Suomen geologiset olosuhteet ovat haastavat geotermisen energian hyödyntämiselle, mutta suuren lämmöntarpeen vuoksi toimivat geotermiset lämpölaitokset ovat houkutteleva vaihtoehto tulevaisuuden Suomelle. Otaniemessä pian valmistuva EGS-pilottihanke antaa arvokasta tietoa geotermisen energian soveltuvuudesta käytännössä. Syvä poraaminen muodostaa suurimmat taloudelliset kustannukset ja riskit, joita tulee pienentää tuen ja lainsäädännöllisin keinoin. Lisää tutkimustietoa tarvitaan Suomessa jokaiselta geotermisen energian osa-alueelta, ja tätä tutkimusta tulee tukea taloudellisesti. Kokonaisuutena geotermistä energiaa voidaan pitää potentiaalisena vaihtoehtona korvaamaan fossiilisia polttoaineita myös Suomessa.

Avainsanat: geotermisen energia, geotermisen laitos, EGS

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. GEOTERMINEN VOIMALAITOS .....	3
3. SOVELTUVUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT .....	5
3.1 Ympäristö- ja terveysvaikutukset.....	5
3.1.1 Hiilidioksidipäästöt .....	5
3.1.2 Muut vaikutukset.....	6
3.2 Taloudelliset kustannukset.....	8
4. GEOTERMISIÄ HANKKEITA EUROOPASSA .....	10
4.1 Upper Rhine Graben .....	10
4.1.1 Soultz-sous-Forets, Ranska .....	11
4.1.2 Rittershoffen, Ranska .....	11
4.2 Ferrara, Italia.....	12
4.3 Gross Schönebeck, Saksa .....	13
5. SOVELTUVUUDEN HAASTEET SUOMESSA.....	14
5.1 EGS-pilottihanke Otaniemessä .....	14
5.2 Geologiset olosuhteet Suomessa.....	14
5.3 Kustannukset .....	15
6. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	17
LÄHTEET .....	18

# 1. JOHDANTO

Fossiilisten polttoaineiden runsas käyttö ja niistä vapautuneet kasvihuonekaasut ovat voimistaneet luonnollista kasvihuoneilmiötä, mikä on johtanut ilmastonmuutokseen. Tällä ilmiöllä ennustetaan olevan lukuisia haittavaikutuksia maapallon eri ekosysteemeihin, joten nykyistä kehityssuuntaa pyritään kääntämään siirtymällä vähäpäästöisempiin energialähteisiin.

Maapallo sisältää valtavan määrän uusiutuvaa energiaa, joka kattaa moninkertaisesti koko maailman energiantarpeen (Olasolo et al. 2015). Tämä energia on peräisin maapallon sulasta metalliytimeistä, jossa tapahtuu radioaktiivisten aineiden hajoamista. Ytimistä lämpö välittyy aina maankuoren yläosiin asti. Tätä Maan ytimeistä peräisin olevaa lämpöenergiaa kutsutaan geotermiseksi energiaksi.

Maalämpö eroaa käsitteenä geotermisestä energiasta, vaikka englanninkielinen termi *geothermal energy* sisältää lähteestä riippuen nämä molemmat. Maalämmössä käytettävä energia saadaan aivan maan pintaosista, vain joidenkin satojen metrien syvyydestä. Tämä energia on lähes kokonaan peräisin Auringosta, jonka säteilemä energia varastoituu maaperään. Sen sijaan geotermistä energiaa varastoidaan usean kilometrin syvyydestä, jossa energia on lähtöisin maapallon ytimeistä.

Geotermistä energiaa on hyödynnetty jo esihistoriallisina aikoina kuumien altaiden ja lähteiden muodossa, mutta ensimmäisen kerran sillä tuotettiin sähköä vasta 1900-luvun alussa (Olasolo et al. 2015). Tuolloinkin hyödynnettiin vain aivan maankuoren pintaosissa sijaitsevia valmiita kuumen veden esiintymiä, mutta vuosisadan loppupuolella alettiin tutkia keinotekoisien kuumavesialtaiden tuottamista kilometrien syvyyteen, jossa maankuoren lämpötila on huomattavasti korkeampi ja tasaisempi. Tätä tekniikkaa hyödyntäviä laitoksia kutsutaan nykyään EGS-laitoksiksi (Enhanced Geothermal Systems).

Ensimmäinen EGS-koevoimalaitoshanke aloitettiin Yhdysvalloissa vuonna 1973. Hankkeen takana oli Yhdysvaltalainen LASL (Los Alamos Scientific Laboratory), joka sai tukea lisäksi Japanista ja Saksasta. Vuoteen 1986 mennessä laitoksen kapasiteetti oli noin 10 MW, mitä voitiin pitää hyvänä tuloksena sekä todisteena EGS-laitosten potentiaalista. (Olasolo et al. 2015)

Tämä työ käsittelee geotermisille laitoksille tyypillisiä etuja ja haittoja, sekä tarkastelee muualla jo toteutuneita laitoshankkeita. Nämä hankkeet on rajattu Euroopan alueelle, jotta vallitsevat olosuhteet pysyvät vertailukelpoisina. Työn tavoitteena on kerätä tietoa geotermisen energian hyödyntämisestä sekä löytää keskeisimmät haasteet geotermisen energiantuotannon kehitykselle Suomessa. Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena.

Työn toisessa luvussa käsitellään geotermisen voimalaitoksen toimintaa, jonka jälkeen kolmannessa luvussa kerrotaan geotermisten laitosten soveltuvuuteen liittyvistä haasteista. Neljännessä luvussa tarkastellaan muualla Euroopassa toteutuneita geotermisiä hankkeita. Viidennessä luvussa arvioidaan, mitkä tekijät tuottavat Suomessa suurimmat haasteet geotermisen energian hyödyntämiselle, ja lopuksi tehdään yhteenveto kirjallisuuskatsauksen tuloksista.

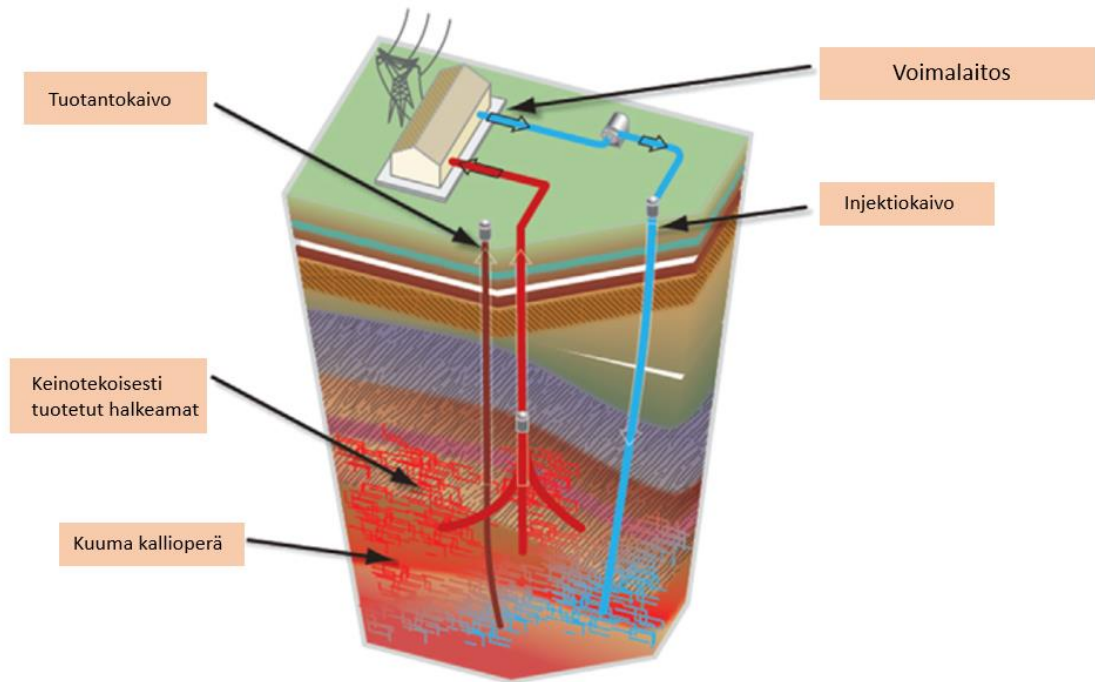
## 2. GEOTERMINEN VOIMALAITOS

Geotermistä energiaa on ennen pidetty samankaltaisena energianlähteenä öljyn kanssa; Energiantuotantoa varten on ensin löydettävä kannattava maanalainen esiintymä, josta raaka-ainetta pumpataan maan pinnalle ja muunnetaan se energiaksi. Kun esiintymä on tyhjentynyt, toiminta alueella loppuu. (Olasolo et al. 2015) Geotermisen energian tapauksessa kyseinen raaka-aine on maaperässä sijaitseva kuuman veden lähde, jonka sisältämä lämpö voidaan muuttaa sähköksi tai käyttää sellaisenaan lämmitykseen. Kuitenkin tällä tavoin geotermisen energian hyödyntäminen on rajoittunut muutamiin paikkoihin, joista tarpeeksi laadukkaita esiintymiä löytyy.

Koska perinteinen tapa tuottaa geotermistä energiaa on hyvin rajoittunutta ja kasvunvara on vähän, on keskustelun aiheeksi noussut uudet tavat hyödyntää geotermistä energiaa. Nykyään parhaana tapana pidetään EGS-voimalaitoksia, joiden tavoitteena on parantaa geotermisen lämmön talteenottoa paikoissa, joissa valmista lämmönlähdettä ei ole, tai jossa maaperän lämmönjohtavuus on huono (Majer et al. 2007). Tämä toteutetaan luomalla keinotekoisesti luvun alussa kuvatun kaltainen maanalainen kuumen veden lähde. Koska vain kallioperän ominaisuuksilla on merkitystä eikä valmista lähdettä tarvita, kasvaa käyttökelpoisten alueiden määrä moninkertaiseksi.

EGS:n toiminta perustuu kallioperään porattaviin syviin kaivoihin, joihin suihkutetaan vettä korkeassa paineessa. Tämä saa kallioperän kiviaineksen luonnolliset halkeamat avautumaan, mikä lisää kallioperän lämmönjohtavuutta sekä päästää lämmönsiirrossa käytettävän väliaineen kulkemaan kallioperässä. Tätä kutsutaan kaivojen hydrauliseksi stimuloinniksi. Sen lisäksi kaivoja voidaan stimuloida myös kemiallisesti, jolloin kaivoihin syötetään kemikaaleja erinäisten mineraalien liuottamiseksi. Tämä avaa luotuja halkeamia entisestään lisäten virtauspotentiaalia. (Kumari & Ranjith 2019)

Poraus- ja stimuloituvaiheiden jälkeen ensimmäiseen kaivoon eli injektiokaivoon pumpataan lämmönsiirtoprosessissa käytettävää väliainetta, joka kulkee avautuneita halkeamia pitkin ja vastaanottaa samalla kallioperän lämpöenergiaa. Kuumennettu väliaine pumpataan takaisin maan pinnalle toista kaivoa pitkin. Tätä kaivoa kutsutaan tuotanto-kaivoksi. (Kumari & Ranjith 2019) Kuvassa 1 on esitetty EGS-voimalaitoksen perusosat.



Kuva 1: EGS-voimalaitos (muokattu lähteestä Olasolo et al. 2015).

Maan pinnalla sijaitsee voimalaitos, joka muuntaa kallioperästä talteen otetun lämpöenergian sähköksi, tai käyttää energian suoraan lämpönä lämmönvaihtimien kautta. Laitosprosessin jälkeen väliaine pumpataan takaisin injektiokaivoon, jolloin väliaineen kierrosta muodostuu suljettu prosessi. Tällainen suljettu EGS-voimalaitos ei tuota käyttövaiheessaan lainkaan kasvihuonekaasupäästöjä. (Olasolo et al. 2015)

## 3. SOVELTUVUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Geotermistä laitoshanketta kaavailtaessa täytyy kiinnittää huomioita niille tyypillisiin etuihin ja haittoihin, jotka vaikuttavat lopulliseen rakentamispäätökseen. Keskeisimpiä etuja ja haittoja käsitellään tässä luvussa, ja ne on jaettu kahteen alalukuun. Ensimmäisessä alaluvussa käsitellään ympäristö- ja terveysvaikutuksia, ja toisessa keskitytään taloudellisiin kustannuksiin ja kannattavuuteen.

### 3.1 Ympäristö- ja terveysvaikutukset

Vaikka geoterminen energia on luonteeltaan uusiutuvaa, aiheutuu senkin käytöstä joitain hiilidioksidipäästöjä erityisesti laitosten rakennusvaiheessa. Nämä päästöt on otettava huomioon mahdollisen päästövähennyspotentiaalın arvioinnissa. Lisäksi geotermisillä voimalaitoksilla voi olla myös muita vaikutuksia ympäristöön, joita käsitellään toisessa alaluvussa.

#### 3.1.1 Hiilidioksidipäästöt

Geotermisten voimalaitosten käyttö tuottaa hyvin vähän hiilidioksidipäästöjä. Päästöjä syntyy merkittävästi ainoastaan rakennusvaiheessa, jossa etenkin kaivojen poraamiseen käytettävä koneisto kuluttaa paljon fossiilisia polttoaineita. (Pan et al. 2018) Rakennusvaiheen jälkeen itse energian tuotantoprosessi ei tuota kasvihuonekaasupäästöjä, kuten luvussa 2 todettiin. Laitos tarvitsee kuitenkin toimiakseen sähköenergiaa verkosta pumppuja ja muuta laitteistoa varten. Kulutetun sähkön päästöt riippuvat sähkön tuotantotavasta. Jos kyseinen laitos tuottaa itse sähköä, saa se tarvittavan energiansa omasta tuotannostaan.

Pratiwi et al. (2018) ovat tutkineet kuluneiden materiaalien määriä ranskalaisella Rittershoffenin geotermisellä voimalaitoksella. Hiilidioksidipäästöjen kannalta avainasemassa ovat kulutetut fossiiliset polttoaineet, joita aiemmin mainittiin kuluvan etenkin kaivojen poraamisessa. Rittershoffenissa on porattu kaksi kaivoa, GRT-1 ja GRT-2, joihin on kulunut 297,4 ja 619,5 m<sup>3</sup> dieseliä. Litra dieseliä vapauttaa palaessaan noin 2,6 kg hiilidioksidia, josta kaivojen porausten päästöiksi saadaan 773 ja 1610 tonnia hiilidioksidia. GRT-2 kaivon suuremmat lukemat johtuvat suuremman syvyyden lisäksi poraamisen aikana kohdatuista hidasteista, jotka lisäsivät porauskoneiston käyttöaikaa.

Rittershoffenin tapauksessa itse porauskoneisto toimi sähköenergialla, mutta se tuotettiin paikan päällä dieselmoottorilla. Sähköä tarvittiin poraamisen aikana myös muun



avustavan laitteiston käyttöön, yhteensä noin 23 kWh porattua metriä kohden. Mahdollinen keino vähentää poraamisesta koituvia hiilidioksidipäästöjä on ottaa porauskaluston vaatima sähköenergia suoraan sähköverkosta. Tällöin päästöjen suuruus riippuu verkoon tuotetun sähkön päästöistä. Myös sähköverkon saavutettavuus työmaalta vaikuttaa vaihtoehdon kannattavuuteen. Rittershoffenin tapauksessa verkosta otetulla sähköenergialla olisi voitu säästää 8 % tuotetuista hiilidioksidipäästöistä. Poraamisen lisäksi Rittershoffenissa rakennettiin pitkä putki lämpölaitoksen ja tuotettua lämpöenergiaa käyttävän tehtaan välille, mikä lisäsi tuotettujen päästöjen kokonaismäärää. Putken rakentamisen päästöt pois suljettuna säästöt olisivat 12 %. (Pratiwi et al. 2018)

Viime vuosina tutkimuksen kohteeksi on noussut geotermisten laitosten kyky käyttää nestemäistä hiilidioksidia lämmönsiirron väliaineena veden sijaan. Vaikka laitoksen toimintaprosessi on ihannelanteessa suljettu kierto, hukkuu syötetystä väliaineesta silti käytännössä osa. Esimerkkinä luvussa 4 käsiteltävä Soultz-sous-Foretsin voimalaitos, jossa syötetystä vedestä saadaan takaisin vain 15–26 massaprosenttia (Sanjuan et al. 2016). Prosessissa häviävän hiilidioksidin haitat eivät olisi yhtä suuret kuin veden tapauksessa, sillä poistuva hiilidioksidi sitoutuu kallioperään erilaisten yhdisteiden muodossa. Hiilidioksidilla toimiva geotermisen laitoksen voisi siis toimia energiantuottajan lisäksi hiilinieluna. (Pan et al. 2018)

Song et al. (2020) ovat tutkineet nestemäisen hiilidioksidin ja veden eroja EGS-voimalaitoskäytössä. Heidän saamiensa tulosten mukaan hiilidioksidin ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti vettä enemmän olosuhteista riippuen, mutta oikeissa olosuhteissa hiilidioksidin käyttö on vettä kannattavampaa. Hiilidioksidin lämpöhäviöt tuotanto-kaivosta nostaessa ovat vettä suuremmat, mutta painehäviöt huomattavasti pienemmät. Näistä syistä hiilidioksidin käyttö vähentää tarvittavan pumppaustehon määrää, mutta asettaa erityisvaatimuksia esimerkiksi putkimateriaaleille hukkalämmön pienentämiseksi. Erityisen kannattavaa hiilidioksidin käyttö on matalammassa kaivoissa, joissa lämpöhäviöt eivät muodostu suhteessa yhtä suuriksi. Tärkeintä hiilidioksidin käyttöä arvioitaessa onkin löytää tasapaino lämpöhäviöiden ja painevoittojen välille.

### 3.1.2 Muut vaikutukset

Hiilidioksidipäästöjäkin enemmän huomiota ovat saaneet geotermisten hankkeiden yhteydessä mahdolliset pienet maanjäristykset, jotka ovat seurausta syvästä poraamisesta sekä paineistetun veden injektioista sekä poraus- että käyttövaiheissa. Kuitenkaan fyysistä vahinkoa aiheuttavia maanjäristyksiä ei ole havaittu missään geotermisessä hankkeessa. Suurin osa havaituista järistyksistä on korkeintaan kolmen magnitudin luokkaa, jotka eivät ole ihmisen tunnistettavissa ilman laitteistoa. Jotkin järistykset ovat ylittäneet

neljän magnitudin rajan, joista suurin (4,6 magnitudia) mitattiin 1980-luvulla. Kuitenkin seismisen aktiivisuuden monitorointi koko laitoksen elinkaaren ajan on tärkeää, jotta mahdollisiin maanjäristyksiin voidaan varautua. (Pan et al. 2018; Majer et al. 2007) Vaikka voimakkaat maanjäristykset ovat epätodennäköisiä, tekee niiden mahdollisuus niistä merkittävän ympäristöhuolen ympäröiville asukkaille (Stauffacher et al. 2015).

Stauffacher et al. (2015) tutkivat geotermisistä voimalaitoksista käytyjä keskusteluja sveitsiläisessä mediassa, ja nostivat esiin yleisimpiä argumentteja hankkeiden puolesta ja vastaan. Tulosten mukaan aiemmin mainitut maanjäristykset ovat yleisin argumentti geotermisiä hankkeita vastaan. Tutkimuksen mukaan median vaikutus yksilöiden mielipiteeseen aiheesta on suuri, sillä suurella osalla ihmisistä ei ole olemassa olevaa mieltä pidettä geotermisten voimalaitosten kaltaiseen uuteen teknologiaan. Yleisön mielipide on puolestaan tärkeä mm. projekteihin sijoittaneille, mikä näkyi esimerkiksi Sveitsin Baselissa, jossa projekti jouduttiin pysäyttämään maanjäristyksiä seuranneesta median ja yleisön reaktiosta. Tutkimuksen mukaan onnistuneiden hankkeiden taustalla on yleensä joko tiivis yhteistyö ympäröivien asukkaiden kanssa tai yhdistämällä geotermisen hankkeen jonkin muun ympäröivälle yhteisölle tärkeän hankkeen kanssa. (Stauffacher et al. 2015)

Laitoksen rakentamisvaiheessa erityisesti kaivojen poraamisesta ja testaamisesta koituu meluhaittoja. Muita melun lähteitä ovat esimerkiksi raskas työkoneisto ja pumpput. Porauksen äänentaso voi nousta jopa 120 desibeliin, jota pidetään myös kipukynnyksen rajana. (Soltani et al. 2021) Äänen voimakkuutta pyritään pienentämään porauksessa käytettävillä vaimentimilla, mutta siitä huolimatta meluhaitat on otettava huomioon etenkin lähellä asutusta sijaitsevilla hankkeilla.

Tuotantoprosessissa käytettävään veteen voi liueta kallioperästä metalleja ja puolimetalleja kuten elohopeaa, arseenia ja litiumia, jotka ovat haitallisia ihmisille ja ympäristölle maan pinnalla. Lisäksi liukeneva rikkivety tekee vedestä pahan hajuisen, mikä voi haitata lähistön asukkaita sekä laitoksen työntekijöitä. Useimmissa tapauksissa vesi kierrätetään suljetussa prosessissa takaisin kallioperään, mutta vuodon sattuessa ympäristö voi saastua. (Evans et al. 2008; Pan et al. 2018) Litiumin kohdalla kiinnostus sen talteenottoon prosessivesistä on kasvanut viime vuosina (Glaas et al. 2021). Litium on tärkeä alkuaine mm. akku- ja metalliteollisuudessa.

Geotermisten voimalaitosten on tutkittu tarvitsevan huomattavasti pienemmän maapinta-alan asennettua tuotantokapasiteettia kohden muihin voimalaitoksiin verrattuna. Geotermisesti sopivan alueen löytäminen on kuitenkin usein haasteellista ja aikaa vievää, ja sopivimmat alueet saattavat sijaita esimerkiksi rauhoitetuilla luontoalueilla. Lisäksi sopivan alueen sijainnin ollessa syrjässä, lisäkustannuksia muodostuu energian siirrosta

kanta- tai kaukolämpöverkkoon. (Pan et al. 2018; Soltani et al. 2021) Hyvällä aluevalinnalla on kuitenkin merkittävä vaikutus hankkeen onnistumiseen, mikä on nähtävissä esimerkiksi Ranskan Soultz-sous-Foretsin ja Rittershoffenin laitoksilla luvussa 4.

### 3.2 Taloudelliset kustannukset

Geotermisten voimalaitosten etuna on tasainen energiantuotanto vuoden- tai vuorokaudenajasta riippumatta, mikä näkyy myös tuotetun energian hinnan vakaudessa. Etenkin muiden uusiutuvien energiantuotantomuotojen kuten aurinko- tai tuulienergian kohdalla tuotantomäärät vaihtelevat voimakkaasti ajankohdan ja sääolosuhteiden mukaan. Fossiilisten polttoaineiden kohdalla puolestaan itse polttoaineen hinta vaihtelee, vaikuttaen suoraan tuotetun sähkön tai lämmön hintaan. Näiden epävarmuuksien poistuminen tekee geotermisen energian hinnasta luotettavan ja lisää energian tuotantovarmuutta. (Soltani et al. 2021)

Yksi tapa vertailla geotermisen energiantuotannon kustannuksia muihin uusiutuvan energian vaihtoehtoihin ovat LCOE-kustannukset (Levelized Cost of Energy). LCOE-kustannuksissa otetaan huomioon kaikki kustannukset koko voimalaitoksen elinkaaren ajalta, ja suhteutetaan ne tuotetun energian määrään. LCOE-arvo voidaan siis nähdä keskimääräisenä energian myyntihintana, jolla laitos ei tee tappiota. Tämä hinta kertoo suoraan laitoksen taloudellisesta kilpailukyvyystä, joka on keskeinen tekijä energiapoliittisessa päätöksenteossa. (Clauser & Ewert 2017)

Clauser ja Ewert (2017) muodostavat artikkelissaan LCOE-hinnan geotermiselle energialle ja vertaavat sitä muihin uusiutuviin energianlähteisiin sekä joihinkin fossiilisiin polttoaineisiin. Heidän mukaansa geotermisen energian muuttuvat kustannukset (käyttö- ja huoltokustannukset, polttoainekustannukset sekä hiilidioksidipäästöt) ovat muiden uusiutuvien tapaan hyvin matalat, sillä polttoaineesta ja tuotetuista hiilidioksidipäästöistä ei synny juurikaan kustannuksia. Toisaalta etenkin geotermisellä energialla on suuret ns. CAPEX-kustannukset (Capital Expenditure), jotka johtuvat suurista alkuinvestointikustannuksista. Tällä mittarilla fossiiliset polttoaineet ovat selkeästi uusiutuvia edullisempia. Suurten alkukustannusten keskiössä ovat kaivojen poraamisen kustannukset. Syvälle kallioperään poraaminen vaatii suurta ja kallista koneistoa, jonka käyttö ja huolto vaatii paljon työntekijöitä. Kaiken kaikkiaan kaivojen poraamisen kustannukset voivat olla jopa yli puolet koko projektin kustannuksista (Yost et al. 2014). Lisäksi valitun sijainnin lopullisesta kannattavuudesta on vaikea varmistua ennen porauksen toteuttamista (Pan et al.

2018). Epävarmuus sekä porauksen onnistumisesta että porauskohteen soveltuvuudesta yhdistettynä kokeilun suuriin kustannuksiin on yksi geotermisen energiantuotannon suurimmista haasteista.

Pelkät poraus- tai rakennuskustannukset eivät kuitenkaan kerro koko totuutta laitoksen taloudellisesta kannattavuudesta, vaan sen lisäksi on huomioitava esimerkiksi laitoksen käyttökerroin, hyötysuhde, ja aiemmin mainitut ympäristövaikutukset. Käyttökerroin tarkoittaa tuotettua energiaosuutta siihen energiamäärään verrattuna, jonka laitos tuottaisi energiaa käydessään keskeytyksettä täydellä teholla tietyssä aikayksikössä. Käyttökerroin on geotermisille voimalaitoksille usein hyvin korkea (yli 90 %) verrattuna muihin uusiutuviin energialähteisiin, kuten tuuli- tai aurinkoenergiaan (25 ja 14 %) (Li et al. 2014).

Rahallisia kustannuksia sekä investointiriskiä on pyritty vähentämään maailmalla toteutuneissa hankkeissa muutamien eri tavoin. Yksinkertaisimmillaan hankkeen rahoitukselle hankitaan kolmas osapuoli eli lainan takaaja, joka ottaa vastuun jäljelle jäävästä velkaosuudesta, jos hankkeen toteuttaja ei sitä kykene maksamaan. Joissain tapauksissa on ollut käytössä muunnelmä tästä mallista, jossa kolmantena osapuolena on takaajan sijaan hankkeen tukija, joka maksaa rahan lainaajalle tietyn osuuden riippumatta siitä, miten lainan maksu lopulta toteutuu. (Soltani et al. 2021)

Geotermisille hankkeille on myönnetty myös apurahoja varsinkin alun kenttätutkimuksia varten. Toisin kuin edellä mainituissa takaus- ja tukijametodeissa, tämän apurahan määrä on suoraan pois tarvittavan ulkopuolisen investoinnin suuruudesta, eikä vaikutus näy vasta hankkeen jälkeen. Apurahaa voi tarjota alan yritysten ja järjestöjen lisäksi myös hankkeen kohdevaltio. Toisena valtioiden toimivana vaikutuskeinona nähdään pitkän aikavälin (15–20 vuotta) syöttötariffit, joilla taataan tuotetulle energialle kilpailukykyinen hinta. (Soltani et al. 2021)

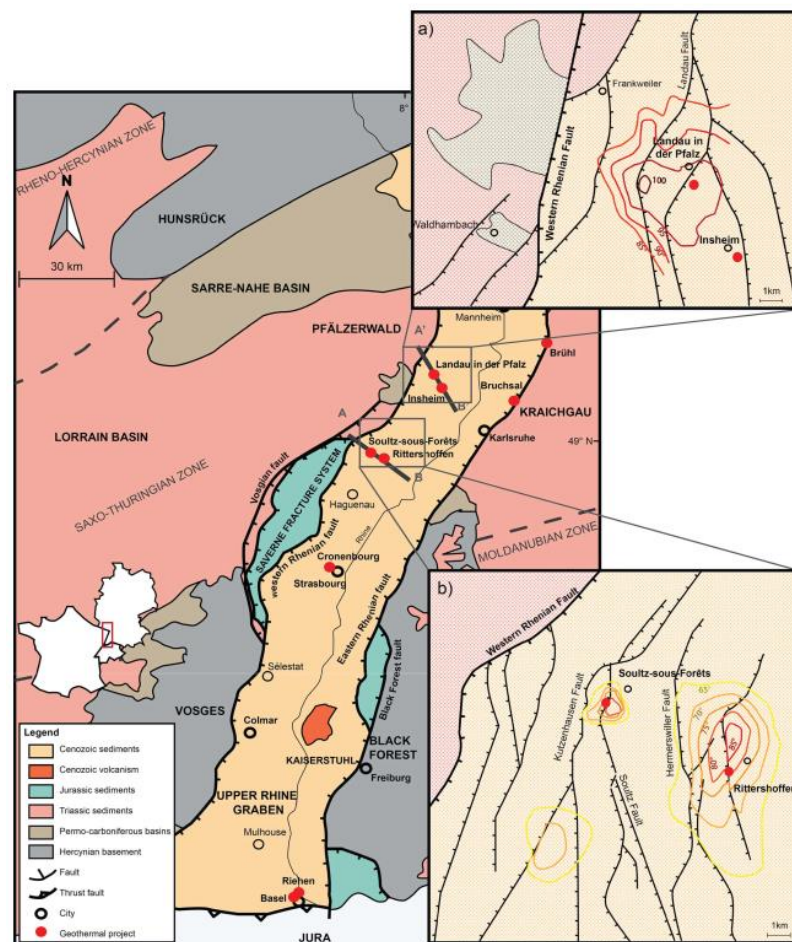
Kokonaiskulutarkastelussa geotermisen energia osoittautuu kilpailukykyiseksi muiden uusiutuvien energiamuotojen kanssa. Kuten aiemmin todettiin, geotermisen energia saa edun riippumattomuudestaan vuoden- tai vuorokaudenajasta, sääolosuhteista, sekä korkeasta käyttökertoimesta. Lisäksi käyttökertoimella ei ole yhtä suurta vaikutusta geotermisen energian kokonaiskustannuksiin kuin muilla energiantuotantomuodoilla. (Clauser & Ewert 2017) Jos paikallinen lainsäädäntö verottaa hiilidioksidipäästöjen tuottamisesta, saa geotermisen energia lisää kilpailuetua erityisesti fossiilisia polttoaineita vastaan yhdessä muiden uusiutuvien energialähteiden kanssa. Tuottoja voisi edelleen lisätä myymällä päästöoikeuksia, jos laitos kuuluu päästökaupan piiriin. (Pan et al. 2018)

## 4. GEOTERMISIÄ HANKKEITA EUROOPASSA

Vaikka Suomessa geotermiset laitokset ovat vasta rakennus- ja pilottivaiheessa, on muualla Euroopassa jo toiminnassa olevia laitoksia. Tämä luku käsittelee osaa niistä tarkemmin.

### 4.1 Upper Rhine Graben

Upper Rhine Graben (URG) on alue keski-Euroopassa, jonka kallioperässä sijaitsee paljon luontaisia halkeamia, tehden siitä otollisen alueen geotermisen energian hyödyntämiselle. URG on osa Euroopan kenotsooisien aikakauden halkeamaverkostoa, joka kattaa yli tuhannen kilometrin matkan Pohjanmereltä Välimerelle. Itse URG:n alue on pituudeltaan noin 300 km, ja leveydeltään 30–40 km. (Vidal & Genter 2018) Kuvassa 2 on esitetty Upper Rhine Grabenin alue sekä siellä sijaitsevat geotermiset hankkeet kartalla.



Kuva 2: Upper Rhine Graben (Vidal & Genter 2018).

Kuvasta nähdään alueen sijaitsevan Ranskan, Saksan ja Sveitsin välisellä raja-alueella. Aluetta rajaa lännessä Vosegesin vuoristo ja idässä Schwarzwaldin (Black Forest) vuoristo, joissa peruskallio on näkyvässä maan pinnalla (kuvassa harmaalla). Väliin jäävällä URG:n alueella (kuvassa keltaisella) peruskallion päällä on paksu kenotsooinen sedimenttikerros.

#### **4.1.1 Soultz-sous-Forets, Ranska**

Soultzin EGS-voimalaitos on maailman ensimmäinen kaupallisen koon EGS-voimalaitos. Sen rakentaminen aloitettiin jo vuonna 1987, ja kaupallinen kapasiteetti saavutettiin vuosien 1997–1998 aikana. Laitos sijaitsee URG:n alueella Strasbourgin kaupungin pohjoispuolella (kuva 2). Soultzin voimalaitos toimi pilottihankkeena EGS-teknologialle Euroopassa ja käytti hyödykseen URG:n alueella havaittuja luontaisia halkeamia. (Lu, 2017) Onnistumisellaan laitos antoi konkreettisen esimerkin koko URG:n alueen kannattavuudesta geotermisissä hankkeissa. Erityisen merkittävät löydöt hankkeen aikana olivat sedimenttikerroksen ja peruskallion rajalla sijaitsevat luonnolliset kanavat, joissa virtaa kuumaa merivettä (Glaas et al. 2021).

Soultziin on porattu kaiken kaikkiaan viisi kaivoa, joista kolme on yli 5 km syviä. Laitos tuottaa tänä päivänä 1,7 MW sähköenergiaa. (Pratiwi et al. 2018) Tuotantoa saatiin tehostettua asentamalla tuotantokaivoihin maanalaisia pumppuja, jotka lisäksi auttoivat pienentämään injektiokaivon syöttöpainetta (Lu, 2017). Tämä puolestaan vähentää injektio-pumpun vaatiman sähköenergian määrää.

#### **4.1.2 Rittershoffen, Ranska**

Rittershoffenin geoterminen lämpölaite sijaitsee lähellä Soultz-sous-Foretsin pilottivoimalaitosta (kuva 2) ja on ollut käytössä vuodesta 2016. Se tuottaa lämpöenergiaa 15 km päässä sijaitsevalle Roquette Freresin tehtaalle, joka on Euroopan johtava tärkkelyksen tuottaja. Rittershoffenin lämpölaite kattaa neljäsosan tehtaan tarvitsemasta energiasta (180 GW vuodessa), ja on Ranskan ensimmäinen teollisuudelle lämpöä tuottava geoterminen lämpölaite. (Pratiwi et al. 2018)

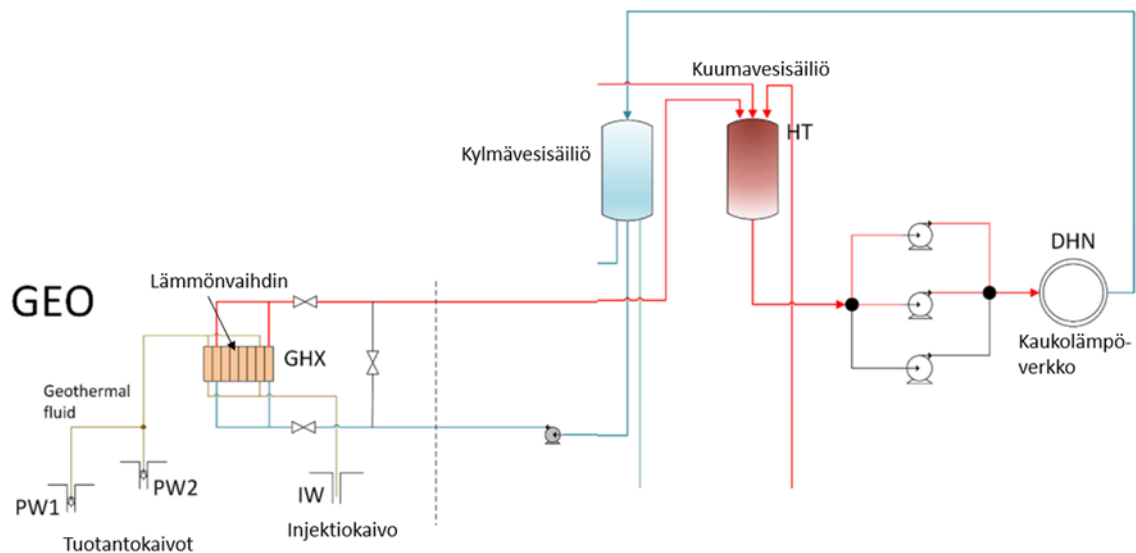
Rittershoffenin lämpölaitoksella on kuvan 1 mukaisesti yksi tuotantokaivo ja yksi injektiokaivo. Tuotantokaivon syvyys on 2708 m, ja injektiokaivon 2508 m. Tuotantokaivosta saatavan lämpimän veden energia siirretään lämmönvaihtimien avulla toiseen kiertoon, jossa kuuma vesi kulkee määränpäähensä Roquette Freresin tehtaalle. Käytön jälkeen viilentynyt vesi matkaa takaisin lämpölaitokselle uudelleen lämmitettäväksi muodostaen

suljetun kierron. Myös Rittershoffenin laitoksella käytetään maanalaista pumppua tuotantokaivossa Soultzin tapaan. (Pratiwi et al. 2018)

## 4.2 Ferrara, Italia

Ferraran kaupunki pohjois-Italiassa käyttää kaukolämpönsä tuottamiseen osittain geotermistä energiaa. Kaupungin lämpölaitos koostuu kolmesta osasta: geotermisestä laitoksesta, jätettä polttavasta CHP-voimalaitoksesta (Combined Heat and Power), sekä maakaasua polttavista erilliskattiloista. Yhdessä ne tuottivat vuonna 2017 171,1 GWh lämpöenergiaa, josta geotermisen energian osuus oli 36 %. (Manente et al. 2019)

Geoterminen lämpölaitos koostuu kahdesta tuotantokaivosta ja yhdestä injektiokaivosta, joiden syvyys on noin yksi kilometri. Aiemmin esitelyjen laitosten tapaan tuotantokaivoihin on asennettu pumput auttamaan tuotannon tasaisuudessa sekä painetasojen ylläpidossa. Tuotantokaivoista saatavan veden lämpötila on 102 °C. Lämpöenergia siirretään lämmönvaihtimella toiseen kiertoon, jonka vesi lämpenee 90–95-asteiseksi. Tämä vesi viedään kuumavesisäiliöön, kun taas tuotantokaivoista peräisin oleva vesi viedään takaisin maan alle injektiokaivoa pitkin. Kuumavesisäiliöön saapuu lämmitettyä vettä myös muista lämpölaitoksen systeemeistä, kuten CHP-voimalaitokselta. Säiliöstä vesi pumpataan lopulta kaukolämpöverkkoon. (Manente et al. 2019) Kuvassa 3 on esitetty geotermisen laitoksen toiminta kaaviona.



Kuva 3: Ferraran geoterminen lämpölaitos (muokattu lähteestä Manente et al. 2019)

Geotermisen laitoksen kaukolämpöverkkoon tuottama teho vaihtelee välillä 5–14 MW lämmön tarpeesta riippuen. Vastaavasti tuotantokaivoista otettu tilavuusvirta vaihtelee välillä 200–400 m<sup>3</sup>/h. Lämpimällä kesäkaudella tilavuusvirran tarve on vähäisempi, ja

toisen tuotantokaivon pumppu voidaan kytkeä pois päältä sähköenergian säästämiseksi. Tuotantokaivoista saatava vesi on pysynyt tasaisesti 102 °C lämpöisenä tuotannon alusta lähtien (1990), ja ennusteiden mukaan tuotantoa voidaan jatkaa vielä ainakin vuoteen 2050 saakka. (Manente et al. 2019)

### 4.3 Gross Schönebeck, Saksa

Gross Schönebeck on geotermisen energian koelaitos pohjois-Saksassa. Myös tämä laitos koostuu yhdestä injektio- ja yhdestä tuotantokaivosta. Injektiokaivona toimii vanha maakaasuesiintymän tutkimuskaivo, jota syvennettiin 4240 metristä 4309 metriin nykyistä hanketta varten. Tuotantokaivo porattiin alusta alkaen vuonna 2006, ja se saavutti lopulta 4404 m syvyyden. Kaivojen välinen etäisyys toisistaan on pohjalla noin 475 m, ja lämpötila noin 150 °C. (Blöcher et al. 2015)

Kumpaakin kaivoa käsiteltiin poraamisen jälkeen paineistetulla vedellä virtauksen tehostamiseksi. Virtauksen suuruutta mitattiin tuottavuusindeksillä (productivity index, PI), joka ilmoittaa saavutetun tilavuusvirran tunnissa suhteessa paineen yksikköön. Ennen käsittelyä injektiokaivon tuottavuusindeksi oli 0,97 m<sup>3</sup>/h Mpa ja tuotantokaivon 2,4 m<sup>3</sup>/h Mpa. Käsittelyn jälkeen molemmat tuottavuusindeksit olivat noin seitsenkertaiset, 7,5 m<sup>3</sup>/h Mpa ja 14,7 m<sup>3</sup>/h Mpa. (Blöcher et al. 2015)

Kaivojen käsittelyjen jälkeen loput testilaitoksesta valmistui kesäkuussa 2011, jonka jälkeen laitoksella alettiin tehdä virtausmittauksia. Kesäkuun 2011 ja marraskuun 2013 välillä tehtiin kaiken kaikkiaan 139 mittausta, joissa tuotetut volyymit vaihtelivat 4,4 ja 2567 m<sup>3</sup> välillä. Samalla tuottavuusindeksi kuitenkin laski voimakkaasti arvosta 8,9 m<sup>3</sup>/h Mpa arvoon 0,6 m<sup>3</sup>/h Mpa. Syinä pidetään mm. kaivojen täyttymistä mineraaleista, niiden seinämien tukkeutumista niihin pelkistyneen kuparin vuoksi, sekä aikaansaatuun halkeamien kestättömyyttä. (Blöcher et al. 2015) Tuottavuusindeksin laskusta huolimatta etenkin hydraulisen stimuloinnin tulokset laitoksella ovat merkittäviä.



## 5. SOVELTUVUUDEN HAASTEET SUOMESSA

Suomi tarvitsee pohjoisen sijaintinsa vuoksi paljon lämpöenergiaa suurimman osan vuodesta. Erilaisia lämpöpumppuratkaisuja on ollut Suomessa käytössä jo 2000-luvun alusta, ja varsinkin maalämmön sekä ilmalämpöpumppujen suosio on kasvanut tasaisesti viime vuosina (Kallio, 2019). Lämmöntarpeen ansiosta Suomeen on kehittynyt myös laajalle ulottuva kaukolämpöverkko, mikä lisää geotermisen energian hyödyntämismahdollisuuksia kaukolämpökäytössä.

### 5.1 EGS-pilottihanke Otaniemessä

Suomen ensimmäinen EGS-hanke aloitettiin vuonna 2015 Espoon Otaniemessä. Sen tarkoituksena on valmistuessaan saavuttaa 40 MW teho ja kattaa sillä noin 10 % Espoon kaukolämpötehosta. (Arola, 2019; Kallio, 2019) Ensimmäisen kaivon poraus- ja stimuloivaihe saatiin valmiiksi heinäkuussa 2018, jonka jälkeen toinen kaivo porattiin lopulliseen syvyyteensä stimuloinnin tulosten perusteella helmikuuhun 2020 mennessä. Kumminkin kaivot ovat yli 6 km syviä. (St1, 2021)

Keväällä 2020 suoritettiin vielä hydraulisia testejä, joilla selvitettiin vastastimuloinnin tarvetta toisen kaivon suunnasta. Tämän jälkeen alkoivat laitoksen maanpäällisen osan rakennustyöt, jotka saatiin suurilta osin valmiiksi alkuvuoteen 2021 mennessä. Rakennustyöt ovat kuitenkin tauolla kaivojen virtaustestien ajan, jotka ovat tällä hetkellä käynnissä. Virtaustesteissä mitataan kallioperän vedenjohtavuutta eri suuruisilla virtauksilla. Laitoksen käyttöönotto tulee siirtymään näiden testien vuoksi vuodelle 2022. (St1, 2021)

Otaniemen pilottilaitos tulee valmistuessaan olemaan maailman syvin geotermisen energian lämpölaitos. Sieltä saadut tulokset sekä kertynyt asiantuntemus ovat tärkeässä asemassa geotermisen energian kehitykselle Suomessa.

### 5.2 Geologiset olosuhteet Suomessa

Geotermisten resurssien hyödyntäminen vaatii karkeasti kaksi asiaa: Lämpötila kallioperässä tulee olla riittävän korkea, ja lämmönsiirron väliaineen tulee päästä kulkeutumaan kallioperässä. Ensimmäistä vaatimusta voidaan kuvata termisellä gradientilla, joka kertoo kuinka paljon kallioperän lämpötila kasvaa syvyyssuunnassa pituusyksikköä kohti. Toista vaatimusta kuvaa kallioperän permeabiliteetti, joka kertoo kallioperän huokoisuudesta.

Suomen kallioperän terminen gradientti on keskimäärin 8–15 °C/km, ja maan pintalämpötila vuoden keskiarvona 2–8 °C (Kallio, 2019). Tämä tarkoittaa sitä, että 100 °C lämpötilan saavuttamiseksi on hyvissäkin olosuhteissa porattava noin 6–8 km syvyyteen. Näin ollen Suomessa geotermistä energiaa on kannattavinta hyödyntää suoraan lämpönä, sillä sähkön tuotantoon tarvittava lämpötila tulisi olla vähintään 100–150 °C suurusluokkaa (Aghahosseini & Breyer 2020).

Suomen kallioperä koostuu enimmäkseen erilaisista graniitti- ja gneissilajeista, joilla on erittäin pieni permeabiliteetti (Arola, 2019). Tämän vuoksi Suomen kallioperässä nesteet eivät pääse luonnostaan juurikaan virtaamaan kallioperän läpi. Siksi Suomessa onkin tarpeen käyttää EGS-voimalaitosten kaltaisia ratkaisuja, joissa kallioperää halkaistaan keinotekoisesti permeabiliteetin kasvattamiseksi.

Kokonaisuudessaan Suomen geologiset olosuhteet ovat haastavat geotermisen energian hyödyntämiselle, mutta onnistuessaan sen tasainen uusiutuvan lämpöenergian tuotanto olisi Suomen kaltaiselle valtiolle hyödyllistä. Siksi tulevaisuudessa olisikin tärkeää paikantaa parhaat sijainnit geotermisille laitoksille, jotta hankkeiden onnistuminen olisi todennäköisempää. Erityisesti sijainnit, joissa esiintyy valmiita halkeamia ja virtauksia kallioperässä parantavat tuotantomahdollisuuksia, kuten Ranskan laitoksilla luvussa 4.

### 5.3 Kustannukset

Arola (2019) arvioi tutkimuksessaan geotermisen laitoksen kustannuksia Suomessa. Hänen laskelmiensa mukaan 7 km syvän kaivon poraaminen maksaisi noin 24 miljoonaa euroa. Kuten aiemmin todettiin, tähän syvyyteen olisi Suomessa päästävä tarpeeksi suuren lämpötilan saavuttamiseksi. Lisäksi EGS-voimalaitosta varten kaivoja tulisi olla vähintään kaksi, joten porauskustannukset tulee niin ikään kaksinkertaistaa.

Arolan tutkimus käsittelee kaukolämpökäyttöön rakennettavaa laitosta, jollaiseksi myös Otaniemen pilottihanke on tarkoitettu. Tämän työn kolmannessa luvussa kerrottiin, että porauskustannukset olisivat yli puolet koko hankkeen kustannuksista. Tämä pitääkin paikkansa sähköä tuottavien laitosten kohdalla, joita suurin osa käytössä olevista laitoksista on. Kaukolämpölaitoksen (10 MW) rakennuskustannukset ovat Arolan mukaan kuitenkin vain noin 1,8 miljoonaa euroa, joka on alle 4 % kaivojen porauskustannuksista.

Kuten aiemmin todettiin, Suomen haastavissa geologisissa olosuhteissa on tärkeää löytää geotermisen energian hyödyntämiselle sopiva sijainti. Tämän tukemiseen myönnettäviä apurahoja käsiteltiin luvussa 3, jossa niitä pidettiin myös kohdevaltiolle soveltuvana tukikeinona. Apuraha geotermisesti otollisten alueiden kartoittamiseksi olisi Suomessa

tärkeä seuraava askel geotermisen energiantuotannon lisäämiseksi. Muina tärkeinä valtion ohjauskeinoina kolmannessa luvussa mainittiin syöttötariffit, hiilidioksidipäästöjen verotus sekä päästökauppa. Myös näitä keinoja olisi hyvä saada käyttöön Suomessa investointiriskin pienentämiseksi sekä houkuttelevuuden lisäämiseksi fossiilisten polttoaineiden käyttöä vastaan.

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Suomessa on edellytykset hyödyntää geotermistä energiaa lämmitystarpeisiin, mutta suurimman riskin ja kustannuserän muodostaa kaivojen poraaminen. Poraamalla täytyy Suomessa päästä muun maailman mittakaavassa poikkeuksellisen syvälle, jotta taloudellisesti kannattavat lämpötilat saavutetaan. Syvä poraaminen on kallista ja sen onnistuminen ei ole varmaa, joten investointiriskin alentaminen lainsäädännöllisin keinoin sekä rahallisin tuin on tärkeää hankkeiden läpiviemiseksi.

Lisätutkimusta aiheeseen liittyen tarvitaan Suomessa kaikilta geotermisen energian osa-alueilta. Erityisesti Otaniemen pilottihankkeen tuottama tutkimus- ja mittaustieto on arvokasta soveltuvuuden arvioinnissa. Myös ympäristövaikutuksiin, sopiviin alueisiin ja lainsäädäntöön liittyviä asioita on tarkasteltava geotermisten laitosten näkökulmasta, ja tukea näitä selvityksiä taloudellisesti.

Otaniemen pilottihankkeen lisäksi on tärkeää tarkastella myös muualla toteutuneiden hankkeiden tuloksia sekä niissä tehtyjä ratkaisuja. Esimerkiksi Ranskan laitosten tapaiset maanalaiset tuotantokaivopumput sekä Ferraran yhdistelmälaitos jätteenpolttolaitoksen kanssa voisivat olla potentiaalisia vaihtoehtoja myös Suomessa.

Fossiilisten polttoaineiden aseman odotetaan heikkenevän tulevaisuudessa, kun niiden käyttöä pyritään vähentämään suurten kasvihuonekaasupäästöjen vuoksi. Lisäksi niiden hinta nousee nykyisten esiintymien ehtyessä, mikä vahvistaa osaltaan tätä kehitystä. Geoterminen energia on potentiaalinen uusiutuvan energian vaihtoehto korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Sen suurin etu muihin uusiutuviin energialähteisiin verrattuna on kyky tuottaa tasainen määrä energiaa ympäri vuorokauden ja vuoden. Poraustekniikan kehittyessä tulevaisuudessa geotermisten hankkeiden onnistuminen on todennäköisempää ja niistä tulee taloudellisesti kannattavampia.

# LÄHTEET

- Aghahosseini, A. & Breyer, C. 2020, "From hot rock to useful energy: A global estimate of enhanced geothermal systems potential", *Applied Energy*, vol. 279, 115769.
- Arola, T. 2019, "Deep geothermal energy utilisation in Finland – total madness or possibility for successful business", *Exploration & Development of Deep Geothermal Systems – CAS DEEGEOSYS*, vol. 4, s. 1–17.
- Blöcher, G., Reinsch, T., Henniges, J., Milsch, H., Regenspurg, S., Kummerow, J., Francke, H., Kranz, S., Saadat, A., Zimmermann, G. & Huenges, E. 2016, "Hydraulic history and current state of the deep geothermal reservoir Groß Schönebeck", *Geothermics*, vol. 63, pp. 27-43.
- Clauser, C. & Ewert, M. 2018, "The renewables cost challenge: Levelized cost of geothermal electric energy compared to other sources of primary energy – Review and case study", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3683-3693.
- Evans, A., Strezov, V. & Evans, T.J. 2009, "Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 5, pp. 1082-1088.
- Glaas, C., Vidal, J. & Genter, A. 2021, "Structural characterization of naturally fractured geothermal reservoirs in the central Upper Rhine Graben", *Journal of Structural Geology*, vol. 148, 104370.
- Kallio, J. 2019, "Geothermal Energy Use, Country Update for Finland", *European Geothermal Congress 2019*, s. 1–6.
- Kumari, W.G.P. & Ranjith, P.G. 2019, "Sustainable development of enhanced geothermal systems based on geotechnical research – A review", *Earth-Science Reviews*, vol. 199, pp. 102955.
- Li, K., Bian, H., Liu, C., Zhang, D. & Yang, Y. 2015, "Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 1464-1474.
- Lu, S. 2018, "A global review of enhanced geothermal system (EGS)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 2902-2921.
- Majer, E.L., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B. & Asanuma, H. 2007, "Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems", *Geothermics*, vol. 36, no. 3, pp. 185-222.
- Manente, G., Lazzaretto, A., Molinari, I. & Bronzini, F. 2019, "Optimization of the hydraulic performance and integration of a heat storage in the geothermal and waste-to-energy district heating system of Ferrara", *Journal of Cleaner Production*, vol. 230, pp. 869-887.
- Olasolo, P., Juárez, M.C., Morales, M.P., D'Amico, S. & Liarte, I.A. 2016, "Enhanced geothermal systems (EGS): A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 133-144.
- Pan, S., Gao, M., Shah, K.J., Zheng, J., Pei, S. & Chiang, P. 2019, "Establishment of enhanced geothermal energy utilization plans: Barriers and strategies", *Renewable Energy*, vol. 132, pp. 19-32.
- Pratiwi, A., Ravier, G. & Genter, A. 2018, "Life-cycle climate-change impact assessment of enhanced geothermal system plants in the Upper Rhine Valley", *Geothermics*, vol. 75, pp. 26-39.

- Sanjuan, B., Scheiber, J., Gal, F., Touzelet, S., Genter, A. & Villadangos, G. 2016, "Inter-well chemical tracer testing at the Rittershoffen geothermal site (Alsace, France)", *European Geothermal Congress 2016*, pp. 1-7.
- Soltani, M., Moradi Kashkooli, F., Souri, M., Rafiei, B., Jabarifar, M., Gharali, K. & Nathwani, J.S. 2021, "Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 140, 110750.
- Song, W., Wang, C., Du, Y., Shen, B., Chen, S. & Jiang, Y. 2020, "Comparative analysis on the heat transfer efficiency of supercritical CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in the production well of enhanced geothermal system", *Energy*, vol. 205, 118071.
- St1, Puhdasta geolämpöä maan syvyyksistä, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.11.2021): <https://www.st1.fi/geolampo>
- Stauffacher, M., Muggli, N., Scolobig, A. & Moser, C. 2015, "Framing deep geothermal energy in mass media: the case of Switzerland", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 98, pp. 60-70.
- Vidal, J. & Genter, A. 2018, "Overview of naturally permeable fractured reservoirs in the central and southern Upper Rhine Graben: Insights from geothermal wells", *Geothermics*, vol. 74, pp. 57-73.
- Yost, K., Valentin, A. & Einstein, H.H. 2015, "Estimating cost and time of wellbore drilling for Engineered Geothermal Systems (EGS) – Considering uncertainties", *Geothermics*, vol. 53, pp. 85-99.